
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 28

Πολυπρακτορικά Συστήματα

*"There is no such thing as a single agent system".
[Woodriddle, 2002]*

Η παραπάνω ρήση από το βιβλίο του M.Wooldriddle τονίζει, ίσως με περισσή έμφαση, ότι είναι πλέον συχνό φαινόμενο να υλοποιούνται συστήματα τα οποία αποτελούνται από πράκτορες που αλληλεπιδρούν. Το να απαρτίζεται ένα υπολογιστικό σύστημα από αλληλεπιδρώντα υποσυστήματα δεν αποτελεί καινοτομία στο χώρο της επιστήμης υπολογιστών. Εκείνο που είναι πραγματικά νέο είναι ότι η αλληλεπίδραση στα πολυπρακτορικά συστήματα είναι δυναμική και όχι στατικά καθορισμένη, δίνοντας τη δυνατότητα στο σύστημα να συμπεριφερθεί με σωστό τρόπο ακόμη και σε περιπτώσεις που δεν είχαν αρχικά προβλεφθεί. Έτσι η τεχνολογία πρακτόρων αποτελεί ουσιαστικά μια νέα σχολή προγραμματισμού (*agent oriented programming*), με την έννοια ότι ο πράκτορας αποτελεί τη βασική μονάδα αφαίρεσης τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην υλοποίηση του συστήματος. Αν και η δημιουργία *πρακτοροστροφών* (*agent-oriented*) (κατά το αντικειμενοστραφών, *object-oriented*) γλωσσών προγραμματισμού είναι ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, εντούτοις φαίνεται να μπορεί να αποτελέσει ικανοποιητικό εργαλείο για τη διαχείριση της πολυπλοκότητας των συστημάτων λογισμικού.

Η δυναμική φύση της αλληλεπίδρασης των πρακτόρων, καθώς και το γεγονός ότι οι πράκτορες αποτελούν αυτόνομες οντότητες, εγείρει μια σειρά αρκετά δύσκολων θεμάτων που αφορούν την υλοποίηση πολυπρακτορικών συστημάτων. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στις τεχνικές και τα πρωτόκολλα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η εξαντλητική παράθεση των τεχνικών που έχουν προταθεί ξεφεύγει από τα όρια και τους στόχους του παρόντος βιβλίου, καθώς τα πολυπρακτορικά συστήματα αποτελούν τρέχουσα ερευνητική περιοχή με μεγάλο ενδιαφέρον και πληθώρα νέων αποτελεσμάτων.

28.1 Βασικές Έννοιες

Ένα *πολυπρακτορικό σύστημα* (*multi-agent system*) είναι ένα σύστημα που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ως ένα σύνολο πρακτόρων που αλληλεπιδρούν δηλαδή συνεργάζονται, συντονίζονται, διαπραγματεύονται, κτλ. Τα πολυπρακτορικά συστήματα μαζί με την κατανεμημένη επίλυση προβλημάτων (*distributed problem solving*) αποτελούν τους βασικούς τομείς της *κατανεμημένης ΤΝ*, (*distributed artificial intelligence*). Η κατανεμημένη επίλυση προβλημάτων ασχολείται με το πώς ένα συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί από έναν αριθμό επεξεργαστικών μονάδων που συνεργάζονται διαμοιράζοντας γνώση για το πρόβλημα καθώς και τις επιμέρους λύσεις. Τα πολυπρακτορικά συστήματα είναι ουσιαστικά ένα δίκτυο από "χαλαρά συνδεδεμένους" πράκτορες που δρουν μαζί για να επιλύσουν προβλήματα που είναι πέρα των δυνατοτήτων και της γνώσης ενός μόνο πράκτορα. Αν και σε πρώτη ματιά θα φαινόταν ότι δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο περιοχών εντούτοις η συνεργασία στα πολυπρακτορικά συστήματα είναι δυναμική με την έννοια ότι οι οντότητες που αλληλεπιδρούν είναι αυτόνομες, άρα αποφασίζουν για το πότε και πώς θα συνεργαστούν. Έτσι ένα πολυπρακτορικό σύστημα μπορεί να έχει σαν στόχους:

- Την επίλυση προβλημάτων που είναι πολύ πολύπλοκα για να επιλυθούν αποδοτικά από ένα μόνο πράκτορα.
- Την επίλυση προβλημάτων τα οποία είναι από τη φύση τους κατανεμημένα, όπως για παράδειγμα προβλήματα στα οποία απαιτείται συλλογή πληροφοριών από κατανεμημένες πηγές, όπως δίκτυα αισθητήρων, κατανεμημένες βάσεις πληροφοριών, έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας, κτλ.
- Την επίλυση προβλημάτων στα οποία η εμπειρογνομοσύνη είναι κατανεμημένη, όπως για παράδειγμα ροή εργασιών σε κάποιο περιβάλλον εργασίας, κτλ.
- Τη διασύνδεση και λειτουργία ήδη υπαρχόντων συστημάτων (*legacy systems*) έτσι ώστε να είναι εύκολη η εκμετάλλευσή τους χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις (*mediator systems*).

Στα πολυπρακτορικά συστήματα οι πράκτορες είτε εργάζονται αυτόνομα ανταλλάσσοντας πληροφορίες ή/και υπηρεσίες και προσπαθούν να επιτύχουν τους δικούς τους ανεξάρτητους στόχους, ή συνεργάζονται επιλύοντας υποπροβλήματα έτσι ώστε ο συνδυασμός των επιμέρους λύσεων που θα προκύψουν να αποτελέσει την τελική λύση. Στη γενική περίπτωση, τα περιβάλλοντα της κατηγορίας είναι ανοικτά, δεν υπάρχει ένας κεντρικός σχεδιασμός του όλου συστήματος, οι πράκτορες που δρουν σε αυτά είναι δυνατό να συνεργάζονται ή να διαπραγματεύονται την επίτευξη των προσωπικών τους στόχων και παρέχουν στους πράκτορες δυνατότητα επικοινωνίας.

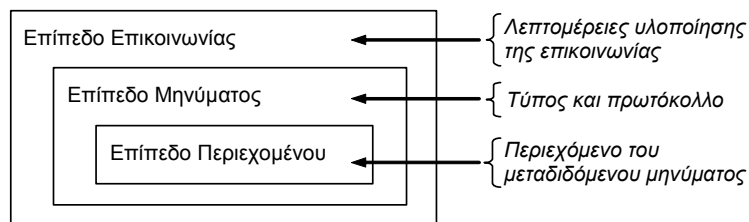
Κύριο χαρακτηριστικό των συνεργαζόμενων πρακτόρων είναι η δυνατότητα *συντονισμού* (*coordination*) μέσω κάποιας γλώσσας επικοινωνίας, έτσι ώστε να φτάσουν σε κοινά αποδεκτές συμφωνίες και να επιλύσουν ενδεχόμενες συγκρούσεις οι οποίες προκύπτουν από την επίτευξη των επιμέρους στόχων τους. Ίσως ο πλέον περιεκτικός ορισμός του τι είναι συντονισμός δίνεται από τους Huhns και Stephens: "*ο συντονισμός είναι η ιδιότητα ενός συστήματος πρακτόρων να φέρουν εις πέρας ενέργειες μέσα σε ένα κοινό περιβάλλον*". Οι πράκτορες μπορεί να συντονίζουν τη δράση τους είτε για να επιτύχουν έναν κοινό στόχο (*συνεργασία-cooperation*) ή για να επι-

μήνυμα βάσει του πρωτοκόλλου. Έτσι αν για παράδειγμα ο τύπος του μηνύματος είναι ερώτηση τότε ο πράκτορας "γνωρίζει" ότι πρέπει να αντιδράσει δίνοντας κάποιου είδους απάντηση.

