

# Κατανεμημένοι Υπολογισμοί (*Distributed Computing*)

**Λέξεις-Κλειδιά:** κατανεμημένοι αλγόριθμοι, κινητοί πράκτορες, εξερεύνηση γραφήματος, μαύρη τρύπα.

## 1 Εισαγωγή

Η λύση των προβλημάτων πλοήγησης και αναζήτησης πληροφορίας σε ένα μή-χαρτογραφημένο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας ρομπότ (ή αλλιώς κινητούς πράκτορες) είναι πολύ σημαντική στην περιοχή των κατανεμημένων υπολογισμών. Τέτοια προβλήματα έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών (για μια ανασκόπηση παλιών και νέων αποτελεσμάτωνδες [12]).

Το περιβάλλον στο οποίο αναζητούμε μια πληροφορία, είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί με δύο βασικούς τρόπους. Ο ένας από αυτούς είναι ο χώρος τριών διαστάσεων με εμπόδια που αναπαριστώνται σαν κυρτά πολύγωνα ([4, 5, 1]). Ο άλλος τρόπος είναι η μοντελοποίηση του περιβάλλοντος με ένα γράφημα, θεωρώντας ότι οι κινητοί πράκτορες (*mobile agents*) μπορούν να κινηθούν μόνο πάνω στις ακμές του γραφήματος.

Στην τελευταία περίπτωση το γράφημα συνήθως μοντελοποιεί ένα δίκτυο και οι κινητοί πράκτορες αναπαριστούν συνήθως λογισμικό το οποίο μπορεί να αντιγράψει τον εαυτό του και έτσι να κινείται από κόμβο σε κόμβο (υπολογιστή) του δικτύου (γραφήματος).

Τα συστήματα κινητών πρακτόρων είναι μια αρκετά νέα περιοχή των κατανεμημένων υπολογισμών. Η γενική ιδέα είναι ότι αντί να έχουμε ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των υπολογιστών ενός δικτύου, υπάρχουν προβλήματα που θα μπορούσαν να λυθούν πιο αποδοτικά αν οι υπολογιστές ανταλλάσσαν κάποιο πρόγραμμα το οποίο θα μπορούσε να εκτελεστεί σε έναν υπολογιστή που ίσως βρίσκεται σε περισσότερο πλεονεκτική θέση στο δίκτυο.

Έχει αποδειχθεί σε πλήθος εργασιών ότι η ιδέα των κινητών πρακτόρων έχει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της ανταλλαγής μηνυμάτων σε πολλές εφαρμογές στα δίκτυα όπως είναι για παράδειγμα η διαχείριση συναλλαγών και η ανάκτηση πληροφορίας που είναι κατανεμημένη στο δίκτυο. Από την άλλη πλευρά οι κινητοί πράκτορες εισάγουν νέα προβλήματα που αφορούν την ασφάλεια και πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Τα διάφορα σενάρια εξερεύνησης ενός γραφήματος που έχουν μελετηθεί στη βιβλιογραφία μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στη μία από αυτές κάθε κόμβος του γραφήματος έχει μια μοναδική ετικέτα την οποία οι πράκτορες μπορούν να αναγνωρίσουν ([6, 9, 10]). Η άλλη κατηγορία αφορά *ανώνυμα* γραφήματα των οποίων οι κόμβοι δεν έχουν καθόλου ετικέτες ([2, 3, 14, 18]). Τα κριτήρια αποδοτικότητας των αλγόριθμων εξερεύνησης είναι συνήθως ο χρόνος ολοκλήρωσης της αποστολής (ο οποίος μετριέται με το συνολικό άθροισμα των διελεύσεων των

ακμών που έχουν κάνει οι πράκτορες ([10]), και η μνήμη που απαιτείται να έχει ο κάθε πράκτορας (η οποία μετριέται συνήθως σε *bits* ή με τον αριθμό των καταστάσεων του πεπερασμένου αυτόματου ([8, 15]). Η ελαχιστοποίηση της μνήμης που χρειάζεται ένας πράκτορας για την εξερεύνηση ενός ανώνυμου, μή-κατευθυνόμενου γραφήματος έχει μελετηθεί στα [13, 14, 8, 16, 18].

