

**ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ**  
ΠΤΥΧΙΑΚΕΣ & ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ  
ΕΡΓΑΣΙΕΣ







# ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ

## ΠΤΥΧΙΑΚΕΣ & ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Τόμος 10

Εκδίδεται μία φορά το χρόνο από το:

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών,  
Πανεπιστημιούπολη, 15784 Αθήνα

Τηλ: 210 - 727 5190, Φαξ: 210 - 727 5333  
email: [library@di.uoa.gr](mailto:library@di.uoa.gr), url: <http://www.di.uoa.gr/lib>

*Επιμέλεια έκδοσης:*

**Επιτροπή Ερευνητικών και Αναπτυξιακών Δραστηριοτήτων**

Θ. Θεοχάρης (υπεύθυνος έκδοσης), Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Η. Μανωλάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

*Γραφιστική επιμέλεια - Επιμέλεια κειμένων:*

Λ. Χαλάτση, Γραφείο Προβολής, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

**ISSN 1792-8826**

Εξώφυλλο: Από τη συλλογή Stockspace του [Marius Watz](#).

*Ο Marius Watz είναι ένας καλλιτέχνης που εργάζεται πάνω σε παραγωγικά συστήματα (generative systems) για τη δημιουργία αφαιρετικών απεικονίσεων-έργων. Αυτοδίδακτος, εγκατέλειψε τις σπουδές του στην Πληροφορική για να συνεχίσει το εικαστικό του έργο βασισμένο σε παραμετρικές μεθόδους. Είναι γνωστός για τη χρήση τολμηρών χρωμάτων και γεωμετρικά έντονων συνθέσεων.*

# Περιεχόμενα

Πρόλογος..... 5

**ΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ..... 6**

Βασίλειος Χ. Αγγελόπουλος, Παύλος Π. Καφούρης

Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Αλγορίθμων Συμπερασμού  
κατά Bayes κατάλληλων για Φασματικό Διαχωρισμό ..... 7

Μαριάνθη Σ. Γριζιώτη

Digital Magnetic Poetry: Ένα Διαδραστικό Παιχνίδι  
Αναγνώρισης Κίνησης και Χειρονομιών..... 19

Γεώργιος Β. Δήμος

Εξαγωγή Στοιχείων Συνάντησης από Κείμενο σε email ..... 31

Αθανάσιος Ε. Μπαλμπακάκης

Γραφο-θεωρητική Μελέτη της Απόδοσης  
σε Χρονικά Εξελισσόμενα Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα Κορμού ..... 45

Αντωνία Δ. Σαραβάνου

Σύνοψη Ανασκοπήσεων Προϊόντος..... 59

Δημήτριος Π. Σγούρδος

Εξακρίβωση Παραμέτρων Διδιάστατων Μορφοκλασματικών  
Συναρτήσεων Παρεμβολής χρησιμοποιώντας Περιβάλλοντες Όγκους..... 74

Ευάγγελος Ι. Τζέμης

Αξιολόγηση της Απόδοσης του Kinect σε 2D και 3D  
Διαδικασίες Κατάδειξης ..... 88

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ..... 104**

Γιώργος Ν. Γαρμπής

Παρακολούθηση Πυρκαγιών σε Πραγματικό Χρόνο  
χρησιμοποιώντας Τεχνολογίες Σηματολογικού Ιστού και  
Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων ..... 105

Γεώργιος Κ. Κόλλιας, Μαρία Γ. Παπαδάκη

Μελέτη της Ανθεκτικότητας των Συστημάτων Υποβοήθησης  
Στάθμευσης σε Κακόβουλες Συμπεριφορές Οχημάτων ..... 118

Μιχαήλ Ι. Σιούτης

Έλεγχος της Συνέπειας Δικτύων Ποιοτικών Χωρικών Περιορισμών  
με χρήση Χορδικών Γράφων ..... 135

Δημήτριος Ε. Χριστοδούλου

Υπολογιστική Μοντελοποίηση της Δυναμικής του Μεταγραφικού  
Μηχανισμού της Ιντερφερόνης - Β (IFNβ) μέσω της  
Συγκρότησης του Ενισχυοσώματος..... 148



# Πρόλογος

Ο τόμος αυτός περιλαμβάνει περιλήψεις των καλύτερων διπλωματικών και πτυχιακών εργασιών που εκπονήθηκαν στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών κατά το διάστημα **01/01/2012 - 31/12/2012**. Πρόκειται για τον **10<sup>ο</sup> τόμο** στη σειρά αυτή. Στόχος του θεσμού είναι η ενθάρρυνση της δημιουργικής προσπάθειας και η προβολή των πρωτότυπων εργασιών των φοιτητών του Τμήματος.

Η έκδοση αυτή είναι ψηφιακή και έχει δικό της ISSN. Αναρτάται στην επίσημη ιστοσελίδα του Τμήματος και έτσι, εκτός από τη μείωση της δαπάνης κατά την τρέχουσα περίοδο οικονομικής κρίσης, έχει και μεγαλύτερη προσβασιμότητα. Για το στόχο αυτό, σημαντική ήταν η συμβολή της Λήδας Χαλάτση που επιμελήθηκε και φέτος την ψηφιακή έκδοση και πέτυχε μια ελκυστική ποιότητα παρουσίασης, ενώ βελτίωσε και την ομοιογένεια των κειμένων.

Η συμμετοχή των φοιτητών ήταν και φέτος πολύ ικανοποιητική. Η στάθμη των εργασιών που εγκρίθηκαν (αλλά και αυτών που υποβλήθηκαν) ήταν υψηλή και τα γνωστικά αντικείμενα που πραγματεύονται οι εργασίες καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό ολόκληρη την περιοχή της Πληροφορικής και των Τηλεπικοινωνιών.

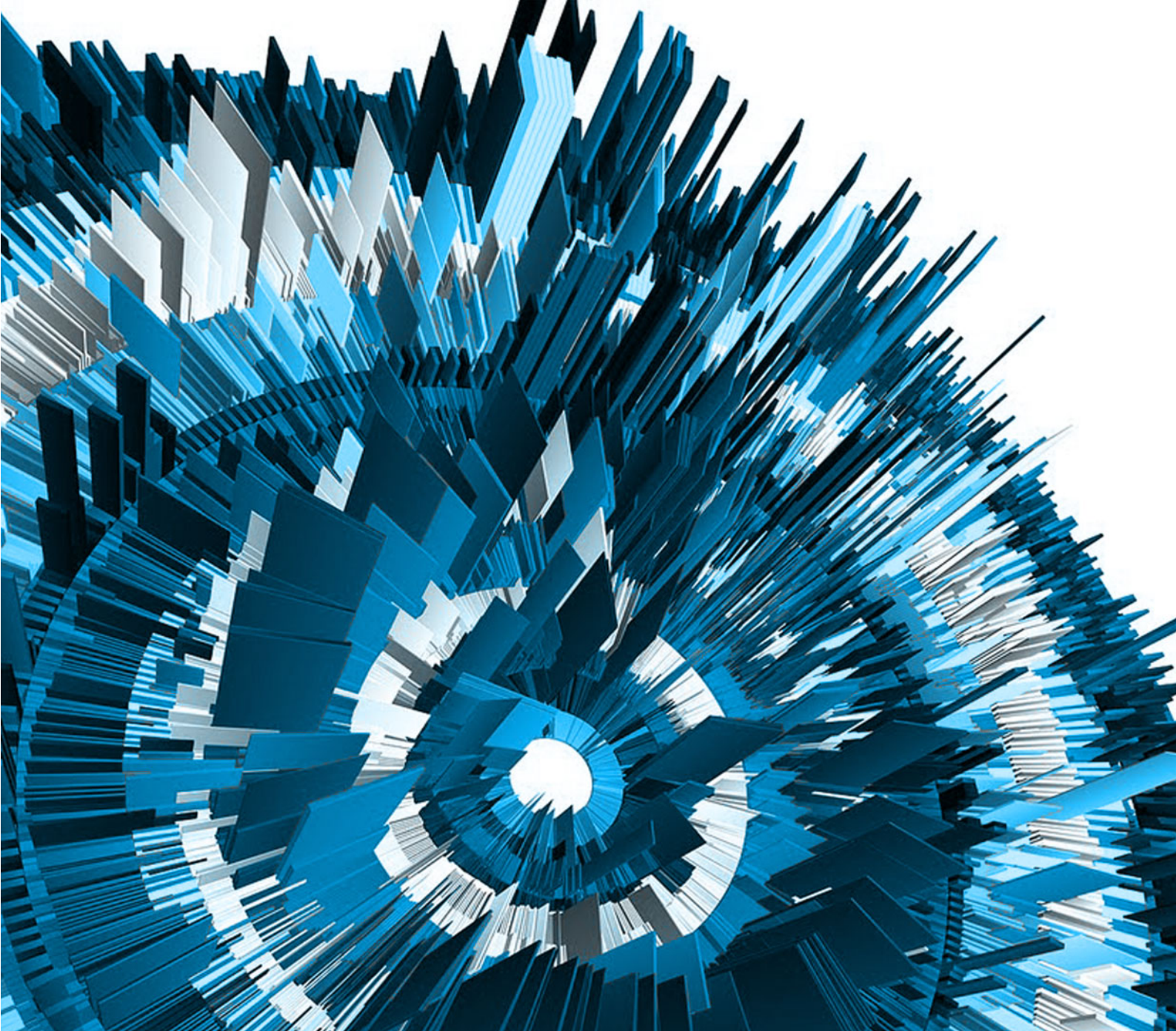
Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους φοιτητές για το χρόνο που αφιέρωσαν για να παρουσιάσουν τη δουλειά τους στα πλαίσια αυτού του θεσμού και να τους συγχαρούμε για την ποιότητα των εργασιών τους. Ελπίζουμε η διαδικασία αυτή να προσέφερε και στους ίδιους μια εμπειρία που θα τους βοηθήσει στη συνέχεια των σπουδών τους ή της επαγγελματικής τους σταδιοδρομίας.

Η Επιτροπή Ερευνητικών και Αναπτυξιακών Δραστηριοτήτων

Θ. Θεοχάρης (υπεύθυνος έκδοσης), Η. Μανωλάκος

Αθήνα, Ιούνιος 2013





# ΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ



Βασίλειος Χ. Αγγελόπουλος  
billagelo@gmail.com

Παύλος Π. Καφούρης  
p.kafouris@hotmail.com

# Ανάπτυξη και Αξιολόγηση Αλγορίθμων Συμπερασμού κατά Bayes κατάλληλων για Φασματικό Διαχωρισμό

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Επικεντρωνόμαστε στο πρόβλημα του ημί-επιβλεπόμενου υπέρ-φασματικού διαχωρισμού, όπου, γνωρίζοντας τις φασματικές υπογραφές κάποιων υλικών, στόχος κατά την ανάλυση ενός συγκεκριμένου εικονοστοιχείου είναι ο προσδιορισμός των υλικών που το συνθέτουν, αλλά και του διανύσματος που περιέχει τα ποσοστά αυτών των υλικών στη σύνθεση. Υιοθετώντας το γραμμικό μοντέλο μίξης, αναπτύσσεται μία ιεραρχική προσέγγιση κατά Bayes κατάλληλη γι' αυτόν το διαχωρισμό και με βάση αυτή εξάγεται ένας νέος επαναληπτικός αλγόριθμος συμπερασμού κατά Bayes, με όνομα BI-ICE-single, και συστήνεται μια νέα τεχνική, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν της την πιθανή χωρική συσχέτιση γειτονικών εικονοστοιχείων.

Λέξεις κλειδιά: Υπερφασματική απεικόνιση, ιεραρχικό Bayesian μοντέλο, αραιός ημί-επιβλεπόμενος φασματικός διαχωρισμός, συμπερασμός κατά Bayes, φασματική υπογραφή.

## Επιβλέποντες

Θεοδωρίδης Σέργιος, Καθηγητής | Κουτρούμπας Κωνσταντίνος, Κύριος Ερευνητής  
ΕΑΑ | Ροντογιάννης Αθανάσιος, Κύριος Ερευνητής ΕΑΑ

## 1. Εισαγωγή

### 1.1. Φασματικός διαχωρισμός

Σε πολλές μοντέρνες εφαρμογές, μέσω της απεικονιστικής φασματοσκοπίας, προκύπτουν δεδομένα από φάσματα αντικειμένων ή σκηνών από μεγάλες περιοχές. Στην απεικόνιση με υπερφασματικούς αισθητήρες η ζώνη συχνοτήτων διαιρείται σε εκατοντάδες συνεχόμενες στενές ζώνες. Στις εικόνες, που δημιουργούνται, είναι αρκετά συνηθισμένο τα εικονοστοιχεία να απεικονίζουν περισσότερα από ένα διαφορετικά υλικά. Το πρόβλημα αυτό καθιστά αναγκαίο τον φασματικό διαχωρισμό, όπου το μετρούμενο φάσμα ενός μεικτού εικονοστοιχείου αναλύεται στα συστατικά φάσματα των υλικών που το συνθέτουν, προσδιορίζοντας, συνήθως, και τα ποσοστά στα οποία παρουσιάζεται το καθένα.

Μία κατηγορία υπερφασματικών μεθόδων είναι οι ημί-επιβλεπόμενες μέθοδοι, όπως και το μοντέλο της παρούσας εργασίας. Λόγω της φύσης του προβλήματος, τα ποσοστά συμμετοχής των υλικών στη δημιουργία ενός εικονοστοιχείου, θα πρέπει να είναι μη αρνητικοί αριθμοί και να αθροίζουν στη μονάδα. Κάτω από αυτούς τους περιορισμούς, ο φασματικός διαχωρισμός διατυπώνεται ως ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, αντιμετωπίσιμο με Bayesian μεθόδους.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό, που συναντάται εδώ, είναι αυτό της αραιότητας του διανύσματος των ποσοστών συμμετοχής των υλικών, απόρροια του γεγονότος ότι σε ένα εικονοστοιχείο απεικονίζεται συνήθως ένας μικρός αριθμός, σε σχέση με το συνολικό αριθμό των εμφανιζόμενων υλικών. Έτσι, επιτρέπεται η αξιοποίηση τεχνικών αραιής αναπαράστασης σήματος (compressive sensing), π.χ. [3]-[4].

### 1.2. Προτεινόμενη προσέγγιση κατά Bayes

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται μία ιεραρχική προσέγγιση κατά Bayes για αυτό το πρόβλημα, που μοντελοποιεί τις ιδιότητες που περιγράφηκαν, μέσω κατάλληλα ορισμένων παραμέτρων, στις οποίες ανατίθενται κατάλληλες εκ των προτέρων πυκνότητες πιθανότητας. Μέσω κατάλληλης μοντελοποίησης αυτής της προσέγγισης, αναπτύσσεται ο αλγόριθμος BI-ICE-single με σκοπό την αραιή εκτίμηση του ζητούμενου διανύσματος ποσοστών. Επίσης, προτείνεται μια νέα τεχνική, η οποία με την χρήση της επιπλέον πληροφορίας στοχεύει στην εκτίμηση, λαμβάνοντας υπ' όψιν την πιθανή χωρική συσχέτιση μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων της εικόνας.



### 1.3. Πειραματικά αποτελέσματα

Ο BI-ICE-single είναι υπολογιστικά αποδοτικός, αφού εκτελώντας ελάχιστες επαναλήψεις καταλήγει σε εκτίμηση για τα ποσοστά των υλικών που συνθέτουν το εκάστοτε εικονοστοιχείο, εντοπίζοντας ποιά από αυτά είναι παρόντα και ποιά όχι (ποσοστά κοντά στο μηδέν). Θα πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι ο αλγόριθμος BI-ICE-single παρουσιάζει ελαφρά υποδεέστερη συμπεριφορά από τον BI-ICE στην περίπτωση υψηλής συσχέτισης των φασματικών υπογραφών των υλικών. Αντίθετα, οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν εξαιρετική συμπεριφορά σε περίπτωση χαμηλού βαθμού συσχέτισης των φασματικών υπογραφών.

Τέλος, πειραματικά φαίνεται ότι η νέα προτεινόμενη τεχνική επεξεργασίας των εικονοστοιχείων οδηγεί σε ταχύτερη σύγκλιση και, κατά συνέπεια, καθιστά πιο αποδοτική υπολογιστικά τη διαδικασία διαχωρισμού, χωρίς να υστερεί στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

## 2. Ιεραρχικό μοντέλο κατά Bayes

### 2.1. Ορισμοί

Στην παρούσα εργασία, με  $\vec{y}$ , συμβολίζεται το  $M$  - διάστατο διάνυσμα, της φασματική υπογραφή ενός εικονοστοιχείου μίας υπερφασματικής εικόνας, όπου  $M$  ο αριθμός των φασματικών ζωνών. Επίσης,  $\Phi = [\vec{\varphi}_1, \vec{\varphi}_2, \dots, \vec{\varphi}_N]$  είναι ο  $M \times N$  πίνακας υπογραφών του προβλήματος,  $M > N$ , όπου  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των διαφορετικών υλικών. Τέλος, με  $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$  συμβολίζουμε το  $N$  - διάστατο διάνυσμα ποσοστών που σχετίζεται με το  $\vec{y}$ .

Ο προσθετικός θόρυβος  $\vec{n}$  είναι ένα τυχαίο διάνυσμα, που θεωρούμε ότι ακολουθεί κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και με ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανομημένα στοιχεία. Τέλος, με  $\beta$  συμβολίζουμε το αντίστροφο της διασποράς (ακρίβεια) του θορύβου.

### 2.2. Περιγραφή του μοντέλου

Σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο μίξης, οι ποσότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως συσχετίζονται με την παρακάτω σχέση:

$$\vec{y} = \Phi \vec{w} + \vec{n}. \quad (1)$$

Εδώ ο πίνακας  $\Phi$  θεωρείται γνωστός. Όλες οι άγνωστες ποσότητες θεωρούνται ως τυχαίες μεταβλητές, καθεμία απ' τις οποίες μοντελοποιείται από μία εκ των προτέρων κατανομή πιθανότητας. Πιο συγκεκριμένα, εξαιτίας της μη αρνητικότητας των στοιχείων του  $w$ , χρησιμοποιείται μία κολοβωμένη μη αρνητική κανονική κατανομή για το  $w$ .

Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο που ορίστηκε στην (1) και την ιδιότητα του προσθετικού Gaussian θορύβου, η συνάρτηση πιθανοφάνειας του  $\vec{y}$  εκφράζεται ως ακολούθως:

$$p(\vec{y} | \vec{w}, \beta) = N(\vec{y} | \Phi \vec{w}, \beta^{-1} \mathbf{I}_M) = (2\pi)^{-\frac{M}{2}} \beta^{\frac{M}{2}} \exp\left[-\frac{\beta}{2} \|\vec{y} - \Phi \vec{w}\|_2^2\right] \quad (2)$$

Για τη μοντελοποίηση της αραιότητας χρησιμοποιείται μια Λαπλασιανή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Μία βασική ιδιότητα της Λαπλασιανής κατανομής, [7], είναι πως μπορεί να εκφραστεί σαν μία σταθμισμένη μίξη κανονικών κατανομών, με τους παράγοντες στάθμισης να ακολουθούν εκθετική πυκνότητα πιθανότητας, μέσω της σχέσης:

$$\frac{\lambda}{2} \exp[-\lambda |w_i|] = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi s}} \exp\left[-\frac{w_i^2}{2s}\right] \frac{\lambda^2}{2} \exp\left[-\frac{\lambda^2 s}{2}\right] ds, \quad \lambda > 0 \quad (3)$$

Η (3) υποδεικνύει ότι η εκ των προτέρων Λαπλασιανή κατανομή ισοδυναμεί με ένα ιεραρχικό Bayesian μοντέλο δύο επιπέδων, όπου το  $\vec{w}$  ακολουθεί κανονική κατανομή (1ο επίπεδο), η διακύμανση της οποίας ακολουθεί εκθετική κατανομή (2ο επίπεδο). Κύριο πλεονέκτημα της διατύπωσης αυτής είναι ότι διατηρεί τη συζυγία των εκ των προτέρων και εκ των υστέρων κατανομών των εμπλεκόμενων παραμέτρων.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μη αρνητικότητα των συνιστωσών του διανύσματος  $\vec{w}$ , το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί μία κολοβωμένη κανονική κατανομή στο μη αρνητικό orthant<sup>1</sup> του  $R^N$ . Υποθέτοντας ότι όλα τα  $w_i$  είναι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα κατανομημένα και ότι τα  $\gamma_i$  (κανονικοποιημένα από το  $\beta$ ) είναι διακυμάνσεις των  $w_i$ , η εκ των προτέρων κατανομή του διανύσματος

1. Το μη αρνητικό orthant είναι η περιοχή του  $R^N$ , που περιέχει όλα τα σημεία, των οποίων όλες οι συνιστώσες είναι μη αρνητικές.



$\vec{w}$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$p(\vec{w} | \vec{\gamma}, \beta) = N_{R_+^N}(\vec{w} | 0, \beta^{-1} \Lambda^{-1}), \quad (4)$$

όπου  $\vec{\gamma} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N]$  είναι το  $N \times 1$  διαστάσεων διάνυσμα που περιέχει τις υπέρ-παραμέτρους,  $\gamma_i \geq 0, i=1, 2, \dots, N$  (διασπορές των  $w_i$ ) και  $\Lambda$  είναι ο  $N \times N$  διαγώνιος πίνακας, με  $\Lambda^{-1} = \text{diag}(\vec{\gamma})$ .

Έχοντας ορίσει την κολοβωμένη κανονική κατανομή για τα  $w_i$ , θα ορίσουμε τώρα την εκθετική κατανομή για τα  $\gamma_i$  στο πνεύμα της (3). Η εκθετική εκ των προτέρων κατανομή πιθανότητας του  $\gamma_i$  ορίζεται ως:

$$p(\gamma_i | \lambda) = \Gamma\left(\gamma_i | 1, \frac{\lambda}{2}\right) = \frac{\lambda}{2} \exp\left[-\frac{\lambda}{2} \gamma_i\right], \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (5)$$

όπου το  $\lambda \geq 0$  είναι μία υπέρ-παραμέτρος ελέγχου της αραιότητας.

Η διαφορά του παρόντος μοντέλου σε σχέση με αυτό που περιγράφεται στο [1] είναι ότι, με σκοπό το σχηματισμό ενός κατά Bayes ιεραρχικού μοντέλου, ανάλογου του προσαρμοστικού Lasso κριτηρίου, που προτείνεται στο [6], στο [1] υπάρχει ένα διακριτό  $\lambda_i$  που σχετίζεται με κάθε  $\gamma_i$ , ενώ στο παρόν μοντέλο υπάρχει μόνο ένα  $\lambda$  που σχετίζεται με όλα τα  $\gamma_i$ . Με την παραδοχή ότι όλα τα  $\gamma_i$  είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, η από κοινού κατανομή του  $\vec{\gamma}$  μπορεί να γραφεί ως

$$p(\vec{\gamma} | \lambda) = \prod_{i=1}^N \left[ \frac{\lambda}{2} \exp\left[-\frac{\lambda}{2} \gamma_i\right] \right] = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^N \exp\left[-\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^N \gamma_i\right]. \quad (6)$$

Τα δύο πρώτα στάδια του Bayesian μοντέλου, που συνοψίζονται στις σχέσεις (4) και (6), δίνουν μία μη αρνητική κολοβωμένη εκ των προτέρων Λαπλασιανή κατανομή που προωθεί την έννοια της αραιότητας.

Συνήθως, η παράμετρος  $\lambda$  αντικατοπτρίζει μία πρότερη γνώση για το πρόβλημα και μπορεί, είτε να οριστεί χειροκίνητα, είτε να θεωρηθεί ως τυχαία μεταβλητή. Επιλέγοντας τη δεύτερη εναλλακτική, υποθέτουμε ότι η  $\lambda$  ακολουθεί μία εκ των προτέρων Γάμμα κατανομή, όπου

$$p(\lambda | r, \delta) = \Gamma(\lambda | r, \delta) = \frac{\delta^r}{\Gamma(r)} \lambda^{r-1} \exp[-\delta\lambda], \quad (7)$$

όπου  $r$  και  $\delta$  είναι οι υπέρ-παράμετροι της κατανομής, με  $r, \delta \geq 0$ .

### 3. Προτεινόμενος αλγόριθμος συμπερασμού

#### 3.1. Υπό συνθήκη εκ των υστέρων κατανομές

Στο εδάφιο αυτό, θα οριστούν οι υπό συνθήκη εκ των υστέρων κατανομές των παραμέτρων του μοντέλου  $\vec{w}, \vec{\gamma}, \lambda$  και  $\beta$ . Ξεκινώντας με το  $\vec{w}$ , μπορεί να αποδειχθεί, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2) και (4), ότι η εκ των υστέρων υπό συνθήκη πυκνότητα πιθανότητάς του, μοντελοποιείται από μία κολοβωμένη πολυδιάστατη Gaussian κατανομή στο  $R_+^N$ , δηλαδή

$$p(\vec{w} | \vec{y}, \vec{\gamma}, \lambda, \beta) = N_{R_+^N}(\vec{w} | \vec{\mu}, \Sigma), \quad (8)$$

όπου  $\vec{\mu} = \beta \Sigma \Phi^T \vec{y}$  και  $\Sigma = \beta^{-1} [\Phi^T \Phi + \Lambda]^{-1}$ .

Όσον αφορά την εκ των υστέρων υπό συνθήκη κατανομή για την παράμετρο  $\beta$ , χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2), (4) και (5), αποδεικνύεται ότι μοντελοποιείται από μία Γάμμα κατανομή:

$$p(\beta | \vec{y}, \vec{w}, \vec{\gamma}, \lambda) = \Gamma\left(\beta \left| \frac{M+N}{2} + \kappa, \frac{1}{2} \|\vec{y} - \Phi \vec{w}\|_2^2 + \theta + \frac{1}{2} \vec{w}^T \Lambda \vec{w} \right.\right). \quad (9)$$

Η υπό συνθήκη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της παραμέτρου  $\gamma_i$  μοντελοποιείται από μία γενικευμένη αντίστροφη Gaussian κατανομή, η οποία, μέσω των σχέσεων (4) και (5), υπολογίζεται ως:

$$p(\gamma_i | \vec{y}, w_i, \lambda, \beta) = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \gamma_i^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{\beta w_i^2}{2 \gamma_i} - \frac{\lambda}{2} \gamma_i + \sqrt{\beta \lambda} |w_i|\right] \quad (10)$$

Τέλος, η εκ των υστέρων υπό συνθήκη κατανομή του  $\lambda$ , εκφράζεται, με τη βοήθεια των (6) και (7), ως ακολούθως:

$$p(\lambda | \vec{y}, \vec{w}, \vec{\gamma}, \beta) = \Gamma\left(\lambda \left| N+r, \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{2} + \delta \right.\right), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

### 3.2. Ο αλγόριθμος BI-ICE-single

Ο BI-ICE-single, όπως και ο BI-ICE, παράγει μία αραιή μη αρνητική εκτίμηση του διανύσματος ποσοστών, ενημερώνοντας σε κάθε επανάληψη τις εκ των υστέρων υπό συνθήκη μέσες τιμές, με βάση τις τρέχουσες εκτιμήσεις των υπολοίπων. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει ένα επαναληπτικό σχήμα μεταξύ των εκ των υστέρων υπό συνθήκη μέσων τιμών των  $\vec{w}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_i$  και  $\lambda$ . Έτσι, προκύπτει ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

```

Είσοδος  $\Phi, \vec{y}, \kappa, \theta, r, \delta$ 

Αρχικοποίηση  $\vec{\gamma}^{(0)} = 1, \lambda = 1, \beta^{(0)} = 0.01 \|\vec{y}\|_2$ 
for  $t=1, 2, \dots$  κάνε
    - Υπολόγισε το  $\vec{w}^{(t)}$  όπως παρακάτω
        Υπολόγισε τα  $\vec{\mu}^{(t)}, \Sigma^{(t)}$  με χρήση των (23), (24)
        Θέσε  $\vec{v}^{(0)} = \vec{\mu}^{(t)}$ 
        Υπολόγισε το  $u_1^{(1)} = E[p(u_1 | u_2^{(0)}, \dots, u_N^{(0)})]$  με χρήση των (31), (32) και (29)
        Υπολόγισε το  $u_2^{(1)} = E[p(u_2 | u_1^{(1)}, u_3^{(0)}, \dots, u_N^{(0)})]$  με χρήση των (31), (32) και (29)
         $\vdots$ 
        Υπολόγισε το  $u_N^{(1)} = E[p(u_N | u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, \dots, u_{N-1}^{(1)})]$  με χρήση των (31), (32) και (29)
        Θέσε  $\vec{w}^{(t)} = \vec{v}^{(1)}$ 
    - Υπολόγισε το  $\beta^{(t)} = E[p(\beta | \vec{y}, \vec{w}^{(t)}, \vec{\gamma}^{(t-1)}, \lambda^{(t-1)})]$  με χρήση της (34)
    - Υπολόγισε τα  $\gamma_i^{(t)} = E[p(\gamma_i | \vec{y}, w_i^{(t)}, \vec{\gamma}^{(t-1)}, \lambda^{(t-1)}, \beta^{(t)})]$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , με χρήση της (35)
    - Υπολόγισε το  $\lambda^{(t)} = E[p(\lambda | \vec{y}, \vec{w}^{(t)}, \vec{\gamma}^{(t)}, \beta^{(t)})]$  με χρήση της (36)
endfor
    
```

Πίνακας 1: Ο αλγόριθμος BI-ICE-single

## 4. Αξιοποίηση της χωρικής συσχέτισης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων

Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, τα εικονοστοιχεία εξετάζονται το ένα μετά το άλλο κατά γραμμές, και (για καθένα από αυτά) λαμβάνει χώρα φασματικός διαχωρισμός, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο BI-ICE-single<sup>2</sup>. Όσον αφορά το

2. Σημειώνεται ότι, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε άλλος αλγόριθμος φασματικού διαχωρισμού στη θέση του BI-ICE-single

πρώτο εικονοστοιχείο, η αρχικοποίηση των υπολοίπων παραμέτρων γίνεται όπως περιγράφεται στο [5] για τον BI-ICE. Έπειτα, για κάθε επόμενο εικονοστοιχείο αρχικοποιούνται, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τελικές τιμές που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας του προηγούμενου του ή του πρώτου της προηγούμενης γραμμής.

Η αξιοποίηση της πιθανής χωρικής συσχέτισης μεταξύ διαδοχικών εικονοστοιχείων αναμένεται να επιφέρει σημαντική εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος κατά την εφαρμογή του φασματικού διαχωρισμού. Η προτεινόμενη τεχνική συνοψίζεται στον Πίνακα 2.

```

Είσοδος  $\Phi, \mathbf{I}, m, n, \kappa, \theta, r, \delta$ 

Αρχικοποίηση  $\bar{w}^{(0)} = 1, \bar{\gamma}_{pr\_line} = 1, \lambda_{pr\_line} = 1, \beta_{pr\_line} = 0.01 \|\mathbf{I}_{1,1}\|_2$ 
for  $i=1, 2, \dots, n$  κάνε
    if  $i \neq 1$  τότε
         $\bar{w}^{(0)} = W_{i-1,1}$ 
    endif
     $\bar{\gamma}^{(0)} = \bar{\gamma}_{pr\_line}, \lambda^{(0)} = \lambda_{pr\_line}, \beta^{(0)} = \beta_{pr\_line}$ 
    for  $j=1, 2, \dots, m$  κάνε
         $\bar{y} = I_{i,j}$ 
        for  $t=1, 2, \dots$  κάνε
            -Υ πολόγισε το  $\bar{w}^{(t)}$  όπως παρακάτω
                Υ πολόγισε τα  $\bar{\mu}^{(t)}, \Sigma^{(t)}$  με χρήση των (23),(24)
                Θέσε  $\bar{v}^{(t)} = \bar{\mu}^{(t)}$ 
                Υ πολόγισε το  $u_1^{(t)} = E[p(u_1 | u_2^{(0)}, \dots, u_N^{(0)})]$  με χρήση των (31),(32) και (29)
                Υ πολόγισε το  $u_2^{(t)} = E[p(u_2 | u_1^{(1)}, u_3^{(0)}, \dots, u_N^{(0)})]$  με χρήση των (31),(32) και (29)
                ⋮
                Υ πολόγισε το  $u_N^{(t)} = E[p(u_N | u_1^{(1)}, u_2^{(1)}, \dots, u_{N-1}^{(1)})]$  με χρήση των (31),(32) και (29)
                Θέσε  $\bar{v}^{(t)} = \bar{v}^{(t)}$ 
            -Υ πολόγισε το  $\beta^{(t)} = E[p(\beta | \bar{y}, \bar{w}^{(t)}, \bar{\gamma}^{(t-1)}, \lambda^{(t-1)})]$  με χρήση της (34)
            -Υ πολόγισε τα  $\gamma_i^{(t)} = E[p(\gamma_i | \bar{y}, w_i^{(t)}, \bar{\gamma}^{(t-1)}, \lambda^{(t-1)}, \beta^{(t)})]$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , με χρήση της (35)
            -Υ πολόγισε το  $\lambda^{(t)} = E[p(\lambda | \bar{y}, \bar{w}^{(t)}, \bar{\gamma}^{(t)}, \beta^{(t)})]$  με χρήση της (36)
        endfor
         $W_{i,j} = w^{(end)}, w^{(0)} = w^{(end)}, \bar{\gamma}^{(0)} = \bar{\gamma}^{(end)}, \lambda^{(0)} = \lambda^{(end)}, \beta^{(0)} = \beta^{(end)}$ 
        if  $j = 1$  τότε
             $\bar{\gamma}_{pr\_line} = \bar{\gamma}^{(end)}, \lambda_{pr\_line} = \lambda^{(end)}, \beta_{pr\_line} = \beta^{(end)}$ 
        endif
    endfor
endfor
    
```

Πίνακας 2: Ο αλγόριθμος BI-ICE-single με αξιοποίηση της πληροφορίας της πιθανής χωρικής συσχέτισης



## 5. Αποτελέσματα πειραματικής μελέτης

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται ένα πολύ μικρό ποσοστό των πειραματικών μελετών που διεξήχθησαν για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου και της νέας τεχνικής.

### 5.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης σε συνθετικά δεδομένα

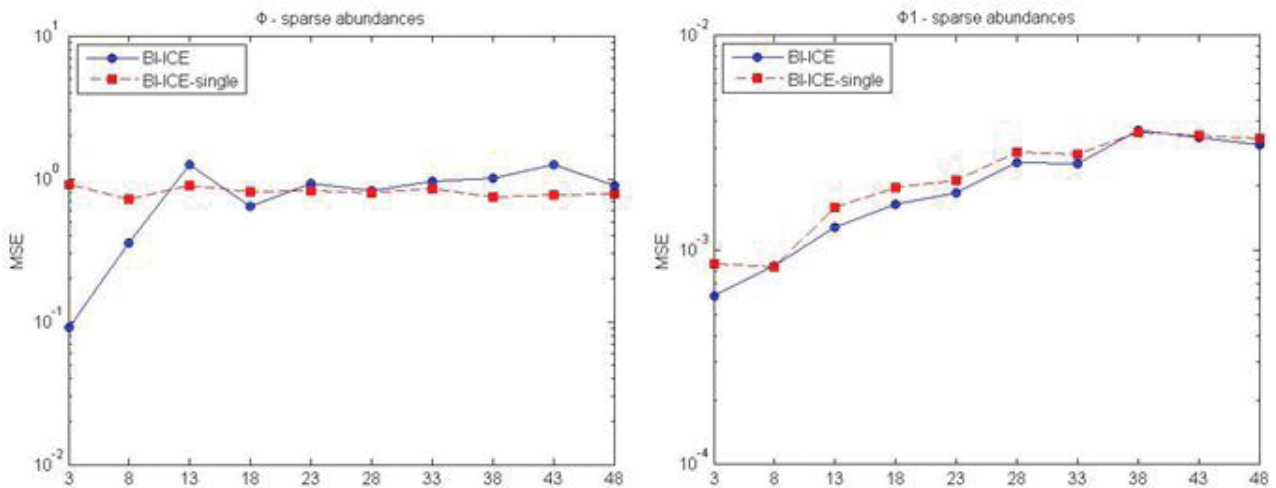
Ακολουθώντας τις πειραματικές ρυθμίσεις του [10], θεωρούμε δύο σύνολα φασματικών δεδομένων για το προσομοιωμένο υπερφασματικό σκηνικό:

- (a) το μητρώο  $\Phi$ , που περιέχει τις φασματικές υπογραφές από 220 συστατικά της φασματικής βιβλιοθήκης USGS, [8],
- (b) το μητρώο  $\Phi_1$ , που περιέχει στοιχεία με ψευδοτυχαίες τιμές, τα οποία ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Σε όλες τις προσομοιώσεις, θεωρείται ότι υπάρχει αλλοίωση από προσθετικό λευκό Gaussian θόρυβο και ως μέτρο σύγκρισης για την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων χρησιμοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

Στο Σχήμα 1 παριστάνονται γραφικά οι αντίστοιχες καμπύλες του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για τα δύο μητρώα και για διαφορετικούς βαθμούς αραιότητας που κυμαίνονται από 3 έως 48. Το σφάλμα εκτιμάται σε σχέση με το πραγματικό διάνυσμα ποσοστών  $\vec{w}$ , λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο τις μη μηδενικές συνιστώσες του (παρόντα υλικά), όσο και του εκτιμώμενου διανύσματος  $\vec{w}'$ . Σε όλες τις μετρήσεις έχει προστεθεί λευκός θόρυβος με λόγο σήματος-προς-θόρυβο 20 dB.

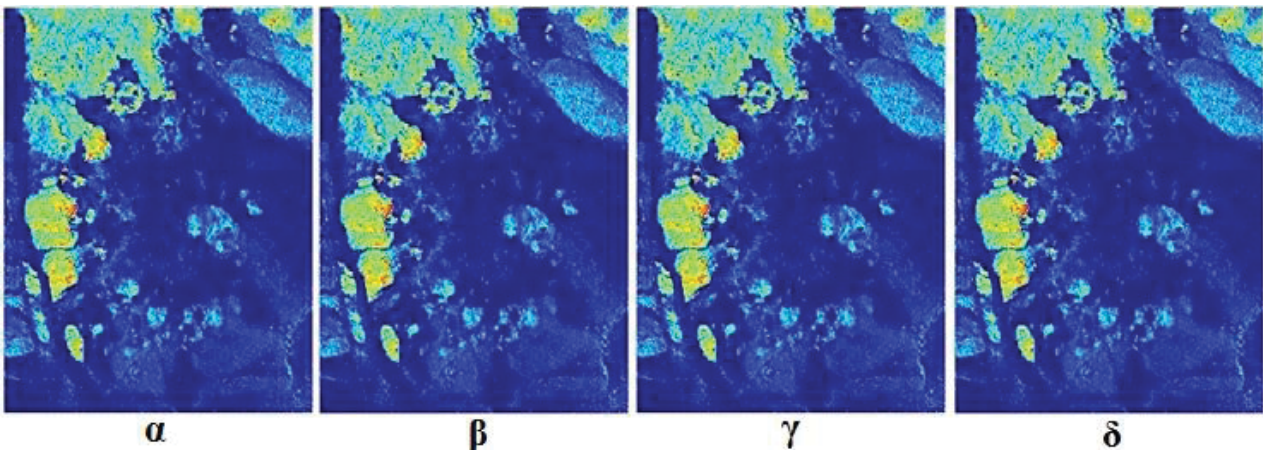
Από τη μελέτη των γραφημάτων προκύπτει ότι καθώς αυξάνεται ο βαθμός αραιότητας επέρχεται μικρή αύξηση και στο σφάλμα εκτίμησης για τους δύο αλγορίθμους. Το φαινόμενο γίνεται πιο αισθητό στον BI-ICE, ενώ στην περίπτωση του BI-ICE-single, παρά τη μικρή αύξηση σφάλματος, δεν παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις στην τιμή του, καθώς αυξάνεται ο βαθμός αραιότητας.



Σχήμα 1: Μέσο τετραγωνικό σφάλμα λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο τα υλικά που συνθέτουν το εικονοστοιχείο

## 5.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης σε πραγματικά δεδομένα

Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνικής που προτείνεται στην παράγραφο 4, πάνω σε πραγματικά δεδομένα. Τα πραγματικά δεδομένα συλλέχθηκαν από την πτήση του εναέριου απεικονιστικού φασματομέτρου ορατών/υπέρυθρων ακτινοβολιών (AVIRIS) πάνω από το ορυχείο Cuprite της Νεβάδα, το 1997 [9]. Χρησιμοποιώντας τις φασματικές υπογραφές των υλικών αυτών, οι δύο αλγόριθμοι παράγουν μια εικόνα για κάθε υλικό, η οποία απεικονίζει την εκτιμώμενη ποσοστιαία αναλογία του υλικού σε κάθε εικονοστοιχείο. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες αναλογίες ενός επιλεγμένου υλικού, που έχουν εκτιμηθεί με τη χρήση των αλγορίθμων BI-ICE χωρίς (α) και με (β) χωρική συσχέτιση, και BI-ICE-single χωρίς (γ) και με (δ) χωρική συσχέτιση, αντίστοιχα.



Εικόνα 1: Εκτιμώμενες τιμές ποσοστών για ένα επιλεγμένο υλικό

Από τις εικόνες αυτές, φαίνεται ότι οι δύο αλγόριθμοι, τόσο με χωρική συσχέτιση όσο και χωρίς χωρική συσχέτιση, οδηγούν σε αποτελέσματα που παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ομοιότητας, και είναι σε πλήρη συμφωνία με προηγούμενα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν δημοσιευθεί στο [2], όπως και με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το εδάφιο 5.1.

## 6. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάστηκε το πρόβλημα του ημί-επιβλεπόμενου υπερφασματικού διαχωρισμού, εκφραζόμενο με τη χρήση ενός ιεραρχικού μοντέλου κατά Bayes, όπου οι περιορισμοί και οι ιδιότητες των παραμέτρων του ενσωματώνονται επιλέγοντας κατάλληλες εκ των προτέρων κατανομές πιθανότητας για αυτές, ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η αραιότητα του διανύσματος των ποσοστών συμμετοχής των υλικών στη σύνθεση ενός εικονοστοιχείου, όσο και η μη αρνητικότητα του. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε ένας νέος επαναληπτικός αλγόριθμος συμπερασμού κατά Bayes, για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Η συμπεριφορά του αλγορίθμου αυτού είναι εξαιρετική, ιδίως όταν τα δεδομένα παρουσιάζουν χαμηλή συσχέτιση.

Επιπλέον, προτάθηκε μια νέα απλή τεχνική για την εκτίμηση των εν λόγω ποσοστών, η οποία λαμβάνει υπ' όψιν της την πιθανή χωρική συσχέτιση μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων. Η τεχνική αυτή παρουσιάζει την ίδια ακρίβεια στις εκτιμήσεις, σε σχέση με την περίπτωση όπου η πιθανή χωρική συσχέτιση δεν λαμβάνεται υπ' όψιν, οδηγώντας, ταυτόχρονα, σε σημαντική εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος.

## Αναφορές

- [1] K.E. Themelis, A.A. Rontogiannis, K.D. Koutroumbas, "A Novel Hierarchical Bayesian Approach for Sparse Semi-Supervised Hyperspectral Unmixing", IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 60, n0. 2, pp. 585-599, Feb. 2012.
- [2] J. M. Nascimento and J. M. Bioucas-Dias, "Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 43, pp. 898-910, Apr. 2005.

- [3] B. Efron, T. Hastie, I. Johnstone, and R. Tibshirani, “Least angle regression,” *Ann. Statist.*, vol. 32, pp. 407-499, Feb. 2002.
- [4] S. Ji, Y. Xue, and L. Carin, “Bayesian compressive sensing,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 6, pp. 2346-2356, Jun. 2008.
- [5] S. Babacan, R. Molina, and A. Katsaggelos, “Bayesian compressive sensing using Laplace priors,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 19, no. 1, pp. 53-63, Jan. 2010.
- [6] H. Zou, “The adaptive Lasso and its oracle properties,” *J. Amer. Statist. Assoc.*, vol. 101, pp. 1418-1429, Dec. 2006.
- [7] D. F. Andrews and C. L. Mallows, “Scale mixtures of normal distributions,” *J. Royal Statist. Soc., Ser. B*, vol. 36, no. 1, pp. 99-102, 1974.
- [8] R. N. Clark, G. A. Swayze, R. Wise, K. E. Livo, T. M. Hoefen, R. F. Kokaly, and S. J. Sutley, USGS Digital Spectral Library, 2007 [Online]. Available: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>
- [9] AVIRIS Free Standard Data Products [Online]. Available: <http://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris.freedata.html>
- [10] M.-D. Iordache, J. M. Bioucas-Dias, and A. Plaza, “Sparse unmixing of hyperspectral data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 6, pp. 2014-2039, Jun. 2011.



Μαριάνθη Σ. Γριζιώτη

sdi0700046@di.uoa.gr

# Digital Magnetic Poetry: Ένα Διαδραστικό Παιχνίδι Αναγνώρισης Κίνησης και Χειρονομιών

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός εκπαιδευτικού παιχνιδιού, στο οποίο η αλληλεπίδραση γίνεται μέσω Φυσικών Χειρονομιών (Natural Gestures) και αναγνώρισης κινήσεων του χρήστη (Motion Detection). Πρόκειται για ένα παιχνίδι στο οποίο ο παίκτης, χωρίς να κάνει χειρισμό κάποιας συσκευής ή χειριστηρίου, αλληλεπιδρά με το γραφικό περιβάλλον με την κίνηση του σώματός του και κυρίως των χεριών του.

Λέξεις κλειδιά: Αλληλεπίδραση Ανθρώπου Υπολογιστή, Αναγνώριση Χειρονομιών, Ανίχνευση Κίνησης, Σχεδίαση Διεπαφών, Φυσικές Διεπαφές Χρήστη, Kinect SDK, Σοβαρά Παιχνίδια

## Επιβλέποντες

Ιωαννίδης Ιωάννης, Καθηγητής | Δρ. Ρούσσου Μαρία

## 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται σημαντική εξέλιξη στον τομέα Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου Υπολογιστή και ειδικότερα στη σχεδίαση εφαρμογών όπου η αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους γίνεται με φυσικούς τρόπους, όπως με την αφή, με φωνητικές εντολές, με χειρονομίες ή κινήσεις. Μια αρκετά πρόσφατη τεχνολογία τέτοιου είδους, είναι η αναγνώριση των κινήσεων του χρήστη. Στα πλαίσια της εξέλιξης αυτή της τεχνολογίας, η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση του σχεδιασμό και της ανάπτυξης ενός εκπαιδευτικού διαδραστικού παιχνιδιού, στο οποίο ο παίκτης θα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον της εφαρμογής με κινήσεις του σώματός του. Η τεχνολογία αναγνώρισης κίνησης, είναι μια νέα τεχνολογία η οποία διαρκώς εξελίσσεται σε παγκόσμιο επίπεδο και έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τον τομέα αλληλεπίδρασης ανθρώπου υπολογιστή καθώς ανοίγει νέους δρόμους στην ανάπτυξη φυσικών εφαρμογών χρήστη. Η πρωτοποριακή εμπειρία που δημιουργεί στο χρήστη, ο οποίος μπορεί να χειριστεί μια εφαρμογή αποκλειστικά και μόνο με τις κινήσεις του, χωρίς να απαιτείται η πρωτύτερη γνώση χειρισμού κάποιου μηχανισμού, δίνει μια νέα διάσταση στις ηλεκτρονικές εφαρμογές και ειδικά στις εφαρμογές παιχνιδιών.

Στα πλαίσια της εξέλιξης της τεχνολογίας αναγνώρισης κίνησης, έχουν αναπτυχθεί διάφορα παιχνίδια και εφαρμογές σε αυτή. Ένα παράδειγμα είναι τα full body games που σχεδιάστηκαν από την εταιρία Feedtank<sup>1</sup> και αποτελούνται από 4 διαφορετικά παιχνίδια. Στα παιχνίδια αυτά ο παίκτης αλληλεπιδρά με το περιβάλλον με κινήσεις ολόκληρου του σώματός του, ενώ πολύ παίκτες μπορούν να συμμετάσχουν ταυτόχρονα [1]. Τα παιχνίδια αυτά έχουν τοποθετηθεί σε διάφορες τεχνολογικές εκθέσεις ανά τον κόσμο. Μια από αυτές ήταν και το διαδραστικό πάρκο «Πολυμήχανο»<sup>2</sup> στην Αθήνα, που λειτούργησε στην Ελλάδα για δύο συνεχόμενες χρονιές. Μια ακόμη τεχνολογία που βασίζεται στην αναγνώριση κίνησης είναι το Ground Fx., που αναπτύχθηκε από την εταιρία GestureTek<sup>3</sup>, στην οποία οι χρήστες ελέγχουν με απλές κινήσεις και χειρονομίες, διαδραστικά περιβάλλοντα που προβάλλονται στο έδαφος. Ενώ έχουν αναπτυχθεί διάφορες εφαρμογές που βασίζονται στην αναγνώριση κίνησης, η τεχνολογία αυτή δεν έχει αξιοποιηθεί ιδιαίτερα σε εκπαιδευτικά

---

1. <http://www.feedtank.com/index.php> (Τελευταία επίσκεψη 26/6/2012)

2. <http://www.polymechanon.gr> (Τελευταία επίσκεψη 26/6/2012)

3. <http://www.gesturetek.com> (Τελευταία επίσκεψη 26/6/2012)

παιχνίδια. Αξιοποιώντας την αναγνώριση κίνησης σε εκπαιδευτικές εφαρμογές, η μάθηση προσεγγίζεται από μια διαφορετική οπτική, βασισμένη στην αλληλεπίδραση με φυσικό τρόπο με τα τεχνολογικά περιβάλλοντα [2]. Μέσα από την εφαρμογή που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, οι χρήστες εμπλέκονται με τα γνωστικά αντικείμενα της γλώσσας και των μαθηματικών μέσα από ένα περιβάλλον όπου το ελέγχουν κιναισθητικά. Αυτό δημιουργεί μια ξεχωριστή εμπειρία, όπου ο χρήστης έρχεται σε επαφή με τη γνώση μέσα από ένα πρωτότυπο, διασκεδαστικό και ταυτόχρονα εκπαιδευτικό περιβάλλον.

Επιπλέον, σημαντική πρόκληση για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης εφαρμογής, αποτέλεσε η πρόσφατη κυκλοφορία του Kinect for Windows SDK. Πρόκειται για ένα software development kit το οποίο κυκλοφόρησε η Microsoft τον Ιούνιο του 2011 και περιέχει όλες τις απαραίτητες βιβλιοθήκες και εργαλεία για τον προγραμματισμό εφαρμογών για την κονσόλα του Kinect<sup>4</sup>. Καθώς το συγκεκριμένο development kit είναι μια πολύ πρόσφατη κυκλοφορία στον τομέα του προγραμματισμού, λίγες εκπαιδευτικές εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί με αυτό προς το παρόν.

Ο απώτερος στόχος της εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η δημιουργία ενός πρωτοποριακού εκπαιδευτικού παιχνιδιού, το οποίο θα βασίζεται στην τεχνολογία αναγνώρισης κίνησης των παικτών και θα προσφέρει στους χρήστες του μια εναλλακτική εμπειρία μάθησης.

## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1. Φυσικές Διεπαφές Χρήστη

Οι Φυσικές Διεπαφές Χρήστη (Natural User Interfaces) αποτελούν την εξέλιξη των Διεπαφών Γραφικού Περιβάλλοντος (GUIs). Μια Φυσική Διεπαφή Χρήστη αφορά σε διεπαφές ανθρώπου-υπολογιστή οι οποίες είναι 1) μη ορατές από τους χρήστες και 2) βασίζονται στη φυσικότητα ή σε φυσικά στοιχεία [3]. Με τον όρο «μη ορατές» εννοούμε ότι ο χρήστης κατά τη αλληλεπίδρασή του με τον υπολογιστή δεν αντιλαμβάνεται την ύπαρξη κάποιας διεπαφής καθώς ο υπολογιστής αντιδρά κατά κάποιο τρόπο με ανθρώπινη συμπεριφορά, δίνοντας του την αίσθηση ότι αλληλεπιδρά μαζί του με φυσικό τρόπο. Ο όρος

---

4. <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/> (τελευταία επίσκεψη 26/6/2012)

«φυσικότητα» αναφέρεται στον στόχο της εμπειρίας χρήστη, όπου η αλληλεπίδραση προκύπτει ως κάτι φυσικό χωρίς να απαιτείται η χρήση και η προαπαιτούμενη γνώση χειρισμού οποιασδήποτε τεχνητής συσκευής. Μερικά παραδείγματα Φυσικών Διεπαφών Χρήστη είναι οι Multi-touch εφαρμογές, οι Handwriting Recognition εφαρμογές ή εφαρμογές με αναγνώριση γραφής, οι Speech recognition ή Voice User Interface στις οποίες ο χρήστης αλληλεπιδρά με τον υπολογιστή χρησιμοποιώντας φωνητικές εντολές, οι Facial Recognition εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία αναγνώρισης προσώπου και τέλος οι Gesture recognition εφαρμογές, οι οποίες χρησιμοποιούν αναγνώριση κίνησης. Η αναγνώριση κίνησης αποτελεί και τη βάση της παρούσας εφαρμογής.

## 2.2. Τεχνολογίες αναγνώρισης κίνησης

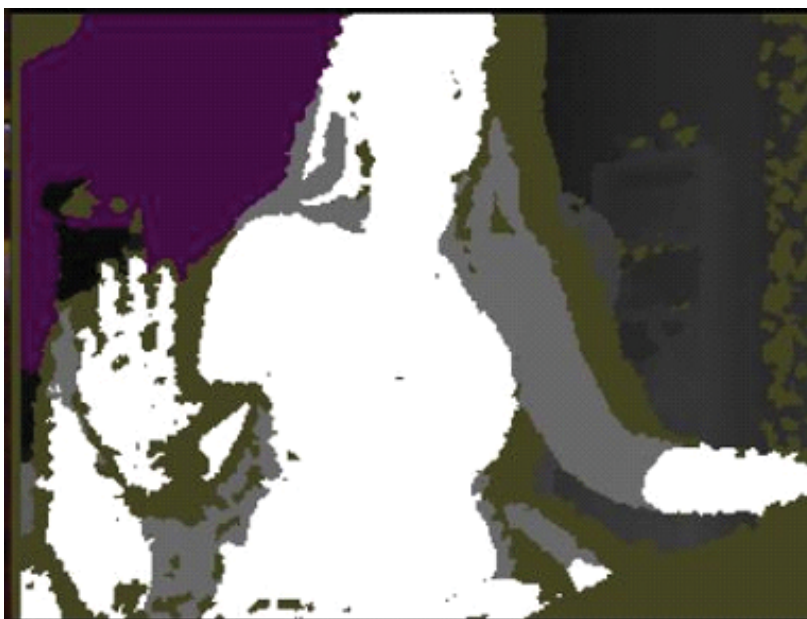
Στις τεχνολογίες αναγνώρισης κίνησης πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν οι χειρονομίες του χρήστη. Παρ' όλα αυτά, η αναγνώριση και η κατηγοριοποίηση τους αποτελούν μια αρκετά πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία.

Κάποιες από τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί για την αναγνώριση των χειρονομιών είναι τα Wired Gloves, ειδικά διαμορφωμένα γάντια που χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας, οι Gesture Controllers, όπως είναι η κονσόλα του Wii<sup>5</sup> και η τεχνολογία Vision Based [4]. Στην τελευταία δεν απαιτείται η χρήση εξωτερικής συσκευής από το χρήστη (π.χ. χειριστήριο) καθώς η αναγνώριση γίνεται με χρήση καμερών. Μια τεχνική για την υλοποίηση της τεχνολογίας αυτής, η οποία χρησιμοποιείται και από την κονσόλα του Kinect, είναι το Depth Imaging. Σκοπός του Depth Imaging είναι η τρισδιάστατη καταγραφή και αναπαράσταση του χώρου. Αυτό πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός χάρτη βάθους (depth map), ο οποίος πρόκειται ουσιαστικά για μία εικόνα που αναπαριστά με διαφορετικά χρώματα ότι καταγράφεται από μια κάμερα. Το διαφορετικό βάθος στην εικόνα αναπαριστάται με διαφορετικό χρώμα. Έτσι υπάρχει μια τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου (Εικόνα 1).