28.2.1 Η Γλώσσα Επικοινωνίας KQML

Η KQML (*Knowledge and Query Manipulation Language*), αποτελεί ταυτόχρονα πρωτόκολλο και μια γλώσσα επικοινωνίας μεταξύ πρακτόρων. Η γλώσσα συγκέντρωσε το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και αποτελεί μια από τις κύριες γλώσσες επικοινωνίας πρακτόρων (ACL, Agent Communication Languages) με αρκετές εφαρμογές. Στην KQML ορίζονται τρία διαφορετικά επίπεδα (Σχήμα 28.3):

- Το *επίπεδο περιεχομένου (content layer)*, το οποίο αφορά το περιεχόμενο του μεταδιδόμενου μηνύματος. Αυτό καθορίζεται από την αντίστοιχη εφαρμογή και μπορεί να είναι οτιδήποτε.
- Το *επίπεδο μηνύματος (message layer)*, το οποίο είναι ο πυρήνας της γλώσσας. Στο επίπεδο αυτό καθορίζεται ο *τύπος* του μηνύματος, με κάποια από τις διαθέσιμες δηλώσεις (*performative*) από το σύνολο που έχει καθοριστεί για τη γλώσσα (tell, ask, reply, inform, advertise, κτλ) καθώς και το *πρωτόκολλο (protocol)*, δηλαδή ο τρόπος μετάδοσης και λήψης των μηνυμάτων, όπως για παράδειγμα σύγχρονος, ασύγχρονος, κτλ.
- Το *επίπεδο επικοινωνίας (communication layer)*, στο οποίο καθορίζονται οι χαμηλού επιπέδου λεπτομέρειες υλοποίησης της επικοινωνίας.



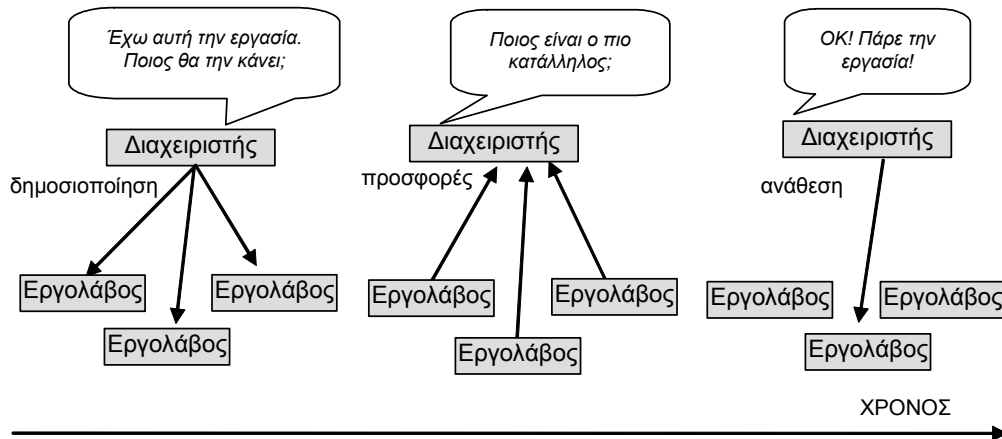
Σχήμα 28.3: Επίπεδα του πρωτοκόλλου KQML.

Τα μηνύματα στην KQML έχουν την ακόλουθη μορφή:

```
(<performative>
  :sender <ο αποστολέας>
  :receiver <ο παραλήπτης>
  :language <η γλώσσα στην οποία έχει κωδικοποιηθεί το περιεχόμενο>
  :ontology <η οντολογία είναι το λεξιλόγιο το οποίο πρέπει
             να χρησιμοποιηθεί για να γίνει κατανοητό το μήνυμα>
  :content <το περιεχόμενο του μηνύματος>
)
```