Ο πρώτος αλγόριθμος που σχεδιάστηκε για την εξερεύνηση ενός γραφήματος από έναν κινητό πράκτορα (πεπερασμένο αυτόματο) προτάθηκε από τον Shannon το 1951 ([19]). Από τότε αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη δυνατότητα εξερεύνησης ενός γραφήματος από έναν ή περισσότερους πράκτορες. Το 1967 κατά τη διάρκεια μιας ομιλίας στο Berkeley, ο Rabin διατύπωσε την εικασία ότι δεν υπάρχει πεπερασμένο αυτόματο που να μπορεί να εξερευνήσει όλα τα γραφήματα αν το αυτόματο έχει στη διάθεσή του έναν πεπερασμένο αριθμό από σημάδια (*pebbles, tokens*) που μπορεί να αφήσει στους κόμβους του γραφήματος [17]. Το πρώτο βήμα στην κατεύθυνση μιας τυπικής απόδειξης της εικασίας του Rabin ήρθε από τον Budach ο οποίος μελέτησε την περίπτωση ενός πράκτορα χωρίς pebbles [14]. Στη συνέχεια οι Blum και Kozen βελτίωσαν το αποτέλεσμα του Budach αποδεικνύοντας ότι τρεις πράκτορες που συνεργάζονται δεν μπορούν να εξερευνήσουν όλα τα γραφήματα [13]. Το 1979 ο Kozen απέδειξε ότι τέσσερις πράκτορες που συνεργάζονται δεν μπορούν να εξερευνήσουν όλα τα γραφήματα [16]. Τελικά το 1980 ο Rollik έδωσε μια πλήρη απόδειξη της εικασίας του Rabin [18]. Πιο συγκεκριμένα, ο Rollik απέδειξε ότι δεν υπάρχει πεπερασμένο σύνολο από πεπερασμένα αυτόματα τα οποία θα μπορούσαν να συνεργαστούν για να εξερευνήσουν ούτε καν όλα τα γραφήματα των οποίων κάθε κορυφή έχει βαθμό 3. Εφόσον ένα πεπερασμένο αυτόματο είναι πιο ισχυρό από ένα σημάδι, η εικασία του Rabin προκύπτει σαν πόρισμα από το θεώρημα του Rollik. Η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων στην εργασία του Rollik ήταν ‘τοπική’, δηλαδή οι πράκτορες ανταλλάσσουν πληροφορίες μόνο όταν συναντούνται σε κόμβους του γραφήματος.

Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των πρακτόρων είναι απαραίτητη για την από κοινού εξερεύνηση ενός γραφήματος. Έτσι ένα σχετικό σημαντικό πρόβλημα είναι το εξής: πώς πρέπει να κινηθούν δύο πράκτορες σε ένα δίκτυο έτσι ώστε να συναντηθούν; Ο αλγόριθμος ή οι αλγόριθμοι που θα πρέπει να ακολουθήσουν οι πράκτορες θα πρέπει να τους οδηγούν σε συνάντηση ανεξάρτητα από τις θέσεις εκκίνησης, το είδος του δικτύου, κλπ.

Το πρόβλημα έχει μελετηθεί σε διάφορα σενάρια. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να σπάσει η συμμετρία με την οποία κινούνται οι πράκτορες όπως να εκτελέσουν έναν πιθανοτικό (*randomized*) αλγόριθμο ή διαφορετικούς ντετερμινιστικούς αλγόριθμους ([20, 21, 22]). Οι Yu και Yung απέδειξαν ότι το πρόβλημα της συνάντησης δεν μπορεί να λυθεί σε ένα γενικό γράφημα αν οι πράκτορες χρησιμοποιούν τον ίδιο ντετερμινιστικό αλγόριθμο [37]. Σε άλλη εργασία οι Baston και Gal χρησιμοποιούν τη σήμανση των σημείων εκκίνησης των πρακτόρων αλλά συνεχίζουν να βασίζονται είτε σε πιθανοτικούς είτε σε διαφορετικούς ντετερμινιστικούς αλγόριθμους για τη λύση του προβλήματος [24].