---

5. <http://www.wii.com> (Τελευταία επίσκεψη 26/6/2012)





Εικόνα 1: Depth Image καταγραφή από το Kinect με χρήση του Kinect SDK v1.0

### 2.3. Αλγόριθμοι για τη διαχείριση των χειρονομιών

Από τη στιγμή που θα ανιχνευτούν οι χειρονομίες, ο υπολογιστής πρέπει να αναλύσει και να διαχειριστεί με το κατάλληλο λογισμικό τις κινήσεις του παίκτη. Όσον αφορά τις vision-based εφαρμογές υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία των κινήσεων: οι Appearance-Based και οι 3D Based Model αλγόριθμοι [5]. Στην πρώτη προσέγγιση, οι κινήσεις αναγνωρίζονται κατευθείαν από την εικόνα ή το βίντεο, οπότε η αναπαράσταση του σώματος δεν μπορεί να είναι τρισδιάστατη.

Στην προσέγγιση των 3D model αλγορίθμων χρησιμοποιούνται ογκομετρικά μοντέλα ή μοντέλα σκελετού ως βάση για την αναγνώριση και τη διαχείριση των κινήσεων του παίκτη. Στα μοντέλα σκελετού το σώμα αναπαρίσταται από ένα εικονικό μοντέλου ανθρώπινου σκελετού στο οποίο είναι χαρτογραφημένα συγκεκριμένα σημεία του ανθρώπινου σώματος. Η ανάλυση της κίνησης γίνεται χρησιμοποιώντας τη θέση και την κατεύθυνση αυτών των σημείων και τη σχέση που έχουν μεταξύ τους δύο διαφορετικά σημεία (για παράδειγμα τη γωνία μεταξύ δύο αρθρώσεων (joints) και τη σχετική τους απόσταση ή κατεύθυνση).

### 3. Σχεδιασμός της εφαρμογής

#### 3.1. Ιδέα και σενάριο

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε βασίστηκε στο παραδοσιακό παιχνίδι Magnetic Poetry. Πρόκειται για ένα παιχνίδι ελεύθερης δημιουργίας προτάσεων από μαγνήτες που περιέχουν διάφορες λέξεις. Ο παίκτης τοποθετεί όλους τους μαγνήτες σε μια επιφάνεια και δημιουργεί προτάσεις ή κείμενα βάζοντας τους μαγνήτες-λέξεις στη σειρά που θέλει [6]. Στην επιλογή του magnetic poetry ως βασικό πλαίσιο μιας τέτοιας εφαρμογής, συντέλεσε πρώτον ο δημιουργικός και παράλληλα εκπαιδευτικός του χαρακτήρας και δεύτερον το γεγονός ότι είναι ένα παιχνίδι που περιλαμβάνει ως βασικό του στοιχείο την έννοια της κίνησης. Το παιχνίδι που υλοποιήθηκε πρόκειται για ένα συνδυασμό των χαρακτηριστικών του παραδοσιακού παιχνιδιού magnetic poetry, με την ευχρηστία και τα πλεονεκτήματα της αναγνώρισης κίνησης. Έτσι, ενώ το βασικό πλαίσιο παραμένει το ίδιο (σκοπός του παίκτη είναι να μετακινεί έναν αριθμό μαγνητών στο χώρο, όπου αυτός επιθυμεί), γίνονται όλα σε ένα εικονικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλά περιθώρια επέκτασης και βελτίωσης του παραδοσιακού παιχνιδιού. Για παράδειγμα, στο παιχνίδι που αναπτύχθηκε, το περιεχόμενο των λέξεων μπορεί εύκολα να αλλάζει πριν από κάθε παιχνίδι και να προσαρμόζεται στο γνωστικό επίπεδο του παίκτη. Επιπλέον, εκτός από την παραδοσιακή δημιουργία ελεύθερων προτάσεων, προστέθηκε και άλλη μια επιλογή, αυτή των μαθηματικών. Η επιλογή αυτή είναι ένας συνδυασμός του magnetic poetry και μαθηματικών παιχνιδιών, στην οποία ο παίκτης καλείται να αποδείξει τις γνώσεις του στα μαθηματικά. Έτσι, η εφαρμογή αποτελείται ουσιαστικά από δυο διαφορετικά υπό-παιχνίδια, από τα οποία ο παίκτης μπορεί να επιλέξει.

#### 3.2. Σχεδιασμός

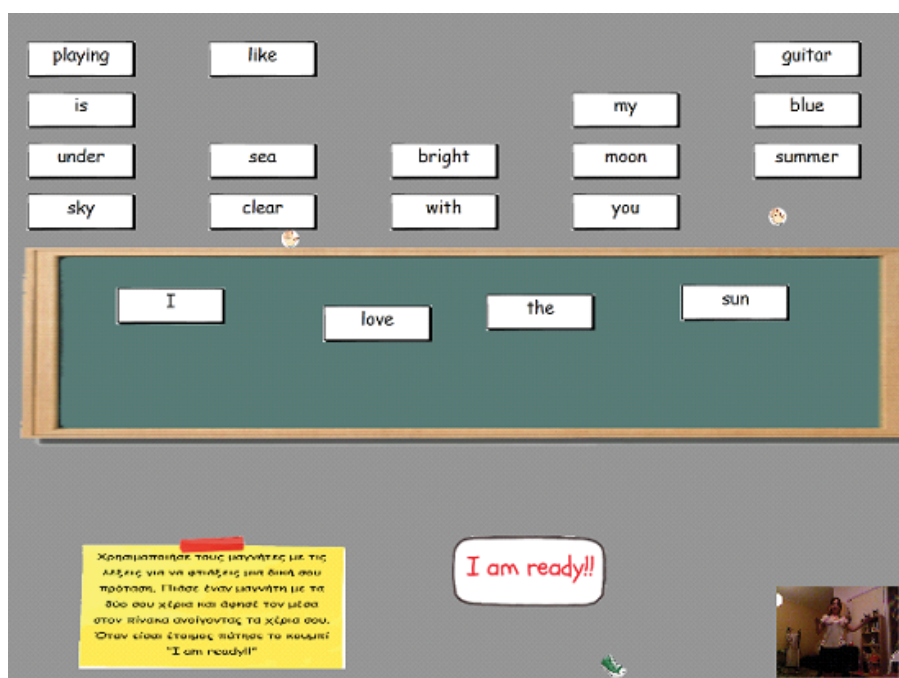
Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τις διεπαφές που χρησιμοποιούν ανθρωποκεντρική προσέγγιση είναι η ευχρηστία του συστήματος. Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ευχρηστία πρέπει να ακολουθούνται κάποιες αρχές και κανόνες σχεδίασης καθ' όλη τη διάρκεια ανάπτυξης και σχεδιασμού της διεπαφής. Ο σχεδιασμός της συγκεκριμένης εφαρμογής βασίστηκε στις τρεις βασικές αρχές ευχρηστίας [7], στους οκτώ χρυσούς κανόνες του Shneiderman [7], καθώς και στα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά των εκπαιδευτικών παιχνιδιών

όπως αυτά διατυπώθηκαν από τους Malone και Lepper (1987) [8].

### 3.3. Μορφή παιχνιδιού

Όπως αναφέρθηκε, η εφαρμογή αποτελείται από δύο επιμέρους υπο-παιχνίδια. Οι τίτλοι των δυο παιχνιδιών είναι Words και Mathematics και το καθένα ασχολείται με το αντίστοιχο γνωστικό αντικείμενο.

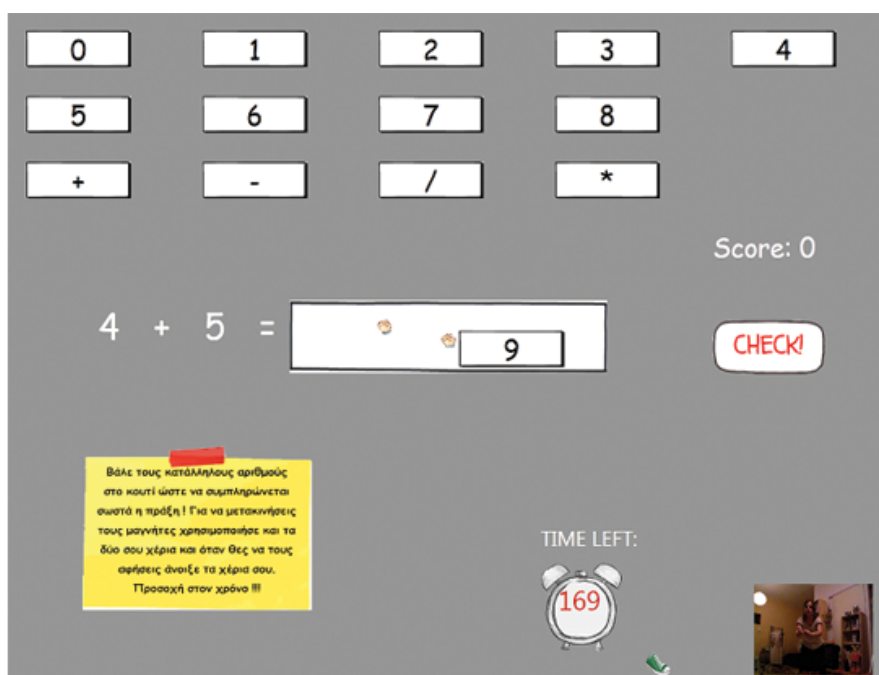
Το παιχνίδι Words αποτελεί την μεταφορά του κλασσικού παιχνιδιού magnetic poetry. Στο περιβάλλον της εφαρμογή εμφανίζεται ένας αριθμός από εικονικούς μαγνήτες, ο κάθε ένας από τους οποίους περιέχει μια αγγλική λέξη (Εικόνα 2). Ο παίκτης μπορεί να μετακινήσει τους μαγνήτες με συγκεκριμένες κινήσεις των χεριών του και να τους τοποθετήσει όπως αυτός επιθυμεί δημιουργώντας τη δική του πρόταση ή κείμενο. Στο παιχνίδι μπορούν να παίξουν δύο παίκτες ταυτόχρονα και να συνεργαστούν στη μετακίνηση και τοποθέτηση των μαγνητών και στη δημιουργία του κειμένου.



Εικόνα 2: Στιγμιότυπο του παιχνιδιού Words

Στο παιχνίδι Mathematics, εμφανίζονται στην οθόνη διαδοχικές μαθηματικές πράξεις από τις οποίες λείπει κάποιος αριθμητικός όρος ή το σύμβολο της

πράξης. Σε όλη τη διάρκεια του παιχνιδιού είναι διαθέσιμοι 14 μαγνήτες οι οποίοι αναπαριστούν τα νούμερα 0-9 και τα 4 βασικά αριθμητικά σύμβολα (Εικόνα 3). Ο παίκτης καλείται να συμπληρώσει την πράξη, τοποθετώντας τους κατάλληλους μαγνήτες μέσα στο κενό πλαίσιο. Αν η επιλογή του είναι σωστή εμφανίζεται η επόμενη πράξη. Σκοπός είναι ο παίκτης, μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο, να συμπληρώσει σωστά όσο το δυνατόν περισσότερες μαθηματικές πράξεις. Το παιχνίδι αυτό είναι ατομικό και μετά το πέρας του διαθέσιμου χρόνου αναγράφεται το σκορ του παίκτη.



Εικόνα 3: Στιγμιότυπο του παιχνιδιού Mathematics

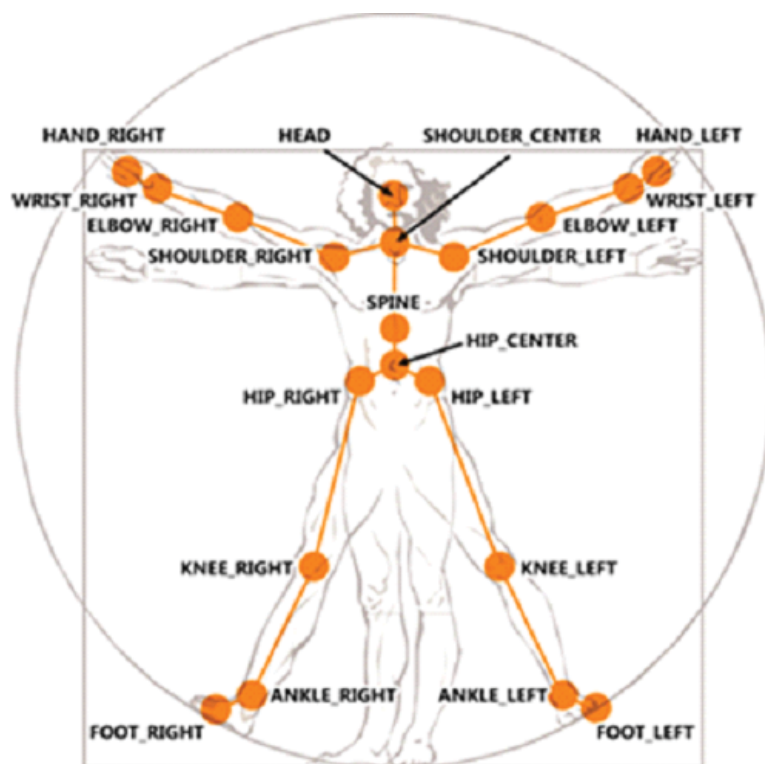
Ιδιαίτερα σημαντικό είναι η δυνατότητα τροποποίησης των δεδομένων και των δύο παιχνιδιών από το χρήστη. Συγκεκριμένα, τροποποιώντας ένα αρχείο txt, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τις διαθέσιμες λέξεις του παιχνιδιού Words, καθώς και τις μαθηματικές πράξεις και τον διαθέσιμο χρόνο του παιχνιδιού Mathematics.

#### 4. Τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν

Η κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της εφαρμογής είναι η κονσόλα του Microsoft Kinect καθώς και το Kinect for Windows SDK.



Το Kinect είναι μια συσκευή αναγνώρισης κίνησης που κυκλοφόρησε από την Microsoft τον Νοέμβριο του 2010 και είναι συμβατή με την κονσόλα του Xbox 360 και με υπολογιστές που χρησιμοποιούν Windows με σύνδεση μέσω USB port. Η συσκευή αποτελείται από δύο 3d depth sensors, μια RGB Camera και ένα multi-array microphone και προσφέρει δυνατότητες αναγνώρισης κίνησης ολόκληρου του σώματος με την τεχνική του Light Coding [9]. Στην τεχνική αυτή μια σταθερή πηγή laser εκπέμπει συνεχώς αόρατο φως το οποίο κατανέμεται στο χώρο μπροστά από την κάμερα. Με ειδικούς υπολογισμούς υπολογίζεται η απόσταση κάθε ακτίνας από τον αισθητήρα [10]. Επιπλέον το Kinect παρέχει αναγνώριση φωνής (speech recognition) και αναγνώριση προσώπου (facial recognition). Μπορεί να αναγνωρίσει μέχρι έξι διαφορετικούς ανθρώπους κάθε φορά και σε κάθε παίκτη αναγνωρίζει 20 διαφορετικά σημεία του σώματος του (Εικόνα 4). Το Kinect προτιμήθηκε για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης εφαρμογής λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, τα οποία του δίνουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες εφικτές τεχνικές, όπως η χρήση μιας απλής κάμερας.



Εικόνα 4: Τα 20 σημεία αναγνώρισης από την κονσόλα του Kinect

Το Microsoft Kinect For Windows SDK, που χρησιμοποιήθηκε κατά την ανάπτυξη του κώδικα της εφαρμογής, αναπτύχθηκε από την Microsoft και η πρώτη

του έκδοση ήταν διαθέσιμη τον Ιούνιο του 2011. Το SDK περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα εργαλεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη εφαρμογών συμβατές με το Kinect της Microsoft και δίνει τη δυνατότητα στους προγραμματιστές να αναπτύξουν εφαρμογές σε C++, C# ή Visual Basic χρησιμοποιώντας το Visual Studio. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση v1.0 με το Visual Studio 2010. Το SDK χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή για τον εντοπισμό της θέσης των χεριών και των ποδιών του παίκτη, ώστε να πραγματοποιείται η μετακίνηση των αντικείμενων σύμφωνα με τις ανάγκες του παιχνιδιού. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό δύο διαφορετικών παικτών στο παιχνίδι των λέξεων.

Η γλώσσα προγραμματισμού στην οποία αναπτύχθηκε το μεγαλύτερο κομμάτι του κώδικα του παιχνιδιού ήταν η C#. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα XAML για τον ορισμό στοιχείων και γεγονότων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε για τον ορισμό των γραφικών στοιχείων της αρχικής οθόνης και τον ορισμό κάποιων βασικών παραμέτρων του χώρου που εξελίσσεται το παιχνίδι οι οποίες παραμένουν αμετάβλητες σε όλη τη διάρκεια του παιχνιδιού, όπως για παράδειγμα το background της εφαρμογής.

Εκτός των παραπάνω τεχνολογιών, χρησιμοποιήθηκε επίσης το εργαλείο Coding4Fun Kinect Toolkit. Είναι ένα εργαλείο το οποίο αναπτύχθηκε ως project από την ομάδα Coding4Fun και περιέχει επεκταμένες συναρτήσεις και χειρισμούς για το Kinect SDK [11]. Στον κώδικα της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν κάποιες από τις μεθόδους και τα αντικείμενα του Toolkit. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το αντικείμενο HoverButton για τη δημιουργία των ειδικών κουμπιών και η συνάρτηση ScaleTo για την προσαρμογή της κλίμακας της θέσης ενός σημείου του σκελετού. Τέλος, για τη σχεδίαση των γραφικών χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Balsamiq Mockups<sup>6</sup>, ένα εργαλείο για τη σχεδίαση προτύπων, κυρίως ιστοσελίδων, που αναπτύχθηκε από την εταιρία Balsamiq.

Ένα παράδειγμα από τον κώδικα, στο οποίο γίνεται η διαχείριση του σημείου όπου βρίσκονται τα χέρια του παίκτη είναι το εξής:

```
Joint joint_left = skeleton.Joints[JointType.HandLeft];  
    Joint joint_right = skeleton.Joints[JointType.HandRight];  
    Joint scaledJointLeft =  
joint_left.ScaleTo(Convert.ToInt32(canvas.ActualWidth),  
Convert.ToInt32(canvas.ActualHeight), .7f, .7f);
```

---

6. <http://www.balsamiq.com/products/mockups> (Τελευταία επίσκεψη 18/6/2012)

```
Joint scaledJointRight =  
joint_right.ScaleTo(Convert.ToInt32(canvas.ActualWidth),  
Convert.ToInt32(canvas.ActualHeight), .7f, .7f);
```

## 5. Συμπεράσματα

Η τεχνολογία αναγνώρισης κίνησης είναι μια τεχνολογία που ανοίγει νέους δρόμους στην ανάπτυξη εφαρμογών. Όπως φάνηκε από αυτή την εφαρμογή, η αξιοποίησή της στον τομέα των εκπαιδευτικών παιχνιδιών δημιουργεί νέες προσέγγισης στη μάθηση και προσφέρει στους χρήστες μια ξεχωριστή εκπαιδευτική εμπειρία. Η υλοποίηση της παρούσας εργασίας οδήγησε στη δημιουργία μιας νέας εκπαιδευτικής εφαρμογής, για τους τομείς της γλώσσας και των μαθηματικών, η οποία απευθύνεται σε όλες τις ηλικίες αφού μπορεί να τροποποιηθεί και να προσαρμοστεί ανάλογα. Χρησιμοποιώντας την αναγνώριση κίνησης οι παίκτες μαθαίνουν μέσα από τη συμμετοχή και τη δράση, σε ένα περιβάλλον πρωτότυπο και διασκεδαστικό.

Μετά την υλοποίησή της, η εφαρμογή αξιολογήθηκε από χρήστες διαφορετικών ηλικιών και διαφορετικού βαθμού εξοικείωσης τόσο με τους υπολογιστές όσο και με τα ηλεκτρονικά παιχνίδια. Από τους χρήστες αυτούς, ζητήθηκε να παίξουν και τα δύο υπό-παιχνίδια της εφαρμογής, από δύο φορές το καθένα. Συνολικά οι παίκτες έδειξαν θετική αντιμετώπιση προς το παιχνίδι. Το χαρακτήρισαν διασκεδαστικό, πρωτοπόρο και εύκολο στην εκμάθηση. Επισήμαναν ότι είναι ένα παιχνίδι το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση μαθητών, αλλά πως είναι εξίσου ενδιαφέρον για άτομα μεγαλύτερης ηλικίας αλλάζοντας το επίπεδο δυσκολίας. Οι περισσότεροι πρότειναν να γίνουν και επεκτάσεις σε άλλα γνωστικά αντικείμενα.

Μια μελλοντική επέκταση που θα μπορούσε να υλοποιηθεί, είναι η ενσωμάτωση ηχητικών εντολές για τον χειρισμό του παιχνιδιού, αξιοποιώντας τη δυνατότητα του Kinect για αναγνώριση φωνής. Επιπλέον, η εφαρμογή στο σύνολό της θα μπορούσε να υλοποιηθεί με τη μορφή διαδικτυακού παιχνιδιού για δύο παίκτες. Στην υλοποίηση αυτή δύο παίκτες θα μπορούσαν από απομακρυσμένους υπολογιστές να παίζουν ταυτόχρονα το παιχνίδι. Κάτι τέτοιο θα ήταν πολύ πρωτοποριακό αφού προς το παρόν δεν έχει υλοποιηθεί κάποια διαδικτυακή εφαρμογή για δύο παίκτες με το Kinect. Τέλος, πάνω στο ήδη υπάρχον πλαίσιο θα μπορούσαν να προστεθούν επιπλέον υπό-παιχνίδια για άλλα γνωστικά αντικείμενα, όπως η φυσική ή η γεωγραφία.

## Αναφορές

- [1] “Feedtank - Full body games”, Internet: <http://www.feedtank.com/index.php?strProject=full-body-games> [Jun 22, 2012]
- [2] “GestureFX-Interactive floor projection system”, Internet: [http://www.gesturetek.com/gesturefx/productsolutions\\_groundfx.php](http://www.gesturetek.com/gesturefx/productsolutions_groundfx.php) [Jun 20, 2012]
- [3] “Natural User Interface”. Internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Natural\\_user\\_interface](http://en.wikipedia.org/wiki/Natural_user_interface), [Jun 24, 2012].
- [4] William Buxton, “Human Input to Computer Systems: Theories, Techniques and Technology”, 2004.
- [5] “Gesture Recognition”, Internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Gesture\\_recognition](http://en.wikipedia.org/wiki/Gesture_recognition), [Jun.24, 2012].
- [6] “Magnetic Poetry - our story” , Internet: <http://magneticpoetry.com/our-story/> [Jun 22,2012].
- [7] A. Dix, J. Finlay, G. D. Abowd, R. Beale, “Επικοινωνία Ανθρώπου-Υπολογιστή”, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας , Τρίτη έκδοση, Αθήνα 2007.
- [8] David Schaller, “What makes a learning game”
- [9] “Kinect”, Internet: <http://en.wikipedia.org/wiki/Kinect> [Jun 24, 2012].
- [10] Mikkel Viager, “Analysis of Kinect for mobile robots” ,Technical University of Denmark, March 2011 Chapter 2 “ A brief explanation how Light Coding works”.
- [11] “Coding4Fun Kinect Toolkit”, Internet : <http://c4fkinect.codeplex.com/> [Jun 27, 2012].



Γεώργιος Β. Δήμος

*sdi0800045@di.uoa.gr*

# Εξαγωγή Στοιχείων Συνάντησης από Κείμενο σε email

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίον όταν λαμβάνεται ένα νέο e-mail το οποίο αφορά σε μελλοντική συνάντηση και στο οποίο προσδιορίζεται ο χρόνος αυτής, τότε τόσο η ημερομηνία όσο και η ώρα της συνάντησης (εάν αυτή προσδιορίζεται στο περιεχόμενο του e-mail ) αποθηκεύονται στο ημερολόγιο του χρήστη μετά από έγκριση του ίδιου (mail to calendar).

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρονική αλληλογραφία, γραμματική δεικτοδότηση, συντακτική ανάλυση, χρονική πληροφορία, εισαγωγή σε ημερολόγιο

## Επιβλέπων

Γουνόπουλος Δημήτριος, Καθηγητής

## 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια το email (ηλεκτρονικό ταχυδρομείο) έχει αποτελέσει μια από τις βασικότερες μορφές επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων. Ο ρόλος του δεν περιορίζεται μόνο στην απλή μεταφορά νέων όπως συμβαίνει με το κλασσικό ταχυδρομείο. Αντίθετα, χρησιμεύει για την ανταλλαγή σύντομων μηνυμάτων (αντίστοιχων με τα sms των κινητών τηλεφώνων), links προς sites, συνημμένου υλικού, κ.α. Ιδιαίτερα χρήσιμο είναι επίσης για τα άτομα που χρησιμοποιούν συχνά το e-mail τους προκειμένου να κανονίσουν συναντήσεις με φίλους, γνωστούς, συνεργάτες, κλπ. Έτσι το e-mail συχνά περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν στο χρόνο συνάντησης. Με αφορμή την προαναφερθείσα αυτή ανάγκη των ατόμων να κανονίζουν τις συναντήσεις τους μέσω e-mail, εκπονήθηκε η παρακάτω πτυχιακή εργασία.

Στόχος, λοιπόν της πτυχιακής είναι ο ακόλουθος: Λαμβάνοντας ο χρήστης ένα νέο e-mail το οποίο αφορά σε μελλοντική συνάντηση και στο οποίο προσδιορίζεται ο χρόνος αυτής, τότε τόσο η ημερομηνία όσο και η ώρα της συνάντησης αποθηκεύονται στο ημερολόγιο του μετά από έγκριση του ίδιου (mail to calendar). Η επιθυμητή αυτή χρονική πληροφορία μπορεί να είναι συγκεκριμένη, σε format που να δηλώνει ρητά την ημερομηνία στη μορφή π.χ. «15/10/1990» ή σε αφηρημένο format που να χρειάζεται περισσότερη ανάλυση context του μηνύματος π.χ. «Tomorrow morning meeting at my home». Συνοψίζοντας, παρά το γεγονός ότι το πρώτο format είναι πιο εύκολο στο να εντοπισθεί, είναι και το λιγότερο χρησιμοποιούμενο. Συνεπώς, στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι να εντοπίζεται όσο το δυνατό καλύτερα και με όσο το δυνατό λιγότερα σφάλματα και η ημερομηνία η οποία ενδέχεται να προκύπτει όταν υπάρχει μια περισσότερη ελεύθερη έκφραση.

Χάρη σε αυτή τη διαδικασία η οποία θα αναλυθεί στην πορεία του κειμένου, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να οργανώνει καλύτερα τα ραντεβού του και να μπορεί ανά πάσα στιγμή, ανατρέχοντας στο ημερολόγιο του, να ενημερώνεται για αυτά. Αυτό συμβάλλει μακροπρόθεσμα στην εξοικονόμηση πολύτιμου χρόνου και στην απλοποίηση της ανθρώπινης ζωής με τη βοήθεια της αναπτυσσόμενης με καλπάζοντα ρυθμό τεχνολογίας.

Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της τεχνικής εξόρυξης κειμένου. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται εν συντομία αντίστοιχες μέθοδοι εντοπισμού του χρόνου μέσα σε ένα e-mail τις οποίες χρησιμοποιούν εταιρείες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (Gmail, Yahoo). Τέλος, στο κεφάλαιο 4

γίνεται παρουσίαση της τεχνικής που έχει χρησιμοποιηθεί.

## 2. Επεξεργασία φυσικής γλώσσας

Η επιστημονική περιοχή της επεξεργασίας φυσικής γλώσσας καλύπτει το σχεδιασμό και την υλοποίηση υπολογιστικών μοντέλων της φυσικής γλώσσας και πιο συγκεκριμένα την αναγνώριση ή κατανόηση της φυσικής γλώσσας από υπολογιστή και την παραγωγή ή σύνθεση φυσικής γλώσσας. Οι εφαρμογές της περιοχής αυτής αγκαλιάζουν το διάλογο με τον υπολογιστή μέσα από τη μηχανική μετάφραση (από γλώσσα σε γλώσσα, από γλώσσα σε βάση δεδομένων, και αντιστρόφως) και την αναδίφηση (browsing) ή τη διήθηση (filtering) από ένα πράκτορα ή παράγοντα (agent).

Ο όρος Επεξεργασία Φυσικής γλώσσας (Natural Language Processing) είναι παραδοσιακός και προέρχεται από τον ομώνυμο κλάδο της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence). Σήμερα αντιστοιχεί στην εφαρμοσμένη Υπολογιστική Γλωσσολογία.

Στον πυρήνα του συστήματος επεξεργασίας κειμένου φυσικής γλώσσας βρίσκεται η εξαγωγή γνώσης και προτύπων μέσα από την εφαρμογή των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για να κάνουν ένα σύστημα πιο «ευφύες» και να εξάγουν γνώση από δομημένες και κατανοητές προς το σύστημα πληροφορίες διαφέρουν ανάλογα με το είδος της επιθυμητής εξόδου.

Ένα από τα ερευνητικά πεδία στα οποία εφαρμόζεται η Μηχανική Μάθηση είναι η Εξόρυξη Κειμένων<sup>1</sup>. Η Εξόρυξη Κειμένων είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που σχετίζεται εκτός από τη Μηχανική Μάθηση και με την Εξόρυξη Δεδομένων, τη Στατιστική και την Υπολογιστική Γλωσσολογία.

Εισήχθη ως έννοια τη δεκαετία του '80 και γνώρισε μεγάλη πρόοδο τη δεκαετία του '90 ως επακόλουθο της τεχνολογικής ανάπτυξης και της ραγδαίας αύξησης των διαθέσιμων κειμένων σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από το διαδίκτυο. Ο συγκεκριμένος κλάδος είναι μεγάλου επιστημονικού και εμπορικού ενδιαφέροντος καθώς, όπως υπολογίζεται, το 80% της πληροφορίας είναι

---

1 *Data Mining Techniques* by Arun K. Pujari, Hyderabad Universities Press 2002, [http://www.google.gr/books?hl=en&lr=&id=dH2KQhJboSYC&oi=fnd&pg=PR11&dq=data+mining+techniques&ots=zJ2yj\\_bMHc&sig=JA6vECsmsxqXn7ahxBBPuq3\\_0FA&redir\\_esc=y#v=onepage&q=data%20minin&f=false](http://www.google.gr/books?hl=en&lr=&id=dH2KQhJboSYC&oi=fnd&pg=PR11&dq=data+mining+techniques&ots=zJ2yj_bMHc&sig=JA6vECsmsxqXn7ahxBBPuq3_0FA&redir_esc=y#v=onepage&q=data%20minin&f=false)

καταγεγραμμένη σε μορφή κειμένου.

Εφαρμόζοντας τεχνικές Εξόρυξης Κειμένου, συνήθως κάποιος θέλει να επιτύχει:

- (1) **Κατηγοριοποίηση κειμένων.** Αφορά την ταξινόμηση ενός κειμένου μέσα σε μια κατηγορία (τάξη). Γνωστές εφαρμογές αποτελούν η διήθηση ανεπιθύμητης ιστοσελίδας και η ταξινόμηση ιστοσελίδας.
- (2) **Ομαδοποίηση κειμένων.** Αφορά στην αυτόματη οργάνωση κειμένων σε ομάδες που θα έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Γνωστές εφαρμογές αποτελούν η ιεραρχική οργάνωση ιστοσελίδων και η ομαδοποίηση ειδησεογραφικών άρθρων.
- (3) **Εξαγωγή πληροφορίας.** Αναφέρεται στην προσπάθεια εξαγωγής συγκεκριμένης πληροφορίας από μεγάλο αριθμό κειμένων. Ένα παράδειγμα εφαρμογής είναι η αυτόματη εξαγωγή πληροφοριών όπως η διαθεσιμότητα σε αεροπορικές πτήσεις με βάση την ημερομηνία ταξιδιού και τον προορισμό.
- (4) **Περίληψη κειμένου.** Πρόκειται για τη δημιουργία ενός κειμένου που να δίνει επί γραμματικά το περιεχόμενο του αρχικού και να είναι μικρότερο σε μέγεθος.
- (5) **Ανάκτηση κειμένου.** Αφορά την εύρεση νέων κειμένων με βάση κάποια λέξη κλειδί ή κάποιο σύντομο κείμενο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εύρεση επιστημονικών άρθρων στο διαδίκτυο με βάση το επιστημονικό πεδίο.

Η εξόρυξη κειμένου, αποσκοπώντας στην εξόρυξη πληροφορίας, εμπλέκει μεθόδους που ποικίλουν, ανάλογα με τη μορφή και το είδος του προς επεξεργασία κείμενο και ανάλογα με το είδος της επιθυμητής πληροφορίας.

Οι δυσκολίες στην επεξεργασία ενός κειμένου οφείλονται στο ότι τα δεδομένα δεν είναι δομημένα και σε μορφή που να είναι κατανοητή και επεξεργάσιμη από μια μηχανή. Επίσης, οι λέξεις που φέρουν τη χρήσιμη πληροφορία είναι διάσπαρτες στο σύνολο του κειμένου και η μηχανή καλύτερα να τις εντοπίσει και να τις χρησιμοποιήσει για να εξάγει γνώση ή να δώσει λύσεις σε άλλα προβλήματα επεξεργασίας κειμένου. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η αναγνώριση ενός απλοποιημένου συνόλου χαρακτηριστικών που θα αντιπροσωπεύει το αρχικό



κείμενο (Text Indexing–Δεικτοδότηση)<sup>2</sup>. Το σύνολο αυτό είναι σημαντικό να αποτελείται από τους πιο δυνατούς και πιο αντιπροσωπευτικούς όρους (μείωση διαστάσεων). Η μείωση αυτή εισάγει ένα καθοριστικό βήμα της εξόρυξης κειμένου αυτό της προ-επεξεργασίας του.

### 3. Mail to Calendar από τη Google και τη Yahoo

#### 3.1. Παρουσίαση της υπηρεσίας της Google

Η Google είναι μια μεγάλη πολυεθνική εταιρεία η οποία εδώ και αρκετά χρόνια εμφανίζεται ως πρωτοπόρος σε όλα τα επίπεδα. Επόμενο, λοιπόν, ήταν να ακολουθήσει την ίδια πορεία και στις υπηρεσίες του ηλεκτρονικού της ταχυδρομείου Gmail χρησιμοποιώντας την υπηρεσία mail to calendar ήδη από το 2006.

Μετά από μια πληθώρα δοκιμών που εφαρμόστηκαν στον προσωπικό λογαριασμό του Gmail, διαπιστώθηκαν τα εξής στοιχεία που αφορούν στη συγκεκριμένη υπηρεσία:

- Προκειμένου να εντοπίσει την πρόταση που αναφέρεται σε συνάντηση, πρέπει στο περιεχόμενο του email να υπάρχει κάποια λέξη-κλειδί. Για παράδειγμα, ορισμένες από τις λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν είναι: «meeting», «appointment», «dinner», «breakfast», κ.ο.κ. Αυτό φυσικά σημαίνει ότι για να εντοπίσει κάποια πιθανή συνάντηση του χρήστη, χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν λέξεις-κλειδιά. Το γεγονός αυτό, έως ένα βαθμό είναι λογικό, καθώς με αυτόν τον τρόπο δεν θα χρησιμοποιούνται ημερομηνίες που δεν αναφέρονται στην συνάντηση και συνεπώς αυξάνεται το precision<sup>3</sup>.
- Στην περίπτωση που η χρονική πληροφορία ακολουθεί τη λέξη-κλειδί όπως για παράδειγμα με την πρόταση: «Meeting tomorrow at my place», η υπηρεσία λειτουργία πολύ σωστά.

---

2 <http://nlp.stanford.edu/software/tagger.shtml#About>, <http://www.computing.dcu.ie/~acahill/tagset.html>

3 [http://en.wikipedia.org/wiki/Tag\\_\(metadata\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Tag_(metadata)), [http://en.wikipedia.org/wiki/Precision\\_and\\_recall](http://en.wikipedia.org/wiki/Precision_and_recall)

Αντίθετα, όταν η χρονική πληροφορία προηγείται της λέξης-κλειδί, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην πρόταση: «Tomorrow morning meeting at my place», η υπηρεσία mail to calendar δεν δίνει το αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς δεν εμφανίζει την ένδειξη «Add to Calendar» ώστε να τοποθετήσουμε την πληροφορία στο Calendar. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χάνονται πληροφορίες οι οποίες να αναφέρονται σε ενδεχόμενη συνάντηση.

### 3.2. Παρουσίαση της υπηρεσίας της Yahoo

Η Yahoo, μια εξίσου μεγάλη πολυεθνική εταιρεία όπως η Google, ακολουθεί τις τάσεις της εποχής και με το έργο της προσπαθεί να εξελισσεται και να βελτιώνεται συνεχώς. Επόμενο, λοιπόν, ήταν η Yahoo να προχωρήσει σε κάποιες αλλαγές στο email της, προσχωρώντας σε αυτό τη δυνατότητα mail to calendar<sup>4</sup>. Εντούτοις, η νοοτροπία και το σκεπτικό αυτής της υπηρεσίας διαφέρει σε πολλά σημεία σε σχέση με την αντίστοιχη του Gmail που περιγράψαμε προηγουμένως.

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία της Yahoo mail είναι η εξής: Μόλις ο χρήστης ανοίξει το email, αυτομάτως μέσα στο κείμενο υπογραμμίζονται όλες οι ημερομηνίες και μόλις ο κέρσορας του ποντικιού βρεθεί πάνω σε αυτές και πατηθεί μια από αυτές, εμφανίζεται ένα pop-up (αναδυόμενο) παράθυρο.

Έπειτα, με την επιλογή «Add to Calendar», εμφανίζεται ένα δεύτερο pop-up (αναδυόμενο) παράθυρο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να τοποθετήσει πληροφορίες που αφορούν σε μια συνάντηση για τη δεδομένη ημερομηνία.

Όπως παρατηρείται βέβαια, το σκεπτικό της υπηρεσίας mail to calendar στη Yahoo σε καμία περίπτωση δεν θυμίζει το αντίστοιχο σκεπτικό του Gmail, μιας και το μόνο που συμβαίνει στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι να υπογραμμίζονται οι ημερομηνίες χωρίς να εξάγεται άμεσα κάποια πληροφορία για τυχόν συνάντηση που ενδέχεται να υπάρχει στο κείμενο του email.

---

4 [http://help.yahoo.com/tutorials/cal/cal/cal\\_addevent4.html](http://help.yahoo.com/tutorials/cal/cal/cal_addevent4.html)

## 4. Παρουσίαση της υπηρεσίας Mail to Calendar

### 4.1. Παρουσίαση του σκεπτικού

Αξίζει να διευκρινιστεί ότι η πτυχιακή αυτή εργασία βασίστηκε, ως επί το πλείστον, στο σκεπτικό της Google και στην πορεία εξελίχθηκε, κάτι που θα περιγραφεί στη συνέχεια λεπτομερώς.

Για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το Gmail για τη λήψη και επεξεργασία των emails, όπως επίσης και το Google Calendar για την εισαγωγή των γεγονότων/συναντήσεων που ενδεχομένων θα προέκυπταν. Τέλος, χάρη στα APIs<sup>5</sup> που υπάρχουν στο διαδίκτυο, επιτεύχθηκε η αλληλεπίδραση του χρήστη/προγραμματιστή με τις υπηρεσίες του Gmail.

Όπως προαναφέρθηκε, η υπηρεσία mail to calendar βασίζεται στην ιδέα του Gmail. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε επεξεργασία συμβαίνει, με απώτερο σκοπό την εξαγωγή χρονικής πληροφορίας, θα πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε προτάσεις όπου χρειάζεται. Με άλλα λόγια, να εφαρμόζεται σε προτάσεις που περιλαμβάνει κάποια λέξη-κλειδί. Για το σκοπό αυτό θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε ένα λεξικό που θα περιλαμβάνει λέξεις-κλειδιά, όπως για παράδειγμα meeting, meet, dinner, κ.α. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση του χρόνου λειτουργίας της υπηρεσίας, καθώς επίσης και η αποφυγή της παραγωγής «λανθασμένης» πληροφορίας. Είναι βέβαια λογικό πως όσο πληρέστερο λεξικό λέξεων- φράσεων- κλειδιών χρησιμοποιηθεί τόσο καλύτερο θα είναι το αποτέλεσμα.

Για την επεξεργασία, λοιπόν, του email «σπάει» το κείμενο σε προτάσεις με delimiter (οριοθέτη) την τελεία ή το ερωτηματικό. Στη συνέχεια, αναζητούνται προτάσεις οι οποίες περιέχουν κάποια λέξη-κλειδί έτσι ώστε να αναζητηθεί χρονική πληροφορία σε αυτές. Εάν όντως υπάρχει, τότε γίνεται αρχικά tagging, κάτι το οποίο θα βοηθήσει αρκετά τόσο στην κατανόηση του κειμένου όσο και στον εντοπισμό της χρονικής πληροφορίας.

Όπως είναι γνωστό, στις κύριες προτάσεις, η χρονική πληροφορία είτε θα βρίσκεται στην αρχή της πρότασης είτε μετά τη λέξη-κλειδί και προς το τέλος της πρότασης. Αντίθετα, στις δευτερεύουσες προτάσεις η χρονική πληροφορία

---

5 *JavaMail API documentation* <http://javamail.kenai.com/nonav/javadocs/index.html>,  
<http://metoojava.wordpress.com/tag/java-mail-api/>,  
[https://developers.google.com/google-apps/calendar/v2/developers\\_guide\\_java#AuthClientLogin](https://developers.google.com/google-apps/calendar/v2/developers_guide_java#AuthClientLogin)

Βρίσκεται μετά τη λέξη- κλειδί και προς το τέλος της πρότασης.

Η υπηρεσία mail to calendar που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας, στηρίχθηκε στο παραπάνω σκεπτικό για τη σωστή εξαγωγή χρονικής πληροφορίας.

Αρχικά, έχοντας κάνει tagging στην πρόταση είναι δυνατό να γίνει αναζήτηση των conjunctions<sup>6</sup> που εισάγουν δευτερεύουσα πρόταση. Μόλις βρεθεί το conjunction αυτό, η πρόταση χωρίζεται σε κύρια και δευτερεύουσα. Στη συνέχεια, γίνεται αναζήτηση της λέξης-κλειδί ώστε να διευκρινιστεί εάν αυτή βρίσκεται στην κύρια ή στη δευτερεύουσα πρόταση. Εάν βρεθεί στην κύρια πρόταση, γίνεται αναζήτηση για εξαγωγή χρονικής πληροφορίας μονάχα σε αυτή τόσο μετά τη λέξη-κλειδί όσο και στην αρχή της πρότασης. Εάν βρεθεί στην δευτερεύουσα πρόταση, όπως αναφέραμε προηγουμένως, η χρονική πληροφορία αναζητείται μόνο μετά τη λέξη-κλειδί.

Σκοπός του παραπάνω σκεπτικού είναι:

- Η εξαγωγή της χρονικής πληροφορίας από την κύρια πρόταση, στην περίπτωση που δεν βρεθεί μετά τη λέξη-κλειδί, να μπορεί να γίνει και στην αρχή της πρότασης, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει με το Gmail.
- Να καθίσταται εφικτή η εξαγωγή της σωστής χρονικής πληροφορίας. Αυτό σημαίνει πως εάν η λέξη-κλειδί βρίσκεται στη δευτερεύουσα πρόταση, τότε η αναζήτηση χρονικής πληροφορίας γίνεται μόνο σε αυτή την πρόταση. Το ίδιο ισχύει και για την κύρια. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η λανθασμένη εξαγωγή ημερομηνία όπως θα μπορούσε να συμβεί με την παρακάτω πρόταση: «Tomorrow morning I'll speak to Tom in order to organize a meeting with George and Mary». Στην πρόταση αυτή, χάρη στο παραπάνω σκεπτικό, δεν λαμβάνεται κάποια ημερομηνία για το meeting καθώς η λέξη-κλειδί εντοπίζεται στη δευτερεύουσα πρόταση στην οποία δεν υπάρχει κάποια ημερομηνία. Ομοίως, στο παρακάτω παράδειγμα φαίνεται η σωστή χρήση της υπηρεσίας mail to calendar χάρη στο σκεπτικό που περιγράφηκε. «Tomorrow morning I'll call Joanna in order to remind her that the day after tomorrow is John's birthday». Εδώ παρατηρείται ότι και στις δυο προτάσεις έχουμε χρονική πληροφορία και ότι στην πρόταση που υπάρχει η λέξη-κλειδί «birthday» θα πάρουμε σαν ημερομηνία την «the day after tomorrow» και όχι το «tomorrow».

---

6 <http://esl.about.com/library/beginner/bleasypreps.htm>



Πλέον, έχοντας ήδη κάνει το απαραίτητο tagging σε πρόταση η οποία περιέχει κάποια λέξη-κλειδί, είναι δυνατό να αναγνωριστεί η χρονική πληροφορία μετά τη λέξη-κλειδί. Αυτό μπορεί να γίνει, αρχικά, αναζητώντας μετά από τη λέξη κάποιο conjunction που να εισάγει χρονική πληροφορία.

Η χρονική πληροφορία που εισάγεται με τα conjunctions μπορεί να είναι είτε σε απλή μορφή, π.χ. : «at 22/12/2012» είτε σε πιο ελεύθερη μορφή, π.χ. : «on May the 21st». Στα πλαίσια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας, επιτεύχθηκε η εξαγωγή χρονικής πληροφορίας και με τις δυο παραπάνω μορφές.

Η χρονική πληροφορία μπορεί επίσης, να εξαχθεί από μια περισσότερο ελεύθερη μορφή, όπως για παράδειγμα : «tomorrow», «the day after tomorrow». Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα λεξικό το οποίο περιλαμβάνει λέξεις και φράσεις- κλειδιά με τα οποία δηλώνεται χρόνος-ημερομηνία.

Συνοπτικά, για τη σωστή λήψη χρονικής πληροφορίας, εφαρμόζεται η διαδικασία που ακολουθεί:

- (1) Αναζήτηση time conjunctions<sup>7</sup> αμέσως μετά τη λέξη- κλειδί.
- (2) Εάν από τα conjunctions αυτά παράγεται χρονική πληροφορία, τότε αυτή λαμβάνεται ως η ζητούμενη ημερομηνία, η οποία θα συνδέεται με τη λέξη-κλειδί.
- (3) Σε διαφορετική περίπτωση, γίνεται αναζήτηση μετά τη λέξη κλειδί κάποιας άλλης λέξης, η οποία να περιλαμβάνεται στο λεξικό χρόνου που έχει δημιουργηθεί ώστε να παραχθεί η κατάλληλη ημερομηνία.
- (4) Εάν εξετάζεται κάποια κύρια πρόταση θα πρέπει, στην περίπτωση που δεν έχει εξαχθεί χρονική πληροφορία, να αναζητηθούν time conjunction στην αρχή της πρότασης και να εκτελεστούν τα βήματα 2 και 3 προκειμένου να είναι δυνατή η εξαγωγή χρονικής πληροφορίας (αν υπάρχει) στην αρχή της πρότασης.
- (5) Εάν δεν έχει βρεθεί χρονική πληροφορία, δεν μπορεί να εξαχθεί κάποια πληροφορία από τη δεδομένη πρόταση.

Έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των unread emails

---

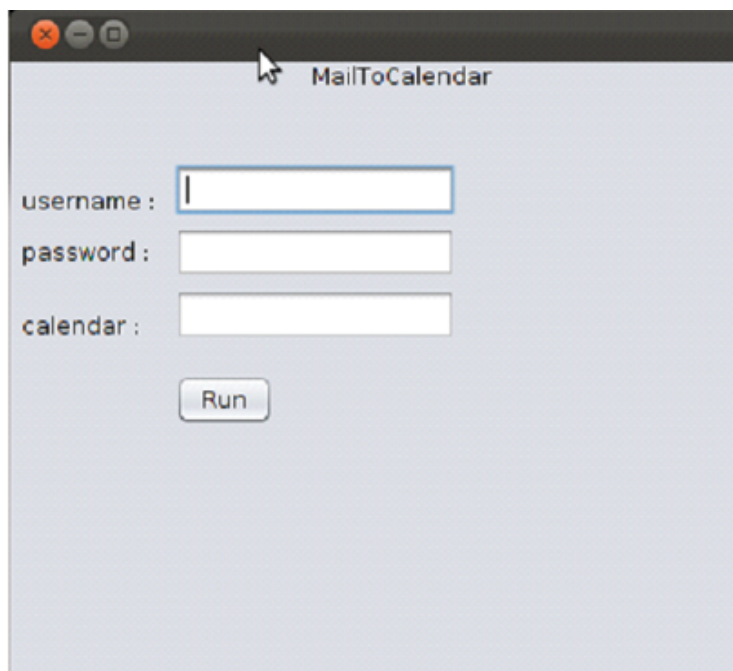
7 <http://www.chompchomp.com/terms/subordinateconjunction.htm>

(αδιάβαστα ηλεκτρονικά μηνύματα), πλέον απαιτείται η εισαγωγή της εξαγόμενης πληροφορίας στο Google calendar.

#### 4.2. Παρουσίαση της λειτουργίας

Στο παρών υποκεφάλαιο παρατίθεται η λειτουργία της υπηρεσίας mail to calendar, η οποία δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Με την έναρξη του προγράμματος που δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, ο χρήστης έρχεται αντιμέτωπος με ένα παράθυρο, στο οποίο καλείται να τοποθετήσει το username και password του λογαριασμού Gmail που έχει, καθώς και το όνομα calendar στο οποίο θέλει να τοποθετηθούν οι εγγραφές που τυχόν παραχθούν από τα unread emails του.



Εικόνα 1: Παράθυρο για εισαγωγή username, password και calendar

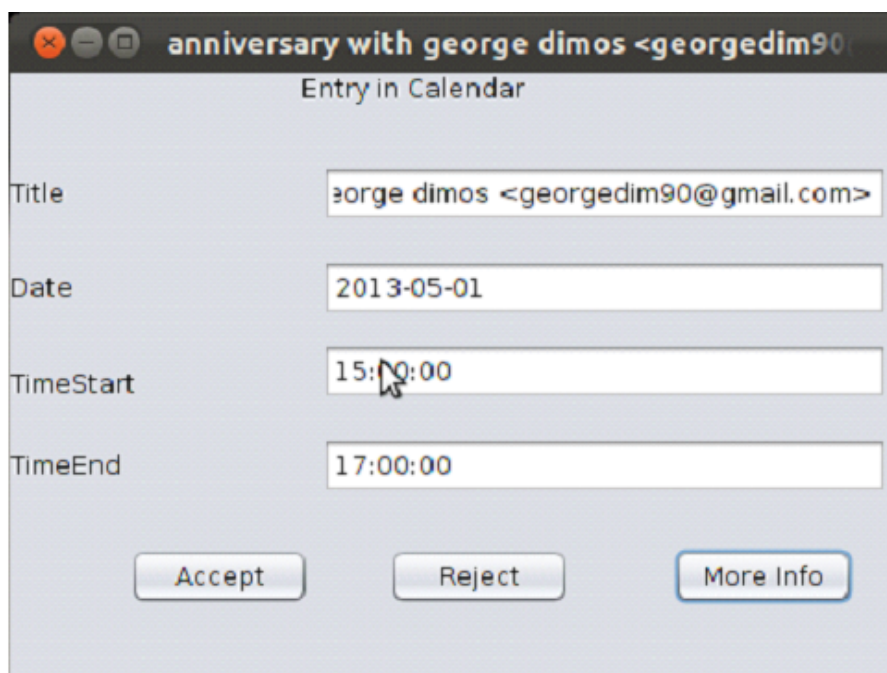
Έπειτα, σε περίπτωση που υπάρχουν unread emails και αυτά περιέχουν εξαγόμενη πληροφορία για κάποιο γεγονός, εμφανίζεται ένα καινούριο παράθυρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Αυτό περιλαμβάνει τις εξής εξαγόμενες πληροφορίες:

- Τον τίτλο του γεγονότος που θα δημιουργηθεί

- Την ημερομηνία που υπολογίστηκε από το πρόγραμμα
- Την ώρα που ξεκινάει το γεγονός
- Την ώρα που τελειώνει το γεγονός

Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να αλλαχθούν, αν τυχόν θέλει ο χρήστης.

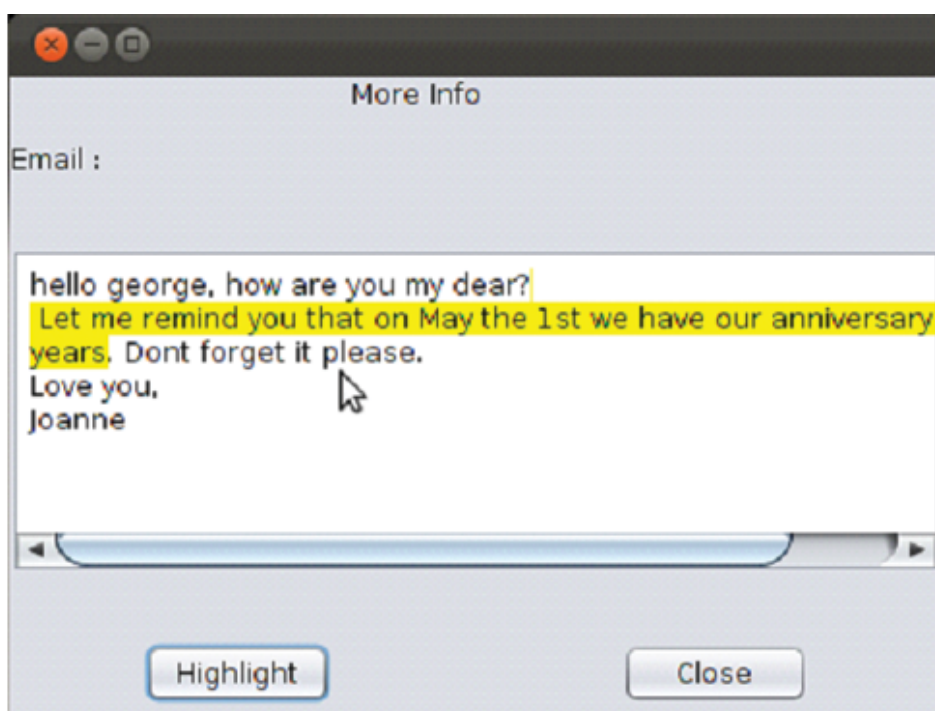
Το παράθυρο αυτό περιλαμβάνει επίσης και 3 κουμπιά. Πατώντας το accept, το γεγονός, έτσι όπως παρουσιάζεται στο παράθυρο, θα περαστεί μέσα στο calendar. Πατώντας το reject κλείνει το παράθυρο χωρίς να αποθηκευτεί κάποια πληροφορία, ενώ πατώντας το More Info εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο.



The image shows a window titled "anniversary with george dimos <georgedim90...>". Inside the window, the title is "Entry in Calendar". There are four input fields: "Title" with the value "george dimos <georgedim90@gmail.com>", "Date" with "2013-05-01", "TimeStart" with "15:00:00", and "TimeEnd" with "17:00:00". At the bottom, there are three buttons: "Accept", "Reject", and "More Info".

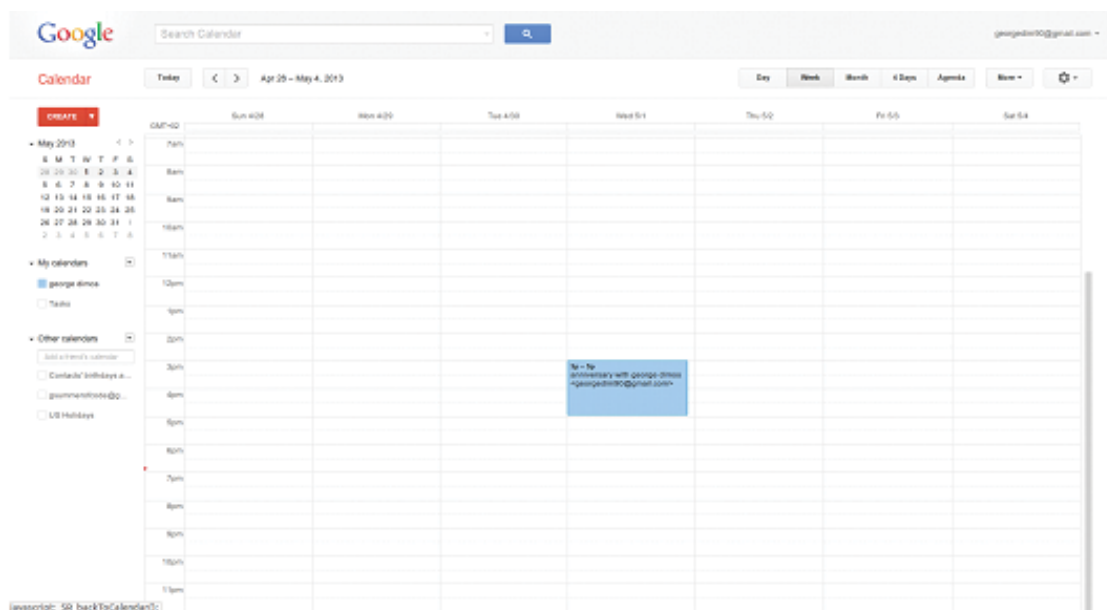
Εικόνα 2: Παράθυρο με τις εξαγόμενες πληροφορίες

Στο νέο παράθυρο (Εικόνα 3) εμφανίζεται όλο το email όπως φαίνεται παρακάτω, ενώ πατώντας το κουμπί Highlight χρωματίζεται η πρόταση από την οποία παράχθηκε η εξαγόμενη πληροφορία.



Εικόνα 3: Παράθυρο με το περιεχόμενο του email

Τέλος, μετά τη σύνδεση στο Google Calendar παρατηρείται ότι το παραγόμενο γεγονός μαζί με τα χαρακτηριστικά τα οποία εμφανίστηκαν στο παράθυρο (Εικόνα 3) έχουν εισαχθεί σε αυτό, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Παράθυρο που παρουσιάζεται η εισαγωγή στο calendar της παραγόμενης πληροφορίας

## 5. Συμπεράσματα

Έχοντας, πλέον, ολοκληρώσει την πτυχιακή εργασία μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με την υπηρεσία mail to calendar.

Η ανάλυση κειμένου που πραγματοποιείται στο περιεχόμενο των emails μπορεί να επιφέρει πολύ σημαντικά αποτελέσματα. Τόσο η εξαγωγή χρονικής πληροφορίας αυτόματα όσο και η ταυτόχρονη εισαγωγή της στο calendar προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να οργανώνει καλύτερα το χρόνο του και να ενημερώνεται, ανά πάσα στιγμή, για τα επικείμενα ραντεβού του. Είναι αδιαμφισβήτητο το γεγονός ότι ιδιαίτερα στις μέρες μας η μεγαλύτερη ανάγκη του σύγχρονου ανθρώπου είναι η εύρεση ελεύθερου χρόνου. Συνεπώς, χάρη στην υπηρεσία mail to calendar, το πρόβλημα περιορίζεται και η καθημερινή ζωή απλοποιείται. Πλέον, με την εισαγωγή στο λογαριασμό του mail και το πάτημα ορισμένων πλήκτρων, εξασφαλίζεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Με άλλα λόγια, ο χρήστης μπορεί να έχει σε ένα calendar όλα τα σημαντικά για εκείνον ραντεβού, υποχρεώσεις, συναντήσεις, ακόμη και υπενθυμίσεις για γιορτές και επετείους.

Εν κατακλείδι, το αντικείμενο της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας αφορά σε ένα αντικείμενο ιδιαίτερα ενδιαφέρον από επιστημονικής απόψεως. Στα πλαίσια της πτυχιακής αυτής εργασίας μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ένα αρκετά μικρό μέρος του αντικειμένου της εξόρυξης κειμένου. Στο μέλλον, με συνεχή απασχόληση και δημιουργικές ιδέες, θα μπορούσε η υπηρεσία αυτή να εξελιχθεί σημαντικά και να αποδώσει σπουδαία αποτελέσματα σε πολλούς επιστημονικούς και μη, τομείς.

## Αναφορές

- [1] H. Buchholz, A. Dusterhoft, B. Thalheim, 1996, Capturing Information on Behavior with the RADD\_NLI: A Linguistic and Knowledge Base Approach
- [2] Siqing Du, 2008, On the use of natural language processing for automated conceptual data-modelling
- [3] Ronen Feldman, James Sanger, 2007, The Text Mining Handbook, Advanced



### Approaches in Analyzing Unstructured Data

- [4] Leonid Kof, 2004, Natural Language Processing For Requirements Engineering: Applicability To Large Requirements Documents
- [5] [KOF 05] Leonid Kof, 2005, Natural Language Processing: Mature Enough for Requirements Documents Analysis
- [6] D.L. McGuinness and J. Wright, 1998, Conceptual Modeling for Configuration: A Description Logic-based Approach. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing - special issue on Configuration

Αθανάσιος Ε. Μπαλμπακάκης

a.mpalmpakakis@di.uoa.gr

# Γραφο-θεωρητική Μελέτη της Απόδοσης σε Χρονικά Εξελισσόμενα Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα Κορμού

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων κορμού και στην εξέλιξη της απόδοσής τους στο πέρασμα του χρόνου. Η εργασία ξεκινά με την παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου της Θεωρίας των Δικτύων. Γίνεται αναφορά και παρουσίαση συγκεκριμένων μετρικών που σχετίζονται με την απόδοση. Έπειτα επιλέγονται οι χρονικά εξελισσόμενες τοπολογίες οκτώ δικτύων κορμού και γίνεται μελέτη της απόδοσης τους με βάση τις σχετικές μετρικές. Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη σχεδίαση και προστασία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Λέξεις κλειδιά: Χρονική εξέλιξη δικτύων, μετρικές απόδοσης δικτύων, στατιστική ανάλυση δικτύου, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα κορμού, Θεωρία Γράφων

## Επιβλέποντες

Βαρουτάς Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής |  
Μανιαδάκης Δημήτριος, Επιστημονικός συνεργάτης

## 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιαστεί έντονη αύξηση στο ενδιαφέρον για τη μελέτη των δικτύων. Η ύπαρξη δικτύων γύρω μας τις πιο πολλές φορές δεν είναι αντιληπτή, ωστόσο δίκτυα κοινωνικά και τεχνολογικά πλαισιώνουν την καθημερινότητά μας και επηρεάζουν τον τρόπο ζωής μας. Η μελέτη των δικτύων αφορά την κατανόηση της δομής και της λειτουργίας τους και την προσπάθεια βελτίωσής τους. Η μελέτη αυτή δημιούργησε με τον καιρό μια ολόκληρη επιστήμη, την Επιστήμη των Δικτύων και της Θεωρίας Δικτύων.

Μέρος της επιστήμης αυτής αποτελούν τα «πολύπλοκα δίκτυα» [1]. Ένα πολύπλοκο δίκτυο είναι πρακτικά ένας μαθηματικός γράφος, ο οποίος όμως αντικατοπτρίζει κάποιο πραγματικό δίκτυο. Ένας από τους κύριους λόγους πίσω από την έκρηξη του ενδιαφέροντος για τα πολύπλοκα δίκτυα είναι η γενικότητα και η προσαρμοστικότητά τους στο να αναπαριστούν εικονικά οποιοδήποτε φυσική δομή, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων οι οποίες υπόκεινται συχνά σε τοπολογικές αλλαγές (δυναμικές ή μη). Στην πραγματικότητα κάθε διακριτή δομή μπορεί να αναπαρασταθεί με κάποιο συγκεκριμένο είδος γράφου.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας εργαλεία από την Επιστήμη των Δικτύων, γίνεται μελέτη της απόδοσης σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα κορμού. Ένα δίκτυο κορμού είναι μία γραμμή μεταφοράς υψηλής χωρητικότητας, η οποία μεταφέρει δεδομένα τα οποία εισχωρούν σε αυτή από γραμμές μεταφοράς μικρότερης χωρητικότητας [2]. Ενώνει μικρότερα τοπικά δίκτυα και αποτελεί την κύρια οδό πληροφοριών μέσα στο ευρύτερο δίκτυο. Αποτελεί την «ραχοκοκαλιά» των δικτύων.

Θέλοντας να μελετήσουμε την απόδοση τέτοιων δικτύων, πρέπει να καθορίσουμε τι εννοούμε όταν αναφερόμαστε στην απόδοση. Η απόδοση ενός δικτύου έχει άμεση σχέση με τη διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου [3]. Με απλά λόγια, η απόδοση μελετάει το πόσο αποτελεσματικό είναι το δίκτυο στο να φέρει εις πέρας το έργο το οποίο του έχει ανατεθεί ή το έργο για το οποίο έχει κατασκευαστεί. Ωστόσο, μελετώντας την απόδοση των δικτύων, παρατηρούμε ότι δεν εξαρτάται από μία συγκεκριμένη παράμετρο, αλλά από πολλές και διαφορετικές κάθε φορά. Σκεπτόμενοι τι μπορεί να επηρεάζει την απόδοση ενός δικτύου δεν είναι δυνατό να μπορέσουμε να καταλήξουμε σε ένα μέγεθος. Τοπολογικές ιδιότητες του δικτύου που καθορίζουν πόσο γρήγορο είναι το δίκτυο, πόσο σταθερό είναι σε αλλαγές, πόσο πολύπλοκο είναι κ.α. έχουν άμεση

σχέση με την απόδοσή του.

Το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας δομείται σε τέσσερις παραγράφους. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφονται και αναλύονται οι μετρικές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της απόδοσης, στη τρίτη παράγραφο γίνεται μια σύντομη αναφορά στα δεδομένα (πραγματικά δίκτυα κορμού) που χρησιμοποιήθηκαν, στη τέταρτη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και στην πέμπτη παράγραφο αναφέρονται τα συμπεράσματα της μελέτης.

## 2. Μετρικές απόδοσης

Ερευνώντας κανείς τη βιβλιογραφία για μετρικές οι οποίες χαρακτηρίζουν την απόδοση των δικτύων, συναντά ποικιλία εννοιών και μεγεθών. Έννοιες όπως η ελαστικότητα (resilience), η σταθερότητα (stability), η ευπάθεια (vulnerability), η ανθεκτικότητα (robustness), η επίδοση (performance), η ευελιξία (flexibility), η αξιοπιστία (reliability), η αποδοτικότητα (efficiency), η επιβιωσιμότητα (survivability) και η εντροπία (entropy), συναντώνται συχνά. Οι μαθηματικά ορισμένες και περισσότερο εφαρμόσιμες στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα από αυτές επιλέχθηκαν για μελέτη στην παρούσα εργασία και αναλύονται σε αυτή την παράγραφο.

### Ευπάθεια (Vulnerability)

Η ευπάθεια ενός πολύπλοκου δικτύου περιγράφει τη συμπεριφορά του δικτύου όταν αυτό υπόκειται σε κάποια αναμενόμενη (ή μη αναμενόμενη) «επίθεση» σε κάποιο κόμβο ή ακμή του [4]. Η ευπάθεια δίνεται από τη σχέση:

$$v(G) = \exp \left\{ \frac{\sigma}{n} + n - |E| - 2 + \frac{2}{n} \right\} \quad (1)$$

όπου  $n$  είναι το πλήθος των κόμβων,  $|E|$  το πλήθος των ακμών και

$$\sigma = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( gr_i - \frac{2|E|}{n} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

όπου  $gr_i$  ο βαθμός του κόμβου  $i$ .

Ο μαθηματικός αυτός τύπος περιγράφει την ευπάθεια πληρώντας τις εξής προϋποθέσεις:

- Οι τιμές του είναι αμετάβλητες σε περίπτωση ισόμορφων δικτύων (δίκτυα τα οποία αποτελούνται από το ίδιο πλήθος κόμβων και ακμών, και οι κόμβοι τους συνδέονται κατ' απόλυτη αντιστοιχία όμοια μεταξύ τους, αλλά μπορεί να παρουσιάζουν διαφορές στην τοποθεσία που βρίσκεται κάποιος ή κάποιοι κόμβοι του).
- Αν ένας γράφος  $G'$  προέρχεται από κάποιο γράφο  $G$  με την προσθήκη στον τελευταίο μιας ακμής, τότε ισχύει  $\nu(G') \leq \nu(G)$
- Μέσω αυτού του μαθηματικού τύπου η ευπάθεια είναι υπολογίσιμη πολυωνυμικά συναρτήσει του πλήθους των κόμβων του δικτύου

Η ευπάθεια του πολύπλοκου δικτύου παίρνει τιμές στο  $[0,1]$ . Όσο μεγαλύτερες οι τιμές τόσο πιο ευπαθές είναι το σύστημα σε επιθέσεις.

### Αλγεβρική συνδεσιμότητα (Algebraic Connectivity)

Η αλγεβρική συνδεσιμότητα σχετίζεται με την ανθεκτικότητα του δικτύου. Αλγεβρική συνδεσιμότητα ενός δικτύου ονομάζεται η δεύτερη μικρότερη ιδιοτιμή του λαπλασιανού πίνακα που προκύπτει από το δίκτυο αυτό. Για ένα γράφο  $G$  όπου  $N$  και  $L$  τα σύνολα των κόμβων και των ακμών αντίστοιχα και  $|N|$  και  $|L|$  τα πλήθη τους, ο λαπλασιανός πίνακας  $Q = Q(G)$  είναι ένας πίνακας  $N \times N$  που ορίζεται ως:

$$Q_{ij} = \begin{cases} D_i, & \text{αν } i = j \\ -1, & \text{αν } i \neq j \text{ και } (i, j) \in L \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3)$$

όπου  $D_i$  είναι ο βαθμός του κόμβου  $i$ .

Αν ένα δίκτυο έχει αλγεβρική συνδεσιμότητα 0, το δίκτυο αυτό είναι μη συνδεδεμένο, άρα όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές της αλγεβρικής συνδεσιμότητας τόσο πιο ανθεκτικό είναι το δίκτυο σε αλλαγές. Η αλγεβρική συνδεσιμότητα τις περισσότερες φορές παίρνει τιμές μεταξύ του 0 και του 1, αλλά μπορεί να πάρει και τιμή ίση με την τιμή του πλήθους κόμβων ενός δικτύου, όταν όλα τα ζεύγη



κόμβων του είναι συνδεδεμένα [5].

### Αποδοτικότητα (Efficiency)

Αποδοτικότητα ενός γράφου  $G$  με  $N$  κόμβους και  $V$  ακμές, ορίζεται ως η μέση τιμή των αποδοτικοτήτων κάθε ζεύγους κόμβων από τους  $N$ . Η αποδοτικότητα ( $e$ ) δύο κόμβων ορίζεται ως το αντίστροφο μέγεθος της ελάχιστης απόστασης ( $d$ ) μεταξύ δύο κόμβων (δηλ. για δύο κόμβους  $i$  και  $j$  η αποδοτικότητα είναι  $e_{ij} = 1/d_{ij}$ ). Οπότε η αποδοτικότητα του γράφου  $G$  είναι [6]:

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (4)$$

Η αποδοτικότητα παίρνει τιμές στο  $(0,1]$ . Αποδοτικότητα με τιμή 1 σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου συνδέονται άμεσα ο ένας με τον άλλο. Μεγάλες τιμές της αποδοτικότητας σημαίνουν μεγάλη αντοχή του δικτύου σε αλλαγές και μικρότερα ελάχιστα μονοπάτια μεταξύ των κόμβων, άρα πιο ευέλικτο δίκτυο [7].

### ΠΣΖΚ (ποσοστό συνδεδεμένων ζευγών κόμβων)

Εισάγουμε ένα νέο μέγεθος το οποίο βοηθά στη μελέτη της αποδοτικότητας ενός πολύπλοκου δικτύου. Έστω γράφος  $G$  με σύνολο κόμβων  $N$ . Με τον όρο ΠΣΖΚ περιγράφεται το ποσοστό των ζευγών κόμβων τα οποία παραμένουν συνδεδεμένα ύστερα από την αφαίρεση  $\zeta$  κόμβων [8].

$$\text{ΠΣΖΚ}(\zeta) = \frac{Z_{\sigma}(\zeta)}{Z_{\sigma\lambda}} \quad (5)$$

όπου  $Z_{\sigma}(\zeta)$  το πλήθος των ζευγών κόμβων τα οποία παραμένουν συνδεδεμένα ύστερα από την αφαίρεση  $\zeta$  τυχαίων κόμβων, και  $Z_{\sigma\lambda}$  το πλήθος όλων των ζευγών κόμβων του γράφου  $G$  που είναι συνδεδεμένοι.

Όσο περισσότερα ζευγάρια κόμβων παραμένουν συνδεδεμένα τόσο λιγότερο χάνεται η συνοχή του δικτύου και άρα το δίκτυο είναι πιο ανθεκτικό σε αλλαγές. Όσο μεγαλύτερες λοιπόν είναι η τιμές του ΠΣΖΚ τόσο πιο ανθεκτικό είναι το δίκτυο.

## Κανονικοποιημένη διαμεσότητα (Normalized betweenness centrality)

Η κανονικοποιημένη διαμεσότητα ενός γράφου ορίζεται ως:

$$\text{κανονικοποιημένη διαμεσότητα} = \frac{\text{μέγιστη κεντρικότητα διαμεσότητας}}{\text{μέση κεντρικότητα διαμεσότητας}} \quad (6)$$

όπου η κεντρικότητα διαμεσότητας μετρά το πόσες φορές ένας κόμβος ενεργεί «σαν γέφυρα» στα συντομότερα μονοπάτια των υπόλοιπων ζευγών κόμβων μέσα σε ένα δίκτυο.

Εξ' ορισμού της, η κανονικοποιημένη διαμεσότητα, μπορεί να αποτελέσει μέγεθος το οποίο να σχετίζεται με την ανθεκτικότητα ενός δικτύου. Παρατηρώντας τον μαθηματικό τύπο που την ορίζει, διαπιστώνουμε ότι παίρνει τιμές στο  $[1, +\infty)$ . Τιμή κανονικοποιημένης διαμεσότητας 1, σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου έχουν την ίδια τιμή κεντρικότητας διαμεσότητας. Σε αυτή την περίπτωση κάθε κόμβος του δικτύου είναι εξίσου «σημαντικός», όσον αφορά τη διαμεσότητα, με αποτέλεσμα το δίκτυο να μην είναι επιρρεπές σε στοχευμένες επιθέσεις, ενώ σε μια μη στοχευμένη επίθεση η απώλεια ενός εκ των πολλών «σημαντικών» κόμβων του δικτύου ίσως να μην του προκαλούσε ιδιαίτερη ζημιά. Έτσι όσο πιο κοντά στο 1 είναι οι τιμές της κανονικοποιημένης διαμεσότητας τόσο πιο ανθεκτικό είναι το δίκτυο σε αλλαγές ή επιθέσεις.

## Εντροπία (Entropy)

Η εντροπία ενός γράφου αντικατοπτρίζει ποσοτικά την τυχαιότητα ενός δικτύου. Είναι μέγεθος που μετρά την ανικανότητα του δικτύου να λειτουργήσει ενώ χρησιμοποιείται και σαν μέγεθος για την κατανόηση της αταξίας ενός γράφου. Άρα, μεγαλύτερα ποσά εντροπίας υποδηλώνουν πιο χαοτικό και άτακτο δίκτυο. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ποικίλοι μαθηματικοί ορισμοί της εντροπίας [9], οι οποίοι όμως κατά πλειοψηφία παρουσιάζουν παρόμοιες συμπεριφορές. Θέλοντας να υπολογιστεί η εντροπία σε συγκεκριμένα δίκτυα, επιλέχτηκαν για την εντροπία οι εξής μαθηματικοί τύποι:

$$\bullet \quad E = -\sum_{k=1}^{N_p} q(k) \log_2(q(k)) \quad (7)$$

όπου  $N_p$  ο μέγιστος βαθμός κόμβου του γράφου και  $q(k) = \frac{(k+1)p_{k+1}}{\sum_1^{N_p} kp_k}$ ,

όπου  $p_k$  η κατανομή βαθμού του δικτύου, δηλαδή η πιθανότητα ένας τυχαίος γράφος του να έχει βαθμό  $k$  [10]. Ο μαθηματικός τύπος αυτός στηρίζεται στην ομοφυλία των κόμβων του δικτύου. Δίκτυα με μικρό συντελεστή ομοφυλίας παρουσιάζουν μεγάλη εντροπία.

$$\bullet E = -\frac{1}{2}N(N-1)[p \log_2 p + (1-p) \log_2 (1-p)] \quad (8)$$

όπου  $N$  το πλήθος των κόμβων του γράφου και  $p$  η πιθανότητα κάποιο τυχαίο ζευγάρι κόμβων να είναι άμεσα συνδεδεμένο [11]. Ο μαθηματικός τύπος αυτός βασίζεται στην αταξία του γράφου με βάση την τοπολογία του, ή πιο συγκεκριμένα στο πώς συνδέονται οι κόμβοι μεταξύ τους.

### 3. Περιγραφή δεδομένων

Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία λήφθηκαν από την ιστοσελίδα του topology-zoo. Το topology-zoo είναι μια βιβλιοθήκη δεδομένων η οποία περιέχει τοπολογίες πραγματικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων, επιπέδου PoP (Point of Presence).

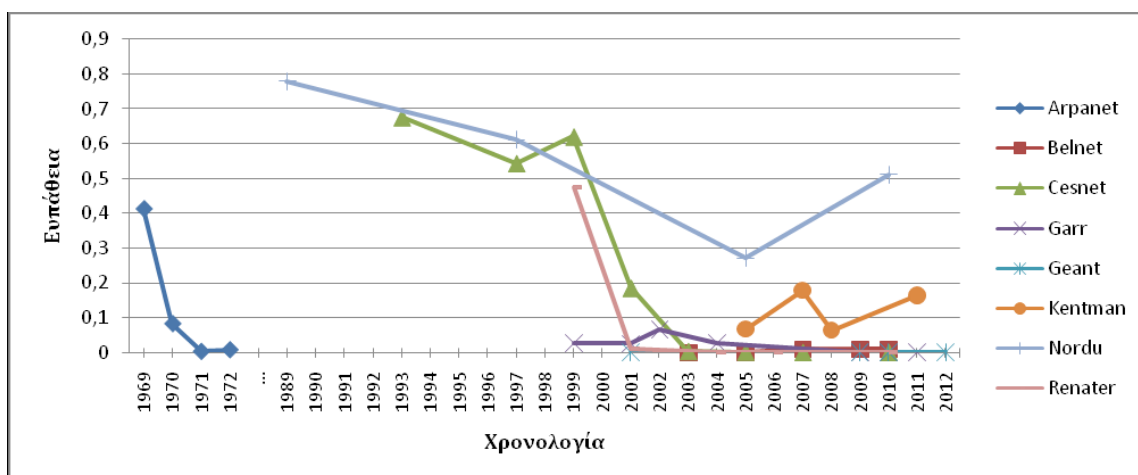
Οι τοπολογίες του topology-zoo, περιγράφονται με τη χρήση μη κατευθυνόμενων γράφων, οι οποίοι είναι δομημένοι κατάλληλα ώστε να περιέχουν όλα τα τοπολογικά χαρακτηριστικά των εκάστοτε δικτύων που αναπαριστούν. Οι τοπολογίες αυτές είναι διαθέσιμες μέσω της ιστοσελίδας [www.topology-zoo.org](http://www.topology-zoo.org) σε μορφή GML ή GraphML αρχείων, ενώ ο τρόπος συλλογής τους και ταξινόμησής τους αναλύεται σε σχετική δημοσίευση [12].

Θέλοντας να μελετηθεί και η χρονική εξέλιξη σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, η επιλογή από τη συλλογή δεδομένων του topology-zoo έγινε με βάση το πλήθος των χρονικών στιγμιότυπων που είχε το κάθε δίκτυο. Επιλέχθηκαν λοιπόν δίκτυα για τα οποία υπάρχει διαθεσιμότητα δεδομένων από τουλάχιστον 4 χρονικά στιγμιότυπα. Συγκεκριμένα αυτά είναι τα: Arpanet, Belnet, Cesnet, Garr, Geant, Kentman, Nordu, Renater.

## 4. Αποτελέσματα εξέλιξης της απόδοσης

Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μετρικών απόδοσης των οκτώ επιλεγμένων δικτύων, σε συνάρτηση με το χρόνο σε έτη.

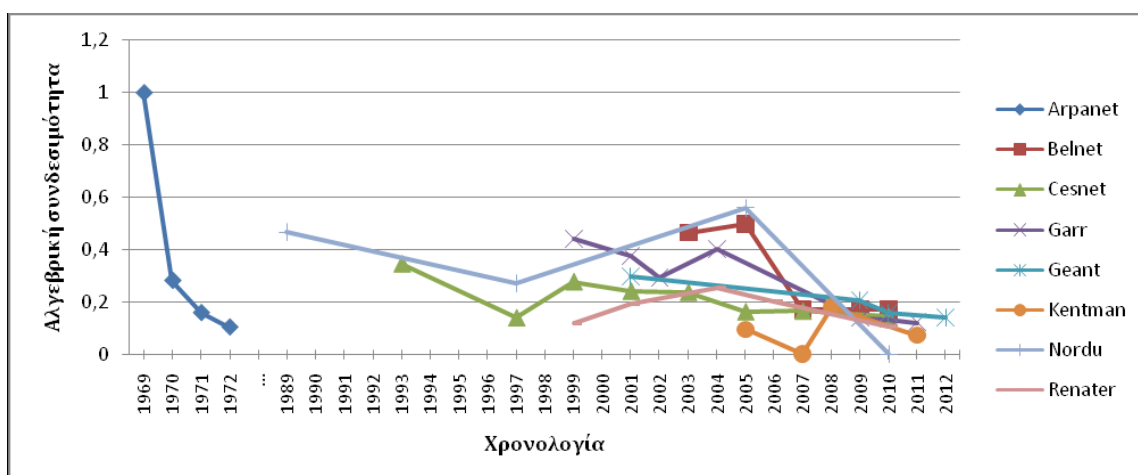
### Ευπάθεια



Σχήμα 1: Συγκεντρωτικό γράφημα εξέλιξης της ευπάθειας

Από το Σχήμα 1 διακρίνεται ότι κατά πλειοψηφία η ευπάθεια των τηλεπικοινωνιακών δικτύων μειώνεται. Παρατηρώντας και τη μαθηματική εξίσωση που περιγράφει την ευπάθεια η μείωση της ευπάθειας στο πέρασμα του χρόνου φαίνεται να οφείλεται στον μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης των κόμβων των δικτύων σε σχέση με το ρυθμό αύξησης των ακμών τους.

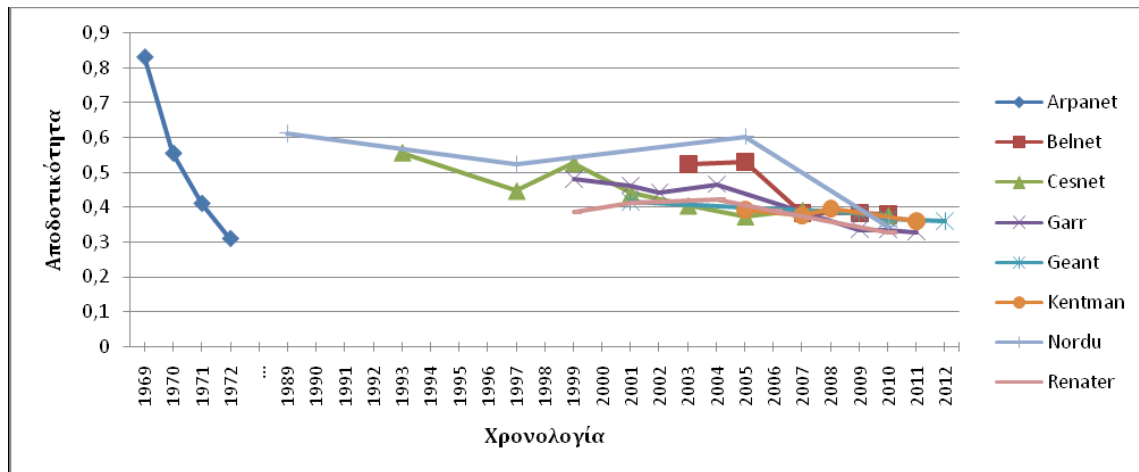
### Αλγεβρική συνδεσιμότητα



Σχήμα 2: Συγκεντρωτικό γράφημα εξέλιξης της αλγεβρικής συνδεσιμότητας

Η αλγεβρική συνδεσιμότητα φαίνεται να μειώνεται και στα οκτώ δίκτυα. Μικρότερες τιμές της αλγεβρικής συνδεσιμότητας οδηγούν σε λιγότερο ανθεκτικό δίκτυο.

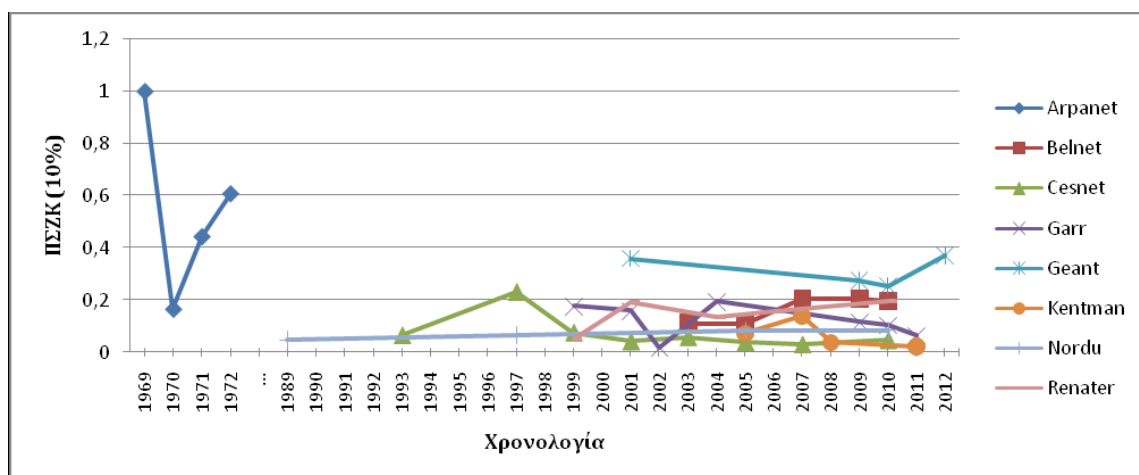
### Αποδοτικότητα



Σχήμα 3: Συγκεντρωτικό γράφημα εξέλιξης της αποδοτικότητας

Η αποδοτικότητα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων φαίνεται να ελαττώνεται στο χρόνο. Όντας μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο με το πλήθος των κόμβων και λόγω του φαινομένου προσθήκης κόμβων στα δίκτυα με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχει μείωση του μέσου ελάχιστου μονοπατιού, η αποδοτικότητα στα δίκτυα έχει πτωτική τάση.

### ΠΣΖΚ (με αφαίρεση 10% κόμβων, με φθίνουσα σειρά κεντρικότητας βαθμού)



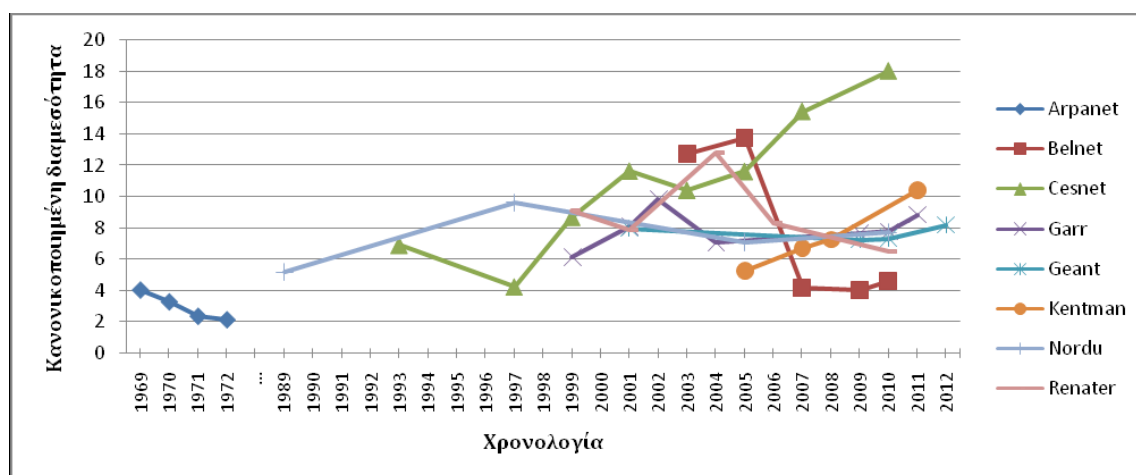
Σχήμα 4: Συγκεντρωτικό γράφημα εξέλιξης του ΠΣΖΚ με αφαίρεση 10% κόμβων



Κατά μία έννοια, από τον τρόπο που έχει οριστεί, το ΠΣΖΚ περιγράφει το μέγεθος της ζημιάς που θα προκαλούσε μια στοχευμένη ή μη επίθεση στο δίκτυο. Δεν διακρίνεται κάποια συγκεκριμένη τάση στο μέγεθος αυτό. Κάθε δίκτυο παρουσιάζει διαφορετική ανθεκτικότητα στις επιθέσεις ως προς το μέγεθος αυτό. Σαν γενική εικόνα φαίνεται τα περισσότερα δίκτυα να διατηρούν, σχετικά στα ίδια επίπεδα, τις τιμές τους σε αυτό το μέγεθος.

Προς αποφυγή λανθασμένων εντυπώσεων, η τιμή 1 του δικτύου Arpanet το έτος 1969, δεν υποδηλώνει τέλεια αντοχή του δικτύου. Η τιμή είναι 1, καθώς το δίκτυο στο συγκεκριμένο χρονικό στιγμιότυπο έχει τέσσερις κόμβους και άρα αφαίρεση 10% κόμβων από τους τέσσερις, δεν οδηγεί σε αφαίρεση κόμβων.

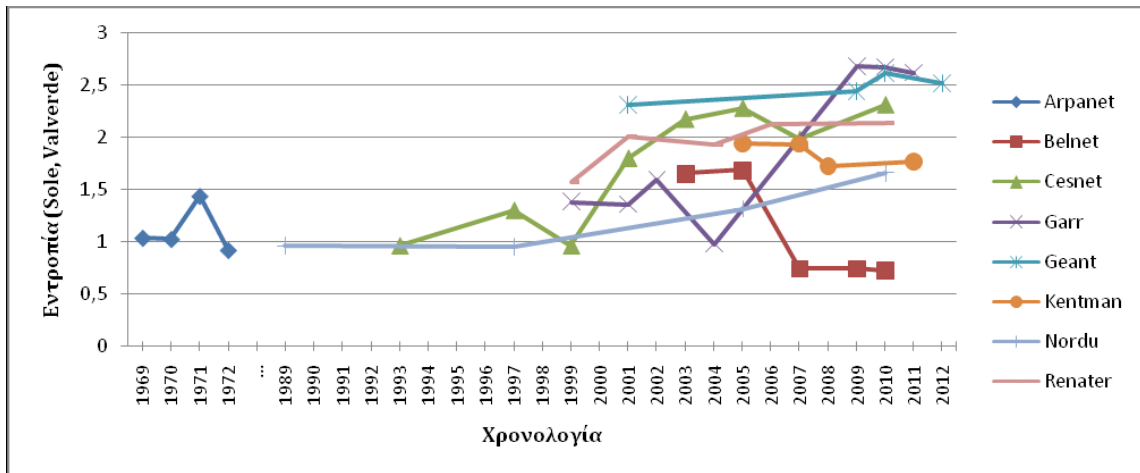
### Κανονικοποιημένη διαμεσότητα



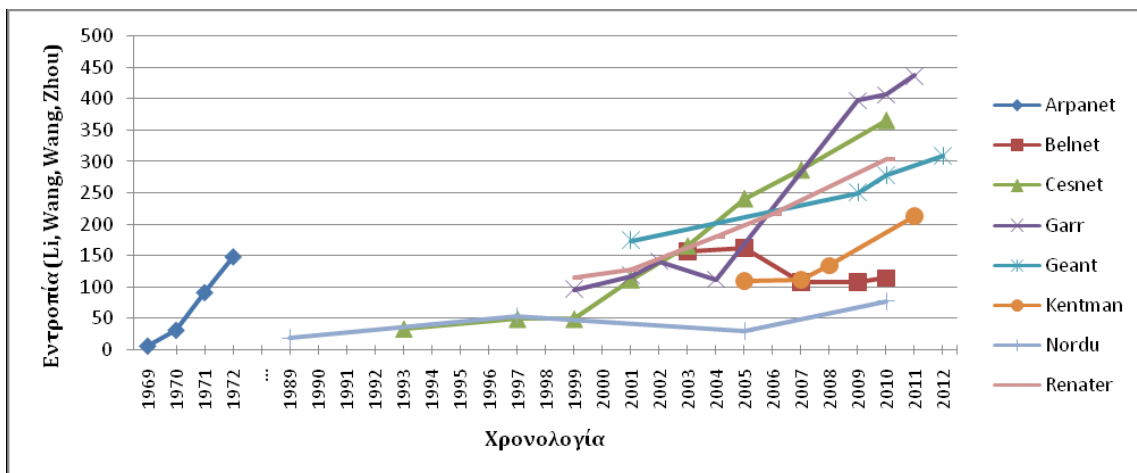
Σχήμα 5: Συγκεντρωτικό γράφημα εξέλιξης της κανονικοποιημένης διαμεσότητας

Η συμπεριφορά της κανονικοποιημένης διαμεσότητας ποικίλει μεταξύ των δικτύων. Πιο συγκεκριμένα στα δίκτυα Cesnet, Garr, Geant, Kentman και Nordu, η κανονικοποιημένη διαμεσότητα φαίνεται να αυξάνεται, το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στα δίκτυα αυτά η κεντρικότητα βαθμού δεν «μοιράζεται» σε όλους τους κόμβους και άρα γίνονται επιρρεπή σε στοχευμένες κυρίως επιθέσεις. Τα υπόλοιπα τρία δίκτυα δείχνουν πτωτική τάση στη κανονικοποιημένη διαμεσότητα τους πράγμα που τα καθιστά ανθεκτικότερα ως προς αυτό το μέγεθος.

## Εντροπία



Σχήμα 6: Συγκεντρωτικό γράφημα εξέλιξης της εντροπίας με βάση Valverde, Sole [10]



Σχήμα 7: Συγκεντρωτικό γράφημα εξέλιξης της εντροπίας με βάση Li, Wang, Wang, Zhou [11]

Με εξαίρεση τα δίκτυα Arpanet και Kentman οι δύο μαθηματικοί τύποι οδηγούν σε ίδιες συμπεριφορές της εντροπίας των δικτύων στο χρόνο. Όλα τα δίκτυα, με εξαίρεση το Belnet φαίνεται κατά την εξέλιξη τους στο χρόνο να αποκτούν πιο άτακτη δομή και να γίνονται πιο ασταθή.

## 5. Συμπεράσματα

Μελετώντας τη συμπεριφορά των δικτύων στο χρόνο τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα εξής:

- Από μεριάς αλγεβρικής συνδεσιμότητας, αποδοτικότητας, κανονικοποιημένης διαμεσότητας και εντροπίας, τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, κατά πλειοψηφία, φαίνεται να χάνουν την απόδοση τους καθώς εξελίσσονται.
- Η ευπάθεια, ως μετρική που περιγράφει την απόδοση των δικτύων, φαίνεται να δείχνει ότι τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα γίνονται πιο αποδοτικά στο πέρασμα του χρόνου. Αυτό προκαλεί αντίφαση με τα αποτελέσματα των υπόλοιπων μετρικών που μελετήθηκαν. Η αντίφαση αυτή έχει συζητηθεί ξανά στη βιβλιογραφία για τέτοιες μετρικές [5].
- Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα τα οποία περιέχουν αρκετούς κύκλους στη δομή τους φαίνεται να παρουσιάζουν καλύτερα στατιστικά στοιχεία ως προς την απόδοση τους σε σχέση με τα υπόλοιπα δίκτυα.
- Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που έχουν μεγάλο λόγο πλήθους ακμών προς πλήθος κόμβων, όπως ήταν αναμενόμενο είναι πολύ αποδοτικά ως προς όλες τις μετρικές που μελετήθηκαν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το δίκτυο Geant.
- Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που έχουν μεγάλη πυκνότητα φαίνεται να είναι περισσότερο αποδοτικά.

Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δεν φαίνεται κάπου αλλού στην βιβλιογραφία να μελετάται η απόδοση των δικτύων σε συνάρτηση με το χρόνο. Επίσης, η μελέτη τους οδηγεί σε πληθώρα συμπερασμάτων σαν αυτά που μόλις προαναφέρθηκαν.

Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα στο σχεδιασμό και την προστασία των δικτύων. Μέχρι τώρα φαίνεται ότι ο σχεδιασμός των τηλεπικοινωνιακών δικτύων γίνεται εμπειρικά, έχοντας ως βάση οικονομικά ή εμπορικά κριτήρια. Ωστόσο, αν κατά το σχεδιασμό συμπεριληφθούν υπ' όψη μετρικές απόδοσης σαν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και έχουν γίνει κατανοητά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη

αυτών των μετρικών, τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που θα προκύψουν θα είναι πιο ανθεκτικά, πιο ευέλικτα στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων τους, και εν τέλει πιο αποδοτικά.

Η εκτεταμένη μορφή της εργασίας αυτής έγινε δεκτή για παρουσίαση στο 18th European Conference on Networks and Optical Communications & 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC 2013/OC&I 2013), July 10-12, 2013, Graz, Austria με τον τίτλο «On the Temporal Evolution of Backbone Topological Robustness»

[http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU\\_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i4510/noc2013](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i4510/noc2013)

## Αναφορές

- [1] Wikipedia, “Complex network”, Wikipedia: The free encyclopedia, Nov 2012; [http://en.wikipedia.org/wiki/Complex\\_networks](http://en.wikipedia.org/wiki/Complex_networks) [Προσπελάστηκε 19/11/2012]
- [2] Margaret Rouse, “backbone”, SearchTelecom, Nov 2012; <http://searchtelecom.techtarget.com/definition/backbone> [Προσπελάστηκε 19/11/2012]
- [3] Wikipedia, “Network performance”, Wikipedia: The free encyclopedia, Nov 2012; [http://en.wikipedia.org/wiki/Network\\_performance](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_performance) [Προσπελάστηκε 19/11/2012]
- [4] R. Criado, J. Flores, B. Hernández-Bermejo, J. Pello, and M. Romance, “Effective measurement of network vulnerability under random and intentional attacks”, presented at J. Math. Model. Algorithms, 2005, pp.307-316.
- [5] Ellen van der Meer, “Comparing measures of network robustness”, Research Paper Business Analytics, July 6, 2012.

- [6] Latora V, Marchiori M, “Efficient behavior of small-world networks”, Phys Rev Lett 2001, 87:198701.
- [7] W. Ellens and R.E. Kooij, “Graph measures and network robustness”, preprint, 2011.
- [8] Sebastian Neumayer, Gil Zussman, Reuven Cohen, Eytan Modiano, “Assessing the Vulnerability of the Fiber Infrastructure to Disasters”, IEEE/ACM Trans. Netw., Vol. 19, Nr. 6 (2011) , p. 1610-1623.
- [9] Dehmer M, Mowshowitz A, “A history of graph entropy measures”, Information Sciences, 2010.
- [10] S. Valverde, R.V. Solé, “Hierarchical Small Worlds in Software Architecture”, Working paper of Santa Fe Institute, SFI/03-07-44, 2003.
- [11] Li Ji, Wang Bing-Hong, Wang Wen-Xu, Zhou Tao, “Network Entropy Based on Topology Configuration and Its Computation to Random Networks”, Chinese Physics Letters, Vol. 25, No. 11, 2008.
- [12] Simon Knight, Hung X. Nguyen, Nickolas Falkner, Rhys Bowden, Matthew Roughan, “The Internet Topology Zoo”, IEEE Journal On Selected Areas In Communications, Vol 29, No. 9, October 2011.



Αντωνία Δ. Σαραβάνου

antoniasar@di.uoa.gr

## Σύνοψη Ανασκοπήσεων Προϊόντος

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία προτείνουμε μία μέθοδο που εξάγει και κάνει περίληψη όλων των κριτικών (reviews) που έχει δεχθεί ένα προϊόν σε κάποιο διαδικτυακό κατάστημα (e-shop). Η υλοποίηση μας για τη δημιουργία περίληψης διαφέρει από τις ήδη υπάρχουσες, καθότι εξάγουμε μόνο τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προϊόντος για τα οποία οι αγοραστές εκφράζουν θετική ή αρνητική γνώμη. Η προσέγγισή μας βασίζεται στο σύνολο των κριτικών και δεν επαναδιατυπώνουμε κάποιες προτάσεις για να βρούμε τα βασικά στοιχεία τους, όπως στις κλασικές μεθόδους για δημιουργία περίληψης. Το σύστημα που δημιουργήσαμε χωρίζεται σε τρία βήματα: (1) εύρεση των χαρακτηριστικών του προϊόντος τα οποία σχολιάζουν οι αγοραστές, (2) εύρεση των προτάσεων που περιέχουν γνώμη σε κάθε κριτική (review) και κατηγοριοποίηση τους σε θετικές ή αρνητικές προτάσεις και (3) δημιουργία περίληψης από τα αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά: Εξόρυξη κειμένου, Ανάλυση συναισθήματος, Αναγνώριση χαρακτηριστικών, Δημιουργία περίληψης, Τεχνικές συσταδοποίησης

### Επιβλέπων

Γουνόπουλος Δημήτριος, Καθηγητής

## 1. Εισαγωγή

Οι κριτικές προϊόντων είναι πολύ σημαντικές πηγές πληροφοριών για ένα προϊόν. Είναι πολύ χρήσιμες όχι μόνο για τους πελάτες που ανταλλάζουν απόψεις και επιτυχίες για την αγορά ενός προϊόντος, αλλά και για τους εμπόρους που λαμβάνουν ανατροφοδότηση για τα προϊόντα τους. Δυστυχώς, λόγω του μεγάλου αριθμού κριτικών είναι δύσκολο για κάποιον να ψάξει και να αξιοποιήσει τις πηγές πριν αποφασίσει να προβεί σε μία αγορά.

Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα, δημιουργήσαμε ένα σύστημα περίληψης κριτικών που αυτόματα επεξεργάζεται ένα μεγάλο πλήθος κριτικών και εξάγει περίληψη με τις πληροφορίες που περιέχονται στις κριτικές. Ο στόχος του συστήματος είναι διττός. Πρώτα, χρησιμοποιούμε έναν αποδοτικό τρόπο για να εντοπίσουμε τα χαρακτηριστικά του προϊόντος και τις γνώμες που υπάρχουν για αυτά (προσδιορισμό χαρακτηριστικών προϊόντος) και στη συνέχεια συνοψίζουμε όλες αυτές τις γνώμες σε μία περίληψη (δημιουργία περίληψης).

Στον προσδιορισμό χαρακτηριστικών προϊόντος, η μέθοδος μας πρώτα εντοπίζει τα χαρακτηριστικά του προϊόντος που εμφανίζονται συχνά. Δείχνουμε ότι ο συνδυασμός μίας νέας ευρετικής, χρησιμοποιώντας τους συντακτικούς ρόλους μέσα στις προτάσεις σε ένα από τα πιο γνωστά συστήματα, πετυχαίνει καλύτερα αποτελέσματα. Στη δημιουργία περίληψης, υλοποιήσαμε ένα αλγόριθμο συσταδοποίησης που πρώτα εντοπίζει ένα σύνολο προτάσεων που αναφέρονται στο ίδιο χαρακτηριστικό, και στη συνέχεια αναλύει το συναίσθημα τους και παράγει την περίληψη. Αντίθετα με άλλες δουλειές, αυτό το σύστημα παράγει μία αναγνώσιμη από χρήστες περίληψη και δείχνει τα χαρακτηριστικά του προϊόντος και τις γνώμες για αυτά.

## 2. Προγενέστερες και σχετικές εργασίες

### 2.1. Ανάλυση συναισθήματος

Η ανάλυση συναισθήματος αναφέρεται στην εφαρμογή της επεξεργασίας φυσικής γλώσσας, υπολογιστικής γλωσσολογίας, και ανάλυση κειμένου για τον εντοπισμό και την εξαγωγή υποκειμενικής πληροφορίας. Είναι η υπολογιστική επεξεργασία της υποκειμενικότητας (αν υπάρχει συναίσθημα), η πολικότητα συναισθήματος (θετική, αρνητική, ουδέτερη ή σε κλίμακα συναισθήματος), καθώς

και το περιεχόμενο γνώμης στις πληροφορίες (κάτοχος γνώμης, το θέμα της γνώμης, κλπ.), που κρύβεται πίσω από ένα τμήμα κειμένου. Υπάρχουν επίπεδα της διακριτότητας σε τμήμα κειμένου: πρώτα έρχεται το επίπεδο των μεμονωμένων λέξεων, μετά φράσεις, προτάσεις, και τελικά ολόκληρο το κείμενο.

Σε επίπεδο λέξης, οι Hatzivassiloglou και McKeown [5] προέβλεψαν το δυαδικό σημασιολογικό προσανατολισμό των επιθέτων. Χρησιμοποίησαν συνδέσμους κειμένου (π.χ., «και», «αλλά») σε ένα μεγάλο σώμα εκπαίδευσης μεταξύ του επιθέτου-στόχος και μιας λίστας επιθέτων με χειροκίνητα σχολιασμένη πολικότητα, επιτυγχάνοντας μια μέση ακρίβεια 82%. Οι Turney et al. [16] έχουν συγκρίσημα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας λέξεις-στόχους με χρήση όχι μόνο ουσιαστικών, αλλά και επιθέτων, ρημάτων και επιρρημάτων. Πρόσφατα, οι Hu και Liu [7] υλοποίησαν το WordNet [12]. Η πρώτη επιτυχία της ανάλυσης συναισθήματος σε επίπεδο λέξεων ήταν η δημιουργία μπλοκ για τη μελέτη μεγαλύτερων τμημάτων κειμένου [17]. Επιπροσθέτως, για τον εντοπισμό προσανατολισμού συναισθήματος, οι Yu και Hatzivassiloglou [19], υπολογίζουν την πολικότητα κάθε επιθέτου και λέξης με συναίσθημα που εμφανίζεται στην πρόταση. Παρ' όλα αυτά, ο εντοπισμός της πολικότητας μίας πρότασης είναι ανεπαρκής στην περιοχή των κριτικών προϊόντος. Στην πραγματικότητα πρέπει να εντοπίσεις τη γνώμη μέσα σε μία πρόταση. Πρόσφατα οι Ding et al. [3] πρότειναν μία μέθοδο που λύνει αυτό το πρόβλημα με τη χρήση γραμματικών κανόνων μεταξύ των λέξεων σε μία πρόταση. Η τεχνική αυτή κατόρθωσε να έχει 92% σωστά αποτελέσματα.

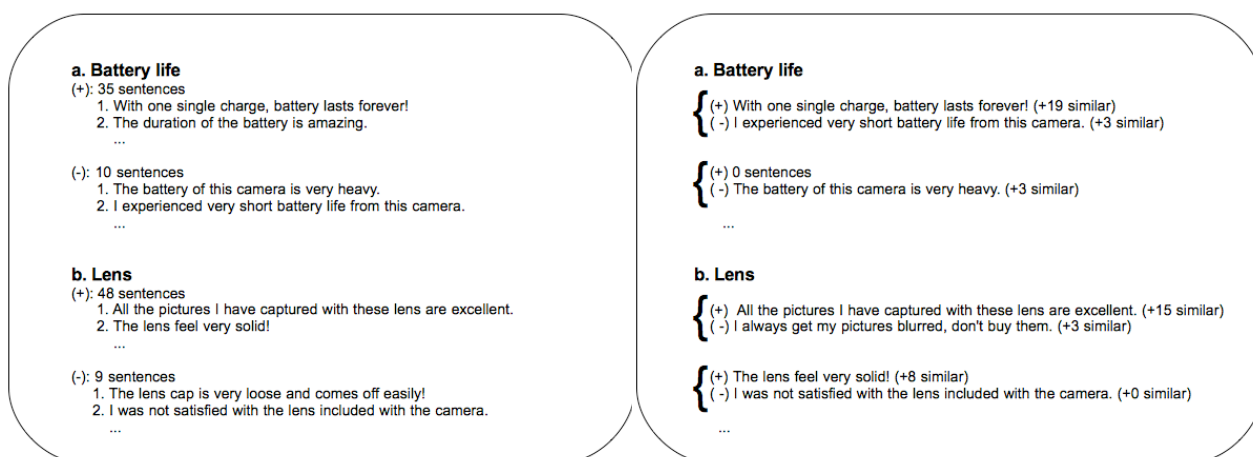
## 2.2. Δημιουργία περίληψης

Για επιφανειακές πληροφορίες οι χρήστες επιλέγουν περιλήψεις όπως αυτές που παράγουν τα συστήματα των Turney et al. [16] και Liu et al. [10]. Εν τούτοις, οι τεχνικές για δημιουργία περίληψης μεταξύ πολλών κειμένων ταιριάζουν περισσότερο. Το κύριο όφελος της περίληψης πολλαπλών κειμένων είναι η καθαρή δημιουργία του εγγενούς πλεονασμού της εισόδου, που προκύπτουν από παρόμοιες πληροφορίες που εμφανίζονται σε διαφορετικές πηγές. Οι Barzilay et al. [2] προτείνουν μία μέθοδο που δεν χρειάζεται κάποιος να έχει υπόβαθρο για το θέμα που πραγματεύονται τα κείμενα.

### 3. Προτεινόμενη μέθοδος

#### 3.1. Κίνητρο

Αρχικά χρησιμοποιήσαμε κάποια συστήματα όπως Google Product, Bing Shopping, Hu's [6] και τα συγκρίναμε με την περίληψη που εξάγει το δικό μας σύστημα.

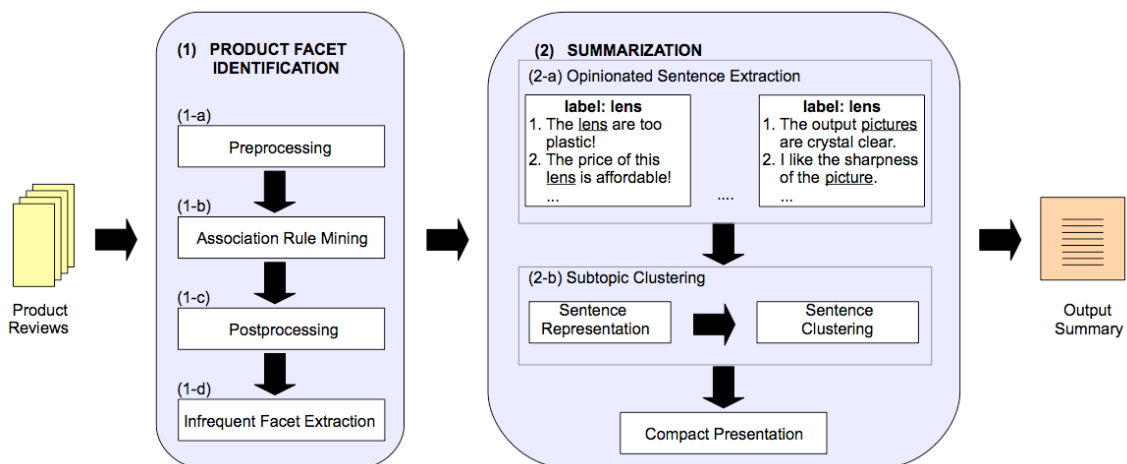


Σχήμα 1: Σύγκριση περιλήψεων από υπάρχοντα συστήματα (αριστερά) και αυτό που προτείνουμε εμείς (δεξιά)

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε δύο είδη περιλήψεων, η πρώτη είναι αυτή που εξάγουν τα ήδη υπάρχοντα συστήματα και η δεύτερη αυτή που βγάζει το δικό μας. Στην πρώτη περίληψη, για κάθε χαρακτηριστικό έχουμε μη οργανωμένες θετικές απόψεις και αρνητικές απόψεις και το πλήθος τους, ενώ στη δεύτερη για κάθε χαρακτηριστικό έχουμε ζευγάρια αντικρουόμενων θετικών και αρνητικών απόψεων και το πλήθος των προτάσεων που είναι όμοιες.

