

Κεφάλαιο 15

Τεχνητή Νοημοσύνη

15.1 Εισαγωγή

Ο όρος “τεχνητή νοημοσύνη” (TN) αναφέρεται στον κλάδο εκείνο της πληροφορικής που ασχολείται με την ανάπτυξη ευφύων συστημάτων. Ο όρος αποδίδεται στον John McCarthy ο οποίος τον εισήγαγε για πρώτη φορά το 1956 στη διάσκεψη του Dartmouth. Ως ευφυή συστήματα θεωρούμε τα υπολογιστικά εκείνα συστήματα που σκέφτονται και ενεργούν όπως ο άνθρωπος. Η TN εφάπτεται πολλών επιστημών πέραν αυτής πληροφορικής όπως της ψυχολογίας, της φιλοσοφίας, της γλωσσολογίας, της λογικής κ.λπ. Ένα από τα βασικά ερωτήματα των επιστημόνων είναι το κατά πόσον είναι εφικτή η TN. Ο Alan Turing το 1950 πρότεινε μία δοκιμασία (ένα test) που εξετάζει την ικανότητα μιας μηχανής να επιδεικνύει ευφυή συμπεριφορά που ισοδυναμεί με αυτή ενός ανθρώπου. Για να περάσει αυτή τη δοκιμασία ένας υπολογιστής θα πρέπει να έχει διάφορες ικανότητες όπως επεξεργασία φυσικής γλώσσας, αναπαράσταση γνώσης, μηχανική όραση κ.λπ.

Ένα κλασσικό παράδειγμα της δοκιμασίας Turing είναι το εξής: Έχουμε δύο δωμάτια που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, δύο ανθρώπους και έναν υπολογιστή. Ο ένας άνθρωπος τοποθετείται στο πρώτο δωμάτιο ενώ ο άλλος στο δεύτερο μαζί με τον υπολογιστή. Ο άνθρωπος στο δεύτερο δωμάτιο ή ο υπολογιστής (η επιλογή είναι τυχαία) απαντούν σε μία ερώτηση. Οι απαντήσεις αποστέλλονται στον άνθρωπο του πρώτου δωματίου με γραπτό κείμενο κάθε φορά. Ο άνθρωπος αυτός πρέπει από την απάντηση που λαμβάνει να αποφασίσει αν αυτή έχει δοθεί από τον Η/Υ ή από τον άνθρωπο. Η δοκιμασία δεν εξετάζει αν οι απαντήσεις είναι ορθές αλλά αν προέρχονται από άνθρωπο ή Η/Υ. Αν από τις απαντήσεις δεν είναι δυνατό να διευκρινιστεί ποιά απάντηση δόθηκε από τον Η/Υ και ποια από τον άνθρωπο, τότε ο άνθρωπος και ο Η/Υ έχουν παρόμοια ευφυία.

15.2 Ιστορικά Στοιχεία

Οι απαρχές της τεχνητής νοημοσύνης ανάγονται στην αρχαιότητα:

- 550 π.Χ. Πυθαγόρας: Όλα τα υπαρκτά αντικείμενα μπορούν να αναχθούν σε αριθμητικές

σχέσεις.

- 400 π.Χ. Πλάτωνας: Η διαλεκτική ως δρόμος για την καθαρή γνώση. Αναζήτηση μεθόδων εύρεσης της γνώσης και της αλήθειας.
- 384-322 π.Χ. Αριστοτέλης: Οι “συλλογισμοί του” παρείχαν πρότυπα εκφράσεων που έδιναν πάντα σωστά συμπεράσματα από σωστές υποθέσεις (Αριστοτέλεια συλλογιστική). Αρχές της λογικής.
- 1630 μ.Χ. Καρτέσιος: Ο πρώτος μοντέρνος ορθολογιστής.
- 1640 μ.Χ. Hobbes: Η σοφία ως προϊόν λογικής.
- 1840 μ.Χ. Boole: Συσχετισμός μεταξύ αλγεβρικών και λογικών πράξεων.
- 1930 μ.Χ. Goedel: Απόδειξη του θεωρήματος της μη-πληρότητας Υπάρχουν αλήθειες που δεν μπορούν αποδεικνύονται.
- 1935 μ.Χ. Church και Turing: Ανάπτυξη της έννοιας της αποτελεσματικής διαδικασίας. Αναγωγή κάθε τυπικής συμβολικής επεξεργασίας σε απλές μηχανικές πράξεις.
- 1949 μ.Χ. Ο Shannon έθεσε τις βάσεις για τον προγραμματισμό του παιζίματος σκακιού.
- 1956 μ.Χ. Ο John McCarthy εισήγαγε τον όρο TN (Artificial Intelligence). 1950-μέσα 1970μ.Χ. Πρώτη φάση της TN (συμβολική/κλασσική TN). Κάποιες σημαντικές και επιτυχίες της TN αφορούσαν στη:
 - (i) Μηχανική μετάφραση (language translation) τεχνικών κειμένων.
 - (ii) Επίλυση προβλημάτων (problem solving) πχ. (i) Logic Theorist (Newell, Shaw και Simon, 1957) το οποίο αποδεικνύει θεωρήματα της λογικής και μάλιστα – κάποιες φορές – μέσω συντομότερων αποδείξεων από τις υπάρχουσες. (ii) General Problem Solver (Newell και Simon, 1972) το οποίο χρησιμοποιεί γενικές ευριστικές μεθόδους (heuristics) και εμπειρικούς κανόνες (rules of thumb) προκειμένου να επιλύσει προβλήματα.
 - (iii) Αναγνώριση προτύπων (pattern recognition) πχ. κατανόηση κώδικα Morse ή αναγνώριση του γράμματος "A" σε χειρόγραφο κείμενο.
- 1959 μ.Χ. Ο McCarthy ανέπτυξε τη γλώσσα λογικού προγραμματισμού LISP.
- 1965 μ.Χ. Ο Robinson ανέπτυξε τη γλώσσα λογικού προγραμματισμού PROLOG.
- 1972 μ.Χ. Ο Winograd εισήγαγε ένα σύστημα αναγνώρισης τεχνητού μικρόκοσμου κύβων (blocks world).
- Μέσα 1970-μέσα 1980 μ.Χ. Δεύτερη φάση της TN. Η TN επεκτείνεται και σε εμπορικές εφαρμογές πέρα από τις ερευνητικές). Δόθηκε έμφαση στην αναπαράσταση γνώσης και στη δημιουργία αποδοτικών τεχνικών.

- Μέσα 1980-σήμερα: Τρίτη φάση της ΤΝ. Πειράματα και εφαρμογές, οι οποίες δίνουν απαντήσεις σε δύσκολα προβλήματα. Δημιουργούνται παρακλάδια της ΤΝ, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, η ασαφής λογική, τα έμπειρα συστήματα και οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι κοινωνίες μυρμηγκιών κ.λπ.

15.3 Η Τεχνητή νοημοσύνη σήμερα

Επιτυχίες της ΤΝ περιλαμβάνουν:

- Σε θέματα καθημερινής γνώσης
 - Αντίληψη, πχ. όραση (ανάλυση και κατηγοριοποίηση οπτικών δεδομένων, επεξεργασία εικόνων), ομιλία (κατανόηση απλής γλώσσας, απάντηση σε απλές ερωτήσεις, συνομιλία, δυνατότητα άντλησης πληροφοριών από φυσική γλώσσα). Σημειώνεται ότι αυτά επιτυγχάνονται για καλά καθορισμένα και πολύ περιορισμένα περιβάλλοντα (περιορισμοί στον χώρο του προβλήματος).
 - Ρομποτική, πχ. κίνηση και δράση στο περιβάλλον, αλληλεπίδραση στα ερεθίσματα του περιβάλλοντος, χειρισμός αντικειμένων.
 - Οργάνωση δράσης ώστε να επιτευχθεί ένας σκοπός.
 - Σύθεση πρωτότυπων καλλιτεχνικών δημιουργημάτων (ποιημάτων, μελωδιών, ζωγραφικής).
 - Εκμάθηση μέσα από παραδείγματα καθώς και μέσα από λάθη, με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης.
- Σε θέματα έμπειρης γνώσης
 - Επίλυση δύσκολων προβλημάτων μαθηματικών και λογικής (λόγω της ταχύτητάς τους σε αριθμητικές πράξεις και της μεγάλης και ακριβούς μνήμης τους), πχ. ολοκληρώματα, εύρεση ριζών.
 - Απόδειξη θεωρημάτων των μαθηματικών και της λογικής (πχ. απόδειξη χρωματισμού χαρτών).
 - Ικανότητα νίκης με αντιπάλους ανθρώπους/πρωταθλητές σε ευρύ πεδίο πνευματικών παιχνιδιών (πχ. σκάκι).
 - Εφαρμογή έμπειρων αποφάσεων, πχ. διάγνωση ασθενειών (διαγνωστική ιατρική), ανάλυση και κατασκευή πολύπλοκων κυκλωμάτων, αυτόματος έλεγχο πολύπλοκων βιομηχανικών συστημάτων, παροχή συμβουλών (ειδικά σε μεγάλες βάσεις δεδομένων), δημιουργία νέων προϊόντων από συνδυασμούς υπαρχόντων, διάγνωση μηχανικών βλαβών (συλλογή γνώσης πολλών ειδικών).
- Σε άλλα θέματα
 - Έλεγχος ορθογραφίας/γραμματικής/σύνταξης κειμένων.

- Τηλε-εκπαίδευση, προσαρμοζόμενη σε μεταβαλλόμενα επίπεδα γνώσης.
- Εκτέλεση δύσκολων/βαρετών/επικίνδυνων λειτουργιών.
- Διευκόλυνση ανθρώπου σε καθημερινές λειτουργίες (πχ. μαγείρεμα, έλεγχος ποιότητας).

Τι δεν μπορούν να κάνουν οι υπολογιστές (μέχρι σήμερα):

- Να περπατήσουν στο πάρκο και να περιγράψουν τι βλέπουν.
- Να ετοιμάσουν ένα απλό γεύμα στην κουζίνα.
- Να παίξουν ατομικά παιχνίδια, πχ. τέννις.
- Να παίξουν ομαδικά παιχνίδια, πχ. ποδόσφαιρο.
- Να κάνουν τους κηπουρούς.
- Να κυνηγήσουν έναν λαγό όπως ένας σκύλος.
- Να συζητήσουν χωρίς περιορισμούς για ένα θέμα.
- Να κατανοήσουν ένα έργο ή μια εκπομπή στην τηλεόραση.
- Να ζωγραφίσουν μία εικόνα ή μια απλή σκηνή που τους περιγράφεται.
- Να οδηγήσουν ένα αυτοκίνητο.
- Να καταλάβουν ένα ανέκδοτο.

15.4 Αναπαράσταση Προβλήματος

Η υλοποίηση ενός προβλήματος σε σύστημα Η/Υ που επιδεικνύει ΤΝ προωθεί:

- Τη σκέψη, ειδικότερα τον τρόπο κατάλληλης περιγραφής των δεδομένων του προβλήματος (αναπαράστασης δεδομένων) καθώς και τον τρόπο συνδυασμού διάφορων πράξεων (μετασχηματισμού δεδομένων), έτσι ώστε να επιτευχθεί η ορθή καθώς και οικονομική επίλυση του προβλήματος.
- Την ακρίβεια στη σκέψη. Διανοητικά λάθη και παραλείψεις όσον αφορά στην αναπαράσταση καθώς και στον χειρισμό αποκαλύπτονται.
- Την ποσοτικοποίηση των απαιτήσεων μνήμης και πράξεων. Με την επιτυχή λειτουργία της υλοποίησης τίθενται ανώτερα όρια σε αυτές τις απαιτήσεις.
- Την διακρίβωση των απαραίτητων στοιχείων για την επίλυση. Με την αφαίρεση τμήματος των δεδομένων ελέγχεται εφόσον αυτά αποτελούν απαραίτητα στοιχεία γνώσης.

15.4.1 Συμβολική αναπαράσταση

Κάθε αριθμός ή κομμάτι δεδομένων αναπαριστάται στον H/Y με δυαδικό τρόπο. Ο χειρισμός των δεδομένων πραγματοποιείται σε αυτή τη μορφή, και η αποθήκευσή τους γίνεται σε καθορισμένες θέσεις μνήμης του H/Y. Σημειώνεται ότι ο H/Y είναι ιδιαίτερα ισχυρός (ακριβής και ταχύς) σε αριθμητικές και λογικές πράξεις. Στα προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων, συνήθως εκτελείται περιγραφή των δεδομένων με ανάθεση σε μεταβλητές του προγράμματος, δηλαδή μέσω της χρήσης συμβόλων τα οποία λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές από τη μνήμη ή/και μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του προγράμματος. Η συμβολική αυτή αναπαράσταση των δεδομένων της μνήμης επεκτείνεται στην TN με τη χρήση συμβόλων και συμβολικών δομών για την κωδικοποίηση των δεδομένων, των αρχικών συνθηκών καθώς και των περιορισμών του προβλήματος στον H/Y, με σκοπό να προγραμματιστεί η επίλυσή του προβλήματος με τεχνικές TN. Τα σύμβολα ορίζονται από τον προγραμματιστή της μεθόδου TN στον H/Y έτσι ώστε η αναπαράσταση του προβλήματος στις συμβολικές δομές (καταστάσεις) να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Γενικότητα και πληρότητα, δηλαδή να επιτρέπει την επίλυση όλων των παραδειγμάτων του προβλήματος με την ίδια τεχνική, ανεξαρτήτως μεγέθους προβλήματος.
- Απλότητα και αφαίρεση, ώστε να αναδεικνύει τα σημαντικά χαρακτηριστικά του προβλήματος και να αποκρύπτει τα μη σημαντικά. Έτσι, πλήθος καταστάσεων το οποίο εκφράζεται από τα ίδια σημαντικά χαρακτηριστικά αναπαριστάται από την ίδια συμβολική δομή (οικονομία χώρου και χρόνου επεξεργασίας, π.χ. για ενημέρωση καταστάσεων).

Έτσι η αναπαράσταση είναι κρίσιμη προκειμένου να αναδειχθούν τα στοιχεία τα οποία αποτελούν τα κλειδιά για την επίλυση του προβλήματος, ενώ αντίθετα να κρυφτούν/παραλειφθούν αυτά τα οποία δεν έχουν σχέση με την επίλυση. Και τα δύο προωθούν τον καλό ορισμό του χώρου του προβλήματος. Κατά την υλοποίηση της μεθόδου TN εκτελείται τυπική διαχείριση συμβόλων. Έτσι, ενώ η έννοια των συμβόλων αποδίδεται κατά την έκφραση/περιγραφή του προς επίλυση προβλήματος, τα σύμβολα δεν έχουν έννοια οπότε η επίλυση και τα ενδιαμέσα εξαγόμενα συμπεράσματα ανάγονται στον χειρισμό των συμβόλων που αναπαριστούν το πρόβλημα.

15.4.2 Επιλογή Συμβολικής Αναπαράστασης

Η επιλογή της αναπαράστασης στον H/Y, δηλαδή η επιλογή συμβόλων και συμβολικών δομών για την κωδικοποίηση του προβλήματος (επιθυμητής λύσης, δεδομένων και περιορισμών) στο πρόγραμμα με τεχνικές TN καθορίζει σε ένα μεγάλο βαθμό όχι μόνο τον τρόπο επίλυσης αλλά και την αποδοτικότητα (ταχύτητα, οικονομία μνήμης και ποσοστό επιτυχίας) της.

Ένα παράδειγμα της σημασίας της αναπαράστασης παρουσιάζεται στον τομέα της αναγνώρισης προτύπων, συγκεκριμένα στο πρόβλημα αναγνώρισης χαρακτήρων (optical character recognition) και ιδιαίτερα στο πρόβλημα του εάν οι εισαγόμενοι χαρακτήρες κατατάσσονται σε ένα από τα 10 ψηφία (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

15.4.3 Χειρισμός Συμβολικής Αναπαράστασης Λογική

Τα δεδομένα καθώς και η γνώση ενός προβλήματος απαρτίζουν γεγονότα (facts), δηλαδή το τι ισχύει και τι όχι στον χώρο του προβλήματος. Τα γεγονότα εκφράζονται μέσω δηλωτικών προτάσεων (declarative sentences) και αναπαριστώνται μέσω μεταβλητών. Για παράδειγμα, το γεγονός ότι η θερμοκρασία έξω είναι 0ο εκφράζεται μέσω της δηλωτικής πρότασης "Κάνει κρύο" και αναπαριστάται μέσω της μεταβλητής ΚΡΥΟ ή - απλούστερα - ως x . Καθότι η αναπαράσταση στον Η/Υ πραγματοποιείται σε δυαδική μορφή (1 για αληθές γεγονός, 0 για ψευδές γεγονός), χρησιμοποιείται η δυαδική λογική (Boolean) για την αναπαράσταση και τον χειρισμό των γεγονότων, προτάσεων και αντίστοιχων μεταβλητών. Έτσι η μεταβλητή x λαμβάνει τιμή 1 ή 0 ανάλογα με την απάντηση ψευδές ή αληθές, αντίστοιχα, στο ερώτημα "Είναι αλήθεια ότι x "; Για παράδειγμα, για θερμοκρασία έξω -10ο η μεταβλητή x παίρνει την τιμή 1, ενώ για θερμοκρασία έξω +40ο η μεταβλητή x παίρνει την τιμή 0. Τα γεγονότα (και οι αντίστοιχες προτάσεις και μεταβλητές) είναι δυνατόν να συνδυαστούν. Οι συνδυασμοί γεγονότων αποτελούν εκφράσεις. Η λογική (Hodges, 1977) αποτελεί τη μελέτη συνεπών συνόλων γεγονότων ή συνδυασμών τους (δηλαδή εκφράσεων). Επικεντρώνεται στην αλήθεια και την συμπερασματική διαδικασία (inference), με άλλα λόγια στην εύρεση των προϋποθέσεων (τιμές 1 ή 0 των γεγονότων) κάτω από τις οποίες ένα σύνολο γεγονότων ή μία έκφραση είναι αληθή.