Η έρευνα έχει εστιάσει στη δύναμη, μνήμη και γνώση που χρειάζονται οι πράκτορες για να συναντηθούν σε ένα γράφημα. Πιο συγκεκριμένα, ποιο είναι το πιο αδύνατο σενάριο στο οποίο η συνάντηση είναι εφικτή; Για παράδειγμα οι Yu και Yung δίνουν διαφορετικές ετικέτες στους πράκτορες [37] ενώ οι Dessmark, Fraigniaud και Pelc έχουν προσθέσει απεριόριστη μνήμη [25]. Σημειώνουμε εδώ ότι η ύπαρξη διαφορετικών ταυτοτήτων για τους πράκτορες, τους επιτρέπει να εκτελούν διαφορετικούς αλγόριθμους. Άλλοι ερευνητές ([23, 29]) έχουν δώσει τη δυνατότητα στους πράκτορες να αφήνουν σημειώσεις σε κάθε κόμβο.

Σε μια άλλη προσέγγιση κάθε πράκτορας έχει ένα σημάδι που μπορεί να αφήσει στην αρχική του θέση. Αυτό το μοντέλο είναι αρκετά πιο περιορισμένο από ότι οι διαφορετικές ταυτότητες ή

η ικανότητα των πρακτόρων να γράφουν σε κάθε κόμβο. Με την κατάλληλη μνήμη, τα σημάδια (*tokens*) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τους πράκτορες για να σπάσουν τη συμμετρία με την οποία κινούνται ([33, 30]).

Προβληματικές ακμές, δηλαδή ακμές που δεν επιτρέπουν τη διέλευση των πρακτόρων ([11]), ελλιπείς πληροφορίες για το περιβάλλον ([7]) και εχθρικοί κόμβοι που καταστρέφουν τους πράκτορες (*μαύρες τρύπες*) είναι σενάρια που έχουν επίσης εξεταστεί στη βιβλιογραφία.

Η προστασία των πρακτόρων από επιθέσεις που εκδηλώνονται στους κόμβους (*hosts*) του γραφήματος είναι τόσο σημαντική όσο και η προστασία ενός κόμβου από επιθέσεις του πράκτορα [35, 36]. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την προστασία των πρακτόρων από τις επιθέσεις των κόμβων (π.χ., [31, 32, 34, 35, 36, 38]). Το θέμα επίσης της γρήγορης ανακάλυψης μιας μαύρης τρύπας έχει μελετηθεί σε πολλά διαφορετικά δίκτυα ([26, 27, 28, 29]).

## 2 Μερικοί συνηθισμένοι ορισμοί

Ο κινητός πράκτορας μοντελοποιείται σαν ένα πεπερασμένο αυτόματο. Η εξερεύνηση ενός δικτύου συνίσταται στην επίσκεψη κάθε κόμβου ή/και ακμής του δικτύου από έναν τουλάχιστον πράκτορα. Σφάλματα στην επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων έχουμε όταν ένας πράκτορας που βρίσκεται σε έναν κόμβο  $v$  στέλνει μηνύματα στους γειτονικούς κόμβους του  $v$  αλλά μόνο ένα ποσοστό αυτών είναι εγγυημένο ότι θα φτάσει στους αποδέκτες. Η μαύρη τρύπα είναι ένας κόμβος που καταστρέφει όποιον πράκτορα την επισκεφτεί χωρίς να αφήσει ίχνη.