#### 3.2. Επισκόπηση συστήματος

Στο σχήμα 2 παρουσιάζουμε μία οπτικοποιημένη έκδοση για το πως λειτουργεί το σύστημά μας. Το χωρίζουμε σε δύο βασικές φάσεις, την φάση εξαγωγής των χαρακτηριστικών και την φάση της περίληψης. Για την περίληψη χρησιμοποιούμε μόνο το κείμενο της κριτικής και όχι ημερομηνία, τίτλο, όνομα συγγραφέα, βαθμολογία προϊόντος κ.λ.π., ώστε η τεχνική μας να γενικεύεται πιο εύκολα.



Σχήμα 2: Προεπισκόπηση συστήματος

Στην πρώτη φάση, προεπεξεργαζόμαστε τις προτάσεις κάθε κριτικής με το Part-of-Speech Tagger (POS) για να βρούμε τί μέρος του λόγου είναι η κάθε λέξη. Στο επόμενο βήμα, συλλέγουμε μόνο τα ουσιαστικά/φράσεις από ουσιαστικά ή τα επίθετα και από αυτά βρίσκουμε ποιιά είναι τα πιο συχνά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, έρχεται η φάση της μεταεπεξεργασίας για να αφαιρέσουμε τα περιττά χαρακτηριστικά. Επίσης χρησιμοποιήσαμε και όλα τα επίθετα που συνοδεύουν αυτά τα χαρακτηριστικά.

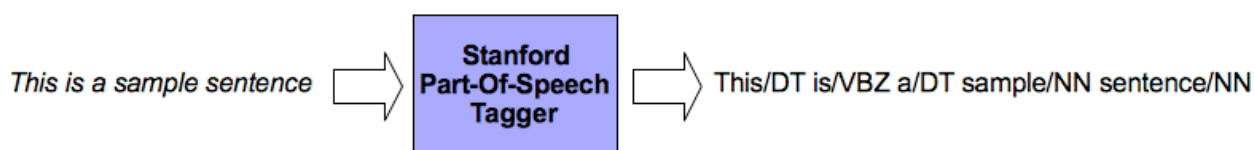
Στη φάση της περίληψης, η είσοδος είναι ομάδες από προτάσεις που ανήκουν σε κάθε ένα χαρακτηριστικό του προϊόντος που βρήκαμε στην προηγούμενη φάση. Προεπεξεργαζόμαστε τη λίστα με τα χαρακτηριστικά για να αφαιρέσουμε τα χαρακτηριστικά που έχουν μικρή σημασία. Στη συνέχεια, βάζουμε ετικέτα στις προτάσεις το όνομα του χαρακτηριστικού για το οποίο μιλάνε. Από αυτές ξεχωρίζουμε τις προτάσεις που μιλάνε για το ίδιο χαρακτηριστικό από τις υπόλοιπες για το μοντέλο συσταδοποίησης. Το μοντέλο αυτό πρώτα καθορίζει μία «αναπαράσταση της πρόταση» βασιζόμενο στην ομοιότητα μεταξύ δύο προτάσεων, και συνδυάζει ίδιες προτάσεις για να παράξουν συστάδες. Η έξοδος του μοντέλου είναι είσοδος στο μοντέλο «συμπαγής αναπαράσταση», το οποίο εφαρμόζει τεχνικές ανάλυσης συναισθήματος και δημιουργίας περίληψης για τη δημιουργία της τελικής περίληψης.

## 4. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών προϊόντος

### 4.1. Προεπεξεργασία

#### 4.1.1. Part-of-Speech Tagging

Για να επεξεργαστούμε κάθε πρόταση, υλοποιούμε το Stanford Part-Of-Speech Tagger (POS Tagger) [15] το οποίο διαβάζει κείμενο και αντιστοιχίζει κάθε λέξη με μία ετικέτα για το τί μέρος του λόγου είναι. Για παράδειγμα:



Σχήμα 3: POS-Tagging

όπου DT, VBZ και NN μαζί με άλλα τοποθετούνται στο παρακάτω πίνακα:

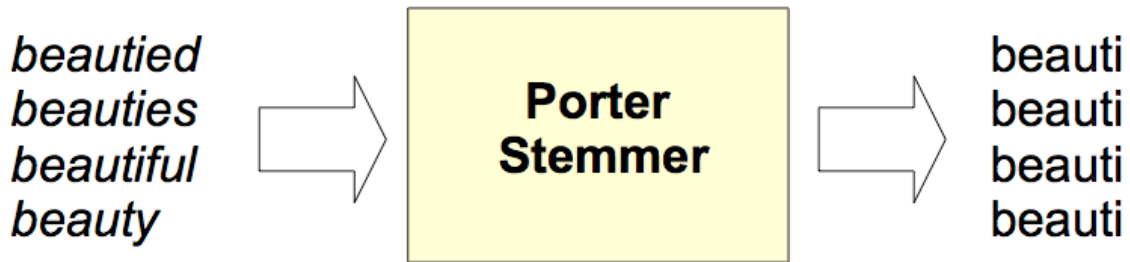
DT	Determiner	RB	Adverb
JJ	Adjective	VB	Verb, base form subsumes imperatives, infinitives and subjunctives
JJR	Adjective, comparative	VBD	Verb, past tense includes the conditional form of the verb to be
JJS	Adjective, superlative	VBG	Verb, gerund or present participle
NN	Noun, singular or mass	VBN	Verb, past participle
NNP	Proper Noun, singular	VBP	Verb, non-3rd person singular present
NNPS	Proper Noun, plural	VBZ	Verb, 3rd person singular present
NNS	Noun, plural		

Πίνακας 1: Μερικά tags με αντιστοίχιση σε μέρη του λόγου



#### 4.1.2. Stemmed version

Στη συνέχεια τα ουσιαστικά/φράσεις ουσιαστικών με τις ετικέτες περνάνε από τον Porter Stemmer[13] που αφαιρεί τις καταλήξεις από τις λέξεις. Οι λέξεις που προκύπτουν δεν είναι πάντα πραγματικές λέξεις. Για παράδειγμα οι παρακάτω λέξεις:



Σχήμα 4: Porter Stemmer

#### 4.1.3. Συντακτικοί ρόλοι

Το σύστημα των Hu and Liu [6] βρίσκει ως υποψήφια χαρακτηριστικά μίας φωτογραφικής μηχανής, λέξεις όπως: «light», «hand», «time», «month» και «hour». Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα, εισάγουμε τη χρήση του συντακτικού ρόλου κάθε λέξης στην πρόταση, μιας και έχουμε παρατηρήσει ότι τα χαρακτηριστικά έχουν συνήθως ρόλο αντικειμένου ή υποκειμένου. Για να βρούμε τη γραμματική δομή της πρότασης χρησιμοποιήσαμε το Stanford Dependency Parser [8] που βρίσκει ποιά ομάδα από λέξεις «πάνε μαζί» και ποιές λέξεις είναι αντικείμενα/ υποκείμενο του ρήματος κλπ. Για παράδειγμα οι παρακάτω προτάσεις:

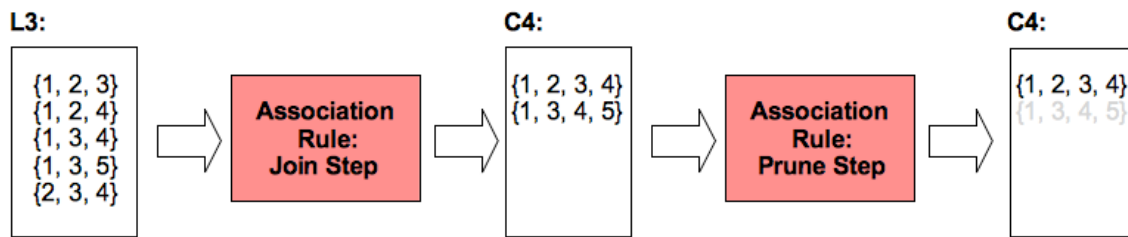


Σχήμα 5: Lex-Parser

## 4.2. Εξόρυξη με κανόνες συσχέτισης (Association Rules)

Σε αυτό το σημείο χρησιμοποιήσαμε κανόνες συσχέτισης [1] για να εντοπίσουμε βάσει στατιστικών στοιχείων όλα τα συχνά εμφανιζόμενα χαρακτηριστικά που

ικανοποιούν το ελάχιστο support. Για παράδειγμα:



Σχήμα 6: Association Rule

### 4.3. Μεταεπεξεργασία

Ένα μεγάλο πλήθος ουσιαστικών και φράσεων από ουσιαστικά εμφανίζονται στις κριτικές, αλλά δεν είναι όλα χαρακτηριστικά ενώ κάποια από αυτά ίσως δεν είναι ενδιαφέροντα ή είναι περιττά. Με χρήση κανόνων αφαιρούμε τα άχρηστα ουσιαστικά/φράσεις ουσιαστικών.

#### 4.3.1. Κλάδεμα χρησιμότητας (Usefulness Pruning)

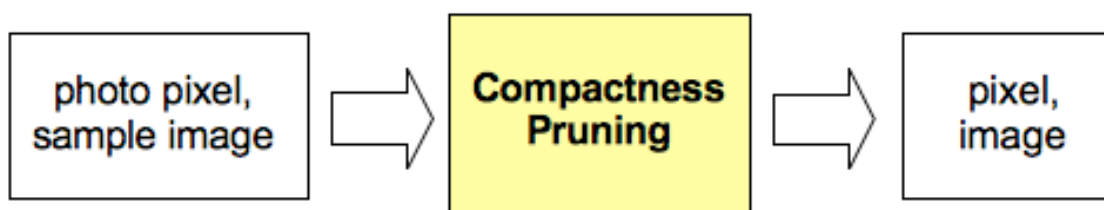
Σε αυτό το σημείο αφαιρούμε τα χαρακτηριστικά που δεν έχουν νόημα. Πιο συγκεκριμένα, σε μία κριτική φωτογραφικής μηχανής, η φράση «διάρκεια ζωής» δεν σχετίζεται με το προϊόν, ενώ η φράση «διάρκεια ζωής της μπαταρίας» αφορά σε ένα χαρακτηριστικό της φωτογραφικής μηχανής. Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα, υπολογίζουμε σε πόσες προτάσεις εμφανίζεται το υποψήφιο χαρακτηριστικό χωρίς να συνοδεύεται από άλλα ουσιαστικά. Αν το νούμερο αυτό είναι κάτω από ένα κατώφλι μπορούμε να κρατήσουμε το υπερσύνολο της φράσης που περιέχει το υποψήφιο χαρακτηριστικό, αλλιώς κρατάμε και τα δύο. Σχηματικά φαίνεται ένα παράδειγμα, όταν το πλήθος εμφανίσεων του «life» είναι κάτω από το κατώφλι:



Σχήμα 7: The Usefulness Pruning

### 4.3.2. Συμπαγές κλάδεμα (Compactness Pruning)

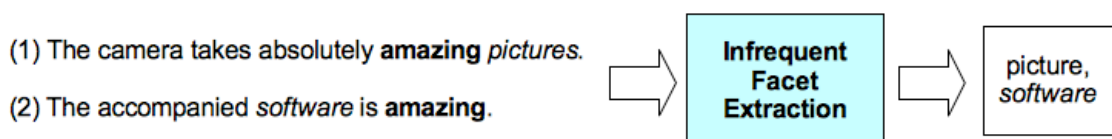
Ένα άλλο πρόβλημα που έχουμε είναι ότι για κάποια χαρακτηριστικά κρατάμε μία φράση, ενώ για να τα αναγνωρίσουμε αρκούν λιγότερες λέξεις. Για παράδειγμα, το «pixel», είναι πιο εύχρηστο από το «photo pixel». Για κάθε λέξη της φράσης υπολογίζουμε μία αναλογία για το βάρος που έχει η φράση και το βάρος που έχει κάθε λέξη μόνη της. Αν οποιοδήποτε από τα δύο βάρη είναι μικρότερο από το κατώφλι, τότε κλαδεύουμε τη φράση. Το παραπάνω φαίνεται σχηματικά:



Σχήμα 8: The Compactness Pruning

### 4.4. Εξαγωγή χαρακτηριστικών με μη συχνή εμφάνιση (Infrequent Facet Extraction)

Σε αυτή τη φάση είναι δύσκολο να ανακαλύψουμε τα πιο σπάνια χαρακτηριστικά, γιατί έχουν μικρό βάρος. Οι χρήστες συνήθως δίνουν ίδια επίθετα για να χαρακτηρίσουν ακόμα και τα μη συχνά εμφανιζόμενα χαρακτηριστικά του προϊόντος. Ακολουθεί παράδειγμα:



Σχήμα 9: The Infrequent Facet Extraction Step.

Στην πρόταση (1), η λέξη «pictures» είναι ένα συχνό χαρακτηριστικό το οποίο το αναγνωρίζουμε, ενώ στην πρόταση (2) η λέξη «software» είναι ένα μη συχνό. Και τα δύο χαρακτηριστικά όμως προσδιορίζονται από το επίθετο «amazing». Η ευρετική μας δουλεύει ως εξής:

- (i) Βρίσκουμε όλα τα συχνά χαρακτηριστικά.
- (ii) Αν μία πρόταση περιέχει κάποιο ουσιαστικό που προσδιορίζεται από ένα ή περισσότερα επίθετα που χαρακτηρίζουν και κάποιο από αυτά που βρήκαμε στο (i), τότε προσθέτουμε και αυτό στη λίστα με τα χαρακτηριστικά.

## 5. Δημιουργία περίληψης

### 5.1. Εξαγωγή προτάσεων που περιέχουν γνώμη

Στο βήμα αυτό προσθέτουμε μία ετικέτα σε κάθε πρόταση ανάλογη με το χαρακτηριστικό που περιέχει. Μία πρόταση μπορεί να έχει περισσότερες από μία ετικέτες. Για την περίληψη χρησιμοποιούμε μόνο τις προτάσεις που περιέχουν γνώμη. Για να το πετύχουμε αυτό, χρησιμοποιούμε τις τεχνικές ανάλυσης συναισθήματος που περιγράφονται στο [3].

#### 5.1.1. Κλάδεμα ομοιότητας

Υπάρχουν περισσότερες από μία λέξεις που αντιστοιχίζονται στο ίδιο χαρακτηριστικό, π.χ. picture - image - photo. Στο σύστημα των Hu and Liu [6] όμως, αντιμετωπίζονται σαν ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιούμε την τεχνική των Kong et al. [11] και υπολογίζουμε την ομοιότητα μεταξύ δύο χαρακτηριστικών. Αν η ομοιότητα ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, τα χαρακτηριστικά προσμετρούνται ως ένα.

#### 5.1.2. Αναπαράσταση πρότασης και μέτρηση ομοιότητας

Αφού εντοπίσουμε τα χαρακτηριστικά του προϊόντος, αναλύονται οι προτάσεις ως προς την υποκειμενικότητά τους. Χρησιμοποιούμε μία απλή αναπαράσταση των προτάσεων, μαζί με ένα σύστημα μέτρησης ομοιότητας πρότασης [9].

Ο αλγόριθμος ξεκινάει αναγνωρίζοντας «έννοιες» στην πρόταση [18]. Οι «έννοιες» ορίζονται ως μια ανοικτή κατηγορία λέξεων (ουσιαστικά, επίθετα, επιρρήματα, ρήματα) της πρότασης. Από αυτές τις λέξεις χρησιμοποιούμε μόνο

αυτές που έχουν ρόλο υποκειμένου ή αντικειμένου στην πρόταση καθώς και τα επίθετα/ρήματα που τις χαρακτηρίζουν.

Θέλουμε να υπολογίσουμε την ομοιότητα δύο προτάσεων, έστω  $S1$  και  $S2$ , με τις αντίστοιχες «έννοιες»  $C1$  και  $C2$ . Η ένωση των «εννοιών» ορίζεται ως  $C = C1 \cup C2$ . Στη συνέχεια, ο πίνακας αναπαράστασης  $V_i$  για την πρόταση  $S_i$  ( $i = 1, 2$ ) δημιουργείται με μέγεθος (το μέγεθος του  $C$ ) και οι τιμές του ακολουθούν τους παρακάτω κανόνες:

Στο ευρετήριο  $k$ ,

- Αν η  $S_i$  περιέχει την  $C[k]$ , δηλαδή την έννοια στην  $k$  θέση του ευρετηρίου, τότε το  $V1[k]$  γίνεται 1.0.
- Αν η  $S_i$  δεν περιέχει την  $C[k]$ , τότε υπολογίζεται ένα σημασιολογικό σκορ ομοιότητας μεταξύ της  $C[k]$  και όλων των «εννοιών» στην πρόταση. Το  $V_i[k]$  πέρνει την τιμή του υψηλότερου σκορ.

Η σημασιολογική ομοιότητα μεταξύ των δύο προτάσεων  $S1$  και  $S2$  μπορεί να υπολογιστεί από την ομοιότητα μεταξύ των δύο πινάκων  $V1$  και  $V2$ , που τελικά ανήκει στο  $[0, 1]$ . Η εξίσωση υπολογισμού φαίνεται παρακάτω:

$$sim(S1, S2) = \frac{V1 * V2}{\|V1\| * \|V2\|}$$

Assume the following two sentences with the underlined concepts:

$S1 =$  The battery of this camera is very impressive.

$S2 =$  Canon camera always has a long battery life.

Therefore, the joint vector is denoted as follows:

$C = \{battery, camera, impressive, has, long, life\}$

The resulting sentence vectors  $V1$  and  $V2$  are:

$V1 = \{1.0, 1.0, 1.0, 0.0, 0.3, 0.15\}$

$V2 = \{1.0, 1.0, 0.3, 1.0, 1.0, 1.0\}$

The semantic similarity between two sentences:

$$sim(S1, S2) = 0.69$$

Σχήμα 10: Παράδειγμα προτάσεων με τους πίνακες αναπαράστασής τους

## 5.2. Συσταδοποίηση με βάση υπόθεματικές ενότητες

Όταν όλες οι ομοιότητες κατά ζεύγη υπολογιστούν, τις εισάγουμε στο μοντέλο συσταδοποίησης. Υλοποιήσαμε ιεραρχικό και μη-ιεραρχικό αλγόριθμο για να συγκρίνουμε τις επιδόσεις τους.

### 5.2.1. Ιεραρχικός αλγόριθμος συσταδοποίησης

Στον ιεραρχικό αλγόριθμο συσταδοποίησης, μεμονωμένες προτάσεις αρχικοποιούνται ως συστάδες επαναληπτικά και συγχωνεύονται για να σχηματίσουν ομάδες με την ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους ανά ζεύγος. Αυτό συνεχίζει μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο τερματισμού. Υιοθετούμε έναν αλγόριθμο που προτείνεται στο [4] για να εκτιμήσουμε το τελικό πλήθος των συστάδων. Η διαδικασία συσταδοποίησης θα τερματίσει όταν το πλήθος των συστάδων φτάσει αυτό το νούμερο.

### 5.2.2. Μη ιεραρχικός αλγόριθμος συσταδοποίησης

Επίσης, υπολοποιήσαμε έναν μη-ιεραρχικό αλγόριθμο, μέθοδος [14], που αντιμετωπίζει το πρόβλημα συσταδοποίησης ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση  $\Phi$  που μετρά την ανομοιότητα μεταξύ των συστάδων ενός τμήματος  $P = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ :

$$\Phi(P) = \sum_{i=1}^k \left( \frac{1}{|C_i|} \sum_{x,y \in C_i, x \neq y} (1 - sim(x,y)) \right)$$

Γίνεται η ίδια εκτίμηση για τον τελικό αριθμό συστάδων, όπως προηγουμένως. Ο αλγόριθμος συνεχίζει, δημιουργώντας μια αρχική ανάθεση των ποιών στο διαμέρισμα και ψάχνει για τοπικά βέλτιστες κινήσεις (αντιμετάθεση) των προτάσεων μεταξύ των συστάδων, που βελτιώνουν την  $\Phi$  σε κάθε επανάληψη μέχρι τη σύγκλιση. Δεδομένου ότι αυτό είναι μία μέθοδος αναρρίχησης λόφου, είναι απαραίτητο να επαναληφθεί ο αλγόριθμος πολλές φορές, με τυχαία κατάτμηση των προτάσεων στις συστάδες κάθε φορά. Θα επιλεγεί η βέλτιστη συνολική διαμόρφωση ως το τελικό αποτέλεσμα συσταδοποίησης.



### 5.2.3. Συμπαγής παρουσίαση των προτάσεων

Σε αυτό το βήμα δημιουργείται και παρουσιάζεται η τελική περίληψη που φαίνεται στο Σχήμα 1. Θεωρούμε συστάδες με προτάσεις από όλα τα χαρακτηριστικά που δημιουργούνται από την προηγούμενη ενότητα. Με την εφαρμογή της τεχνικής ανάλυσης συναισθήματος που περιγράφεται σε προηγούμενες ενότητες, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον προσανατολισμό για κάθε πρόταση σε ένα συγκεκριμένο δευτερεύον θέμα. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, είμαστε σε θέση να μοιράσουμε τις προτάσεις σε κάθε δευτερεύον θέμα, με βάση την πολικότητα τους. Το επόμενο βήμα είναι να επιλεγεί η πιο αντιπροσωπευτική πρόταση για κάθε ομάδα. Η επιλεγμένη πρόταση πρέπει να αντιπροσωπεύει τη μέγιστη πληροφορία μεταξύ των προτάσεων, με άλλα λόγια, η πρόταση στόχος είναι πιο όμοια με όλες τις υπόλοιπες προτάσεις.

## 6. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία προτείναμε ένα σύστημα που μπορεί να κάνει περίληψη κριτικές προϊόντων. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε είναι ανεξάρτητη με τη σημασιολογική ομοιότητα μεταξύ των λέξεων και των προτάσεων, η οποία λύνεται εξ'ολοκλήρου μόνο με ορισμένες μορφές χειροκίνητης εισαγωγής. Επιπρόσθετα, δεν χρησιμοποιούμε βαθιά σημασιολογική πληροφορία για να εντοπίσουμε ομοιότητες μεταξύ των προτάσεων, την οποία αν χρησιμοποιήσουμε θα έχουμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

Υπάρχουν πολλές επεκτάσεις που μπορούμε μελλοντικά να κάνουμε. Για παράδειγμα μπορούμε να αναγνωρίσουμε ως διαφορετικά χαρακτηριστικά τις εμπορικές επωνυμίες που αντιστοιχούν στο ίδιο προϊόν (π.χ. Nikon, Canon (φωτογραφική μηχανή)) ή ακόμα και τα ονόματα προϊόντων που αντιστοιχούν σε αξεσουάρ (π.χ. Kingston (κάρτα μνήμης για φωτογραφική μηχανή)).

Εναλλακτικά, επειδή το σύστημα μας δημιουργεί μία περίληψη από την εξόρυξη, θα ήταν ίσως προτιμότερο να είχαμε μία περίληψη όπου οι προτάσεις που την απαρτίζουν να είναι επαναδιατυπωμένες και όχι όπως τις έγραψαν οι χρήστες. Τέλος, η χρήση μεταδεδομένων σίγουρα θα βελτίωνε τα αποτελέσματα μας, όπως π.χ. η βαθμολογία που έδωσε ο χρήστης στο εκάστοτε προϊόν.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] R. Agrawal and R. Srikant. Fast Algorithms for Mining Association Rules. In Proc. of 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB'94), pages 487-499, 1994
- [2] R. Barzilay, K. R. Mckeown, and M. Elhadad. Information Fusion in the Context of Multi-document Summarization. In Proc. of the 37th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 1999), pages 550-557, 1999
- [3] X. Ding, B. Liu, and P. S. Yu. A Holistic Lexicon-based Approach to Opinion Mining. In Proc. of the International Conference on Web Search and Web Data Mining (WSDM'08), pages 231-240, 2008.
- [4] V. Hatzivassiloglou, J. L. Klavans, M. L. Holcombe, R. Barzilay, M.-Y. Kan, and K. R. McKeown. SIMFINDER: A Flexible Clustering Tool for Summarization. In Proc. of the Workshop on Automatic Summarization co-located with the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL 2001), 2001
- [5] V. Hatzivassiloglou and K. R. McKeown. Predicting the Semantic Orientation of Adjectives. In Proc. of the 8th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics (EACL 1997), pages 171-181, 1997
- [6] M. Hu and B. Liu. Mining and Summarizing Customer Reviews. In Proc. of the 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'04), pages 168-177, 2004
- [7] M. Hu and B. Liu. Mining Opinion Features in Customer Reviews. In Proc. of the 19th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2004), pages 755-760, 2004
- [8] D. Klein and C. D. Manning. Information Fusion in the Context of Multi-document Summarization. In Proc. of the 41st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2003), pages 423-430, 2003
- [9] Y. Li, D. McLean, Z. A. Bandar, J. D. O'Shea, and K. Crockett. Sentence Similarity Based on Semantic Nets and Corpus Statistics. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (TKDE), 18(8):1138-1150, 2006
- [10] B. Liu, M. Hu, and J. Cheng. Opinion Observer: Analyzing and Comparing Opinions on the Web. In Proc. of the 14th International World Wide Web Conference (WWW2005), pages 342-351, 2005

- [11] X.-Y. Liu, Y.-M. Zhou, and R.-S. Zheng. Measuring Semantic Similarity in WordNet. In Proc. of the 6th International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC 2007), pages 3431-3435, 2007
- [12] G. A. Miller. WordNet: A Lexical Database for English. Communications of the ACM, 38(11):39-41, 1995
- [13] M. F. Porter. An Algorithm for Suffix Stripping. Program, 14(3):130-137, 1980
- [14] H. Spath. The Cluster Dissection and Analysis Theory FORTRAN Programs Examples. Prentice-Hall, Inc., 1985
- [15] K. Toutanova and C. D. Manning. Enriching the Knowledge Sources Used in a Maximum Entropy Part-of-Speech Tagger. In Proc. of the Joint SIGDAT Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Very Large Corpora (EMNLP/VLC-2000), pages 63-70, 2000
- [16] P. Turney, C. Canada, and M. Littman. Unsupervised Learning of Semantic Orientation from a Hundred-Billion-Word Corpus. Technical Report ERB-1094, National Research Council, Institute for Information
- [17] J. M. Wiebe, R. F. Bruce, and T. O'Hara. Development and Use of a Gold-standard Data Set for Subjectivity Classifications. In Proc. of the 37th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 1999), pages 246-253, 1999
- [18] S. Ye, L. Qiu, T.-S. Chua, and M.-Y. Kan. The Use of MMR, Diversity-Based Reranking for Reordering Documents and Producing Summaries. In Proc. of the Document Understanding Conference (DUC 2005), 2005
- [19] H. Yu and V. Hatzivassiloglou. Towards Answering Opinion Questions: Separating Facts from Opinions and Identifying the Polarity of Opinion Sentences. In Proc. of 2003 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP'03), pages 129-136, 2003

Δημήτριος Π. Σγούρδος  
sgdimitris@gmail.com

# Εξακρίβωση Παραμέτρων Διδιάστατων Μορφοκλασματικών Συναρτήσεων Παρεμβολής χρησιμοποιώντας Περιβάλλοντες Όγκους

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Η εν λόγω εργασία πραγματεύεται τη θεωρητική μελέτη και υλοποίηση αλγορίθμων αφορούντες κυρτά πολύεδρα και την εφαρμογή αυτών στον κλάδο της μορφοκλασματικής παρεμβολής και κατ' επέκταση στον τομέα της Γραφικής Υπολογιστών. Εστιάζουμε στην εύρεση του κυρτού περιβλήματος ενός συνόλου τριδιάστατων σημείων και στον υπολογισμό τόσο του όγκου ενός κυρτού πολυέδρου όσο και της τομής δύο κυρτών πολυέδρων. Στόχος μας είναι η εξακρίβωση των παραμέτρων και η κατασκευή διδιάστατων μορφοκλασματικών συναρτήσεων παρεμβολής χρησιμοποιώντας περιβάλλοντες όγκους. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της συμμετρικής διαφοράς μεταξύ περιβαλλόντων όγκων καταλλήλως επιλεγμένων σημείων.

Λέξεις κλειδιά: Κυρτό περίβλημα, όγκος πολυέδρου, τομή πολυέδρων, μορφοκλασματική παρεμβολή, επαναλαμβανόμενο σύστημα συναρτήσεων.

## Επιβλέποντες

Θεοχάρης Θεοχάρης, Καθηγητής | Δρ. Δρακόπουλος Βασίλειος

## 1. Εισαγωγή

Η παρεμβολή εστιάζει γενικώς στην κατασκευή μιας συνεχούς συνάρτησης, η οποία διέρχεται από ένα σύνολο σημείων θεωρούμενων ως δειγμάτων μίας άγνωστης συνάρτησης. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές συναρτήσεις παρεμβολής, οι οποίες είναι κατά κανόνα «λείες», η βασισμένη στη θεωρία των επαναλαμβανόμενων συστημάτων συναρτήσεων (Ε.Σ.Σ.) μορφοκλασματική παρεμβολή παρέχει έναν εύχρηστο τρόπο κατασκευής συνεχών συναρτήσεων παρεμβάλλουσες σύνολα τα οποία έχουν ακανόνιστη μορφή, όπως σεισμικά, ιατρικά, γεωγραφικά δεδομένα κ.ά. Στη μορφοκλασματική παρεμβολή δεν χρησιμοποιείται κάποιος αναλυτικός τύπος ή αλγόριθμος για τον υπολογισμό της τιμής της αναπαράστασης για δεδομένες τιμές συντεταγμένων. Αντιθέτως, μέσω αλγορίθμων κατασκευάζεται ολόκληρη η συνάρτηση ως ρυθμιζόμενης πληθικότητας σύνολο σημείων.

Η κατασκευή μορφοκλασματικών επιφανειών παρεμβολής (Μ.Ε.Π.) με τη χρήση Ε.Σ.Σ. προτάθηκε αρχικώς από τον Peter R. Massopust [2], όπου εξετάζεται η περίπτωση τριγωνικών χωρίων με συνεπίπεδα συνοριακά δεδομένα. Οι Jeffrey S. Geronimo και Douglas Hardin [6], μελέτησαν πολυγωνικές περιοχές με αυθαίρετα σημεία παρεμβολής, αλλά ίσους παράγοντες κατακόρυφης κλιμάκωσης. Ο Nailiang Zhao [7] χειρίζεται τους παράγοντες ως μία συνεχή «συνάρτηση συστολής», ενώ ο Peter R. Massopust [3], πρότεινε την κατασκευή Μ.Ε.Π. ως τανυστικό γινόμενο δύο συνεχών μονομεταβλητών συναρτήσεων. Διμεταβλητές, μη τανυστικού γινομένου μορφοκλασματικές συναρτήσεις παρεμβολής ορισμένες επί ορθογώνιων χωρίων, κατασκευάστηκαν πλήρως από τον Xiao-yuan Qian [4]. Ο Hong-Yong Wang [5], χρησιμοποίησε μία ευρεία τάξη τριδιάστατων Ε.Σ.Σ. και έδειξε ότι οι ελκυστές τους αποτελούν μία κατηγορία Μ.Ε.Π.

Στην παρούσα εργασία επεκτείνεται η κατασκευή των Β. Δρακοπούλου, Πολ. Μανουσοπούλου και Θεοχ. Θεοχάρη [1] στις συνεχείς διμεταβλητές Μ.Ε.Π. Στόχος μας είναι η εύρεση των βέλτιστων παραγόντων κατακόρυφης κλιμάκωσης της μορφοκλασματικής παρεμβολής που προκαλούν ελαχιστοποίηση της συμμετρικής διαφοράς μεταξύ περιβαλλόντων όγκων καταλλήλως επιλεγμένων σημείων. Για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι εύρεσης του κυρτού περιβλήματος ενός συνόλου σημείων, υπολογισμού του όγκου κυρτού πολυέδρου, καθώς επίσης και της τομής κυρτών πολυέδρων. Η χρήση βέλτιστων παραγόντων κατακόρυφης κλιμάκωσης οδηγεί στη μέγιστη επικάλυψη των αντίστοιχων περιβαλλόντων

όγκων, επιτυγχάνοντας καλύτερη αναπαράσταση των δεδομένων σημείων.

Η υλοποίηση των προτεινόμενων αλγορίθμων, καθώς και η ενοποίησή τους για το λογισμικό εφαρμογών της εργασίας, πραγματοποιήθηκε σε γλώσσα C++ και περιβάλλον Microsoft® Visual Studio® 2010. Ιδιαίτερης μνείας χρήζει η βιβλιοθήκη CGAL η οποία χρησιμοποιήθηκε εκτενώς, ενώ για την τριδιάστατη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη DirectX.

## 2. Κυρτό περίβλημα

Το κυρτό περίβλημα ενός συνόλου σημείων είναι το ελάχιστο κυρτό σύνολο το οποίο περιέχει τα σημεία. Συγκεκριμένα, δοθέντος ενός συνόλου  $S$  από  $n$  σημεία, το κυρτό τους περίβλημα  $CH(S)$  είναι το ελάχιστο κυρτό πολύγωνο (για τον  $\mathbb{R}^2$ ) ή κυρτό πολυέδρο (για τον  $\mathbb{R}^3$ ) τέτοιο, ώστε κάθε ένα από τα  $n$  σημεία του  $S$  βρίσκεται επί του συνόρου του  $CH(S)$  ή στο εσωτερικό του  $CH(S)$ . Ένα κυρτό περίβλημα περιγράφεται από ένα σύνολο όψεων (facets) και από ένα σύνολο λιστών που προσδιορίζει τις γειτονικές όψεις και κορυφές για κάθε όψη. Τα συνοριακά σημεία κάθε όψης ονομάζονται κορυφογραμμές (ridges). Κάθε κορυφογραμμή σηματοδοτεί την τομή δύο όψεων.

Διάφοροι αλγόριθμοι εύρεσης κυρτών περιβλημάτων έχουν προταθεί. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν εκείνοι οι οποίοι αποτελούν παραλλαγές ενός τυχαιοποιημένου αυξητικού αλγορίθμου, προταθείς από τους Clarkson και Shor [9], καθώς εμφανίζουν βέλτιστα αποτελέσματα. Ένας αυξητικός αλγόριθμος προσθέτει επαναληπτικώς ένα σημείο στο κυρτό περίβλημα των σημείων που έχουν επεξεργαστεί στα προηγούμενα βήματα σε τυχαία σειρά.

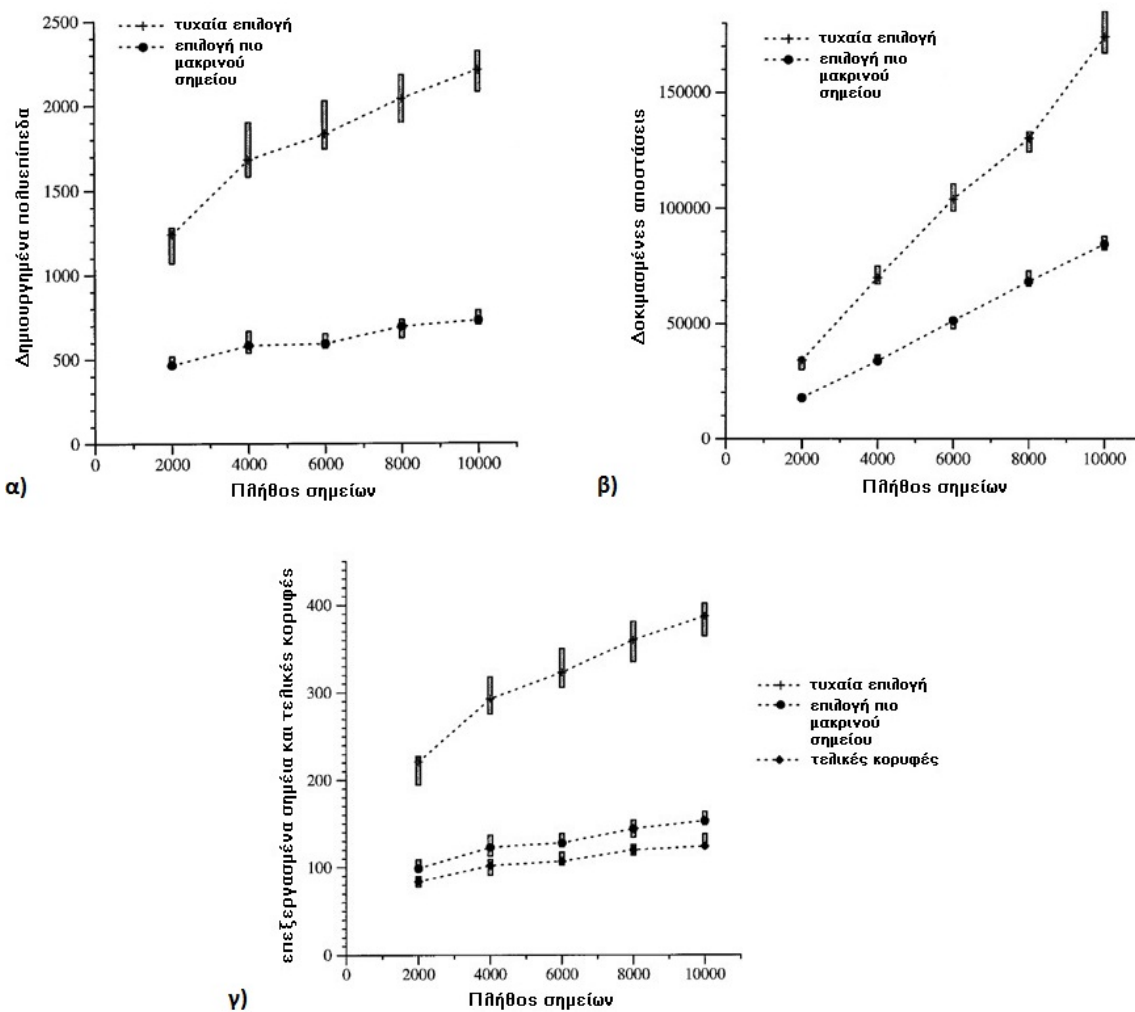
Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο αλγόριθμος του ταχείος περιβλήματος (A.T.Π. - Quickhull algorithm) [8]. Ο A.T.Π. βελτιστοποιεί την επιλογή σημείων σε κάθε βήμα της διαδικασίας, καθώς επιλέγει το πιο απομακρυσμένο σημείο ενός εξωτερικού συνόλου σε αντίθεση με ένα τυχόν σημείο. Επειδή επεξεργάζεται λιγότερα εσωτερικά σημεία, εκτελείται ταχύτερα, ενώ επιπλέον, επαναχρησιμοποιεί τη μνήμη που καταλαμβάνουν οι παλαιότερες όψεις.



## Ο αλγόριθμος του ταχείος περιβλήματος στον $\mathbb{R}^d$

1. Δημιούργησε ένα σύμπλεγμα  $d + 1$  σημείων.
2. Για κάθε όψη  $F$ 
  - 2.1. Για κάθε μη προσημασμένο σημείο  $p$ , επανάλαβε
    - 2.1.1. Αν το  $p$  ευρίσκεται άνωθεν του  $F$ 
      - i. Ένταξε το  $p$  στο εξωτερικό σύνολο του  $F$ .
3. Για κάθε όψη  $F$  με μη κενό εξωτερικό σύνολο
  - 3.1. Επέλεξε το μακρινότερο σημείο  $p$  από το εξωτερικό σύνολο του  $F$ .
  - 3.2. Αρχικοποίησε το σύνολο  $V$  των ορατών όψεων στο  $F$ .
  - 3.3. Για όλες τις μη επεξεργασμένες γειτονικές όψεις  $N$  του  $V$ ,
    - 3.3.1. Αν το  $p$  ευρίσκεται άνωθεν του  $N$ 
      - i. Πρόσθεσε το  $N$  στο  $V$ .
  - 3.2. Το σύνολο του  $V$  είναι το σύνολο των οριζόμενων κορυφογραμμών  $H$ .
  - 3.3. Για κάθε κορυφογραμμή  $R$  του  $H$ 
    - 3.5.1. Δημιούργησε μια νέα όψη από το  $R$  και το  $p$ .
    - 3.5.2. Σύνδεσε την νέα όψη με τις γειτονικές της.
  - 3.6. Για κάθε νέα όψη  $F'$ 
    - 3.6.1. Για κάθε μη αντιστοιχισμένο σημείο  $q$  μέσα σε ένα εξωτερικό σύνολο από μία όψη του  $V$ ,
      - i. Αν το  $q$  ευρίσκεται άνωθεν του  $F$ ,
        - α) Αντιστοίχησε το  $q$  στο εξωτερικό σύνολο του  $F'$ .
  - 3.7. Διέγραψε τις όψεις στο  $V$ .

Για ακρίβεια σημείων εισόδου ίση με  $O(\log n)$ , η χείριστη πολυπλοκότητα του Α.Τ.Π. είναι  $O(n \log u)$  για  $d \leq 3$  και  $O(nf_u/u)$  για  $d \geq 4$ , όπου  $n$  το πλήθος των αρχικών σημείων εισόδου στον  $\mathbb{R}^d$  και  $u$  το πλήθος των κορυφών στην έξοδο. Για μια αποτελεσματική σύγκριση του Α.Τ.Π. με τους τυχαιοποιημένους αυξητικούς αλγόριθμους, πρέπει να απομονωθεί η επίδραση της τυχαίας επιλογής. Στο Σχήμα 1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής σύγκρισης δύο εκδοχών του Α.Τ.Π., με και χωρίς τυχαία επιλογή, όπως προκύπτουν από το μέσο όρο 10 δοκιμών. Όπως είναι φανερό, ο αυθεντικός Α.Τ.Π. υπερέχει σαφώς της τυχαιοποιημένης εκδοχής.



**Σχήμα 1:** Κυρτό περίβλημα ομοιομόρφως κατανομημένων τριδιάστατων σημείων. Κατά μέσο όρο 10 δοκιμές για (α) δημιουργία πολυεπιπέδων, (β) δοκιμασμένες αποστάσεις, (γ) επεξεργασμένα σημεία και κορυφές στην έξοδο.

### 3. Όγκος κυρτού πολυέδρου

Ο όγκος ή χωρητικότητα, έχει αριθμητική αξία και δίνεται για να περιγράψει την τριδιάστατη αντίληψη για το πόσο χώρο καταλαμβάνει ένα αντικείμενο. Συμβολίζεται συνήθως με το αγγλικό γράμμα V (Volume), ενώ η διεθνής μονάδα μέτρησης είναι το κυβικό μέτρο ( $m^3$ ).

Ο άμεσος υπολογισμός του όγκου είναι εφικτός για αντικείμενα με απλό σχήμα,

όπως π.χ. κύβος, πυραμίδα, κώνος κ.ά. Ωστόσο, για πολυέδρα με πιο περιπεπλεγμένο σχηματισμό, η διαδικασία υπολογισμού του όγκου δυσχεραίνεται. Η βασική ιδέα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η απλοποίηση του προβλήματος μέσω της διάσπασης του αρχικού κυρτού πολυέδρου σε επιμέρους, μη επικαλυπτόμενα κυρτά τετράεδρα, όπου είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση του όγκου τους. Ο όγκος του αρχικού πολυέδρου ισούται τότε με το άθροισμα των όγκων όλων των τετραέδρων που έχουν προκύψει.

Για το διαμερισμό του κυρτού πολυέδρου απαιτείται η επιλογή μιας κορυφής του, η οποία θα αποτελέσει το σταθερό σημείο για τον σχηματισμό των τετραέδρων, ενώ απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι έδρες του πολυέδρου να είναι τριγωνοποιημένες. Κάθε τετράεδρο προκύπτει ως ένωση της κορυφής αυτής με κάθε ένα από τα τρίγωνα της τριγωνοποιημένης μορφής του πολυέδρου. Από τη διαδικασία δημιουργίας τετραέδρων αποκλείονται τα τρίγωνα που ορίζουν επίπεδο στο οποίο βρίσκεται και η αρχικά επιλεγμένη κορυφή, καθώς θα προέκυπταν τετράεδρα με μηδενικό όγκο.

### Αλγόριθμος για την εύρεση του όγκου ενός κυρτού πολυέδρου

1. Επίλεξε μια κορυφή  $A$  του κυρτού πολυέδρου  $P$  ως αρχικό σημείο για το σχηματισμό των τετραέδρων που το διαμερίζουν.
2. Όρισε αρχικώς τον όγκο  $V$  του  $P$  ίσο με 0.
3. Για κάθε τρίγωνο  $Tr_i$  της τριγωνοποιημένης μορφής του  $P$ 
  - 3.1. Αν η κορυφή  $A$  δεν βρίσκεται στο επίπεδο που ορίζει το τρίγωνο  $Tr_i$ 
    - 3.1.1. Δημιούργησε ένα τετράεδρο  $T_i$  με κορυφές την  $A$  και τις κορυφές του τριγώνου  $Tr_i$
    - 3.1.2. Υπολόγισε τον όγκο  $V_i$  του τετραέδρου  $T_i$
    - 3.1.3. Πρόσθεσε τον  $V_i$  στον αθροιστικά υπολογιζόμενο όγκο  $V$  του  $P$ .
4. Επίστρεψε ως έξοδο τον όγκο  $V$  του κυρτού πολυέδρου  $P$ .

Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι ανάλογη με το πλήθος των τετραέδρων στα οποία έχει διαμεριστεί το αρχικό κυρτό πολυέδρο και κατ' επέκταση ανάλογη με το πλήθος των τριγώνων που έχουν προκύψει από τη διαδικασία τριγωνοποίησης. Αν  $n$  είναι το πλήθος των τριγώνων, τότε η πολυπλοκότητα

της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι  $O(n)$ . Καθώς η τριγωνοποιημένη μορφή του πολυέδρου προκύπτει από τις έδρες του, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση των κορυφών ( $V$ ), των ακμών ( $E$ ) ή των εδρών ( $F$ ) του αρχικού πολυέδρου, αν ληφθεί υπ' όψιν ότι συνδέονται με τη σχέση  $V + F - E = 2$ .

#### 4. Τομή κυρτών πολυέδρων

Η τομή δύο κυρτών πολυέδρων στον τριδιάστατο χώρο αντιστοιχεί στο χώρο επικάλυψής τους. Ισοδυναμεί με το πεπερασμένο σχήμα του χώρου, το οποίο περικλείεται από  $n$  επίπεδα πολυγωνικά σχήματα, και εσωκλείεται ταυτόχρονα και στα δύο αρχικά κυρτά πολυέδρα. Με την προϋπόθεση ότι τα αρχικά πολυέδρα επικαλύπτονται, αποτελεί με τη σειρά της ένα κυρτό πολυέδρο.

Ενώ ο ορισμός της τομής φαίνεται απλοϊκός, η εύρεση ενός αποδοτικού αλγορίθμου για τον υπολογισμό της, συνιστά ένα περιπεπλεγμένο μαθηματικό πρόβλημα. Η δυσκολία έγκειται στην ιδιομορφία που πιθανώς να παρουσιάζει ο σχηματισμός των πολυέδρων καθώς και στον τρόπο επικάλυψής τους.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει ως βασικό άξονα δόμησης την επαναληπτική δημιουργία ενός επιπέδου από κάθε έδρα του ενός εκ των δύο πολυέδρων και τη κατάτμηση του δευτέρου πολυέδρου από το εκάστοτε επίπεδο που έχει προκύψει. Το μέρος του δευτέρου πολυέδρου, που βρίσκεται στον αντίθετο ημιχώρο συγκριτικά με το πρώτο πολυέδρο, απορρίπτεται, ενώ το μέρος που βρίσκεται στον ίδιο ημιχώρο διατηρείται. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, το δεύτερο πολυέδρο αντικαθίσταται από το πολυέδρο που έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο βήμα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση του αλγορίθμου, αποτελεί το δεύτερο πολυέδρο να είναι τριγωνοποιημένο. Η προαπαίτηση αυτή οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο διαμερίζεται το πολυέδρο αυτό από κάθε προκύπτον επίπεδο.

#### Αλγόριθμος για την εύρεση της τομής δύο κυρτών πολυέδρων

1. Λάβε ως είσοδο τα πολυέδρα  $A$  και  $B$ .
2. Θέσε το πολυέδρο επεξεργασίας  $P$  ίσο με το  $B$ .
3. Για κάθε έδρα του πολυέδρου  $A$ 
  - 3.1. Όρισε το επίπεδο  $E$  το οποίο διαμερίζει τον  $\mathbb{R}^3$  σε δύο ημιχώρους.

- 3.2. Για κάθε τρίγωνο  $Tr_i$  της τριγωνοποιημένης μορφής του  $P$ 
    - 3.2.1. Αν όλες οι κορυφές του  $Tr_i$  βρίσκονται στον ίδιο ημιχώρο με το  $A$ ,
      - i. Πρόσθεσε το τρίγωνο στην τριγωνοποιημένη μορφή του προς δημιουργία πολυέδρου  $T$ .
    - 3.2.2. Διαφορετικά, αν όλες οι κορυφές του  $Tr_i$  βρίσκονται στον αντίθετο ημιχώρο με το  $A$ ,
      - i. Απόρριψε το τρίγωνο.
    - 3.2.2. Διαφορετικά, αν μόνο μία κορυφή του  $Tr_i$  βρίσκεται στον ίδιο ημιχώρο με το  $A$ ,
      - i. Πρόσθεσε στην τριγωνοποιημένη μορφή του προς δημιουργία πολυέδρου  $T$ , το τρίγωνο που σχηματίζεται από την κορυφή αυτή και από τα δύο σημεία τομής των πλευρών του αρχικού τριγώνου με το επίπεδο  $E$ .
    - 3.2.2. Διαφορετικά (δύο κορυφές του  $Tr_i$  βρίσκονται στον ίδιο ημιχώρο με το  $A$ ),
      - i. Τριγωνοποίησε το τετράπλευρο το οποίο προκύπτει από τις δύο κορυφές του τριγώνου, που βρίσκονται στον ίδιο ημιχώρο με το  $A$ , και από τα δύο σημεία τομής των πλευρών του αρχικού τριγώνου με το επίπεδο.
        - ii. Πρόσθεσε τα δύο τρίγωνα που προκύπτουν από το βήμα (i) στην τριγωνοποιημένη μορφή του προς δημιουργία πολυέδρου  $T$ .
  - 3.3. Τριγωνοποίησε το  $n$ -γώνο που προκύπτει από τα σημεία τομής των τριγώνων του  $P$  με το επίπεδο  $E$ , και πρόσθεσε τα προκύπτοντα τρίγωνα στο προς δημιουργία πολυέδρου  $T$ .
  - 3.4. Θέσε σαν πολυέδρου  $P$  το κυρτό πολυέδρου  $T$ , και αρχικοποίησε το  $T$ .
4. Επίστρεψε το πολυέδρου  $P$ .

## 5. Μορφοκλασματική παρεμβολή

Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες βρίσκουν άμεση εφαρμογή στον κλάδο της μορφοκλασματικής παρεμβολής. Αποτελούν δομικά

συστατικά για την υλοποίηση του προτεινόμενου αλγορίθμου εξακρίβωσης παραμέτρων Μ.Ε.Π. χρησιμοποιώντας περιβάλλοντες όγκους.

### 5.1. Επαναλαμβανόμενα συστήματα συναρτήσεων

Τα επαναλαμβανόμενα συστήματα συναρτήσεων (Ε.Σ.Σ.) έχουν ως στόχο, εκκινώντας από ένα αρχικό σύνολο, την κατασκευή ακολουθιών συνόλων οι οποίες συγκλίνουν προς ένα επιθυμητό όριο.

**Ορισμός 1:** Έστω  $(X, \rho)$  ένας μετρικός χώρος. Ένας μετασχηματισμός  $w: X \rightarrow X$  καλείται κηδεστικός, αν είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί από έναν πίνακα  $A$  και μία μετατόπιση  $t$  ως  $w(x) = Ax + t$ .

**Ορισμός 2:** Ένα επαναλαμβανόμενο σύστημα συναρτήσεων ή Ε.Σ.Σ. είναι μία συλλογή ενός πλήρους μετρικού χώρου  $(X, \rho)$  μαζί με ένα πεπερασμένο σύνολο συνεχών απεικονίσεων  $w_{m,n}: X \rightarrow X$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$  και  $n = 1, 2, \dots, N$ , όπου  $\rho$  είναι η συνάρτηση απόστασης μεταξύ των στοιχείων του  $X$ . Αν οι μετασχηματισμοί  $w_{m,n}$  είναι συστολές με αντίστοιχους παράγοντες συσταλτικότητας  $s_{m,n}$ , τότε το Ε.Σ.Σ. ονομάζεται υπερβολικό.

Με βάση τον ορισμό ενός Ε.Σ.Σ. προκύπτει το παρακάτω:

**Θεώρημα 1:** Έστω  $\{ X; w_{1-M,1-N} \}$  ένα υπερβολικό Ε.Σ.Σ. με παράγοντα συσταλτικότητας  $s = \max \{ s_{m,n}; m = 1, 2, \dots, M \text{ και } n = 1, 2, \dots, N \}$ . Τότε ο μετασχηματισμός  $W: H(X) \rightarrow H(X)$ , με

$$W(B) = U_{m=1}^M U_{n=1}^N w_{mn}(B), \text{ για κάθε } B \in H(X),$$

είναι μια απεικόνιση συστολής επί του πλήρους μετρικού χώρου  $(H(X), h(\rho))$  με παράγοντα συσταλτικότητας  $s$ . Το μοναδικό σταθερό σημείο της  $A \in H(X)$ , λέγεται ελκυστής του υπερβολικού Ε.Σ.Σ., ικανοποιεί την

$$A = W(A) = U_{m=1}^M U_{n=1}^N w_{mn}(A)$$

και δίνεται από την  $A = \lim_{k \rightarrow \infty} W^k(B)$ , για κάθε  $B \in H(X)$ .

### 5.2. Διμεταβλητές μορφοκλασματικές επιφάνειες παρεμβολής

Οι μορφοκλασματικές επιφάνειες παρεμβολής (Μ.Ε.Π.) αποτελούν συνεχείς συναρτήσεις στον τριδιάστατο χώρο των οποίων το διάγραμμα είναι ελκυστής



ενός καταλλήλως επιλεγμένου Ε.Σ.Σ. για σύνολα της μορφής

$$\{ (x_i, y_j, z_{i,j} = z(x_i, y_j)) \in \mathbb{R}^3 : i = 0, 1, \dots, M; j = 0, 1, \dots, N \}$$

και έχουν μορφοκλασματική διάσταση μεταξύ δύο και τρία.

Έστωσαν  $I_x = [a, b]$  πραγματικό, συμπαγές διάστημα και  $\Delta_{x,1}, \Delta_{x,2}$  διαμερισμοί του  $I_x$ , με τον  $\Delta_{x,1}$  να αποτελεί εκλέπτυνση του  $\Delta_{x,2}$  τέτοιου, ώστε:

$$\Delta_{x,1} = \{ u_0, u_1, \dots, u_{M'} \}, \text{ με } a = u_0 < u_1 < \dots < u_{M'} = b,$$

$$\Delta_{x,2} = \{ x_0, x_1, \dots, x_M \}, \text{ με } a = x_0 < x_1 < \dots < x_M = b.$$

Παρομοίως, έστωσαν  $I_y = [c, d]$  πραγματικό, συμπαγές διάστημα και  $\Delta_{y,1}, \Delta_{y,2}$  διαμερισμοί του  $I_y$ , με τον  $\Delta_{y,1}$  να αποτελεί εκλέπτυνση του  $\Delta_{y,2}$ , τέτοιου ώστε:

$$\Delta_{y,1} = \{ u_0, u_1, \dots, u_{N'} \}, \text{ με } c = u_0 < u_1 < \dots < u_{N'} = d,$$

$$\Delta_{y,2} = \{ y_0, y_1, \dots, y_N \}, \text{ με } c = y_0 < y_1 < \dots < y_N = d.$$

Έστω πλήρης μετρικός χώρος  $K = D \times \mathbb{R}$ , με  $D = I_x \times I_y$ . Το σύνολο των δεδομένων σημείων συμβολίζεται ως

$$P = \{ (u_k, u_l, \hat{z}_{k,l} = \hat{z}(u_k, u_l)) \in K : k = 0, 1, \dots, M'; l = 0, 1, \dots, N' \},$$

ενώ το σύνολο των σημείων παρεμβολής ως

$$Q = \{ (x_i, y_j, z_{i,j} = z(x_i, y_j)) \in K : i = 0, 1, \dots, M; j = 0, 1, \dots, N \}, \text{ όπου } Q \subset P.$$

Τα  $I_{x_m} = [x_{m-1}, x_m]$ ,  $I_{y_n} = [y_{n-1}, y_n]$ ,  $D_{m,n} = I_{x_m} \times I_{y_n}$  αντιστοιχούν στα οριζόμενα υποδιαστήματα, ενώ τα  $P_{m,n} = \{ (u, u, \hat{z}) \in P : (u, u) \in D_{m,n} \}$  στα υποσύνολα των δεδομένων σημείων, για κάθε  $m = 1, 2, \dots, M$  και  $n = 1, 2, \dots, N$ .