Προτασιακή λογική (propositional logic)

Είναι η λογική την οποία χρησιμοποιούν οι Η/Υ. Δεδομένης μίας έκφρασης (ως συνδυασμός δεδομένων), εξάγεται ένα αποτέλεσμα το οποίο εκφράζει την αληθή/ψευδή κατάσταση της έκφρασης (1 για αληθή κατάσταση, 0 για ψευδή κατάσταση). Ο πίνακας αληθείας είναι το σύνηθες εργαλείο προκειμένου να εξαχθεί η αλήθεια ή όχι μίας έκφρασης: ο συνδυασμός τιμών των εμπλεκόμενων λογικών μεταβλητών εφαρμόζεται εξαντλητικά και η εφαρμογή των τελεστών της έκφρασης για κάθε συνδυασμό δημιουργεί ένα αληθές ή ψευδές αποτέλεσμα. Για τον συνδυασμό περισσότερων από δύο λογικών μεταβλητών χρησιμοποιούνται παρενθέσεις, οι οποίες καθορίζουν την προτεραιότητα εφαρμογής των λογικών πράξεων. Σημειώνεται ότι αν δεν χρησιμοποιηθούν παρενθέσεις μεγαλύτερη προτεραιότητα έχει ο τελεστής \neg μετά οι τελεστές \vee και \wedge , και τέλος οι τελεστές \rightarrow και \leftrightarrow . Έτσι, η προτασιακή λογική επιτρέπει την εύκολη και σαφή έκφραση σχέσεων λογικών μεταβλητών, όπου το αποτέλεσμα ανάγεται πάντα σε μία ακολουθία τελεστών \neg , \vee και \wedge (βασική μορφή συνδυασμού λογικών μεταβλητών). Είναι λοιπόν προτιμότερη η χρήση κάποιας συμπερασματικής διαδικασίας προκειμένου να επαληθευτεί ή να απορριφθεί το συμπέρασμα. Για παράδειγμα, η απαγωγή σε άτοπο υποθέτει ότι δεν ισχύει το συμπέρασμα $\neg(p \wedge q)$, άρα ότι ισχύει η έκφραση $p \wedge q$. Τότε όμως η έκφραση $(\neg p \vee r) \wedge (\neg p \vee t)$ ικανοποιείται μόνο εάν η έκφραση $r \wedge t$ είναι αληθής. Σε αυτή την περίπτωση όμως, το δεύτερο μέλος (άρα και ολόκληρη η έκφραση) $(\neg s \vee \neg q) \wedge (\neg t \vee \neg q)$ δεν ικανοποιείται, άρα και οι δύο εκφράσεις των γεγονότων του προβλήματος είναι αναγκαστικά ψευδείς. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει, οπότε συμπεραίνεται ότι το συμπέρασμα είναι αληθές.

Κατηγορηματική λογική (predicate logic)

Το ότι εκφράσεις της μορφής “Ο Γιώργος είναι άνθρωπος”, “Η γάτα έχει τέσσερα πόδια”, “Η Ελένη αγαπά το παγωτό” και “Η Ελένη τρώει το παγωτό” ή “Η Ελένη έφαγε τρία παγωτά” αναπαριστώνται στην προτασιακή λογική μόνο ως αδιαίρετες έννοιες συνεπάγεται ότι προτάσεις οι οποίες είναι φανερό ότι είναι ασύμβατες δεν μπορούν να ανιχνευτούν ως τέτοιες, πχ. οι εκφράσεις “Κάνει κρύο” και “Κάνει ζέστη”. Επίσης εκφράσεις της μορφής “Όλοι οι άνθρωποι έχουν δύο πόδια” μπορούν να εκφραστούν μόνο ως σύνολο προτάσεων που αφορούν σε κάθε μεταβλητή-άνθρωπο του χώρου του προβλήματος ξεχωριστά, πχ. “Ο Γιώργος έχει δύο πόδια”, “Η Ελένη έχει δύο πόδια” κλπ. Η κατηγορική λογική επιτρέπει την πιο δομημένη και κατανεμημένη έκφραση γεγονότων (ακόμη και αρκετά περίπλοκων) καθώς και την (συμπερασματική) παραγωγή νέων γεγονότων που απορρέουν από υπάρχοντα γεγονότα. Για το σκοπό αυτό έχει καλά ορισμένη σύνταξη και συγκεκριμένους κανόνες παραγωγής. Η σύνταξη εκφράσεων της κατηγορικής λογικής στηρίζεται στους όρους και τα κατηγορήματα.

- Ο όρος (term) αποτελεί είτε μία σταθερά (αδιάσπαστο γεγονός του χώρου του προβλήματος, object), είτε μία μεταβλητή (variable) η οποία λαμβάνει τιμές μέσα από κάποιο σύνολο σταθερών.
- Το κατηγορήμα (predicate) εκφράζει κάποια σχέση μεταξύ των όρων. Συντάσσεται ως συνάρτηση (function) με αντικείμενά της (arguments) όρους ή οι οποίοι βρίσκονται μέσα στις παρενθέσεις (σε καθορισμένες θέσεις ανάλογα με τον ρόλο που παίζουν για το κατηγορήμα). Με αυτή τη σύνταξη δημιουργείται μία έκφραση (expression) της κατηγορικής λογικής, δηλαδή ένα γεγονός του χώρου του προβλήματος το οποίο όμως, σε αντίθεση με τους όρους, διασπάται.

Μία σχέση η οποία ισχύει μεταξύ των όρων του κατηγορήματος καθιστά την έκφραση αληθή, ενώ μία σχέση η οποία δεν ισχύει μεταξύ των όρων του κατηγορήματος καθιστά την έκφραση ψευδή. Η άρνηση μίας έκφρασης την καθιστά ψευδή αν η ίδια είναι αληθής και αληθή αν η ίδια είναι ψευδής. Παρατηρείται ότι, στην περίπτωση χρήσης της κατηγορικής λογικής, είναι απαραίτητη η ανάθεση όρων-σταθερών στα κατηγορήματα προκειμένου να δημιουργηθούν συγκεκριμένες εκφράσεις (χωρίς μεταβλητές ή σύμβολα \forall και \exists).

Λόγω της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας της κατηγορικής λογικής, εάν η αναπαράσταση και επίλυση του προβλήματος είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μέσω της προτασιακής λογικής τότε είναι προτιμότερη. Εάν πάλι είναι απαραίτητο να διασπαστούν/ποσοτικοποιηθούν/γενικευτούν/συγκεκριμενοποιηθούν οι εκφράσεις, τότε προτιμάται η κατηγορική λογική.

Σημειώνεται πάντως ότι, αν και η χρήση πινάκων αληθείας καθώς και οι διάφορες τεχνικές συμπερασματικής διαδικασίας οδηγούν πάντα σε σωστές διαπιστώσεις, είναι δυνατόν μία απόδειξη να είναι τόσο χρονοβόρα που να μην είναι χρήσιμη. Επιπλέον είναι δυνατόν να μην μπορεί να αποδειχτεί κάτι το οποίο είναι αληθές (μη πληρότητα κατηγορικής λογικής, incompleteness) ή η συμπερασματική διαδικασία να μην τερματίζει στην προσπάθειά της να αποδείξει κάτι το οποίο είναι ψευδές (μη επιδεκτικότητα απόφασης κατηγορικής λογικής, undecidability). Είναι γεγονός όμως ότι η δυνατότητα και αποδοτικότητα της απόδειξης εξαρτάται κατά πολύ από την αναπαράσταση του προβλήματος καθώς και την κατάλληλη επιλογή τεχνικής επίλυσης.

Ασαφής Λογική (fuzzy logic)

Η δίτιμη λογική (και μέσω αυτής η προτασιακή και κατηγορική λογική), αν και κατάλληλη για την αναπαράσταση και τον χειρισμό γεγονότων, προτάσεων και αντίστοιχων μεταβλητών στον H/Y , δεν είναι πάντα επαρκώς ευέλικτη ώστε να εκφράζει επιτυχώς ορισμένες έννοιες, ιδιαίτερα γλωσσικές, υποκειμενικές ή εμπειρικές. Είναι προφανές ότι η δίτιμη λογική δεν επιτρέπει:

- (i) Την εις βάθος έκφραση της σχέσης
- (ii) Την ακριβή περιγραφή του βαθμού *membership**
- (iii) Την αποδοτική έκφραση της σχέσης

Η ασαφής λογική έχει δημιουργηθεί ώστε να καλύψει την αδυναμία της δίτιμης λογικής στην έκφραση μερικού χαρακτηρισμού γεγονότων, προτάσεων και αντίστοιχων μεταβλητών.

Κάθε χαρακτηριστικό της ασαφούς λογικής απεικονίζεται σε μία γραφική παράσταση όπου ο άξονας X αναπαριστά το εύρος δυνατών τιμών της μεταβλητής και ο άξονας Y το ποσοστό συμμετοχής (degree of membership) των τιμών της μεταβλητής στο χαρακτηριστικό. Αντί των τιμών 1 και 0 (δίτιμη λογική) το ποσοστό συμμετοχής μπορεί να λαμβάνει συνεχείς τιμές στο διάστημα $[0,1]$ οι οποίες εκφράζουν το κατά πόσο το χαρακτηριστικό εκφράζει τη συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής. Η καμπύλη που δημιουργείται από όλα τα ζεύγη (x,y) ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής (membership function) του χαρακτηριστικού. Αυτή μπορεί να πάρει πρακτικά οποιαδήποτε μορφή, δεν είναι αναγκαστικά ευθεία ή συνεχής, και συνήθως εμφανίζει ποσοστά συμμετοχής 0 στο ένα ή και στα δύο άκρα του εύρους τιμών της μεταβλητής και ποσοστά που αυξάνονται ανάμεσα. Επιπλέον, διαφορετικά αλλά γλωσσικά, υποκειμενικά ή εμπειρικά σχετιζόμενα χαρακτηριστικά μπορούν να συνδυαστούν στην ίδια γραφική παράσταση εκφράζοντας συνολικά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία αλληλοσυμπληρώνονται και εκφράζουν πληρέστερα τη μεταβλητή.

15.5 Τεχνικές για επίλυση προβλημάτων

Η TN απαιτεί:

- κατάλληλα σχήματα διαχείρισης συμβόλων για την αναπαράσταση του περιβάλλοντος, δηλαδή για την σύλληψη της γνώσης της σχετικής με το περιβάλλον,
- αποτελεσματικές διαδικασίες για την εξαγωγή και χρήση συμβολικά εκφρασμένης γνώσης προκειμένου να εκτελέσει ευφυείς λειτουργίες (επίλυση προβλημάτων).

Ετσι, αφενός ένα πρόγραμμα TN χειρίζεται συμβολικές δομές και όχι κατευθείαν αυτό που αναπαριστούν, και αφετέρου η ερμηνεία των καταστάσεων γίνεται από τον χρήστη, μέσα από την αναπαράστασή τους. Καθότι τα περισσότερα προβλήματα της TN δεν έχουν απευθείας λύση (δεν είναι τετριμμένα) είναι απαραίτητη η εύρεση μίας μεθοδολογίας που (α) να οδηγεί στην λύση πιο αποτελεσματικά από ότι η τύχη (guesswork) και (β) να επιτρέπει την οπισθοδρόμηση (backtracking) εφόσον η πορεία δεν οδηγεί προς τη λύση. Στα επόμενα αναλύονται διάφορες τεχνικές TN με τα δύο αυτά χαρακτηριστικά.

15.5.1 Αναζήτηση

Επίλυση ως αναζήτηση στον χώρο του προβλήματος

Ως χώρος του προβλήματος χαρακτηρίζεται το σύνολο των καταστάσεων, δηλαδή όλοι οι συνδυασμοί των δυνατών τιμών των σημαντικών χαρακτηριστικών που αναπαριστούν το πρόβλημα. Λόγω της υπερπληθώρας (έκρηξης) των συνδυασμών αυτών (combinatorial explosion) για όλα εκτός από τα πιο περιορισμένα προβλήματα, η απαρίθμηση όλων των καταστάσεων (states) δεν είναι αποδοτική και μερικές φορές δεν είναι ούτε εφικτή.

Η αναζήτηση (search) αποτελεί ένα ταξίδι στον χώρο του προβλήματος: ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση πραγματοποιείται μετάβαση (state transition) σε μία νέα κατάσταση, από εκεί – μέσω μετάβασης – σε μία νεώτερη κατάσταση και ούτω καθεξής. Η επίλυση ανάγεται στην αναζήτηση που περιγράφει μία διαδρομή (path), δηλαδή ένα ταξίδι μέσω μεταβάσεων από την αρχική σε μία από τις τελικές καταστάσεις του προβλήματος.

Οι καταστάσεις αναπαριστώνται από συμβολικές δομές, οι οποίες όχι μόνο είναι επεξεργάσιμες από τον Η/Υ αλλά και είναι κατάλληλες για χειρισμό από την τεχνική ΤΝ, επί του προκειμένου από την αναζήτηση στον χώρο του προβλήματος. Είναι απαραίτητο να καθοριστούν τα εξής:

- Οι συμβολικές δομές (symbolic structures) οι οποίες αναπαριστούν επακριβώς την πλευρά του προβλήματος τη σχετική με την επίλυσή του.
- Οι διαδικασίες επεξεργασίας (processing procedures) οι οποίες αναγνωρίζουν, δημιουργούν, μετατρέπουν και διαγράφουν συμβολικές δομές. Σημειώνεται ότι οι διαδικασίες επεξεργασίας πρέπει να εκφράζουν και προωθούν αποκλειστικά και μόνο τις επιτρεπτές μεταβάσεις.
- Οι διαδικασίες ελέγχου (control procedures) οι οποίες οργανώνουν την εφαρμογή των διαδικασιών επεξεργασίας ώστε να είναι δυνατή η μετάβαση στην τελική κατάσταση.

Τα τρία αυτά χαρακτηριστικά μεγέθη είναι αλληλεξαρτώμενα.

Τα σύμβολα, οι συμβολικές δομές και οι διαδικασίες επεξεργασίας αποτελούν τα απαραίτητα στοιχεία για τη έκφραση του προβλήματος και της επίλυσης. Για κάθε μετάβαση, πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος σχετικά με το αν η νέα κατάσταση είναι επιτρεπτή. Επιπλέον, προκειμένου να δοθεί μία ευφυής λύση στο πρόβλημα (μικρότερος αριθμός μετακινήσεων από την αρχική μέχρι την τελική κατάσταση), πρέπει όχι μόνο να επιτυγχάνεται μετάβαση σε νέα κατάσταση αλλά και να αποφεύγονται οι κύκλοι, δηλαδή ακολουθίες μετακινήσεων με την πρώτη και τελευταία κατάσταση στην ακολουθία να ταυτίζονται.

Το πρόβλημα είναι τώρα έτσι εκφρασμένο ώστε να είναι κατανοητό, αλλά όχι αναγκαστικά κατάλληλο για προγραμματισμό. Είναι φανερό ότι η επεξεργασία συνόλων με μεταβλητά μεγέθη δεν είναι η προτιμότερη συμβολική δομή. Μια συμβολική δομή σταθερού μήκους είναι προτιμότερη, για παράδειγμα συμβολικές δομές με ακριβώς 5 σύμβολα, όπου το σύμβολο (ποτάμι) έχει εισαχθεί προκειμένου να ξεχωρίσει τα σύμβολα στη Ο1 από αυτά στην Ο2. Αυτή η αναπαράσταση είναι:

- πλήρης (εμπεριέχει όλα τα απαραίτητα στοιχεία του προβλήματος), διαφανής (κατανοητή από τον χρήστη),
- περιεκτική και αφαιρετική (καθιστά σαφή τα σημαντικά στοιχεία του προβλήματος, - π.χ. την όχθη στην οποία βρίσκεται κάθε σύμβολο - ενώ παραλείπει τα μη σημαντικά στοιχεία του προβλήματος - π.χ. το χρώμα της χήνας ή την ποσότητα/ποιότητα του σταριού -), οπότε επιτρέπει την οικονομική έκφραση του προβλήματος),
- ευνοεί τον προγραμματισμό (οι συμβολικές δομές αποθηκεύονται, προσπελαύνονται και μετατρέπονται με ευκολία), και
- είναι εύκολα υλοποιήσιμη.

Καθίσταται λοιπόν και πάλι προφανές πώς η σωστή επιλογή αναπαράστασης επιτρέπει την ρητή έκφραση των περιορισμών που ενυπάρχουν στο πρόβλημα, προκειμένου να διευκολύνεται η επίλυση.

Δεδομένης της συμβολικής δομής που έχει επιλεγεί, το δίκτυο (graph) των καταστάσεων του χώρου του προβλήματος περιέχει έναν κόμβο για κάθε κατάσταση και μία γραμμή για κάθε δυνατή μετάβαση από μία κατάσταση σε μία άλλη, η οποία ενώνει τους αντίστοιχους κόμβους.

Η πορεία προς τη λύση, χρησιμοποιώντας τις διαδικασίες επεξεργασίας και ελέγχου για την μετάβαση σε κάθε δυνατή νέα κατάσταση και τον έλεγχο των μη επιτρεπτών καταστάσεων και των κύκλων. Η πορεία προς τη λύση παρουσιάζει το σύνολο όλων των δυνατών μεταβάσεων και περιλαμβάνει όλες τις δυνατές διαδρομές. Οι μεταβάσεις είναι μη αμφίδρομες, οπότε η πορεία προς τη λύση αποκτά τη μορφή δένδρου (αντί για τη μορφή γράφου): ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση (κορυφή του δένδρου), δημιουργούνται παρακλάδια για όλες τις δυνατές μεταβάσεις, κάθε μία από τις οποίες επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μίας διαδικασίας επεξεργασίας. Οι διαδικασίες επεξεργασίας εφαρμόζονται κάθε φορά στην όχθη που περιέχει τον καλλιεργητή, άρα στην πλευρά του που περιέχει το σύμβολο K. Επιπλέον, ο αριθμός των διαδικασιών επεξεργασίας που μπορούν να εφαρμοστούν είναι ανάλογος με τον αριθμό των συμβόλων που βρίσκονται στην ίδια πλευρά με το σύμβολο K όσον αφορά στο σύμβολο . Σε αυτή την περίπτωση, για κάθε κατάσταση δημιουργούνται τόσες νέες καταστάσεις (παρακλάδια) όσες είναι και οι εφαρμόσιμες διαδικασίες επεξεργασίας. Μέσω των διαδικασιών ελέγχου, από τις νέες καταστάσεις αποκλείονται αυτές που δημιουργούν απαγορευμένες καταστάσεις (κόκκινα τετράγωνα) ή κύκλους (μπλε τετράγωνα). Για κάθε μία από τις αποδεκτές καταστάσεις δημιουργούνται νέα παρακλάδια (μέσω των διαδικασιών επεξεργασίας) τα οποία είτε επεκτείνονται είτε σταματούν (μέσω των διαδικασιών ελέγχου) και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την μετάβαση στην τελική κατάσταση.