## 3 Ανοιχτά προβλήματα - Προτεινόμενη έρευνα

Προτείνουμε την σχεδίαση κατανεμημένων αλγόριθμων ανεκτικών σε σφάλματα επικοινωνίας μεταξύ των πρακτόρων ή/και σφάλματα του δικτύου (π.χ., κομμένες ακμές, εχθρικούς κόμβους, κλπ) για τα παραπάνω προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος είναι η σχεδίαση ντετερμινιστικών αλγόριθμων για ομάδες πρακτόρων για το πρόβλημα της εξερεύνησης γραφημάτων, το πρόβλημα της συνάντησης, κλπ. Οι πράκτορες μπορεί να έχουν περιορισμένες δυνατότητες και λάθος ή ελλιπείς πληροφορίες για το γράφημα.

## Βιβλιογραφία

- [1] E. Bar-Eli, P. Berman, A. Fiat and R. Yan, On-line navigation in a room, *Journal of Algorithms* 17 (1994), 319-341.
- [2] M.A. Bender, A. Fernandez, D. Ron, A. Sahai and S. Vadhan, The power of a pebble: Exploring and mapping directed graphs, *Proc. 30th Ann. Symp. on Theory of Computing* (1998), 269-278.
- [3] M.A. Bender and D. Slonim, The power of team exploration: Two robots can learn unlabeled directed graphs, *Proc. 35th Ann. Symp. on Foundations of Computer Science* (1994), 75-85.
- [4] A. Blum, P. Raghavan and B. Schieber, Navigating in unfamiliar geometric terrain, *SIAM Journal on Computing* 26 (1997), 110-137.

- [5] X. Deng, T. Kameda and C. H. Papadimitriou, How to learn an unknown environment I: the rectilinear case, *Journal of the ACM* 45 (1998), 215-245.
- [6] X. Deng and C. H. Papadimitriou, Exploring an unknown graph, *Journal of Graph Theory* 32 (1999), 265-297.
- [7] A. Dessmark and A. Pelc, Optimal graph exploration without good maps, *Proc. 10th European Symposium on Algorithms (ESA 2002)*, LNCS 2461, 374-386.
- [8] K. Diks, P. Fraigniaud, E. Kranakis, and A. Pelc, Tree exploration with little memory, *Proc. 13th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms (SODA'02)*, 588-597.
- [9] C.A. Duncan, S.G. Kobourov and V.S.A. Kumar, Optimal constrained graph exploration, *Proc. 12th Ann. ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms (2001)*, 807-814.
- [10] P. Panaite and A. Pelc, Exploring unknown undirected graphs, *Journal of Algorithms* 33 (1999), 281-295.
- [11] P. Panaite, A. Pelc, Optimal broadcasting in faulty trees, *Journal of Parallel and Distributed Computing* 60 (2000), 566-584.
- [12] N. S. V. Rao, S. Hareti, W. Shi and S.S. Iyengar, Robot navigation in unknown terrains: Introductory survey of non-heuristic algorithms, *Tech. Report ORNL/TM-12410*, Oak Ridge National Laboratory, July 1993.
- [13] M. Blum and D. Kozen. On the power of the compass (or, why mazes are easier to search than graphs). In *19th Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)*, pages 132-142, 1978.
- [14] L. Budach. Automata and labyrinths. *Math. Nachrichten*, pages 195-282, 1978.
- [15] P. Fraigniaud, and D. Ilcinkas. Digraphs Exploration with Little Memory. *Proc. 21st Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science (STACS)*, LNCS 2996, pages 246-257, 2004.
- [16] D. Kozen. Automata and planar graphs. In *Fund. Computat. Theory (FCT)*, 243-254, 1979.
- [17] M.O. Rabin, Maze threading automata. Seminar talk presented at the University of California at Berkeley, October 1967.
- [18] H.A. Rollik. Automaten in planaren Graphen. *Acta Informatica* 13:287-298, 1980 (also in LNCS 67, pages 266-275, 1979).
- [19] CL. E. Shannon. Presentation of a maze-solving machine. In *8th Conf. of the Josiah Macy Jr. Found. (Cybernetics)*, pages 173-180, 1951.
- [20] S. Alpern, The Rendezvous Search Problem, *SIAM Journal of Control and Optimization*, 33, pp. 673-683, 1995.
- [21] S. Alpern, Rendezvous Search: A Personal Perspective, *Operations Research*, 50, No. 5, pp. 772-795, 2002.