Ορίζεται το Ε.Σ.Σ.  $\{ K; w_{1-M,1-N} \}$ , του οποίου οι απεικονίσεις έχουν τη μορφή

$$w_{m,n} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_m & 0 & 0 \\ c_n & 0 & 0 \\ e_{m,n} & f_{m,n} & s_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_m \\ d_n \\ g_{m,n}xy + k_{m,n} \end{pmatrix}$$

όπου οι παράμετροι  $a_m, b_m, c_n, d_n, e_{m,n}, f_{m,n}, g_{m,n}, k_{m,n}$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$a_m = \frac{x_m - x_{m-1}}{\Delta_x}, \quad b_m = \frac{x_M x_{m-1} - x_0 x_m}{\Delta_x}, \quad c_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta_y}, \quad d_n = \frac{y_N y_{n-1} - y_0 y_n}{\Delta_y},$$

$$g_{m,n} = \frac{z_{m,n} + z_{m-1,n-1} - z_{m-1,n} - z_{m,n-1} - s_{m,n}(z_{0,0} + z_{M,N} - z_{0,N} - z_{M,0})}{\Delta_x \Delta_y}$$

$$e_{m,n} = \frac{z_{m,n-1} - z_{m-1,n-1} + s_{m,n}(z_{0,0} - z_{M,0}) - g_{m,n} \Delta_x y_0}{\Delta_x}$$

$$f_{m,n} = \frac{z_{m-1,n} - z_{m-1,n-1} + s_{m,n}(z_{0,0} - z_{0,N}) - g_{m,n} \Delta_y x_0}{\Delta_y}$$

$$k_{m,n} = z_{m,n} - e_{m,n} x_M - f_{m,n} y_N - s_{m,n} z_{M,N} - g_{m,n} x_M y_N$$

Οι μετασχηματισμοί  $w_{m,n}$  είναι διμεταβλητοί και έχουν παράγοντες κατακόρυφης κλιμάκωσης τις ελεύθερες παραμέτρους  $s_{m,n}$ . Επίσης πρέπει

$$w_{m,n} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_{0,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{m-1} \\ y_{n-1} \\ z_{m-1,n-1} \end{pmatrix}, \quad w_{m,n} \begin{pmatrix} x_M \\ y_0 \\ z_{M,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_m \\ y_{n-1} \\ z_{m,n-1} \end{pmatrix}$$

$$w_{m,n} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_N \\ z_{0,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{m-1} \\ y_n \\ z_{m-1,n} \end{pmatrix}, \quad w_{m,n} \begin{pmatrix} x_M \\ y_N \\ z_{M,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_m \\ y_n \\ z_{m,n} \end{pmatrix}$$

### 5.3. Εξακρίβωση παραμέτρων

Οι παράγοντες κατακόρυφης κλιμάκωσης  $s_{m,n}$ , για  $m = 1, 2, \dots, M$  και  $n = 1, 2, \dots, N$  των προτεινόμενων διμεταβλητών Μ.Ε.Π. είναι ελεύθερες παράμετροι των μετασχηματισμών περιοριζόμενες στο διάστημα  $(-1, 1)$ . Έστω  $B \in K_0^3$  κυρτός περιβάλλον όγκος του  $P$  και  $B_{m,n} \in K_0^3$  κυρτοί περιβάλλοντες όγκοι των  $P_{m,n}$ . Οι παράγοντες  $s_{m,n}$  πρέπει να υπολογιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει μέγιστη επικάλυψη των αντιστοίχων

περιβαλλόντων όγκων. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου των μη επικαλυπτόμενων τμημάτων του κυρτού περιβλήματος του συνόλου  $P_{m,n}$  και του μετασχηματισμένου από τον  $w_{m,n}$  κυρτού περιβλήματος του συνόλου  $P$ , για κάθε  $m = 1, 2, \dots, M$  και  $n = 1, 2, \dots, N$ , δηλαδή η ελαχιστοποίηση της συμμετρικής διαφοράς:

$$\delta_S(CH(P_{m,n}), w_{m,n}(CH(P))) = Volume\{CH(P_{m,n})\} + Volume\{w_{m,n}(CH(P))\}$$

$$- 2 \cdot Volume\{CH(P_{m,n}) \cap w_{m,n}(CH(P))\} = Volume\{CH(P_{m,n})\} + Volume\{w_{m,n}(CH(P))\}$$

$$- 2 \cdot Volume\{CH(P_{m,n}) \cap w_{m,n}(P)\}.$$

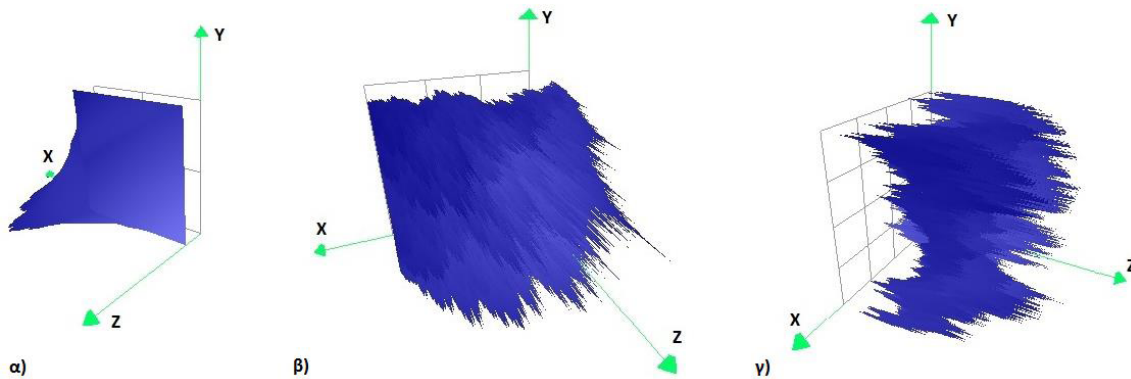
Επειδή ο  $w_{m,n}$  είναι κηδεστικός ισχύει  $w_{m,n}(CH(\cdot)) = CH(w_{m,n}(\cdot))$ .

### Αλγόριθμος υπολογισμού βέλτιστων παραγόντων κλιμάκωσης

1. Υπολόγισε το κυρτό περίβλημα του συνόλου των δεδομένων σημείων  $P$ .
2. Για κάθε επίπεδο παρεμβολής  $I_{m,n}$ , με  $m = 1, 2, \dots, M$  και  $n = 1, 2, \dots, N$ 
  - 2.1. Υπολόγισε τις γνωστές παραμέτρους  $a_{m,n}$ ,  $b_{m,n}$ ,  $c_{m,n}$ ,  $d_{m,n}$ ,  $e_{m,n}$ ,  $f_{m,n}$ ,  $g_{m,n}$ ,  $k_{m,n}$  του μετασχηματισμού  $w_{m,n}$ .
  - 2.2. Υπολόγισε το κυρτό περίβλημα του συνόλου  $P_{m,n}$ .
  - 2.3. Υπολόγισε τον βέλτιστο  $\hat{s}_{m,n}^+ \in [0, 1)$  που ελαχιστοποιεί τον όγκο των μη επικαλυπτόμενων τμημάτων των όγκων  $CH(P_{m,n})$  και  $w_{m,n}(CH(P))$ , χρησιμοποιώντας την τριάδα εγκιβωτισμού  $(s_{m,n}^b/c, s_{m,n}^b, \min\{cs_{m,n}^b, 1\})$ , όπου  $c > 1$  και  $s_{m,n}^b = Volume\{CH(P_{m,n})\}/a_{m,n} \cdot c_{m,n} \cdot Volume\{CH(P)\}$ .
  - 2.4. Υπολόγισε τον βέλτιστο  $\hat{s}_{m,n}^- \in (-1, 0]$  που ελαχιστοποιεί τον όγκο των μη επικαλυπτόμενων τμημάτων των όγκων  $CH(P_{m,n})$  και  $w_{m,n}(CH(P))$ , χρησιμοποιώντας την τριάδα εγκιβωτισμού  $(\max\{cs_{m,n}^{b'}, -1\}, s_{m,n}^{b'}, s_{m,n}^{b'}/c)$ , όπου  $c > 1$  και  $s_{m,n}^{b'} = -s_{m,n}^b$ .
  - 2.5. Εάν  $Volume(\hat{s}_{m,n}^+) < Volume(\hat{s}_{m,n}^-)$ , τότε  $\hat{s}_{m,n} = \hat{s}_{m,n}^+$ , αλλιώς  $\hat{s}_{m,n} = \hat{s}_{m,n}^-$ .

Ο υπολογισμός ενός παράγοντα  $s_{m,n}$  εξαρτάται από το πλήθος των σημείων εντός του αντίστοιχου επιπέδου παρεμβολής, ενώ στη χειρίστη περίπτωση απαιτεί χρόνο  $O(K \log(K)/(M \cdot N))$ . Εφ' όσον υπάρχουν συνολικώς  $M \cdot N$  παράγοντες  $s_{m,n}$ , ο αλγόριθμος έχει πολυπλοκότητα στη χειρίστη περίπτωση ως προς το πλήθος των δεδομένων σημείων  $O(K \log(K))$ . Επιπλέον τα κυρτά

περιβλήματα έχουν συνήθως λίγες κορυφές, με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί να είναι ταχείς. Στο Σχήμα 2 εμφανίζονται τα αποτελέσματα τριών παραδειγμάτων μορφοκλασματικής παρεμβολής σύμφωνα με τις προτεινόμενες μεθοδολογίες.



Σχήμα 2: Παραδείγματα μορφοκλασματικής παρεμβολής για (α) 2×2, (β) 3×3 και (γ) 4×4 διαμερισμό του επιπέδου XY.

## 6. Συμπεράσματα

Στην εν λόγω εργασία μελετήθηκαν, παρουσιάστηκαν και υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι για την εύρεση του κυρτού περιβλήματος ενός αρχικού συνόλου σημείων, τον υπολογισμό του όγκου ενός κυρτού πολυέδρου και την εξακρίβωση της τομής δύο κυρτών πολυέδρων. Τόσο για την επιλογή ενός προϋπάρχοντος αλγορίθμου (περίπτωση κυρτού περιβλήματος) όσο και για την εισαγωγή νέων αλγορίθμων (περίπτωση όγκου και τομής), δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην αποδοτικότητά τους.

Οι παραπάνω αλγόριθμοι βρίσκουν εφαρμογή στην εξακρίβωση των παραμέτρων και κατά συνέπεια στην αλγοριθμική κατασκευή διδιάστατων μορφοκλασματικών συναρτήσεων παρεμβολής με χρήση περιβαλλόντων όγκων. Προτάθηκε και υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος υπολογισμού των βέλτιστων παραγόντων κατακόρυφης κλιμάκωσης μιας Μ.Ε.Π., έτσι ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστη αναπαράσταση των δεδομένων σημείων. Κατά την κατασκευή Μ.Ε.Π., η κύρια δυσκολία που έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν η εξασφάλιση της συνέχειας.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιορίζεται σε κυρτούς περιβάλλοντες όγκους, αφού οι μη κυρτοί είναι αβέβαιο ότι μπορούν να συνδυαστούν με αποδοτικούς αλγόριθμους ή να βελτιώσουν τα αποτελέσματα.

## Αναφορές

- [1] P. Manousopoulos, V. Drakopoulos, T. Theoharis: Parameter identification of 1D fractal interpolation functions using bounding volumes. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 233(4):1063-1082 (2009)
- [2] P. R. Massopust: Fractal surfaces. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 151(1):275-290 (1990)
- [3] P. R. Massopust: Fractal functions, fractal surfaces and wavelets. Academic Press, San Diego (1994)
- [4] X. Y. Qian: Bivariate fractal interpolation functions on rectangular domains. *Journal of Computational Mathematics*, 20(4):349-362 (2002)
- [5] H.-Y. Wang: On smoothness for a class of fractal interpolation surfaces. *Fractals*, 14(3):223-230 (2006)
- [6] J. S. Geronimo, D. Hardin: Fractal interpolation surfaces and a related 2-D multiresolution analysis. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 176(2):561-586 (1993)
- [7] N. Zhao: Construction and application of fractal interpolation surfaces. *The Visual Computer*, 12(3):132-146 (1996)
- [8] C. B. Barber, D. P. Dobkin, H. Huhdanpaa: The Quickhull Algorithm for Convex Hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 22, No. 4, Pages 469-483 (December 1996)
- [9] K. Clarkson, P. Shor: Applications of random sampling in computational geometry, ii. *Discr. Comput. Geom.* 4, 387-421 (1989)

Ευάγγελος Ι. Τζέμης

etzemis@di.uoa.gr

# Αξιολόγηση της Απόδοσης του Kinect σε 2D και 3D Διαδικασίες Κατάδειξης

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Παρουσιάζουμε μια μελέτη που αξιολογεί συγκριτικά την απόδοση δισδιάστατων (2D) και τρισδιάστατων (3D) διαδικασιών κατάδειξης (pointing) κατά την αλληλεπίδραση του χρήστη στο GUI κοινού υπολογιστή. Στα πειράματα, τα οποία βασίστηκαν στη μεθοδολογία που προτείνει το ISO 9241-9, επτά (7) συμμετέχοντες χρησιμοποίησαν τη συσκευή Microsoft Kinect και ένα ποντίκι. Για το 3D πείραμα εισαγάγαμε μια καινούργια διάταξη πειράματος την οποία προτείνουμε ως επέκταση στο ISO 9241-9. Εξετάζουμε τη συμμόρφωση των συσκευών με το νόμο του Fitts και μετράμε εννέα επιπλέον παραμέτρους, οι οποίες περιγράφουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την κίνηση και την τροχιά του κέρσορα. Η Ρυθμαπόδοση (Throughput), σε bits/sec, αξιολογήθηκε ως η πιο σημαντική παράμετρος απόδοσης. Στη διαδικασία 2D, ο αισθητήρας Kinect έχει Ρυθμαπόδοση 39% πιο χαμηλή συγκριτικά με αυτό του ποντικιού, η Επανείσοδος στην Επιφάνεια του Στόχου (Target Re-Entry) είναι 10 φορές μεγαλύτερη και ο αριθμός των Λανθασμένων Επιλογών (Missed Clicks) είναι σχεδόν 50% πιο υψηλός. Στη διαδικασία 3D, το ποντίκι έχει 9% πιο χαμηλή Ρυθμαπόδοση σε σχέση με το Kinect, ενώ η Επανείσοδος στην Επιφάνεια Στόχου και οι Λανθασμένες Επιλογές είναι σχεδόν στα ίδια επίπεδα. Τα αποτελέσματά μας, επίσης, συγκρίνονται με παλαιότερες μελέτες για τη συσκευή WiiMote. Τελικά, συμπεραίνουμε ότι το Kinect, όταν χρησιμοποιείται μέσω του χεριού και της φωνής του χρήστη, είναι μια κατάλληλη και αποδοτική μέθοδος εισόδου για διαδικασίες κατάδειξης, ειδικότερα σε περιβάλλοντα 3D.

Λέξεις κλειδιά: Νόμος του Fitts, ISO 9241-9, Microsoft Kinect, Gesture User Interface.

## Επιβλέπων

Κουρουπέτρογλου Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής

### 1. Εισαγωγή

Στις μέρες μας, οι χαμηλού κόστους συσκευές χειρός που έχουν εισαχθεί μαζί με τις ευρέως διαδεδομένες κονσόλες παιχνιδιών, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές εισόδου σε γενικού σκοπού προσωπικούς υπολογιστές (PCs). Το Kinect [1], είναι μια συσκευή εισόδου της Microsoft που ανιχνεύει κίνηση. Έχει σχεδιασθεί για χρήση με το Xbox 360, αλλά και για υπολογιστές που χρησιμοποιούν Microsoft Windows. Βασισμένο στη λογική μιας απλής κάμερας, δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να ελέγχουν και να αλληλοεπιδρούν με το Xbox 360 και με τον υπολογιστή, χωρίς την ανάγκη να χρησιμοποιήσουν κάποιο φυσικό χειριστήριο, αλλά μέσα από μία φυσική διεπαφή χρήστη, χρησιμοποιώντας χειρονομίες και προφορικές εντολές. Ο αισθητήρας Kinect είναι μια οριζόντια μπάρα, η οποία συνδέεται σε μία βάση που περιέχει έναν μηχανισμό περιστροφής, και έχει σχεδιαστεί με σκοπό να τοποθετείται κατά μήκος, πάνω ή κάτω από την οθόνη προβολής. Η συσκευή διαθέτει μια κάμερα RGB, έναν αισθητήρα βάθους και μια συστοιχία μικροφώνων. Μέσω ενός λογισμικού, είναι σε θέση να μας παρέχει πλήρη καταγραφή της κίνησης του σώματος του χρήστη σε τρεις διαστάσεις, αναγνώριση προσώπου και δυνατότητες αναγνώρισης φωνής. Ο αισθητήρας Kinect, σε αντίθεση με τις περισσότερες συσκευές του είδους του που είναι βασισμένες σε επιταχυνσιόμετρα, χρησιμοποιεί την κάμερα βάθους για να αναγνωρίσει δυναμικές χειρονομίες. Αυτός είναι και ο λόγος που ο χρήστης δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσει κανένα άλλο είδος τηλεχειριστηρίου πέρα από τα χέρια του.

Αν και η αναγνώριση δυναμικών χειρονομιών, χρησιμοποιώντας συσκευές με επιταχυνσιόμετρα, έχει διερευνηθεί σε πολυάριθμες μελέτες (για παραδείγματα



[2-3]), το ερευνητικό πεδίο σε συσκευές βασισμένες στην όραση [4] δεν είναι τόσο εκτεταμένο. Μία πολλά υποσχόμενη εφαρμογή λογισμικού που παρακολουθεί την 3D θέση, τον προσανατολισμό και την πλήρη άρθρωση ενός ανθρώπινου χεριού από τις οπτικές παρατηρήσεις, αναπτύχθηκε από τους Οικονομίδη, Κυριαζή και Αργυρό [5-6].

Οι συντομογραφίες 2D και 3D στην περίπτωση μας, όπου η γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) εμφανίζεται σε μία δισδιάστατη οθόνη σε αμφότερες τις περιπτώσεις, θα ήταν ακριβέστερο να περιγραφεί με τους όρους δύο κατευθύνσεων και τριών κατευθύνσεων, αντί για δισδιάστατη και τρισδιάστατη.

Η διαδικασία «κατάδειξη και επιλογή» (point-and-click) συχνά αναφέρεται απλά ως κατάδειξη (pointing) ή tapping και αποτελεί μια θεμελιώδη διαδικασία για τις περισσότερες 2D και 3D γραφικές διεπαφές χρήστη, με σκοπό οι χρήστες να πραγματοποιήσουν μια διαδικασία επιλογής αντικειμένου. Οι διαδικασίες Typing, resizing, dragging, scrolling, καθώς και άλλες διαδικασίες αλληλεπίδρασης με το GUI, απαιτούν κατάδειξη. Για την καλύτερη ανάπτυξη τεχνικών κατάδειξης πρέπει να κατανοήσουμε την ανθρώπινη συμπεριφορά σε αυτή τη διαδικασία. Ο νόμος του Fitts [7] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να:

- Μοντελοποιήσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι χρήστες κάνουν επιλογή στόχου,
- Μετρήσουμε την απόδοση του χρήστη,
- Συγκρίνουμε τις επιδόσεις του χρήστη ανάμεσα σε διαφορετικές συσκευές εισόδου ή την διακύμανση της απόδοσης του στην διάρκεια του χρόνου.

Ο νόμος του Fitts έχει εφαρμοστεί σε 3D διαδικασίες κατάδειξης [8] καθώς και στο να σχεδιαστούν αλληλεπιδράσεις μέσω κατάδειξης βασισμένες στις χειρονομίες (gesture-based) [9]. Οι πιο κοινές μετρικές αξιολόγησης που σχετίζονται με το νόμο του Fitts είναι η ταχύτητα και η ακρίβεια, οι οποίες ενσωματώνονται στην απόδοση ρυθμαπόδοση (throughput).

## 2. Μεθοδολογία

Ο Fitts [7] πρότεινε ένα μοντέλο για τη συσχέτιση ανάμεσα στην ακρίβεια και την ταχύτητα στις μηχανικές κινήσεις του ανθρώπου. Πρότεινε να ποσοτικοποιηθεί η δυσκολία μια διεργασίας κίνησης χρησιμοποιώντας τη μετρική «bits».

Σύμφωνα με τον Fitts, ο Χρόνος Κίνησης (Movement Time)  $MT$  που απαιτείται για να πετύχεις ένα στόχο, είναι γραμμικά σχετιζόμενος με το Βαθμό Δυσκολίας (Index of Difficulty)  $ID$  της διαδικασίας:

$$MT = \alpha + (b \times ID) \quad (1)$$

Όπου τα  $\alpha$  και  $b$  είναι σταθερές που καθορίζονται μέσω της γραμμικής παρεμβολής,

$$ID = \log\left(\frac{D}{W} + 1\right) \quad (2)$$

και τα  $D$  και  $W$  είναι η απόσταση και το πλάτος των στόχων, αντιστοίχως.

Ο Fitts πρότεινε να ποσοτικοποιηθεί ο ανθρώπινος ρυθμός επεξεργασίας πληροφοριών σε στοχευμένες κινήσεις, χρησιμοποιώντας ως μονάδες τα «bits ανά δευτερόλεπτο». Ο Fitts τον ονόμασε Δείκτη Απόδοσης (index of performance), αλλά σήμερα είναι πιο ευρέως γνωστός ως ρυθμαπόδοση (Throughput)  $TP$ , σε bits/s. Παρόλο που υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της ρυθμαπόδοσης στη βιβλιογραφία, η συνιστώμενη είναι αυτή που προτάθηκε από τον Fitts το 1954 [7]. Ο υπολογισμός αφορά την άμεση διαίρεση των μέσων τιμών: Διαιρώντας τα  $ID$  (bits) προς τη μέση τιμή του Χρόνου Μετακίνησης  $MT$  (seconds), υπολογισμένα σε ένα σύνολο από δοκιμασίες:

$$TP = \frac{ID_e}{MT} \quad (4)$$

Ο δείκτης  $e$  στο  $ID_e$  αντανakλά μια μικρή αλλά σημαντική προσαρμογή την οποία υιοθέτησε ο Fitts σε μια επόμενη εργασία [10]. Η προσαρμογή για ακρίβεια («adjustment for accuracy») περιλαμβάνει πρώτα τον υπολογισμό του Ενεργού Πλάτους Στόχου (effective target Width)  $W_e$  ως:

$$W_e = 4,133 \times SD_x \quad (5)$$

όπου  $SD_x$  είναι η τυπική απόκλιση στις συντεταγμένες που επέλεξε ένας συμμετέχων κατά τη διάρκεια επανειλημμένων δοκιμών για ένα συγκεκριμένο ζεύγος  $D-W$ . Υπολογισμένο με τον τρόπο αυτό, το  $W_e$  περιέχει τη χωρική μεταβλητότητα ή την ακρίβεια στις αποκρίσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα

να απαιτείται μια παρόμοια προσαρμογή στο  $ID$ , έτσι ορίζουμε έναν Ενεργό Δείκτη Δυσκολίας (effective Index of Difficulty):

$$ID = \log_2 \left( \frac{D}{W_e} + 1 \right) \quad (6)$$

Ο  $TP$  είναι ένα μέτρο απόδοσης του χρήστη που ενσωματώνει τόσο την ταχύτητα, όσο και την ακρίβεια των αποκρίσεων. Ο  $TP$  είναι κυρίως χρήσιμος ως μια εξαρτημένη μεταβλητή σε παραγοντικά πειράματα, χρησιμοποιώντας συσκευές κατάδειξης ή τεχνικές κατάδειξης ως ανεξάρτητες μεταβλητές.

Για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης του Kinect στο νόμο του Fitts ως συσκευή εισόδου, χρησιμοποιήσαμε μια εφαρμογή λογισμικού που είχαμε σχεδιάσει και υλοποιήσει στο παρελθόν [11], βασισμένη στο πρότυπο ISO 9241-1 [12-13], η οποία καλύπτει τις περιοχές που σχετίζονται με τις αλληλεπιδράσεις χρήστη, είτε αυτές είναι προς μία κατεύθυνση είτε σε πολλαπλές. Το ISO 9241-1 περιγράφει μια τυποποιημένη διαδικασία για την αξιολόγηση της επίδοσης, την άνεση και την προσπάθεια που απαιτείται όταν χρησιμοποιούνται συσκευές κατάδειξης για PC.

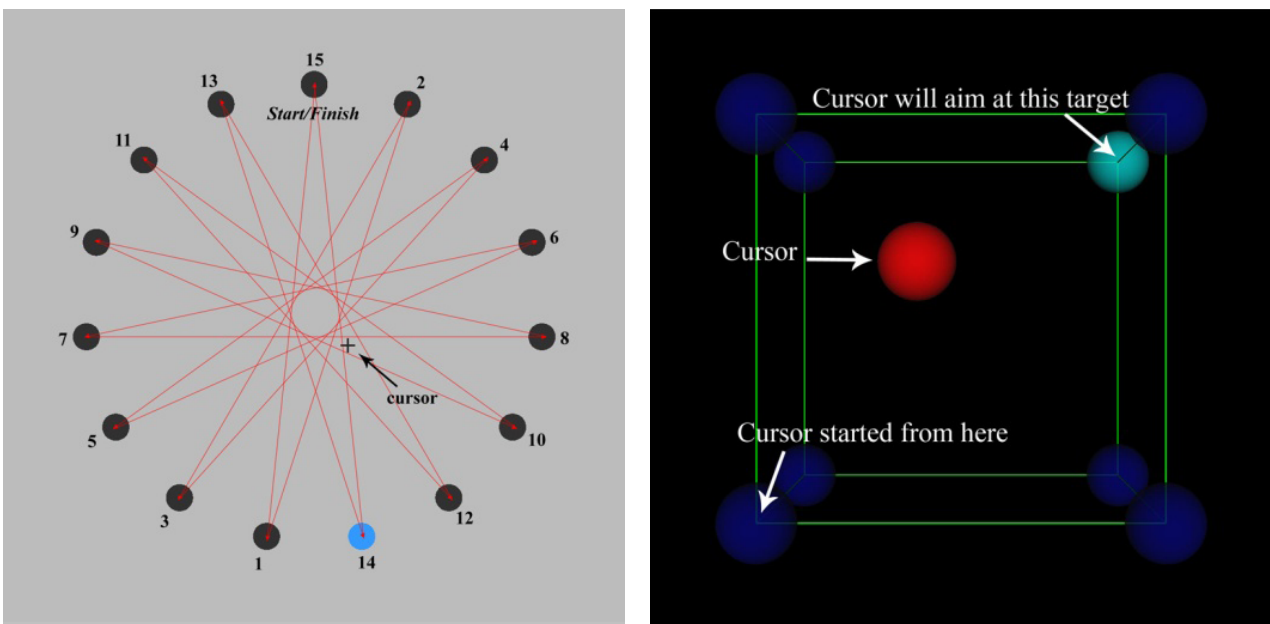
Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα GUIs για τα 2D και 3D πειράματα. Οι χρήστες κλήθηκαν να πραγματοποιήσουν διεργασίες κατάδειξης για 5 συνδυασμούς απόστασης και πλάτους στόχων, άρα για 5 διαφορετικά  $ID$ , με αυξανόμενο βαθμό δυσκολίας. Για κάθε  $ID$  καλούνται να πετύχουν 15 στόχους στο 2D πείραμα και 8 στόχους στο 3D. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις τιμές των  $ID$  που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μια από τις 5 συνεδρίες. Τα  $ID$  ήταν γενικά πιο χαμηλά στο 3D πείραμα, διότι μεγαλύτερες τιμές οδηγούσαν σε μη απεικονίσιμες διατάξεις των στόχων πάνω στην οθόνη.

Session	2D IDs	3D IDs
1 <sup>st</sup>	2.69	1.91
2 <sup>nd</sup>	3.19	2.35
3 <sup>rd</sup>	3.69	2.81
4 <sup>th</sup>	4.19	3.28
5 <sup>th</sup>	4.69	3.76

Πίνακας 1: Οι Βαθμοί Απόδοσης ( $ID$ s) που χρησιμοποιήθηκαν για τα 2D και 3D πειράματα.

Στην περίπτωση του 2D, παρατάχθηκαν 5 κυκλικοί στόχοι σε μια κυκλική διάταξη (Σχήμα 1, αριστερά). Στην αρχή, ο κέρσορας είναι κλειδωμένος χωρίς τη δυνατότητα να κινηθεί στο κέντρο του πρώτου στόχου. Ο χρήστης πρέπει να κάνει κλικ για να απελευθερώσει τον κέρσορα και να ξεκινήσει το πείραμα. Στη συνέχεια, ο συμμετέχων πρέπει να κουνήσει τον κέρσορα κατευθείαν στον επισημασμένο στόχο που βρίσκεται απέναντι και να κάνει κλικ πάνω του. Η διαδικασία συνεχίζεται με την ίδια λογική και με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Κάθε ομάδα δοκιμασιών ολοκληρώνεται όταν έχουν επιλεγθεί και οι 15 στόχοι και για τις 5 συνεδρίες, δίνοντας συνολικά 75 δοκιμασίες ανά χρήστη. Χρησιμοποιήθηκαν κυκλικοί στόχοι και ένας κέρσορας σε σχήμα σταυρού. Το μονοπάτι αρχίζει και τελειώνει στο στόχο που βρίσκεται στην πάνω θέση. Οι γραμμές στο Σχήμα 1 (αριστερά) απεικονίζουν το ιδανικό μονοπάτι, καθώς εναλλάσσονται οι στόχοι γύρω από τον κύκλο. Οι αριθμοί υποδεικνύουν τη σειρά με την οποία πρέπει να χτυπηθούν οι στόχοι. Το Σχήμα 1 (αριστερά) απεικονίζει το πείραμα για το 4<sup>ο</sup> ID ( $ID = 4.19$ ).



Σχήμα 1: Εικόνες από τις 2D (αριστερά) και 3D (δεξιά) διαδικασίες κατάδειξης.

Για το 3D πείραμα εισαγάγαμε μια καινούργια πειραματική διάταξη, καθώς το ISO 9241-9 δεν προέβλεπε 3D αλληλεπίδραση στην οθόνη του υπολογιστή.

Χρησιμοποιήσαμε 8 σφαιρικούς στόχους τοποθετημένους στις κορυφές ενός κύβου (Σχήμα 1, δεξιά). Κάθε διαδικασία αρχίζει πάλι με ένα κλικ, στο κέντρο του κάτω αριστερά στόχου. Στη συνέχεια, ο χρήστης πρέπει να κουνήσει τον κέρσορα στο στόχο που βρίσκεται διαγωνίως αντίθετα και να κάνει κλικ σε αυτόν. Μετά από μία επιτυχημένη δοκιμασία, ο κέρσορας μεταφέρεται αυτόματα σε έναν άλλο στόχο που θα γίνει η αρχή για την επόμενη τροχιά. Ο ενεργός στόχος που πρέπει να κάνουμε κλικ, είναι κάθε φορά τονισμένος με διαφορετικό χρώμα. Κάθε τεστ ολοκληρώνεται όταν και οι 8 διαγωνίες διαδρομές έχουν ολοκληρωθεί επιτυχώς (8 δοκιμασίες) και 5 συνεδρίες, οι οποίες περιέχουν διαφορετικές ακτίνες κύκλου και συνδυασμούς αποστάσεων (συνολικά 5 διαφορετικά ID), δίνοντας συνολικά 40 δοκιμασίες ανά χρήστη. Ο κέρσορας αυτή τη φορά είναι επίσης σφαίρα (κόκκινη). Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης μπορεί να αντιληφθεί σε ποια θέση βρίσκεται ο κέρσορας συγκρίνοντας το μέγεθος του με αυτό των μπροστινών και των πίσω στόχων. Όσο μικρότερος είναι ο στόχος τόσο πιο βαθιά είναι στην εικόνα. Όταν είναι στο ίδιο μέγεθος με κάποιον από τους στόχους τότε σημαίνει ότι βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο του άξονα z με αυτόν. Το Σχήμα 1 (δεξιά) απεικονίζει το πείραμα για ID = 3.28.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι απενεργοποιήσαμε κάθε ρύθμιση που αφορούσε την επιτάχυνση και την ακρίβεια της θέσης του κέρσορα του ποντικιού στο λειτουργικό MS-Windows. Χρησιμοποιήθηκε επίσης ένα mouse pad διαστάσεων 40X30 cm, και το αριστερό κουμπί για κλικ. Όσον αφορά το Kinect λαμβάνουμε τις συντεταγμένες για τη μετακίνηση του κέρσορα χρησιμοποιώντας την κάμερα βάθους, αφού αναγνωρίσουμε το χέρι του χρήστη και τις κινήσεις που έκανε αυτό. Λαμβάναμε υπόψη μόνο τις κινήσεις στον x και στον y άξονα, και όχι στον z.

Όσον αφορά τα 3D πειράματα η διαφορά έγκειται στο ότι χρησιμοποιήσαμε τη ρόδα κύλισης του ποντικιού (scrolling wheel) για να κινούμαστε στον άξονα z. Για το Kinect χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα που λαμβάναμε για τον άξονα z από την κάμερα βάθους. Πρέπει επίσης να επισημάνουμε ότι η λειτουργία του κλικ και στα δύο πειράματα που αφορούσαν το Kinect, επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας τη διάταξη μικροφώνων του ίδιου του αισθητήρα Kinect. Ο χρήστης έπρεπε να παράγει ένα σύντομο επιφώνημα έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η διαδικασία του κλικ. Για παράδειγμα το επιφώνημα «A» είναι αρκετό για να γίνει το κλικ.

Η ανάλυση που έχουμε κάνει βασίζεται στη θεωρία που προτάθηκε από τον Fitts [7, 10] και από τους MacKenzie et al. [14]. Ειδικότερα, μετρήσαμε τις τιμές των εξής παραμέτρων (λεπτομερείς ορισμοί και τύποι μπορούν να βρεθούν στις [11], [14], και [15]):

- TP: Ρυθμαπόδοση (Throughput) σε bits ανά sec,
- MCL: Λανθασμένες Επιλογές (Missed Clicks),
- TRE: Επανείσοδος στην Επιφάνεια του Στόχου (Target Re-Entries),
- TAC: Διάτμηση του άξονα που ενώνει τα κέντρα των στόχων (Task Axis Crossings),
- MDC: Αλλαγή Κατεύθυνσης Κίνησης (Movement Direction Changes),
- ODC: Ορθογώνια Μεταβολή Κατεύθυνσης (Orthogonal Direction Changes),
- MV: Μεταβλητότητα Κίνησης (Movement Variability) σε pixels,
- ME: Σφάλμα Μετακίνησης (Movement Error) σε pixels,
- MO: Μετατόπιση Κίνησης (Movement Offset) σε pixels.

Επιπλέον, εισαγάγαμε μια νέα παράμετρο που την ονομάσαμε Διανυθείσα Απόσταση (Distance Travelled)  $DT$ , που ορίζεται ως η απόσταση σε pixels που καλύφθηκε από το σημείο έναρξης μέχρι το επιτυχημένο κλικ μέσα στον ενεργό στόχο κάθε δοκιμασίας. Η  $DT$  δίνει μια αίσθηση του πόσο κοντά στην ιδανική ήταν η διαδρομή μας. Σε μία τέλεια δοκιμασία, όπου ο κέρσορας ξεκινά από το κέντρο του στόχου εκκίνησης και ο χρήστης κάνει κλικ στο κέντρο του ενεργού στόχου, η Διανυθείσα Απόσταση πρέπει να είναι ίση με την Απόσταση  $D$ . Οι Keates και al. [15] επίσης εισήγαγαν μια σειρά από παρεμφερείς μετρικές με την  $DT$ .

Η εφαρμογή αναπτύχθηκε [16] ως ένα Εικονικό Όργανο (Virtual Instrument), χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) της National Instruments [17]. Αναπτύξαμε κατάλληλο λογισμικό στο LabVIEW για να παίρνουμε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, τόσο από την κάμερα βάθους, όσο και από τη συστοιχία μικροφώνων του Kinect.

Το Kinect ήταν συνδεδεμένο σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω της θύρας USB 2.0. Ο υπολογιστής ήταν ένας σταθερός πύργος με επεξεργαστή Intel Core i7 στα 3.50 GHz, μνήμη RAM 8 GB, λειτουργικό σύστημα MS-Windows 7 Professional και LabVIEW Ver. 2011. Χρησιμοποιήσαμε μια οθόνη 19" TFT με ανάλυση 1280×1024 και ένα ασύρματο ποντίκι 1600 dpi.

Επτά (7) συμμετέχοντες πήραν μέρος εθελοντικά στα πειράματα. Η ηλικία τους κυμαίνεται μεταξύ 22 και 55 χρόνων. Κανένας δεν είχε κάποιο είδος αναπηρίας και επίσης όλοι τους δεν είχαν προηγούμενη εμπειρία στη χρήση του Microsoft Kinect.

Στους χρήστες δόθηκε η οδηγία να πετύχουν τους ενεργούς στόχους σε κάθε δοκιμασία, όσο πιο γρήγορα και όσο πιο κοντά στο κέντρο του μπορούσαν. Και στα δύο πειράματα είχαν δοθεί οδηγίες στους χρήστες να μην σταματάνε σε εσφαλμένα κλικ, αλλά μια ηχητική ανάδραση δίνεται στην περίπτωση αυτή. Οπτική ανάδραση επίσης παρεχόταν όταν ο κέρσορας ήταν μέσα στο στόχο. Τέλος, σε περίπτωση επιτυχημένου κλικ είχαμε και οπτική αλλά και ακουστική ανάδραση. Με σκοπό την επίτευξη των καλύτερων δυνατών αποτελεσμάτων, οι χρήστες χρησιμοποιούσαν ακουστικά κεφαλής με σκοπό, εκτός της ακύρωσης του εξωτερικού θορύβου, να ακούνε πιο καθαρά τα ηχητικά σήματα. Επιπλέον, τα πειράματα λάμβαναν χώρα σε σκοτεινό περιβάλλον (η φωτεινότητα της οθόνης ήταν η μόνη πηγή φωτός), με στόχο να μην υπάρχει απόσπαση της προσοχής από άλλα αντικείμενα του περιβάλλοντος, αλλά επίσης και για να έχουμε καλύτερη οπτική επαφή με την οθόνη. Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με το ποντίκι, οι χρήστες καθόντουσαν σε καρέκλα, έχοντας ένα τραπέζι με το ποντίκι και το mouse pad μπροστά τους. Στο πείραμα με το Kinect, ήταν όρθιοι έχοντας ανορθωμένο το δεξί χέρι μπροστά τους στο ύψος των ώμων τους. Και στα δύο πειράματα οι χρήστες βρισκόντουσαν σε απόσταση 2 μέτρων από την οθόνη. Τέλος, κάθε διαδικασία εξηγήθηκε και παρουσιάστηκε στους συμμετέχοντες και όλοι πραγματοποίησαν ένα κύκλο προθέρμανσης, στο μεσαίο επίπεδο δυσκολίας (ID), για κάθε συσκευή και κάθε φάση (2D, 3D).

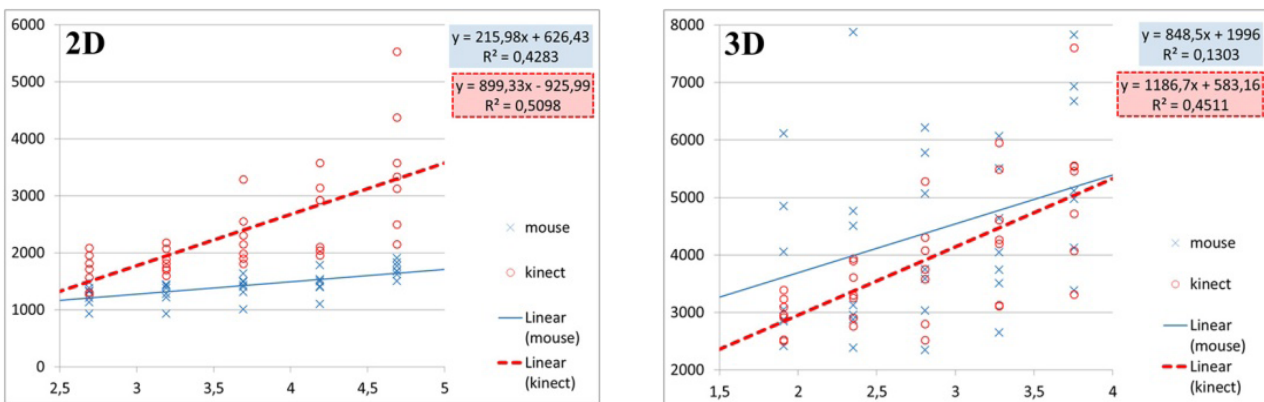
### 3. Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται όλα τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τους δείκτες  $MT$  σαν συνάρτηση του  $ID$  για όλους τους συμμετέχοντες και στα δύο πειράματα 2D, 3D χρησιμοποιώντας το ποντίκι και το Kinect.

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης παράγοντας  $R$ , μετράει την ισχύ και την κατεύθυνση της γραμμικής σχέσης μεταξύ των μεταβλητών  $ID$  και  $MT$ . Η τιμή του  $R$  είναι τέτοια ώστε  $-1 < R < +1$ . Θετικές τιμές υποδεικνύουν μια γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών τέτοια, ώστε καθώς η τιμή του  $ID$  αυξάνεται, ο  $MT$  επίσης αυξάνεται. Αρνητικές τιμές υποδεικνύουν μια σχέση τέτοια ώστε



όταν αυξάνονται οι τιμές του  $ID$ , οι τιμές του  $MT$  μειώνονται. Στη δική μας περίπτωση οι τιμές του  $R$  ήταν πάντα θετικές. Αν δεν υπάρχει καθόλου ή υπάρχει μικρή γραμμική συσχέτιση, τότε η τιμή του  $R$  πλησιάζει το 0. Μία τιμή κοντά στο μηδέν σημαίνει ότι υπάρχει μία τυχαία μη γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Μία συσχέτιση μεγαλύτερη από 0.8 είναι γενικά αποδεκτή ως ισχυρή, ενώ μία συσχέτιση με τιμή μικρότερη από 0.5 αναφέρεται ως ασθενής. Για τα 2D πειράματα το  $R$  ήταν 0.65 για το ποντίκι και 0.71 για το Kinect. Στα 3D πειράματα το  $R$  ήταν 0.36 για το ποντίκι και 0.67 για το Kinect.



**Σχήμα 2:** Γραφικές παραστάσεις με τις μέσες τιμές του Χρόνου Μετακίνησης για όλες τις δοκιμασίες ( $MT$  σε milliseconds) ως συνάρτηση του Βαθμού Δυσκολίας ( $ID$  σε bits) για όλους τους συμμετέχοντες στα 2D (αριστερά) και 3D (δεξιά) πειράματα χρησιμοποιώντας το Kinect (διακεκομμένες γραμμές) και το ποντίκι (συνεχής γραμμή).

Ο Συντελεστής Προσδιορισμού (coefficient of determination)  $R^2$ , είναι χρήσιμος επειδή μας δίνει το ποσοστό της διακύμανσης μιας μεταβλητής, η οποία είναι προβλέψιμη, από μια άλλη μεταβλητή. Πρόκειται για ένα μέτρο που μας επιτρέπει να καθορίσουμε πόσο σίγουρος μπορεί να είναι κάποιος όταν κάνει προβλέψεις σε ένα συγκεκριμένο μοντέλο/γράφημα, στην περίπτωση μας τον νόμο του Fitts. Οι τιμές που παίρνει ο όρος  $R^2$  είναι  $0 < R^2 < 1$ , και δηλώνει την ισχύ της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του  $ID$  και του  $MT$ . Αντιπροσωπεύει το ποσοστό των δεδομένων που είναι πιο κοντά στη γραμμή βέλτιστης προσαρμογής (best fit line). Για παράδειγμα, η γραμμή που αντιπροσωπεύει το 2D Kinect, έχει  $R^2 = 0.51$ , που σημαίνει ότι 51% της συνολικής διακύμανσης στο  $MT$  μπορεί να εξηγηθεί από τη γραμμική σχέση μεταξύ του  $ID$  και του  $MT$  (όπως περιγράφεται από την εξίσωση της παρεμβολής). Το υπόλοιπο 49% της συνολικής διακύμανσης παραμένει ανεξήγητο. Το  $R^2$  είναι μια μονάδα που μας δείχνει το κατά πόσο η γραμμική παρεμβολή αντιπροσωπεύει τα δεδομένα, ή καλύτερα το κατά πόσο

τα πειραματικά μας δεδομένα συμμορφώνονται με το νόμο του Fitts. Αν η γραμμή της παρεμβολής περνάει ακριβώς από κάθε σημείο του γραφήματος, τότε ο νόμος του Fitts θα ήταν ικανός να εξηγήσει όλη την διακύμανση. Όσο πιο μακριά βρίσκεται η γραμμή από τα σημεία, τόσο λιγότερο είναι ικανός ο νόμος του Fitts να εξηγήσει τη διακύμανση.

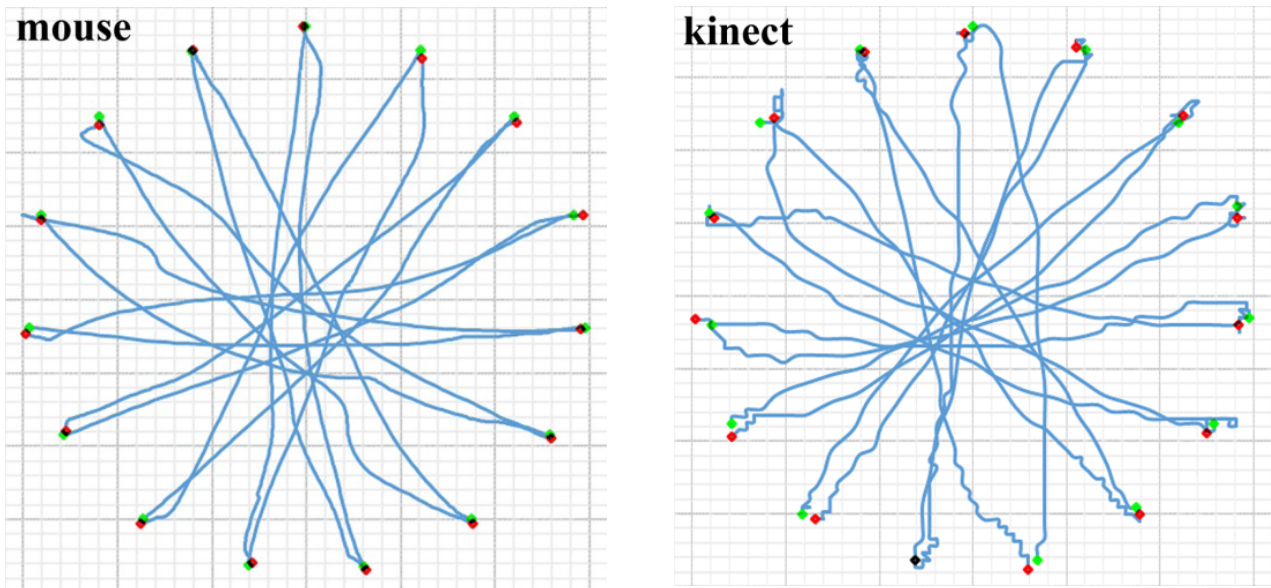
		TP	MCL	TRE	TAC	MDC	ODC	MV	ME	MO	DT
2D	Mouse	3,45	0,30	0,07	2,62	31,50	1,24	11,39	12,95	3,73	569
	Kinect	2,10	0,28	0,69	4,85	18,82	5,28	16,97	15,80	3,41	905
3D	Mouse	0,96	0,53	0,18	-	41,10	12,37	78,30	109,10	-	1285
	Kinect	1,06	0,28	0,66	-	28,08	25,07	80,83	106,53	-	1563

Πίνακας 2: Μέσες τιμές, των υπολογισμένων παραμέτρων που αφορούν την τροχιά του κέρσορα, οι οποίες παράχθηκαν από τις δύο συσκευές εισόδου στα 2D και 3D πειράματα.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων από όλους τους χρήστες. Σημειώνουμε ότι στο 3D πείραμα ο δείκτης TAC δεν έχει νόημα γιατί ακόμα και αν υπήρχε ένας άξονας που να συνέδεε τα κέντρα των δύο σφαιρών, η πιθανότητα να τον διασχίσουμε στην πραγματικότητα είναι πάρα πολύ χαμηλή. Επίσης, το Σφάλμα Μετακίνησης είναι πανομοιότυπο με τη Μετατόπιση Κίνησης.

Το Σχήμα 3 απεικονίζει τυπικές συνεδρίες που παρατηρήθηκαν για το ποντίκι (αριστερά) και για το Kinect (δεξιά). Είναι εμφανές ότι για τις 2D διαδικασίες το ποντίκι δείχνει ότι συμπεριφέρεται πιο ομαλά και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το Kinect εισάγει τρέμουλο που παρουσιάζεται στους περισσότερους χρήστες. Ακόμα και όταν αυτό δεν είναι εμφανές με το μάτι, εντούτοις παρουσιάζεται στα διαγράμματα. Για τις συγκεκριμένες συνεδρίες που απεικονίζονται στο Σχήμα 3, οι μέσες τιμές από τους πιο σημαντικούς δείκτες είναι:

- Mouse:  $MT = 1829$  ms,  $TP = 3.27$  bits/s,  $DT = 783.75$  pixels
- Kinect:  $MT = 2148$  ms,  $TP = 2.60$  bits/s,  $DT = 865.61$  pixels



Σχήμα 3: Γραφικές παραστάσεις από δύο δύσκολες 2D συνεδρίες με  $ID = 4.69$ : ποντίκι (αριστερά), και Kinect (δεξιά).

Θα συγκρίνουμε, εν συντομία, τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος σε σχέση με το προηγούμενο το οποίο περιελάμβανε το mouse και το WiiMote [16]. Για το ποντίκι, η βασική διαφορά ήταν ότι στο προηγούμενο πείραμα είχαν ενεργοποιηθεί οι ρυθμίσεις των MS-Windows 7 για βελτίωση της ακρίβειας του. Η ρύθμιση ονομάζεται «enhance pointer precision» και επιταχύνει τον κέρσορα όταν κινούμαστε γρήγορα, ενώ τον επιβραδύνει όταν ο χρήστης πηγαίνει πιο αργά με σκοπό να τον βοηθήσει στην επίτευξη ενός στόχου. Με τον τρόπο αυτό στα προηγούμενα πειράματα ο χρήστης είχε κάποια εικονική βοήθεια όταν προσπαθούσε να πετύχει έναν συγκεκριμένο στόχο. Παρ' όλα αυτά, αποφασίσαμε στο συγκεκριμένο πείραμα να απενεργοποιήσουμε αυτή τη ρύθμιση για να είναι πιο δίκαιη η σύγκριση των δύο συσκευών. Επίσης, ρυθμίσαμε την ταχύτητα κίνησης του ποντικιού με σκοπό να είναι συγκρίσιμη με αυτή των άλλων συσκευών.

Στο προηγούμενο πείραμα το ποντίκι είχε τιμή Ρυθμαπόδοσης 5.05 bits/sec για το 2D και 1.71 bits/sec για το 3D πείραμα, οι οποίες ήταν πολύ καλύτερες αποδόσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές 3.45 bits/sec και 0.96 bits/sec της παρούσας εργασίας. Οι προηγούμενες ρυθμίσεις ακριβείας, που αυτή την φορά απενεργοποιήθηκαν, τεκμηριώνουν τα αποτελέσματα μας και τη διαφορά στις αποδόσεις.

Εντούτοις, αυτό που έχει το περισσότερο ενδιαφέρον και σημασία είναι η σύγκριση μεταξύ των επιδόσεων του WiiMote και του Kinect: Στο προηγούμενο

πείραμα [16] το WiiMote μας έδωσε Ρυθμαπόδοση 2.97 bits/sec και 0.75 bits/sec στο 2D και 3D αντίστοιχα. Στο τωρινό πείραμα το Kinect έδωσε 2.10, και 1.06 bits/sec. Αυτό σημαίνει ότι το WiiMote είναι καλύτερο σε διαδικασίες 2D, ενώ το Kinect είναι καλύτερο στις 3D.

#### 4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάσαμε μια πειραματική μελέτη βασισμένοι στο πρότυπο ISO 9241-9 για τη συγκριτική αξιολόγηση 2D and 3D διαδικασιών κατάδειξης. Μια συσκευή Microsoft Kinect και ένα ποντίκι χρησιμοποιήθηκαν από επτά (7) συμμετέχοντες. Για το 3D πείραμα εισαγάγαμε μια καινούργια διάταξη που συμπληρώνει το ISO 9241-9, καθώς και μια καινούργια μετρική αξιολόγησης, τη Διανυθείσα Απόσταση  $DT$ .

Συμπεραίνουμε ότι για το 2D πειραματικό μέρος, χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα Kinect, η Ρυθμαπόδοση είναι 39% πιο χαμηλή από αυτή του ποντικιού και ο αριθμός των Λανθασμένων Επιλογών παραμένει σχεδόν στα ίδια επίπεδα. Στην περίπτωση των 3D πειραμάτων, χρησιμοποιώντας το Kinect, η Ρυθμαπόδοση, είναι 9.7% πιο υψηλή από αυτή του ποντικιού, ενώ ο αριθμός των Λανθασμένων Επιλογών είναι αισθητά πιο χαμηλός.

Επιπλέον, στο 2D πείραμα, ο Συντελεστής Προσδιορισμού ( $R^2$ ) που αντανακλά την αξιοπιστία της γραμμικής σχέσης μεταξύ των τιμών του  $MT$  και του  $ID$  και ως αποτέλεσμα τη συμμόρφωση στο νόμο του Fitts, είναι ελαφρώς υψηλότερη για το Kinect παρά για το ποντίκι. Όσον αφορά το 3D πείραμα παρατηρούμε με βεβαιότητα ότι η συμμόρφωση με το νόμο του Fitts είναι πλέον πολύ υψηλότερη για το Kinect, παρά για το ποντίκι.

Τέλος, καταλήγουμε ότι το Microsoft Kinect αποδείχθηκε ότι είναι μια πιο αργή και πιο δύσκολη στο χρήστη συσκευή για τις 2D διαδικασίες κατάδειξης, συγκριτικά με το ποντίκι. Παρ' όλα αυτά, στα 3D πειράματα η κατάσταση ανατρέπεται όσον αφορά την ταχύτητα και την ακρίβεια του Kinect. Το Kinect δουλεύει καλύτερα από το ποντίκι στο 3D πείραμα. Άρα, μπορούμε να συμφωνήσουμε ότι τόσο το ποντίκι όσο και το Kinect έχουν πολύ χαμηλό  $TP$  ως 3D συσκευές κατάδειξης, γεγονός που δικαιολογείται μερικώς από το ότι κανένας από τους χρήστες δεν είχε ποτέ του οποιαδήποτε αλληλεπίδραση με 3D περιβάλλον.

Η μελλοντική ερευνητική εργασία μας θα περιλαμβάνει τη συμμετοχή περισσότερων χρηστών στα πειράματα, συμπεριλαμβανομένων και ατόμων με κινητικές αναπηρίες, θα ερευνά το κατά πόσο η απόδοση αλλάζει στη διάρκεια του χρόνου, και τέλος θα εισάγει νέες μεταβλητές τροχιάς για το 3D πείραμα σε σφαιρικές συντεταγμένες.

Μέρος της εργασίας αυτής έχει δημοσιευθεί ως:

A. Pino, E. Tzemis, N. Ioannou and G. Kouroupetroglou «Using Kinect for 2D and 3D Pointing Tasks: Performance Evaluation» in M. Kurosu (Ed.): Human-Computer Interaction, Part IV, HCII 2013, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) Vol. 8007, pp. 358-367, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

<http://www.hcii2013.org/wednesday>

## Αναφορές

- [1] Microsoft: Kinect - Xbox.com. Xbox 360 + Kinect homepage <http://www.xbox.com/en-US/kinect>
- [2] Kela, J., Korpipää, P., Mäntyjärvi, J., Kallio S., Savino, G., Jozzo L., Marca, D.: Accelerometer-Based Gesture Control for a Design Environment. Pers. Ubiquit. Comput. 10(5), 285-299 (2006)
- [3] Kratz, S., Rohs, M.: The \$3 recognizer: Simple 3D Gesture Recognition on Mobile Devices. In: IUI '10, 15th International Conference on Intelligent User Interfaces, pp. 419-420. ACM Press, New York (2010)
- [4] Marvel, J.A., Franaszek, M., Wilson, J., and Hong, T.H.: Performance Evaluation of Consumer-Grade 3D Sensors for Static 6DOF Pose Estimation Systems. In: Tescher, A.G. (ed) Applications of Digital Image Processing XXXV, SPIE Optical Engineering and Applications Conference, vol. 8499, article 849905, SPIE, Bellingham, WA, (2012)

- [5] Oikonomidis, I., Kyriazis, N., and Argyros, A.A.: Efficient Model-Based 3D Tracking of Hand Articulations Using Kinect. In: Hoey, J., McKenna, S., and Trucco, E. (eds.), 22nd British Machine Vision Conference, pp. 101.1-101.11. BMVA Press, Manchester (2011)
- [6] Oikonomidis, I., Kyriazis N., and Argyros, A.A.: Tracking the Articulated Motion of Two Strongly Interacting Hands. In: CVPR 2012, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1862-1869, IEEE (2012)
- [7] Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J. Exp. Psychol.* 47(6), 381-391 (1954).
- [8] Murata, A., Iwase, H.: Extending Fitts' law to a three-dimensional pointing task. *Hum. Mov. Sci.* 20, 791-805 (2001)
- [9] Foehrenbach, S., König, W.A., Gerken, J., Reiterer, H.: Tactile Feedback Enhanced Hand Gesture Interaction at Large, High-resolution Displays. *J. Visual Lang. Comput.* 20(5), 341-351(2009)
- [10] Fitts, P. M., and Peterson, J. R.: Information capacity of discrete motor responses. *J. Exp. Psychol.* 67(2), 103-112 (1964)
- [11] Pino, A., Kalogeros, E., Salemis, I., Kouroupetroglou, G.: Brain Computer Interface Cursor Measures for Motion-impaired and Able-bodied Users. In: Stephanidis C. (ed) HCI International 2003. Universal Access in HCI: Inclusive Design in the Information Society, vol. 4, pp. 1462-1466. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, (2003)
- [12] ISO 9241-9:2000: Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs) - Part 9: Requirements for Non-keyboard Input Devices. ISO Standard (2000)
- [13] Soukoreff, W.R., MacKenzie, I.S.: Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *Int. J. Hum.-Comput. St.* 61(6), 751-789 (2004)
- [14] MacKenzie, I.S., Kauppinen, T., Silfverberg, M.: Accuracy measures for evaluating computer pointing devices. In: CHI '01, SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 9-16. ACM Press, New York (2001)
- [15] Keates, S., Hwang, F., Langdon, P., Clarkson, J.P.: Cursor measures for motion-impaired computer users. In ASSETS 2002, the 5th International ACM Conference on Assistive Technologies, pp. 135-142. ACM Press, New York (2002)

- [16] Kouroupetroglou G., Pino A., Balmpakakis A., Chalastanis, D., Golematis, V., Ioannou, N., and Koutsoumpas, I. Using WiiMote for 2D and 3D Pointing Tasks: Gesture Performance Evaluation. (LNAI), vol. 7206, pp. 13-23, Springer, Heidelberg (2012)
- [17] National Instruments: NI LabVIEW - Improving the Productivity of Engineers and Scientists. LabVIEW System Design Software homepage <http://www.ni.com/labview/>





# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ



Γιώργος Ν. Γαρμπής

[ggarbis@di.uoa.gr](mailto:ggarbis@di.uoa.gr)

# Παρακολούθηση Πυρκαγιών σε Πραγματικό Χρόνο χρησιμοποιώντας Τεχνολογίες Σημασιολογικού Ιστού και Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Στην εργασία αυτή ασχολούμαστε με την εφαρμογή των τεχνολογιών του Σημασιολογικού Ιστού και των Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων σε εφαρμογές Παρατήρησης της Γης και παρουσιάζουμε τα οφέλη που προκύπτουν. Ξεκινώντας με την περιγραφή μιας εφαρμογής παρακολούθησης πυρκαγιών παρουσιάζουμε κάποια γεωχωρικά δεδομένα που δημοσιοποιήσαμε σύμφωνα με τις αρχές των Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων και εξηγούμε πως τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της ακρίβειας των δεδομένων παρακολούθησης πυρκαγιών και για την ταχεία παραγωγή χαρτών.

Λέξεις κλειδιά: Σημασιολογικός Ιστός, Γεωχωρικά Συστήματα, Ανοιχτά Συνδεδεμένα Δεδομένα, Τηλεπισκόπηση, stRDF, stSPARQL

## Επιβλέποντες

Κουμπάρακης Μανόλης, Καθηγητής | Κυζηράκος Κωστής, Ερευνητής

## 1. Εισαγωγή

Η παρακολούθηση και διαχείριση πυρκαγιών θεωρούνται ιδιαίτερης σημασίας για την Ευρώπη και κυρίως για την Ελλάδα όπου κάθε χρόνο ξεσπούν πυρκαγιές και προκαλούν σημαντικές καταστροφές όχι μόνο σε δάση και αγροτικές εκτάσεις, αλλά και σε τεχνικές υποδομές. Το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) έχει αναπτύξει, στα πλαίσια του προγράμματος SAFER (Services and Applications For Emergency Response)<sup>1</sup>, μια υπηρεσία παρακολούθησης πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή στηρίζεται στη λήψη δορυφορικών εικόνων για τον εντοπισμό των πυρκαγιών. Η παρούσα εργασία επεκτείνει την εφαρμογή αυτή, επιτρέποντας ευκολότερη διαχείριση των δεδομένων και αυτόματη βελτίωση των παραγόμενων προϊόντων μέσω της σύγκρισης τους με εξωτερική βοηθητική πληροφορία. Παλαιότερα ερευνητικά προγράμματα σχετικά με τη διαχείριση δεδομένων για επιστήμες Παρατήρησης της Γης (Earth Observation) είναι τα παρακάτω: Paradise [1], Sequoia 2000 [2], Microsoft TerraServer [3], Sloan Digital Sky Survey [4]. Η παρούσα εργασία επεκτείνει τη δουλειά των παραπάνω προγραμμάτων χρησιμοποιώντας Ανοιχτά Συνδεδεμένα Δεδομένα και τεχνολογίες Σηματολογικού Ιστού για τη διαχείριση των δεδομένων.

Για τη διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων στα πλαίσια του Σηματολογικού Ιστού, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη γεωχωρικών επεκτάσεων της γλώσσας επερωτήσεων SPARQL. Η δουλειά αυτή οδήγησε στην GeoSPARQL [5] ένα OGC πρότυπο για την επερώτηση γεωχωρικών δεδομένων εκφρασμένων σε RDF. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η stSPARQL [6] η οποία αναπτύχθηκε παράλληλα με την GeoSPARQL. Η stSPARQL υλοποιείται από το σύστημα διαχείρισης γεωχωρικών δεδομένων Strabon<sup>2</sup> [6]. Το σύστημα Strabon χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας και επεκτάθηκε με τη δυνατότητα ενημερώσεων (updates) και συναθροιστικών συναρτήσεων (aggregate functions) σε γεωχωρικά δεδομένα, λειτουργίες που αποδείχτηκαν απαραίτητες για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της εφαρμογής παρακολούθησης πυρκαγιών του ΕΑΑ. Αν παραλείψουμε τη δυνατότητα ενημερώσεων και συναθροιστικών συναρτήσεων, η stSPARQL αποτελεί ένα υποσύνολο της GeoSPARQL. Μια λεπτομερής σύγκριση των δύο γλωσσών μπορεί να βρεθεί στο [7].

---

1. <http://emergencyresponse.eu/>

2. <http://strabon.di.uoa.gr/>

Επίσης, στα πλαίσια αυτής της εργασίας δημοσιεύτηκαν γεωχωρικά δεδομένα σύμφωνα με τις αρχές των Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων<sup>3</sup>. Το Σύννεφο των Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων (Linked Open Data Cloud) εμπλουτίζεται συνεχώς με γεωχωρική πληροφορία, δίνοντας τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης ανάπτυξης σχετικών εφαρμογών. Δύο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι τα δεδομένα του OpenStreetMap που δημοσιεύονται σαν Ανοιχτά Συνδεδεμένα Δεδομένα [8] και η δημοσίευση δεδομένων του Ισπανικού δημόσιου τομέα [9].

## 2. Η αρχική εφαρμογή

Η εφαρμογή παρακολούθησης πυρκαγιών του ΕΑΑ στηρίζεται σε ένα σταθμό λήψης που λαμβάνει δορυφορικές εικόνες από τους δορυφόρους Meteosat Second Generation, MSG-1 και MSG-2. Οι εικόνες λαμβάνονται κάθε 5 και 15 λεπτά, δηλαδή τις χρονικές αναλύσεις των δορυφόρων MSG-1 και MSG-2 αντίστοιχα. Οι εικόνες που λαμβάνονται από αυτούς τους δορυφόρους έχουν χαμηλή χωρική ανάλυση, κάθε ρίxel αντιστοιχεί σε μία περιοχή περίπου 4x4 km. Όμως, η υψηλή χρονική τους ανάλυση επιτρέπει την παρακολούθηση πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο, για αυτό προτιμούνται σε σχέση με άλλους δορυφόρους που πετυχαίνουν καλύτερη χωρική ανάλυση, αλλά λαμβάνουν πολύ λίγες εικόνες την ημέρα (π.χ.: Aqua MODIS, Terra MODIS). Η εφαρμογή μπορεί να περιγραφεί περιληπτικά ως εξής:

- (1) Ο σταθμός λήψης λαμβάνει τις δορυφορικές εικόνες κάθε 5 και 15 λεπτά.
- (2) Τα δεδομένα αποκωδικοποιούνται και αποθηκεύονται προσωρινά στο METEOSAT Ground Station.
- (3) Μια εφαρμογή γραμμένη σε Python χειρίζεται τη ροή των δεδομένων ως εξής:
  - a. Εξάγει και αποθηκεύει τα μεταδεδομένα των εικόνων σε μια SQLite βάση δεδομένων. Τα μεταδεδομένα περιέχουν πληροφορία, όπως ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη της εικόνας, η ώρα λήψης κ.α.

---

3. <http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>

- b. Απορρίπτει την πληροφορία των εικόνων που δεν είναι σχετική με τον εντοπισμό πυρκαγιών και τις στέλνει για μόνιμη αποθήκευση.
- c. Ξεκινάει μια διαδικασία, όπου οι εικόνες (i) περικόπτονται για να διατηρηθεί μόνο η περιοχή που απεικονίζει την Ελλάδα. (ii) γεωαναφέρονται στο ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα (HGRS87), (iii) ένας αλγόριθμος κατηγοριοποίησης εντοπίζει περιοχές (pixels των εικόνων), όπου πιθανώς υπάρχει φωτιά και τέλος (iv) οι περιοχές αυτές εξάγονται, ως τελικό προϊόν, σε διανυσματικά αρχεία τύπου ESRI shapefile.

Η παρούσα εργασία βελτιώνει την εφαρμογή παρακολούθησης πυρκαγιών που περιγράφηκε παραπάνω, διευθετώντας τα παρακάτω ζητήματα.

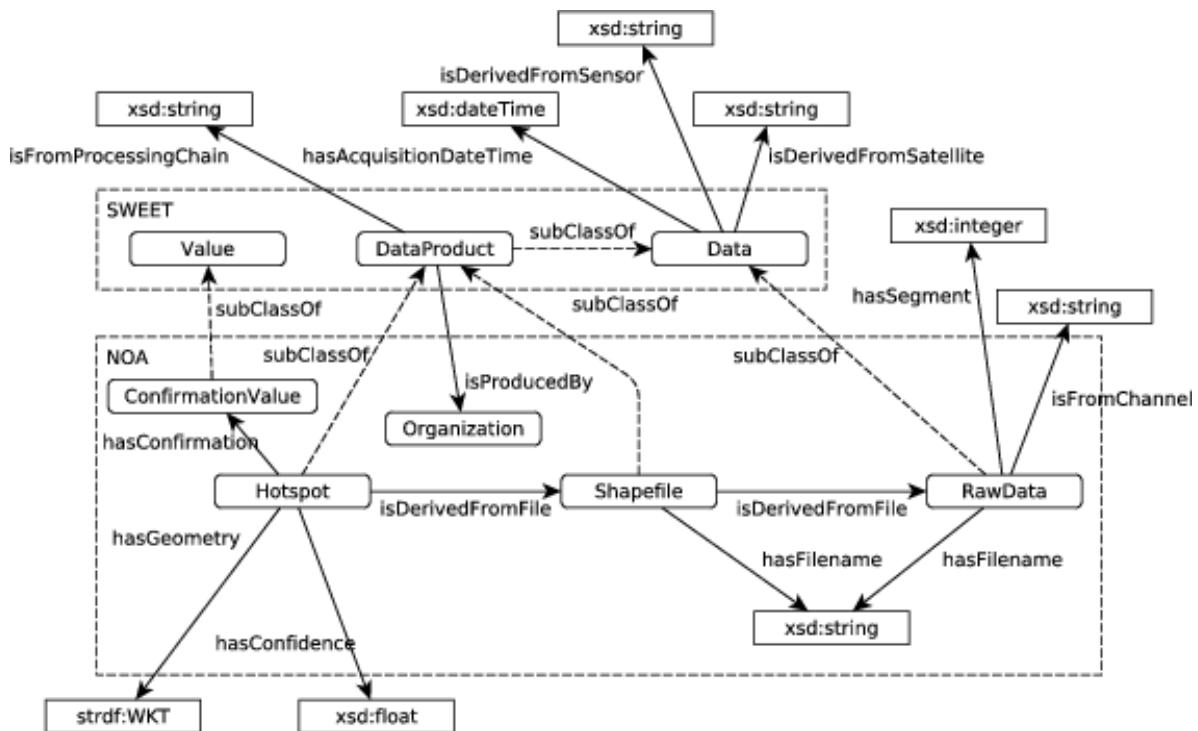
Η ακρίβεια του παραγόμενου προϊόντος βελτιώνεται με ένα συστηματικό και αυτόματο τρόπο όπου τα hotspots, οι περιοχές δηλαδή στις οποίες εντοπίστηκε φωτιά, συγκρίνονται με την υποκείμενη περιοχή. Τα κύρια προβλήματα ακρίβειας σχετίζονται με hotspots τα οποία εμφανίζονται στη θάλασσα ή σε περιοχές μη συνεπείς με την έννοια της πυρκαγιάς (π.χ.: αστικές και αγροτικές περιοχές). Τα hotspots πιθανώς να αντιστοιχούν (i) σε πραγματικές πυρκαγιές στα όρια των περιοχών αυτών και λόγω της χαμηλής ανάλυσης των pixels και λαθών που προκύπτουν από τη γεωαναφορά εμφανίζονται στις μη συνεπείς περιοχές, (ii) σε ελεγχόμενες φωτιές που έχουν μπει σε μεγάλες αγροτικές εκτάσεις για τον καθαρισμό τους ή (iii) σε ψευδής εντοπισμούς λόγω λάθος παραμετροποίησης του αλγόριθμου εντοπισμού πυρκαγιών. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να λυθούν συσχετίζοντας τα παραγόμενα hotspots με βοηθητική πληροφορία για την περιοχή στην οποία βρίσκονται. Αυτή η διαδικασία όμως συνήθως γίνεται χειροκίνητα με αποτέλεσμα να παίρνει πολύ χρόνο και να απαγορεύει τη διόρθωση σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, εμφανίζονται προβλήματα χρονικής ασυνέπειας του παραγόμενου προϊόντος, επειδή κάθε δορυφορική λήψη αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα από τις προηγούμενες. Μια απλή προσέγγιση επίλυσης αυτών των προβλημάτων είναι να μετρώνται οι φορές που εμφανίζεται μια φωτιά σε μια χρονική περίοδο και αναλόγως με το πόσο σταθερή είναι μια παρατήρηση στο χρόνο να ανατίθεται διαφορετικό επίπεδο εμπιστοσύνης σε κάθε hotspot.

Επίσης, υπάρχει η ανάγκη της εύκολης και γρήγορης παραγωγής χαρτών συνδυάζοντας διαφορετικές πηγές πληροφορίας, καθώς και ενός ομοιογενή

τρόπου διαχείρισης των δεδομένων.

### 3. Ανοιχτά συνδεδεμένα δεδομένα για παρακολούθηση πυρκαγιών

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2, τα παραγόμενα hotspots χρειάζεται να συνδυαστούν με εξωτερική πληροφορία για να αυξηθεί η ακρίβεια τους και να γίνει δυνατή η εύκολη παραγωγή χαρτών. Για να είμαστε σε θέση να διαχειριζόμαστε και τα hotspots που παράγονται από τη διαδικασία εντοπισμού πυρκαγιών, αλλά και την εξωτερική γεωχωρική πληροφορία με ομοιογενή τρόπο στηρίζομαστε σε οντολογίες και συνδεδεμένα γεωχωρικά δεδομένα.



Εικόνα 1: Οντολογία δεδομένων του EAA

Για να μπορούμε να διαχειριστούμε τα δεδομένα που χρησιμοποιεί το EAA χρησιμοποιώντας stSPARQL και να τα συνδυάσουμε με συνδεδεμένα γεωχωρικά δεδομένα, παράγουμε για κάθε δορυφορική εικόνα την περιγραφή σε RDF των hotspots που εντοπίστηκαν από την εικόνα, αλλά και όλων των μεταδεδομένων της δορυφορικής εικόνας, του shapefile που περιέχει τα hotspots που παράχθηκαν από τη δορυφορική εικόνα και των ίδιων των hotspots. Η μετατροπή αυτή

στηρίζεται στην οντολογία που απεικονίζεται στην Εικόνα 1. Τα παρακάτω triples αποτελούν ένα παράδειγμα αναπαράστασης ενός hotspot.

```
noa:Hotspot_1 rdf:type noa:Hotspot ;
  noa:hasAcquisitionDateTime "2007-08-24T18:15:00"^^xsd:dateTime;
  noa:hasConfidence 1.0 ;
  noa:hasConfirmation noa:confirmed ;
  noa:hasGeometry "POLYGON ((21.52 37.91,21.57 37.91,21.56
    37.88,21.56 37.88,21.52 37.87,21.52 37.91))"^^strdf:geometry ;
  noa:isDerivedFromSensor "MSG2"^^xsd:string ;
  noa:isProducedBy noa:noa ;
  noa:isFromProcessingChain "DynamicThresholds"^^xsd:string .
```

Προκειμένου να συσχετίσουμε το σύνολο δεδομένων του ΕΑΑ με εξωτερική πληροφορία μετατρέψαμε σε RDF και δημοσιεύσαμε<sup>4</sup> σύμφωνα με τις αρχές των Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων τα παρακάτω σύνολα δεδομένων που περιέχουν γεωχωρική πληροφορία:

**Corine Land Use / Land Cover.** Το πρόγραμμα Corine Land Cover<sup>5</sup> της European Environment Agency συλλέγει πληροφορίες για τη χρήση γης των ευρωπαϊκών χωρών. Για την περιγραφή των τύπων χρήσης γης, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα ιεραρχικό σχήμα με τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο περιγράφει μεγάλες κατηγορίες χρήσης γης, όπως «δάση και ημιφυσικές περιοχές». Το δεύτερο επίπεδο περιγράφει πιο συγκεκριμένους τύπους χρήσης γης, όπως «δάση», ενώ το τρίτο επίπεδο παρέχει περισσότερη λεπτομέρεια (π.χ.: «κωνοφόρα δάση»). Η πληροφορία για τη χρήση γης δημοσιεύεται από το πρόγραμμα Corine Land Cover σε αρχεία τύπου ESRI shapfile. Τα αρχεία αυτά μετατράπηκαν σε RDF σύμφωνα με μία οντολογία που αναπτύξαμε, όπου κάθε τύπος χρήσης γης αντιπροσωπεύεται από μια κλάση και το ιεραρχικό σχήμα μοντελοποιείται με σχέσεις subclassOf μεταξύ των κλάσεων. Ένα παράδειγμα αναπαράστασης ενός κωνοφόρου δάσους είναι το παρακάτω:

```
clc:Area_45 rdf:type clc:Area ;
  clc:hasGeometry "POLYGON ((22.07 40.62, ...,
    22.07 40.62))"^^strdf:geometry ;
  clc:hasLandUse clc:coniferousForest .
```

---

4. <http://www.linkedopendata.gr/>

5. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover/>



**Coastline of Greece.** Προέρχεται από ένα ESRI shapefile που περιέχει κλειστά πολύγωνα τα οποία ορίζουν την ακτογραμμή της Ελλάδας. Σε κάθε πολύγωνο ανατίθεται ένα URI και ένα χωρικό λεκτικό (spatial literal) για την περιγραφή της γεωμετρίας του. Ένα παράδειγμα αυτού του συνόλου δεδομένων είναι το παρακάτω:

```
coast:Coastline_1 rdf:type coast:Coastline ;
                    coast:hasGeometry "POLYGON ((24.12 34.80, ...,
                                                24.12 34.80))"^^strdf:geometry .
```

**Greek Administrative Geography.** Αποτελείται από μια οντολογία που περιγράφει τη διοικητική διαίρεση της Ελλάδας. Τα στιγμιότυπα (instances) της οντολογίας προέκυψαν από δεδομένα που έχουν δημοσιευτεί (σε μορφές ESRI shapefile και CSV) στο ελληνικό portal ανοιχτών δεδομένων διακυβέρνησης<sup>6</sup>. Για παράδειγμα ο δήμος της Αθήνας περιγράφεται ως εξής:

```
gag:Athens rdf:type gag:Municipality ;
            rdfs:label "Athens" ;
            gag:hasPopulation "655780"^^xsd:integer ;
            gag:isPartOf gag:preAttica ;
            gag:hasGeometry "POLYGON((23.74,38.03, ...,
                                    23.74,38.03))"^^strdf:geometry .
```

Επίσης, για να εμπλουτίσουμε τα δεδομένα μας χρησιμοποιήσαμε δύο γνωστά σύνολα δεδομένων του Σύννεφου Ανοιχτών Συνδεδεμένων Δεδομένων:

- (1) Δεδομένα από την υπηρεσία OpenStreetMap<sup>7</sup> που περιέχει πληροφορία κυρίως για το οδικό δίκτυο και για σημεία ενδιαφέροντος. Τα δεδομένα του OpenStreetMap δημοσιεύονται σε RDF από το LinkedGeoData<sup>8</sup>.
- (2) Δεδομένα από το GeoNames<sup>9</sup>, ένα γεωγραφικός κατάλογος (gazetteer) που περιέχει πληροφορίες για διάφορα τοπωνύμια ανά τον κόσμο.

---

6. <http://geodata.gov.gr/>

7. <http://www.openstreetmap.org/>

8. <http://linkedgeo.org/>

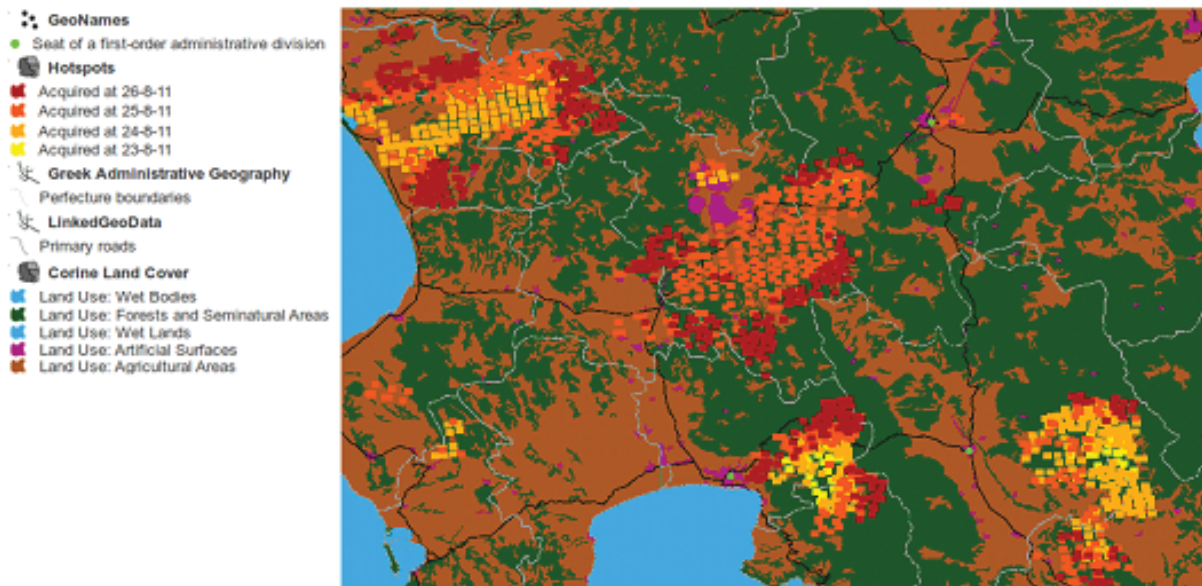
9. <http://www.geonames.org/>

## 4. Χρησιμοποιώντας ανοιχτά συνδεδεμένα δεδομένα

Το πρώτο σημαντικό πρόβλημα στην εφαρμογή παρακολούθησης πυρκαγιών είναι η έλλειψη ενός αυτόματου τρόπου βελτίωσης της ακρίβειας των παραγόμενων hotspots σύμφωνα με την υποκείμενη περιοχή. Προτείναμε το μοντέλο RDF ως ομοιογενή τρόπο αναπαράστασης των hotspots και της εξωτερικής βοηθητικής πληροφορίας, ώστε να μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας μόνο stSPARQL επερωτήσεις. Έτσι, προστέθηκε ένα ακόμα βήμα στη ροή δεδομένων της εφαρμογής, όπου για κάθε δορυφορική λήψη εκτελείται μία σειρά από stSPARQL ενημερώσεις οι οποίες ενημερώνουν την RDF αναπαράσταση των hotspots, λαμβάνοντας υπ' όψιν πληροφορίες από τα σύνολα δεδομένων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Οι ενημερώσεις αυτές διορθώνουν τα προβληματικά hotspots που περιγράφηκαν στην Ενότητα 2. Για παράδειγμα, το παρακάτω update χρησιμοποιεί πληροφορία για την ακτογραμμή της Ελλάδας και για κάθε hotspot που βρίσκεται πάνω στην ακτή διαγράφει το κομμάτι της γεωμετρίας του που πέφτει στη θάλασσα.

```
DELETE {?h noa:hasGeometry ?hGeo}
INSERT {?h noa:hasGeometry ?dif}
WHERE {
  SELECT DISTINCT ?h ?hGeo
    (strdf:intersection(?hGeo, strdf:union(?cGeo)) AS ?dif)
  WHERE { ?h rdf:type noa:Hotspot; noa:hasGeometry ?hGeo.
          ?c rdf:type coast:Coastline; coast:hasGeometry ?cGeo.
          FILTER(strdf:anyInteract(?hGeo, ?cGeo))}
  GROUP BY ?h ?hGeo
  HAVING strdf:overlap(?hGeo, strdf:union(?cGeo))}
```

Επίσης, η αυτόματη παραγωγή χαρτών εμπλουτισμένων με εξωτερική πληροφορία είναι σημαντική για το ΕΑΑ. Η διαδικασία αυτή συνήθως γίνεται χειροκίνητα. Επεκτείνοντας το Strabon, ώστε να επιστρέφει δεδομένα σε γνωστά formats που χρησιμοποιούνται από εφαρμογές γεωχωρικών δεδομένων (π.χ.: KML και GeoJSON), δίνεται η δυνατότητα ο χρήστης να ανακτά κάθε επίπεδο (layer) του χάρτη που χρειάζεται κάνοντας μόνο μια stSPARQL επερώτηση σε ένα endpoint, αντί να συνδυάζει χειροκίνητα διαφορετικές πηγές δεδομένων για κάθε επίπεδο του χάρτη.



Εικόνα 2: Παράδειγμα χάρτη που μπορεί να δημιουργηθεί συνθέτοντας απαντήσεις επερωτήσεων stSPARQL.

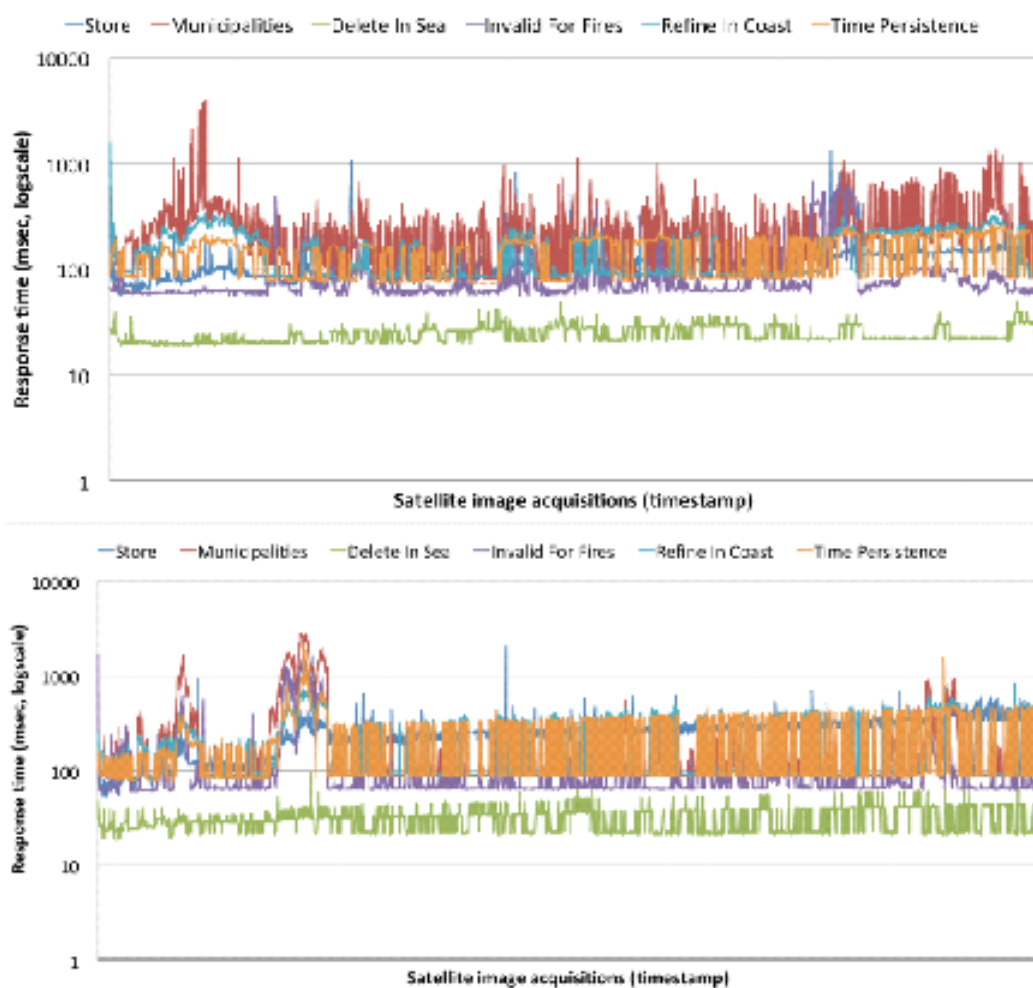
Για παράδειγμα, εκτελώντας τις παρακάτω επερωτήσεις σε ένα endpoint ένας χρήστης μπορεί να πάρει 5 KML αρχεία και συνθέτοντας τα σε ένα σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας (GIS) να παράξει τον χάρτη της Εικόνας 2. Για λόγους έλλειψης χώρου οι επερωτήσεις δίνονται σε φυσική γλώσσα.

- Επέλεξε τα hotspots που εντοπίστηκαν μεταξύ 23ης και 26ης Αυγούστου το 2007 στην περιοχή της νοτιοανατολικής Πελοποννήσου.
- Επέλεξε τους τύπους χρήσης γης της νοτιοανατολικής Πελοποννήσου.
- Επέλεξε τους κύριους δρόμους της νοτιοανατολικής Πελοποννήσου.
- Επέλεξε τις πρωτεύουσες νομαρχιών της νοτιοανατολικής Πελοποννήσου.
- Επέλεξε τα σύνορα των δήμων της νοτιοανατολικής Πελοποννήσου.

## 5. Εκτίμηση

Για να μπορέσουμε να προσφέρουμε μια εφαρμογή παρακολούθησης πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο είναι σημαντικό οι stSPARQL ενημερώσεις που εκτελούνται

στο βήμα που προσθέσαμε να εκτελούνται γρήγορα. Συγκεκριμένα, πρέπει να εκτελούνται σε χρόνο μικρότερο από το χρονικό πλαίσιο των 5 και 15 λεπτών που επιβάλλεται από τη συχνότητα των δορυφορικών λήψεων. Για να βεβαιωθεί η γρήγορη εκτέλεση των ενημερώσεων, εκτελέσαμε διάφορα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκαν hotspots από τους δορυφόρους MSG1 και MSG2 που προέρχονται από τις παρατηρήσεις των ετών 2007, 2008, 2010, 2011 και 2012. Χρησιμοποιήθηκαν, επίσης, τα σύνολα δεδομένων Corine Land Use / Land Cover, Greek Coastline και Greek Administrative Geography. Το συνολικό μέγεθος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν είναι περίπου 542,000 triples. Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε ένα PC με Ubuntu 11.04 με δύο Intel Xeon E5620 with 12 MB L2 cache με συχνότητα 2.4GHz. Σαν μετρική απόδοσης χρησιμοποιήθηκε ο χρόνος απόκρισης κάθε ενέργειας.



Εικόνα 3: Χρόνοι απόκρισης για κάθε λήψη από τους δορυφόρους MSG1 (πάνω) και MSG2 (κάτω)

Για κάθε δορυφορική λήψη γίνονται οι παρακάτω ενέργειες:

- **Store:** Αποθηκεύεται η RDF αναπαράσταση των hotspots που παρήχθησαν.
- **Municipalities:** Κάθε hotspot συνδέεται (με ένα rdf property) με τον δήμο στον οποίο βρίσκεται.
- **Delete In Sea:** Διαγράφονται τα hotspots που βρίσκονται εξ ολοκλήρου στην θάλασσα
- **Invalid For Fires:** Διαγράφονται τα hotspots που βρίσκονται εξ ολοκλήρου σε περιοχές μη συμβατές με την έννοια της πυρκαγιάς
- **Refine In Coast:** Για τα hotspots που βρίσκονται στην ακτή διαγράφεται το μέρος της γεωμετρίας τους που πέφτει στην θάλασσα
- **Time Persistence:** Τα αποτελέσματα κάθε δορυφορικής λήψης συγκρίνονται με τα αποτελέσματα προηγούμενων λήψεων και εισάγονται, όπου χρειάζεται, κάποια εικονικά hotspots με χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης.

Στην Εικόνα 3 παρατηρούμε πως όλες οι λειτουργίες εκτελούνται ικανοποιητικά, σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο, εκτός από τη λειτουργία σύνδεσης των hotspots με το δήμο στον οποίο βρίσκονται. Η λειτουργία αυτή κατά κανόνα δεν ξεπερνά τα δύο δευτερόλεπτα, αν και υπάρχουν περιπτώσεις όπου χρειάζεται έως και τέσσερα. Παρατηρούμε λοιπόν, πως οι απόδοση του συστήματος είναι ικανοποιητική και δεδομένου του χρονικού ορίου των 5 και 15 λεπτών μπορεί να υποστηρίξει σημαντικά περισσότερες ενημερώσεις εφόσον ζητηθούν από τους χρήστες.

## 6. Συμπεράσματα

Σε αυτή την εργασία προτείνουμε τη χρήση τεχνολογιών Σημασιολογικού Ιστού για τη διαχείριση των μεγάλων συλλογών δεδομένων Παρατήρησης της Γης. Έτσι, πετυχαίνεται η διαχείριση δεδομένων από διαφορετικές πηγές με ομοιόμορφο τρόπο και διευκολύνεται η εύκολη ανάπτυξη εφαρμογών. Επίσης, τα Ανοιχτά Συνδεδεμένα Δεδομένα παρέχουν μια ήδη αρκετά πλούσια συλλογή δεδομένων, αλλά και την τεχνική για δημοσίευση και ανταλλαγή

όλο και περισσότερων δεδομένων που μπορεί εύκολα να συνδυαστεί και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή περισσότερης πληροφορίας προστιθέμενης αξίας. Παρουσιάζεται μια σειρά από γεωχωρικά δεδομένα που μετατράπηκαν σε RDF και δημοσιεύτηκαν σύμφωνα με τις αρχές των Ανοικτών Συνδεδεμένων Δεδομένων. Επίσης παρουσιάζεται πώς τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε μια αληθινή εφαρμογή. Η εφαρμογή αυτή αφορά την παρακολούθηση πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο, όμως οι τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν με παρόμοιο τρόπο και σε άλλους επιστημονικούς κλάδους, όπως αστρονομία, μετεωρολογία, σεισμολογία, βιολογία κ.α.

Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος TELEIOS (257662) (<http://www.earthobservatory.eu>) και διακρίθηκε στο [Semantic Web Challenge 2012](#), λαμβάνοντας την 3<sup>η</sup> θέση.

Η εργασία έχει δημοσιευτεί ως paper και demo paper με τον τίτλο «*Real Time Fire Monitoring Using Semantic Web and Linked Data Technologies*» στα συνέδρια:

- 11th International Semantic Web Conference (ISWC 2012). November 11-15, 2012. Boston, USA. Demo Paper.
- 16th International Conference on Extending Database Technology (EDBT 2013). Genoa, Italy. March 18-22, 2013.

## Αναφορές

- [1] M. P. Jignesh, Y. Jie-Bing, K. Navin, T. Kristin, N. Biswadeep, B. Josef, E. H. Nancy, R. Karthikeyan, L. Roger, J. E. Curt, K. Jim, G. Shelly, J. D. David and F. N. Jeffrey, «Building a scalable geo-spatial dbms: Technology, implementation and evaluation.,» in SIGMOD, 1997.
- [2] M. Stonebraker, Sequoia 2000: A reflection of the first three years, 1994.
- [3] T. Barclay, J. Gray, S. Ekblad, E. Strand and J. Richter, «Designing and building terraservice,» in IEEE Internt Computing, 2006.

- [4] J. Gray and S. A. Szalay, «Where the rubber meets the sky: Bridging the gap between databases and science,» in IEEE Data Eng. Bull., 2004.
- [5] Open Geospatial Consortium Inc OGC. GeoSPARQL - A geographic query language for RDF data, July 2012.
- [6] K. Kyzirakos, M. Karpathiotakis and M. Koubarakis, «Strabon: A Semantic Geospatial DBMS,» in ISWC, 2012.
- [7] M. Koubarakis, M. Karpathiotakis, K. Kyzirakos, C. Nikolaou and M. Sioutis, «Data Models and Query Languages for Linked Geospatial Data,» in Reasoning Web. Semantic Technologies for Advanced Query Answering, 2012.
- [8] S. Auer, J. Lehmann and S. Hellman, «LinkedGeoData: Adding a Spatial Dimension to the Web of Data,» in ISWC, 2009.
- [9] A. d. Leon, V. Saquicela, L. M. Vilches, B. Villazon-Terrazas, F. Priyatna and O. Corcho, «Geographical Linked Data: a Spanish Use Case,» in I-SEMANTICS, 2010.



Γεώργιος Κ. Κόλλιας  
grad1153@di.uoa.gr

Μαρία Γ. Παπαδάκη  
grad1140@di.uoa.gr

# Μελέτη της Ανθεκτικότητας των Συστημάτων Υποβοήθησης Στάθμευσης σε Κακόβουλες Συμπεριφορές Οχημάτων

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Σε ανταγωνιστικά δικτυακά περιβάλλοντα, οι κόμβοι προσπαθούν να εξυπηρετήσουν τα δικά τους συμφέροντα χρησιμοποιώντας προς όφελος τους τη διαθέσιμη πληροφορία. Στην παρούσα εργασία μελετάμε ένα ρεαλιστικό σενάριο υπηρεσίας υποβοήθησης στάθμευσης, που αντιπροσωπεί τέτοια περιβάλλοντα. Σύμφωνα με την ιδανική απόλυτα συνεργατική λειτουργία, τα οχήματα συλλέγουν και διαμοιράζουν μεταξύ τους πληροφορίες για την τοποθεσία και τη διαθεσιμότητα κάθε θέσης στάθμευσης που συναντούν καθώς κινούνται. Όμως, ο ανταγωνισμός που έτσι δημιουργείται για τις θέσεις μπορεί να αποτελέσει αφορμή για την εκδήλωση κακόβουλων συμπεριφορών. Αναλύουμε δύο περιπτώσεις κακόβουλης συμπεριφοράς και την επίδραση που έχουν στην απόδοση του συστήματος.

Λέξεις κλειδιά: Δίκτυα οχημάτων, συστήματα υποβοήθησης στάθμευσης, μη-συνεργατική ορορτουριστική διάδοση.

## Επιβλέποντες

Σταυρακάκης Ιωάννης, Καθηγητής | Δρ. Καραλιόπουλος Μερκούρης  
Πολύτιμη Συνεισφορά: Κοκολάκη Ευαγγελία, Υποψήφια Διδάκτωρ

## 1. Εισαγωγή

Τα προηγμένα συστήματα υποβοήθησης στάθμευσης έχουν προταθεί (π.χ., [1]), και σε μερικές περιπτώσεις έχουν τεθεί σε λειτουργία (π.χ., [2] ή [3], [4]), σε μία προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το ζήτημα διαχείρισης στάθμευσης στα πολυσύχναστα αστικά περιβάλλοντα [5]. Στα κεντροποιημένα συστήματα, ένας κεντρικός εξυπηρετητής που επικοινωνεί με τους αισθητήρες των θέσεων στάθμευσης συντονίζει τη διαδικασία ανάθεσης των θέσεων: λαμβάνει τα αιτήματα των οδηγών, δεσμεύει θέσεις στάθμευσης, και κατευθύνει τους οδηγούς σε αυτές. (π.χ., [6]). Στα οπουρτουνιστικά συστήματα, τα ίδια τα οχήματα συλλέγουν και αποθηκεύουν πληροφορίες για την τοποθεσία και την κατάσταση (κατειλημμένη/ελεύθερη) των θέσεων στάθμευσης και τις μοιράζονται με άλλα οχήματα μέσω των vehicle-to-vehicle τεχνολογιών επικοινωνίας (V2V) (π.χ., [7]). Στα οπουρτουνιστικά συστήματα ο διαμοιρασμός των πληροφοριών αυξάνει τη γνώση των κόμβων για τη διαθεσιμότητα θέσεων στάθμευσης, αλλά ταυτόχρονα συγχρονίζει τις επιλογές στάθμευσης των κόμβων. Αυτός ο συγχρονισμός αυξάνει τον ανταγωνισμό για τις θέσεις, ιδιαίτερα όταν οι προορισμοί των οδηγών επικαλύπτονται [8].

Στόχος της εργασίας μας είναι να μελετήσουμε την ανθεκτικότητα της οπουρτουνιστικής διαδικασίας υποβοήθησης στάθμευσης σε μη συνεργατικές συμπεριφορές των οδηγών. Ως εκ τούτου, επιτρέπουμε στους κόμβους να συμπεριφερθούν κακόβουλα και μελετάμε πώς αυτό επηρεάζει βασικούς δείκτες απόδοσης, όπως το χρόνο αναζήτησης στάθμευσης και την απόσταση των θέσεων στάθμευσης των οδηγών από τους πραγματικούς προορισμούς τους. Αναφορά σύγκρισης αποτελεί η απόδοση του συστήματος όταν οι οδηγοί διαμοιράζονται πάντα και ειλικρινά τις αποθηκευμένες πληροφορίες που έχουν συλλέξει. Το διπλό ερώτημα που προκύπτει από την πλευρά των οδηγών είναι εάν οι κόμβοι έχουν κίνητρα να δράσουν κακόβουλα και κατά πόσο αυτή η δράση τους επιτρέπει να επιτύχουν καλύτερους χρόνους αναζήτησης και/ή αποστάσεις θέσης-προορισμού.

Οι δύο περιπτώσεις κακόβουλης συμπεριφοράς οδηγού που αναλύουμε περιλαμβάνουν την αποχή από το διαμοιρασμό της πληροφορίας με άλλους οδηγούς (free-rider) και την εσκεμμένη παραποίηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας με σκοπό την απομάκρυνση των άλλων οδηγών από την περιοχή ενδιαφέροντός του (selfish liar). Προσομοιώνουμε έναν μεγάλο αριθμό κρίσιμων παραμέτρων κάτω από διαφορετική ένταση κακόβουλης συμπεριφοράς, όταν οι προορισμοί των οχημάτων είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι και όταν

επικαλύπτονται. Επιπλέον, μελετάμε την αποτελεσματικότητα των κινητών κόμβων αποθήκευσης (MSNs), οι οποίοι εισάγονται στην προσπάθεια μας να αντισταθμίσουμε την επίδραση των κακόβουλων συμπεριφορών όταν οι προορισμοί επικαλύπτονται.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις διαισθητικά αναμενόμενα. Συγκεκριμένα, οι κόμβοι που δρουν κακόβουλα αδυνατούν να αποκτήσουν κάποιο ουσιώδες πλεονέκτημα σε σύγκριση με αυτό που επιτυγχάνουν οι συνεργάσιμοι κόμβοι. Παρ' όλα αυτά, οι δύο τύποι κακόβουλων συμπεριφορών τείνουν, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, να μειώσουν τις αποστάσεις θέσης-προορισμού και να αυξήσουν το χρόνο αναζήτησης για όλα τα οχήματα, με την τελευταία αύξηση να γίνεται ιδιαίτερα έντονη όταν οι προορισμοί των οδηγών επικαλύπτονται. Αντίθετα, καμία από τις δύο συμπεριφορές δεν περιορίζει τα φαινόμενα συγχρονισμού που εμφανίζονται στα περιεχόμενα της μνήμης λόγω της ομορτουριστικής ανταλλαγής περιεχομένων. Κατά συνέπεια, οι διαδρομές των οχημάτων παραμένουν σε ένα μεγάλο βαθμό κοινές, ιδιαίτερα όταν οι προορισμοί τους επικαλύπτονται. Στην περίπτωση αυτή, η εισαγωγή των MSNs λειτουργεί ως αποτελεσματικό αντίμετρο όταν οι κόμβοι συμπεριφέρονται ως free-riders, ενώ βοηθούν ελάχιστα όταν οι κόμβοι γίνονται selfish liars.

## 2. Ομορτουριστική υποβοήθηση στάθμευσης και κακόβουλες συμπεριφορές

Στην ομορτουριστική υποβοήθηση στάθμευσης, τα οχήματα είναι εφοδιασμένα με αισθητήρες και ασύρματες διεπαφές (π.χ., 802.11x) σε ad-hoc λειτουργία που τους επιτρέπει να συλλέξουν και να διαμοιράσουν πληροφορίες για την τοποθεσία και τη διαθεσιμότητα των θέσεων στάθμευσης καθώς κινούνται. Οι πληροφορίες φιλτράρονται βάσει του χρόνου και του χώρου, μέσω της χρήσης χρονοσφραγίδων και γεωγραφικών διευθύνσεων. Γνωρίζοντας αυτές τις πληροφορίες ένα όχημα έχει τη δυνατότητα να κατευθύνει την αναζήτησή του προς επιλεγμένες θέσεις που αναγράφονται στη μνήμη του ως πιο κοντινές ελεύθερες στον προορισμό του, παρά να περιπλανιέται τυχαία στην περιοχή αναζήτησής του. Εάν η θέση είναι πραγματικά ελεύθερη όταν φθάσει σε αυτή, τη δεσμεύει, διαφορετικά επαναλαμβάνει τη διαδικασία επιλογής θέσης.

Κρίσιμες παράμετροι για την απόδοση αυτών των συστημάτων είναι η ποσότητα

και η ακρίβεια των πληροφοριών που αποθηκεύονται στις μνήμες των οχημάτων και που μοιράζονται μεταξύ τους. Και οι δύο υπόκεινται σε ισχυρές χωροχρονικές επιδράσεις: τα οχήματα δεν διαθέτουν καθολική πληροφόρηση για τη διαθεσιμότητα των θέσεων στάθμευσης και δεδομένου ότι η κατάσταση των θέσεων αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, οι αποθηκευμένες πληροφορίες τους είναι ενδεχομένως παρωχημένες μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Όσο πιο γρήγορα κυκλοφορούν οι πληροφορίες μέσα στο σύστημα τόσο πιο όμοιο είναι το περιεχόμενο των μνημών των οχημάτων. Κατά συνέπεια, ανάλογα με τους προορισμούς των οχημάτων, τα μοτίβα κίνησης των μεμονωμένων οχημάτων συγχρονίζονται και οξύνουν τον ανταγωνισμό για δεδομένες θέσεις στάθμευσης [8], με αποτέλεσμα την παρότρυνση εκδήλωσης κακόβουλων συμπεριφορών.

Οι δύο μορφές κακόβουλης συμπεριφοράς, που αναλύουμε στην εργασία, επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την ποσότητα και ακρίβεια της διακινούμενης πληροφορίας. Στην πρώτη περίπτωση, οι κακόβουλοι κόμβοι δεν μοιράζονται την πληροφορία που έχουν με άλλα οχήματα, ενώ δέχονται τις διαθέσιμες πληροφορίες από τα άλλα οχήματα (Information Denial). Οι free riders, όπως αποκαλούμε τους κόμβους αυτούς, μειώνουν την ποσότητα των πληροφοριών που διαδίδονται, αλλά και την ακρίβεια τους, δεδομένου ότι οι μνήμες των οχημάτων ενημερώνονται λιγότερο συχνά με φρέσκες πληροφορίες για τη διαθεσιμότητα των θέσεων. Αντίθετα, η δεύτερη περίπτωση κακόβουλης συμπεριφοράς περιλαμβάνει κόμβους που διαδίδουν παραποιημένες πληροφορίες για την κατάσταση των θέσεων στάθμευσης (Information Forgery). Οι κόμβοι αυτοί (selfish liars) δρουν έτσι προκειμένου να δημιουργήσουν ζώνες χωρίς ανταγωνισμό γύρω από τους προορισμούς τους, κατευθύνοντας τα οχήματα που συναντούν μακριά τους. Σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση, η συγκεκριμένη κακόβουλη συμπεριφορά έχει επιπτώσεις μόνο στην ακρίβεια των πληροφοριών.

### 3. Μεθοδολογία αξιολόγησης απόδοσης

#### 3.1. Περιβάλλον προσομοίωσης

Η μελέτη μας διεξάγεται στο περιβάλλον προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στην αναφορά [8]. Παρακάτω περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης που είναι κρίσιμα για τη μελέτη μας.

**Πλέγμα δρόμων και θέσεις στάθμευσης:** Ο προσομοιωτής υλοποιεί ένα πλέγμα δύο

λωρίδων κυκλοφορίας (μία λωρίδα ανά κατεύθυνση) με διασταυρώσεις κυκλικής κυκλοφορίας που συνδέουν μέχρι τέσσερις δρόμους. Οι θέσεις στάθμευσης κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλες τις λωρίδες των δρόμων του πλέγματος.

**Κίνηση του οχήματος:** Το μοντέλο κινητικότητας των οχημάτων εμπίπτει στην ευρεία κατηγορία των συμπεριφορικών μοντέλων κινητικότητας. Δύο επίπεδα συμπεριφοράς μπορούν να προσδιοριστούν: το καθολικό και το τοπικό.

Στο καθολικό επίπεδο, κάθε φορά που ένα όχημα ελευθερώνει μια θέση στάθμευσης, επιλέγει νέο προορισμό (γεωγραφικές συντεταγμένες εντός των ορίων του πλέγματος) και κινείται προς αυτό. Μόλις φτάσει κοντά στον προορισμό (αρχική περιοχή αναζήτησης), η διαδικασία αναζήτησης θέσης ξεκινά. Η αρχική περιοχή αναζήτησης στάθμευσης είναι κυκλική με κέντρο τον προορισμό και ακτίνα ίση με το μισό της αποστάσης μεταξύ δύο γειτονικών διασταυρώσεων. Έπειτα, οι εγγραφές της μνήμης φιλτράρονται τόσο χρονικά, για να αποκλειστούν πληροφορίες που είναι παρωχημένες (σε συνδυασμό με ένα timestamp που ξεπερνά την οριακή τιμή), όσο και χωρικά, για να διατηρηθούν ως υποψήφιες θέσεις αυτές που βρίσκονται μόνο εντός της τρέχουσας περιοχής αναζήτησης. Από τις θέσεις που έχουν περάσει από το φίλτρο, ο χρήστης επιλέγει την πλησιέστερη διαθέσιμη θέση στον προορισμό (πλήρης χρήση της μνήμης, FM). Εάν καμία εγγραφή δεν περάσει το χωροχρονικό φίλτρο, ο οδηγός επιλέγει τυχαία μία θέση εντός της περιοχής αναζήτησης και κινείται προς αυτή (τυχαία χρήση της μνήμης, RM). Ελλείψει οποιασδήποτε πληροφορίας για θέσεις στάθμευσης εντός της τρέχουσας περιοχής ενδιαφέροντος, το όχημα κυκλοφορεί τυφλά μέσα στην περιοχή (χωρίς μνήμη, NoM). Σε όλες τις περιπτώσεις, τα οχήματα κινούνται κατά μήκος των βραχύτερων διαδρομών προς τους προορισμούς τους και καταλαμβάνουν την πρώτη διαθέσιμη θέση στάθμευσης που τυχόν συναντήσουν στο δρόμο τους. Αν ο οδηγός βρει μια ελεύθερη θέση, που είτε έχει επιλέξει από τη μνήμη είτε έχει συναντήσει τυχαία, την καταλαμβάνει για ένα χρονικό διάστημα (χρόνος στάθμευσης), που μπορεί να ακολουθεί διαφορετική κατανομή πιθανοτήτων. Στο τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος, εγκαταλείπει τη θέση και επιλέγει άλλο προορισμό. Σε αντίθετη περίπτωση, μετά από μια αποτυχημένη προσπάθεια, ο χρήστης ελέγχει εκ νέου τη μνήμη του και επαναλαμβάνει την προσπάθεια, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό αποτυχημένων προσπαθειών στην τρέχουσα περιοχή αναζήτησης στάθμευσης, ο οδηγός αυξάνει την εμβέλειά της.

Σε τοπικό επίπεδο, η θέση κάθε οχήματος για το επόμενο χρονικό βήμα προσομοίωσης εξαρτάται από την τρέχουσα θέση και την ταχύτητά του. Τα

οχήματα προσαρμόζουν την ταχύτητά τους ανάλογα με την απόσταση τους από: τα μπροστινά οχήματα (δεν επιτρέπεται να προσπεράσει το ένα το άλλο), την επόμενη διασταύρωση, και την πλησιέστερη θέση στάθμευσης, υποθέτοντας ότι επιβραδύνονται όταν συναντούν θέσεις στάθμευσης για να ελέγξουν την κατάστασή τους. Η ταχύτητά τους μηδενίζεται όταν κολλήσουν σε μποτιλιάρισμα, εισέρθουν σε μια κυκλική διασταύρωση, ή όταν σταθμεύουν. Τέλος, τα οχήματα δεν έχουν τη δυνατότητα να σταματήσουν ή να κινηθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση των λωρίδων κυκλοφορίας.