Η εξαντλητική (πλήρης) δημιουργία όλων των δυνατών μεταβάσεων από την αρχική κατάσταση είτε στην τελική κατάσταση είτε σε μία απαγορευμένη κατάσταση ή κύκλο αποτελεί μία τυπική έκφραση της αναζήτησης, η οποία επιβάλλει την εύρεση λύσης αν κάτι τέτοιο είναι εφικτό. Αυτή η μέθοδος εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Εκκίνηση από την αρχική κατάσταση.

Βήμα 2. Εφαρμογή των εφαρμόσιμων διαδικασιών επεξεργασίας στην αρχική κατάσταση. Δημιουργία παρακλαδιών (ένα για κάθε εφαρμόσιμη διαδικασία επεξεργασίας), το καθένα από τα

οποία εκφράζει μία νέα κατάσταση.

Βήμα 3. Εφαρμογή των διαδικασιών ελέγχου σε κάθε μία από τις νέες καταστάσεις. Διαγραφή νέων καταστάσεων οι οποίες δεν ικανοποιούν τις διαδικασίες ελέγχου (αποτελούν απαγορευμένες καταστάσεις ή κύκλους).

Βήμα 4. Επιλογή μίας από τις νέες καταστάσεις, την τρέχουσα κατάσταση.

Βήμα 5. Διαπίστωση ύπαρξης τρέχουσας κατάστασης.

Εάν ναι,

Βήμα 5.1. Διαπίστωση του εάν η τρέχουσα κατάσταση ταυτίζεται με την τελική κατάσταση.

Εάν ναι,

Μετάβαση στο **Βήμα 4** (προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει και άλλος τρόπος μετάβασης στην τελική κατάσταση).

Εάν όχι,

Βήμα 5.1.1. Εφαρμογή των εφαρμόσιμων διαδικασιών επεξεργασίας στην τρέχουσα κατάσταση. Δημιουργία παρακλαδιών (ένα για κάθε εφαρμόσιμη διαδικασία επεξεργασίας), το καθένα από τα οποία εκφράζει μία νέα κατάσταση.

Βήμα 5.1.2. Εφαρμογή των διαδικασιών ελέγχου σε κάθε μία από τις νέες καταστάσεις. Διαγραφή νέων καταστάσεων οι οποίες δεν ικανοποιούν τις διαδικασίες ελέγχου. Μετάβαση στο **Βήμα 4**.

Εάν όχι,

Βήμα 5.2. Τέλος μεθόδου.

Το δένδρο αναζήτησης δημιουργείται από την πορεία προς τη λύση αφού παραληφθούν όλες οι μεταβάσεις που οδηγούν σε κύκλους ή μη επιτρεπτές καταστάσεις, δηλαδή διατηρώντας μόνο όσες ακολουθίες μεταβάσεων αποτελούν διαδρομές (δηλαδή αποτελούν επιλύσεις του προβλήματος). Επίσης μπορεί να δημιουργηθεί από το δίκτυο του προβλήματος, ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση και προχωρώντας προς συνδεδεμένους κόμβους που δεν οδηγούν σε απαγορευμένη κατάσταση. Σημειώνεται ότι μόνο μία διέλευση από γραμμή του γράφου επιτρέπεται. Με αυτόν τον τρόπο περιγράφεται μία μέθοδος επίλυσης προβλημάτων στην TN, η αναζήτηση, ως ακολουθία μεταβάσεων. Σημειώνεται πάντως ότι αυτή η περιγραφή δεν αποτελεί από μόνη της πρόγραμμα επίλυσης. Για τον προγραμματισμό στον H/Y απαιτούνται ακόμη:

(α) ένας τρόπος αποθήκευσης/χαρακτηρισμού καθώς και διαγραφής/αποχαρακτηρισμού μίας κατάστασης ως νέας,

(β) ένας τρόπος αποθήκευσης καταστάσεων ώστε να αναγνωρίζονται οι κύκλοι,

(γ) ένας τρόπος ελέγχου για ύπαρξη νέων καταστάσεων προκειμένου να εφαρμοστεί το **Βήμα 4**,

(δ) ένας τρόπος διατήρησης των παρακλαδιών που οδηγούν στην τελική κατάσταση (μια και ενδιαφέρει εξίσου η ακολουθία μεταβάσεων από την αρχική στην τελική λύση εξίσου με το αν υπάρχει λύση).

Τα παραπάνω εκφράζονται από συμπληρωματικές διαδικασίες ελέγχου. Σημειώνεται τέλος ότι κάθε διαδρομή μπορεί να χαρακτηρίζεται από ένα κόστος (cost). Αυτό μπορεί να αποδίδει τον αριθμό μεταβάσεων μέχρι την επίλυση (άρα πιο σύντομες διαδρομές είναι και πιο οικονομικές, δηλαδή έχουν μικρότερο κόστος) ή και τη δυνατότητα κάποιων μεταβάσεων να είναι πιο ακριβές από κάποιες άλλες. Στην περίπτωση ύπαρξης κόστους, ο σκοπός της αναζήτησης δεν είναι να προσδιοριστεί μία οποιαδήποτε επίλυση αλλά να βρεθεί η πιο οικονομική επίλυση (πχ. αυτή με τον μικρότερο αριθμό μεταβάσεων ή με το μικρότερο συνολικό κόστος).

15.5.2 Μέθοδοι αναζήτησης

Υπενθυμίζεται ότι ο στόχος της ΤΝ είναι (ιδιαίτερα σε πολύπλοκα προβλήματα) να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της διαδρομής-επίλυσης. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αναζήτησης οι οποίες διαφέρουν στον τρόπο επιλογής της τρέχουσας κατάστασης στο **Βήμα 4** της προηγούμενης παραγράφου (και άρα στον τρόπο μετάβασης σε νέα κατάσταση). Διακριτικά χαρακτηριστικά των διάφορων μεθόδων αναζήτησης αποτελούν:

- (i) Εάν επιτυγχάνεται η εύρεση της πιο οικονομικής (βέλτιστης) λύσης (optimal search) ή απλά αναζητείται κάποια διαδρομή (non-optimal search).
- (ii) Εάν η αναζήτηση πραγματοποιείται τυφλά (blind search) ή είναι καθοδηγούμενη (informed search), δηλαδή εάν η κάθε μετάβαση πραγματοποιείται ανεξάρτητα ή βάσει της ποιότητας της νέας κατάστασης (πόσο κοντύτερα εκτιμάται ότι η νέα κατάσταση πλησιάζει στην τελική κατάσταση) αντίστοιχα. Η τυφλή αναζήτηση είναι η πιο απλή: δεν εμπεριέχεται πληροφορία για τον χώρο του προβλήματος οπότε η μετάβαση γίνεται βάσει κάποιου συστηματικού κριτηρίου. Η καθοδηγούμενη αναζήτηση χρησιμοποιεί ευριστικές μεθόδους (heuristics) που αφορούν στην ποιότητα της μετάβασης.
- (iii) Εάν η μέθοδος είναι πλήρης (complete), δηλαδή εγγυάται ότι θα βρεθεί μία λύση, εφόσον υπάρχει.
- (iv) Εάν χρησιμοποιείται οπισθοδρόμηση σε περίπτωση μη εύρεσης λύσης.

Ο Πίνακας 15.1 κατηγοριοποιεί τις διάφορες μεθόδους αναζήτησης βάσει των παραπάνω χαρακτηριστικών. Σημειώνεται ότι οι απαιτήσεις μνήμης και χρόνου έχουν υπολογιστεί για δένδρα αναζήτησης με b τον μέσο αριθμό παρακλαδιών (branching factor) ανά κόμβο-κατάσταση, d το μέσο βάθος (depth) των παρακλαδιών, και e το μέσο βάθος από την αρχική στην τελική κατάσταση ($e \leq d$).

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΗ	ΤΥΦΛΗ	ΠΛΗΡΗΣ	ΟΠΙΣΘΟΔΡΟΜΗΣΗ	ΜΝΗΜΗ	ΧΡΟΝΟΣ
Εξαντλητική	ναι	ναι	ναι	ναι	$O(bd)$ ή $O(b^d)$	$O(b^d)$
Σε βάθος	όχι	ναι	ναι	ναι	$O(be)$	$O(b^e)$
Σε πλάτος	όχι	ναι	ναι	ναι	$O(b^e)$	$O(b^e)$
Καλύτερη-πρώτα	όχι	όχι	ναι	ναι	-	-
Ακτινωτή	όχι	όχι	όχι	όχι	$O(bd)$	$O(bd)$
Αναρρίχηση	όχι	όχι	ναι	ναι	-	-
Περιορισμός παρακλαδιών	ναι	όχι	ναι	ναι	-	-
Περιορ. παρακλ. με υποεκτίμηση	ναι	όχι	ναι	ναι	-	-
Δυναμικός προγραμματισμός	ναι	όχι	ναι	ναι		
A*	ναι	όχι	ναι	ναι	-	-

Πίνακας 15.1: Χαρακτηριστικά μεθόδων αναζήτησης.

15.5.3 Επίλυση ως ανάλυση και ικανοποίηση περιορισμών

Κάθε σύστημα επιδεικνύει περιορισμούς: τα τμήματά του σχετίζονται (συναρμολογούνται) μέσω καλά καθορισμένων σχέσεων. Ετσι, αν μέσω της ανάλυσης ενός συστήματος είναι δυνατό να καταστεί γνωστό ακριβώς το πώς τα τμήματά του επιτρέπεται να σχετίζονται, τότε αυτή η γνώση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να επιτρέψει αφενός τη συναρμολόγηση ενός νέου συστήματος και αφετέρου την διαπίστωση του εάν ένα συγκεκριμένο σύστημα είναι κατασκευασμένο βάσει των επιτρεπτών σχέσεων (και άρα ανήκει στην κατηγορία συστημάτων που διέπονται από τους ίδιους περιορισμούς).

Για συστήματα που συναρμολογούνται σύμφωνα με καλά καθορισμένες όσο περισσότερα τμήματα συνδυάζονται τόσο αυξάνονται οι περιορισμοί σχετικά με το πώς μπορούν να συναρμολογηθούν τα υπόλοιπα τμήματα. Μάλιστα, αυτά ενδέχεται να μην μπορούν να συναρμολογηθούν, οπότε πρέπει να αποσυναρμολογηθούν κάποια ήδη συναρμολογημένα τμήματα και να δοκιμαστεί εκ νέου η συναρμολόγηση. Με άλλα λόγια, ακόμα και εάν και η λύση επιμέρους προβλημάτων είναι εύκολη, ο συνδυασμός των επιλύσεων μπορεί να μην είναι εφικτός ως λύση του συνολικού προβλήματος.

Ετσι, ενώ μία συλλογή τμημάτων φαινομενικά προσφέρει άπειρες δυνατότητες για τη δημιουργία μίας κατηγορίας συστημάτων, οι περιορισμοί μειώνουν σημαντικά τον αριθμό συστημάτων που δύνανται να συναρμολογηθούν. Παραδείγματα ικανοποίησης περιορισμών αποτελούν:

- Η συναρμολόγηση ενός ρολογιού.

- Το κόλλημα ενός σπασμένου πιάτου.
- Η συμπλήρωση ενός σταυρολέξου.
- Η αναγνώριση σχεδιαγραμμάτων τα οποία περιγράφουν γενικές όψεις αδιαφανών στερεών με επίπεδες πλευρές λευκού χρώματος, όπου ακριβώς τρεις έδρες και τρεις ακμές συναντώνται ώστε να δημιουργήσουν μία κορυφή. Ο φωτισμός είναι ομοιόμορφος ώστε να μην δημιουργούνται σκιές, ενώ δεν επιτρέπονται ρωγμές ή άλλες χαρακτηριστικές γραμμές στις επιφάνειες.

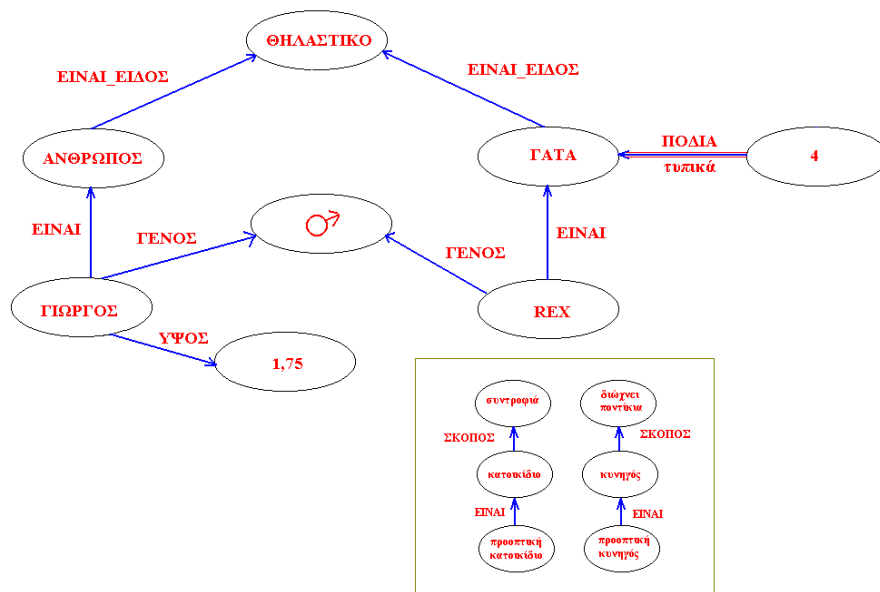
15.6 Χρήση Λογικής για την επίλυση προβλημάτων

Οι μορφές της λογικής οι οποίες περιγράφονται στην παράγραφο 2.3, και ιδιαίτερα η κατηγορική λογική, έχουν σημαντικές εφαρμογές στην υλοποίηση της καθημερινής γνώσης καθώς και στη συλλογιστική (reasoning). Για τον ίδιο σκοπό έχουν μάλιστα αναπτυχθεί γλώσσες λογικού προγραμματισμού (logic programming) οι οποίες είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για την υλοποίηση αυτών των συστημάτων, υιοθετώντας ως δομή τους το τρόπο αναπαράστασης και σύνταξης (όρους και κατηγορήματα) της κατηγορικής λογικής. Οι δύο βασικότερες από αυτές της γλώσσες είναι η LISP και η PROLOG, οι οποίες λειτουργούν βασικά μέσω συμπλήρωσης/ταύτισης όρων στα κατηγορήματά τους.

15.6.1 Καθημερινή γνώση Σημασιολογικά δίκτυα (semantic nets)

Τα δίκτυα αυτά αποτελούν σχηματικό τρόπο έκφρασης των σχέσεων μεταξύ ομάδων αντικειμένων, αντικειμένων και χαρακτηριστικών τους. Οι ομάδες, τα αντικείμενα και τα χαρακτηριστικά τους αναπαριστώνται από κόμβους, ενώ οι σχέσεις μεταξύ τους εκφράζονται από κατευθυνόμενες ενώσεις μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων. Ένα παράδειγμα δίνεται στο 15.1, για τις σχέσεις που περιγράφονται από το κείμενο: "Ο άνθρωπος είναι θηλαστικό. Ο Γιώργος είναι άνδρας και έχει ύψος 1,75. Η γάτα είναι θηλαστικό και τυπικά έχει τέσσερα πόδια. Ο Rex είναι γάτος. Ως κατοικίδιο, σκοπός του Rex είναι η συντροφιά, ενώ ως κυνηγός, σκοπός του είναι να διώχνει τα ποντίκια.

Σχήμα 15.1: Σημασιολογικό Δίκτυο



Κλασσικοί μηχανισμοί αναπαράστασης σχέσεων στα σημασιολογικά δίκτυα αποτελούν:

- (i) Κληρονομικότητα. Η γνώση η σχετική με τα χαρακτηριστικά μίας ομάδας αντικειμένων χρησιμοποιείται για τη γνώση σχετικά με τα αντικείμενα της ομάδας πχ Η κληρονομικότητα επιτυγχάνεται μέσω σχέσεων της μορφής "είναι", "είναι είδος" κλπ.
- (ii) Ανάθεση τυπικών (default) τιμών. Αποτελεί έκφραση της πιο πιθανής τιμής ενός χαρακτηριστικού ενός αντικειμένου. Πχ η τυπική τιμή για τον αριθμό ποδιών της γάτας είναι τέσσερα, άρα ο Rex μάλλον έχει τέσσερα πόδια, χωρίς αυτό να χρειαστεί να δηλωθεί ειδικά για τον Rex.
- (iii) Χρήση δαίμωνων. Οι δαίμονες αποτελούν ρουτίνες παραγωγής πληροφορίας/χαρακτηριστικού αντικειμένων ή ομάδων αντικειμένων μέσα από άλλες πληροφορίες/χαρακτηριστικά τους. Οι δαίμονες χρησιμοποιούνται μόνο αν είναι αναγκαίο να συλλεχθεί αυτή η πληροφορία).
- (iv) Προοπτική. Περιλαμβάνει τις διαφορετικές έννοιες κάτω από τις οποίες θεωρείται ένα αντικείμενο ή μία ομάδα αντικειμένων. Εφόσον ενεργοποιηθεί μία προοπτική αγνοούνται οι υπόλοιπες, ούτως ώστε να αποσαφηνιστεί η έννοια του αντικειμένου. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2 φαίνονται οι "σκοποί" του Rex ως κατοικίδιο και ως κυνηγός.

Σχήματα

Τα σχήματα (schemata, frames, scenarios, scripts, Minsky (1975)) αποτελούν έναν από τους πιο συνήθεις τρόπους έκφρασης γνώσης σχετικής με αντικείμενα, ενέργειες ή γεγονότα. Αφορούν στην αναγνώριση και κατανόηση του περιβάλλοντος με δομημένο τρόπο. Έχουν ως πηγή έμπνευσής τους την ευελιξία της ΦΝ αφενός όταν αντιμετωπίζει μία νέα κατάσταση (η οποία μοιάζει με κάποια γνωστή κατάσταση) και αφετέρου όταν προσαρμόζεται στην αλλαγή μίας κατάστασης.