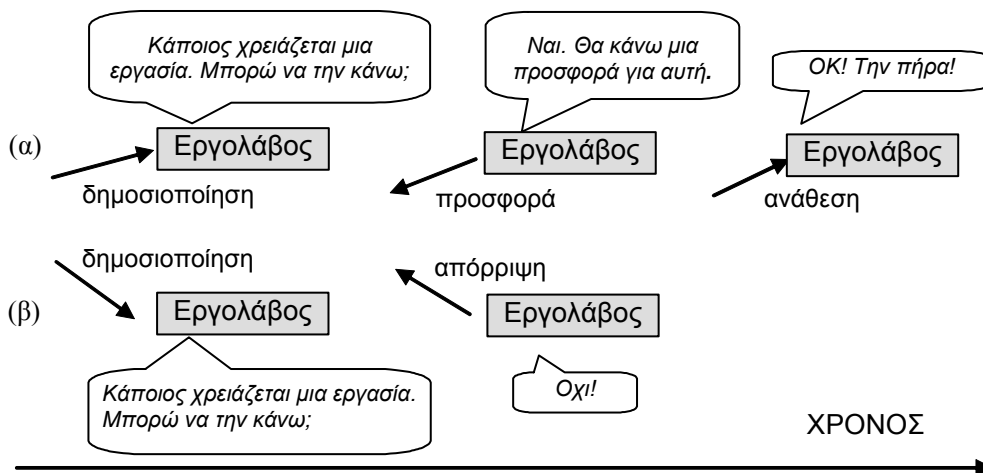
Για παράδειγμα, το μήνυμα που ακολουθεί είναι μια ερώτηση για την τιμή της μετοχής της εταιρίας IBM στο χρηματιστήριο. Ο πράκτορας που ρωτά ονομάζεται **stock-client** εκείνος που απαντά **stock-server**, η γλώσσα στην οποία είναι κωδικο-

- το ρόλο του *διαχειριστή (manager)*, ο οποίος χωρίζει το πρόβλημα σε υποπρόβλημα και αναλαμβάνει να τα αναθέσει στους εργολάβους (*contractors*), καθώς και να επιβλέπει την πορεία της λύσης, ή
- το ρόλο του *εργολάβου (contractor)*, ο οποίος αναλαμβάνει να λύσει ένα υποπρόβλημα. Οι εργολάβοι μπορούν να χωρίσουν το υποπρόβλημα που έχουν αναλάβει σε περισσότερα υποπρόβλημα και με τη σειρά τους να το αναθέσουν σε άλλους πράκτορες.



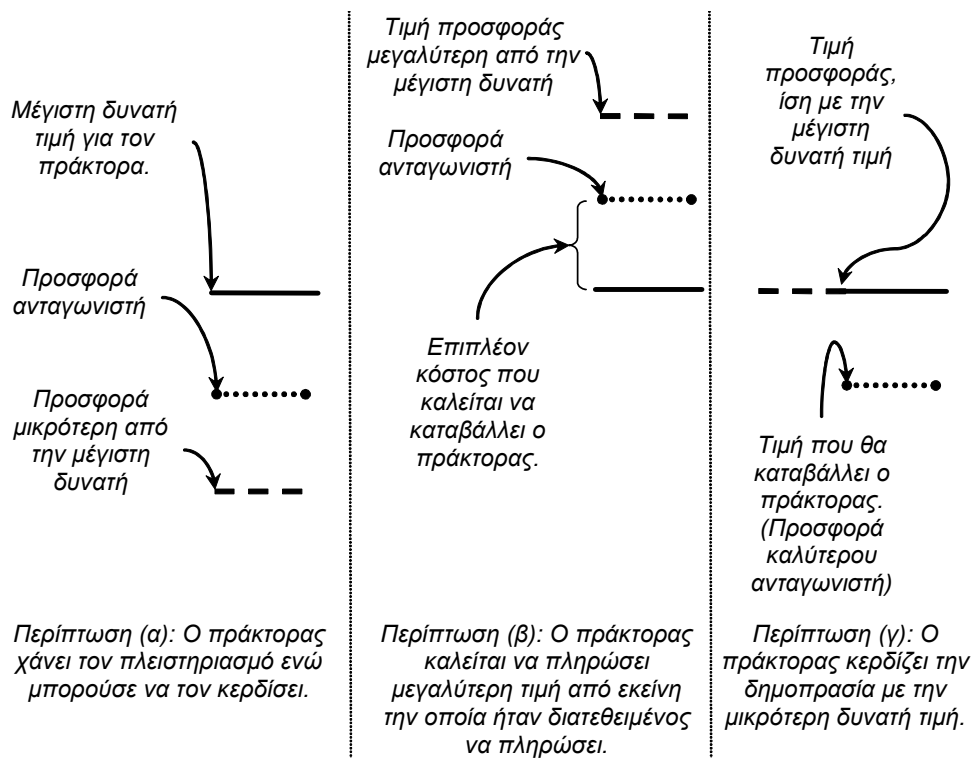
Σχήμα 28.10: Ανάθεση προβλημάτων από την πλευρά του διαχειριστή.