**Συνεργάσιμα vs. Κακόβουλα οχήματα:** Τα οχήματα που εκδηλώνουν Information Denial δεν μοιράζονται τις πληροφορίες που κατέχουν σχετικά με την τοποθεσία και τη διαθεσιμότητα των θέσεων στάθμευσης με τα οχήματα που συναντούν, ενώ ενημερώνουν τις εγγραφές τους με τη γνώση που τους προσφέρεται. Κατά τη διάρκεια της αναζήτησής τους, χρησιμοποιούν τις αποθηκευμένες πληροφορίες τους με τον ίδιο τρόπο όπως οι συνεργάσιμοι κόμβοι.

Υπό Information Forgery τα οχήματα μεταδίδουν όλες τις θέσεις στάθμευσης που βρίσκονται εντός μιας συγκεκριμένης απόστασης από τους προορισμούς τους (ακτίνα ενδιαφέροντος, RoI) ως δεσμευμένες, και όλες τις άλλες ως ελεύθερες, καθορίζοντας το αντίστοιχο timestamp σε φρέσκια τιμή. Όντας πιο καχύποπτα για παραποιημένα στοιχεία, επιμένουν περισσότερο όταν αναζητούν διαθέσιμη θέση γύρω από τους προορισμούς τους, δηλαδή, κινούνται περισσότερο τυχαία (RM ή NoM λειτουργία) στην αρχική περιοχή αναζήτησης στάθμευσης πριν αποφασίσουν να αυξήσουν την εμβέλειά της.

### 3.2. Ρυθμίσεις προσομοίωσης και μετρικές απόδοσης

Οι προσομοιώσεις εκτελούνται με τις τιμές των παραμέτρων (εύρη τιμών) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 (εκτός και αν αναφέρεται κάτι διαφορετικό).

Παράμετροι	Τιμές	Παράμετροι	Τιμές
Simulation Area	1.2x 1.2 km <sup>2</sup>	Vehicle - vehicle comm. range	70m
Simulation Time	10 <sup>5</sup> sec	Exponential parking time with mean	1800 sec

No of uniformly distributed spots, P	25	Distance between adjacent roundabouts	300m
No of vehicles , V	5-70	Linear increase step of parking search area	150m
User maximum speed	50 km/h	Radius of Interest, RoI	150, 350, 500m
Vehicle - spot-sensor comm. range	15m	Ratio of misbehaving nodes, $\rho$	0, 0.3, 0.5, 0.8, 1

Πίνακας 1: Παράμετροι προσομοίωσης

**Μετρικές απόδοσης:** Οι δύο βασικές μετρικές απόδοσης της μελέτης μας είναι ο μέσος χρόνος που δαπανάται για την αναζήτηση διαθέσιμης θέσης στάθμευσης (Parking search time,  $T_{ps}$ ) και η μέση γεωγραφική απόσταση μεταξύ των προορισμών των οχημάτων και των επιλεγμένων θέσεων στάθμευσης (Destination - parking spot distance,  $D_p$ ). Σε πιο μικροσκοπικό επίπεδο, εξάγουμε τα αποτελέσματα για το προφίλ των πληροφοριών που είναι αποθηκευμένες στις μνήμες των οχημάτων, καθώς και τον τρόπο που τα οχήματα τις χρησιμοποιούν και επωφελούνται από αυτές, πλοτάροντας στατιστικά στοιχεία σχετικά με το ποσοστό χρήσης FM και RM λειτουργίας κατά την αναζήτηση των οχημάτων.

#### 4. Αποτελέσματα προσομοίωσης - Πειραματισμός

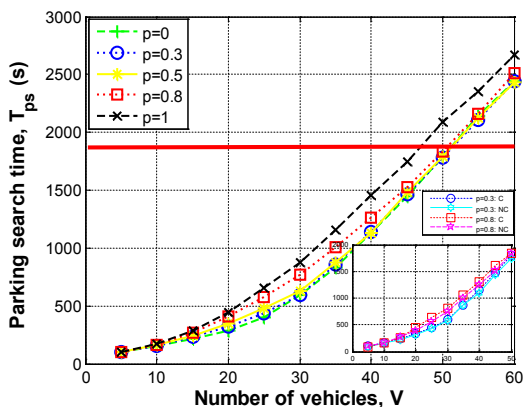
Σε όλα τα σχήματα, συγκρίνουμε τις τιμές υπό ιδανική συνεργατική λειτουργία με εκείνες κάτω από διαφορετικές εντάσεις κακόβουλης συμπεριφοράς για διαφορετικά επίπεδα ζήτησης στάθμευσης. Κάθε σημείο των σχημάτων προκύπτει από το μέσο όρο των γεγονότων στάθμευσης των συνολικών κόμβων ή χωριστά, των συνεργάσιμων (C) και των κακόβουλων κόμβων (NC). Υποθέτουμε ότι οι οδηγοί επιμένουν στην αναζήτησή τους. Μια κόκκινη γραμμή στα σχήματα σηματοδοτεί χρονικό όριο για την αναζήτηση θέσης στάθμευσης ίσο με 1800 δευτερόλεπτα.



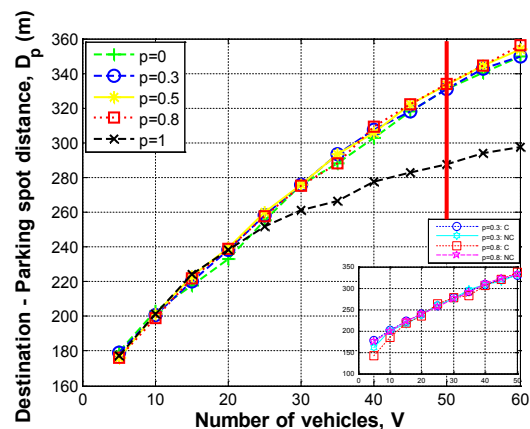
## 4.1. Ομοιόμορφα κατανομημένοι προορισμοί

### 4.1.1. Information Denial

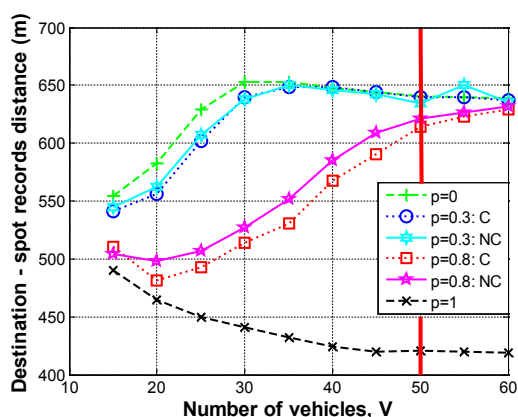
Στα σχήματα 1, 2, 3 παρατηρούμε ότι το σύστημα παρουσιάζει αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα σε αυτήν την κακόβουλη συμπεριφορά. Ούτε ο μέσος χρόνος αναζήτησης στάθμευσης (Σχ. 1), ούτε η απόσταση θέσης-προορισμού (Σχ. 2) ζημιώνονται ακόμη και όταν τα μισά οχήματα είναι κακόβουλα. Η αύξηση του χρόνου αναζήτησης στάθμευσης γίνεται ορατή όταν το 80% των κόμβων δρουν κακόβουλα και εξελίσσεται σε ένα εντυπωσιακό tradeoff όταν όλοι οι κόμβοι συμπεριφέρονται κακόβουλα. Δηλαδή, αν όλα τα οχήματα αρνούνται να διαμοιράζουν τις πληροφορίες τους, καταλήγουν να σταθμεύουν κοντά στους προορισμούς τους σε βάρος του χρόνου αναζήτησης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό μπορεί να ανιχνευθεί στο συνδυασμό των σχημάτων 3 και 4. Ελλείψει της ανταλλαγής πληροφοριών, οι μνήμες των κόμβων αποτελούνται κυρίως από εγγραφές θέσεων γύρω από τον προορισμό τους (αρχική περιοχή αναζήτησης στάθμευσης), που συνάντησαν κατά τη διάρκεια των πρώτων τους προσπαθειών. Δεδομένου ότι οι θέσεις αυτές είναι κατηλειμμένες (για μεσαία προς υψηλή ζήτηση), και τα οχήματα αυξάνουν σταδιακά την εμβέλεια αναζήτησής τους, εξακολουθούν να επιλέγουν τυχαία μία από αυτές τις θέσεις με υψηλή πιθανότητα (RM λειτουργία). Ακόμη και όταν μερικοί κόμβοι διαμοιράζουν τις πληροφορίες τους (Σχ. 3), οι μνήμες τους δεν ανανεώνονται με εγγραφές για πιο απομακρυσμένες θέσεις που κοινοποιήθηκαν από άλλα οχήματα. Αντίθετα, οι μνήμες τους μόνο περιστασιακά εμπλουτίζονται με κάποια θέση που τυχαία συναντούν σε μία περιοχή γύρω από τον προορισμό, στην οποία καταλήγει να περιορίζεται η αναζήτησή τους. Εξίσου αξιοσημείωτη είναι η αποτυχία των κακόβουλων κόμβων να επιτύχουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους συνεργάσιμους (ingraphs στα σχ. 1 και 2).



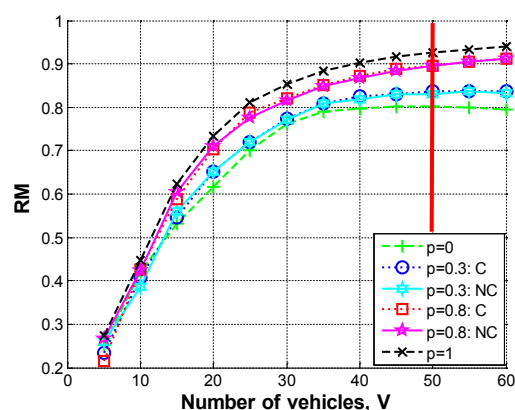
Σχήμα 1: Average parking search time



Σχήμα 2: Average destination-spot distance



Σχήμα 3: Average distance from destination of spot records at vehicles' caches



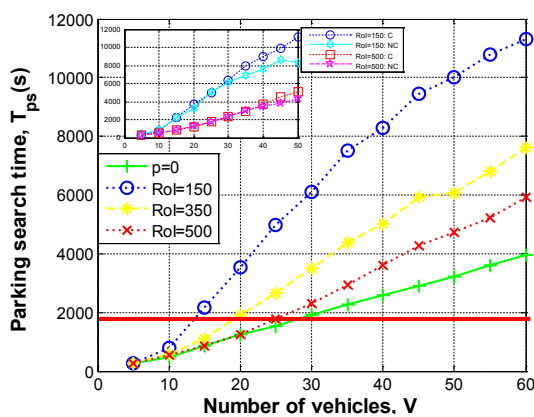
Σχήμα 4: Ratio of parking attempts in RM mode

Σχήματα 1-4: Ανθεκτικότητα ομορτυνιστικής υποβοήθησης αναζήτησης στάθμευσης σε Information Denial συμπεριφορές: ομοιόμορφα καταναμημένοι προορισμοί

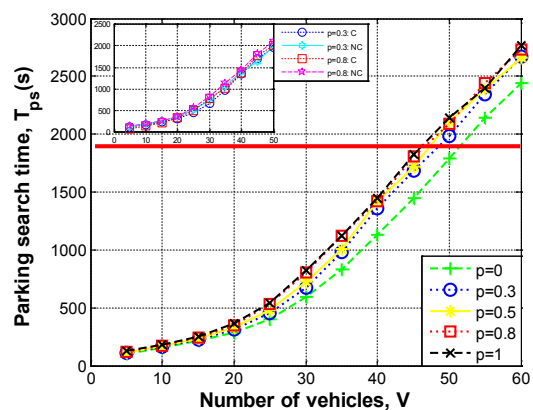
#### 4.1.2. Information Forgery

Τα οχήματα που εκδηλώνουν Information Forgery, όπως έχουμε αναφέρει, προσπαθούν να δημιουργήσουν ελεύθερες από ανταγωνισμό ζώνες γύρω από τους προορισμούς τους. Για μικρές τιμές RoI, οι ζώνες αυτές είναι στενές και ασύνδετες. Δεδομένου ότι οι κόμβοι που εκδηλώνουν τη συγκεκριμένη συμπεριφορά διαδίδουν τις θέσεις στάθμευσης εκτός των ζωνών αυτών ως ελεύθερες και οι προορισμοί των οδηγών είναι ομοιόμορφα καταναμημένοι, οι (συνεργάσιμοι) κόμβοι καταλήγουν (λανθασμένα) να έχουν καταχωρημένες στη μνήμη τους ως ελεύθερες, θέσεις γύρω από τους δικούς τους προορισμούς για το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Αυτές οι θέσεις εμφανίζονται ως κορυφαίες επιλογές στο βήμα του χωροχρονικού φιλτραρίσματος (FM mode) και προσελκύουν τις επαναλαμβανόμενες προσπάθειες στάθμευσης των οχημάτων (Σχ. 7). Ως αποτέλεσμα, τα οχήματα σταθμεύουν πλησιέστερα στον προορισμό τους ξοδεύοντας υψηλότερους χρόνους αναζήτησης. Όταν οι κακόβουλοι κόμβοι γίνονται πιο επιθετικοί και οι ζώνες που προσπαθούν να δημιουργήσουν αρχίζουν να επικαλύπτονται ( $RoI = \{350, 500\}$ ), οι περισσότερες θέσεις στις μνήμες των οχημάτων αναφέρονται ως κατηλειμμένες, τα οχήματα χρησιμοποιούν περισσότερο την RM λειτουργία, και ένα tradeoff εμφανίζεται μεταξύ των αποστάσεων θέσης-προορισμού και των χρόνων αναζήτησης θέσης στάθμευσης, όπως φαίνεται στα σχήματα 5 και 6.

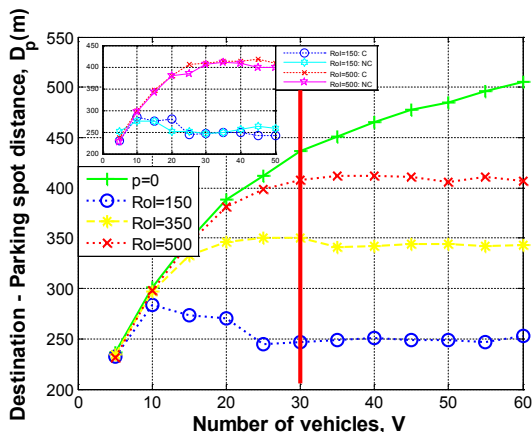
Σε αντίθεση με την κακόβουλη συμπεριφορά Information Denial, υπό Information Forgery, η ένταση της κακόβουλης συμπεριφοράς και οι επιπτώσεις της δεν εξαρτώνται μόνο από τον αριθμό των κακόβουλων κόμβων, αλλά και από το πλήθος των συνεργάσιμων. Οι συνεργάσιμοι κόμβοι ακούσια διαδίδουν λανθασμένες πληροφορίες σε όλο το δίκτυο από τη στιγμή που έχουν μολυνθεί με αυτές κατά τη συνάντησή τους με έναν κακόβουλο κόμβο. Αυτό έχει δύο άμεσες συνέπειες. Πρώτον, το tradeoff μεταξύ των αποστάσεων θέσης-προορισμού και των χρόνων αναζήτησης θέσης στάθμευσης είναι πιο ήπιο, όπως φαίνεται στα σχήματα 8 και 9: για δεδομένο RoI ακόμη και ένα μικρό ποσοστό κακόβουλων κόμβων αρκεί για να συμπληρώσει τις μνήμες των οχημάτων με υποτιθέμενες ελεύθερες θέσεις και να κατευθύνει τις προσπάθειές τους σε θέσεις γύρω από προορισμούς τους (Σχ. 10). Δεύτερον, με μικρή εξαίρεση τα χαμηλά επίπεδα ζήτησης στάθμευσης ( $V < P$ ), οι κακόβουλοι κόμβοι δεν μπορούν να αποκτήσουν οποιοδήποτε σημαντικό πλεονέκτημα απόδοσης σε σχέση με τους συνεργάσιμους (ενσωματωμένα γραφήματα στα σχ. 5, 6, 8, 9), δεδομένου ότι οι χειραγωγημένες πληροφορίες που παράγουν επιστρέφουν πίσω σε αυτούς μετά από ένα ή περισσότερα hops σε συνεργάσιμους κόμβους. Αυτό το φαινόμενο κοινής μοίρας (fate-sharing) μετριάζει ουσιαστικά τα κίνητρα των κόμβων να δράσουν κακόβουλα.



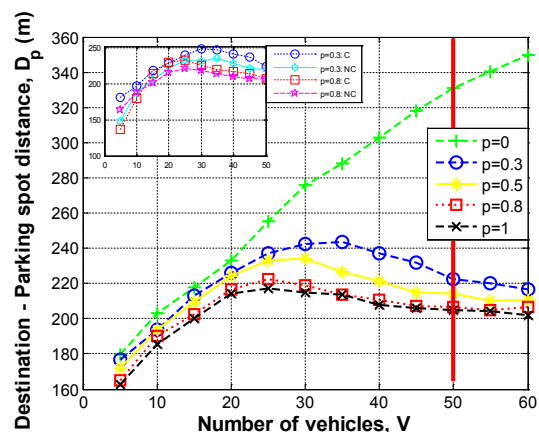
Σχήμα 5: Average parking search time



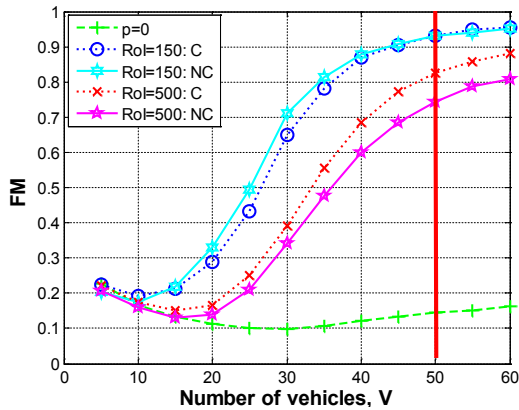
Σχήμα 8: Average parking search time



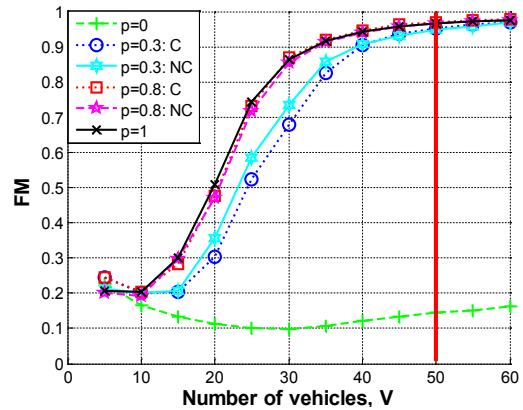
Σχήμα 6: Average destination-spot distance



Σχήμα 9: Average destination-spot distance



Σχήμα 7: Ratio of parking attempts in FM mode



Σχήμα 10: Ratio of parking attempts in FM mode

Σχήματα 5-10: Ανθεκτικότητα ομορτυνιστικής υποβοήθησης αναζήτησης στάθμευσης σε Information Forgery συμπεριφορές: ομοιόμορφα κατανομημένοι προορισμοί:  $\rho = 0.3$  (αριστερή στήλη),  $\text{RoI}=150$  (δεξιά στήλη)

## 4.2. Hotspot σενάριο

Στα πλαίσια ενός πλήρως συνεργατικού περιβάλλοντος, η χωρική συγκέντρωση των προορισμών των οχημάτων έχει δύο άμεσες συνέπειες για τις πληροφορίες που αποθηκεύονται στις μνήμες τους. Πρώτον, καθώς όλα τα οχήματα κινούνται κατά μήκος της περιοχής υψηλής κίνησης (hotspot) και συναντούν το ένα το άλλο πιο συχνά, έχουν την τάση να συγχρονίζουν τις μνήμες τους με εγγραφές για τις ίδιες θέσεις. Δεύτερον και πιο σημαντικό, κατατάσσουν αυτές τις θέσεις με

τον ίδιο τρόπο, δηλαδή τα ταξίδια τους συγχρονίζονται, οξύνεται ο ανταγωνισμός και οι χρόνοι αναζήτησης στάθμευσης αυξάνονται σημαντικά [8].

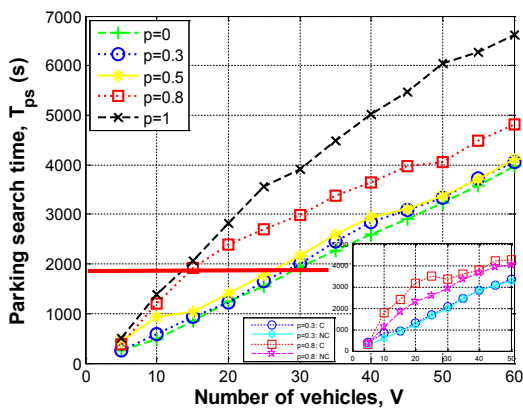
#### 4.2.1. Information Denial

Σε hotspot περιβάλλοντα, το σύστημα φαίνεται να είναι ανθεκτικό στην συγκεκριμένη συμπεριφορά: ακόμα και όταν οι μισοί από τους κόμβους αρνούνται να διαμοιράσουν τις πληροφορίες τους, οι μέσοι χρόνοι αναζήτησης στάθμευσης και οι αποστάσεις θέσης-προορισμού παραμένουν σχεδόν άθικτες, όπως φαίνεται στα σχ. 11 και 12 αντιστοίχως. Επιπλέον, οι κακόβουλοι κόμβοι δεν επωφελούνται στους δύο δείκτες απόδοσης (ingraphs στα σχ. 11 και 12). Από την άλλη πλευρά, αυτή η κακόβουλη συμπεριφορά δεν καταφέρνει να ακυρώσει τα φαινόμενα συγχρονισμού. Όταν τελικά, επιτυγχάνεται διαφοροποίηση στις μνήμες των οχημάτων, με τους περισσότερους κόμβους στο δίκτυο να είναι κακόβουλοι, αυτό αντισταθμίζεται από τη σημαντική μείωση της παρεχόμενης πληροφορίας. Τα οχήματα δεν ενημερώνονται σχετικά και δεν επωφελούνται από κενές θέσεις στάθμευσης πιο μακρινές από τους κοινούς προορισμούς τους (Σχ. 13). Καταλήγουν να σταθμεύουν πιο κοντά σε αυτούς, σε βάρος των απαράδεκτων χρόνων αναζήτησης, ακόμη και κάτω από μέτρια επίπεδα ζήτηση στάθμευσης.

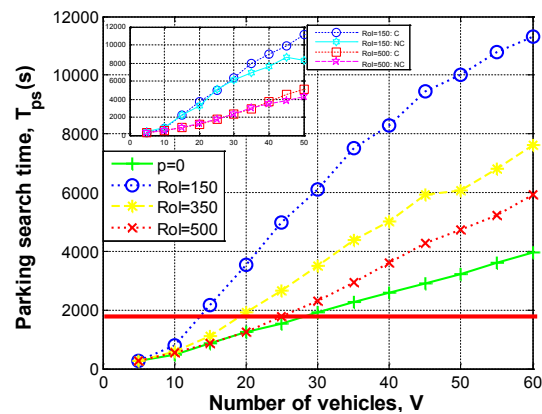
#### 4.2.2. Information Forgery

Στο hotspot σενάριο, οι ζώνες χωρίς ανταγωνισμό που προσπαθούν να δημιουργήσουν τα κακόβουλα οχήματα, επικαλύπτονται και όλες οι θέσεις πέρα από μια απόσταση ίση με  $R_{01}$  διαδίδονται ως ελεύθερες. Για μικρές τιμές  $R_{01}$ , τα οχήματα κατευθύνουν επίμονα τις προσπάθειες τους προς τις λίγες θέσεις που βρίσκονται κοντά στους κοινούς προορισμούς τους, με αποτέλεσμα οι μνήμες τους να μην εμπλουτίζονται με πληροφορίες για πιο μακρινές κενές θέσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Η επίδραση συγχρονισμού/ ανταγωνισμού είναι ισχυρότερη και τα οχήματα ξοδεύουν ακόμη περισσότερο χρόνο αναζητώντας για μια θέση στάθμευσης γύρω από το hotspot δρόμο (Σχ. 14). Ωστόσο, ως αποτέλεσμα αυτού του τρόπου αναζήτησης, τα οχήματα σταθμεύουν πλησιέστερα στον προορισμό τους (Σχ. 15). Είναι ενδιαφέρον και μάλλον σε αντίθεση με τη διαίσθηση, ότι όσο οι κακόβουλοι κόμβοι προσπαθούν να απομακρύνουν τον ανταγωνισμό σε πιο μακρινές περιοχές (δηλαδή,  $R_{01} = \{350, 500\}$ ), οι χρόνοι

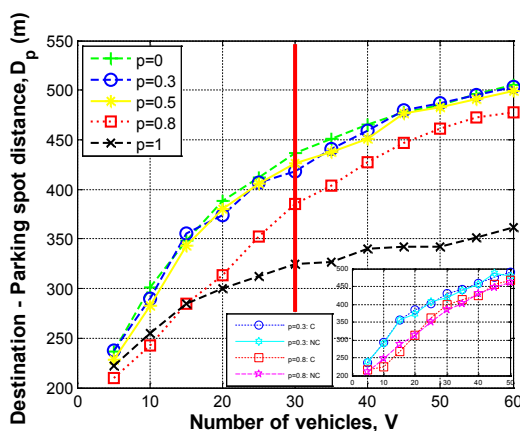
αναζήτησης θέσης στάθμευσης βελτιώνονται για όλα τα οχήματα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι τα οχήματα κατευθυνόμενα από το περιεχόμενο των μηνυών τους, επεκτείνουν την αναζήτησή τους πιο μακριά από την hotspot περιοχή και έχουν την ευκαιρία να συναντήσουν και, ενδεχομένως να δεσμεύσουν, θέσεις που δεν γνώριζαν. Ουσιαστικά, η κίνηση των οχημάτων στην ευρύτερη περιοχή βοηθά στον κατευνασμό, αλλά όχι στην επίλυση της επίδρασης του συγχρονισμού. Και πάλι, όπως και με τους ομοιόμορφα κατανομημένους προορισμούς, οι κακόβουλοι κόμβοι δεν μπορούν να επιτύχουν κάποιο πλεονέκτημα στην απόδοση, καθώς οι παραποιημένες πληροφορίες επιστρέφουν σε αυτούς μετά από μερικές συναντήσεις με άλλους κόμβους, αυτή τη φορά ακόμα πιο γρήγορα λόγω των πιο συχνών συναντήσεων μεταξύ των οχημάτων (ενσωματωμένα γραφήματα στα σχ. 14 και 15).



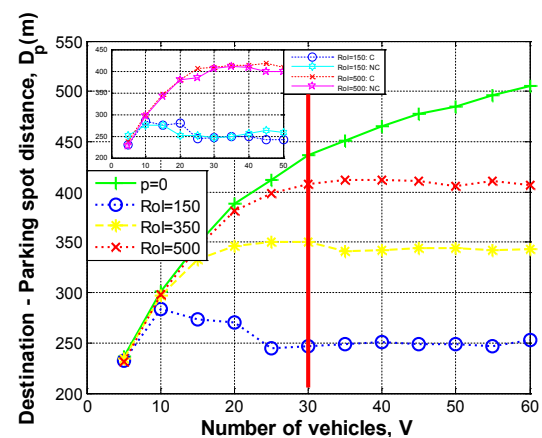
Σχήμα 11: Average parking search time



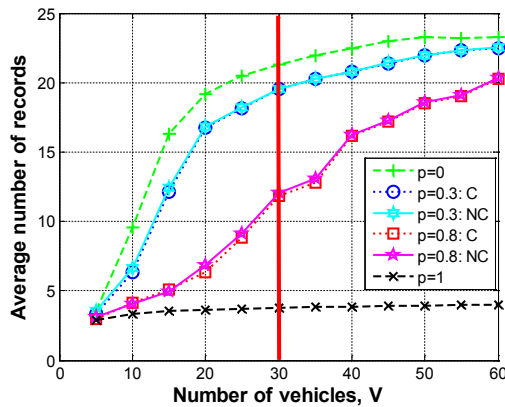
Σχήμα 14: Average parking search time



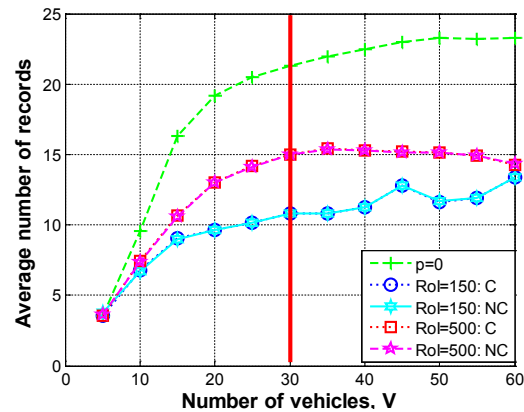
Σχήμα 12: Average destination-spot distance



Σχήμα 15: Average destination-spot distance



Σχήμα 13: Average number of records in memory



Σχήμα 16: Average number of records in memory

Σχήματα 11-16: Ανθεκτικότητα ομορτουριστικής υποβοήθησης αναζήτησης στάθμευσης για hotspot σενάριο: Information Denial (αριστερή στήλη), Information Forgery,  $\rho = 0.3$  (δεξιά στήλη)

### 4.3. Κινητοί κόμβοι αποθήκευσης για το hotspot σενάριο

Οι κινητοί κόμβοι αποθήκευσης (MSNs) μπορεί να είναι είτε ειδικά είτε κανονικά οχήματα, π.χ. ταξί, εξοπλισμένα με ασύρματες διεπαφές που τους επιτρέπουν να συλλέγουν πληροφορίες στάθμευσης για ολόκληρη την περιοχή και να τις διαμοιράζουν σε άλλα οχήματα και MSNs. Με τη μετάδοση πληροφοριών, οι MSNs επιταχύνουν τη διάδοση πληροφοριών. Η αποτελεσματικότητα των MSNs σαν αντίμετρο για τους δύο τύπους κακόβουλων συμπεριφορών είναι πολύ διαφορετική.

#### 4.3.1. Information Denial

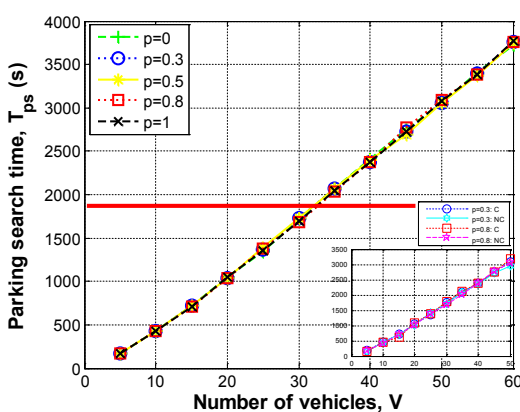
Σε αυτήν την περίπτωση, ακόμη και ένας πολύ μικρός αριθμός MSNs αποκαθιστά τη ροή των πληροφοριών στα επίπεδα ενός πλήρως συνεργατικού συστήματος. Καθιστούν το μέσο χρόνο αναζήτησης στάθμευσης και την απόσταση θέσης-προορισμού ανεξάρτητα από τον αριθμό των free rider οχημάτων, όπως φαίνεται στα Σχ. 17, 18. Η προσθήκη περισσότερων MSNs (έχουμε πειραματιστεί με 15 MSNs) δεν φέρει ορατές αλλαγές στις μετρικές της απόδοσης: Από την άλλη πλευρά, παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται ακόμα και με ένα MSN. Στην πραγματικότητα, μία μόνο συνάντηση με MSN ενημερώνει τους κόμβους για όλες



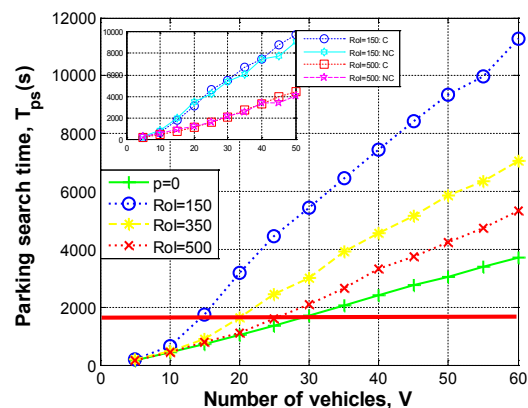
τις θέσεις στάθμευσης στην περιοχή, βοηθώντας τους να επεκτείνουν την αναζήτησή τους σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από το δρόμο υψηλής κίνησης και εν μέρει τυχαιοποιούν τα μοτίβα οδήγησης τους. Ωστόσο, τα φαινόμενα συγχρονισμού λόγω της επικάλυψης των προορισμών των οχημάτων δεν εξαλείφεται πλήρως και διατηρεί τους χρόνους αναζήτησης στάθμευσης σε σημαντικά υψηλότερα επίπεδα από την περίπτωση που οι προορισμοί είναι ομοιόμορφα καταναμημένοι.

#### 4.3.2. Information Forgery

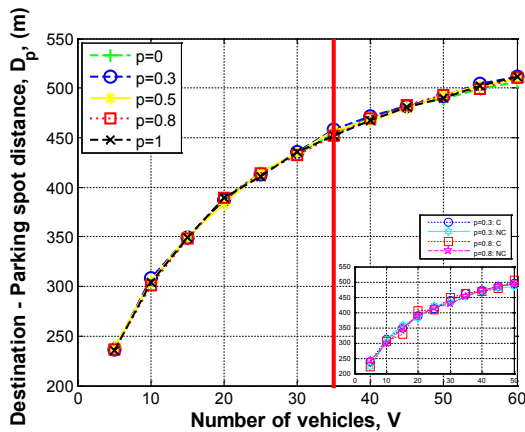
Όταν οι κόμβοι εκδηλώνουν τη συγκεκριμένη κακόβουλη συμπεριφορά, οι MSNs αποτελούν μία πολύ λιγότερο αποδοτική λύση. Παρ'όλο που συλλέγουν και αποθηκεύουν ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με την πραγματική κατάσταση των θέσεων στάθμευσης καθώς κινούνται τυχαία μέσα στο δίκτυο, οι πληροφορίες αυτές ξαναγράφονται κατά τις συναντήσεις με κακόβουλους κόμβους (ή με συνεργάσιμους κόμβους που έχουν μολυνθεί). Έτσι, οι MSNs καταλήγουν να διαδίδουν τις παραπονημένες πληροφορίες που συγχρονίζουν τις μνήμες των οχημάτων, καθιστώντας το συγχρονισμό ακόμα ισχυρότερο και τη μείωση του χρόνου αναζήτησης, λόγω των πρόσθετων φρέσκων πληροφοριών, οριακή (Σχ. 19, 20).



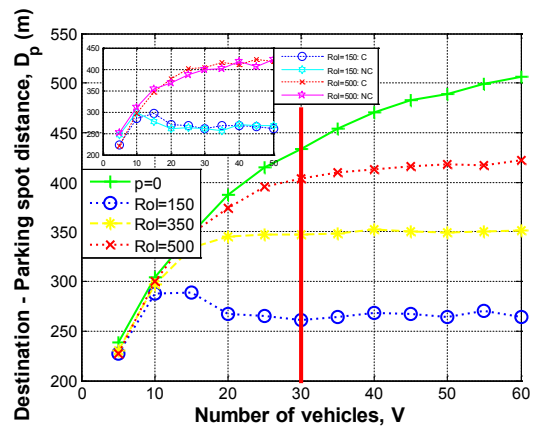
Σχήμα 17: Average parking search time



Σχήμα 19: Average parking search time



Σχήμα 18: Average destination-spot distance



Σχήμα 20: Average destination-spot distance

Σχήματα 17-20: MSNs και hotspot σενάριο: Information Denial (αριστερή στήλη), Information Forgery,  $\rho=0.3$  (δεξιά στήλη)

Η εργασία έγινε δεκτή και παρουσιάστηκε στο 10th International Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (IFIP/IEEE WONS), March 18-20, 2013, Banff, Alberta με τον τίτλο «Opportunistically-assisted parking search: a story of free-riders, selfish liars and bona fide mules».

Η εκτεταμένη μορφή της, με προσθήκες αναλυτικών προσεγγίσεων στο πρόβλημα, υπεβλήθη προς δημοσίευση στο ειδικό τεύχος του περιοδικού Elsevier Computer Communications, αφιερωμένο στα ομορπονιστικά δίκτυα (26 Φεβρουαρίου 2013).

## Αναφορές

- [1] S. Mathur et al., “Parknet: Drive-by sensing of road-side parking statistics,” in Proc. 8th ACM MobiSys, San Fran., USA, 2010.
- [2] SFpark: parking system for San Francisco, available online at <http://sfpark.org>
- [3] Parking Defenders mobile application, available online at <http://www.parkingd.com>.

- [4] Parkomotivo: parking system for the city of Lugano, online at <http://www.bmob-park>.
- [5] <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/35515.wss>.
- [6] H. Wang and W. He, “A reservation-based smart parking system,” in Proc. 5th Inter.Workshop on Cyber-Physical Networking Systems (co-located with IEEE INFOCOM), April 2011.
- [7] M. Caliskan, D. Graupner, and M. Mauve, “Decentralized discovery of free parking places,” in Proc. 3rd VANET (in conjunction with ACM MobiCom), USA, 2006.
- [8] E. Kokolaki, M. Karaliopoulos, and I. Stavrakakis, “Opportunistically assisted parking service discovery: Now it helps, now it does not,” Pervasive and Mobile Computing, vol. 8, no. 2, 2012.

Μιχαήλ Ι. Σιούτης  
sioutis@di.uoa.gr

# Έλεγχος της Συνέπειας Δικτύων Ποιοτικών Χωρικών Περιορισμών με χρήση Χορδικών Γράφων

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Θεωρούμε χορδικά RCC-8 δίκτυα και δείχνουμε πως μπορούμε να ελέγξουμε τη συνέπειά τους με την επιβολή μερικής συνέπειας μονοπατιού με αδύναμη σύνθεση. Το αποδεικνύουμε αυτό χρησιμοποιώντας σαν δεδομένο πως τα RCC-8 δίκτυα με σχέσεις από τα μέγιστα βατά υποσύνολα  $H_8$ ,  $C_8$  και  $Q_8$  της RCC-8 άλγεβρας έχουν την ιδιότητα της αμαλγάμωσης. Η χρήση της μερικής συνέπειας μονοπατιού έχει σημαντικά πρακτικά επακόλουθα τα οποία επιδεικνύουμε πειραματικά. Δοθέντος ενός RCC-8 δικτύου, δείχνουμε ότι μπορεί να επιλυθεί πολύ αποδοτικά τριγωνοποιώντας τον υποκείμενο γράφο περιορισμών και εφαρμόζοντας τη συνέπεια μονοπατιού σε αυτόν τον αραιό γράφο, εν αντιθέσει με την πλήρωση του συγκεκριμένου δικτύου.

Λέξεις κλειδιά: Δίκτυο περιορισμών, σχεσιακή άλγεβρα, RCC-8 τοπολογική σχέση, χορδικός γράφος, αδύναμη σύνθεση.

## Επιβλέπων

Κουμπάρακης Μανόλης, Καθηγητής

## 1. Εισαγωγή

Η RCC άλγεβρα είναι η κυρίαρχη άλγεβρα στον τομέα της Τεχνητής Νοημοσύνης για την αναπαράσταση και το συλλογισμό τοπολογικών σχέσεων [1]. Η άλγεβρα RCC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει μη-άδεια κανονικά υποσύνολα κάποιου τοπολογικού χώρου δηλώνοντας τις τοπολογικές σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ των υποσυνόλων αυτών. Η περισσότερη από τη δημοσιευμένη δουλειά σε αυτή την περιοχή ασχολείται με ένα υποσύνολο της άλγεβρας RCC, το οποίο είναι η άλγεβρα RCC-8. Η άλγεβρα RCC-8 θεωρεί τις επόμενες εξής 8 δυαδικές τοπολογικές σχέσεις: ασύνδετος (DC), εξωτερικά συνδεδεμένος (EC), ίσος (EQ), μερικώς επικαλυπτόμενος (PO), εσωκλειόμενος εφαπτόμενος (TPP), εσωκλειόμενος εφαπτόμενος αντίστροφος (TPPi), εσωκλειόμενος μη-εφαπτόμενος (NTPP), και εσωκλειόμενος μη-εφαπτόμενος αντίστροφος (NTPPi).

Οι υπάρχοντες επιλυτές ποιοτικών χωρικών περιορισμών για την άλγεβρα RCC-8 [2], [3], [4] υλοποιούν αποδοτικούς αλγορίθμους για να αποφασίζουν αν ένα δοθέν σύνολο RCC-8 σχέσεων μεταξύ περιοχών είναι συνεπές και να συμπεραίνουν νέα γνώση από τις σχέσεις αυτές. Για αυτά τα δύο προβλήματα, όλοι οι γνωστοί επιλυτές χρησιμοποιούν κάποιους είδους συνέπεια μονοπατιού με αδύναμη σύνθεση στην περίπτωση που έχουμε βατά RCC-8 δίκτυα και αλγορίθμους βασισμένους σε υπαναχώρηση για τη γενική περίπτωση μη-βατών RCC-8 δικτύων. Σε αυτήν την εργασία, επικεντρωνόμαστε στο πρόβλημα του ελέγχου της συνέπειας μόνο και κάνουμε τις εξής συνεισφορές:

- Θεωρούμε RCC-8 δίκτυα με χορδικούς γράφους περιορισμών και δείχνουμε πως μπορούμε να ελέγχουμε τη συνέπεια τους με την εφαρμογή μερικής συνέπειας μονοπατιού (PPC). Η μερική συνέπεια μονοπατιού εισήχθει αρχικά για CSPs πεπερασμένων πεδίων [5] και χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα στην περίπτωση των δικτύων που χαρακτηρίζονται από την άλγεβρα χρονικών διαστημάτων (IA) [6]. Οι δύο αυτές προηγούμενες εφαρμογές χορδικών γράφων και μερικής συνέπειας μονοπατιού, θεωρούν κυρτά CSPs πεπερασμένων πεδίων στη δημοσίευση [5] και προ-κυρτά δίκτυα ποιοτικών χρονικών περιορισμών στη δημοσίευση [6]. Οι ίδιες ιδέες μπορούν να εφαρμοστούν στην άλγεβρα RCC-8 εξαιτίας ενός πρόσφατου αποτελέσματος που δείχνει πως τα RCC-8 δίκτυα με σχέσεις από τα μέγιστα βατά υποσύνολα  $H_8$ ,  $C_8$  και  $Q_8$  της RCC-8 άλγεβρας [7] έχουν την ιδιότητα της αμαλγάμωσης [8].

- Δείχνουμε την πρακτική εφαρμογή των αποτελεσμάτων μας με την υλοποίηση ενός νέου επιλυτή, που τον ονομάζουμε PyRCC8. Δοθέντος ενός RCC-8 δικτύου με αποκλειστικά βατές σχέσεις, ο επιλυτής PyRCC8<sup>1</sup> μπορεί να το επιλύσει πολύ αποδοτικά μετατρέποντας τον υποκείμενο γράφο περιορισμών σε χορδικό γράφο και εφαρμόζοντας τη συνέπεια μονοπατιού σε αυτόν τον αραιό γράφο σε αντίθεση με την πλήρωση του δοθέντος δικτύου. Κατά τον ίδιο τρόπο, χρησιμοποιεί τη μερική συνέπεια μονοπατιού σαν το βήμα ελέγχου συνέπειας σε έναν αλγόριθμο υπαναχώρησης για δίκτυα γενικών RCC-8 σχέσεων, με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη απόδοση για αραιά δίκτυα και μια μικρή επιβαρύνση για πυκνά δίκτυα.
- Θέτουμε τις βάσεις για μια νέα γενιά επιλυτών ποιοτικών σχέσεων, οι οποίοι θα είναι βασισμένοι στη γλώσσα Python και θα κάνουν εκτεταμένη χρήση προηγμένων περιβαλλόντων σε Python, όπως είναι το PyPy<sup>1</sup>, μια εναλλακτική υλοποίηση της γλώσσας Python με χρήση ενός JIT μεταγλωττιστή [9], [10]. Ένας τέτοιος επιλυτής είναι ο PyRCC8<sup>2</sup> ο οποίος ουσιαστικά είναι βασισμένος στον επιλυτή πλήρων γράφων PyRCC8<sup>2</sup>. Οι δύο επιλυτές συγκρίνονται πειραματικά σε αυτή την εργασία.

Η οργάνωση της εργασιάς έχει ως εξής: στο Κεφάλαιο 2 εισάγουμε τη μερική συνέπεια μονοπατιού και την εφαρμόζουμε σε χορδικά RCC-8 δίκτυα, στο Κεφάλαιο 3 δείχνουμε πειραματικά αποτελέσματα, και τέλος, στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε τα συμπεράσματά μας.

Υποθέτουμε πως ο αναγνώστης είναι εξοικειωμένος με τις παρακάτω έννοιες τις όποιες λόγω περιορισμένου χώρου δυστυχώς δεν επεξηγούμε: δίκτυα περιορισμών και οι αντίστοιχοι γράφοι περιορισμών, σχεσιακή άλγεβρα, σύνθεση, αδύναμη σύνθεση, αλγεβρική κλειστότητα, διάφορες έννοιες τοπικής συνέπειας, και τις λεπτομέρειες της άλγεβρας RCC-8 [11], [12].

---

1 <http://www.pypy.org/>

2 <https://pypi.python.org/pypi/PyRCC8/>

## 2. Επίλυση χορδικών RCC-8 δικτύων

Σε αυτήν την ενότητα, εισάγουμε τους χορδικούς γράφους και τα χορδικά δίκτυα, και τη μερική συνέπεια μονοπατιού. Καθώς ασχολούμαστε με RCC-8 δίκτυα, θα χρησιμοποιήσουμε μερική συνέπεια μονοπατιού με αδύναμη σύνθεση όπως έπραξαν οι συγγραφείς της δημοσίευσης [6] για τα IA δίκτυα. Ονομάζουμε, για ευκολία, αυτού του είδους τη συνέπεια ως  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού. Όμοια με τη μερική συνέπεια μονοπατιού που ορίζεται στη δημοσίευση [5], η  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού θεωρεί αποκλειστικά τρίγωνα κόμβων στο χορδικό γράφο που αντιστοιχεί σε ένα δίκτυο περιορισμών και περιορίζει τον έλεγχο συνέπειας σε αυτά τα τρίγωνα.

Οι υπάρχοντες επιλυτές ποιοτικών περιορισμών θεωρούν πλήρεις γράφους, όταν ελέγχουν για τη συνέπεια ενός εισηχθέντος δικτύου. Οι τεχνικές αυτής της ενότητας θα δείξουν πώς μπορούμε να κάνουμε πιο αποδοτικά αυτήν την ενέργεια, χρησιμοποιώντας  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού αν οι υποκείμενοι γράφοι περιορισμών είναι χορδικοί ή μετατρέποντας τους σε χορδικούς αν δεν είναι.

Οι χορδικοί γράφοι αποτελούν μια πολύ σημαντική κατηγορία γράφων. Είναι γνωστό ότι αρκετά δύσκολα προβλήματα λύνονται βέλτιστα σε πολυωνυμικό χρόνο σε αυτή την κατηγορία γράφων. Ένας γράφος  $G = (V, E)$  καλείται χορδικός (chordal) αν κάθε απλός κύκλος του  $G$ , μήκους μεγαλύτερου του 3, έχει πάντα μια χορδή.

Συνεπώς έχουμε τον παρακάτω ορισμό:

**Ορισμός 1.** Ένας γράφος  $G = (V, E)$  είναι χορδικός αν κάθε κύκλος με μήκος μεγαλύτερο από 3 περιέχει τουλάχιστον μία χορδή.

Το επόμενο θεώρημα δίνει μια γνωστή ιδιότητα των χορδικων γράφων [13]:

**Θεώρημα 1.** Έστω  $G = (V, E)$  ένας μη κατευθυνόμενος χορδικός γράφος. Τότε υπάρχει ένα δέντρο, το οποίο ονομάζουμε δέντρο κλικών (clique tree) του γράφου  $G$ , για το οποίο το σύνολο των κόμβων του είναι το σύνολο των μέγιστων κλικών του γράφου  $G$  και το σύνολο των πλευρών του είναι το σύνολο των ελάχιστων διαχωριστών του γράφου  $G$ .



Ο έλεγχος χορδικότητας ενός γράφου μπορεί να γίνει πολύ γρήγορα σε γραμμικό χρόνο, τροποποιώντας ελαφρώς αλγόριθμους όπως ο Lex-BFS και ο MCS, που περιγράφονται εκτενώς στη δημοσίευση [14]. Και οι δύο αλγόριθμοι έχουν πολυπλοκότητα  $O(|V| + |E|)$  δοθέντος ενός γράφου  $G = (V, E)$ .

Αν ένας γράφος δεν είναι χορδικός, μπορεί να γίνει με την προσθήκη ενός συνόλου νέων επιπρόσθετων πλευρών που ονομάζονται πλευρές γεμίματος (fill edges). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται τριγωνοποίηση του γράφου. Οι πλευρές γεμίματος μπορούν να βρεθούν με την απαλοιφή ενός προς ενός των κόμβων του γράφου και τη συνένωση όλων των γειτονικών του κόμβων σε κάθε βήμα, σχηματίζοντας έτσι μια κλίκα στον υπο επεξεργασία, και εν δυνάμει χορδικό, γράφο. Στην πραγματικότητα, θα θέλαμε να επιτυγχάνουμε χορδικότητα σε έναν γράφο με όσο το δυνατόν λιγότερες πλευρές γεμίματος, όμως το πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης τριγωνοποίησης ή αλλιώς του ελάχιστου χορδικού γράφου είναι NP-hard (14). Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι ευριστικοί μηχανισμοί που βοηθούν στην προσέγγιση μια καλής τριγωνοποίησης (15). Στην υλοποίηση μας χρησιμοποιούμε τον ευριστικό μηχανισμό του ελάχιστου βαθμού, το οποίο έχει μια χείριστη χρονική πολυπλοκότητα της τάξης του  $O(n)$  και απεδείχθει αρκετά αποτελεσματικός. Ο μηχανισμός ελάχιστου βαθμού, όποτε εφαρμόζεται, επιλέγει τον κόμβο με το μικρότερο αριθμό γειτόνων (δηλαδή, τον κόμβο με το μικρότερο βαθμό).

Στη συνέχεια της εργασίας, οι έννοιες των χορδικών γράφων που εισήχθησαν παραπάνω θα εφαρμόζονται στο γράφο περιορισμών ενός δοθέντος RCC-8 δικτύου. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως αν το δοθέν RCC-8 δίκτυο δεν αντιστοιχεί σε χορδικό γράφο, τότε ο γράφος περιορισμών του θα γίνεται χορδικός με την προσθήκη πλευρών γεμίματος. Οι πλευρές αυτές, σε ότι αφορά τα RCC-8 δίκτυα, αντιστοιχούν σε καθολικούς περιορισμούς, δηλαδή σε περιορισμούς που επιτρέπουν όλες τις τοπολογικές σχέσεις μεταξύ δύο περιοχών.

Σε αυτό το σημείο, θα δείξουμε πως η  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού είναι επαρκής για να αποφανθεί της συνέπειας ενός δικτύου που έχει σχέσεις από τα μέγιστα βατά υποσύνολα  $H_8$ ,  $C_8$  και  $Q_8$  της RCC-8 άλγεβρας. Η απόδειξη αυτού του αποτελέσματος χρησιμοποιεί την ιδιότητα της αμαλάμωσης των RCC-8 δικτύων, η οποία αρχικά εισήχθει στη δημοσίευση [16] και πιο πρόσφατα χρησιμοποιήθηκε και μελετήθηκε στη δημοσίευση [8]. Αυτή η ιδιότητα, την οποία ορίζουμε παρακάτω, επιτρέπει να συνενώνουμε ένα σύνολο συνεπών RCC-8 δικτύων σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο το οποίο είναι συνεπές, υποθέτοντας πως όλα τα δίκτυα «συμφωνούν» στο κοινό τους μέρος.

Έστω  $C$  ένα δίκτυο περιορισμών από ένα δοθέν πρόβλημα ικανοποίησης περιορισμών. Θα χρησιμοποιήσουμε το συμβολισμό  $V_C$  για να αναφερθούμε στο σύνολο των μεταβλητών του δικτύου  $C$ . Αν το σύνολο  $V$  είναι οποιοδήποτε σύνολο μεταβλητών, τότε το σύμβολο  $C_V$  θα αναφέρεται στο δίκτυο περιορισμών που προκύπτει από το δίκτυο  $C$  διατηρώντας μόνο τους περιορισμούς που αφορούν μεταβλητές του συνόλου  $V$ .

**Ορισμός 2.** Θα λέμε ότι ένα δίκτυο έχει την ιδιότητα της αμαλγάμωσης, αν για οποιαδήποτε πεπερασμένα συνεπή δίκτυα περιορισμών  $C$  και  $C'$  ενός CSP έτσι ώστε  $C_{(V_C) \cap (V'_C)} = C'_{(V_C) \cap (V'_C)}$ , το δίκτυο περιορισμών  $C \cup C'$  είναι συνεπές (8).

**Πρόταση 1.** Τα τρία CSPs για δίκτυα με σχέσεις από τα μέγιστα βατά υποσύνολα  $\hat{H}_8$ ,  $C_8$ , και  $Q_8$  της RCC-8 άλγεβρας που έχουν συνέπεια μονοπατιού, έχουν την ιδιότητα της αμαλγάμωσης (8).

Η παρακάτω πρόταση είναι το κύριο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας:

**Πρόταση 2.** Έστω  $C$  ένα RCC-8 δίκτυο με σχέσεις από τα μέγιστα βατά υποσύνολα  $\hat{H}_8$ ,  $C_8$  και  $Q_8$  στις πλευρές του. Έστω  $G$  ο χορδικός γράφος ο οποίος είναι το αποτέλεσμα της τριγωνοποίησης του αντίστοιχου γράφου περιορισμών του δικτύου  $C$ , και  $T$  το δέντρο κλικών του  $G$ . Έστω  $C'$  το δίκτυο περιορισμών που αντιστοιχεί στο γράφο  $G$  (το δίκτυο  $C'$  είναι το δίκτυο  $C$  επαυξημένο με καθολικές σχέσεις που αντιστοιχούν σε πλευρές γεμίματος). Το δίκτυο  $C$  είναι συνεπές αν όλα τα δίκτυα που αντιστοιχούν στους κόμβους του δέντρου  $T$  έχουν συνέπεια μονοπατιού.

Θα παρουσιάσουμε τώρα έναν αλγόριθμο για να αποφασίζουμε το πρόβλημα συνέπειας ενός RCC-8 δικτύου χρησιμοποιώντας σχέσεις από τα μέγιστα βατά υποσύνολα  $\hat{H}_8$ ,  $C_8$  και  $Q_8$  της RCC-8 άλγεβρας και έλεγχο συνέπειας περιορισμένο στα τρίγωνα του χορδικού δικτύου, δηλαδή  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού. Αυτός ο αλγόριθμος θα παρουσιαστεί στα πλαίσια του επιλυτή PyRCC8 $\nabla$ . Πρώτα, θεωρούμε τη συνάρτηση  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1 και παίρνει ως παραμέτρους ένα δίκτυο  $C$  και τον

αντίστοιχο χορδικό γράφο περιορισμών  $G = (V, E)$ , ο οποίος προκύπτει από την τριγωνοποίηση του γράφου περιορισμών που αντιστοιχεί στο δίκτυο  $C$ . Ο στόχος της συνάρτησης αυτής είναι να εφαρμόσει την  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού σε όλα τα τρίγωνα κόμβων στο γράφο  $G$ . Κατά συνέπεια, αυτό θα έχει ως επακόλουθο πλήρη δίκτυα με συνέπεια μονοπατιού που αντιστοιχούν στους κόμβους ενός δέντρου κλικών  $T$  του  $G$ . Έτσι, επάγεται από την Πρόταση 3 πως η  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού αποφασίζει τη συνέπεια του δικτύου  $C$ , υποθέτοντας πως το δίκτυο  $C$  περιλαμβάνει σχέσεις από τα μέγιστα υποσύνολα  $H_g$ ,  $C_g$  και  $Q_g$  της RCC-8 άλγεβρας. Συμβολίζοντας με  $\delta$  το μέγιστο βαθμό ενός κόμβου του  $G$ , έχουμε πως για κάθε ακμή που επιλέγεται στη γραμμή 3, έχουμε το πολύ  $\delta$  κόμβους του  $G$  που αντιστοιχούν στο δείκτη  $k$ , έτσι ώστε οι κόμβοι  $v_i$ ,  $v_j$  και  $v_k$  να σχηματίζουν ένα τρίγωνο. Επιπρόσθετα, υπάρχουν  $|E|$  ακμές στο δίκτυο και κάποιος μπορεί να αφαιρέσει το πολύ  $|B|$  τιμές από οποιαδήποτε σχέση/περιορισμό που αντιστοιχεί σε μια ακμή, όπου  $B$  είναι το σύνολο των βασικών σχέσεων της άλγεβρας RCC-8. Συνεπώς, η χρονική πολυπλοκότητα της  $\nabla$ -συνέπειας μονοπατιού είναι  $O(\delta \cdot |E| \cdot |B|)$ .