Τα σχήματα αποτελούν παραλλαγή των σημασιολογικών δικτύων: αντιπροσωπεύουν πραγματικές καταστάσεις εκφρασμένες συνολικά ως κόμβοι/θέσεις (slots) που περιέχουν/συμπληρώνονται από συγκεκριμένες τιμές και αντίστοιχες κατευθυνόμενες συνδέσεις. Ισχύουν οι κλασσικοί μηχανισμοί αναπαράστασης σχέσεων των σημασιολογικών δικτύων (κληρονομικότητα, τυπικές τιμές, δαίμονες και προοπτική), οπότε είναι δυνατό να μεταβάλλονται οι θέσεις-λεπτομέρειες όπως χρειάζεται, καθώς και να εμπεριέχονται (οπότε και να επεξηγούνται) λεπτομέρειες οι οποίες είναι χαρακτηριστικές αλλά παραλείπονται λόγω του ότι είναι αυτονόητες. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να υλοποιηθεί ο ελλειπτικός, καθημερινός, λόγος και - μέσω των σχημάτων - να αποσαφηνίζονται/συμπληρώνονται τα δεδομένα ώστε να δίνεται σωστή ερμηνεία σε περίπτωση ελλιπών δεδομένων ή πολλαπλών και αμφίσημων εκδοχών. Επιπλέον σχήματα μπορούν να περιέχουν επιμέρους (πιο εξειδικευμένα) σχήματα. Παραδείγματα σχημάτων αποτελούν η αναγνώριση μίας καρέκλας (μαζί με την ανάσυρση των χαρακτηριστικών της), το παιδικό πάρτυ γενεθλίων, μία βόλτα παίρνοντας το λεωφορείο, ή μία έξοδος πηγαίνοντας στο εστιατόριο. Μία υλοποίηση του σχήματος του εστιατορίου μπορεί να εκφραστεί με το εξής κείμενο:

Ο Γιάννης πήγε στο εστιατόριο.

Κάθησε.

Διάβασε το μενού.

Παρήγγειλε κοτόπουλο.

Δεν ήθελε ποτό.

Εφαγε το κοτόπουλο.

Άφησε μεγάλο φιλοδώρημα.

Εφυγε από το εστιατόριο.

Σχήμα 15.2: Σχήμα εστιατορίου. Χαρακτηριστικά και Θέσεις

ΕΣΤΙΑΤΟΡΙΟ	
Λογική	ταξί αυτοκίνητο μικρο λεωφόρος παόλια
Ωρα	μεσημέρι βράδυ
Συνδάτημονος	μόνος με συντροφιά με συντροφιά
Τραπεζί	κλεισμένο παράθυρο ορχήστρα μακριά από τηγεία
Επιλογή γεύματος	μπουφές μενσο
Πιάτο (ένα ή περισσότερα)	ορεκτικό της ώρας κρέας ψάρι σιελίτσα γλυκό φρυγανιά
Ποτό (ένα ή περισσότερα)	λευκό κρασί κόκκινο κρασί σιμιτάνια σάξο μπύρα νερό
Λογαριασμός	με κερφή πιστώτικη φιλοδώρημα %
Αναχώρηση	αυτόνομο κλήση ταξί

Από το σχήμα 15.2 είναι φανερό ότι υπήρχε μενού και όχι μπουφές για την επιλογή του γεύματος, ότι έφαγε κοτόπουλο και ότι δεν ήπιε κρασί. Καθίσταται πιθανό ότι ο Γιάννης ήταν μόνος, ενώ συμπεραίνεται ότι του άρεσε το κοτόπουλο (αφού άφησε μεγάλο φιλοδώρημα). Το τελευταίο δίνεται από ένα ξεχωριστό, επιμέρους σχήμα, το σχήμα του φιλοδωρήματος που καθορίζει το ποσοστό του φιλοδωρήματος ανάλογο της ποιότητας του γεύματος. Παρ' όλο που δεν γίνεται

φανερό πώς ήρθε και πώς έφυγε ο Γιάννης, αν είχε κλείσει τραπέζι ή με ποιόν τρόπο πλήρωσε το λογαριασμό, η κατανόηση του ελλειπτικού κειμένου επιτυγχάνεται με ευκολία.

Επεξεργασία φυσικής γλώσσας (natural language processing)

Ορμώμενοι από την εξέταση του Turing, δημιουργούνται ολοένα και πιο εξελιγμένα προγράμματα (chatbots ή chatterbots ή crash dummies of communication) τα οποία επικοινωνούν με τον άνθρωπο σε φυσική γλώσσα με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνουν επιτυχώς - για κάποιο χρονικό διάστημα - την ανθρώπινη συμπεριφορά και επικοινωνία. Αποτελούν σχετικά μικρές βάσεις δεδομένων (λέξεις της αγγλικής - συνήθως - γλώσσας) συνδυασμένα με σειρά κανόνων για τη δημιουργία "ευφών" προτάσεων. Τα προγράμματα αυτά έχουν απλή δομή συνήθως με τη μορφή κανόνων εκφρασμένων μέσω κατηγορικής λογικής, σημασιολογικών δικτύων και υλοποιημένα σε κάποια γλώσσα λογικού προγραμματισμού. Μπορούν να ξεγελάσουν τον συνομιλητή για περιορισμένο χρονικό διάστημα, αλλά - όσο εξεζητημένα και αν είναι - αποτυγχάνουν εύκολα (και συχνά) όταν αντιμετωπίζουν το ευρύτερο πεδίο ερωτήσεων/απαντήσεων του συνομιλητή τους (ΦΝ). Το ενδιαφέρον, ο συναγωνισμός, αλλά και η δυσκολία δημιουργίας ενός προγράμματος επικοινωνίας σε φυσική γλώσσα είναι τέτοια που κάθε χρόνο διεξάγεται ο διαγωνισμός Loebner για το πιο πετυχημένο πρόγραμμα.

Το κλασικό πρόγραμμα επικοινωνίας σε φυσική γλώσσα είναι η ELIZA

(Weizenbaum, 1966), η οποία προσομοιώνει πειστικά (για περιορισμένο χρονικό διάστημα) έναν ψυχοθεραπευτή: διεισδυτική και ήρεμη, θέτει σύντομες αλλά κατάλληλες ερωτήσεις προκειμένου να κάνει τον ασθενή να ξανοιχτεί (πχ. "Πώς σε κάνει αυτό να αισθάνεσαι;" ή "Πες μου περισσότερα"). Χωρίς ουσιαστικό ίχνος εξυπνάδας (πχ. ευριστικών μεθόδων) στον πρόγραμμα, λειτουργεί ανιχνεύοντας λέξεις κλειδιά (keyword matching), πχ. "μητέρα" ή "καταπιεσμένος/η" προκειμένου να θέσει τις ανάλογες ερωτήσεις μέσα από μία βάση δεδομένων-ερωτήσεων. Αν η ανίχνευση λέξεων-κλειδιών αποτύχει, η ELIZA θέτει γενικές ερωτήσεις προκειμένου να συλλέξει περισσότερες πληροφορίες (και λέξεις-κλειδιά). Παρ' όλα αυτά, εύκολα αποκαλύπτεται η περιορισμένη ικανότητά της για διάλογο.

Η ELIZABETH (Peter Millican), απόγονος της ELIZA με καλύτερη βάση δεδομένων και εκτεταμένο τρόπο αναζήτησης απαντήσεων. Η ELIZABETH μπορεί να χειρίζεται πιο πολύπλοκες εκφράσεις και μετασχηματισμούς. Ξεκινά τη συζήτηση με έναν τυχαία επιλεγμένο χαιρετισμό (από τους αποθηκευμένους) και οι απαντήσεις της βασίζονται αποκλειστικά στις προτάσεις του συνομιλητή της μέσω της παρακάτω διαδικασίας:

- Ανάλυση της πρότασης του συνομιλητή.
- Αναγνώριση λέξεων-κλειδιών στην πρόταση και τυχαία επιλογή ενός από τους υπάρχοντες μετασχηματισμούς τους.
- Δημιουργία απάντησης (ένα παράδειγμα δίνεται παρακάτω).

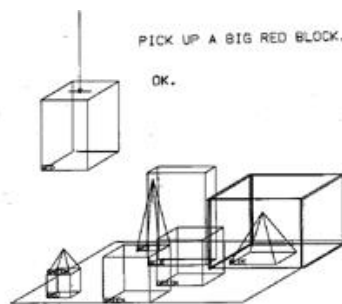
Ο SANTA (Rich Waugh and Rey Barry) για τη δημιουργία ενός προσομοιωτή του Αη Βασίλη που δέχεται παραγγελίες για πρωτοχρονιάτικα δώρα.

Συστήματα γνώσης (knowledge-based systems)

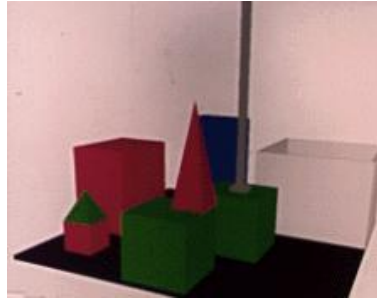
Δεδομένου του προβλήματος της καθημερινής γνώσης (όπως φάνηκε παραπάνω) αντί για την παραγωγή συστημάτων ΤΝ γενικής χρήσης, αναπτύχθηκε η εναλλακτική μεθοδολογία μίμησης της ΦΝ σε "μικροκόσμους" (microworlds), δηλαδή περιορισμένα και καλά καθορισμένα περιβάλλοντα (χώρους προβλήματος). Η θεωρία πίσω από τους μικροκόσμους ήταν ότι η ΤΝ όφειλε να παράγει ευφυΐα σε ένα περιορισμένο περιβάλλον. Μόλις αυτό επιλυνόταν, η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος θα αυξανόταν (χαλάρωση περιορισμών περιβάλλοντος) προκαλώντας επέκταση στην ΤΝ. Αφού αυτό επαναλαμβανόταν διαδοχικά, η ΤΝ θα έφτανε σε ένα σημείο που θα επέλυε πραγματικά προβλήματα και περιβάλλοντα. Ήταν μία θεωρία αμοιβαία κλιμακούμενης πολυπλοκότητας περιβάλλοντος και ΤΝ.

Ενα από τα πιο κλασσικά παραδείγματα μικροκόσμου αποτελεί ο μικρόκοσμος των κύβων με διαχείρισή του από το SHRDLU (Winograd, 1972), ένα σύστημα γνώσης το οποίο στηρίζεται σε κανόνες της μορφής που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.1. Το SHRDLU έλαβε το όνομά του από τα επτά πιο συνηθισμένα γράμματα της Αγγλικής γλώσσας. Αποτελεί συνδυασμό επικοινωνίας σε φυσική γλώσσα αφενός και επίλυσης προβλημάτων μετακίνησης και τοποθέτησης αντικειμένων του τεχνητού μικροκόσμου των κύβων (κύβων, σφαιρών, κώνων, πυραμίδων κλπ. διαφόρων μεγεθών και χρωμάτων, βλ. 15.3,15.6.1) αφετέρου. Περιγράφει κύβους και έναν ρομποτικό βραχίονα που χρησιμοποιείται για την μετακίνηση των κύβων. Είναι ενδιαφέρον ότι τέσσερις απλές ιδέες επιτρέπουν την ικανοποιητική προσομοίωση της κατανόησης και επικοινωνίας με το περιβάλλον/άνθρωπο και εισήγαγαν ένα πρώτο δείγμα ρομποτικής. Οι τέσσερις αυτές ιδέες είναι οι εξής:

Σχήμα 15.3: SHRLDU



- Περιορισμένο και καλά καθορισμένο περιβάλλον. 50 λέξεις είναι αρκετές για την περιγραφή και διαχείρισή του περιβάλλοντος.
- Ενσωμάτωση μία πρώτης έννοιας εκμετάλλευσης του προηγούμενου διαλόγου για την κατανόηση αμφίβολων εντολών. Αρα πραγματοποιείται φυσική επεξεργασία λόγου και διάλογος με σκοπό την εκτέλεση της εντολής.
- Έλεγχος της δυνατότητας εκτέλεσης εντολής. Λόγω της μνήμης του σχετικά με τον προηγούμενο διάλογο, μπορεί να διαπιστώσει αν κάτι είναι εφικτό ή όχι. Αρα, σε κάθε βήμα, πραγματοποιείται επίλυση του προβλήματος που εκφράζεται μέσω της εντολής.



- Εκμάθηση. είναι δυνατή η αποθήκευση νέων ονομάτων σε αντικείμενα ή σε συνδυασμούς τους.

15.6.2 Εμπειρη γνώση

Αν και το SHRLDU αποτέλεσε ένα ιδιαίτερα πετυχημένο πρόγραμμα TN, η επέκτασή του σε λιγότερο περιορισμένα περιβάλλοντα ήταν αποτυχής. Μάλιστα, ο Winograd πρώτος αποστασιοποιήθηκε από το κατασκευασμά του, πιστεύοντας ότι η TN οδηγεί σε αδιέξοδο. Παρόλα αυτά, το SHRLDU απέδειξε ότι κατάλληλα δομημένα συστήματα TN μπορούν να δρουν ως ειδικοί σε καλά καθορισμένα περιβάλλοντα (βαθιά αλλά περιορισμένη γνώση ειδικού αντί για πλατιά και ρηχή καθημερινή γνώση). Έτσι, ένας κλάδος της TN αφιερώθηκε στην εμπειρη γνώση.

Συλλογιστική - συστήματα κανόνων (rule-based systems)

Λόγω της πολυπλοκότητας και έκτασής της, η εμπειρη γνώση δεν υλοποιείται συνήθως μέσα από σημασιολογικά δίκτυα ή σχήματα (τα οποία έχουν καθαρά δηλωτική μορφή) αλλά μέσα από κανόνες που επεξηγούν τι επακολουθεί (συμπέρασμα ή πράξη) εφόσον ένα σύνολο προϋποθέσεων ικανοποιείται. Οι κανόνες αυτοί είναι της μορφής:

```
<ΚΑΝΟΝΑΣ i> <ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΗ i1> ΑΛΗΘΗΣ
<ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΗ i2> ΑΛΗΘΗΣ
```

...

```
<ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΗ in> ΑΛΗΘΗΣ
ΤΟΤΕ <ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΟ i1> ΑΛΗΘΕΣ
< ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΟ i2> ΑΛΗΘΕΣ
```

...

```
< ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΟ im> ΑΛΗΘΕΣ
```

όπου οι προϋποθέσεις αποτελούν τα απαιτούμενα προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο κανόνας, ενώ τα επακόλουθα είναι τα αποτελέσματα της ενεργοποίησης του κανόνα. Οι προϋποθέσεις συνδέονται μεταξύ τους με λογικούς τελεστές (V και Λ του Πίνακα 1). Η ικανοποίησή τους ή η μή

ικανοποίησή τους εξαρτάται από την ικανοποίηση ή τη μη ικανοποίηση του λογικού συνδυασμού των προϋποθέσεων, οπότε προκαλείται η ενεργοποίηση ή η μη ενεργοποίηση των επακόλουθων αντίστοιχα. Τα συστήματα κανόνων χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της γνώσης και την επαλήθευση/διάψευση κάποιων εικασιών. Τα συστήματα κανόνων χαρακτηρίζονται ως:

- Συστήματα σύνθεσης (synthesis systems), εφόσον δημιουργούν/συνθέτουν ένα σύνολο αποτελεσμάτων, όπως αυτό προκύπτει από κάποια δεδομένα/γεγονότα.
- Συστήματα ανάλυσης (analysis systems), εφόσον προσπαθούν να κατηγοριοποιήσουν/διagnώσουν κάποια δεδομένα/γεγονότα βάσει των διαθέσιμων κανόνων.

Για την σύνθεση/ανάλυση δεδομένων μέσα από την επαλήθευση/διάψευσή τους, τα συστήματα κανόνων απαρτίζονται από:

- Σύνολο κανόνων.
- Σύνολο γεγονότων/δεδομένων/αληθειών σχετικά με κάποια αντικείμενα ή χαρακτηριστικά τους, το οποίο εκφράζεται ως βάση δεδομένων (database). Η βάση αυτή εμπλουτίζεται μέσα από ερωτήσεις του συστήματος στον χρήστη καθώς και μέσα από τα αποτελέσματα/συμπεράσματα των ενεργοποιημένων κανόνων.
- Σύνολο συμπερασμάτων (εικασιών), τα οποία πρέπει να επαληθευτούν ή να διαψευστούν.
- Σύνολο διαδικασιών ελέγχου που καθορίζουν τη συλλογιστική (reasoning strategy) και καλούν τη συμπερασματική μηχανή (inference engine) για τη δημιουργία νέων γεγονότων που εμπλουτίζουν τη βάση δεδομένων και οδηγούν στην επαλήθευση ή τη διάψευση των συμπερασμάτων.

Η συλλογιστική καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα κανόνων οδηγείται μέσα από τα δεδομένα και τους κανόνες στην επαλήθευση ή στη διάψευση των συμπερασμάτων. Βασικό πλεονέκτημά της αποτελεί η δυνατότητα επεξήγησης της πορείας προς την επαλήθευση ή τη διάψευση, για παράδειγμα το πώς διαπιστώθηκε κάποιο γεγονός (προϋπόθεση, επακόλουθο ή συμπέρασμα) καθώς και το γιατί ερωτήθηκε ο χρήστης σχετικά με κάποιο γεγονός. Για την επίτευξη της σύνθεσης/ανάλυσης υπάρχουν δύο είδη συλλογιστικής, η συλλογιστική προς τα εμπρός και η συλλογιστική προς τα πίσω.

Η συλλογιστική προς τα εμπρός

Ξεκινώντας από γεγονότα και δεδομένα της βάσης δεδομένων χρησιμοποιούνται οι κανόνες προκειμένου να δημιουργηθούν νέα γεγονότα και δεδομένα (επακόλουθα) τα οποία εμπλουτίζουν τη βάση δεδομένων. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου είτε να προκύψει το ζητούμενο συμπέρασμα είτε να καταστεί βέβαιο ότι αυτό δε μπορεί να προκύψει. Ετσι, η συλλογιστική προς τα εμπρός χρησιμοποιείται όταν ζητείται τι μπορεί να προκύψει από ένα σύνολο κανόνων και κάποια αρχική βάση δεδομένων (δηλαδή για συστήματα σύνθεσης). Εκφράζεται ως εξής:

Βήμα 1. Για κάθε κανόνα,

Βήμα 1.1. Απόπειρα ικανοποίησης του συνδυασμού των προϋποθέσεων βάσει των γεγονότων/δεδομένων της βάσης δεδομένων. Ελεγχος του εάν ο κανόνας ενεργοποιείται.

