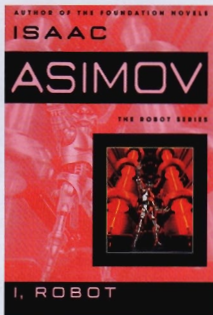


# Μηχανική Μάθηση

Το πρώτο βήμα  
προς τις «σκεπτόμενες» μηχανές

ΧΑΡΗΣ Β. ΓΕΩΡΓΙΟΥ  
Ερευνητής Πληροφορικής, M.Sc., Ph.D.

Η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί διαχρονικά μια από τις λίγες περιπτώσεις όπου ένας τομέας των θετικών επιστημών εμπεριέχει μια τόσο βαθιά φιλοσοφική οπτική γύρω από την ανθρώπινη φύση και συμπεριφορά. Η προσπάθεια κατασκευής μιας μηχανής με «ανθρώπινη νοημοσύνη» είναι σχεδόν τόσο παλιά όσο και η ίδια η ιστορία της ανθρωπότητας. Η Μηχανική Μάθηση ίσως αποτελεί σήμερα το πρώτο, μικρό αλλά ουσιαστικό, βήμα προς τις «σκεπτόμενες» μηχανές, όχι με τη μορφή πανέξυπνων ρομπότ για όλες τις εργασίες, αλλά ως «βρέφη» που μόλις μαθαίνουν τα πρώτα τους, όχι και τόσο επιδέξια, βήματα.



Τα φανταστικά ρομπότ του I. Asimov και τα «ανθρώπινα» χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς τους, όχι μόνο σε επίπεδο λογικής αλλά και συναίσθηματος, θέτουν πολύ πιο επιτακτικά το ερώτημα αν οι έννοιες μηχανή και (ανθρώπινη) νοημοσύνη είναι συμβατές και μπορούν να συνυπάρχουν σε ένα ανθρώπινο κατασκευάσμα.



Η εφαρμογή Εμπειρων Συστημάτων (Expert Systems) σε πραγματικά προβλήματα όπως στην ιατρική διάγνωση, στον σύνδετο αυτόματο έλεγχο, στη διάγνωση θλασών κλπ., κατάστησε σαφές ότι ο πραγματικός κόσμος είναι κάθε άλλο παρά σφαιρικός, ακριβής και μονοσήμαντα ορισμένος, όπως απαιτεί η αυστηρή μαθηματική λογική.

**Α**πό την εποχή της Mary Shelley και του μυθιστόρημα του Φράνκνενσταϊν, στο οποίο ο επιστήμονας καταλήγει να διερωτάται αν το κατασκευάσμα του έχει ανθρώπινα συναισθήματα, μέχρι τους περίφημους τρεις νόμους της ρομποτικής του συγγραφέα επιστημονικής φαντασίας Isaac Asimov, αλλά και πολύ παλαιότερα στην αρχαιότητα, στη μυθολογία του Ηφαίστου και του Πυγμαλίωνα που αφορούσε κατασκευές όπως ο Τάλας και η Γαλάτεια, ο άνθρωπος προσπαθεί διαχρονικά να προσδιορίσει τη φύση του και το «διαφορετικό» της δικής του σκέψης από τα υπόλοιπα ζώα και τις δικές του κατασκευές.

Πέρα από τις όποιες πνευματικές αντιλήψεις και θρησκευτικά δόγματα, το πιο σημαντικό ίσως χαρακτηριστικό που τον διαφοροποιεί ουσιαστικά από οτιδήποτε άλλο γύρω του είναι αυτό που ονομάζεται με μια λέξη νοημοσύνη: η ικανότητα συλλογισμού, η αφαιρετική ικανότητα, η εξεργασμένη συμπερασματική, η μάθηση και η οργάνωση της γνώσης σε γενικευμένες έννοιες και μοντέλα, η επίλυση σύνθετων προβλημάτων, η

κατασκευή και χρήση κατάλληλων εργαλείων που τον βοηθούν σε κάθε του δραστηριότητα. Στην έννοια της νοημοσύνης εμπεριέχεται γενικά και η συναισθηματική διάσταση της ανθρώπινης νόησης, η δυνατότητα δηλαδή να βιώνει ο άνθρωπος συναισθήματα, κυρίως ακούσια, που δρούν ως αμιγνός εσωτερικό ερέθισμα «εισόδου» στη συλλογιστική διαδικασία και που ενισχύουν ή αποδυναμώνουν την μία ή την άλλη επιλογή κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, η ενσυναίσθηση και οι οικογενειακοί δεσμοί αποτελούν σημαντικό στοιχείο για την εξέλιξη και επιβίωση του ανθρώπου, καθώς βοήθησαν διαχρονικά στη δημιουργία ομάδων και κοινωνιών με στενούς δεσμούς συνεργασίας και αμοιβαίας προστασίας μεταξύ των μελών. Επιπλέον, ο άνθρωπος είναι ίσως το μόνο πλάσμα που διαθέτει την ικανότητα της επίγνωσης του εαυτού, δηλαδή της συνειδητότητας της ύπαρξής του στη φύση και της αναγνώρισης του ως ξεχωριστό εν μέσσο σε αυτήν.

Όλα τα παραπάνω, και αρκετά άλλα, συνιστούν αυτό που ονομάζεται ανθρώπινη νοημοσύνη, δηλαδή όλα αυτά τα εν-

δογενή και εξωτερικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς που καθιστούν τον άνθρωπο όχι απλά «έξυμνο» αλλά νοήμονα. Ο όρος, λοιπόν, νοημοσύνη αποτελεί από μόνος του μια πρόκληση, σε ό,τι αφορά την αναγνώρισή του σε οποιονδήποτε άλλον οργανισμό πέρα από τον άνθρωπο και πολύ περισσότερο όταν δεν πρόκειται καν για κάποιον οργανισμό αλλά για μια ανθρώπινη κατασκευή, μια μηχανή. Ο Τάλας, ο τεράστιος χάλκινος μυθικός φύλακας της Κρήτης, είναι σφαιρικά μια τέτοια μηχανή, ένα τεχνητό κατασκευάσμα όχι πολύ διαφορετικό ως έννοια από ένα υπερ-εξελιγμένο όπλο της αρχαιότητας. Αντίθετα, τα φανταστικά ρομπότ του I. Asimov και τα «ανθρώπινα» χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς τους, όχι μόνο σε επίπεδο λογικής αλλά και συναισθηματικό, θέτουν πολύ πιο επιτακτικά το ερώτημα αν οι έννοιες μηχανή και (ανθρώπινη) νοημοσύνη είναι συμβατές και μπορούν να συνυπάρχουν σε ένα ανθρώπινο κατασκευάσμα.

Για τη διάκριση της αμιγώς ανθρώπινης νοημοσύνης από ο,τιδήποτε άλλο προσομοιάζει ή μιμείται κάποιες πτυχές της, επινοήθηκε ο όρος Τεχνητή Νοημο-

σύνη (Artificial Intelligence - AI). Οποιαδήποτε κατασκευή λειτουργεί «έξυπνα», δηλαδή επιλύει κάποιο πρόβλημα ή ελέγχει αυτόματα κάποιο σύστημα, μπορεί να θεωρηθεί εν γένει ότι διαθέτει κάποιο επίπεδο τέτοιας τεχνητής νοημοσύνης, χαμηλότερο ή υψηλότερο, ανάλογα με τη σχεδίαση και τον τρόπο λειτουργίας της. Για παράδειγμα, οποιοσδήποτε αυτόματος διακόπτης ή βαλβίδα ροής μπορεί να θεωρηθεί «έξυπνη» μηχανή στον βαθμό που «αποφασίζει», με κατάλληλο τρόπο και χρονισμό, ώστε να πραγματοποιηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα (π.χ. διακοπή τροφοδοσίας ρεύματος ή της, ροής σε μια δεξαμενή κλπ.). Επειδή συνήθως η «έξυπνη» αυτή συμπεριφορά μιας κατασκευής είναι πολύ εξειδικευμένη και στοχεύει στην επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος, συχνά, αντί του όρου νοημοσύνη, χρησιμοποιείται (στα ελληνικά) ο όρος Τεχνητή Ευφυΐα.

## ΘΕΩΡΙΑ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ - ΠΟΤΕ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ «ΕΥΦΥΪΑ»;

Τόσο η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος όσο και αυτή της λήψης μιας απόφασης αποτελούν αντικείμενο μελέτης σε πλήθος επιστημονικών κλάδων, αλλά και της καθημερινότητας. Η Θεωρία Αποφάσεων (Decision Theory) αφορά ακριβώς αυτά τα θέματα και εφαρμόζεται στα Οικονομικά, στα Μαθηματικά και στη Στατιστική, ακόμα και στην Ψυχολογία, για να ερμηνεύσει την ανθρώπινη συμπεριφορά. Σχετίζεται στενά με τη Θεωρία Παιγνίων (Game Theory), όπου η ανάλυση όλων των δυνατών επιλογών σταθμίζεται ανάλογα με το αναμενόμενο κέρδος/κόστος, με σκοπό την επιλογή βέλτιστων στρατηγικών κατά τη λήψη αποφάσεων.

Σύμφωνα με τη Θεωρία Αποφάσεων, οι καταστάσεις στις οποίες η λήψη από-

φασης απαιτεί ειδική ανάλυση των συνθηκών και των δεδομένων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις βασικές περιπτώσεις:

- Λήψη απόφασης υπό καθεστώς αβεβαιότητας: Αυτή είναι η συνηθέστερη και πιο τυπική περίπτωση, όπου είτε η εγκυρότητα ή η ακρίβεια των δεδομένων εισόδου δεν είναι διασφαλισμένη (ασάφεια εισόδου), είτε το ίδιο το πρόβλημα δεν οδηγεί σε μονοσήμαντη λύση για συγκεκριμένους συνδυασμούς δεδομένων εισόδου (ασάφεια εξόδου). Οι περιπτώσεις αυτές μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω πιθανοτήτων και στατιστικής, όπου η βέλτιστη απόφαση είναι ουσιαστικά αυτή που μεγιστοποιεί το αναμενόμενο κέρδος της απόφασης (π.χ. ακρίβεια της πρόβλεψης).

- Ασύγχρονα αποτελέσματα: Οσο μεγαλύτερη είναι η χρονική αποσύνδεση της εκτέλεσης μιας απόφασης από την παρα-

Της τελευταίας δύο δεκαετιών η NASA έχει αποστείλει στον Άρη αυτόνομα οχήματα (rovers) διαφόρων μεγεθών και δυνατοτήτων, με σκοπό την επίτπου διαζγωγή παραμέτρων για τον εντοπισμό νερού και οργανικών ενώσεων. Λόγω της μεγάλης απόστασης από τη Γη, οποιαδήποτε επικοινωνία χαρακτηρίζεται από καθυστέρηση αρκετών λεπτών, γεγονός που καθιστά τον άμεσο τηλεχειρισμό των οχημάτων αυτών από τη Γη πρακτικά αδύνατο. Αντ' αυτού, τα οχήματα είναι πλέον εντελώς αυτόνομα και σχεδιάζουν τις μετακινήσεις τους «έξυπνα», δάσει γενικών μόνο κατευθύνσεων από το κέντρο ελέγχου, βελτιστοποιώντας τον χρόνο, την ασφάλεια, την εξοικονόμηση ενέργειας κλπ.