#### $\nabla$ -Path-Consistency( $C, G$ )

Input: A constraint network  $C$  and its chordal graph  $G$

Output: True or False

```

1:  $Q \leftarrow \{(i, j) \mid (i, j) \in E\}$  // Initialize the queue
2: while  $Q$  is not empty do
3:   select and delete an  $(i, j)$  from  $Q$ 
4:   foreach  $k$  such that  $(i, k), (k, j) \in E$  do
5:      $t \leftarrow C_{ik} \cap (C_{ij} \diamond C_{jk})$ 
6:     if  $t \neq C_{ik}$  then
7:       if  $t = \emptyset$  then return False
8:        $C_{ik} \leftarrow t$ 
9:        $C_{ki} \leftarrow \check{t}$ 
10:     $Q \leftarrow Q \cup \{(i, k)\}$ 
11:     $t \leftarrow C_{kj} \cap (C_{ki} \diamond C_{ij})$ 
12:    if  $t \neq C_{kj}$  then
13:      if  $t = \emptyset$  then return False
14:       $C_{kj} \leftarrow t$ 
15:       $C_{jk} \leftarrow \check{t}$ 
16:     $Q \leftarrow Q \cup \{(k, j)\}$ 
17: return True
    
```

Σχήμα 1:  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού

Για τη γενική περίπτωση των RCC-8 δικτύων έχουμε έναν αλγόριθμο υπαναχώρησης, επονομαζόμενος  $\nabla$ -Συνέπεια, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Ο αλγόριθμος αυτός σπάει κάθε σχέση  $R$  σε υπο-σχέσεις που ανήκουν σε κάποιο βατό σύνολο σχέσεων  $S$  (γραμμή 6). Έπειτα, κάθε μια από αυτές τις υπο-σχέσεις ανατίθεται ως τιμή στον κατάλληλο περιορισμό στο δίκτυο περιορισμών  $C$  (γραμμή 9) και ο αλγόριθμος  $\nabla$ -συνέπειας μονοπατιού εφαρμόζεται ξανά. Ωστόσο, πέρα από το πρώτο βήμα, ο αλγόριθμος  $\nabla$ -συνέπειας μονοπατιού χρειάζεται να εφαρμοστεί μόνο στα μονοπάτια που πιθανόν επηρεάζονται μετά από κάθε ανάθεση τιμής στο δίκτυο  $C$ , το οποίο απαιτεί  $\Theta(\delta \cdot |B|)$  τομές και συνθέσεις. Αυτή η λεπτομέρεια δεν εμφανίζεται στο Σχήμα 2.

#### $\nabla$ -Consistency(C, G)

Input: A constraint network  $C$  and its chordal graph  $G$

Output: A refined constraint network  $C'$  if  $C$  is satisfiable or None

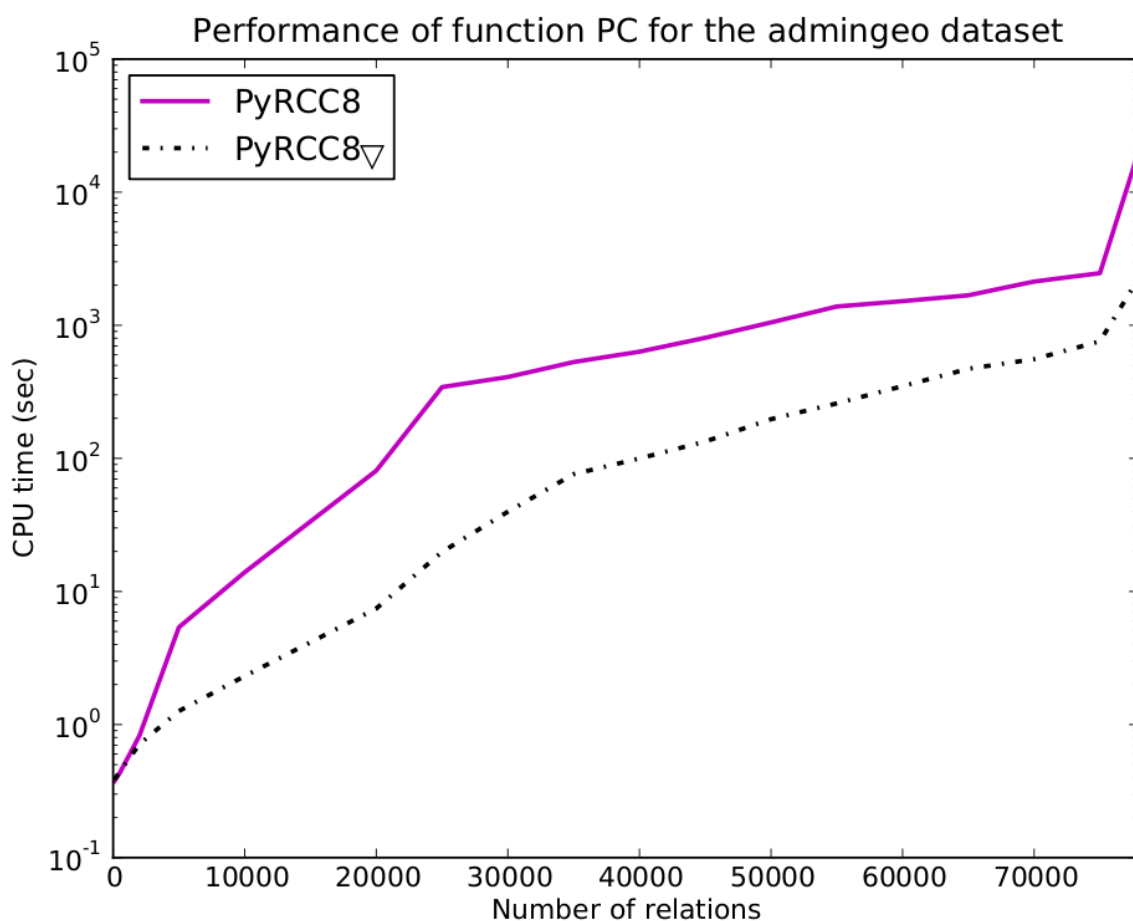
```
1: if not  $\nabla$ -Path-Consistency(C, G) then
2:   return None
3: if no constraint can be split then
4:   return C
5: else
6:   choose unprocessed constraint  $x_i R x_j$  ;
       split  $R$  into  $S_1, \dots, S_k \in S$ :  $S_1 \cup \dots \cup S_k = R$ 
7:   Values  $\leftarrow \{S_l \mid 1 \leq l \leq k\}$ 
8:   for  $V$  in Values do
9:     replace  $x_i R x_j$  with  $x_i V x_j$  in  $C$ 
10:    result =  $\nabla$ -Consistency(C, G)
11:    if result  $\neq$  None then
12:      return result
13: return None
```

Σχήμα 2:  $\nabla$ -Συνέπεια

### 3. Πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτήν την ενότητα, συγκρίνουμε την απόδοση του νέου επιλυτή PyRCC8 $\nabla$  με την απόδοση του επιλυτή PyRCC8, εκτελώντας πειράματα που στοχεύουν τόσο τις διαφορετικές υλοποιήσεις ελέγχου συνέπειας μονοπατιού όσο και τις

υλοποιήσεις ελέγχου συνέπειας. Έχοντας δύο επιλυτές που είναι κατά βάση όμοιοι στα δομικά τους συστατικά, μας επιτρέπει να συγκρίνουμε ξεκάθαρα μια μέθοδο που χρησιμοποιεί τριγωνοποιήσεις γράφων περιορισμών, με μια υλοποίηση που χρησιμοποιεί πλήρεις γράφους περιορισμών. Και οι δύο επιλυτές παραμετροποιήθηκαν για μέγιστη απόδοση. Τα πειράματα διεκπαιρεύθηκαν σε έναν υπολογιστή με επεξεργαστή Intel Xeon 4 Core X3220 συχνότητας 2.40 GHz, 8 GB RAM μνήμη, και το λειτουργικό σύστημα Debian Lenny x86 64. Και οι δύο επιλυτές, υλοποιημένοι σε Python 2, έτρεξαν με χρήση της υλοποίησης PyPy 1.8. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας πύρηνος από τον επεξεργαστή.



Σχήμα 3: Συγκριτικό διάγραμμα PC αλγορίθμων

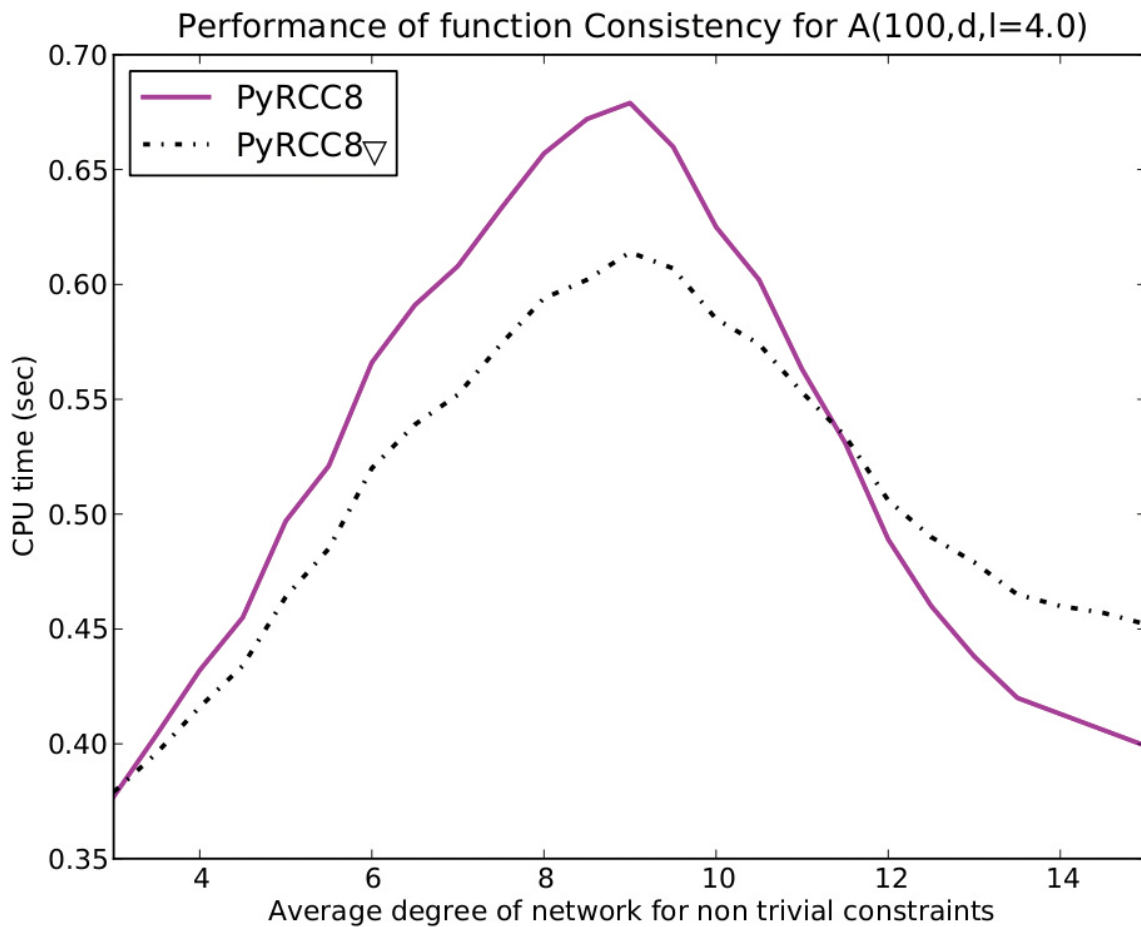
**Συνέπεια Μονοπατιού.** Η απόδοση ενός αλγορίθμου συνέπειας μονοπατιού είναι κρίσιμη για τη συνολική απόδοση ενός ποιοτικού επιλυτή, καθώς η συνέπεια μονοπατιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιλύει βατά δίκτυα, να χρησιμοποιηθεί ως βήμα προεπεξεργασίας, και τέλος να χρησιμοποιηθεί σαν

το βήμα ελέγχου και διάδοσης συνέπειας σε έναν αλγόριθμο υπαναχώρησης. Στο πείραμα μας χρησιμοποιούμε ένα σύνολο δεδομένων που αναπαριστά τη διοικητική γεωγραφία της Μεγάλης Βρετανίας με RCC-8 σχέσεις [17]. Ονομάζουμε αυτό το σύνολο δεδομένων ως *admingeo* σε ότι ακολουθεί για συντομία. Το *admingeo* είναι ένα πραγματικό σύνολο δεδομένων που αποτελείται από βασικές RCC-8 σχέσεις μεταξύ γεωγραφικών οντοτήτων στη Μεγάλη Βρετανία<sup>3</sup>. Το *admingeo* συνθέτει έναν πολύ μεγάλο και αραιό συνεπή RCC-8 γράφο που αποτελείται από περισσότερους από 10000 κόμβους και περίπου 80000 σχέσεις. Για το πείραμά μας δημιουργήσαμε δίκτυα περιορισμών διαφορετικού μεγέθους, λαμβάνοντας υπόψιν ένα μικρό αριθμό σχέσεων από τα αρχικά δεδομένα και επαυξάνοντάς το σε κάθε επόμενο βήμα. Φυσικά, ολόκληρο το *admingeo* χρησιμοποιήθηκε σαν ένα τελικό βήμα. Τα αποτελέσματα του πειράματος ελέγχου της μερικής συνέπειας δείχνονται στο Σχήμα 3.

Η υλοποίηση συνέπειας μονοπατιού του επιλυτή PyRCC8 $\nabla$ , δηλαδή η  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού, ξεπερνά κατά πολύ την απόδοση της υλοποίησης συνέπειας μονοπατιού του επιλυτή PyRCC8. Στο τελικό βήμα, που χρησιμοποιούμε ολόκληρο το *admingeo*, ο επιλυτής PyRCC8 αποφασίζει τη συνέπεια του δικτύου σε 5 ώρες στο μηχάνημά μας, ενώ ο επιλυτής PyRCC8 $\nabla$  χρειάζεται μόλις 40 λεπτά για την ίδια ενέργεια. Ουσιαστικά, ο επιλυτής PyRCC8 $\nabla$  τρέχει γρηγορότερα από τον επιλυτή PyRCC8 για όλα τα βήματα του πειράματος. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη. Η πλήρωση ενός δικτύου 40000 κόμβων έχει σαν αποτέλεσμα ένα σύνολο 50 εκατομμυρίων πλευρών που πρέπει να ελέγξει ο επιλυτής PyRCC8, όταν η τριγωνοποίηση τους ίδιου δικτύου έχει σαν αποτέλεσμα ένα σύνολο 4 εκατομμυρίων πλευρών που πρέπει να ελέγξει ο επιλυτής PyRCC8 $\nabla$ .

**Συνέπεια.** Για να εξετάσουμε την ταχύτητα των αλγορίθμων υπαναχώρησης που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο συνέπειας, θεωρήσαμε δίκτυα μεγέθους 100 κόμβων με έναν μέσο βαθμό  $d$  ανάμεσα σε 3 και 15 με ένα βήμα 0.5. Για κάθε σειρά, παρήχθησαν 300 δίκτυα από το σύνολο  $A(100,d,l=4.0)$  σχέσεων [2]. Τα πιο δύσκολα δίκτυα βρίσκονται στο διάστημα όπου ο μέσος βαθμός του δικτύου είναι από 8 μέχρι και 11. Τα αποτελέσματα του πειράματος ελέγχου της συνέπειας δείχνονται στο Σχήμα 4.

3 <http://www.ordnancesurvey.co.uk/ontology/AdministrativeGeography/v2.0/AdministrativeGeography.rdf>



Σχήμα 4: Συγκριτικό διάγραμμα αλγορίθμων ελέγχου συνέπειας

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν πως η απόδοση του επιλυτή PyRCC8∇ μειώνεται σε σχέση με την απόδοση του επιλυτή PyRCC8, όταν εξετάζονται πυκνά δίκτυα. Ωστόσο, η απόδοση του επιλυτή PyRCC8∇ συνολικά παραμένει πολύ καλύτερη, ειδικά για δίκτυα στο διάστημα 8 με 11, όπου είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν.

Συνεπώς, στην ενότητα αυτή είδαμε πως δοθέντος ενός RCC-8 δικτύου, αυτό μπορεί να επιλυθεί πολύ αποδοτικά τριγωνοποιώντας τον υποκείμενο γράφο περιορισμών και εφαρμόζοντας τη συνέπεια μονοπατιού σε αυτόν τον αραιό γράφο εν αντιθέσει με την πλήρωση του συγκεκριμένου δικτύου.



## 4. Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία εισάγαμε την  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού για RCC-8 δίκτυα. Βασισμένοι στην ιδιότητα της αμαλάμωσης που εξετάζεται στη δημοσίευση [8], δείξαμε πως η  $\nabla$ -συνέπεια μονοπατιού επαρκεί για να αποφασίσει τη συνέπεια RCC-8 δικτύων με σχέσεις από τα μέγιστα βατά υποσύνολα  $H_8$ ,  $C_8$  και  $Q_8$  της RCC-8 άλγεβρας. Επιπλέον, παρουσιάσαμε έναν αλγόριθμο για να επιλύουμε RCC-8 δίκτυα και διεξάγαμε πειράματα από τα οποία προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα.

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από το FP7 πρόγραμμα TELEIOS (257662).

Μέρος της δουλειάς αυτής της εργασίας κρίθηκε επιτυχώς και δημοσιεύτηκε με τίτλο «Consistency of Chordal RCC-8 Networks» στα πρακτικά του 24th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI) [18] που έλαβε χώρα στην Αθήνα, τον Νοέμβριο του 2012.

## Αναφορές

- [1] A Spatial Logic Based on Regions. Randell, D. A., Cui, Z. και Cohn, A. 1992. KR.
- [2] Efficient Methods for Qualitative Spatial Reasoning . Renz, J. και Nebel, B. s.l. : JAIR, 2001, Τόμ. 15.
- [3] GQR - A Fast Reasoner for Binary Qualitative Constraint Calculi. Gartner, Z., Westphal, M. και Woelfl, S. s.l. : AAAI Workshop on Spatial and Temporal Reasoning, 2008.
- [4] PelletSpatial: A Hybrid RCC-8 and RDF/OWL Reasoning and Query Engine. Stocker, M. και Sirin, E. s.l. : OWLED, 2009.
- [5] Path consistency on triangulated constraint graphs. Bliiek, C. και Sam-Haroud, D. s.l. : IJCAI, 1999.

- [6] Consistency of Triangulated Temporal Qualitative Constraint Networks. Chmeiss, A. και Condotta, J.-F. s.l. : ICTAI, 2011.
- [7] Maximal Tractable Fragments of the Region Connection Calculus: A Complete Analysis. Renz, J. s.l. : IJCAI, 1999.
- [8] Compactness and Its Implications for Qualitative Spatial and Temporal Reasoning. Huang, J. s.l. : KR, 2012.
- [9] Tracing the metalevel: PyPy's tracing JIT compiler. Bolz, C. F., και συν. s.l. : IC00OLPS, 2009.
- [10] Runtime feedback in a meta-tracing JIT for efficient dynamic languages. Bolz, C. F., και συν. s.l. : IC00OLPS, 2011.
- [11] Weak Composition for Qualitative Spatial and Temporal Reasoning. Renz, J. και Ligozat, G. s.l. : CP, 2005.
- [12] Renz, J. και Nebel, B. Qualitative Spatial Reasoning Using Constraint Calculi. Handbook of Spatial Logics. 2007.
- [13] Golumbic, M. C. Algorithmic Graph Theory and Perfect Graphs. 2nd Edition. s.l. : Elsevier Science, 2004.
- [14] Maximum Cardinality Search for Computing Minimal Triangulations. Berry, A., Blair, J. R. S. και Heggernes, P. s.l. : WG, 2002.
- [15] Heuristic Algorithms for the Triangulation of Graphs. Cano, A. και Moral, S. s.l. : IPMU, 1994.
- [16] A Tableau Algorithm for DLs with Concrete Domains and GCI. Lutz, C. και Milicic, M. s.l. : JAR, 2007, Τόμ. 38.
- [17] Geographical Linked Data: The Administrative Geography of Great Britain on the Semantic Web. Goodwin, J., Dolbear, C. και Hart, G. s.l. : Transactions in GIS, 2008, Τόμ. 12.
- [18] Consistency of Chordal RCC-8 Networks. Sioutis, M. και Koubarakis, M. s.l. : ICTAI, 2012.

Δημήτριος Ε. Χριστοδούλου

*pin10052@di.uoa.gr*

# Υπολογιστική Μοντελοποίηση της Δυναμικής του Μεταγραφικού Μηχανισμού της Ιντερφερόνης - Β (IFN $\beta$ ) μέσω της Συγκρότησης του Ενισχυοσώματος

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστημιούπολη, Ιλίσια, 15784, Αθήνα, Ελλάς

## Περίληψη

Αναπτύχθηκε το πρώτο υπολογιστικό μοντέλο Συστημικής Βιολογίας, ικανό να προσομοιώσει τη λειτουργία και δυναμική του μεταγραφικού μηχανισμού της Ιντερφερόνης - Β (IFN $\beta$ ), σε μονοκυτταρικό και πληθυσμιακό επίπεδο, δεδομένης της μόλυνσης του κυττάρου από κάποιο ιό. Το μονοκυτταρικό υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύξαμε, προσομοιώνει τη стоχαστική διαδικασία μεταγραφής της IFN $\beta$ , μέσω της συγκρότησης του Ενισχυοσώματος. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτέλεσε το δομικό λίθο για τη δημιουργία ενός ιδιαίτερα ισχυρού υπολογιστικού μοντέλου, σε πληθυσμιακό επίπεδο, ικανό να προσομοιώσει τη δυναμική και τη стоχαστικότητα του συστήματος, αλλά και τους ενδοκρινείς και παρακρινείς μηχανισμούς και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυττάρων.

Λέξεις κλειδιά: Εκτίμηση παραμέτρων - μηχανική μάθηση, μεταγραφή της IFN $\beta$ , υπολογιστική μοντελοποίηση, δίκτυα βιοχημικών αντιδράσεων, in-silico πειράματα

## Επιβλέπων

Μανωλάκος Ηλίας, Αναπληρωτής Καθηγητής

## 1. Εισαγωγή

Η Μοριακή Βιολογία έχει αποκαλύψει τα τελευταία χρόνια μεγάλο πλήθος πληροφοριών, αυτό όμως δεν αρκεί για την πλήρη κατανόηση των βιολογικών συστημάτων. Η χρήση υπολογιστικών μεθόδων και μαθηματικής μοντελοποίησης των συστημάτων αυτών αποτελεί ίσως μονόδρομο για την πλήρη κατανόηση των βιολογικών συστημάτων, που ίσως επιτρέψει τον ανασχεδιασμό και - γιατί όχι - «προγραμματισμό» τους [1]. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήσαμε το σύστημα της έκφρασης της Ιντερφερόνης - Β (IFNβ) [2], όταν τα κύτταρα έχουν προσβληθεί από κάποιον ιό. Ο ρόλος της συγκεκριμένης πρωτεΐνης είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς σηματοδοτεί την αντίδραση του ανοσοποιητικού συστήματος και οποιαδήποτε αδυναμία έκφρασής της οδηγεί σε ιδιαίτερα επικίνδυνες παρενέργειες. Η εγγενής στοχαστικότητα του συστήματος αποτέλεσε ένα από τα ζητήματα που κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε και να μοντελοποιήσουμε μαθηματικά.

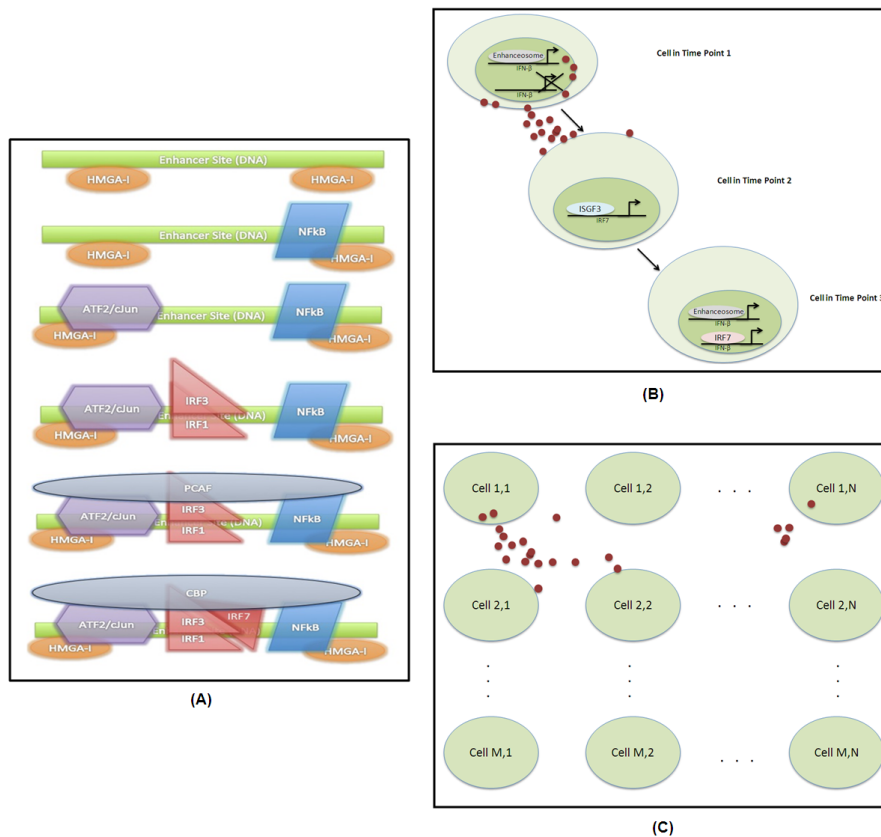
Αναπτύξαμε υπολογιστικά - μαθηματικά μοντέλα τα οποία είναι ικανά να προσομοιώσουν τη λειτουργία του μηχανισμού έκφρασης της IFNβ σε διάφορες περιπτώσεις. Λόγω της στοχαστικότητας της διαδικασίας εφαρμόσαμε στοχαστικούς αλγορίθμους προσομοίωσης [3], [4], [5], ενώ ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στην εκτίμηση των παραμέτρων των μαθηματικών μοντέλων μας από πειραματικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκαν πληθώρα εργαλείων (Copsi, iBioSim) και αναπτύχθηκαν προγράμματα σε Perl και Matlab, ενώ έγινε εκτενής χρήση διάφορων πακέτων και εργαλείων για βελτιστοποίηση και εκτίμηση παραμέτρων, καθώς και προσομοίωση (Simulink), βασισμένα στην πλατφόρμα που προσφέρει το Matlab.

Τα υπολογιστικά μοντέλα που αναπτύξαμε, τόσο σε επίπεδο ενός κυττάρου όσο και σε επίπεδο κυτταρικού πληθυσμού, φαίνεται να είναι ικανά να αναπαραγάγουν, σε ιδιαίτερα ικανοποιητικό επίπεδο, πειραματικά δεδομένα σε διάφορες περιπτώσεις, φτάνοντας σε σημείο να κάνουν προβλέψεις για το ρόλο ορισμένων βασικών υποσυστημάτων για την επιτυχή λειτουργία του μηχανισμού έκφρασης της IFNβ. Τα μοντέλα που αναπτύξαμε έχουν εξαχθεί σε μια έκδοση XML, συγκεκριμένα σε SBML format, για να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφερσιμότητα και επεκτασιμότητά τους.

## 2. Υπολογιστικό - μαθηματικό μοντέλο στο επίπεδο του ενός κυττάρου

Για την ενεργοποίηση του μηχανισμού έκφρασης της IFNB, είναι απαραίτητη η συγκρότηση ενός Ενισχυοσώματος το οποίο οδηγεί στην έκφραση της IFNB [2], [6], [7]. Η διαδικασία αφορά την ένωση 8 πρωτεϊνών στον υποκινητή του γονιδίου, μια διαδικασία η οποία εξαρτάται από τη συγκέντρωση των πρωτεϊνών, καθώς και από μια σειρά άλλων παραγόντων, που κάνουν τη διαδικασία έκφρασης του γονιδίου στοχαστική. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην Εικόνα 1Α, όπου φαίνεται ο ακολουθιακός τρόπος με τον οποίο δένονται οι πρωτεΐνες στον υποκινητή του γονιδίου, οι οποίες λειτουργούν σαν είσοδοι σε πύλη AND μιας και απαιτούνται όλες για να εκκινήσει η διαδικασία έκφρασης. Η στοχαστικότητα της διαδικασίας είναι εγγενής (intrinsic), αφού εξαρτάται από το αν και πότε θα καταφέρουν να δεθούν τα απαραίτητα στοιχεία στον υποκινητή, αλλά και εξωγενής (extrinsic), αφού τα διάφορα κύτταρα στον πληθυσμό δεν έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτεϊνών.

Μελετήσαμε τη συγκεκριμένη διαδικασία, αρχικά, σε επίπεδο ενός κυττάρου, όπου δημιουργήσαμε ένα υπολογιστικό - μαθηματικό μοντέλο το οποίο αναπαριστά τον πραγματικό βιολογικό μηχανισμό, λαμβάνοντας υπόψιν την εγγενή στοχαστικότητά του. Χρησιμοποιούμε 21 διαφορετικές εξισώσεις για τη μοντελοποίηση των 21 διαφορετικών ειδών που συμμετέχουν στη διαδικασία, από τις οποίες έχουμε συνολικά 18 κινητικές παραμέτρους. Ουσιαστικά, μοντελοποιούμε υπολογιστικά ένα δίκτυο από βιοχημικές αντιδράσεις, οι οποίες υπακούουν σε συγκεκριμένους νόμους (mass action law). Από τις παραμέτρους του μοντέλου μας, ορισμένες ήταν γνωστές από τη βιβλιογραφία, ενώ άλλες έπρεπε να εκτιμηθούν από τα διαθέσιμα δεδομένα.



**Εικόνα 1:** (A) Συγκρότηση του Ενισχυοσώματος της IFN $\beta$  με τον ακολουθιακό τρόπο που περιγράφεται στις [2], [6], [7]. Το συγκεκριμένο σύμπλοκο περιλαμβάνει διάφορες πρωτεΐνες, οι οποίες είναι όλες απαραίτητες για την αρχική έκφραση της IFN $\beta$ . Οι συγκεκριμένες πρωτεΐνες θεωρούμε ότι δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και ότι δένονται με έναν καλά ορισμένο τρόπο [2], [6], [7]. (B) Ο μηχανισμός ανατροφοδότησης (Feedback Loop) ενεργοποιεί το δεύτερο αλληλίο του κυττάρου: Τις περισσότερες φορές είναι μόνο το ένα αλληλίο που καταφέρνει να μεταγραφεί, ενώ το δεύτερο αλληλίο ακολουθεί μετά από αρκετά λεπτά, ίσως και ώρες. Έχουμε υποθέσει ότι η εκκρινόμενη πρωτεΐνη IFN $\beta$  λειτουργεί αυτοκρινώς, επηρεάζοντας το ίδιο το κύτταρο από το οποίο προήλθε, σηματοδοτώντας την έκφραση και παραγωγή της ιδιαίτερα σημαντικής πρωτεΐνης IRF7. Έχουμε κάνει την παραδοχή ότι υπάρχει ένας απλούστερος μηχανισμός που διέπει την έκφραση του δεύτερου αλληλίου στον οποίο η πρωτεΐνη IRF7 παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο. Η παρουσία αυτού του μεταγραφικού παράγοντα, σε μεγάλη συγκέντρωση, θα μπορούσε να οδηγήσει στην πιο γρήγορη αύξηση του δεύτερου αλληλίου, χωρίς την ανάγκη για τη συγκρότηση του Ενισχυοσώματος [2]. (C) Το υπολογιστικό μοντέλο σε επίπεδο πληθυσμού αποτελείται από ένα πλέγμα (grid) το οποίο έχει  $N \times M$  (τιμές καθοριζόμενες από το χρήστη) στοιχεία (κύτταρα). Αυτά τα στοιχεία, στη δική μας περίπτωση, είναι αντίγραφα του υπολογιστικού μοντέλου σε επίπεδο ενός κυττάρου, το οποίο σημαίνει ότι έχουμε  $N \times M$  στιγμιότυπα από το μοντέλο στο επίπεδο του ενός κυττάρου. Αυτά τα στιγμιότυπα είναι μοναδικά σε κάθε υπολογιστικό μοντέλο στο επίπεδο του πληθυσμού: κάθε στιγμιότυπο (κύτταρο) στο πλέγμα έχει διαφορετικό, τυχαία ορισμένο, αρχικό αριθμό πρωτεϊνών. Αυτές οι τιμές προκύπτουν από Γάμμα κατανομές με συγκεκριμένες τιμές  $\alpha$  και  $\beta$ .

### 3. Ανάλυση ευαισθησίας και εκτίμηση παραμέτρων

Για να αξιοποιήσουμε τα διαθέσιμα δεδομένα μας κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο, πραγματοποιήσαμε ανάλυση ευαισθησίας για να αναγνωρίσουμε τις παραμέτρους που επηρεάζουν περισσότερο το σύστημά μας. Καταλήξαμε σε 8 παραμέτρους (από το σύνολο των 18) οι οποίες, με βάση την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήσαμε, επηρεάζουν περισσότερο το σύστημά μας. Αυτές επιχειρήσαμε να εκτιμήσουμε, ενώ οι υπόλοιπες 10 παράμετροι πήραν τιμές με βάση τη σχετική βιβλιογραφία [8], [9].

Χρησιμοποιήσαμε τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, τα οποία προήλθαν από πειράματα rt-PCR (real-time PCR). Στη διάθεσή μας είχαμε 17 στιγμιότυπα (time points) από τρεις επαναλήψεις του ίδιου πειράματος, από τα οποία εκτιμήσαμε τις παραμέτρους του μοντέλου. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιήσαμε 4 διαφορετικούς αλγόριθμους: Genetic, Genetic with stochastic ranking, Evolutionary Strategy, Particle Swarm. Η στοχαστική φύση των αλγορίθμων αυτών τους οδηγεί πολλές φορές στο να βρίσκουν τοπικά και όχι ολικά ελάχιστα. Για αυτό το λόγο, πραγματοποιήσαμε 100 εκτιμήσεις με κάθε αλγόριθμο και υπολογίσαμε τη διάμεσο και το μέσο όρο για κάθε παράμετρο και για κάθε αλγόριθμο. Εν συνεχεία, δοκιμάσαμε συστηματικά στο μοντέλο μας τις διαμέσους και τους μέσους όρους των παραμέτρων, όπως εκτιμήθηκαν από τους 4 διαφορετικούς αλγόριθμους, και παρατηρήσαμε ότι τα καλύτερα αποτελέσματα (ελαχιστοποίηση του Root Mean Square Error σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα) δίνονται από τις διαμέσους, επιβεβαιώνοντας πρόσφατα αποτελέσματα [10]. Τα καλύτερα αποτελέσματα (με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και χρησιμοποιώντας την root mean square error μετρική για αξιολόγηση) δόθηκαν από το σετ παραμέτρων που είχε προκύψει από τις 100 προσομοιώσεις με τον Evolutionary Strategy αλγόριθμο.

Με αυτό το εκπαιδευμένο μοντέλο πραγματοποιήσαμε μια σειρά από ντετερμινιστικές, αλλά και στοχαστικές προσομοιώσεις. Σε κάθε περίπτωση δείχνουμε ότι είμαστε εξαιρετικά κοντά στα πειραματικά δεδομένα, γεγονός που δείχνει ότι το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύξαμε στο επίπεδο του ενός κυττάρου είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο.



## 4. Υπολογιστικό μοντέλο στο επίπεδο του πληθυσμού κυττάρων

Παρότι το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύξαμε στο επίπεδο του ενός κυττάρου καταφέρνει να αποτυπώσει σε ικανοποιητικό βαθμό τη δυναμική συμπεριφορά των μολυσμένων από ιό κυττάρων, απουσιάζουν δύο ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία. Το γεγονός ότι προσομοιώνουμε στοχαστικά το σύστημά μας, μας επιτρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν την εγγενή (intrinsic) στοχαστικότητα του μηχανισμού. Αποτυγχάνουμε όμως ως αυτό το σημείο να λάβουμε υπόψιν την εξωγενή (extrinsic) στοχαστικότητα του συστήματος, τη στοχαστικότητα που πηγάζει από το γεγονός ότι τα κύτταρα δεν είναι ίδια μεταξύ τους - για παράδειγμα διαφέρουν στον πλήθος των πρωτεϊνών. Το μοντέλο μας θεωρεί όλα τα κύτταρα ίδια, αφού δεν έχει προστεθεί κάποιος παράγοντας εξωγενούς στοχαστικότητας, καθώς και αλληλεπίδρασης με άλλα κύτταρα.

Το σύστημα που μελετάμε, όμως, είναι ένα σύστημα που αποτελείται από πολλά κύτταρα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, στέλνουν και λαμβάνουν σήματα - μέσω πρωτεϊνών που εκκρίνονται από κάποια κύτταρα και προσλαμβάνονται από άλλα - και έτσι ρυθμίζουν συνεργατικά τη λειτουργία τους. Στο μηχανισμό που μελετάμε, το ρόλο του σήματος και του ρυθμιστή της απόκρισης των κυττάρων, όταν υπάρχει ιός, τον έχει η πρωτεΐνη IFN $\beta$ , η οποία εκκρίνεται από τα κύτταρα που καταφέρνουν να την αναπαράγουν και λειτουργεί αυτοκρινώς (επηρεάζει το ίδιο το κύτταρο από το οποίο εκκρίθηκε), καθώς και παρακρινώς (επηρεάζει τα γειτονικά κύτταρα) (Εικόνα 1B).

Επιχειρήσαμε να προσθέσουμε τα στοιχεία της εξωγενούς στοχαστικότητας, καθώς και της έκκρισης και πρόσληψης της IFN $\beta$  από γειτονικά κύτταρα. Για να το πετύχουμε αυτό, αναπτύξαμε ένα υπολογιστικό μοντέλο στο επίπεδο του κυτταρικού πληθυσμού. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο του ενός κυττάρου, καθώς χρησιμοποιεί την τοπολογία του, τη λειτουργία και τις παραμέτρους του. Το μοντέλο στο επίπεδο του πληθυσμού, αποτελείται από ένα «πλέγμα» (grid) [11], το οποίο έχει  $N \times M$  (καθορίζονται από το χρήστη) στοιχεία - κύτταρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1C. Στη δική μας περίπτωση τα στοιχεία αυτά είναι αντίγραφα του αρχικού μας μονοκυτταρικού μοντέλου, τα οποία όμως έχουμε καταστήσει μοναδικά: κάθε στοιχείο (κύτταρο) του πλέγματος είναι διαφορετικό, διότι οι αρχικές του συνθήκες έχουν επιλεγεί τυχαία από μια Γάμμα κατανομή, με συγκεκριμένες παραμέτρους  $\alpha$  και  $\beta$ . Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε κύτταρο έχει προστεθεί η εξωγενής στοχαστικότητα, ενώ ταυτόχρονα, από τον κοινό τρόπο λειτουργίας τους, διέπονται από την

εγγενή στοχαστικότητα που έχουμε ήδη περιγράψει. Θεωρητικά, κάθε κύτταρο είναι ικανό να εκφράσει την IFNB, αλλά το αν θα καταφέρει να το κάνει ή όχι είναι μια στοχαστική διαδικασία που εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες του κυττάρου (εξωγενής στοχαστικότητα), καθώς και από το αν καταφέρνει να συγκροτηθεί το Ενισχυόσωμα (εγγενής στοχαστικότητα).

Όταν ένα κύτταρο καταφέρνει να εκφράσει την IFNB, την εκκρίνει και έτσι επηρεάζει κάποιο γειτονικό κύτταρο, το οποίο με τη σειρά του καταφέρνει να εκφράσει τη συγκεκριμένη πρωτεΐνη. Η IFNB, όταν εκκρίνεται, μετακινείται μεταξύ των στοιχείων του πλέγματος με συγκεκριμένη ταχύτητα, ενώ το πόσο εύκολα ή δύσκολα εκκρίνεται ή προσλαμβάνεται εξαρτάται από τη διαπερατότητα των κυττάρων.

## 5. Αποτελέσματα υπολογιστικών - εικονικών πειραμάτων (in silico - virtual experiments)

Η μεγαλύτερη χρησιμότητα των υπολογιστικών μοντέλων, που αναπτύξαμε και εκπαιδεύσαμε με πραγματικά βιολογικά δεδομένα, έγκειται στο ότι είμαστε πλέον σε θέση να πραγματοποιήσουμε «πειράματα» (in silico experiments) μέσω αυτών. Με αυτό τον τρόπο, μπορούμε εξαιρετικά γρήγορα και ανέξοδα να δοκιμάσουμε υποθέσεις, αλλά και να δημιουργήσουμε νέες. Ένα βασικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση είναι η αξιολόγηση του υπολογιστικού μοντέλου, με βάση πραγματικά δεδομένα, από βιολογικά πειράματα. Για αυτό το λόγο αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε ως μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων του πολυκυτταρικού υπολογιστικού μοντέλου μας, τα αποτελέσματα των Αποστόλου και Θάνου [12]. Καταφέραμε με σχετική ευκολία να προσαρμόσουμε το υπολογιστικό μοντέλο μας στις εκάστοτε διαταραχές του βιολογικού συστήματος που πραγματοποιήθηκαν στο [12], δείχνοντας με αυτό τον τρόπο τη χρησιμότητα και προσαρμοστικότητά του σε ένα βαθμό. Για να ελέγξουμε τις δυνατότητες του μοντέλου μας και το αν και σε τι βαθμό μπορεί να αποτυπώσει τη δυναμική και στοχαστική συμπεριφορά των κυττάρων, όταν έχουν μολυνθεί από ιό, πραγματοποιήσαμε 7 διαφορετικά υπολογιστικά πειράματα. Σε κάθε περίπτωση, είχαμε πληθυσμό από 100 κύτταρα και πραγματοποιήσαμε 100 συνολικά στοχαστικές προσομοιώσεις για μια περίοδο 10 ωρών. Τα αποτελέσματα που πήραμε από τέσσερα

διαφορετικά υπολογιστικά πειράματα, βρίσκονται σε εξαιρετική συμφωνία με τα αντίστοιχα «βιολογικά» (υγρά) πειράματα που παρουσιάζονται στη δημοσίευση των Αποστόλου και Θάνου [12]. Με τα επόμενα τρία πειράματα που πραγματοποιήσαμε δείχνουμε την ικανότητα του υπολογιστικού μοντέλου να δοκιμάσει νέα πειράματα που δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμα στο εργαστήριο, αλλά και τη δυνατότητά του να παράγει νέες υποθέσεις. Στη συνέχεια, δίνεται περιληπτικά μια περιγραφή του κάθε πειράματος, καθώς και τα αποτελέσματά του. Να σημειωθεί ότι τα ποσοστά που αναφέρουμε αποτελούν το μέσο όρο των αποτελεσμάτων των 100 στοχαστικών προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε σε κάθε περίπτωση.

- (1) Το πρώτο υπολογιστικό πείραμα που πραγματοποιήσαμε αφορά την «control» περίπτωση, δηλαδή τη συμπεριφορά του κυτταρικού πληθυσμού όταν έχει προσβληθεί από ιό. Παρατηρήσαμε ότι στην αρχή μόνο ένα μικρό ποσοστό του πληθυσμού (~20%) καταφέρνει να εκφράσει την IFN $\beta$ , ποσοστό που διπλασιάζεται μετά το πέρας μερικών ωρών (~10). Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τα όσα είναι γνωστά για το σύστημα [12], [8], [9].
- (2) Στη συνέχεια, μελετήσαμε αν είναι η πρωτεΐνη που εκκρίνεται (IFN $\beta$ ) υπεύθυνη για το διπλασιασμό του ποσοστού των κυττάρων. Έτσι, «διακόψαμε» στο υπολογιστικό μας μοντέλο την πρόσληψη της IFN $\beta$  από τα κύτταρα, εμποδίζοντας ουσιαστικά το σήμα ανατροφοδότησης. Τα αποτελέσματα που πήραμε έδειξαν ότι το ποσοστό των κυττάρων που κατάφεραν να εκφράσουν την πρωτεΐνη παρέμεινε σχετικά σταθερό, περίπου 20% στην αρχή και φτάνοντας στο 25% μετά από 10 ώρες. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε πλήρη συμφωνία με όσα αναφέρονται στη δημοσίευση των Αποστόλου και Θάνου [12] για το ίδιο πείραμα.
- (3) Ακολούθως, μελετήσαμε το ρόλο της πρωτεΐνης IRF7 ως πιθανού διακόπτη στη μεταγραφή της IFN $\beta$ , κατά ανάλογο τρόπο με τα όσα αναφέρονται στη [12]. Τα αποτελέσματά μας φανερώνουν τον ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο της συγκεκριμένης πρωτεΐνης-διακόπτη στο σύστημα, επιβεβαιώνοντας (υπολογιστικά) τα αποτελέσματα που αναφέρονται στη δημοσίευση των Αποστόλου και Θάνου [12].
- (4) Εν συνεχεία, ενδιαφερθήκαμε για τα αποτελέσματα του μοντέλου μας στην περίπτωση που είχε χορηγηθεί ήδη IFN $\beta$  στον πληθυσμό (π.χ. μέσω της χορήγησης κάποιου φαρμάκου), κατά ανάλογο τρόπο με το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο [12]. Τα αποτελέσματα που πήραμε

είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος, καθώς τα ποσοστά των κυττάρων που εκφράζουν την IFN $\beta$  αυξήθηκαν δραματικά, φτάνοντας μετά από περίπου 10 ώρες το 70% του συνολικού πληθυσμού με τυπική απόκλιση ~5%. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα βρίσκονται για ακόμα μια φορά σε εξαιρετική συμφωνία με όσα παρατηρήθηκαν και αναφέρθηκαν στη δημοσίευση που αποτελεί το (βιολογικό) πειραματικό ανάλογό μας [12], όπου το 72% του πληθυσμού βρέθηκε να εκφράζει την IFN $\beta$ , μετά από 10 ώρες.

Με τα συγκεκριμένα υπολογιστικά πειράματα, επιχειρήσαμε να αξιολογήσουμε την ποιότητα του μοντέλου μας. Παρατηρήσαμε την εξαιρετική ομοιότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου μας και των αντίστοιχων που πραγματοποιήθηκαν στο πραγματικό, βιολογικό σύστημα [12].

Στη συνέχεια, πραγματοποιήσαμε τρία (3) υπολογιστικά πειράματα, με σκοπό να προβλέψουμε την αντίδραση του συστήματος σε αυτές τις περιπτώσεις, αλλά και να ανακαλύψουμε άλλους πιθανούς μεταγραφικούς διακόπτες για την περίπτωση της έκφρασης της IFN $\beta$ .

Αρχικά, μελετήσαμε το ρόλο της πρωτεΐνης NF $\kappa$ B [13] ως πιθανού μεταγραφικού διακόπτη. Παρατηρήσαμε την αντίδραση του συστήματος, μέσω του μοντέλου μας, και διαπιστώσαμε ότι ο ρόλος της NF $\kappa$ B είναι αντίστοιχα ή περισσότερο σημαντικός από τον ήδη γνωστό ρόλο της IRF7 (που λειτουργεί ως διακόπτης για τη μεταγραφή της IFN $\beta$  και είναι ένας γνωστός περιοριστικός παράγοντας του μηχανισμού). Το μοντέλο μας προβλέπει το ρόλο της NF $\kappa$ B ως πιθανού περιοριστικού παράγοντα του μηχανισμού, έχοντας ένα ρόλο όμοιο με αυτό της IRF7, μιας και ο πληθυσμός των εκφραζόμενων κυττάρων μετά από ~10 ώρες παραμένει στα ίδια επίπεδα, αποτυγχάνοντας να δείξει την αναμενόμενη αύξηση. Μπορούμε, επομένως, να υποθέσουμε ότι ο ρόλος της NF $\kappa$ B είναι όμοιος με αυτόν της IRF7 - λειτουργεί, δηλαδή, σαν διακόπτης και αποτελεί περιοριστικό παράγοντα του συστήματος.

Τέλος, ενδιαφερθήκαμε για την αντίδραση του συστήματος σε περίπτωση που δεν υπάρχει περιορισμός στις δύο αυτές σημαντικές πρωτεΐνες. Το μοντέλο μας προβλέπει ότι σε αυτή την περίπτωση η πλειονότητα των κυττάρων θα ήταν ικανή να εκφράσει την IFN $\beta$  (το μοντέλο προβλέπει ότι ~90% του πληθυσμού θα εκφράσει την πρωτεΐνη, μετά το πέρας των 10 ωρών).

## 6. Συμπεράσματα - μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας

Συνδυάζοντας γνώση, ιδέες και εργαλεία από το χώρο της πληροφορικής (μηχανική μάθηση, λογική σχεδίαση, υπολογιστική μοντελοποίηση), των μαθηματικών και της μοριακής βιολογίας, αναπτύξαμε το πρώτο αξιόπιστο υπολογιστικο-μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει έναν ιδιαίτερα σημαντικό βιολογικό μηχανισμό: τη μεταγραφή της IFN $\beta$ .

Ο στόχος των υπολογιστικών μοντέλων μας δεν ήταν απλά να εξηγήσουν (ή να κάνουν fit τα διαθέσιμα δεδομένα), αν και αυτό ήταν απαραίτητο για τη συνέχεια της δουλειάς μας, αλλά κυρίως να αποτελέσουν μια εννοιολογική βάση για την περαιτέρω κατανόηση των διαθέσιμων δεδομένων, καθώς και για τη δημιουργία νέων υποθέσεων και πειραμάτων.

Αρχικά αναπτύξαμε ένα υπολογιστικό μοντέλο σε μονοκυτταρικό επίπεδο, εκτιμώντας τις πιο σημαντικές παραμέτρους από πραγματικά δεδομένα, κάνοντας χρήση 4 διαφορετικών αλγορίθμων. Το συγκεκριμένο (εκπαιδευμένο) μοντέλο αποτέλεσε τη βάση για το σχεδιασμό ενός αρκετά πιο πολύπλοκου υπολογιστικού μοντέλου, το οποίο περιγράφει τη δυναμική ενός πληθυσμού κυττάρων, μετά τη μόλυνση του από ιό. Το συγκεκριμένο μοντέλο αξιολογήθηκε σε μια σειρά (υπολογιστικών-εικονικών) πειραμάτων, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων πειραμάτων που έγιναν σε πραγματικές συνθήκες και κύτταρα, στο εργαστήριο.

Δείξαμε ότι το μοντέλο μας είναι σε θέση να περιγράψει με εξαιρετική ακρίβεια τα αποτελέσματα των βιολογικών πειραμάτων. Η διενέργεια νέων υπολογιστικών πειραμάτων ανέδειξε το ρόλο μιας ιδιαίτερα σημαντικής πρωτεΐνης (NF $\kappa$ B) ως πιθανού περιοριστικού παράγοντα του μηχανισμού, προβλέποντας ότι πιθανά να αποτελεί έναν ακόμα μεταγραφικό διακόπτη για την ενεργοποίηση του μηχανισμού μεταγραφής της IFN $\beta$  και τελικά του ανοσοποιητικού συστήματος.

Ο ρόλος αυτός μένει να αποδειχθεί και πειραματικά, κάτι το οποίο είναι ο πρώτος μελλοντικός στόχος. Το μοντέλο που έχουμε αναπτύξει, θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για το σχεδιασμό και ανάπτυξη ακόμα πιο πολύπλοκων υπολογιστικών μοντέλων, τα οποία θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην κατανόηση ακόμα πιο σημαντικών και πολύπλοκων βιολογικών μηχανισμών.

Η χρήση υπολογιστικών εργαλείων και μοντέλων στον τομέα της βιολογίας, και όχι μόνο, αποτελεί πιθανά έναν από τους καλύτερους τρόπους για την

ενσωμάτωση της διαθέσιμης πληροφορίας και την κατανόηση αυτών των πολύπλοκων συστημάτων.

## Αναφορές

- [1] H. Kitano, “Computational systems biology”, *Nature*, vol. 420, no. 6912, pp. 206-10, Nov. 2002.
- [2] E. Ford and D. Thanos, “The transcriptional code of human IFN- $\beta$  gene expression” *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Gene Regulatory Mechanisms*, vol. 1799, no. 3-4, pp. 328-336, 2010.
- [3] D. J. Wilkinson, “Stochastic modelling for quantitative description of heterogeneous biological systems”, *Nature reviews. Genetics*, vol. 10, no. 2, pp. 122-133, Feb. 2009.
- [4] J. Pahle, “Biochemical simulations: stochastic, approximate stochastic and hybrid approaches”, *Briefings in Bioinformatics*, vol. 10, no. 1, pp. 53-64, Jan. 2009.
- [5] D. T. Gillespie, “A general method for numerically simulating the stochastic time evolution of coupled chemical reactions”, *Journal of Computational Physics*, vol. 22, no. 4, pp. 403-434, 1976.
- [6] N. Munshi, J. Yie, M. Merika, K. Senger, S. Lomvardas, T. Agaloti, and D. Thanos, “The IFN- $\beta$  Enhancer: A Paradigm for Understanding Activation and Repression of Inducible Gene Expression”, *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, vol. 64, pp. 149-160, Jan. 1999.
- [7] J. Yie, K. Senger, and D. Thanos, “Mechanism by Which the IFN- $\beta$  Enhanceosome Activates Transcription”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 96, no. 23, pp. 13108-13113, Nov. 1999.
- [8] J. Hu, S. C. Sealton, F. Hayot, C. Jayaprakash, M. Kumar, A. C. Pendleton, A. Ganee, A. Fernandez-Sesma, T. M. Moran, and J. G. Wetmur, “Chromosome-Specific and Noisy IFN $\beta$ 1 Transcription in Individual Virus-Infected Human Primary Dendritic Cells”, *Nucleic Acids Research*, vol. 35, no. 15, pp. 5232-5241, Aug. 2007.

- [9] J. Hu, G. Nudelman, Y. Shimoni, M. Kumar, Y. Ding, C. López, F. Hayot, J. G. Wetmur, and S. C. Sealfon, “Role of Cell-to-Cell Variability in Activating a Positive Feedback Antiviral Response in Human Dendritic Cells”, PLoS ONE, vol. 6, no. 2, Feb. 2011.
- [10] S. M. Baker, K. Schallau, and B. H. Junker, “Comparison of different algorithms for simultaneous estimation of multiple parameters in kinetic metabolic models”, Journal of integrative bioinformatics, vol. 7, no. 3, 2010.
- [11] C. J. Myers, N. Barker, K. Jones, H. Kuwahara, C. Madsen, and N.-P. D. Nguyen, “iBioSim: a tool for the analysis and design of genetic circuits.”, Bioinformatics, vol. 25, no. 21, pp. 2848-2849, 2009.
- [12] E. Apostolou and D. Thanos, “Virus Infection Induces NF- $\kappa$ B-Dependent Interchromosomal Associations Mediating Monoallelic IFN- $\beta$  Gene Expression”, Cell, vol. 134, no. 1, pp. 85-96, Jul. 2008.
- [13] D. Thanos and T. Maniatis, “NF-kappa B: a lesson in family values”, Cell, vol. 80, no. 4, pp. 529-532, Feb. 1995.