- [22] S. Alpern and S. Gal, *The Theory of Search Games and Rendezvous*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, 2003.
- [23] L. Barriere, P. Flocchini, P. Fraigniaud, and N. Santoro, Election and Rendezvous of Anonymous Mobile Agents in Anonymous Networks with Sense of Direction, *Proceedings of the 9th International Colloquium on Structural Information and Communication Complexity (SIROCCO)*, pp. 17-32, 2003.
- [24] V. Baston and S. Gal, Rendezvous Search When Marks Are Left at the Starting Points, *Naval Research Logistics*, 47, No. 6, pp. 722-731, 2001.
- [25] A. Dessmark, P. Fraigniaud, and A. Pelc, Deterministic Rendezvous in Graphs, 11th Annual European Symposium on Algorithms (ESA), pp. 184-195, 2003.
- [26] S. Dobrev, P. Flocchini, R. Kralovic, G. Prencipe, P. Ruzicka, N. Santoro, Black hole search by mobile agents in hypercubes and related networks, *Proc. of Symposium on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2002)*, 171-182.
- [27] S. Dobrev, P. Flocchini, G. Prencipe, N. Santoro, Mobile agents searching for a black hole in an anonymous ring, *Proc. of 15th International Symposium on Distributed Computing, (DISC 2001)*, 166-179.
- [28] S. Dobrev, P. Flocchini, G. Prencipe, N. Santoro, Searching for a black hole in arbitrary networks: Optimal Mobile Agents Protocols, *Proc. 21st ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC 2002)*, 153-161.
- [29] S. Dobrev, P. Flocchini, G. Prencipe, N. Santoro, Multiple agents rendezvous on a ring in spite of a black hole, *Proc. Symposium on Principles of Distributed Systems (OPODIS 2003)*.
- [30] P. Flocchini, E. Kranakis, D. Krizanc, N. Santoro, and C. Sawchuk, Multiple Mobile Agent Rendezvous in the Ring, *LATIN 2004, LNCS 2976*, pp. 599-608, 2004.
- [31] F. Hohl, Time limited black box security: Protecting mobile agents from malicious hosts, *Proc. Conf. on Mobile Agent Security (1998), LNCS 1419*, 92-113.
- [32] F. Hohl, A framework to protect mobile agents by using reference states, *Proc. 20th Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2000)*, 410-417.
- [33] E. Kranakis, D. Krizanc, N. Santoro, and C. Sawchuk, Mobile Agent Rendezvous Search Problem in the Ring, *International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 592-599, 2003.
- [34] S. Ng, K. Cheung, Protecting mobile agents against malicious hosts by intention of spreading, *Proc. Int. Conf. on Parallel and Distributed Processing and Applications (PDPTA'99)*, 725-729.
- [35] T. Sander, C.F. Tschudin, Protecting mobile agents against malicious hosts, *Proc. Conf. on Mobile Agent Security (1998), LNCS 1419*, 44-60.
- [36] K. Schelderup, J. Ines, Mobile agent security -- issues and directions, *Proc. 6th Int. Conf. on Intelligence and Services in Networks, LNCS 1597 (1999)*, 155-167.

- [37] X. Yu and M. Yung, Agent Rendezvous: A Dynamic Symmetry-Breaking Problem, in Proceedings of ICALP '96, LNCS 1099, pp. 610-621, 1996.
- [38] J. Vitek, G. Castagna, Mobile computations and hostile hosts, in: Mobile Objects, D. Tsichritzis, Ed., University of Geneva, 1999, 241-261.