*Εκτός από τη χρησιμοποίησή τους σε διαστημικές αποστολές, αυτόνομα οχήματα επαστραφένονται όλο και πιο συχνά για την αντιμετώπιση επικίνδυνων καταστάσεων, όπως για την εξουδετέρωση εκρηκτικών ή σε επιχειρήσεις διάσωσης. Τέτοια οχήματα εισχωρούν μέσα σε καταστραμμένα κτίρια αμέσως μετά από κάποιο σεισμό, αναζητώντας επιζώντες, χαρτογραφώντας τον χώρο, ή προειδοποιώντας τους διασώστες για τυχόν κινδύνους που τους απειλούν.*

τήρηση του αντίστοιχου αποτελέσματος, τόσο δυσκολότερη καθίσταται η ανάλυση της αιτιατής συσχέτισης μεταξύ των δύο. Συνεπώς, η μελέτη της βέλτιστης απόφασης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη χρονική διαφοροποίηση (τυπικά καθυστερήση), σε ένα αιτιατό σύστημα.

- Πολλαπλοί συμμετέχοντες: Είναι πιθανό το ίδιο το πρόβλημα να περιλαμβάνει πολλαπλά μέρη που επηρεάζουν τη λήψη της απόφασης, είτε ως παράγοντες επίδρασης στις συνθήκες, είτε ως εκφραστής μεμονωμένων πολλαπλών αποφάσεων, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τυπικά, η κατηγορία αυτή αφορά το κύριο αντικείμενο της θεωρίας Παιγνίων, όπου πολλαπλοί παίκτες δρουν είτε ανταγωνιστικά είτε συνεργατικά και η λήψη της απόφασης αφορά την επιλογή βέλτιστων στρατηγικών, για τον καθένα ξεχωριστά ή και για ολόκληρες συμμαχίες, αντίστοιχα.

- Σύνθετα συστήματα: Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η δυσκολία λήψης

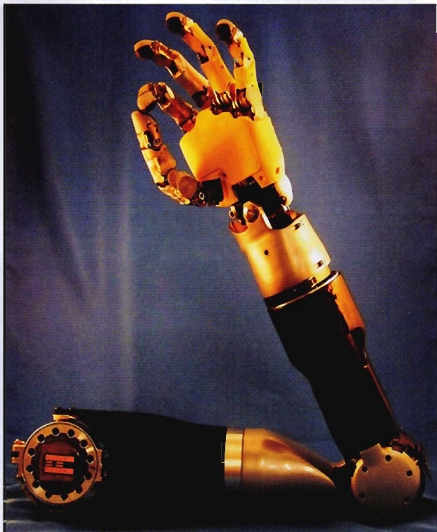
*Το σύστημα κίνησης ενός τεχνητού μέλους, αντί να υλοποιεί αναλυτικές διαδικασίες επίλυσης βέλτιστων τροχιακών εξισώσεων στον τρισδιάστατο χώρο, ενσωματώνει έναν ταξινόμητο προτύπων ο οποίος εκπαιδεύεται να κινεί με σωστό τρόπο τις αρθρώσεις του τεχνητού μέλους ώστε να πετύχει το τελικό σημείο-στόχο, ακριβώς όπως ένα θρέφας μαθαίνει σταδιακά να περπατά χωρίς να πέφτει και να ελέγχει με ακρίβεια τις κινήσεις του μέσα από το παιχνίδι.*

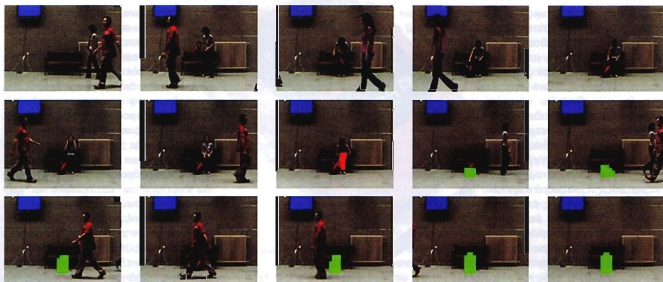
της βέλτιστης απόφασης δεν οφείλεται απλά στην ανάγκη ανάλυσης όλων των δυνατών επιλογών, αλλά κυρίως στο ότι το ίδιο το πρόβλημα είναι υπερβολικά πολύπλοκο ώστε να διατυπωθούν με ακρίβεια όλες οι επιλογές και τα αποτελέσματά τους. Ο τομέας αυτός αφορά τα λεγόμενα Πολύπλοκα Συστήματα (Complex Systems) στα οποία η διαδικασία λήψης αποφάσεων λαμβάνει υπόψη ως αβεβαιότητα όχι μόνο τους «γνωστούς αγνώστους» (known unknowns), αλλά και τους «άγνωστους αγνώστους» (unknown unknowns), των οποίων τα αποτελέσματα εμφανίζονται αυθόρμητα μέσω της αυτοοργάνωσης (self-organization) και των λεγόμενων αναδυόμενων χαρακτηριστικών (emergence).

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, ανάλογα με το πρόβλημα και τις συνθήκες, απαιτείται σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό η ικανότητα σωστής εκτίμησης όλων των παραμέτρων και λήψης της κα-

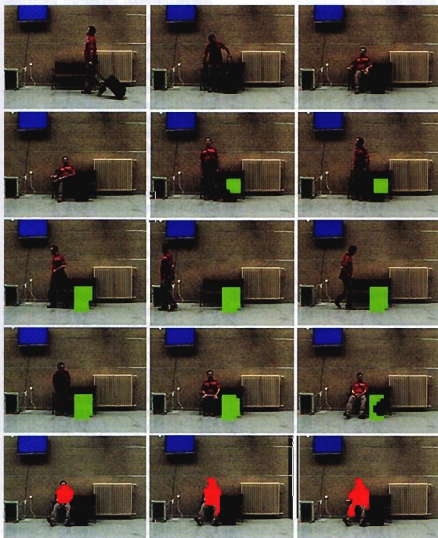
λύτερης δυνατής απόφασης σε σχέση με το αναμενόμενο (επιθυμητό) αποτέλεσμα. Στην πρώτη περίπτωση, η δυσκολία έγκειται στη σωστή διαχείριση της αβεβαιότητας ως προς τα δεδομένα και στην ελαχιστοποίηση της επιρροής της στο τελικό «κέρδος» της απόφασης. Για παράδειγμα, αν πρόκειται για σύστημα μετεωρολογικής πρόβλεψης σχετικά με την πιθανότητα βροχόπτωσης μέσα στις επόμενες ώρες, βάσει των μετρήσεων στην παρούσα χρονική στιγμή, ο βαθμός αποτελεσματικότητας του συστήματος είναι ανάλογος του βαθμού επιτυχίας ή όχι στις προβλέψεις αυτές.

Στη δεύτερη περίπτωση, ακόμα και αν το πρόβλημα είναι απλό, η «ασύγχρονη» διασύνδεση μεταξύ απόφασης και αποτελέσματος είναι πιθανό να καθιστά την ανάλυση εξαιρετικά δύσκολη ως προς τη λήψη της βέλτιστης απόφασης. Μια τέτοια περίπτωση προκύπτει για παράδειγμα στις περιπτώσεις τηλεχειρι-





*Παραδείγματα εφαρμογής ανάλυσης θίγτεο σε χώρους αναμονής αεροδρομίων μέσω τεχνικών Μηχανικής Μάθησης. Η επεξεργασία της εικόνας γίνεται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο και ένας υπολογιστής μπορεί αυτόματα να εντοπίσει αποσκευές (πράσινο χρώμα) και ανθρώπινες φιγούρες (κόκκινο χρώμα), να δημιουργήσει συσχετίσεις θέσει της συμπεριφοράς (αν οι αποσκευές συνοδεύονται ή όχι) και να εσημάνει πιθανούς κινδύνους ασφάλειας (π.χ. πιθανή τοποθέτηση θόμβας).*



μοιά, όπου η μεγάλη απόσταση δημιουργεί σημαντική καθυστέρηση στη μετάδοση των σημάτων από και προς το κέντρο ελέγχου. Σε διαστημικά οχήματα που αποστέλλονται σε άλλους πλανήτες, οι τεράστιες αποστάσεις καθιστούν αδύνατο τον άμεσο τηλεπικοινωνιακό έλεγχο από τη Γη, καθώς ο απαιτούμενος συνολικός χρόνος (round-trip time) είναι πλέον της τάξης των μερικών λεπτών. Επομένως ο χειριστής θα πρέπει μόνο να δίνει γενικές οδηγίες-κατευθύνσεις υπό τη μορφή στόχων, π.χ. σε ποιο σημείο-προορισμό να μετακινηθεί το όχημα ή ποια είναι η επιθυμητή τελική τροχιά του δορυφόρου, και η ίδια η αυτόνομη συσκευή να αναλάβει τοπικά τη διαδικασία ανάλυσης και εκτέλεσης των ενδιάμεσων βημάτων, όπως τον σχεδιασμό μιας κατάλληλης ασφαλούς διαδρομής. Δεν είναι τυχαίο το ότι μία από τις βασικές αρχές σε όλες τις σύγχρονες διαστημικές αποστολές είναι πως «όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση από τη Γη, τόσο πιο έξυπνο και αυτόνομο πρέπει να είναι το όχημα ή η συσκευή που θα σταλεί». Πρακτικές εφαρμογές αυτής της αρχής αποτελούν τα μη επανδρωμένα αυτόνομα οχήματα (rovers) που έχουν προσαρμοστεί στον Άρη από τις αρχές της δεκαετίας του 90 μέχρι και σήμερα, καθώς οι τηλεπικοινωνιακές καθυστερήσεις μιας κατεύθυνσης από ή προς τη Γη κυμαίνονται συνολικά από 3 έως 21 λεπτά (λόγω και των ενδιάμεσων αναμεταδόσεων).

Οι δύο άλλες κατηγορίες, αυτές των



πολλαπλών συμμετεχόντων και των σύνθετων συστημάτων, αποτελούν ίσως τις δυσκολότερες περιπτώσεις σε ό,τι αφορά τη θέλτιστη λήψη αποφάσεων, είτε από άνθρωπο είτε από μηχανή. Στην πρώτη περίπτωση, η ανάλυση μέσω της Θεωρίας Γαγγίνων αποτελεί σήμερα έναν πολύ εξειδικευμένο αλλά ιδιαίτερα σύνθετο κλάδο των Μαθηματικών, καθώς δίνει αναλυτικές και θεωρητικά θέλτιστες λύσεις μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις. Ειδικότερα στην περίπτωση όπου πολλές επιμέρους αποφάσεις πρέπει να συνδυαστούν με θέλτιστο τρόπο, προκύπτουν μαθηματικά προβλήματα που γενικά είναι μη επιλύσιμα, όπως για παράδειγμα το ζήτημα της σχεδίασης ενός καθολικά θέλτιστου εκλογικού συστήματος -σταθμισμένης- ψηφοφορίας. Στη δεύτερη περίπτωση, τα χαρακτηριστικά των Πολύπλοκων Συστημάτων, και ειδικότερα αυτά της αυτο-οργάνωσης και της αναδυόμενης συμπεριφοράς, καθιστούν το ζήτημα της θέλτιστης απόφασης εξαιρετικά δύσκολο. Για παράδειγμα, η μελέτη και πρόβλεψη των τροπικών κυκλώνων αποτελεί εν γένει ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα στη Μετεωρολογία ακριβώς επειδή πρόκειται για τις τελικές «εκφάνσεις» εξαιρετικά σύνθετων Πολύπλοκων Συστημάτων σε επίπεδο μηχανικής ρευστών (ατμόσφαιρας) και αναδυόμενης συμπεριφοράς.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η «νοημοσύνη» ή αλλιώς η «ευφυΐα» ενός συστήματος όσον αφορά τη λήψη της «σωστής» απόφασης αποτελεί το βασικό και πολλές φορές κρίσιμο για την ανθρώπινη ζωή στόχο. Η επίτευξη αυτής της ικανότητας εξαρτάται κυρίως από τρεις παράγοντες:

1. Την αναπαράσταση της γνώσης (knowledge representation)
2. Τη διαδικασία μάθησης (learning)
3. Τη διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος (inference)

Οι τρεις αυτοί παράγοντες δεν είναι εντελώς απομονωμένοι αλλά μπορεί να επικαλύπτονται, ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα και τη σχεδίαση ενός κατάλληλου «ξυπνού» συστήματος. Για παράδειγμα, η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος μπορεί σχεδόν να ταυτίζεται με την αναπαράσταση της γνώσης, ενώ η διαδικασία μάθησης είναι δυνατόν να αποτελεί μέρος ή από τα μια κατάσταση λειτουργίας της δομής που αποθηκεύει τη γνώση. Πρακτικά, αυτό που ονομάζεται



**Ένας από τους τομείς όπου η Μηχανική Μάθηση έχει εφαρμοστεί με πολύ μεγάλη επιτυχία τα τελευταία χρόνια είναι αυτός της Ιατρικής. Μικρές φορητές συσκευές στο μέγεθος ενός απλού κινητού τηλεφώνου ανιχνεύουν αοσμάτα με θιμετρικούς αισθητήρες για την καταγραφή και ανάλυση ενός σήματος σε πραγματικό χρόνο. Στην εικόνα φαίνεται μια τέτοια συσκευή οξυμετρίας, η οποία αναλύει την περιεκτικότητα του αίματος σε οξυγόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και κυρίως του ύπνου και εισηγούνται άμεσα περιπτώσεις αναπνευστικής ανεπάρκειας, όπως π.χ. λόγω υπνικής άπνοιας.**

ανθρώπινη νοημοσύνη εξετάζεται κυρίως σε δύο επίπεδα, αυτό των λειτουργιών υψηλού επιπέδου, όπως π.χ. η αφαιρετική ικανότητα και οι θεωρητικές έννοιες, καθώς και αυτό των λειτουργιών χαμηλού επιπέδου, όπως π.χ. η δομή και οργάνωση των νευρώνων σε ό,τι αφορά τη νευροφυσιολογία του εγκεφάλου. Και τα δύο αυτά επίπεδα έχουν αποτελέσει αντικείμενα έρευνας και επιστημονικής μελέτης κατά τις τελευταίες πέντε σχεδόν δεκαετίες, στο πλαίσιο της προσπάθειας για την κατασκευή «σκεπτόμενων μηχανών».

## ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ, ΓΛΩΣΣΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΣΗ

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της νοημοσύνης αποτελεί αναμφισβήτητη η ικανότητα μάθησης, δηλαδή ο συστηματικός (εκούσιος ή ακούσιος) τρόπος καταγραφής και οργάνωσης της εμπειρίας με τρόπο που να αποχρυσώνει κατάλληλα με γεγονότα ή αποτελέσματα ως γνώση, έτσι ώστε σε κάποια άλλη χρονική στιγμή, σε παρόμοιες (όχι απαραίτητα ταυτόσημες) συνθήκες, να μπο-

ρεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για τη λήψη των βέλτιστων, κατά το δυνατόν, αποφάσεων. Η εμπειρία αυτή μπορεί να είναι ατομική, ως αποτέλεσμα της διαδικασίας «δοκιμής και λάθους» εφόσον η αποτυχία δεν είναι καταστροφική ή θανατηφόρα. Μπορεί επίσης να είναι αποτέλεσμα της συναναστροφής του ατόμου με άλλα άτομα μέσα σε μια κοινότητα, ή, στην περίπτωση του ανθρώπου, να προκύπτει μέσω συστηματικής καταγραφής και χρήσης των γλωσσικών δυνατοτήτων. Όλα τα ζώα που εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο νοημοσύνης, όπως για παράδειγμα οι χιμαπαζήδες, τα δελφίνια και οι φάλαινες, διαθέτουν εξαιρετικά ανεπτυγμένες ικανότητες μάθησης μέσω δοκιμής και λάθους ή/και μέσω συναναστροφής (μίμησης), ακόμα και με τη χρήση γλώσσας σε περιορισμένο βαθμό. Για τον άνθρωπο, η χρήση εργαλείων και ιδιαίτερα της φωτιάς αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό ανώτερου επιπέδου νοημοσύνης, όμως αυτό που πραγματικά κάνει τη διαφορά και αποτελεί σε πολλαπλασιαστικό παράγοντα στην εξέλιξη του είναι ακριβώς η χρήση της γλώσσας, αρχικά αλύχη και στη συνέχεια ολόενα και πιο σύνθετης, μέχρι τη μετεξέλιξη της σε γραπτό μέσο επικοινωνίας. Με τον τρόπο αυτόν η μάθηση έπαιου να περιορίζεται στην εμπειρία ενός ατόμου ή μιας κοινότητας και έγινε πραγματικά συλλογική, ακριβέστερη και διαχρονική. Συνεπώς η γλώσσα, δηλαδή ένα καλώς ορισμένο σύστημα καταγραφής, οργάνωσης και επικοινωνίας της γνώσης, αποτελεί αναπόσπαστο εργαλείο για την ανάπτυξη νοημοσύνης σε ανώτερο επίπεδο.

Με την εμφάνιση των πρώτων ηλεκτρομηχανικών υπολογιστών γενικής χρήσης στις αρχές του 20ού αιώνα, έγινε σαφές ότι η αποτελεσματική οργάνωση της πληροφορίας ήταν εξίσου σημαντική με τον ίδιο τον τρόπο χρήσης της. Μάλιστα, οι «μηχανές» αυτές ήταν ίσως οι πρώτες αμύγες προγραμματιζόμενες ως προς τη λειτουργία τους, αφού τόσο τα δεδομένα όσο και ο τρόπος επεξεργασίας τους μπορούσαν να καθοριστούν δυναμικά ανάλογα με το πρόβλημα μέσω προγραμμάτων, δηλαδή μιας κατάλληλης γλώσσας για αυτόν τον σκοπό. Πολύ γρήγορα έγινε φανερό πως μια τέτοια μηχανική θα μπορούσε, με κατάλληλο προγραμματισμό, όχι μόνο να συμπεριφέρεται «έξυπνα», αλλά και να «μαθαίνει». Θεωρητικές εργασίες από πρωτοπόρους επιστή-

μονες, όπως ο Alan Turing, απέδειξαν με μαθηματικό τρόπο ότι κάτι τέτοιο ήταν δυνατό να συμβεί, θέτοντας τα όρια πολύ πέρα από εκεί που υπέθεταν έως τότε. Αν η λειτουργία του ίδιου του ανθρώπινου εγκεφάλου μπορούσε να θεωρηθεί ως ένα εξαιρετικά πολύπλοκο σύστημα οργάνωσης-συσχέτισης πληροφοριών και «προγραμμάτων» που τις επεξεργάζονται, τότε δεν υπήρχε κανένας περιορισμός (τουλάχιστον θεωρητικά) που να καθιστά αδύνατο την υλοποίηση πανομοιότυπων νοητικών διαδικασιών ως λειτουργία ενός υπολογιστή. Ήταν η πρώτη φορά που η επιστήμη μπορούσε να υποστηρίξει με σαφήνεια και αξιοπιστία ότι η κατασκευή μιας μηχανής με πραγματική νοημοσύνη ήταν πράγματι εφικτή, χωρίς φυσικά ακόμη να είναι σε θέση να διατυπώσει το «πώς» και το «πότε».

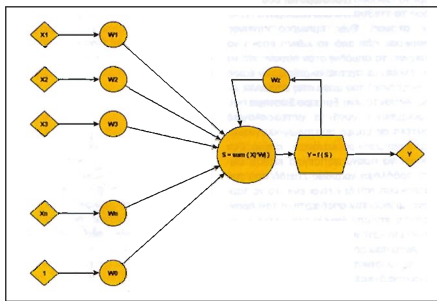
Οι πρώτες προσπάθειες κατασκευής πραγματικά «έξυπνων» προγραμμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή βασίστηκαν ακριβώς στη σχεδίαση κατάλληλων γλωσσών, οι οποίες επέτρεπαν τη μίμηση της ανθρώπινης συλλογιστικής διαδικασίας εξαγωγής συμπερασμάτων με σαφήνεια και ακρίβεια. Ειδικότερα, γλώσσες λογικού προγραμματισμού όπως η LISP και η Prolog, καθώς και οι αντίστοιχες εξελιγμένες «δηλωτικές» γλώσσες λογικής με περιορισμούς όπως η CLIPS/ECLIPSE, βασίστηκαν κατά κύρια λόγο σε μαθηματικά μοντέλα και συστήματα λογικής, κυρίως πρώτου βαθμού. Πρακτικά, μέσω αυτών των γλωσσών ο προγραμματιστής δεν χρειαζόταν να καθορίσει επακριβώς όλα τα διαδοχικά βήματα για την επίλυση ενός προβλήματος, αλλά απλώς να δηλώσει με κατάλληλο τρόπο τη διαθέσιμη «γνώση» και τους αντίστοιχους συμπερασματικούς κανόνες συνεπαγωγής ως απλές λογικές προτάσεις. Έτσι, για να «μιάθει» ένα πρόγραμμα υπολογιστή να παίζει σωστά και αποδοτικά π.χ. σκάκι, μια εξαιρετικά δύσκολη πρόκληση πριν από μερικές δεκαετίες, αρκούσε ένα τέτοιο

πρόγραμμα που θα περιείχε σε κατάλληλη μορφή όλους τους κανόνες (επιτρεπτές κινήσεις) και τις λογικές συνθήκες νίκης και ήττας στο παιχνίδι. Βάσει αυτής της «γνώσης», το σύστημα μπορούσε, εφαρμόζοντας διαδοχικά κανόνες λογικής συνεπαγωγής και διερευνώντας τον βαθμό προσέγγισης της τελικής λύσης (νίκη), να αποφασίζει με εξαιρετικά αποτελεσματικό τρόπο για την επόμενη κίνηση. Μάλιστα, σύμφωνα με τη Θεωρία Παιγνίων, το σκάκι και όλα τα παρόμοια παιχνίδια ανήκουν στην κατηγορία των λεγόμενων «παιγνίων μηδενικού αθροίσματος, πλήρους πληροφόρησης» (zero-sum, fully informed), σύμφωνα δε με τη θεωρία, υπάρχει σίγουρα τουλάχιστον μια καθολικά βέλτιστη στρατηγική (αποφύγι ήττας). Αν και η πολυπλοκότητα του παιχνιδιού στο σκάκι καθιστά την εύρεσή της ουσιαστικά αδύνατη, εντούτοις σε απλούστερα παιχνίδια όπως η τριλιζα (checkers) το σύνολο όλων των πιθανών κινήσεων μπορεί να διερευνηθεί πλήρως και η αντίστοιχη βέλτιστη στρατηγική είναι δυνατό να εντοπιστεί σχετικά εύκολα από ένα πρόγραμμα. Ξαφνικά τα προγράμματα για παιχνίδια όπως το σκάκι έγιναν τόσο «έξυπνα» που ακόμα και ένας προσωπικός υπολογιστής χαμηλών δυνατοτήτων της δεκαετίας του 80 μπορούσε εύκολα να κερδίζει το 90% των μη-επαγγελματιών παικτών ή τουλάχιστον να κατάρφερνε να μη χάνει ποτέ (τριλιζα). Η «μηχανή» είχε «μάθει» να παίζει όχι απλά ισοδύναμα αλλά πολύ καλύτερα από τον μέσο άνθρωπο.