Η διαδικασία ανάθεσης των υποπροβλημάτων περιλαμβάνει τη *δημοσιοποίηση* τους (*announcement*) από το διαχειριστή σε όλους ή σε μερικούς από τους πράκτορες. Οι αποδέκτες των δημοσιοποιήσεων αξιολογούν αν είναι ικανοί να αναλάβουν τη λύση του υποπροβλήματος και στέλνουν αντίστοιχα *προσφορές (bids)* ή *απορρίψεις (declination)* στο διαχειριστή (Σχήμα 28.11). Τέλος ο διαχειριστής αφού συλλέξει τις προσφορές (*bids*) από τους υποψήφιους εργολάβους τις αξιολογεί και κάνει τις κατάλληλες *αναθέσεις (awards)*.



Σχήμα 28.11: Αποδοχή (α) και απόρριψη (β) μιας δημοσιοποίησης από ένα πράκτορα.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το παραπάνω έστω ότι ο πράκτορας προσφέρει μια τιμή μικρότερη από τη μέγιστη δυνατή τιμή του. Τότε διακινδυνεύει να χάσει τον πλειστηριασμό από κάποιον άλλο πράκτορα ο οποίος θα δώσει μεγαλύτερη προσφορά, ενώ ίσως θα μπορούσε να την κερδίσει δίνοντας την πραγματική του προσφορά (Σχήμα 28.13, περίπτωση (α)). Στην αντίθετη περίπτωση αν δώσει μια αρκετά μεγαλύτερη τιμή για να αυξήσει την πιθανότητα να κερδίσει, κινδυνεύει να βρεθεί στη δυσάρεστη θέση να καταβάλλει τίμημα μεγαλύτερο από εκείνο που ήταν διατεθειμένος να διαθέσει (Σχήμα 28.13, περίπτωση (β)). Αν προσφέρει τη μέγιστη δυνατή του τιμή τότε από τη μια μεγιστοποιεί τις πιθανότητες να κερδίσει τον πλειστηριασμό και από την άλλη δε, ρισκάρει να καταβάλλει μεγαλύτερο τίμημα από εκείνο που η αγορά κρίνει ότι αξίζει το αγαθό, καθώς θα καταβάλλει την τιμή της δεύτερης μεγαλύτερης προσφοράς (Σχήμα 28.13, περίπτωση (γ)).



Σχήμα 28.13 Περιπτώσεις προφορών στους πλειστηριασμούς Vickrey.

Αν και οι πλειστηριασμοί δεν είναι τόσο συχνοί στην καθημερινή ζωή, εντούτοις αποτελούν ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης σε πολυπρακτορικά συστήματα. Το γεγονός οφείλεται στο ότι είναι πρωτόκολλα σχετικά απλά στην υλοποίησή τους και μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος περιπτώσεων, όπως για κατανομή πόρων, διάθεση αγαθών, κτλ.

28.4 Εφαρμογές

Τα συστήματα πρακτόρων περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αν και η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε