Βελτίωση της ικανότητας χαρακτηρισμού όγκων εγκεφάλου με χρήση πιθανοκρατικού νευρωνικού δικτύου και μη γραμμικού μετασχηματισμού ελάχιστων τετραγώνων χαρακτηριστικών υφής σε εικόνες MRI

Γεωργιάδης Π.[1], Κάβουρας Δ.[2], Καλατζής Ι.[2], Δασκαλάκης Α.[1], Καγκάδης Γ.[1], Σιφάκη Κ.[3], Μάλαμας Μ.[3], Νικηφορίδης Γ.[1], Σολωμού Α.[4]

[1] *Εργαστήριο Ανάλυσης και Επεξεργασίας Ιατρικής Εικόνας, Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο, Πάτρα.*
[2] *Εργαστήριο Επεξεργασίας Ιατρικού Σήματος και Εικόνας, Τμήμα Τεχνολογίας Ιατρικών Οργάνων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας, Αθήνα.*
[3] *Τμήμα Μαγνητικής Τομογραφίας, 251 Γενικό Νοσοκομείο Αεροπορίας, Αθήνα.*
[4] *Εργαστήριο Ακτινολογίας, Τμήμα Ιατρικής, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο, Πάτρα.*

***Λέξεις κλειδιά**: όγκοι εγκεφάλου, MRI, χαρακτηριστικά υφής, ταξινόμηση προτύπων*

***Περίληψη*: Ο σκοπός της εργασίας ήταν ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η αξιολόγηση υπολογιστικού συστήματος διαχωρισμού μεταξύ μεταστατικών (δευτερογενών) και πρωτογενών όγκων εγκεφάλου (γλοιωμάτων και μηνιγγιωμάτων), χρησιμοποιώντας εικόνες τομογραφίας μαγνητικού συντονισμού T1, μετά την χορήγηση σκιαγραφικού (γαδολίνιο). Το προτεινόμενο σύστημα ταξινόμησης αποτελείται από ένα πιθανοκρατικό νευρωνικό δίκτυο, με τροποποιημένη είσοδο, η οποία περιλαμβάνει ένα μη γραμμικό μετασχηματισμό ελάχιστων τετραγώνων των χαρακτηριστικών παραμέτρων των εικόνων, με σκοπό την αύξηση της διαχωρισιμότητας των προς ταξινόμηση κατηγοριών. Χρησιμοποιήθηκαν 67 εικόνες MRI (21 μεταστάσεις, 19 μηνιγγιώματα και 27 γλοιώματα) από τις οποίες ελήφθησαν περιοχές ενδιαφέροντος από τους όγκους. Από κάθε περιοχή ενδιαφέροντος εξήχθησαν 36 χαρακτηριστικά υφής, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι εισόδου στο σύστημα ταξινόμησης. Η ολική ακρίβεια διαχωρισμού του συστήματος για τη διάκριση μεταξύ πρωτογενών και δευτερογενών όγκων ήταν 95.2%, ενώ μεταξύ γλοιωμάτων και μηνιγγιωμάτων ήταν 93.5%. Τα αντίστοιχα ποσοστά διαχωρισμού των ανωτέρω κατηγοριών, χωρίς την χρήση του μετασχηματισμού ελάχιστων τετραγώνων, ήταν 89.6% και 87.0%.**

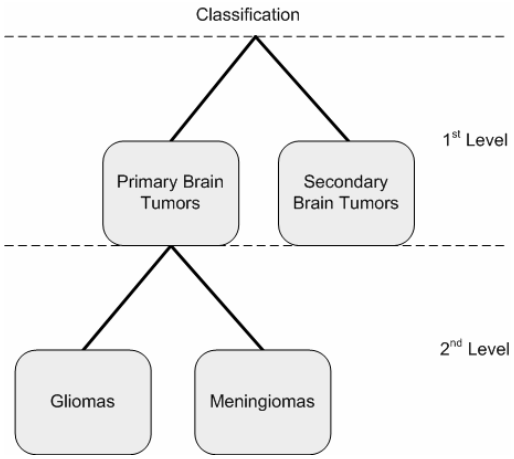
I. Εισαγωγή

Η εισαγωγή της Μαγνητικής Τομογραφίας (ΜΤ) στην κλινική πρακτική συνιστά μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στη διάγνωση ασθενών με καρκίνο εγκεφάλου (Henson et al., 2005). Παρ' όλα αυτά, οι εικόνες ΜΤ είναι συχνά δύσκολο να ερμηνευθούν από τους ειδικούς λόγω (α) της υποκειμενικότητας και περιορισμένης εμπειρίας του παρατηρητή στην εκτίμηση εικόνων, (β) των ποικίλων κλινικών χαρακτηριστικών των όγκων (π.χ. τύπος, διαβάθμιση κακοήθειας κλπ.) και (γ) της ιδιαιτερότητας των όγκων στην αντίθεση που παρουσιάζουν με τον περιβάλλοντα ιστό (Vaidyanathan et al., 1997).

Ενώ έχει ήδη τονιστεί στη διεθνή βιβλιογραφία η αναγκαιότητα της εκμετάλλευσης της διαγνωστικής και προγνωστικής πληροφορίας που προέρχεται από εικόνες ΜΤ, υπάρχουν μόνο λιγοστές αναφορές για τον σχεδιασμό και υλοποίηση συστήματος Η/Υ αυτόματης διάγνωσης όγκων εγκεφάλου κάνοντας χρήση της ποσοτικής πληροφορίας προερχόμενης από εικόνες ΜΤ (Herlidou-Meme et al., 2003, Lerski et al., 1993, Schad et al., 1993).

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η αξιολόγηση υπολογιστικού συστήματος αυτόματης διάγνωσης όγκων εγκεφάλου με σκοπό την αύξηση του ποσοστού επιτυχούς ταξινόμησης όγκων εγκεφάλου σε σχέση με ήδη υπάρχοντα συστήματα, όπως αυτά περιγράφονται στην διεθνή βιβλιογραφία (Herlidou-Meme et al., 2003, Lerski et al., 1993, Schad et al., 1993), με την χρήση ποσοτικών παραμέτρων υφής εικόνων ΜΤ. Χρησιμοποιώντας ιεραρχικό δένδρο απόφασης δύο επιπέδων,

πραγματοποιήθηκε διάκριση μεταξύ μεταστατικών και πρωτογενών όγκων εγκεφάλου και μεταξύ γλοιωμάτων και μηνιγγιωμάτων στο πρώτο και στο δεύτερο επίπεδο του δένδρου απόφασης αντίστοιχα (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Το ιεραρχικό δένδρο απόφασης δύο επιπέδων για τη διάκριση όγκων εγκεφάλου.

ΙΙ. Μεθολογία

Για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 67 εγκάρσιες εικόνες MT (21 μεταστάσεις, 19 μηνιγγιώματα και 27 γλοιώματα), οι οποίες λήφθηκαν με ακολουθία T1 – S.E. (TR = 400 – 500 ms, TE = 7 – 15 ms) μετά την χορήγηση σκιαγραφικού παράγοντα (γαδολίνιο). Σε συνεργασία με έμπειρο ακτινολόγο, εξήχθηκαν από τις εικόνες περιοχές ενδιαφέροντος από τα κέντρα των όγκων. Έπειτα, από τις περιοχές ενδιαφέροντος υπολογίσθηκαν συνολικά 36 ποσοτικά χαρακτηριστικά υφής, τα οποία περιλάμβαναν 4 στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτου βαθμού, 22 χαρακτηριστικά που παρήχθησαν από τους πίνακες χωρικής συν-εμφάνισης των τόνων του γκρι (Haralick et al., 1973) και 10 χαρακτηριστικά που παρήχθησαν από τους πίνακες μήκους διαδρομής των τόνων του γκρι (Galloway, 1975). Το πλήθος των χαρακτηριστικών υφής μειώθηκε σε δέκα (10) με την χρήση της μη παραμετρικής στατιστικής δοκιμασίας Wilcoxon. Κατά συνέπεια, μόνο χαρακτηριστικά με υψηλή διακριτική ικανότητα ($p<0.001$) μεταξύ των προτύπων των κατηγοριών των όγκων εγκεφάλου επιλέχθησαν για να εισαχθούν στο σύστημα ταξινόμησης.

Ο ταξινομητής που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί μια τροποποίηση του ταξινομητή Πιθανοκρατικού Νευρωνικού Δικτύου (Probabilistic Neural Network, PNN) (Specht, 1990). Συγκεκριμένα, για τον καλύτερο διαχωρισμό των τύπων των όγκων εγκεφάλου, στα δεδομένα εισόδου εφαρμόστηκε ένας μη-γραμμικός πολυωνυμικός μετασχηματισμός ελάχιστων τετραγώνων (Least Squares Feature Transformation, LSFT) από το χώρο των χαρακτηριστικών στο χώρο των κατηγοριών, με πλήθος διαστάσεων ίσο με τον αριθμό των προς ταξινόμηση κατηγοριών (Ahmed and Rao, 1975). Στο πρώτο επίπεδο του δένδρου απόφασης, στα διανύσματα χαρακτηριστικών εισόδου στον ταξινομητή εφαρμόστηκε μετασχηματισμός ελάχιστων τετραγώνων δευτέρου βαθμού, ενώ στο δεύτερο επίπεδο εφαρμόστηκε μετασχηματισμός ελάχιστων τετραγώνων τρίτου βαθμού.

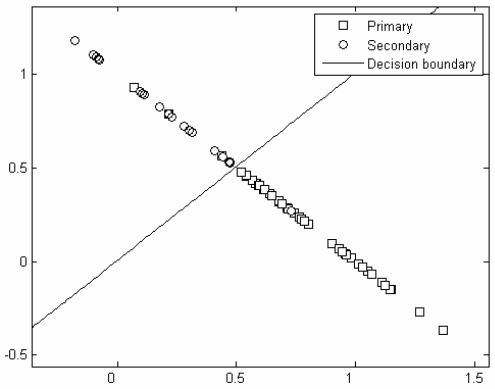
Η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Διαδοχικής Παράλειψης Ενός Προτύπου (Leave-One-Out, LOO) (Theodoridis and Koutroumbas, 1999), ώστε τα δεδομένα εκτίμησης να είναι διαφορετικά από τα δεδομένα εκπαίδευσης και να θεωρούνται από το σύστημα ως άγνωστα. Για την επιλογή του καλύτερου συνδυασμού χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της Εξαντλητικής Αναζήτησης (Exhaustive Search) όλων των δυνατών συνδυασμών των στατιστικά σημαντικών χαρακτηριστικών (Theodoridis and Koutroumbas, 1999).

ΙΙΙ. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα.

Στο πρώτο επίπεδο του ιεραρχικού δένδρου, το ποσοστό ολικής ακρίβειας (το πηλίκο των ορθά ταξινομημένων προτύπων προς το σύνολο των προτύπων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αξιολόγησης) ταξινόμησης των μεταστατικών και των πρωτογενών όγκων εγκεφάλου ήταν 94.03% (Πίνακας 1), χρησιμοποιώντας 3 χαρακτηριστικά υφής (μέση τιμή, εντροπία, διαφορική εντροπία). Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται ο καλύτερος συνδυασμός χαρακτηριστικών στο χώρο των κατηγοριών και το αντίστοιχο όριο απόφασης του ταξινομητή (Decision Boundary) για τον διαχωρισμό μεταξύ μεταστατικών και των πρωτογενών όγκων εγκεφάλου.

Πίνακας 1: Πίνακας αληθείας καλύτερου συνδυασμού χαρακτηριστικών για την ταξινόμηση μεταστατικών και των πρωτογενών όγκων εγκεφάλου.

	Πρωτογε-νείς όγκοι εγκεφάλου	Μεταστατι-κοί όγκοι εγκεφάλου	Ακρί-βεια (%)
Πρωτογε-νείς όγκοι εγκεφάλου	43	3	93.48
Μεταστατι-κοί όγκοι εγκεφάλου	1	20	95.24
			94.03

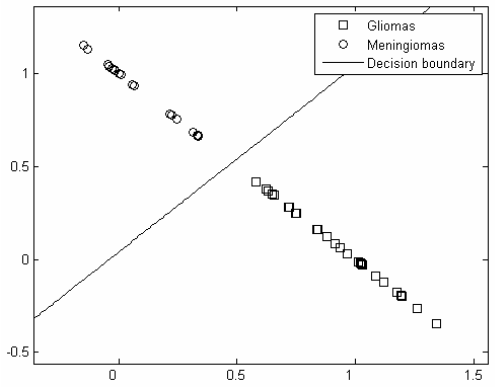


Εικόνα 2: Γράφημα του καλύτερου συνδυασμού χαρακτηριστικών στο χώρο των κατηγοριών και του αντίστοιχου ορίου απόφασης του ταξινομητή για τον διαχωρισμό μεταξύ μεταστατικών και των πρωτογενών όγκων εγκεφάλου.

Στο δεύτερο επίπεδο του ιεραρχικού δένδρου, το ποσοστό ολικής ακρίβειας ταξινόμησης των γλοιωμάτων και μηνιγγιωμάτων ήταν 100% (Πίνακας 2), χρησιμοποιώντας 3 χαρακτηριστικά υφής (μέση τιμή, δεύτερη γωνιακή ροπή, αντίστροφη διαφορική ροπή). Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται ο καλύτερος συνδυασμός χαρακτηριστικών στο χώρο των κατηγοριών και το αντίστοιχο όριο απόφασης του ταξινομητή για τον διαχωρισμό μεταξύ γλοιωμάτων και μηνιγγιωμάτων.

Πίνακας 2: Πίνακας αληθείας καλύτερου συνδυασμού χαρακτηριστικών για την ταξινόμηση γλοιωμάτων και μηνιγγιωμάτων.