Εάν ναι,

Βήμα 1.1.1. Προσθήκη των νέων επακόλουθων στη βάση δεδομένων.

Βήμα 2. Διαπίστωση του εάν η βάση δεδομένων έχει αυξηθεί.

Εάν ναι,

Βήμα 2.1. Επιστροφή στο *Βήμα 1*.

Εάν όχι,

Βήμα 2.2. Τέλος μεθόδου. Αναφορά όλων των νέων επακόλουθων της βάσης δεδομένων.

Η συλλογιστική προς τα εμπρός είναι εξαντλητική. Αν και είναι δυνατό να τίθενται ερωτήσεις αληθείας στον χρήστη κάθε φορά που δεν ικανοποιείται μία προϋπόθεση, κάτι τέτοιο δεν είναι κατευθυνόμενο (άρα δεν είναι και ιδιαίτερα αποδοτικό). Γι' αυτόν τον λόγο, έχει αναπτυχθεί σειρά στρατηγικών (conflict resolution strategies) οι οποίες επιτρέπουν στη συμπερασματική μηχανή να αυξήσει την αποδοτικότητά της. Οι στρατηγικές αυτές περιλαμβάνουν:

- Την εξέταση των πιο γενικών κανόνων πρώτα (προκειμένου να εμπλουτιστεί η αρχική βάση δεδομένων).
- Τη μη εφαρμογή του ίδιου κανόνα στα ίδια δεδομένα.
- Την εφαρμογή των κανόνων στα πιο πρόσφατα στοιχεία της βάσης δεδομένων, έτσι ώστε να επαυξηθεί η βάση δεδομένων και να προχωρήσει η συλλογιστική συστηματικά/κατευθυνόμενα.
- Την προτίμηση για εφαρμογή των πιο ειδικών κανόνων έναντι των πιο γενικών (κατά την πορεία της συλλογιστικής διαδικασίας).

Σημειώνεται πάντως ότι τα πιο σημαντικό στοιχείο του συστήματος κανόνων αποτελεί ο τρόπος σύνταξης των προϋποθέσεων-επακόλουθων των κανόνων καθώς και επιπλέον διαδικασίες ελέγχου της συμπερασματικής μηχανής. Οι τελευταίες εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα προς επίλυση (problem-dependent) και δύνανται να καθορίζουν το πεδίο δράσης των στρατηγικών πχ. ότι αρχικά θα προτιμούνται οι πιο γενικοί κανόνες ώστε να εμπλουτιστεί ικανοποιητικά η βάση δεδομένων και κατόπιν θα εφαρμοστεί η στρατηγική της προτίμησης των πιο ειδικών κανόνων προκειμένου η αναζήτηση να επικεντρωθεί και καταστεί πιο κατευθυνόμενη.

Αρχικά αναζητείται κάποιος κανόνας ο οποίος περιέχει το ζητούμενο συμπέρασμα ως επακόλουθο. Αφού εντοπιστούν οι προϋποθέσεις οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο κανόνας, πραγματοποιείται εκ νέου αναζήτηση των κανόνων οι οποίοι περιέχουν αυτές τις προϋποθέσεις και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου είτε οι προϋποθέσεις ανάγονται σε αληθή γεγονότα/δεδομένα της βάσης δεδομένων (οπότε το ζητούμενο επαληθεύεται)

είτε καταστεί φανερό ότι οι προϋποθέσεις αυτές δεν είναι δυνατό να ικανοποιηθούν (οπότε το ζητούμενο διαψεύδεται). Λόγω του ότι είναι πιο κατευθυνόμενη, η συλλογιστική προς τα πίσω χρησιμοποιείται εάν το ζητούμενο συμπέρασμα είναι εξειδικευμένο (πχ. μία υπόθεση που αφορά σε κάποια συγκεκριμένα δεδομένα της βάσης δεδομένων) και ζητείται η επαλήθευσή/διάψευσή του. Εφαρμόζεται ως εξής:

Βήμα 1. Για κάθε πρωτογενές συμπέρασμα.

Βήμα 1.1. Εξέταση κάθε κανόνα που περιέχει το πρωτογενές συμπέρασμα ως συμπέρασμα:

Βήμα 1.1.1. Έλεγχος του εάν ο κανόνας ενεργοποιείται. (απόπειρα ικανοποίησης του συνδυασμού των προϋποθέσεων βάσει των γεγονότων/δεδομένων της βάσης δεδομένων).

Εάν ναι,

Βήμα 1.1.1.1. Αναφορά του πρωτογενούς αποτελέσματος.

Εάν όχι,

Βήμα 1.1.1.2. Διαγραφή του πρωτογενούς αποτελέσματος.

Εάν δεν είναι δυνατός ο έλεγχος (κάποιες προϋποθέσεις δεν είναι γνωστό αν ικανοποιούνται)

Βήμα 1.1.1.2. Αναδρομικός έλεγχος του εάν η κάθε προϋπόθεση ικανοποιείται.

Όπως και στη συλλογιστική προς τα εμπρός, είναι δυνατό να τίθενται ερωτήσεις αληθείας στον χρήστη κάθε φορά που δεν ικανοποιείται μία προϋπόθεση. Όμως, αντί της συνεχώς επαυξανόμενης βάσης δεδομένων της συλλογιστικής προς τα εμπρός, στη συλλογιστική προς τα πίσω αυξάνεται ο αριθμός των προϋποθέσεων που πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να επαληθευτεί το ζητούμενο συμπέρασμα.. Στη συλλογιστική προς τα πίσω, οι ερωτήσεις προς τον χρήστη μοιάζουν κατευθυνόμενες, μιας και γίνονται όλο και πιο λεπτομερείς. Γι' αυτό το λόγο, η συλλογιστική αυτή είναι πιο αποδοτική από τη συλλογιστική προς τα εμπρός.

Καθώς η συλλογιστική προς τα εμπρός παρουσιάζει προβλήματα συνδυαστικής έκρηξης σε μεγάλες βάσεις δεδομένων και για πολλούς κανόνες, αλλά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική και διεξοδική σε μικρές βάσεις δεδομένων και για λίγους κανόνες, είναι δυνατός ο συνδυασμός των δύο συλλογιστικών οπότε χρησιμοποιείται αρχικά η συλλογιστική προς τα πίσω για την απόδειξη πιο γενικών προϋποθέσεων ακολουθούμενη από τη συλλογιστική προς τα εμπρός για την απόδειξη του ζητούμενου.

Εμπειρα συστήματα (ΕΣ, expert systems)

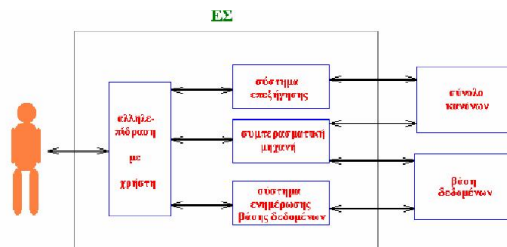
Η δομή των ΕΣ είναι ίδια με αυτή των συστημάτων κανόνων. Έτσι, ένα ΕΣ πρέπει να μπορεί να εξηγήει τον τρόπο με τον οποίο φτάνει σε ένα αποτέλεσμα καθώς και να μπορεί να απαντά σε ερωτήσεις σχετικά με αυτό. Η κύρια διαφορά των ΕΣ και των συστημάτων κανόνων έγκειται:

(α) Στο θέμα το οποίο επιλύουν. Ενώ αυτό είναι γενικότερο για τα συστήματα κανόνων, τα ΕΣ προσεγγίζουν προβλήματα σε σημαντικούς και πολύ εξειδικευμένους/περιορισμένους τομείς (πχ. ιατρική, μαθηματικά, μηχανολογία, γεωλογία, επιστήμη υπολογιστών, επιχειρήσεις, νομική, άμυνα, εκπαίδευση), τα οποία απαιτούν έναν ή περισσότερους ειδικούς (πχ. γιατρό, ορυκτολόγο). Τα προβλήματα αυτά μπορεί να εκφράζονται ως προβλήματα διάγνωσης (πάθηση, μηχανική βλάβη, λάθος μαθητή κλπ.), κατασκευαστικά προβλήματα (ενός κτιρίου ή υπολογιστικού συστήματος), ή προβλήματα επεξήγησης (πχ. γεωλογικών δεδομένων). Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν τα ΕΣ αποτελούν αποφάσεις με τη μορφή παροχής εξειδικευμένης γνώσης, διάγνωσης και συμβουλών.

(β) Στην πολυπλοκότητά της δομής τους. Η κωδικοποίηση της πιο βαθιάς, εξειδικευμένης γνώσης είναι ευριστικής μορφής, βασισμένη περισσότερο σε εμπειρικούς κανόνες (οι οποίοι είναι διαισθητικοί) παρά σε συγκεκριμένα γεγονότα ή βεβαιότητες. Ετσι, απαιτείται όχι μόνο η έκφραση διαισθητικών κανόνων οι οποίοι απομακρύνονται αισθητά από τη δηλωτική γνώση, αλλά και στη σύνθεση κανόνων οι οποίοι εκφράζουν βαθιά, διαδικαστική γνώση του θέματος το οποίο επιλύουν. Συνεπώς, ο τρόπος αναπαράστασης της γνώσης καθώς και της συλλογιστικής σε ένα ΕΣ εξαρτάται κατά πολύ από το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Η δημιουργία ενός ΕΣ απαιτεί την εξαγωγή γνώσης (knowledge acquisition) από τον ειδικό, γνώση η οποία είναι δύσκολο όχι μόνο να εξαχθεί αλλά και να αναπαρασταθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να καταστεί διαχειρίσιμη από ένα σύστημα ΤΝ υλοποιημένο σε Η/Υ. Η δημιουργία ενός ΕΣ αποτελεί την ευθύνη του μηχανικού γνώσης (knowledge engineer), ενός εξειδικευμένου προγραμματιστή ο οποίος συνεργάζεται αφενός με τον ειδικό και αφετέρου με τους χρήστες προκειμένου να εξάγει τη γνώση και να υλοποιήσει κατάλληλα το σύστημα (από άποψη πληροφορίας, κατάλληλης γλώσσας προγραμματισμού, δομής ΕΣ και ικανοποιητικής αλληλεπίδρασης με τον χρήστη). Οι πρώτες προσπάθειες δημιουργίας του ΕΣ (έμπειρης γνώσης και αντίστοιχων κανόνων) είναι σχεδόν πάντα ανεπιτυχείς. Απαιτείται σειρά από συνεχώς βελτιούμενα ΕΣ τα οποία αφενός προσεγγίζουν τον τρόπο σκέψης και λήψης αποφάσεων του ειδικού και αφετέρου έχουν τη δυνατότητα (φαινομενικά) αβίαστης αλληλεπίδρασης με τον χρήστη όσον αφορά στις ερωτήσεις του ΕΣ προκειμένου να συλλεγεί πληροφορία καθώς και στις ερωτήσεις του χρήστη σχετικά με τις αποφάσεις του ΕΣ. Το 15.4 παρουσιάζει τα κυριότερα μέρη ενός ΕΣ.

Σχήμα 15.4: Βασική Δομή ΕΣ



Λόγω του ότι η δημιουργία ενός ΕΣ απαιτεί πολύ χρόνο καθώς και υπολογιστική προσπάθεια, πρέπει να πληρούνται τα εξής προκειμένου να αποφασιστεί η υλοποίησή του:

- (α) Τα οφέλη πρέπει τουλάχιστον να αντισταθμίζουν το κόστος κατασκευής του ΕΣ.
- (β) Η έμπειρη γνώση πρέπει να μη είναι εύκολα προσβάσιμη αλλά να είναι απαραίτητη ή ιδιαίτερα χρήσιμη σε πληθώρα περιπτώσεων. Εφόσον η εξειδικευμένη γνώση είναι εύκολο να βρεθεί τότε μάλλον δεν είναι απαραίτητο το ΕΣ, ενώ εάν η γνώση είναι πολύ εξειδικευμένη και η πρόσβαση σε αυτή δύσκολη ή/και ακριβή τότε η δημιουργία ενός ΕΣ είναι συμφέρουσα.
- (γ) Το πρόβλημα πρέπει να μην αφορά σε κινητική επιδεξιότητα (καθαρά διαδικαστική γνώση), η οποία δε μπορεί να εκφραστεί μέσω δηλωτικής γνώσης (άρα κατηγορικής λογικής, σχημάτων και κανόνων).
- (δ) Το πρόβλημα πρέπει να είναι καλά δομημένο και να μη εμπεριέχει πολλή καθημερινή γνώση, η οποία είναι δύσκολο να περιγραφεί και αναπαρασταθεί. Με άλλα λόγια, η δηλωτική γνώση καλά καθορισμένων και περιορισμένων πεδίων ενδείκνυται για ΕΣ, ενώ η πλατιά, γενικευμένη, εμπειρική γνώση όχι.
- (ε) Πρέπει να μην είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος με άλλες υπολογιστικές τεχνικές. Αν, για παράδειγμα, υπάρχει κάποιος αλγόριθμος ο οποίος υλοποιεί τη λύση, τότε το ΕΣ δεν ενδείκνυται (λόγω κόστους, χρόνου – πολυπλοκότητας - και δυσκολίας κατασκευής).
- (στ) Το πρόβλημα πρέπει να έχει κατάλληλο μέγεθος, δηλαδή να επαρκεί η γνώση ενός ή λίγων ειδικών προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα σε μικρό χρονικό διάστημα (το πολύ σε μία ώρα).
- (ζ) Οι ειδικοί οι οποίοι θα προμηθεύσουν τη γνώση πρέπει να είναι πρόθυμοι να συνεργαστούν, ενώ πρέπει να έχουν επιπλέον την ικανότητα μετάδοσης της γνώσης τους. Εφόσον ένας ειδικός αισθάνεται ότι απειλείται από το έτοιμο ΕΣ, προφανώς δεν θα μεταδώσει τη γνώση του σωστά και με σαφή τρόπο.

Από τα παραπάνω περιορίζεται σημαντικά ο αριθμός των προβλημάτων των οποίων η επίλυση μέσω ΕΣ κρίνεται σκόπιμη. Για τέτοια προβλήματα όμως, τα οφέλη είναι σημαντικότερα (οικονομία και αμεσότητα στην επίλυση).

Κλασσικό ΕΣ (MYCIN)

Το MYCIN αποτελεί ένα από τα πρώιμα - και πλέον κλασσικά - ΕΣ, το οποίο έχει επηρεάσει το σχεδιασμό των περισσότερων εμπορικών ΕΣ. Αποσκοπεί αφενός στη διάγνωση ορισμένων μολυσματικών ασθενειών του αίματος και αφετέρου στον καθορισμό της κατάλληλης αντιμικροβιακής θεραπείας. Επιπλέον διαθέτει τη δυνατότητα λεπτομερούς επεξήγησης των αποφάσεων που λαμβάνει. Λόγω του ότι για τη ακριβή διάγνωση των μολυσματικών ασθενειών αίματος

τις οποίες χειρίζεται το MYCIN απαιτείται καλλιέργεια του αίματος του ασθενούς (τα αποτελέσματα της οποίας προκύπτουν μετά από 48 ώρες, χρόνος μέσα στον οποίο ο ασθενής ενδέχεται να έχει ήδη πεθάνει), είναι απαραίτητο η διάγνωση να πραγματοποιηθεί άμεσα έστω και με περιορισμένα δεδομένα (ελλιπείς πληροφορίες). Η προτεινόμενη θεραπεία αναγκαστικά λοιπόν καλύπτει μία ομπρέλλα από πιθανές αιτίες των συμπτωμάτων. Επιπλέον, η επιλογή της θεραπείας βασίζεται στην ευαισθησία του οργανισμού, στον εντοπισμό και το είδος της μόλυνσης καθώς και στην αποτελεσματικότητα του φαρμάκου.

Το MYCIN αποτελεί ΕΣ ανάλυσης μέσω συλλογιστικής προς τα πίσω με αναζήτηση σε βάθος και οπισθοδρόμηση. Απαρτίζεται από περίπου 500 κανόνες, όπου κάθε κανόνας συνοδεύεται από έναν βαθμό βεβαιότητας ο οποίος καθορίζει το πόσο ισχυρή είναι σχέση προϋποθέσεων-επακολούθων. Ο βαθμός βεβαιότητας λαμβάνει τιμές μέσα από το διάστημα $[0,+1]$, όπου το 0 χαρακτηρίζει την πλήρη έλλειψη βεβαιότητας στο επακόλουθο και το 1 χαρακτηρίζει την πλήρη βεβαιότητα σε αυτό. Η γλώσσα προγραμματισμού η οποία χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του MYCIN είναι η LISP, άρα το ΕΣ εκφράζεται – στο κατώτερο επίπεδό του - καθαρά μέσω κατηγορικής λογικής, με κάθε κανόνα να αναπαριστάται ως μία έκφραση της κατηγορικής λογικής. Έτσι είναι δυνατή η χρήση δεδομένων καθώς και αποτελεσμάτων άλλων κανόνων ως όροι στο κατηγορημα-έκφραση του αντίστοιχου κανόνα, κάτι που προσδίδει μεγάλη ευελιξία και οικονομία έκφρασης στο ΕΣ. Μειονέκτημα αυτής της αναπαράστασης αποτελεί η πυκνή επεξηγηματική ικανότητα του MYCIN η οποία μειώνει τη διαφάνειά του κατά τη συλλογιστική και επεξηγηματική λειτουργία του.

Ασαφή Έμπειρα Συστήματα(fuzzy expert systems)

Τα ασαφή ΕΣ αποτελούν επέκταση των ΕΣ της παραγράφου 4.2.2. Βασική πηγή έμνευσής τους είναι η ικανότητα της ΦΝ να χειρίζεται ανακριβή, αμφίσημα, ελλιπή, ποιοτικά ή γλωσσικά δεδομένα και πληροφορίες. Έτσι, τα ασαφή ΕΣ διαχειρίζονται τις μεταβλητές μέσω ασαφών (αντί δίτιμων) χαρακτηριστικών.

Ένα ασαφές ΕΣ έχει την ίδια δομή και τρόπο λειτουργίας με ένα κλασσικό ΕΣ. Η βάση δεδομένων του απαρτίζεται από κανόνες της μορφής EAN-TOTE. Οι μεταβλητές-προϋποθέσεις λαμβάνουν κάποια ακριβή τιμή (ή κάποιο συγκεκριμένο διάστημα τιμών), η οποία εκφράζεται μέσω ποσοστών συμμετοχής από τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής που περιέχουν τη συγκεκριμένη τιμή. Αυτό επιτρέπει στους κανόνες να εκφράζονται ποιοτικά, με τρόπο που προσομοιώνει τη γλωσσική έκφραση της ΦΝ.

Τα παρακάτω στάδια ακολουθούνται για την δημιουργία και λειτουργία ενός ασαφούς ΕΣ:

- Στάδιο ασαφοποίησης (fuzzification stage). Όλες οι μεταβλητές του προβλήματος (σχετικές είτε με προϋποθέσεις είτε με επακόλουθα) εκφράζονται μέσω της ασαφούς λογικής (μέσω συναρτήσεων και ποσοστών συμμετοχής).
- Συμπερασματικό στάδιο (inference stage). Οι EAN-TOTE κανόνες εκφράζουν ποιοτικά τη σχέση μεταξύ προϋποθέσεων και επακολούθων ως εξής:

EAN (Π είναι mflIi) ΑΛΗΘΗΣ Λ/Υ

(I 2 είναι mfI2j)	ΑΛΗΘΗΣ	Λ/V
... Λ/V		
(I n είναι mfInk)	ΑΛΗΘΗΣ	
TOTE (O είναι mfOI)		

όπου I1, I2, ..., In είναι οι ασαφώς εκφρασμένες προϋποθέσεις, O είναι το ασαφώς εκφρασμένο επακόλουθο, και mfI1i, mfI2j, ..., mfInk και mfOI είναι οι αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής των μεταβλητών που σχετίζονται με τον κανόνα. Οι βαθμοί βεβαιότητας των προϋποθέσεων υπολογίζονται από τα ποσοστά συμμετοχής τους στις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής, και συνδυάζονται μέσω των λογικών τελεστών MIN ή MAX για Λ και V λογικούς τελεστές, αντίστοιχα (όπως στο MYCIN) ώστε να αποδώσουν το βαθμό βεβαιότητας του επακολουθού O. Αυτός μετασχηματίζει τη συνάρτηση συμμετοχής mfOI με κάποιον τρόπο

- Φάση σύνθεσης (composition stage). Οι κανόνες οι οποίοι αναφέρονται στην ίδια μεταβλητή-επακόλουθο και των οποίων οι βαθμοί βεβαιότητας (για τις διάφορες συναρτήσεις συμμετοχής είναι μη μηδενικοί συνδυάζονται (πχ. αθροίζονται), δημιουργώντας τρόπον τινά μία σύμπλοκη συνάρτηση συμμετοχής.
- Φάση απο-ασαφοποίησης (de-fuzzification stage). Κάθε επακόλουθο λαμβάνει μία τιμή (crisp value) η οποία προέρχεται από την μίας τιμής (πχ. το κέντρο βάρους της σύμπλοκης συνάρτησης συμμετοχής).

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ασαφών ΕΣ έναντι των ΕΣ επικεντρώνουν στην:

(α) Ευρωστία λειτουργίας του ασαφούς ΕΣ. Η λειτουργία καθίσταται δυνατή ακόμη και με ελλιπή ή ανακριβή δεδομένα. Η ομαλή μετάβαση μεταξύ διαφορετικών επακολουθών ενισχύει τη διαφάνεια του ασαφούς ΕΣ καθώς και την εφαρμογή του σε προβλήματα ελέγχου.

(β) Ευελιξία. Η απόδοση του συστήματος είναι εύκολο να μεταβληθεί, πχ. μέσω αλλαγής του αριθμού, των ορίων ή των μορφών των συναρτήσεων συμμετοχής των μεταβλητών ή μέσω προσθήκης/διαγραφής/μετατροπής των κανόνων.

(γ) Οικονομία. Συνήθως, μικρός αριθμός κανόνων επαρκεί για ικανοποιητική λειτουργία.

15.7 Μηχανική Εκμάθηση

Ενα από τα σκληρότερα επιχειρήματα των πολέμιων της TN είναι ότι τα συστήματα TN δεν μπορούν να μάθουν έτσι ώστε να είναι ικανά να αλλάξουν και να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις του περιβάλλοντός τους. Η εκμάθηση του περιβάλλοντος προκειμένου να επιτευχθεί η αλληλεπίδραση με αυτό αποτελεί σημαντικό βήμα στην TN.

15.7.1 Στρατηγικές Εκμάθησης τεχνικών TN

Για την εκπαίδευση ενός συστήματος TN είναι απαραίτητη η ύπαρξη διδάσκοντος, δηλαδή η παρέμβαση του χρήστη/προγραμματιστή στο σύστημα TN. Κάποιες στρατηγικές εκμάθησης συστημάτων TN αποτελούν:

- Αποστήθιση (rote learning). Με αυτή τη στρατηγική δεν εκτελείται καμία συμπερασματική διαδικασία ή άλλου είδους μετασχηματισμός της γνώσης του προβλήματος/περιβάλλοντος από το σύστημα TN.
- Εκμάθηση μέσω ανάθεσης γνώσης (learning by instruction). Η γνώση του διδάσκοντος μετασχηματίζεται (αναπαριστάται έτσι ώστε να βρίσκεται) σε μία μορφή η οποία (α) είναι επεξεργάσιμη από το σύστημα TN, και (β) μπορεί να ενσωματωθεί στην υπάρχουσα γνώση. Με άλλα λόγια, καθίσταται και πάλι αναγκαία η επιλογή κατάλληλης αναπαράστασης (μορφής) της γνώσης από τον διδάσκοντα. Η γνώση είναι δηλωτικής μορφής, άρα μπορεί να εκφράζεται μέσω παραδειγμάτων, σχημάτων κλπ
- Εκμάθηση μέσω αναλογιών (learning by analogy). Πραγματοποιείται εκμάθηση όχι παραδειγμάτων ή γνώσης αλλά της σχέσης που αυτά έχουν με αποθηκευμένη γνώση σε κάποιο άλλο πεδίο ή περιβάλλον. Απαιτείται σημαντικά περισσότερη συμπερασματική διαδικασία από ότι στις προηγούμενες δύο στρατηγικές εκμάθησης, αφού το σύστημα TN εκτελεί τους μετασχηματισμούς της γνώσης από το ένα πεδίο στο άλλο ανεξάρτητα από τον διδάσκοντα (ο οποίος απλά παρουσιάζει τα παραδείγματα ή την γνώση).
- Εκμάθηση μέσα από παραδείγματα (learning from examples). Βασισμένη στην επαγωγική γνώση, η στρατηγική αυτή αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τρόπο εκμάθησης της TN. Ο διδάσκων παράγει ένα σύνολο παραδειγμάτων (θετικών μόνο ή θετικών καθώς και αρνητικών). Το σύστημα εκμάθησης προσπαθεί να δημιουργήσει μία υπόθεση η οποία πληροί όλα τα θετικά παραδείγματα αλλά κανένα από τα αρνητικά.

Εστω ότι υπάρχουν μόνο θετικά παραδείγματα. Η παρουσίαση του πρώτου παραδείγματος δημιουργεί την αρχική υπόθεση. Για κάθε νέο παράδειγμα ελέγχεται αυτή η υπόθεση. Αν αυτή εξακολουθεί να ισχύει για το παράδειγμα η υπόθεση παραμένει ως έχει, αλλιώς η υπόθεση αλλάζει ώστε να ικανοποιεί το νέο παράδειγμα καθώς και όλα τα προηγούμενα παραδείγματα (πχ. γενικεύοντας ένα χαρακτηριστικό εάν η αντίστοιχη τιμή του για το νέο παραδείγματα είναι διαφορετική από τις προηγούμενες ή ακόμη αφαιρώντας το χαρακτηριστικό εάν εμφανίζονται όλες οι δυνατές τιμές του). Η εκμάθηση ολοκληρώνεται όταν και μόνο όταν η υπόθεση ικανοποιεί το σύνολο των παραδειγμάτων.

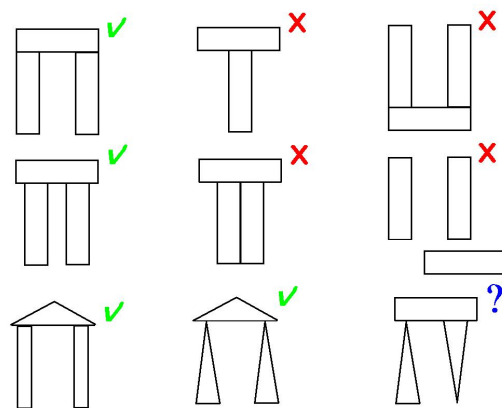
Εφόσον τα παραδείγματα είναι θετικά και αρνητικά, το πρώτο παράδειγμα πρέπει αναγκαστικά να είναι θετικό ώστε να δημιουργηθεί η αρχική υπόθεση. Σε κάθε επόμενη παρουσίαση ενός παραδείγματος εξετάζεται εάν αυτό είναι θετικό ή αρνητικό. Εφόσον είναι θετικό ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε πριν. Εφόσον το παράδειγμα είναι αρνητικό, εντοπίζονται τα χαρακτηριστικά του τα οποία διαφέρουν από την υπάρχουσα υπόθεση καθώς και εκείνα τα οποία δεν διαφέρουν από την υπάρχουσα υπόθεση. Ενώ τα μεν περιορίζουν τις τιμές του αντίστοιχου χαρακτηριστικού, τα δε υποδηλώνουν ότι το

χαρακτηριστικό δεν είναι σημαντικό για τη δημιουργία της υπόθεσης. Είναι προτιμότερη η ύπαρξη και αρνητικών παραδειγμάτων στο σύνολο παραδειγμάτων, τα οποία τρόπον τινά οριοθετούν/περιορίζουν το μοντέλο εξηγώντας τι δεν μπορεί να ισχύσει. Με τα αρνητικά παραδείγματα αποφεύγεται η υπεργενίκευση (overgeneralisation) του μοντέλου η οποία είναι δυνατό να συμβεί εάν υπάρχουν μόνο θετικά παραδείγματα. Πρόβλημα της στρατηγικής εκμάθησης μέσω παραδειγμάτων αποτελεί το πώς πραγματοποιείται η ανίχνευση των σημαντικών χαρακτηριστικών (επίπεδο περιγραφής της υπόθεσης). Το πρόβλημα αυτό αμβλύνεται εφόσον ώστε κάθε παράδειγμα να διαφέρει από τα προηγούμενα σε ένα μόνο χαρακτηριστικό ούτως ώστε η εκμάθηση να προχωρά σε μικρά βήματα.

Καθίσταται λοιπόν σαφής η σημασία που έχει η σωστή επιλογή του συνόλου παραδειγμάτων καθώς και η σειρά παρουσιάσής τους στο σύστημα ΤΝ ώστε να αποφεύγονται οι αβάσιμες υποθέσεις (άρα εξαιρείται ο ρόλος του διδάσκοντος). Σημειώνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις είναι προτιμότερος ο χαρακτηρισμός ενός παραδείγματος ως ειδική περίπτωση παρά η συλλήβδην αλλαγή της όλης υπόθεσης. Καθώς τα παραδείγματα εκφράζονται μέσω των χαρακτηριστικών τους, η υπόθεση περιγράφεται μέσω σημασιολογικών δικτύων, σχημάτων ή συστήματος κανόνων.

Ενα παράδειγμα δίνεται στο 15.5, όπου παρουσιάζεται το σύνολο παραδειγμάτων (συνοδευόμενων από ✓ και ✗ για θετικά και αρνητικά, αντίστοιχα, παραδείγματα) της αψίδας. Με την παρουσίαση των θετικών παραδειγμάτων φαίνεται ότι χαρακτηριστικά της αψίδας είναι:

Σχήμα 15.5: Παραδείγματα Αψίδας



- (α) συμμετρική δομή ως προς τον μεσοκάθετο άξονά της,
- (β) δύο όμοια υποστηρίγματα (παραλληλόγραμμο ή ισοσκελή τρίγωνα με την μα-

κρύτερη πλευρά ως ύψος και κάθετο άξονα συμμετρίας), το πάχος των οποίων δεν είναι καθορισμένο,

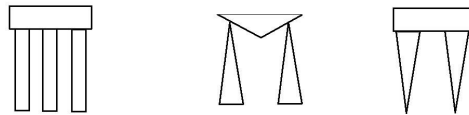
(γ) μία κορυφή (παραλληλόγραμμο ή ισοσκελές τρίγωνο με την μακρύτερη πλευρά ως βάση και κάθετο άξονα συμμετρίας), και

(δ) στήριξη η οποία δεν είναι αναγκαστικό να πραγματοποιείται στα άκρα της κορυφής. Από τα αρνητικά παραδείγματα τονίζεται:

(ε) η υποστηρικτική σχέση υποστηριγμάτων-κορυφής, καθώς και

(στ) ότι δεν επιτρέπεται να υπάρχει ένα μόνο υποστήριγμα ή τα υποστηρίγματα να εφάπτονται. Παρ' όλο που αυτό το σύνολο παραδειγμάτων μοιάζει επαρκές, το τελευταίο παράδειγμα του 15.6 δείχνει τη διαφορά ΦΝ και συστήματος ΤΝ. Η ΦΝ δέχεται αυτό το αντικείμενο ως αψίδα καθότι πληροί τη γενική μορφή αψίδας καθώς και το χρηστικό ρόλο της (να περνούν από κάτω άνθρωποι, οχήματα κλπ.), έστω και εάν δεν έχει συμμετρική δομή και τα υποστηρίγματα διαφέρουν μεταξύ τους και δεν το ένα από αυτά έχει σχήμα μη γνωστό από τα παραδείγματα.

Σχήμα 15.6: Αψίδες;



Μία άλλη έκφραση της στρατηγικής εκμάθησης μέσα από παραδείγματα χρησιμοποιεί τα διαθέσιμα παραδείγματα προκειμένου να δημιουργήσει έναν κανόνα-υπόθεση ο οποίος τα ικανοποιεί. Αρχικά τα χαρακτηριστικά καθώς και το αποτέλεσμα των παραδειγμάτων ταξινομούνται βάσει των αντίστοιχων τιμών τους. Κατόπιν, σχηματίζεται ένα δένδρο με αρχικό κόμβο (κορυφή) ένα από τα χαρακτηριστικά (πλην του αποτελέσματος) και παρακλάδια τις τιμές του χαρακτηριστικού από τα παραδείγματα. Για κάθε παρακλάδι με μικτό αποτέλεσμα επιλέγεται ένα νέο χαρακτηριστικό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η ανάπτυξη του δένδρου τερματίζεται όταν κανένα παρακλάδι δεν έχει μικτό αποτέλεσμα, οπότε ο κανόνας-υπόθεση εκφράζεται από τις διαδρομές μεταξύ αρχικού και τελικών κόμβων του δένδρου με το ζητούμενο αποτέλεσμα.

- Εκμάθηση μέσα από παρατήρηση και ανακάλυψη (learning from observation and discovery). Αποτελεί γενική μορφή της επαγωγικής διαδικασίας η οποία περιλαμβάνει τα συστήματα ανακάλυψης, την ανάπτυξη θεωριών, τη δημιουργία των κριτηρίων κατηγοριοποίησης για

τη παραγωγή ταξινομιών ή ιεραρχιών, χωρίς όμως την ύπαρξη διδάσκοντος. Απαιτείται περισσότερη συμπερασματική διαδικασία από ότι σε όλες τις άλλες μορφές εκμάθησης καθώς δεν υπάρχουν παραδείγματα ή δεν είναι γνωστή ποια είναι η απαραίτητη γνώση ή ο κατάλληλος μετασχηματισμός ή τα μέλη της αναλογίας, άρα το σύστημα TN πρέπει από μόνο να στρέψει την προσοχή του στο κατάλληλο μέρος του περιβάλλοντος και να εφαρμόσει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά, μετασχηματισμό ή αναλογία ή, τέλος, να ανακαλύψει τα ενδιαφέροντα παραδείγματα-χαρακτηριστικά του προβλήματος.

15.7.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ, artificial neural networks)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) απορρέουν από την πεποίθηση ότι είναι δυνατό να προσομοιωθούν κάποιες ιδιότητες του εγκεφάλου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένας τεχνητός εγκέφαλος (σε απλουστευμένη μορφή). Με αυτή την έννοια, τα ΤΝΔ βρίσκονται μεταξύ της ΤΝ και της προσομοίωσης του μέσου της ΦΝ. Υπερτερούν των προαναφερθεισών τεχνικών ΤΝ στη δυνατότητα άμεσης προσαρμογής σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον χωρίς την ανάγκη διδάσκοντος καθώς και στην παραλληλία και καταναεμημένη επεξεργασία/αποθήκευση της γνώσης.

Βασικά στοιχεία δομής εγκεφάλου

Η δομή του εγκεφάλου είναι διαφορετική από αυτή των υπολογιστικών συστημάτων: ο εγκέφαλος δεν περιέχει σειρά από εντολές που εκτελούνται με αναφορά στις θέσεις μνήμης του, αλλά μοιάζει περισσότερο με σύστημα στοιχειωδών κυκλωμάτων συνδεδεμένων σε σειρά και παράλληλα τα οποία μετατρέπουν την είσοδο (αλληλεπίδραση μεγάλου αριθμού απλών στοιχείων/επεξεργαστών). Ο εγκέφαλος έχει βάρος 1.5 κιλά περίπου και αποτελείται από 1011 νευρώνες (εγκεφαλικά κύτταρα, neurons ή brain cells) με 1014 συνδέσεις (connections) μεταξύ τους. Υπάρχει εξειδίκευση νευρώνων – και τμημάτων του εγκεφάλου – που αφιερώνονται σε συγκεκριμένες λειτουργίες. Κατ' αναλογίαν, μπορούν να διακριθούν διάφορα είδη νευρώνων όσον αφορά στο σχήμα, στο μέγεθος, στη συνδεσμολογία καθώς και στη θέση τους στον εγκέφαλο (άρα και στη λειτουργία στην οποία συμμετέχουν). Όλοι όμως οι νευρώνες έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά

- Τον πυρήνα (nucleus) όπου παράγονται συστατικά (πχ. μιτοχόνδρια, ένζυμα και ιόντα) τα οποία είναι απαραίτητα για τη διατήρηση και ομαλή λειτουργία του νευρώνα.
- Απολήξεις, οι οποίες έχουν μεγάλο μήκος και περιέχουν πληθώρα σημείων επαφής (τις συνάψεις, synapses) με τους συνδεδεμένους νευρώνες. Οι απολήξεις είναι δύο ειδών:
 - (α) Δενδρίτες (dendrites). Αυτοί είναι της τάξης των χιλιάδων για κάθε νευρώνα και οι συνάψεις τους δέχονται τα ερεθίσματα τα οποία στέλνουν οι συνδεδεμένους νευρώνες.
 - (β) Αξονας (axon). Είναι μοναδικός για κάθε νευρώνα και οι συνάψεις του μεταβιβάζουν τα ερεθίσματα του νευρώνα στους συνδεδεμένους νευρώνες.

Τα πιο σημαντικά στοιχεία της επικοινωνίας ενός νευρώνα με τους συνδεδεμένους νευρώνες είναι:

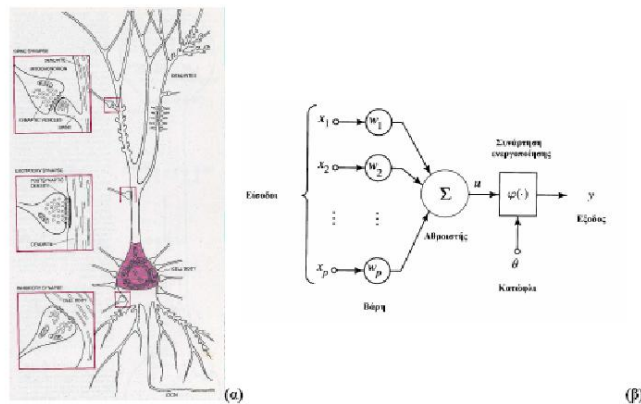
1. Οι συναπτικές δυνάμεις (connection strengths) των συνάψεων του νευρώνα. Η συναπτική δύναμη μίας σύναψης εκφράζει την ένταση και τον τρόπο (διεγερτικό, exhitatory ή κατασταλτικό, inhibitory) με τον οποίο ο νευρώνας επηρεάζει ή επηρεάζεται από τους άλλους νευρώνες. Παρ' όλο που ο διεγερτικός ή κατασταλτικός χαρακτήρας μίας σύνδεσης δεν είναι δυνατό να αλλάξει, η προσαρμογή στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει αλλαγή της έντασης της συναπτικής δύναμης (αύξηση ή μείωση).
2. Η κατάσταση του νευρώνα. Αυτή είναι είτε ενεργή (active) είτε ανενεργή (inactive) και καθορίζει το εάν ο νευρώνας μεταβιβάζει ερεθίσματα στους συνδεδεμένους στον άξονά του νευρώνες. Η κατάσταση εξαρτάται από το εάν το σύνολο των ερεθισμάτων στο νευρώνα (αλγεβρικό άθροισμα των διεγερτικών και κατασταλτικών συναπτικών δυνάμεων στο νευρώνα από τους συνδεδεμένους νευρώνες) ξεπερνά ένα κατώφλι. Το κατώφλι αυτό όχι μόνο διαφέρει από νευρώνα σε νευρώνα, αλλά και για κάθε νευρώνα είναι δυνατό να αλλάξει είτε λόγω κορεσμού (saturation, εφόσον ο νευρώνας καθίσταται πολύ συχνά ενεργός), είτε λόγω εκμάθησης, είτε ακόμα λόγω άλλων παραγόντων (πχ. γήρανση, ασθένεια κλπ.). Η ενεργοποίηση του νευρώνα εκφράζεται ως ακολουθία αποστολής δέλτα-ερεθισμάτων στους νευρώνες οι οποίοι έχουν συνάψεις στον άξονα του νευρώνα. Η ένταση καθώς και η συχνότητα της ακολουθίας εξαρτάται από το κατά πόσο το σύνολο των ερεθισμάτων στο νευρώνα ξεπερνά το κατώφλι.
3. Η πυκνή δομή και συνδεσμολογία του εγκεφάλου. Η αποθήκευση και διαχείριση (κωδικοποίηση) της γνώσης πραγματοποιείται από τη συλλογική αλληλεπίδραση των συνάψεων καθώς και των καταστάσεων των συνδεδεμένων νευρώνων. Σε όλον τον εγκέφαλο υπάρχει περίσσεια νευρώνων, οπότε η κωδικοποίηση είναι αραιή, κατανεμημένη και εκτελείται παράλληλα από πολλούς νευρώνες. Αυτό αποδεικνύεται και από την καταστροφή μικρών περιοχών ή μεμονωμένων νευρώνων του εγκεφάλου σε ατυχήματα ή εγκεφαλικά: οι γειτονικοί νευρώνες οι οποίοι εκτελούν παρόμοια λειτουργία με τους απωλεσθέντες νευρώνες προσαρμόζονται ώστε να αναλάβουν τη λειτουργία τους και να τους αντικαταστήσουν σε κάποιο βαθμό (πλαστικότητα εγκεφάλου). Η αραιή και κατανεμημένη κωδικοποίηση είναι υπεύθυνη για την ευρωστία του εγκεφάλου σε ελλιπή ή μερικώς παραμορφωμένα ερεθίσματα ή εισόδους.

Βασικά στοιχεία δομής ΤΝΔ

Εμπνευσμένα από τα βασικά τμήματα καθώς και από τον τρόπο επικοινωνίας των νευρώνων, οι κόμβοι των ΤΝΔ 15.7β *απαρτίζονται* από:

Τις εισόδους (inputs) στον κόμβο x_1, x_2, \dots, x_p , οι οποίες προσομοιώνουν τις συνάψεις των δενδριτών του νευρώνα και εκφράζουν τα ερεθίσματα των συνδεδεμένων κόμβων ή του περιβάλλοντος.

Σχήμα 15.7: Νευρώνας του ανθρώπινου εγκεφάλου (α), κόβος ΤΝΔ (β)



Τα βάρη (weights ή connection strengths) w_1, w_2, \dots, w_p , τα οποία αντιστοιχούν στις συναπτικές δυνάμεις των νευρώνων και αναπαριστούν την επίδραση που έχουν οι αντίστοιχες εισόδοι x_1, x_2, \dots, x_p στην κατάσταση του κόμβου. Τα βάρη χαρακτηρίζονται από ένα πρόσημο (+ ή -, αντίστοιχο της διεγερτικής ή κατασταλτικής σύναψης) και από έναν αριθμό (αντίστοιχο της έντασης της σύναψης).

Ένα αθροιστή Σ ο οποίος αθροίζει (αλγεβρικά) τα γινόμενα των εισόδων με τα αντίστοιχα βάρη ώστε να υπολογιστεί η συνολική είσοδος u στον κόμβο (\square).

Μία συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) ϕ και ένα κατώφλι (threshold) θ . Στην απλούστερη περίπτωση γίνεται σύγκριση της συνολικής εισόδου u με το κατώφλι θ προκειμένου να κριθεί εάν ο κόμβος θα γίνει ο ίδιος ενεργός και θα μεταφέρει ερεθίσματα σε άλλους συνδεδεμένους κόμβους. Στη γενικότερη περίπτωση, το κατώφλι θ προστίθεται στη συνολική είσοδο u οπότε – μέσω της ϕ - υπολογίζεται η έξοδος y του κόμβου. Η έξοδος αποτελεί αριθμό ο οποίος αντιστοιχεί στην ένταση και συχνότητα της ακολουθίας δέλτα-ερεθισμάτων του ενεργού νευρώνα. Στο 15.7 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα συνάρτησης ενεργοποίησης, η οποία δίνεται από το τύπο για $\square = u + \theta$ ($\theta = -0.3$).

Τα ΤΝΔ (15.8(β)) έχουν ως αφετηρία τους τον εγκέφαλο, αλλά περιορίζονται σε όχι περισσότερους από 1000 κόμβους. Η δομή τους είναι η εξής:

- Οι κόμβοι έχουν καθορισμένη διάταξη και βρίσκονται συνήθως σε επάλληλα επίπεδα (layers). Ανάλογα με τη θέση του στο ΤΝΔ, ένας κόμβος χαρακτηρίζεται ως:

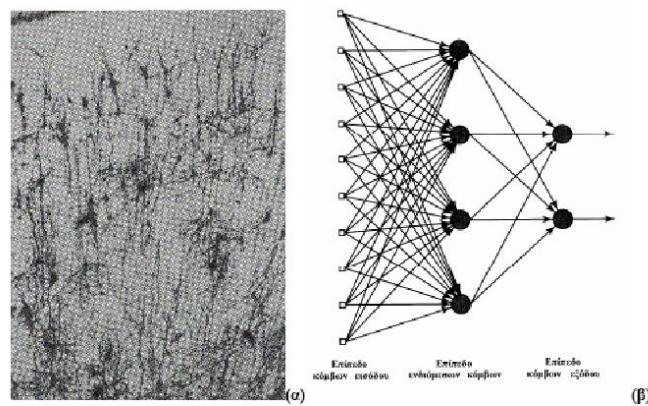
Κόμβος εισόδου (input node), οπότε βρίσκεται στο κατώτερο επίπεδο του ΤΝΔ (επίπεδο εισόδου (input layer), το αριστερότερο κάθετο επίπεδο κόμβων στο 15.8(β)) και λαμβάνει ως είσοδο πληροφορία από το περιβάλλον, πχ. την τιμή ενός συγκεκριμένου pixel από κάποια ψηφιακή εικόνα, έναν αριθμό κλπ. Πριν την εισαγωγή

της, η πληροφορία κανονικοποιείται σε συγκεκριμένο διάστημα το οποίο μπορεί να δεχτεί η συνάρτηση ενεργοποίησης του κόμβου.

Κόμβος εξόδου (output node), οπότε βρίσκεται στο ανώτερο επίπεδο του ΤΝΔ (επίπεδο εξόδου (output layer), το δεξιότερο κάθετο επίπεδο κόμβων στο 15.8(β)) και αποδίδει την έξοδό του στο περιβάλλον.

Ενδιάμεσος κόμβος (hidden node), οπότε βρίσκεται σε ενδιάμεσο επίπεδο κόμβων (hidden layer), δέχεται εισόδους από άλλους κόμβους και - μέσω της συνάρτησης ενεργοποίησης του - αποδίδει την έξοδό του σε άλλους κόμβους του ΤΝΔ.

Σχήμα 15.8: Τμήμα ανθρώπινου εγκεφάλου (α), κόβος ΤΝΔ (β)



- Οι συνδέσεις του ΤΝΔ είναι δυνατό να εφαρμόζονται μεταξύ κόμβων διαφορετικών επιπέδων - και να κατευθύνονται είτε προς κόμβο επόμενου επιπέδου (forward connection) είτε προς κόμβο προηγούμενου επιπέδου (backward connection) -, αλλά είναι επίσης δυνατές και μεταξύ κόμβων του ίδιου επιπέδου ή ακόμα και μεταξύ του ίδιου κόμβου (self-connection). Η συνδεσμολογία (connectivity) του ΤΝΔ εκφράζει τον συνολικό τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι του ΤΝΔ αλληλεπιδρούν. Λόγω του ότι η συνδεσμολογία είναι κατά πολύ υπεύθυνη για τον τρόπο εκμάθησης και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ΤΝΔ, γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένες δομές ή αρχιτεκτονικές ΤΝΔ οι οποίες έχουν ως ειδοποιό διαφορά τους τη δομή των κόμβων (συναρτήσεις ενεργοποίησης και κατώφλια), τον αριθμό των επιπέδων κόμβων και τη συνδεσμολογία τους.
- Τα βάρη των συνδέσεων λαμβάνουν αριθμητικές τιμές μέσα από συγκεκριμένο διάστημα (πχ. $[-1,+1]$), τα όρια του οποίου δεν υπερβαίνονται προκειμένου να μην κορεστούν οι συνδέσεις και, κατά συνέπεια, η έξοδος του κόμβου.
- Είθισται τα ρολόγια των κόμβων του ίδιου επιπέδου να είναι συγχρονισμένα (ενιαίο ρολόι ανά επίπεδο) και τα ρολόγια διαδοχικών επιπέδων να λειτουργούν έτσι ώστε να πραγματοποιείται πρώτα η ενεργοποίηση όλων των κόμβων του επιπέδου εισόδου, αμέσως μετά τον πρώτο ενδιάμεσο επίπεδο και ου τω καθ' εξής μέχρι το επίπεδο εξόδου.

Εκμάθηση ΤΝΔ

Στη γενική περίπτωση, η λειτουργία του ΤΝΔ ξεκινά με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των κόμβων εισόδου από τις πληροφορίες του περιβάλλοντος, συνεχίζεται με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των κόμβων ενδιάμεσων επιπέδων και ολοκληρώνεται με την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των κόμβων του ανώτερου επιπέδου και την απόδοση των αντίστοιχων εξόδων. Για συγκεκριμένες εισόδους και καθορισμένη αρχιτεκτονική, οι έξοδοι του ΤΝΔ εξαρτώνται από τον αριθμό των κόμβων στα ενδιάμεσα επίπεδα καθώς και από τα βάρη των συνδέσεων: μεταβάλλοντας οποιοδήποτε από τα παραπάνω αλλάζουν και οι έξοδοι. Η μεταβολή των βαρών των συνδέσεων συνεπάγεται άμεση μεταβολή της συμπεριφοράς του ΤΝΔ, άρα είναι δυνατό με την κατάλληλη ρύθμισή τους (fine-tuning) να αποδίδονται συγκεκριμένες έξοδοι για συγκεκριμένες εισόδους. Η διαδικασία σταδιακής μεταβολής των βαρών ενός ΤΝΔ προκειμένου να επιτευχθεί η αντιστοιχία συγκεκριμένων ζευγών εισόδων-εξόδων αποτελεί την εκμάθηση του ΤΝΔ (ANN learning). Αυτή πραγματοποιείται ως εξής:

Βήμα 1. Συλλογή συνόλου γνωστών ζευγών εισόδων-εξόδων (x,y) προς εκμάθηση (σύνολο εκμάθησης, training set).

Βήμα 2. Επιλογή τυχαίων τιμών για τα βάρη του ΤΝΔ μέσα από το συγκεκριμένο διάστημα το οποίο δεν προκαλεί κορεσμό των συνδέσεων. Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων. Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών.

Βήμα 3. Για κάθε ζεύγος εισόδων-εξόδων (x,y) :

Βήμα 3.1. Είσοδος του x στο (επίπεδο εισόδου του) ΤΝΔ, ενεργοποίηση των κόμβων του ΤΝΔ και απόδοση της εξόδου $y_{ΤΝΔ}$.

Βήμα 3.2. Σύγκριση της εξόδου $y_{ΤΝΔ}$ με την επιθυμητή έξοδο y και υπολογισμός του σφάλματος e . Έλεγχος του εάν το σφάλμα e υπερβαίνει μία επιτρεπόμενη τιμή.

Βήμα 3.2.1. Ανάθεση της τιμής 1 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών. Πραγματοποίηση αλλαγής των βαρών του ΤΝΔ ανά επίπεδο. Πρώτα μεταβάλλονται τα βάρη των κόμβων του επιπέδου εξόδου, μετά τα βάρη των κόμβων του αμέσως προηγούμενου επιπέδου και τελευταία τα βάρη του επιπέδου εισόδου. Η μεταβολή του κάθε βάρους είναι μικρή, ανάλογη της τρέχουσας τιμής του καθώς και (α) ανάλογη του σφάλματος e εάν ο αντίστοιχος κόμβος ανήκει στο επίπεδο εξόδου, (β) ανάλογη της αλλαγής των βαρών των συνδεδεμένων κόμβων ανωτέρων επιπέδων εάν ο αντίστοιχος κόμβος δεν ανήκει στο επίπεδο εξόδου.

Βήμα 3.2.2. Επιστροφή στο Βήμα 3.

Βήμα 4. Έλεγχος του εάν η μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών λαμβάνει την τιμή 0.

Βήμα 4.1. Απόφαση ότι έχει επιτευχθεί σύγκλιση (convergence) του ΤΝΔ για το σύνολο εκμάθησης (δηλαδή το σφάλμα e είναι ικανοποιητικά μικρό για όλα τα ζεύγη εισόδων-εξόδων του συνόλου εκμάθησης). Μετάβαση στο Βήμα 5.

Βήμα 4.2. Αύξηση της τιμής της μεταβλητής η οποία εκφράζει τον αριθμό επαναλήψεων κατά 1. Έλεγχος του εάν η μεταβλητή αυτή υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή (ανώτατο επιτρεπτό αριθμό επαναλήψεων εκμάθησης).

Εάν ναι,

Βήμα 4.2.1. Απόφαση ότι δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί σύγκλιση του ΤΝΔ. Μετάβαση στο Βήμα 5.

Βήμα 4.2.2. Ανάθεση της τιμής 0 στη μεταβλητή η οποία εκφράζει αλλαγή βαρών. Μετάβαση στο Βήμα 3.

Βήμα 5. Τέλος εκμάθησης.

Το **Βήμα 3** επαναλαμβάνεται αρκετές φορές (της τάξης των εκατοντάδων ή, ακόμη και, χιλιάδων φορών) και τερματίζεται είτε όταν επιτευχθεί η σύγκλιση, είτε όταν ο αριθμός επαναλήψεων υπερβεί το προκαθορισμένο όριο οπότε και συμπεραίνεται ότι δεν είναι δυνατή η σύγκλιση. Στην προηγούμενη μέθοδο εκμάθησης το σφάλμα e και η αλλαγή των βαρών υπολογίζονται ανεξάρτητα για κάθε ζεύγος εισόδων-εξόδων του συνόλου εκμάθησης (on-line ή pattern training). Εναλλακτικά, είναι δυνατόν το σφάλμα να υπολογίζεται συνολικά για όλα τα ζεύγη εισόδων-εξόδων, οπότε η αλλαγή των βαρών πραγματοποιείται μία φορά για ολόκληρο το σύνολο εκμάθησης (batch training). Από τα προηγούμενα καθίσταται προφανές ότι τα βάρη των συνδέσεων αποτελούν τις κατεξοχήν αποθήκες γνώσης των ΤΝΔ. Μέσω της εκμάθησης είναι δυνατό να προσεγγιστούν: Η ρύθμιση των βαρών πρέπει να είναι τέτοια ώστε το ΤΝΔ να είναι ικανό να αποκρίνεται σωστά και σε νέες εισόδους (test patterns), άρα να επιδεικνύει γενίκευση (generalisation). Η γενίκευση χαρακτηρίζει την απαιτούμενη μορφή και πολυπλοκότητα της προσεγγιζόμενης συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης έτσι ώστε η ορθή απόκριση να επεκτείνεται σε μη τετριμμένα σύνολα ελέγχου (text sets). Για την επιτυχημένη γενίκευση, συνήθως στρατηγική κατά την εκμάθηση είναι συγχρόνως με το σύνολο εκμάθησης να χρησιμοποιείται και ένα σύνολο τεκμηρίωσης (validation set): η ρύθμιση των βαρών εκτελείται από το σύνολο εκμάθησης (έλεγχος ικανοποιητικής προσέγγισης της συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης) σε συνδυασμό με το σύνολο τεκμηρίωσης (επιλογή καταλληλότερης συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης).

- Η επιλογή αρχικών βαρών του ΤΝΔ. Είναι δυνατόν κάποια αρχικά βάρη να μην επιτρέπουν ή να επιβραδύνουν σημαντικά τη σύγκλιση, ενώ κάποια άλλα να την επισπεύδουν.
- Η σειρά παρουσίασης των ζευγών του συνόλου εκμάθησης (ισχύει για τη πρώτη μέθοδο εκμάθησης). Για γρηγορότερη σύγκλιση του ΤΝΔ, είναι σκόπιμο να αλλάζει η σειρά παρουσίασης των ζευγών σε κάθε συνολική παρουσίασή τους. Με αυτό τον τρόπο, η κάθε αλλαγή βαρών δεν ακολουθείται πάντα από την ίδια αλλαγή βαρών, οπότε οι διαδοχικές αλλαγές βαρών δεν εξουδετερώνονται πάντα κατά τον ίδιο τρόπο.
- Ο αριθμός των κόμβων στα ενδιάμεσα επίπεδα. Η επιλογή του σωστού αριθμού κόμβων ανά ενδιάμεσο επίπεδο προωθεί τη δημιουργία συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης

κατάλληλης πολυπλοκότητας. Αντίθετα, η ύπαρξη μη επαρκούς αριθμού κόμβων δεν επιτρέπει την ικανοποιητική προσέγγιση, ενώ η ύπαρξη περισσότερων κόμβων από ό,τι είναι απαραίτητο δημιουργεί προβλήματα γενίκευσης

- Ο αριθμός ενδιάμεσων επιπέδων. Η μη χρήση ενδιάμεσων επιπέδων κόμβων επιτρέπει μόνο την επίλυση γραμμικά διαχωρίσιμων (linearly separable) προβλημάτων. Έχει αποδειχτεί ότι η χρήση ενός ενδιάμεσου επιπέδου κόμβων επιτρέπει την προσέγγιση οποιασδήποτε συνάρτησης ή διαχωριστικής καμπύλης (Cybenko, 1989), με την πολυπλοκότητα της προσέγγισης να εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων στο ενδιάμεσο επίπεδο. Η χρήση περισσότερων του ενός ενδιάμεσων επιπέδων επιτρέπει την πιο εύκολη δημιουργία πολύπλοκων συναρτήσεων ή διαχωριστικών καμπυλών.

Καθότι, για λόγους γενίκευσης, προτιμάται η πιο απλή συνάρτηση ή διαχωριστική καμπύλη η οποία ικανοποιεί συγχρόνως τα σύνολα εκμάθησης και τεκμηρίωσης, είναι προτιμότερη η επιλογή ενός μικρού ΤΝΔ (λίγοι κόμβοι, λίγα ενδιάμεσα επίπεδα) και η μετέπειτα επέκτασή του εάν και μόνο εάν η πολυπλοκότητα της προσεγγιζόμενης συνάρτησης δεν επιτυγχάνεται για διαφορετικές αρχικοποιήσεις βαρών και διαφορετικές παρουσιάσεις των ζευγών του συνόλου εκμάθησης.

Αποτίμηση ΤΝΔ

Τα ΤΝΔ υπερτερούν των προαναφερθεισών τεχνικών ΤΝ όσον αφορά στην:

- (α) Αμεση εκμάθηση (προσαρμογή στο περιβάλλον) μέσα από παραδείγματα χωρίς την ανάγκη ύπαρξης διδάσκοντος ή την ανάγκη προσδιορισμού της αναλυτικής λύσης.
- (β) Κατανεμημένη αναπαράσταση της γνώσης στα βάρη των ΤΝΔ έναντι της δυαδικής αναπαράστασης των τεχνικών ΤΝ. Αυτή η αναπαράσταση επιτρέπει την αποδοτική διαχείριση πολλαπλών δεδομένων και περιορισμών χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων συνδυαστικής έκρηξης.
- (γ) Σε συνδυασμό με την παράλληλη και αραιή κωδικοποίηση της γνώσης στα βάρη, η κατανεμημένη αναπαράσταση προωθεί την ευρωστία των ΤΝΔ σε ελλιπή ή παραμορφωμένα δεδομένα. Η λειτουργία δε σταματά σε περίπτωση εισαγωγής λανθασμένων δεδομένων ή λόγω της έλλειψης κάποιων χαρακτηριστικών των δεδομένων. Απλά, παρατηρείται μία σταδιακή επιδείνωση (graceful degradation) της ακρίβειας των ΤΝΔ η οποία είναι ανάλογη της απόκλισης της εισαγόμενης τιμής από την αναμενόμενη καθώς και ανάλογη του ποσοστού των χαρακτηριστικών τα οποία λείπουν. Το ίδιο ισχύει και για τη βλάβη μέρους των ΤΝΔ (πχ. κάποιων κόμβων, συνδέσεων ή βαρών), οπότε η επιδείνωση της λειτουργίας τους είναι ανάλογη του αριθμού των μη λειτουργικών κόμβων ή του αριθμού και μεγέθους του βάρους των μη λειτουργικών συνδέσεων.
- (δ) Δυνατότητα γενίκευσης και ορθής απάντησης σε νέες εισόδους.

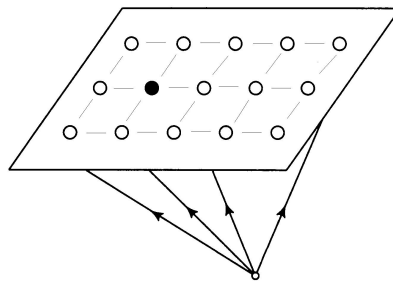
Τα επόμενα δύο παραδείγματα τονίζουν αυτά τα σημεία.

Ταξινόμηση (κατηγοριοποίηση) μερών λόγου Τα ΤΝΔ αυτοοργάνωσης (self-organising maps, Kohonen, 1988) είναι εμπνευσμένα από τους τοπολογικούς χάρτες του εγκεφάλου. Οι κόμβοι δομούνται σε ένα επίπεδο το οποίο αναπτύσσεται ως πλέγμα σε μία ή δύο διαστάσεις (15.9) με κατασταλτικές συνδέσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων. Κατά την εκμάθηση του ΤΝΔ αυτοοργάνωσης:

(α) οι κόμβοι ανταγωνίζονται (competition) μεταξύ τους όσον αφορά στην ομοιότητα των βαρών τους με την εκάστοτε είσοδο,

(β) ο κόμβος με την μεγαλύτερη ομοιότητα των βαρών του με την είσοδο, καθώς και - σε μικρότερο βαθμό - οι άμεσοι γείτονές του, μεταβάλλουν τα βάρη τους ώστε αυτά να μοιάζουν ακόμη περισσότερο στην εκάστοτε είσοδο.

Σχήμα 15.9: ΤΝΔ αυτοοργάνωσης



Αυτός ο τρόπος εκμάθησης έχει ως αποτέλεσμα το ΤΝΔ αυτοοργάνωσης να διαμορφώνει τα βάρη των κόμβων του έτσι ώστε τα βάρη κοντινών κόμβων μοιάζουν ενώ αυτά μακρινών κόμβων διαφέρουν σημαντικά. Αρα, το πλέγμα αποτελεί έναν τοπολογικό χάρτη όπου δημιουργούνται περιοχές του πλέγματος με κοινά χαρακτηριστικά. Κατά τον έλεγχο του ΤΝΔ, οι είσοδοι εφαρμόζονται σε όλους τους κόμβους του ΤΝΔ και επικρατεί ο κόμβος ο οποίος μοιάζει περισσότερο στη είσοδο (winner-take-all). καθότι είσοδοι οι οποίες μοιάζουν τοποθετούνται κοντά στον τοπολογικό χάρτη, ενώ είσοδοι οι οποίες διαφέρουν σημαντικά τοποθετούνται μακριά, δημιουργείται μία κατηγοριοποίηση των εισόδων ανάλογα με τις περιοχές του πλέγματος οι οποίες

έχουν καθοριστεί κατά την εκμάθηση. ΤΝΔ αυτοοργάνωσης έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την ταξινόμηση και κατηγοριοποίηση δεδομένων.

15.8 Βελτιστοποίηση – Γενετικοί Αλγόριθμοι

Όπως φαίνεται από τις προαναφερθείσες μεθόδους αναζήτησης και ικανοποίησης περιορισμών, η ΤΝ δεν δρα προσεγγιστικά, αλλά αναζητά μία ακριβή (και σε πολλές περιπτώσεις, τη βέλτιστη) λύση. Γι' αυτό στις απαιτήσεις μνήμης των δύο αυτών τεχνικών περιλαμβάνεται και η πορεία προς την τρέχουσα κατάσταση (ώστε να μην την επαναλαμβάνεται κάποια κατάσταση) καθώς και η ποιότητα της – μέχρι στιγμής - καλύτερης λύσης. Η ακολουθία των μεταβάσεων πραγματοποιείται σειριακά και είναι ομαλή από άποψη "γειτονιάς" (οι διαδοχικές καταστάσεις συνδέονται, επεκτείνουν η μία την άλλη, άρα "μοιάζουν" μεταξύ τους) αλλά όχι από άποψη ποιότητας. Εμπνευσμένοι από τη κληρονομικότητα που απαντάται στα έμβια όντα - και συγκεκριμένα από την εξέλιξη των όντων, την επικράτηση των καλύτερων όσον αφορά τη δυνατότητα προσαρμογής τους στο περιβάλλον -, οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ) αποτελούν μία στοχαστική (και όχι εξαντλητική) μέθοδο βέλτιστης αναζήτησης/ικανοποίησης περιορισμών, δηλ. αποσκοπούν στην ταχεία και οικονομική εύρεση μιας επαρκώς καλής (και όχι απαραίτητα της καλύτερης) λύσης. Έτσι, 30 χρόνια πριν βιολόγοι, χρησιμοποίησαν Η/Υ για προσομοίωση βιολογικών συστημάτων, πληθυσμών. Δημιουργήθηκαν έτσι οι ΓΑ, οι οποίοι στηρίζονται στην αναλογία με τα φυσικά φαινόμενα/μηχανισμούς και εστιάζουν στην εξέλιξη (κατά Darwin), την κληρονομικότητα, τον πολλαπλασιασμό και την επικράτηση των πλέον συμβατών (με το περιβάλλον) ατόμων του πληθυσμού. Η υλοποίηση πραγματοποιείται στο υπερ-συμβολικό επίπεδο. Έτσι,

- Ο πληθυσμός χρωμοσωμάτων αποτελεί σύνολο δυνατών καταστάσεων του προβλήματος.
- Τα χρωμοσώματα, αποτελούμενα από γονίδια (χαρακτηριστικά), εξελίσσονται σε ακολουθία γενιών μέσω διασταυρώσεων, μεταλλάξεων σε επίπεδο γονιδίου και επιλογής.
- Η συνάρτηση καταλληλότητας εκφράζει τον σκοπό του πληθυσμού και συνεπώς την καταλληλότητα/ποιότητα λύσης.

Τα πιο κατάλληλα χρωμοσώματα επιβιώνουν σε κάθε γενιά, οδηγώντας σε βελτιστοποίηση του πληθυσμού όσον αφορά στους συνδυασμούς χρωμοσωμάτων σε σχέση με τις απαιτήσεις του προβλήματος.

Σημειώνεται ότι, καθώς το μέγεθος του προβλήματος μεγαλώνει, η οικονομία μνήμης (και συνεπώς η υπεροχή των ΓΑ έναντι των κλασικών τεχνικών) καθίσταται προφανής. Γενικά, οι ΓΑ προσφέρουν ικανοποιητικές λύσεις σε περιορισμένο χρόνο και βέλτιστη λύση για επαρκή χρόνο λειτουργίας (αριθμό γενεών). Γενικά, η κλασική αναζήτηση προσαρμόζει το πρόβλημα στην δομή του Η/Υ και (σχεδόν) εξαντλητικά εξερευνά τον χώρο του προβλήματος για την βέλτιστη λύση από υποψήφια λύση σε γειτονική υποψήφια λύση. Αντίθετα, οι ΓΑ, μέσω της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, πραγματοποιούν μη γειτονική αναζήτηση για μία (σχεδόν) βέλτιστη λύση σε ικανό χρόνο, με χρήση περιορισμένης μνήμης. Αυτό σημαίνει ότι μία υποψήφια λύση μπορεί να εμφανίζεται στον πληθυσμό σε περισσότερες από μία γενεές. Μάλιστα, όσο καλύτερη είναι η υποψήφια λύση τόσο πιο συχνά θα εμφανίζεται στον πληθυσμό.

15.9 Διαδραστικό Υλικό – Σύνδεσμοι

- <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_intelligence <http://www.mathworks.com/products/matlab/online/>
- <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>

15.10 Ασκήσεις

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τον πρώτο από τους παραπάνω free sql editors για τα προβλήματα που ακολουθούν. Οι πίνακες βρίσκονται στα δεξιά.

1. Να σχεδιαστεί ένα νευρωνικό δίκτυο για την πύλη OR
2. Να σχεδιαστεί ένα νευρωνικό δίκτυο για την πύλη AND
3. Να σχεδιαστεί το δέντρο ευρετικής αναζήτησης για το παζλ που ακολουθεί:

4	1	3
7	2	6
	5	8

1	2	3
4	5	6
7	8	

4. Χρησιμοποιήστε data sets από το Irvine Machine Learning Depository (4ος σύνδεσμος) και χρησιμοποιήστε το weka για να κάνετε ταξινόμηση (classification). Παρατηρήστε ποιό αλγόριθμοι είναι πιο αποδοτικοί και πως βελτιώνονται τα αποτελέσματα όταν το σύστημα εκπαιδεύεται με μεγάλο όγκο δεδομένων.

Βιβλιογραφία

- [1] Τατιάνα Ταμπουρατζή 2011. Τεχνητή νοημοσύνη και Συστήματα Παραγωγής. http://www.tex.unipi.gr/undergraduate/notes/ai/ai_notes_tt_2011.pdf
- [2] Behrouz Forouzan “Εισαγωγή στην Επιστήμη των Υπολογιστών” τρίτη έκδοση 2014
- [3] Newell A., Shaw J.C., Simon H.A., 1956. Empirical explorations of the logic theory machine: a case study in heuristics, in Proceedings of the Western Joint Computer Conference, pp. 218-239. Also in Computers and Thought (Feigenbaum E. and Feldman J., eds.), McGraw-Hill: New York, U.S.A., 1963, pp. 134-152.
- [4] Newell A., Simon H., 1972. Human Problem Solving. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, U.S.A.
- [5] Searle J.R., 1980. Minds, brains, and programs, Behavioral and Brain Sciences, Vol.3, pp. 417-424.
- [6] Turing A.M., 1950. Computing machinery and intelligence. Mind, Vol. LIX, pp. 433-460.
- [7] Hodges W., 1977. Logic. Penguin Books: Harmondsworth, Middlesex, UK.
- [8] Yager R.R., Zadeh L.A. (eds.), 1992. An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. Kluwer Academic Publishers: Boston, U.S.A.
- [9] Zadeh, L.A., 1996. Fuzzy Logic = Computing with Words, IEEE Transactions on Fuzzy Systems Vol. 2, pp. 103-111.
- [10] Waltz D., 1975. Understanding line drawings of scenes with shadows, in The Psychology of Computer Vision (P.H.Winston ed.), McGraw-Hill: New York, U.S.A.
- [11] Minsky, M., 1975. A framework for representing knowledge (MIT-AI Laboratory Memo 306, June, 1974) reprinted in The Psychology of Computer Vision (P.H.Winston), McGraw-Hill, New York, U.S.A.
- [12] Shortcliffe, E.H., 1976. Computer-based medical consultations: MYCIN. Elsevier Publishing Corporation Inc., New York, U.S.A.

- [13] Weizenbaum, J. 1966. ELIZA - A Computer Program For the Study of Natural Language Communication Between Man and Machine, Communications of the ACM, Vol. 9, pp. 36-45.
- [14] Winograd, T., 1972. Procedures as a representation for data in a computer program for understanding natural language, Cognitive Psychology, Vol. 3., pp. 1-191. Also in Understanding Natural Language (1972), Academic Press, New York, U.S.A.
- [15] Cybenko, G., 1989. Approximation by superpositions of a sigmoidal function, Mathematics of Control, Signals, and Systems, Vol. 2, pp. 303-314.
- [16] Kohonen, T., 1988. Self-Organisation and Associative Memory (3rd edition). Springer-Verlag: New York, U.S.A.
- [17] Quinlan, J.R., 1986. Induction of decision trees, Machine Learning, Vol. 1, pp. 81-106.
- [18] D. Rumelhart, J. McClelland, 1986. On learning the past tenses of English verbs, pp. 216-271, in Parallel Distributed Processing – Vol. 2 (Rumelhart D., McClelland J., eds.), MIT Press: Cambridge, MA, U.S.A Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning. Addison Wesley.