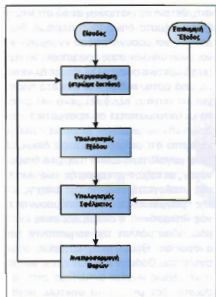
Η έννοια της Τεχνητής Νοημοσύνης άρχισε πλέον να γίνεται ευρύτερα γνω-

στή, θέτοντας για πρώτη φορά στην πράξη ερωτήματα όπως το τι ακριβώς θεωρούμε «νοημοσύνη», πόσο «νοήμων» είναι ένας υπολογιστής που μπορεί να παίζει εξαιρετικό σκάκι αλλά τίποτε άλλο πέρα από αυτό, καθώς και το κατά πόσον μπορεί αυτή η εξειδικευμένη «ευφυΐα» να μετασχηματιστεί σε πραγματικά «ανθρώπινη» νοημοσύνη. Σύντομα έγινε αντιληπτό ότι υπήρχε τεράστια διαφορά, πολύ μεγαλύτερη από ό,τι αρχικά διαφαίνονταν, μεταξύ της τεχνητής ευφυΐας ενός υπολογιστή εκείνης της εποχής και της πραγματικής φυσικής νοημοσύνης ενός θηλαστικού ή ακόμη και ενός εντόμου, πόσω μάλλον της νοημοσύνης του ανθρώπου. Θεωρητικές εργασίες όπως αυτές του Gödel απέδειξαν ότι η νοημοσύνη, όπως γίνεται αντιληπτή στον άνθρωπο, δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω λογικής πρώτης τάξης, δηλαδή απλών διατυπώσεων γεγονότων και συμπερασματικών κανόνων συνεπαγωγής, καθώς τέτοια συστήματα δεν είναι «κλειστά». Πρακτικά, αυτό σήμαινε ότι σε κάθε περίπτωση υπάρχουν στοιχεία που είτε δεν μπορούν να διατυπωθούν επαρκώς, είτε δεν μπορούν αποδειχθούν με σαφήνεια σε τέτοια συστήματα, καθώς απαιτούν την ύπαρξη μη αποδεδειγμένων αξιωμάτων στο αρχικό σύνολο γνώσης. Επιπλέον, η εφαρμογή Εμπειρων Συστημάτων (Expert Systems), βασισμένων σε αντίστοιχα μοντέλα και γλώσσες προγραμματισμού, σε πραγματικά προβλήματα όπως στην ιατρική διάγνωση, στον σύνθετο αυτόματο έλεγχο, στη διάγνωση βλαβών κλπ., κατέστησε σαφές ότι ο πραγματικός κόσμος είναι κάθε άλλο παρα-

**Βασική δομή ενός νευρώνα σε ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΤΝΔ). Κάθε είσοδος  $X_j$  σταθμίζεται με ένα αντίστοιχο βάρος  $W_j$  και στη συνέχεια όλα μαζί αθροίζονται σε ένα κεντρικό κόμβο. Το αποτέλεσμα τροφοδοτείται σε μια συνάρτηση «βήματος» (step function) που καθορίζει, βάσει ενός ορίου, αν τελικά ο νευρώνας ενεργοποιείται ή όχι για το συγκεκριμένο διάστημα εισόδου. Κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης, τα βάρη του κάθε νευρώνα αναπροσαρμόζονται κατάλληλα, ώστε να «αναγνωρίζει» σωστά κάθε πιθανό πρότυπο στην είσοδο.**







**Βασικός τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου Back-Propagation που εφαρμόζεται για την εκπαίδευση ΤΝΔ τύπου MLP. Κάθε επίπεδο αποτελείται από μια σειρά νευρώνων, των οποίων οι εισόδους είναι οι εξόδους του προηγούμενου επιπέδου. Κατά την εκπαίδευση, κάθε δίδνομα εισόδου δημιουργεί ένα σφάλμα στις εξόδους του τελικού επιπέδου. Το σφάλμα αυτό τροφοδοτείται σταδιακά «προς τα πίσω» προς όλα τα επίπεδα, διαρθρώνοντας κατάλληλα τα βάρη σε κάθε νευρώνα.**

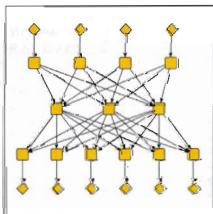
ασφής, ακριβής και μονοσήμαντα ορισμένος, όπως απαιτεί η αυστηρή μαθηματική λογική. Με λίγα λόγια, ο άνθρωπος έχει μάθει να οργανώνει τις εμπειρίες του και να λαμβάνει αποφάσεις μέσω σε καθεστώς αβεβαιότητας, τόσο ως προς τα δεδομένα εισόδου (ερεθίσματα) όσο και ως προς τα επιθυμητά αποτελέσματα (τελικούς στόχους). Ένας έμπειρος κυνηγός μπορούσε ήδη από τη λίθινη εποχή να διακρίνει τα σημάδια στον ουρανό και να προβλέψει με σχετική ακρίβεια τον καιρό στην περιοχή του μέσα στις επόμενες ώρες. Αντίθετα, ένα Εμπειρο Σύστημα που περιλαμβάνει σύνθετο μετωρολογικά μοντέλα σε μορφή αυστηρών «λογικών» συμπερασματικών κανόνων, συχνά δεν μπορεί να πραγματοποιήσει εξίσου ακριβή πρόβλεψη, ακριβώς επειδή από την κατασκευή του δεν είναι εύκολο να ληφθεί υπόψη την αβεβαιότητα του πραγματικού κόσμου (σφάλματα μετρήσεων, απόκλιση κανόνων κλπ.).

Αυτό που αρχικά πρόβαλλε ως η αληθινή πραγματικότητα νοημοσύνης για τη μηχανή στις δεκαετίες του 70 και του 80, σύντομα αντικαταστάθηκε από μια σταδια-

κή απερίσκεψη και υποβάθμιση ολόκληρου του κλάδου. Η λογική, αυστηρά μαθηματική προσέγγιση του προβλήματος αποδείχθηκε ανεπαρκής και το ίδιο το ζήτημα της νοημοσύνης πολύ δυσκολότερο από τις αρχικές εκτιμήσεις. Αλλά αυτό δεν αποτέλεσε παρά την αρχή για μια νέα, εντελώς διαφορετική προσέγγιση του ζητήματος κατά τις επόμενες δεκαετίες, αυτή τη φορά όχι «από επάνω προς τα κάτω» (top-down), δηλαδή με απευθείας μοντελοποίηση της ανώτερης αφαιρετικής διαδικασίας, αλλά «από κάτω προς τα επάνω» (bottom-up), μια φιλοσοφία βασισμένη στα ίδια τα δεδομένα και στον τρόπο οργάνωσής τους ως γνώση – το πρώτο και βασικότερο βήμα για ουσιαστική μάθηση.

## Η ΜΗΧΑΝΗ ΠΟΥ ΜΑΘΑΙΝΕΙ

Ειδικότερα για τις διαδικασίες της μάθησης, πολύ σύντομα διατυπώθηκαν νέες θεωρίες, πολύ μοντέλα που ως έμπνευση είχαν τη λειτουργία του ίδιου του κεφαλάου. Συγκεκριμένα, μετά την αποτυχία των μοντέλων να αποτυπώσουν με ακρίβεια τις ανώτερες λειτουργίες του, όπως για παράδειγμα την ικανότητα αυτόματης κατανόησης σύνθετων μοθηματικών εννοιών, οι επιστήμονες στράφηκαν στο αντίθετο άκρο, δηλαδή στην κατανόηση της δομής και της λειτουργίας των βασικών του δομών: των νευρώνων και των δικτύων που σχηματίζουν με τις διασυνδέσεις μεταξύ τους. Αν και τα νευρικά κύτταρα εμπειρεύουν δομές και λειτουργίες που ακόμη και σήμερα δεν είναι πλήρως κατανοητές, όπως οι πιθανές κβαντικές αλληλεπιδράσεις που περιγράφει ο R. Penrose στα βιβλία του, εντούτοις η βασική τους λειτουργία μοιάζει πολύ με μια βασική δομική μονάδα που συναντάται και στα ηλεκτρονικά κυκλώματα – αυτή του σταθμιζόμενου αδροστίφ.



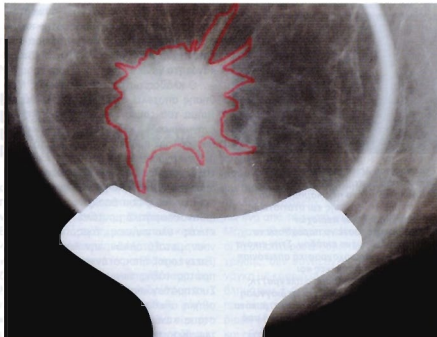
Κάθε νευρώνας εμπειρεύει απολήξεις «εισόδου», απ' όπου δέχεται ερεθίσματα, και απολήξεις «εξόδου», μέσω των οποίων προωθεί τα ερεθίσματα της ενεργοποίησής του. Κάθε είσοδος σταθμίζεται, δηλαδή συνδυάζεται με ένα συντελεστή θαρύτητας, ο οποίος πρακτικά καθορίζεται από την ισχύ του χημικού δεσμού της αντίστοιχης διασύνδεσης. Οι σταθμιζόμενοι είσοδοι αθροίζονται και η τελική ενεργοποίηση ή όχι του νευρώνα καθορίζεται με βάση ένα συγκεκριμένο όριο (κατώφλι). Η απλή αυτή δομή, όταν επεκταθεί σε εκατοντάδες χιλιάδες διασυνδεδεμένους νευρώνες σε πολλαπλά επίπεδα, ο καθένας με τους δικούς του συντελεστές θαρύτητας στις συνδέσεις, δημιουργεί ένα εξαιρετικά Πολύπλοκο Σύστημα, όπου ανώτερες λειτουργίες αναδύονται αυθόρμητα. Έτσι, ενώ ένας μεμονωμένος νευρώνας δεν μπορεί να εκτελέσει παρά μόνο μερικές απλές μαθηματικές πράξεις και συγκρίσεις, ένα σύνθετο Νευρωνικό Δίκτυο (Neural Network – NN) μπορεί να αποθηκεύσει και στη συνέχεια να αναγνωρίσει ολόκληρες εικόνες και ήχους, ως μέρος ανώτερων γνωστικών λειτουργιών, όπως είναι π.χ. η όραση και η οπτική μνήμη.

Εφόσον παράμοιες ανώτερες λειτουργίες προκύπτουν τελικά ως διασύνδεση και αλληλεπίδραση απλών δομικών μονάδων, είναι φυσικό το επόμενο βήμα στην προσπάθεια δημιουργίας τεχνητής ευφυίας υψηλού επιπέδου να επικεντρωθεί αφενός στην υλοποίηση αντίστοιχων δομικών μονάδων με τεχνητό τρόπο (εικονικό, σε υπολογιστή) και αφετέρου στην ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων για την υλοποίηση της μάθησης στα μοντέλα αυτά. Η έννοια των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) φαίνεται να προέρχεται ως ιδέα από μια εργασία των McCulloch και Pitts το 1943, στην οποία προτάθηκε για πρώτη φορά η δομή του νευρώνα, καθώς και από μια σχετική εργασία του Alan Turing το 1948. Η πραγματική, όμως, επανάσταση στον τομέα ήλθε το 1957, χάρη στην εργασία του Frank Rosenblatt με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης του Perceptron, ενός ΤΝΔ με ένα επίπεδο

**Τυπική δομή ενός ΤΝΔ τύπου πολλαπλών επιπέδων perceptron (MLP). Νευρωνικό δίκτυο αυτού του τύπου αποτελείται ως τα πιο διαδεδομένα «γενικής χρήσης» μοντέλα ΤΝΔ, κυρίως λόγω της ευκολίας και της υψηλής αξιοπιστίας της διαδικασίας εκπαίδευσής τους μέσω του αλγορίθμου Back-Propagation ή παραλογών του.**

νευρώνων, και, πολύ περισσότερο, την περίοδο από το 1963 μέχρι το 1974, όταν οι A. Bryson, W. Denham, S. Dreyfus, Yu-Chi Ho, P. Werbos, D. Rumelhart, G. Hinton, R. Williams, κ.ά., θεμελίωσαν τη θεωρία αλγορίθμων εκπαίδευσης για ΤΝΔ πολλών επιπέδων. Το 1986, οι Rumelhart, Hinton και Williams κατόφεραν να διατυπώσουν με λεπτομέρεια έναν αποτελεσματικό αλγόριθμο εκπαίδευσης για ΤΝΔ πολλαπλών επιπέδων νευρώνων τύπου Perceptron (Multi-Layered Perceptron - MLP). Ο αλγόριθμος αυτός είναι σήμερα γνωστός ως Back-Propagation και αποτελεί ίσως την πιο διαδεδομένη μέθοδο εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων τύπου MLP. Μέσω αυτού, τα ΤΝΔ μπορούσαν πλέον να αποκτήσουν το απαραίτητο μέγεθος και συνθετότητα που απαιτείται για την επίλυση εξαιρετικά δύσκολων μέχρι εκείνη την εποχή προβλημάτων, όπως για παράδειγμα την εκπαίδευση με αντικρουόμενα (αντιφατικά) δεδομένα εισόδου. Ουσιαστικά, ένα τέτοιο ΤΝΔ μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως «μαύρο κουτί» όπου τροφοδοτούντο πρότυπα εισόδου και επιθυμητής εξόδου και το σύστημα «μάθαινε» να λειτουργεί σύμφωνα με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές. Επιπλέον, ένα ουσιαστικά εκπαιδευμένο ΤΝΔ εμφανίζει την ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή τη δυνατότητα εκτίμησης της βέλτιστης δυνατής εξόδου ακόμα και για τις περιπτώσεις όπου η είσοδος είναι «άγνωστη» (δεν υπήρχε στο αρχικό δεδομένο εκπαιδευσης), ακριβώς όπως λειτουργεί η ανθρώπινη διαδικασία λήψης απόφασης μέσα σε αβεβαιότητα.

Πώς όμως τα δεδομένα μετασχηματίζονται σε γνώση μέσα σε ένα ΤΝΔ από τον αλγόριθμο εκπαίδευσης; Κάθε «ζεύγος» πρότυπου εισόδου μαζί με την επιθυμητή (ορθή) έξοδο συχνά αναφέρεται ως πρώτοτυπο εκπαίδευσης. Γενικότερα, ένα πρότυπο έχει τη μορφή διανύσματος με μία ή περισσότερες συνιστώσες που ονομάζονται χαρακτηριστικά του προτύπου. Το πλήθος και η σημασιολογία κάθε συνιστώσας εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και από την τεχνική που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της καθεμιάς με βάση τα δεδομένα του προβλήματος. Πρότυπα που εμφανίζουν «επαρκώς όμοια» χαρακτηριστικά ομαδοποιούνται στην ίδια κατηγορία, σχηματίζοντας έτσι «συστάδες» προτύπων που καθορίζουν αντίστοιχες κατηγορίες ή κλάσεις. Τα διάφορα μοντέλα ΤΝΔ χρησιμοποιούνται για τη στατιστική συσχέτιση και σύγκριση προτύπων με τις διαθέσιμες κλάσεις και

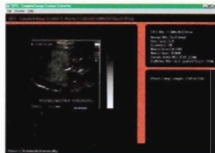


*Ένας από τους πιο απαιτητικούς τομείς της ιατρικής διάγνωσης μέσω υπολογιστών είναι η ανάλυση μαστογραφικής εικόνας για τον εντοπισμό νεοπλασματικών μαζών (καρκίνου). Μέσω της Μηχανικής Μάθησης, η ψηφιακή εικόνα αναλύεται σε διαδοχικά στάδια και οι πιθανοί σχηματισμοί εντοπίζονται, διαχωρίζονται από το υπόβαθρο (φυσιολογικούς ιστούς), ενώ κωδικοποιούνται ως στατιστικό χαρακτηριστικό του περιγράμμου και η υψή στο σωστή κατεύθυνση τους, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται σε ταξινομητές προτύπων για τη διάγνωση καλοήθειας ή κακοήθειας. Παρόμοια συστήματα βρίσκονται σε κλινική χρήση λειτουργώντας υποβοηθητικά για την ανάλυση μαζών ή και αποπνευμάσεων, επιτυγχάνοντας ποσοστά επιτυχούς διάγνωσης που ξεπερνούν το 93%.*

στη συνέχεια την ένταξή τους σε μία από αυτές με βάση κάποιο κριτήριο βέλτιστης ταξινόμησης (ελάχιστου σφάλματος). Κάθε χαρακτηριστικό των προτύπων αποτελεί μια ξεχωριστή συνιστώσα στα αντίστοιχα διανύσματα, δηλαδή μια επιπλέον διάσταση στα δεδομένα εισόδου του προβλήματος. Με άλλα λόγια, αν όλα τα δεδομένα εισόδου τοποθετηθούν σε έναν πίνακα, τότε κάθε γραμμή αποτελεί ένα πλήρες διάνυσμα ενός προτύπου και κάθε στήλη μια ξεχωριστή διάσταση στα διανύσματα αυτά. Ένας επιπλέον πίνακας, μίας και μόνο στήλης, αποθηκεύει τις αντίστοιχες επιθυμητές (ορθές) κλάσεις για κάθε διάνυσμα εισόδου, συμπληρώνοντας έτσι ένα ολοκληρωμένο πρότυπο εκπαίδευσης.

Σε πραγματικά προβλήματα, ο αριθμός των διαστάσεων μπορεί να είναι από μερικές δεκάδες έως και πολλές εκατοντάδες χιλιάδες, ενώ το αντίστοιχο πλήθος προτύπων είναι κατά κανόνα πολλαπλάσιο του αριθμού διαστάσεων, ώστε να μπορεί να επιτευχθεί υψηλός βαθμός γενίκευσης από την πλευρά του εκπαιδευμένου ΤΝΔ. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ενώ

γενικά οι πολλαπλές διαστάσεις προσφέρουν καλύτερη επικοινωνία και διαχωρισμό των κλάσεων (αποφοροποιούν οι επικαλύψεις), εν τούτοις η προσθήκη αλόενας και περισσότερων χαρακτηριστικών δεν οδηγεί πάντα στη βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος, καθώς το πρόβλημα, και κατά συνέπεια η εκπαίδευση, γίνεται πιο σύνθετη. Έτσι, πριν την κυρίαφή της εκπαίδευσης ή ως μέρος αυτής, συνήθως υλοποιούνται πρόσθετες διαδικασίες, στατιστικές ή άλλες, για τη βέλτιστη επιλογή χαρακτηριστικών με το σημαντικότερο πληροφοριακό περιεχόμενο. Επιπλέον, τόσο ο αλγόριθμος Back-Propagation, όσο και οι περισσότεροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης ΤΝΔ, είναι επαναληπτικοί, δηλαδή σε κάθε θήμα συγκλίνουν σταδιακά μετά από ένα πλήθος επαναληψιών, ενώ η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το σφάλμα να μειωθεί κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο ακριβείας. Οι κλίμακες αυτές των δεδομένων, καθώς και η ίδια η διαδικασία εκπαίδευσης και βελτιστοποίησης της τοπολογίας των διασυνδέσεων των νευρώνων σε ένα τυπικό ΤΝΔ, καθίστουν την



*Ο τρόπος που λειτουργεί ένα ιατρικό διαγνωστικό σύστημα Μηχανικής Μάθησης σε εικόνα περιλαμβάνει ένα στάδιο τμηματοποίησης και στατιστικής μοντελοποίησης των περιοχών ενδιαφέροντος, ώστε να παραχθούν τα αντίστοιχα δεδομένα εισόδου. Στην εικόνα διακρίνεται η υπερηχογραφική απεικόνιση ήπατος με επισημασμένες και τμηματοποιημένες (πράσινο πλέγμα) τις περιοχές ενδιαφέροντος για τη διάγνωση κίρρωσης, λιπώδους διήθησης κλπ. (εικόνα από πρότυπη πειραματική εφαρμογή από ερευνητική εργασία του συγγραφέα).*

εκπαίδευση μια εξαιρετικά χρονοβόρα και σύνθετη επεξεργασία δεδομένων, που όμως παραμένει βασισμένη εξ' ολοκλήρου στα δεδομένα εκπαίδευσης και δεν απαιτεί καμία άλλη κωδικοποίηση γνώσης υψηλότερου επιπέδου στο σύστημα (σε αντίθεση π.χ. με τα Εμπειρικά Συστήματα).

Τα ΤΝΔ είναι ένα μόνο παράδειγμα της γενικότερης έννοιας της Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning), η οποία ως κλάδος είναι μέρος της Τεχνητής Νοημοσύνης και αφορά κυρίως τα μοντέλα και τους αλγόριθμους που εφαρμόζουν την προσέγγιση bottom-up, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, δηλαδή από τα δεδομένα και τις απλές δομές προς την ανάδειξη ανώτερων «έξυπνων» λειτουργιών. Εκτός από τα νευρωνικά δίκτυα, η Μηχανική Μάθηση περιλαμβάνει τον κλάδο της Στατιστικής Μάθησης (Statistical Learning), όπου η διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων βασίζεται αποκλειστικά σε σύνθετα στατιστικά μοντέλα (αντί για νευρώνες), καθώς και κλάδους που βασίζονται στη μοντελοποίηση πιθανοτήτων και αβεβαιότητας (Probabilistic models, Uncertainty models). Τόσο στα ΤΝΔ, όσο και στη Στατιστική Μάθηση, τα μοντέλα που κατασκευάζονται λειτουργούν αυσιαστικά με τη μορφή ταξινομητών προτύπων: για ένα συγκεκριμένο σύνολο προτύπων δεδομένων εισόδου το σύστημα «μθαίνει» να παράγει τις αντίστοιχες επιθυμητές εξόδους και μάλιστα με τέτοιο τρόπο, ώστε όταν αργό-

τερα του δοθεί κάποιο νέο «άγνωστο» πρότυπο εισόδου, να προβεί στην καλύτερη δυνατή εκτίμηση όσον αφορά την κατά πάσα πιθανότητα σωστή έξοδο (ικανότητα γενικεύσης).

Ο κλάδος αυτός της Μηχανικής Μάθησης αποτελεί σήμερα το μεγαλύτερο τμήμα του τομέα και είναι γνωστός ως Αναγνώριση Προτύπων (Pattern Recognition): πρόκειται για έναν από τους πιο ενεργούς και σημαντικούς κλάδους της Τεχνητής Νοημοσύνης σήμερα. Πέρα από την Αναγνώριση Προτύπων, άλλες προσεγγίσεις που βασίζονται σε αμυγνά πιθανοθεωρητικά μοντέλα ή σε πιο πρακτικές υλοποιήσεις τους, περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic), όπου οι έννοιες της λογικής πράτης τάξης των κλασικών Εμπειρών Συστημάτων «επαυξάνονται» με την προσθήκη αβεβαιότητας στα δεδομένα και στους κανόνες εξαγωγής συμπερασμάτων. Τόσο η Αναγνώριση Προτύπων, όσο και μοντέλα όπως η Ασαφής Λογική, αποτελούν σήμερα τη βάση για την πλειοψηφία των «έξυπνων» συστημάτων υπολογιστών, από τις προγραμματιζόμενες οικιακές συσκευές (πλυντήρια, ψυγεία, κλπ.) μέχρι τα ιατρικά διαγνωστικά συστήματα (computer-aided diagnosis – CAD).

Ο λόγος που η Μηχανική Μάθηση αποδεικνύεται τόσο αποτελεσματική ως σχεδιαστική προσέγγιση για συστήματα όπου απαιτείται κάποιο μορφή Τεχνητής Νοημοσύνης γίνεται φανερός από μια κλασική εφαρμογή όπως είναι τα «έξυπνα» τεχνητά μέλη. Μέχρι πριν μερικά χρόνια, ένας σοβαρός τραυματισμός ή μια επέμβαση που οδηγούσε σε ακρωτηριασμό, σήμαινε για τον ασθενή μια εξαιρετικά δύσκολη νέα κατάσταση και ασφαλώς πολύ δύσκολη αλλαγή στη ζωή του, στην καθημερινότητα και στον τρόπο πώς έπρεπε να μπάει από την αρχή να εκτελεί τις πιο απλές ενέργειες, καθώς τα «σταπικά» τεχνητά μέλη απλώς αντικαθιστούσαν (εν μέρει) τη δομική αλλά όχι τη λειτουργική δυνατότητα του ακρωτηριασμένου μέλους. Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη της επιστήμης όσον αφορά τη θούβητερη κατανόηση της νευροφυσιολογίας του εγκεφάλου και του τρόπου διασύνδεσης του νευρικού συστήματος, καθώς και της τεχνολογίας σε επίπεδο ανώλων εμπνευσμάτων στον εγκέφαλο και στη συνδυαστική στήλη, επέτρεψαν τη μετατροπή των μέχρι τότε στατικών τεχνητών μελών σε πλήρως «ενεργά» και λειτουργικά. Σήμερα είναι δυνατό, ανάλογα με την περίπτωση, τα τεχνητά μέλη

να δισυσνδένονται με το νευρικό σύστημα ή κατευθύνει με τον εγκέφαλο μέσω μικροηλεκτρονικών συσκευών, έτσι ώστε να υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία «εντολής» (κίνηση) αλλά και «αίσθησης» (π.χ. αφής, αντίστασης). Στις εφαρμογές αυτές περιλαμβάνονται και μικροσυσκευές όπως ο τεχνητός αμφιβληστροειδής, δηλαδή ηλεκτρονικοί αισθητήρες τύπου CCD παρόμοιοι με αυτούς των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, που τοποθετούνται μέσα στον οφθαλμό και συνδέονται με το οπτικό νεύρο ή κατευθύνει με το οπτικό κέντρο του εγκεφάλου, προσφέροντας έτσι και στοιχειώδη, προς το παρόν, όραση σε ανθρώπους με μερική ή ολική απώλεια της.

Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι υπολογιστές και τα ψηφιακά συστήματα μετατρέπονται ολοένα και περισσότερο σε μηχανές γενικής χρήσης. Αντί ένα αυτόματο σύστημα ελέγχου να είναι απλά «ψηφιακό», δηλαδή βασισμένο σε ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα, σήμερα μετασχηματίζεται σταδιακά από υλικό (hardware) σε λογισμικό (software), όχι μόνο για λόγους κόστους και εύκολης τροποποίησης, αλλά και γιατί στο λογισμικό υλοποιούνται πολύ πιο εύκολα «έξυπνες» μονάδες. Ένας απλός αισθητήρας προσέγγισης στον προφυλακτήρα του αυτοκινήτου που διευκολύνει τη διαδικασία της στάθμευσης μετατρέπεται σε ολοκληρωμένο οπτικό σύστημα επεξεργασίας, ανάλυσης και εκτίμησης της κυκλοφορίας κατά την κίνηση σε πραγματικό χρόνο, με «έξυπνες» δυνατότητες όπως η έγκαιρη ειδοποίηση του οδηγού (ή και πλήρως αυτόματο φρενάρησιμα αποφυγής μιας σύγκρουσης) ανάλογα με την απόσταση των άλλων οχημάτων, το βάρος του αυτοκινήτου και τις καιρικές συνθήκες στον δρόμο.

Σ' όλες αυτές τις εφαρμογές, η Μηχανική Μάθηση αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες επιτυχίας, καθώς η αντίστοιχη συσκευή «εκπαιδεύεται» να λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο, κυρίως μέσω της τεχνικής δοκιμής και διόρθωσης σφάλματος. Συγκεκριμένα, το σύστημα κίνησης του τεχνητού μέλους, αντί να υλοποιεί ανεπιτυχώς διδοίκασιες επίλυσης θέλησιων τροχιακών εξισώσεων στον τρισδιάστατο χώρο, εννομηώσεται έναν ταξινομητή προτύπων ο οποίος εκπαιδεύεται να κινεί με σωστό τρόπο τις αρθρώσεις του τεχνητού μέλους ώστε να πετύχει το τελικό σημείοστόχο, ακριβώς όπως ένα βρέφος μαθαίνει σταδιακά να περπατά χωρίς να πέφτει

και να ελέγχει με ακρίβεια τις κινήσεις του μέσα από το παιχνίδι. Κατ' ανάλογο τρόπο, μια μικροσυσκευή τεχνητού αμφιβληστροειδούς δεν αποτελείται απλά από τον οπτικό αισθητήρα, αλλά μπορεί να ενσωματώνει και κάποιες ανώτερες λειτουργίες, χωρίς να απαιτείται η συνεχής τροφοδοσία του οπτικού νεύρου με μεγάλο όγκο πληροφοριών. Για παράδειγμα, το σύστημα μπορεί να εκπαιδεύσει να αναγνωρίζει κίνηση εντός του οπτικού πεδίου, να βελτιώνει την εικόνα, να επισημαίνει τα πιο σημαντικά της χαρακτηριστικά (π.χ. πρόσωπα, σύμβολα, πινακίδες) και γενικά να βοηθά το οπτικό σύστημα του ασθενούς ώστε να «βλέπει» με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τον φυσικό αλλά σχεδόν εξίσου αποτελεσματικό. Οι επιπονητικές έρευνες σε αυτούς τους τομείς βρίσκονται σήμερα στα όρια των τεχνολογικών δυνατοτήτων ενώ κάθε χρόνο κατασκευάζονται όλο και πιο «έξυπνα» οπτικά εμφυτεύματα.

Είναι επίσης σημαντικό να διευκρινιστεί η σημασία του όρου «μάθηση» στον όρο Μηχανική Μάθηση. Όπως αναλύθηκε πιο πάνω για τα ΤΝΔ, αλλά και για όλους σχεδόν τους τύπους ταξινόμητων προτύπων, το σημαντικό στοιχείο δεν είναι μόνο το μοντέλο οργάνωσης της γνώσης (εσωτερική δομή) αλλά πολύ περισσότερο ο αλγόριθμος εκπαίδευσης, δηλαδή ο τρόπος επεξεργασίας των «παράδειγμάτων» εισόδου-εξόδου και η κατάλληλη ανασκόπιση της στη δομή αυτή, χωρίς φυσικά την καταστροφή της προηγούμενης γνώσης. Η ικανότητα μάθησης δεν είναι σημαντική μόνο γιατί προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής μοντέλων «γενικής χρήσης», όπου ουσιαστικά οι ίδιοι ταξινόμητες προτύπων εφαρμόζονται σε διαφορετικά προβλήματα με αντίστοιχα δεδομένα εκπαίδευσης. Είναι εξίσου σημαντική και επειδή επιτρέπει την προσαρμογή του συστήματος σε νέες συνθήκες και διαφορετικό περιβάλλον. Ένα «έξυπνο» σύστημα είναι σχεδόν άχρηστο αν πρέπει να επανεκπαιδεύεται μετά από κάθε μεγάλη ή μικρή αλλαγή στο περιβάλλον όπου λειτουργεί. Αντίθετα, θα πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται σε αυτές τις νέες συνθήκες, να χρησιμοποιεί τυχόν νέα δεδομένα εισόδου αλλά και τις δικές του αστοχίες (σφάλματα), έτσι ώστε να αναθεωρεί τη μέχρι τότε γνώση του και να βελτιώνει εκ νέου την αποτελεσματικότητά του. Η ευελιξία αυτή των μοντέλων της Μηχανικής Μάθησης, καθώς και κάποιων άλλων εναλλακτικών προσεγγίσεων όπως είναι τα αυτόνομα

συστήματα προσαρμοστικής συμπεριφοράς, αποτελούν ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα έναντι των παλαιότερων, «παροδοσιακών» μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης.

## ΕΝΑ ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ: ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Πώς, λοιπόν, λειτουργεί πρακτικά ένα σύστημα Μηχανικής Μάθησης σε ένα πραγματικό καθημερινό πρόβλημα; Για να αναλυθεί ολόκληρη η διαδικασία επεξεργασίας από τη δημιουργία των κατάλληλων δεδομένων εισόδου, την αντιστοίχσή τους με τις «ωστές» εξόδους για τη δημιουργία δεδομένων εκπαίδευσης, τη δημιουργία του ίδιου του αλγορίθμου εκπαίδευσης (π.χ. Back-Propagation), μέχρι και τη χρήση του εκπαιδευμένου συστήματος (π.χ. ΤΝΔ ταξινόμητη προτύπων) με σκοπό τη λήψη αποφάσεων ή την πραγματοποίηση προβλέψεων βάσει άγνωστων δεδομένων εισόδου, απαιτούνται πολλά και σύνθετα ενδιάμεσα στάδια, το καθένα πολύ εξειδικευμένα και κατάλληλα υλοποιημένα για το εκάστοτε πρόβλημα. Η γενική, όμως, προσέγγιση μπορεί να περιγραφεί, χωρίς της σχετική μαθηματική ανάλυση, με ένα απλό παράδειγμα, όπως το παρακάτω.

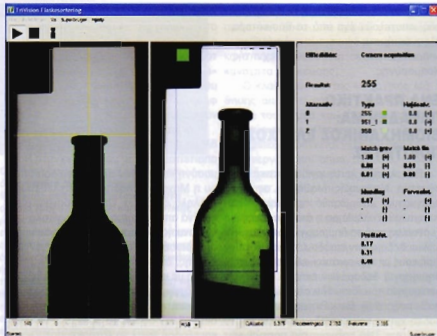
Σε μια βιομηχανία ουσκευασίας τροφίμων, η παραγωγική διαδικασία περιλαμβάνει σε κάποιο στάδιο την αυτόματη διαλογή φρούτων. Μια γραμμή (π.χ. μύλιντας) μεταφοράς προωθεί διάφορα φρούτα στο σύστημα διαλογής, τα οποία πρέπει να διαχωριστούν ανά είδος, όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και με ακρίβεια, ώστε στη συνέχεια να ουσκευαστούν με τρόπο κατάλληλο για το κάθε είδος. Ο χειρωνακτικός τρόπος διαχωρισμού θεωρείται πολύ οργός, και έτσι οι εργάτες, α-

ντί να διαλέγουν «με το χέρι» τα φρούτα στη γραμμή μεταφοράς, ελέγχουν τους αντίστοιχους αυτοματισμούς που λειτουργούν με πολλαπλάνα ταχύτητα. Το «ευφύες» τμήμα του συστήματος πραγματοποιεί την αυτόματη διαλογή των φρούτων μέσω κατάλληλων διατάξεων αναγνώρισης προτύπων.

Το παραπάνω είναι ένα τυπικό πρόβλημα βιομηχανικού αυτοματισμού όπου απαιτείται κάποιος μορφή Τεχνητή Νοημοσύνη και για την υλοποίηση του οποίου η Μηχανική Μάθηση αποτελεί το κατάλληλο εργαλείο. Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της Μηχανικής Μάθησης είναι το γεγονός ότι οι περισσότεροι αλγόριθμοι είναι γενικής χρήσης, δεν συνδέονται δηλαδή κατ' ανάγκη με κάποιο συγκεκριμένο τύπο προβλημάτων, ενώ σε πρακτικό επίπεδο αυτό που απαιτείται κυρίως είναι η σωστή σχεδίαση όσον αφορά τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, ώστε να κατασκευαστούν κατάλληλα εκπαιδευτικά σύνολα για ταξινόμηση προτύπων, π.χ. για κάποιο ΤΝΔ. Είτοι, το παραπάνω πρόβλημα μπορεί, για παράδειγμα, να προσεγγιστεί με τη βοήθεια ενός ΤΝΔ, το οποίο θα εκπαιδευτεί με κατάλληλα δεδομένα και στη συνέχεια θα μπορεί να αναγνωρίζει τα είδη φρούτων στη γραμμή μεταφοράς. Η ακριβής σχεδίαση των προδιαγραφών ενός τέτοιου ΤΝΔ, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τη βέλτιστη τοπολογία του, αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα, το οποίο δεν μπορεί να αναλυθεί εύκολα -άλλωστε, στη θέση του ΤΝΔ μπορεί γενικά να τοποθετηθεί σχεδόν οποιοδήποτε άλλο είδος ταξινόμητη προτύπων. Όμως, είναι σχετικά εύκολο να περιγραφεί η βασική σχεδίαση σε επίπεδο δεδομένων εισόδου και εξόδου που απαιτούνται για την εκπαίδευση και που γενικά είναι ανεξάρτητη από το είδος του ταξινόμητη που πράκειται να χρησιμοποιηθεί.



*Μικροσυσκευές τεχνητού αμφιβληστροειδούς αποτελούν πλέον πραγματικότητα και τα τελευταία χρόνια ενσωματώνουν επί του «έξυπνα» χαρακτηριστικά. Εκτός από απλή καταγραφή εικόνων μέσω ηλεκτρονικών αισθητήρων τύπου CCD, οι μικροσυσκευές αυτές συνδέονται με το οπτικό νεύρο ή καταδικάζουν με το οπτικό κέντρο στον εγκέφαλο, προσφέροντας όραση σε ανθρώπους με μερική ή ολική απώλεια της. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να εκπαιδευτεί ώστε να αναγνωρίζει κίνηση εντός του οπτικού πεδίου, να βελτιώνει την εικόνα, να επισημαίνει τα πιο σημαντικά της χαρακτηριστικά (π.χ. πρόσωπα, σύμβολα, πινακίδες κλπ.*



Παράδειγμα αυτοματοποιημένης ανάλυσης εικόνας και εκτίμησης της ποιότητας γυάλινης φιάλης σε βιομηχανική γραμμή εμφιάλωσης. Η εικόνα της κάμερας, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας διαχωρίζεται σε «αντικείμενο» και «υπόβαθρο», ενώ το περιγράμμα του μπουκαλιού αναλύεται μέσω αλγορίθμου Μηχανικής Μάθησης προκειμένου να εκτιμηθεί η ποιότητά του. Η τελική απόφαση αφορά τη χρησιμοποίηση ή όχι της συγκεκριμένης φιάλης (πρώδηση προς εμφιάλωση ή ανακύκλωση).

Ο απλούστερος, σύμφωνα με την ανθρώπινη εμπειρία, τρόπος διαχωρισμού των φρούτων στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι πιθανότατα ο οπτικός. Τα φρούτα μπορούν να διαχωριστούν εύκολα σύμφωνα με το μέγεθος, το χρώμα και το σχήμα τους, με βάση εικόνες που λαμβάνονται από μία κάμερα υψηλής ταχύτητας σε κάποιο σημείο της γραμμής μεταφοράς. Θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλα χαρακτηριστικά, όπως π.χ. το βάρος ή η οσμή τους, αλλά αυτό απαιτεί πρόσθετο εξοπλισμό αντίστοιχων αισθητήρων. Η επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών πρέπει να είναι επαρκής για την περιγραφή του προβλήματος (διαχωρισμός φρούτων), αλλά ταυτόχρονα να μη περιλαμβάνει υπερβολικό αριθμό διαστάσεων, καθώς κάτι τέτοιο επιβαρύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης και συχνά επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια του συστήματος. Έτσι, ανάλογα με το σύνολο των δεδομένων εισόδου, δηλαδή όλα τα πιθανά είδη των φρούτων που πρέπει να διαχωρίζονται σωστά, επιλέγεται το κατάλληλο πλήθος και είδος χαρακτηριστικών για τον σκοπό αυτό.

Για να γίνει καλύτερα κατανοητό πώς λειτουργεί η παραπάνω διαδικασία, αρκεί να σκεφτεί κανείς μερικές συγκεκριμέ-

νες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, πώς μπορεί να διαχωριστεί οπτικά ένα πορτοκάλι από ένα μήλο; Σίγουρα από το χρώμα, ίσως και από το σχήμα. Αν μια εγχρωμη κάμερα χαμηλής ανάλυσης κοστίζει πολύ περισσότερο από μια μονόχρωμη κάμερα υψηλής ανάλυσης, τότε επιλέγεται η δεύτερη λύση και το σχήμα ως το βασικό χαρακτηριστικό διαχωρισμού. Το σχήμα είναι επίσης το κατάλληλο χαρακτηριστικό για τον διαχωρισμό ενός πορτοκαλιού από μια μπανάνα, ακόμα και από ένα μανταρίνι, μετά από κατάλληλη επεξεργασία του σχήματος και του μεγέθους. Αντίθετα, ο διαχωρισμός ενός κόκκινου μήλου από ένα πράσινο απαιτεί προφανώς τη χρήση χρώματος. Συνεπώς, για τον διαχωρισμό όλων των παραπάνω φρούτων απαιτούνται μόλις δύο οπτικά χαρακτηριστικά, κατάλληλα κωδικοποιημένα σε ποσοτική μορφή (αριθμούς), ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου. Για παράδειγμα, το χρώμα μπορεί να κωδικοποιηθεί βάσει των τριών βασικών του συνιστωσών (Red/Green/Blue – RGB), ενώ το σχήμα και το μέγεθος απαιτούν μια κάπως πιο σύνθετη διαδικασία, π.χ. μέσω διαχωρισμού του πεδίου σε υποδιαίρεσεις (πλέγμα) και κωδικοποίηση του περιγράμματος με τη

μορφή διαδοχικών κορυφών πολυγώνου. Σε κάθε περίπτωση, το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα διάνυσμα «διάστασης K» για κάθε είδος φρούτου, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα N τέτοια «εκπαιδευτικά παραδείγματα» για φρούτα διαφόρων ειδών. Παράλληλα, για κάθε ένα από τα N διανύσματα δίδεται και η σωστή κατηγορία, δηλαδή το είδος που αναμένεται να υπολογίσει ως έξοδο ο «ευφυής» ταξινομητής όταν θα έχει εκπαιδευτεί σωστά.

ΞΕΙΖΙΕ να σημειωθεί ότι στην παραπάνω περιγραφή περιλαμβάνονται μόλις δύο βασικά (οπτικά) χαρακτηριστικά διαχωρισμού, το μέγεθος/σχήμα και το χρώμα. Συνεπώς, το στάδιο της στατιστικής επιλογής των αποδοτικότερων χαρακτηριστικών δεν είναι απαραίτητο στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της απλότητας της σχεδίασης. Αν ο οπτικός εξοπλισμός έχει ρυθμιστεί σωστά και λειτουργεί εντός των προδιαγραφών του (π.χ. ταχύτητα γραμμής μεταφοράς), το σύστημα αναμένεται να διαχωρίζει σωστά όλα τα παραπάνω είδη φρούτων. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι μπορεί να αναγνωρίσει κάθε είδος φρούτων – αφού περιορίζεται αναγκαστικά από το πληροφοριακό περιεχόμενο και την πληρότητα του συνόλου εκπαίδευσης βάσει του οποίου έχει εκπαιδευτεί ο ταξινομητής, π.χ. ένα ΤΝΔ. Στην περίπτωση που στη γραμμή μεταφοράς εμφανιστεί, για παράδειγμα, ένα νερόντζι, το σύστημα πιθανότατα θα το ταξινομήσει εσφαλμένα ως πορτοκάλι. Παρότι θα πρόκειται για λάθος, εντούτοις η ικανότητα γενίκευσης του ταξινομητή, όπως περιγράφηκε πιο πάνω, θα του επιτρέψει τουλάχιστον να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα αυτό, ακόμα και για εντελώς άγνωστα δεδομένα εισόδου, και να μη το αναγνωρίσει π.χ. ως μήλο ή μπανάνα.

Τέλος, ΞΕΙΖΙΕ να αναφερθεί πως η Μηχανική Μάθηση περιλαμβάνει αλγορίθμους και μοντέλα που επιτρέπουν τη σωστή συμπεριφορά ενός συστήματος όπως το παραπάνω, ακόμα και στην περίπτωση άγνωστων δεδομένων εισόδου. Όσα περιγράφηκαν στο πλαίσιο των ταξινομητών προτύπων οφορούν μια μεγάλη κατηγορία αλγορίθμων που αναφέρεται ως εκπαίδευση με επίβλεψη (supervised learning). Κύριο χαρακτηριστικό των αλγορίθμων αυτών είναι το γεγονός ότι για την εκπαίδευση απαιτούνται τόσο τα δεδομένα εισόδου (χαρακτηριστικά), όσο και οι αντίστοιχες σωστές κατηγορίες (κλάσεις) στην έξοδο. Αντίθετα, στους αλγορίθμους εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) δεν δίδεται η

οσστή κατηγορία (κλάση), με άλλα λόγια ο ταξινόμητής δεν «γνωρίζει» ποια είναι η σωστή κατηγορία εξόδου για κάθε διάνυσμα εισόδου, παρά μόνο προσπαθεί να ομαδοποιήσει με βέλτιστο τρόπο τα διαθέσιμα δεδομένα. Δηλαδή, η διαδικασία εκπαίδευσης σε αυτή την περίπτωση δεν έγκειται στο να κατασκευαστεί ένας ταξινόμητής που να παράγει τη σωστή έξοδο για κάθε συγκεκριμένο είδος, αλλά στο να ομαδοποιεί όσο το δυνατόν καλύτερα τα δεδομένα εισόδου και να παράγει ως έξοδο την κατάλληλη «ομάδα συμπεριληψής» (membership) για κάθε πρότυπο. Ένα τέτοιο σύστημα στην περίπτωση της διαλογής φρούτων θα μπορούσε να ρυθμιστεί έτσι ώστε, είτε να ομαδοποιεί τα νεράντζια μαζί με τα πορτοκάλια (εσπεριδοειδή), είτε να αναφέρει ότι πρόκειται για ένα νέο άγνωστο είδος (πιθανότατα μέσω κάποιου πρόσθετου χαρακτηριστικού, π.χ. σχής) και να δημιουργεί μια νέα κατηγορία γι' αυτό.

Το παραπάνω παράδειγμα με τη διαλογή φρούτων αποτελεί μια απλουστευμένη περιγραφή προβλημάτων που συναντώνται καθημερινά σε τομείς όπως ο έλεγχος ποιότητας στη βιομηχανική παραγωγή και που επιλύονται εδώ και αρκετά χρόνια μέσω συστημάτων βασισμένων στη Μηχανική Μάθηση. Σήμερα, ανάλογοι αυτοματισμοί επιτρέπουν τη διαλογή γυάλινων φιαλών προς επαναχρησιμοποίηση (έλεγχος θραύσης, ραγιών, ανθεκτικότητας) μέσω οπτικών ελέγχων υψηλής αξιοπιστίας σε γραμμές μεταφοράς-εμφιάλωσης, με ρυθμό αρκετών εκατοντάδων μονάδων το λεπτό.



## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Είτε πρόκειται για ένα σύστημα διαλογής φρούτων, είτε για διαγνωστική εφαρμογή σε ιατρικό μηχάνημα, είτε για ένα αυτόνομο όχημα σε έναν άλλο πλανήτη, η Τεχνητή Νοημοσύνη και ειδικότερα αυτή που βασίζεται στη Μηχανική Μάθηση αποτελεί την καρδιά και τον βασικότερο παράγοντα επιτυχίας. Σήμερα, παρόμοια συστήματα βρίσκονται εγκατεστημένα σχεδόν σε κάθε μικροηλεκτρονική συσκευή ή λογισμικό που ενσωματώνει κάποια μορφή «έξυπνη» λειτουργικότητα - κάτι περισσότερο από επεξεργασία των δεδομένων εισόδου για απλή αποθήκευση ή βελτίωση της ποιότητάς τους (π.χ. αφαίρεση θορύβου ή ηχούς στις τηλεφωνικές συνδιαλέξεις).

Η Μηχανική Μάθηση απέχει, όπως φαίνεται, πολλές δεκαετίες ακόμη από τα συναισθηματικά ρομπότ που περιγράφει ο I. Asimov στα έργα του. Αποτελεί, όμως, την πιο επιτυχημένη έκφραση της Τεχνητής Νοημοσύνης, με ιδιαίτερα αξιόπιστα αποτελέσματα σε πραγματικά προβλήματα και συγκεκριμένους στόχους. Πρόκειται για τα πρώτα βήματα προς τη πραγματική προσέγγιση αυτού που θεωρείται «νοημοσύνη», όχι με την ψυχρή μηχανιστική αντίληψη αλλά με την ανθρώπινη. Οι επιστήμονες διαπιστώνουν με έκπληξη ότι όσο περισσότερο εξελίσσονται οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης προς όλο και πιο σύνθετες «ανθρώπινες» λειτουργίες, τόσο πιο πολύ η συμπεριφορά των συστημάτων αυτών αρχίζει να εμφανίζει πολύ γνωστά, σχεδόν ανθρώπινα χαρακτηριστικά: συνθέτες ομιλίας που ψευδίζουν μέχρι να «μάθουν» να μιλούν σωστά, μηχανικοί ζωγράφοι που μαθαίνουν να ζωγραφίζουν σαν παιδιά προσχολικής ηλικίας, νευρωνικά δίκτυα που μαθαίνουν αριθμητική και κάνουν τα ίδια λάθη με τους πραγματικούς μικρούς μαθητές. Δεν αποκλείεται, σε λίγα χρόνια η διαχωριστική γραμμή μεταξύ «ανθρώπινης» και «τεχνητής» νοημοσύνης να είναι τό-

**Αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου συσκευασίας σε βιομηχανική γραμμή εμφιάλωσης. Μια κάμερα καταγράφει την οκρασιότητα του πάματος και τη στάθμη πλήρωσης στην κάθε φιάλη, καθώς αυτή διέρχεται με μεγάλη ταχύτητα μπροστά από τη συσκευή. Ένα σύστημα ποιοτικού ελέγχου, βασισμένο π.χ. σε ένα ΤΗΔ, εκτιμά την ποιότητα κάθε συσκευασίας, και όσες κρίνονται ακατάλληλες αποσπώνται αυτόματα από τη γραμμή μεταφοράς.**

σο δυσδιάκριτη που θα είναι πλέον αδύνατο οι μηχανές αυτές να αντιμετωπίζονται απλώς ως ένα εξελιγμένο σύνολο από πολύπλοκα κυκλώματα και γραμμές κώδικα προγραμμάτων. ■

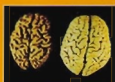
## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) **ARTIFICIAL INTELLIGENCE (article)**, Wikipedia, 3 Sept 2013.
- (2) **N. Nilsson: ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A NEW SYNTHESIS**, Morgan Kaufmann Publ., 1998.
- (3) **S. Russell P. Norvig: ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A MODERN APPROACH**, Prentice Hall, 2003.
- (4) **HISTORY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE (article)**, Wikipedia, 9 Jul 2013.
- (5) **MACHINE LEARNING (article)**, Wikipedia, 29 Aug 2013.
- (6) **X. Γεωργίου: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ - ΤΟΜΟΣ Α: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**, Εκδ. Αρνούση, 2012.
- (7) **X. Γεωργίου: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ - ΤΟΜΟΣ Β: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΦΗΣ ΜΕΣΩ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ**, Εκδ. Αρνούση, 2012.
- (8) **LIST OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS (article)**, Wikipedia, 29 Aug 2013.
- (9) **D. Rumelhart, G. Hinton, R. Williams: LEARNING REPRESENTATIONS BY BACK-PROPAGATION ERRORS**, *Nature* 323 (6086): 533-536.
- (10) **S. Theodoridis, K. Koutroumbas: PATTERN RECOGNITION (4th Ed.)**, Academic Press, 2008.
- (11) **W. McCulloch, W. Pitts: A LOGICAL CALCULUS OF IDEAS IMMANENT IN NERVOUS ACTIVITY**, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5 (4) (1943): 115-133.
- (12) **F. Rosenblatt: THE PERCEPTRON: A PROBABILISTIC MODEL FOR INFORMATION STORAGE AND ORGANIZATION IN THE BRAIN**, *Psychological Review*, 65 (6)(1958): 386-408.
- (13) **F. Rosenblatt: THE PERCEPTRON - A PERCEIVING AND RECOGNIZING AUTOMATON**, Report 65-460-1 (1957), Cornell Aeronautical Laboratory.
- (14) **B. Widrow, M. Lehr: 30 YEARS OF ADAPTIVE NEURAL NETWORKS: PERCEPTRON, MADALINE AND BACKPROPAGATION**, *Proc. IEEE*, 78 (9) (1990): 1415-1442.
- (15) **GODEL'S INCOMPLETENESS THEOREMS (article)**, Wikipedia, 17 Aug 2013.
- (16) **A. Turing: COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE**, *Mind*, 59 (1950): 433-460.
- (17) **T. Mitchell: MACHINE LEARNING**, McGraw-Hill, 1997.
- (18) **C. Looney: PATTERN RECOGNITION USING NEURAL NETWORKS**, Oxford University Press, 1997.
- (19) **DECISION THEORY (article)**, Wikipedia, 28 Aug 2013.
- (20) **V. Vapnik: STATISTICAL LEARNING**

# ΠΕΡΙΣΚΟΠΙΟ

ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Οι μυστικές  
αισθήσεις  
των φυτών



Γήρανση  
του εγκεφάλου

Τι μουσικά κρύβει;



Θκεάνια  
παρατηρητήρια

Η ανθρώπινη ματιά  
στο υγρό στοιχείο

## Μηχανική Μάθηση

Το πρώτο βήμα προς τις «σκεπτόμενες» μηχανές



Αναστροφή  
των πόλων

Πόσο καταστροφική  
μπορεί να είναι για τη  
ζωή στη Γη;

Αποικίες  
στον Άρη

Τα σχέδια για τον αποικισμό του Κόκκινου Πλανήτη



9 771105 712006