	Γλοιώματα	Μηνιγγιώ-ματα	Ακρί-βεια (%)
Γλοιώμα-τα	27	0	100
Μηνιγγιώ-ματα	0	19	100
			100



Εικόνα 3: Γράφημα του καλύτερου συνδυασμού χαρακτηριστικών και του αντίστοιχου ορίου απόφασης του ταξινομητή για τον διαχωρισμό μεταξύ γλοιωμάτων και μηνιγγιωμάτων.

Για λόγους σύγκρισης, για την ταξινόμηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε και Πιθανοκρατικό Νευρωνικό Δίκτυο χωρίς μετασχηματισμό των δεδομένων πριν την είσοδό τους σε αυτό. Στο πρώτο επίπεδο του ιεραρχικού δένδρου, το ποσοστό ολικής ακρίβειας ήταν 89.55%, ενώ στο δεύτερο 97.83%.

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι ο μετασχηματισμός ελάχιστων τετραγώνων που εφαρμόστηκε στα δεδομένα εισόδου του ταξινομητή PNN αύξησε την ικανότητα διαχωρισμού του συστήματος και στα δυο επίπεδα του ιεραρχικού δένδρου ταξινόμησης των όγκων εγκεφάλου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος είναι ότι δεν αυξάνει τις απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο, καθώς ο απαιτούμενος για τον μετασχηματισμό χρόνος ισοσταθμίζεται με το χρονικό όφελος κατά την ταξινόμηση λόγω της ελάττωσης της διαστατικότητας των δεδομένων εισόδου.

Τα χαρακτηριστικά που αποτέλεσαν τον καλύτερο συνδυασμό σε κάθε επίπεδο εκφράζουν την ένταση (μέση τιμή) καθώς και το μέγεθος της ομοιογένειας (εντροπία, διαφορική εντροπία) ή της ανομοιογένειας (δεύτερη γωνιακή ροπή, αντίστροφη διαφορική ροπή) των τόνων του γκρι των εικόνων MT (Haralick et al., 1973).

Το προτεινόμενο σύστημα βελτιώνει τα ποσοστά επιτυχούς ταξινόμησης, συγκριτικά με προγενέστερες μελέτες χαρακτηρισμού παρόμοιων τύπων όγκων εγκεφάλου (Herlidou-Meme et al., 2003, Lerski et al., 1993, Schad et al., 1993).

Συμπερασματικά, μπορεί να εξαχθεί ότι το προτεινόμενο λογισμικό σύστημα ταξινόμησης βελτιώνει την ακρίβεια διαχωρισμού όγκων εγκεφάλου, σε σχέση τόσο με τα αποτελέσματα παρόμοιων μελετών άλλων ερευνητών όσο και με την ακρίβεια ταξινόμησης με την χρήση Πιθανοκρατικού Νευρωνικού Δικτύου χωρίς μετασχηματισμό δεδομένων εισόδου.

Αναφορές

Ahmed N., Rao R., 1975, "*Feature selection in pattern recognition"*, NY, Springer-Verlag.

Galloway M. M., 1975 "*Texture Analysis Using Grey Level Run Lengths*", Comp. Graph. and. Image Proc vol. **4**, pp 172-179.

Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I., 1973 "*Textural Features for Image Classification*", IEEE Trans Syst Man Cybern vol. **SMC-3**, pp 610-621.

Henson J. W., Gaviani P., Gonzalez R. G., 2005 "*MRI in treatment of adult gliomas*", The Lancet Oncology vol. **6**, pp 167-175.

Herlidou-Meme S., Constans J. M., Carsin B., Olivie D., Eliat P. A., Nadal-Desbarats L., Gondry C., Le Rumeur E., Idy-Peretti I., de Certaines J. D., 2003 "*MRI texture analysis on texture test objects, normal brain and intracranial tumors*", Magn Reson Imaging vol. **21**, pp 989-93.

Lerski R. A., Straughan K., Schad L. R., Boyce D., Bluml S., Zuna I., 1993 "*MR image texture analysis--an approach to tissue characterization*", Magn Reson Imaging vol. **11**, pp 873-87.

Schad L. R., Bluml S., Zuna I., 1993 "*MR tissue characterization of intracranial tumors by means of texture analysis*", Magn Reson Imaging vol. **11**, pp 889-96.

Specht D. F., 1990 "*Probabilistic Neural Networks*", Neural Networks vol. **3**, pp 109-118.

Theodoridis S., Koutroumbas K., 1999, "*Pattern Recognition"*, New York, Academic Press.

Vaidyanathan M., Clarke L. P., Hall L. O., Heidtman C., Velthuizen R., Gosche K., Phuphanich S., Wagner H., Greenberg H., Silbiger M. L., 1997 "*Monitoring brain tumor response to therapy using MRI segmentation*", Magnetic Resonance Imaging vol. **15**, pp 323-334.