**ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ**

**Simon Haykin**

~~Έχουν ρίζες στη στατιστική θεωρία μάθησης:~~

~~1. Support Vector Machines (Μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης &~~

1. ~~Principal Components analysis (Ανάλυση κύριων συνιστωσών)~~

Αναπόσπαστο τμήμα του κλάδου των Νευρωνικών Δικτύων, αντλώντας έμπνευση από την λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου:

1. Perceptron
2. MLP
3. Αυτο-οργανούμενοι χάρτες
4. Νευροδυναμική

~~Υπάρχουν ορισμένες λεπτές διαφορές μεταξύ των λειτουργιών των νευρωνικών δικτύων (neural networks) και των μηχανών με δυνατότητα μάθησης (learning machines).~~

~~Ταξινομητής Bayes -> Λειτουργεί σε περιβάλλον με Γκαουσιανή κατανομή.~~

**(ΕΙΣΑΓΩΓΗ)**

1. **ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΕΝΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ**

Το έργο στο επιστημονικό πεδίο των Τ.Ν.Δ. ( χάριν συντομίας, αποκαλούνται συνήθως <<νευρωνικά δίκτυα>>) βασίστηκε, από τις απαρχές του, στο γεγονός ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος εκτελεί τους υπολογισμούς με εντελώς διαφορετικό τρόπο από το συμβατικό ψηφιακό υπολογιστή. Ο εγκέφαλος είναι ένας εξαιρετικά πολύπλοκος, μη γραμμικός, παράλληλος υπολογιστής (σύστημα επεξεργασίας πληροφορίας). Έχει τη δυνατότητα να οργανώνει τα δομικά του στοιχεία, γνωστά ως νευρώνες με τρόπο ώστε να εκτελούν συγκεκριμένους υπολογισμούς (πχ αναγνώριση προτύπων, αντίληψη και έλεγχο της κίνησης) με ταχύτητα πολλαπλάσια από αυτή του γρηγορότερου ψηφιακού υπολογιστή που υπάρχει σήμερα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανθρώπινη όραση, η οποία είναι μία διαδικασία επεξεργασίας πληροφοριών. Είναι ευθύνη του οπτικού συστήματος να μας παρέχει μία αναπαράσταση του περιβάλλοντος μας κα, ακόμη πιο σημαντικό, να μας προμηθεύει με τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για να επικοινωνήσουμε μ’ αυτό. Συγκεκριμένα, ο εγκέφαλος εκτελεί διαρκώς και ασταμάτητα εργασίες αναγνώρισης που βασίζονται στην αντίληψη (πχ αναγνώριση ενός οικείου προσώπου που βρίσκεται σε μία άγνωστη σκηνή) ~~σε χρόνο περίπου 100-200 ms,~~ την ίδια στιγμή που εργασίες πολύ μικρότερου βαθμού πολυπλοκότητας απαιτούν πολύ μεγαλύτερους χρόνους για να εκτελεστούν από έναν ισχυρό υπολογιστή.

~~Ένα άλλο παράδειγμα είναι το σύστημα ηχητικού εντοπισμού που έχει μία νυχτερίδα. Επιπρόσθετα με τις πληροφορίες που παρέχει σχετικά με την απόσταση ενός στόχου ( πχ ενός εντόμου που πετά), το sonar της νυχτερίδας μεταδίδει επίσης πληροφορίες για τη σχετική ταχύτητα του στόχου, το μέγεθος του, το μέγεθος διάφορων χαρακτηριστικών του στόχου, αλλά και το ύψος του στόχου από το έδαφος. Οι πολύπλοκοι νευρωνικοί υπολογισμοί που απαιτούνται για την εξαγωγή όλων αυτών των πληροφοριών από την <<ηχώ>> του στόχου λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό ενός εγκεφάλου που έχει το μέγεθος ενός δαμάσκηνου. Κυριολεκτικά, το sonar μίας νυχτερίδας μπορεί να καταδιώξει και να συλλάβει το στόχο με ευχέρεια και βαθμό επιτυχίας που θα τον ζήλευαν πολλά προηγμένα συστήματα ραντάρ και μηχανικοί ήχου.~~  
  
~~Πως τα καταφέρνει ο ανθρώπινος εγκέφαλος ή ακόμα και ο εγκέφαλος της νυχτερίδας; Από τη στιγμή της γέννησης, ο εγκέφαλος έχει ήδη σημαντική δομή και τη δυνατότητα να κατασκευάζει δικούς του κανόνες συμπεριφοράς, μέσω αυτού που αποκαλούμε συνήθως εμπειρία. Η εμπειρία συσσωρεύεται με την πάροδο του χρόνου και μεγάλο μέρος της εξέλιξης του εγκεφάλου λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων ετών από τη γέννηση, αν και συνεχίζεται και σε μετέπειτα στάδια.~~

Ο χαρακτηρισμός ενός νευρικού συστήματος ως << εξελισσόμενο >> είναι συνώνυμος με την έννοια της **πλαστικότητας** : αυτή δίνει στο νευρικό σύστημα τη δυνατότητα να προσαρμόζεται ανάλογα με το περιβάλλον του. Και ακριβώς όπως είναι ζωτική για τη λειτουργία των νευρώνων ως μονάδες επεξεργασίας πληροφοριών στον ανθρώπινο εγκέφαλο είναι εξίσου σημαντική για τα νευρωνικά δίκτυα που αποτελούνται από τεχνητούς νευρώνες. Στην πλέον γενική μορφή του, ένα νευρωνικό δίκτυο είναι μία ψμε τον οποίο ο εγκέφαλος εκτελεί μία συγκεκριμένη εργασία ή λειτουργία.  
  
Το δίκτυο υλοποιείται συνήθως με τη χρήση ηλεκτρονικών συστατικών ή προσομοιώνεται με τη χρήση λογισμικού σ’ έναν υπολογιστή.

ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΕΚΤΕΛΟΥΝ ΧΡΗΣΙΜΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ΑΦΟΥ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΟΥΝ ΜΕΣΩ ΜΙΑΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΑΘΗΣΗΣ. Για να επιτυγχάνουν καλή απόδοση τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν τεράστιο αριθμό απλών, διασυνδεδεμένων μεταξύ τους υπολογιστικών κυττάρων, τα οποία αποκαλούνται **νευρώνες** ή **μονάδες επεξεργασίας.**

Μπορούμε λοιπόν να διατυπώσουμε τον ακόλουθο ορισμό ενός νευρωνικού δικτύου ως προσαρμόσιμη μηχανή:  
  
Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας τεράστιος παράλληλος επεξεργαστής με κατανεμημένη αρχιτεκτονική, ο οποίος αποτελείται από απλές μονάδες επεξεργασίας και έχει από τη φύση του τη δυνατότητα να αποθηκεύει εμπειρική γνώση και να την καθιστά διαθέσιμη για χρήση. Μοιάζει με τον ανθρώπινο εγκέφαλο σε δύο σημεία.

1. Το δίκτυο προσλαμβάνει τη γνώση από το περιβάλλον του, μέσω μίας διαδικασίας μάθησης.
2. Η ισχύς των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, που αποκαλείται συναπτικό βάρος, χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της γνώσης που αποκτιέται.

Η διαδικασία μέσω της οποία επιτυγχάνεται η μάθηση αποκαλείται αλγόριθμος μάθησης και η λειτουργία του είναι να τροποποιεί τα συναπτικά βάρη του δικτύου με τον κατάλληλο τρόπο για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου.

~~Η τροποποίηση των συναπτικών βαρών αποτελεί την <<παραδοσιακή>> μέθοδο σχεδιασμού νευρωνικών δικτύων. Αυτή η προσέγγιση βρίσκεται πλησιέστερα στην θεωρία γραμμικών προσαρμοστικών φίλτρων, η οποία είναι από καιρό καθιερωμένο και εφαρμόζεται επιτυχώς σε πολλά διαφορετικά πεδία (Widrow & Stearns, 1985. Haykin, 2002). Ωστόσο, ένα νευρωνικό δίκτυο έχει τη δυνατότητα να τροποποιεί την τοπολογία του και αυτό επειδή κάποιοι νευρώνες του ανθρώπινου εγκεφάλου μπορεί να <<πεθάνουν>> ενώ επίσης μπορεί να αναπτύσσονται νέες συναπτικές συνδέσεις.~~

**ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

Είναι προφανές ότι ένα νευρωνικό δίκτυο οφείλει την υπολογιστική ισχύ του κατά πρώτον στην παράλληλη, κατανεμημένη δομή του και κατά δεύτερον στην ικανότητα του να μαθαίνει, και ως εκ τούτου να γενικεύει. Ο όρος γενίκευση αναφέρεται στην παραγωγή, από το νευρωνικό δίκτυο, λογικών εξόδων για εισόδους στις οποίες δεν έχει συναντήσει κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης του. Αυτές οι δύο δυνατότητες δίνουν στα νευρωνικά δίκτυα τη δυνατότητα να βρίσκουν καλές προσεγγιστικές λύσεις σε πολύπλοκα (μεγάλης κλίμακας) προβλήματα, τα οποία είναι μη επιδεκτικά σε λύσεις. Στη πράξη ωστόσο, τα νευρωνικά δίκτυα δεν μπορούν να παρέχουν λύση αν λειτουργούν ατομικά. Απεναντίας, χρειάζεται να ενταχθούν σε μία ευρύτερη αλλά συνεπή προσέγγιση ανάπτυξης του συστήματος. Συγκεκριμένα, ένα πολύπλοκο πρόβλημα αποσυντίθεται σε έναν αριθμό σχετικά απλών εργασιών και τα νευρωνικά δίκτυα αναλαμβάνουν ένα υποσύνολο των εργασιών που ταιριάζουν με τις εγγενείς δυνατότητες τους. Θα πρέπει ωστόσο, να αποδεχτούμε ότι έχουμε να διανύσουμε πολύ δρόμο ακόμη μέχρι να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε μία αρχιτεκτονική υπολογιστών που θα μιμείται τον ανθρώπινο εγκέφαλο.  
  
Τα Ν.Δ. προσφέρουν τις ακόλουθες χρήσιμες ιδιότητες και δυνατότητες:

1. Μη γραμμικότητα.  
    Ένας τεχνητός νευρώνας δεν είναι απαραίτητο να είναι γραμμικός.
2. Αντιστοίχιση εισόδου - εξόδου

Ένα δημοφιλές παράδειγμα μάθησης είναι η αποκαλούμενη μάθηση με επίβλεψη. Σε αυτήν συνίσταται η τροποποίηση των συναπτικών βαρών ενός νευρωνικού δικτύου εφαρμόζοντας ένα σύνολο χαρακτηρισμένων παραδειγμάτων εκπαίδευσης ή παραδειγμάτων εργασιών. Κάθε παράδειγμα αποτελείται από ένα μοναδικό σήμα εισόδου και μία αντίστοιχη επιθυμητή απόκριση (στόχος). Στο δίκτυο παρουσιάζεται ενα παράδειγμα επιλεγμένο τυχαία από το σύνολο και τα συναπτικά βάρη (ελεύθερες παράμετροι) του δικτύου τροποποιούνται ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής απόκρισης του δικτύου που παράγεται από το σήμα εισόδου, σύμφωνα με ένα κατάλληλο στατιστικό κριτήριο. Η εκπαίδευση του δικτύου επαναλαμβάνεται για πολλά παραδείγματα του συνόλου εκπαίδευσης, εως ότου το δίκτυο φτάσει σε μία ευσταθή κατάσταση, όπου δεν υπάρχουν περαιτέρω σημαντικές μεταβολές στα συναπτικά βάρη. Τα προηγούμενα παραδείγματα εκπαίδευσης που εφαρμόστηκαν θα μπορούσαν να εφαρμοστούν εκ νέου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης αλλά με διαφορετική σειρά. Έτσι, το δίκτυο μαθαίνει από παραδείγματα, κατασκευάζοντας μία αντιστοίχιση εισόδου - εξόδου για το δοθέν πρόβλημα.

1. Προσαρμοστικότητα

Τα Ν.Δ. έχουν εγγενή δυνατότητα να προσαρμόζουν τα συναπτικά τους βάρη ανάλογα με τις μεταβολές που γίνονται στο περιβάλλον τους. Συγκεκριμένα, ένα Ν.Δ. εκπαιδευόμενο να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, μπορει εύκολα να επαν-εκπαιδευτεί ώστε να χειρίεται ήσσονος σημασίας μεταβολές στις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας του. Επιπλέον, όταν λειτουργεί σε ενα μη-στατικο περιβαλλον (δηλ. Ένα περιβάλλον του οποίου τα στατιστικά στοιχεία μεταβάλλονται με το χρόνο), ένα Ν.Δ. μπορεί να σχεδιαστει ώστε να μεταβάλλει τα συναπτικά του βάρη σε πραγματικό χρόνο. Σαν γενικό κανόνα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι όσο πιο προσαρμοστικό κάνουμε ένα σύστημα, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι παραμένει διαρκώς σταθερό, τόσο πιο εύρωστο θα είναι και τόσο καλύτερα θα αποδίδει όταν θα κληθεί να λειτουργήσει σε ένα μη σταθερό περιβάλλον.Ωστόσο θα πρέπει να επισημανθεί ότι η προσαρμοστικότητα δεν οδηγεί πάντα στην ευρωστία, στην πραγματικότητα μπορεί να κανει το αντίθετο. Έτσι θα προκληθεί το πρόβλημα γνωστό και ως δίλημμα σταθερότητας - πλαστικότητας (Grossberg, 1988) κατά το οποίο:  
Ένα προσαρμοστικό σύστημα με σταθερές χρόνου μικρής διάρκειας μπορεί να αλλάζει κατάσταση πολύ γρήγορα και λόγω αυτού, να αποκρίνεται σε πλασματικές διαταραχές, γεγονός που προκαλεί δραστική μείωση της απόδοσης του. Για την αξιοποίηση όλων των πλεονεκτημάτων της προσαρμοστικότητας, οι κύριες σταθερές χρόνου του συστήματος θα πρέπει να έχουν επαρκή διάρκεια έτσι ώστε το σύστημα να αγνοεί της πλαστικές διαταραχές και ταυτόχρονα επαρκώς μικρής διάρκειας ώστε το σύστημα να ανταποκρίνεται σε μεταβολές του περιβάλλοντος του που έχουν πραγματικά σημασία.

1. Ενδεικτική απόκριση

Στο πλαίσιο της ταξινόμησης προτύπων ένα Ν.Δ. μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να παρέχει πληροφορία όχι μόνο για το ποιο συγκεκριμένο πρότυπο θα επιλεγεί, αλλά επίσης σχετικά με τον βαθμό εμπιστοσύνης στην ληφθείσα απόφαση. Κάτι το οποίο (2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόρριψη των διφορούμενων μοτίβων, εάν προκύψουν και κατ’ επέκταση τη βελτίωση της απόδοσης του δικτύου.

1. Πληροφορία σχετική με το περιεχόμενο

Η γνώση αντιπροσωπεύεται από την ίδια τη δομή και κατάσταση ενεργοποίησης ενός Ν.Δ. Κάθε νευρώνας στο δίκτυο ενδεχομένως να επηρεάζεται από τη συνολική δραστηριότητα όλων των άλλων νευρώνων του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι το ν.δ. χειρίζεται με φυσικό τρόπο τη σχετική με το περιεχόμενο πληροφορία (contextual information).

1. Ανοχή σε βλάβες

Ένα Ν.Δ., υλοποιημένο σε μορφή hardware, έχει την εγγενή δυνατότητα να είναι ανεκτικό σε βλάβες, ή εύρωστο υπό την έννοια ότι η απόδοση του μειώνεται βαθμιαία και ομαλά υπό αντίξοες συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα αν ένας νευρώνας ή οι συνδέσεις του καταστραφούν, η ποιότητα της ανάκλησης ενός αποθηκευμένο σε αυτό προτύπου μειώνεται. Ωστόσο λόγω της κατανεμημένης φύσης της πληροφορίας που αποθηκεύεται στο δίκτυο επιδεικνύει ομαλή μείωση στην απόδοση και όχι καταστροφική αποτυχία.

1. Δυνατότητα υλοποίησης σε VLSI

Η μαζικά παράλληλη φύση ενός ν.δ. το καθιστά ενδεχομένως γρήγορο για τον υπολογισμό συγκεκριμένων εργασιών. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά ένα ν.δ. ιδιαίτερα κατάλληλο για χρήση τεχνολογίας πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (VLSI)

1. Ομοιομορφία ανάλυσης και σχεδίασης

Ουσιαστικά τα ν.δ. απολαμβάνουν καθολικής αποδοχής ως επεξεργαστές πληροφοριών, υπό την έννοια ότι χρησιμοποιείται η ίδια σημειογραφία σε όλα τα πεδία εφαρμογής τους. Αυτό το χαρακτηριστικό εκδηλώνεται με διάφορους τόπους.

1. Οι νευρώνες σε οποιαδήποτε μορφή, αντιπροσωπεύουν ένα συστατικό κοινό σε όλα τα ν.δ.
2. Αυτός ο << κοινός >> χαρακτήρας καθιστά εφικτή τη χρήση των ίδιων θεωριών και αλγόριθμων μάθησης σε διαφορετικές εφαρμογές των ν.δ.
3. << Σπονδυλωτά>> δίκτυα μπορούν να κατασκευάζονται με απρόσκοπτη ενοποίηση επιμέρους λειτουργικών μονάδων (modules).
4. Αναλογία με τη νευροφυσιολογια του εγκεφάλου

Η σχεδίαση ενός ν.δ. δανείζεται στοιχεία από τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, ο οποίος είναι η ζωντανή απόδειξη ότι η εύρωστη, παράλληλη επεξεργασία δεν ειναι μονο φυσικά εφικτή, αλλά επίσης γρήγορη και ισχυρή. Οι νευροβιολογοι αντιμετωπίζουν τα Τ.Ν.Δ.ως ένα ερευνητικό εργαλείο για την ερμηνεία νευροβιολογικών φαινομένων. Από την άλλη, οι μηχανικοί αναζητούν στον τομέα της νευροβιολογίας νέες ιδέες για την επίλυση προβλημάτων που είναι πολύ πιο πολύπλοκα από αυτά που βασίζονται στις συμβατικές τεχνικές σχεδίασης.

## [1.2 Μάθηση συναρτήσεων]

**ΤΥΠΟΙ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ**

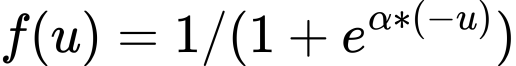
Η συνάρτηση ενεργοποίησης ορίζει την έξοδο ενός νευρώνα βάσει του τοπικού πεδίου u.   
  
**ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ** (threshold function)

~~Στους κλάδους της μηχανικής,~~ αυτή η μορφή συνάρτησης κατωφλίου αναφέρεται ως συνάρτηση Heaviside.

**ΣΙΓΜΟΕΙΔΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ**

Η γραφική της αναπαράσταση έχει σχήμα <<S>>. Είναι η πλέον κοινή μορφή συνάρτησης ενεργοποίησης που χρησιμοποείται στην κατασκευή ν.δ. Ορίζεται ως αυστηρά αύξουσα συνάρτηση που επιδυκνύει κομψή ισοροπία μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής συμπεριφοράς.

Ένα παράδειγμα της είναι η αποκαλούμενη λογιστική συνάρτηση η οποία ορίζεται ως

****

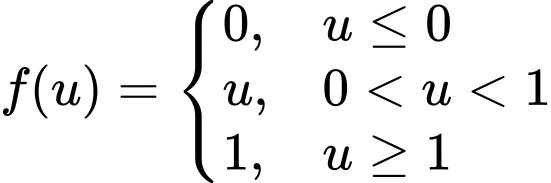
Όπου a είναι η παράμετρος κλίσης της σιγμοειδούς συνάρτησης. ~~Μεταβάλλοντας την, παίρνουμε σιγμοειδής συναρτήσεις διαφορετικών κλίσεων.~~

Στην πραγματικότητα, η κλίση στο σημείο αρχής των αξόνων ισούται με α/4.

Στο όριο, καθώς η παράμετρος προσεγγίζει το άπειρο, η σιγμοειδής συνάρτηση γίνεται απλώς μία συνάρτηση κατωφλιού. Ενώ μία συνάρτηση κατωφλιού λαμβάνει τιμή 0 ή 1, μία σιγμοειδής συνάρτηση μπορεί να λαμβάνει τιμές από ένα συνεχές πεδίο τιμών, από 0 εως 1.

Η σιγμοειδής συνάρτηση είναι διαφορίσιμη, ενώ η συνάρτηση κατωφλιού όχι.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιθυμητό να έχουμε για τη συναρτηση ενεργοποίησης πεδίο τιμών -1 εώς και +1, τότε η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι μία περιττή συνάρτηση του τοπικού πεδίου.

Συγκεκριμένα, η συνάρτηση κατωφλίου ορίζεται τώρα ως:  
  


Και είναι ευρέως γνωστή ως συνάρτηση προσήμου.