3° Πανελλήνιο Συνέδριο
Ιατρικής Φυσικής

27° Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο
Ακτινολογίας

Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση των σφαλμάτων συμπαγούς χωρικής ευθυγράμμισης εικόνων MRI/CT από κλινικά διαθέσιμους αλγορίθμους κατά τον σχεδιασμό πλάνου θεραπείας ενδοκράνιας Στερεοτακτικής Ακτινοχειρουργικής

Πολύμνια Γλαμπεδάκη[1], Παντελής Καραΐσκος[1], Βασιλική Πέππα[1], Γεωργία Λυμπεροπούλου[2], Εμμανουήλ Βερίγος[2], Αλεξία Σιδηροπούλου[2], Ελευθέριος Π. Παππάς[1]

[1]Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ελλάδα
[2]Μονάδα CyberKnife, Α' Εργαστήριο Ακτινολογίας, Ιατρική Σχολή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ελλάδα

30, 31 ΟΚΤ + 1 ΝΟΕ
2026

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
- ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ, ΛΑΡΙΣΑ

Οργάνωση

ΕΦΙΕ
Ένωση Φυσικών Ιατρικής Ελλάδος

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΟΛΛΕΓΙΟ ΑΚΤΙΝΟΛΟΓΙΑΣ

Εισαγωγή

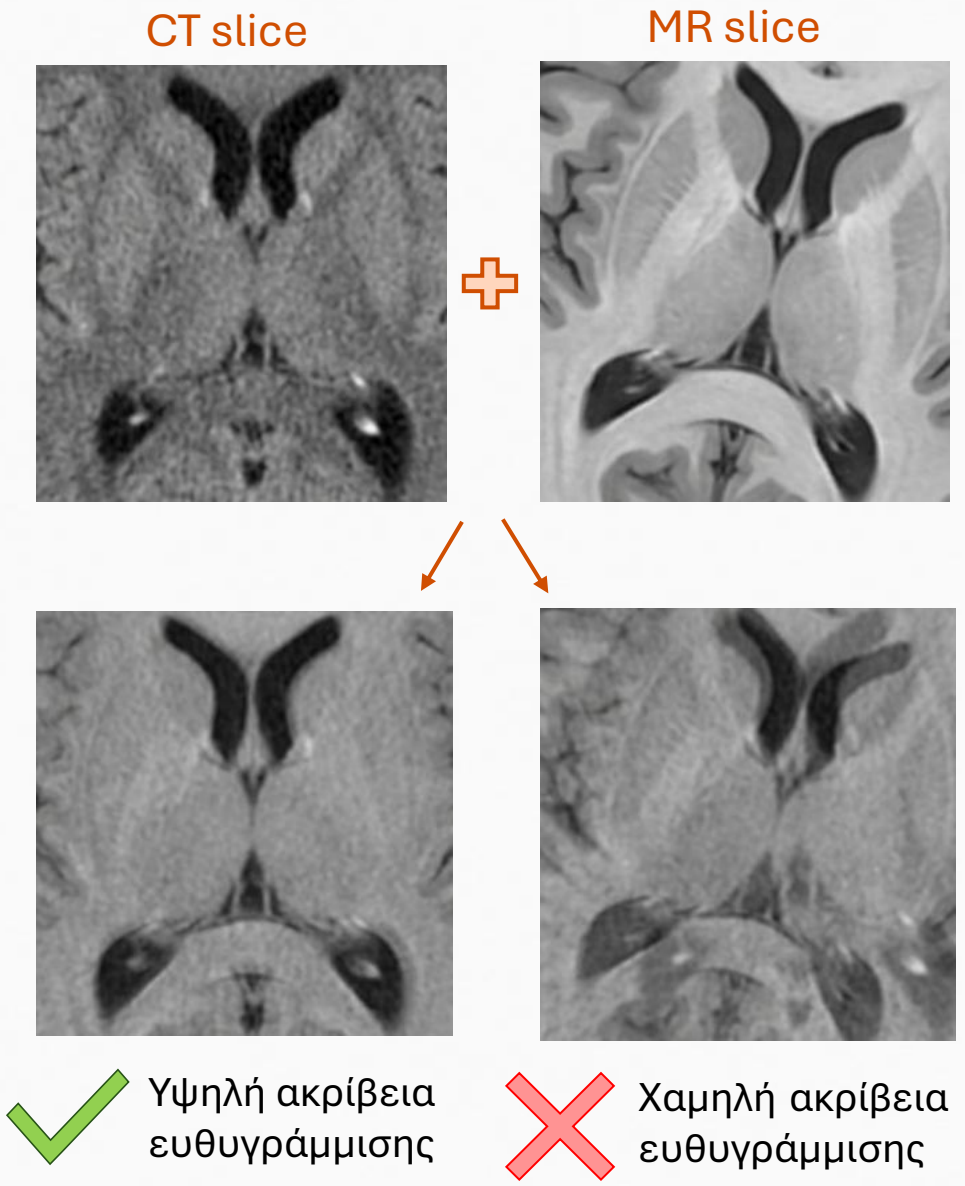
Στην ενδοκράνια Στερεοτακτική Ακτινοθεραπεία και Ακτινοχειρουργική, οι τυπικές απαιτήσεις χωρικής ακρίβειας εντοπισμού και ακτινοβόλησης του στόχου είναι 1 mm. Η χωρική ευθυγράμμιση εικόνων MR/CT αποτελεί σημαντικό κρίκο στην αλυσίδα της στόχευσης.

Η ακρίβεια της χωρικής ευθυγράμμισης των εικόνων που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των όγκων-στόχων και των κρίσιμων οργάνων επηρεάζεται από:

- τον αυτόματο αλγόριθμο υπολογισμού του συμπαγούς μετασχηματισμού (rigid registration),
- τις παραμέτρους που επιλέγει ο χρήστης στο Σύστημα Σχεδιασμού Θεραπείας (TPS),
- την ποιότητα εικόνων

Σκοπός:

- Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας MR/CT rigid registration από κλινικά διαθέσιμους αυτόματους αλγορίθμους.
- Η αξιολόγηση των περιορισμών τους υπό συνθήκες μη βέλτιστης ποιότητας εικόνας.



Μέθοδοι & Υλικά

01 **Ανάπτυξη αναλυτικού ψηφιακού ανθρωπόμορφου ομοιώματος κεφαλής** με ρεαλιστικές ανατομικές δομές (ιγμόρεια, παρεγκεφαλίδα, κοιλίες εγκεφάλου κ.α.) και σφαιρικούς όγκους.

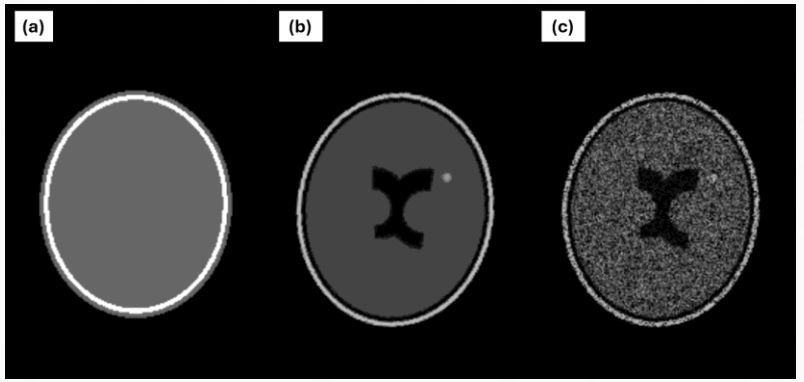
02 **Δημιουργία εικόνων CT & T1w MRI από ρεαλιστικές τιμές σήματος**
Διακριτοποίηση των MR σε 10 διαστάσεις ογκοστοιχείου (0.6^3 – 3^3 mm^3). Εισαγωγή 4 επιπέδων θορύβου (αύξηση SNR, μείωση CNR) στις CT και MR.

03 **Εισαγωγή ανομοιογενούς γεωμετρικής παραμόρφωσης**
στην βαθμίδα κωδικοποίησης της συχνότητας από 0-0.8mm (2ο σετ MR).

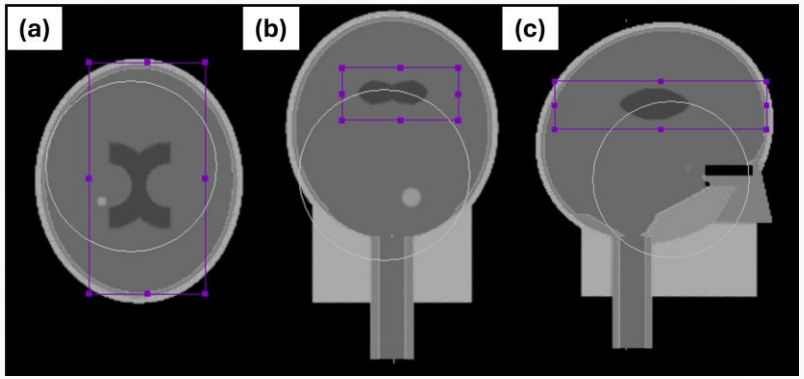
04 **Μεταφορά και στροφή των MR**
Κατά 5 mm και 5ο, αντίστοιχα, σε κάθε άξονα.

05 **Εφαρμογή χωρικής ευθυγράμμισης**
Εισαγωγή των εικόνων στο Monaco TPS (Elekta, Σουηδία) και εφαρμογή 3 διαδοχικών MR/CT ευθυγραμμίσεων ($1^η$:global, $2^η$ & $3^η$: ROI-based, Εικόνα 2).

06 **Εξαγωγή και αξιολόγηση του σφάλματος ευθυγράμμισης**
από την απόκλιση των πινάκων μετασχηματισμού από τις γνωστές μεταφορές και στροφές. Στατιστική σύγκριση των αποτελεσμάτων.



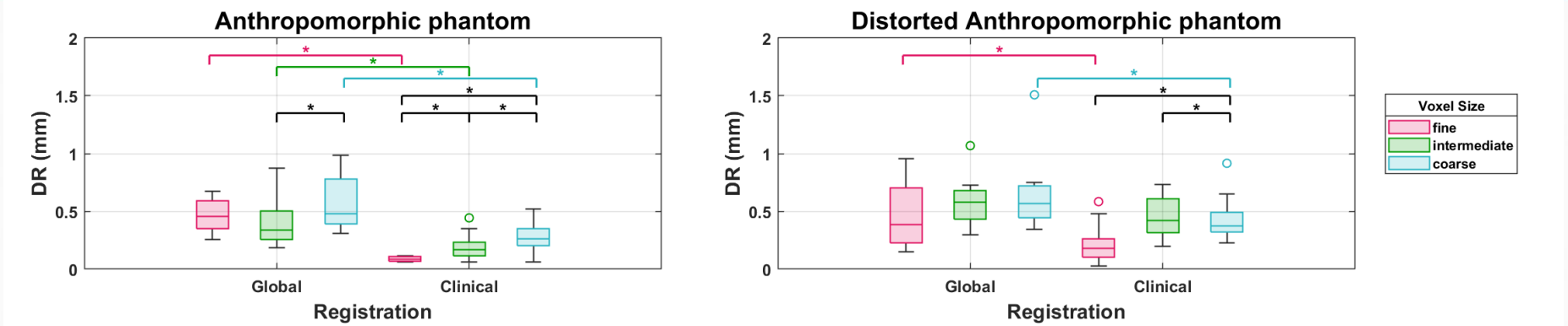
Εικόνα 1: (a) Τομή CT του αναλυτικού ομοιώματος, (b) τομή της μετατοπισμένης και στραμμένης MR με SNR άπειρο, (c) η τομή της εικόνας (b) με SNR=2.



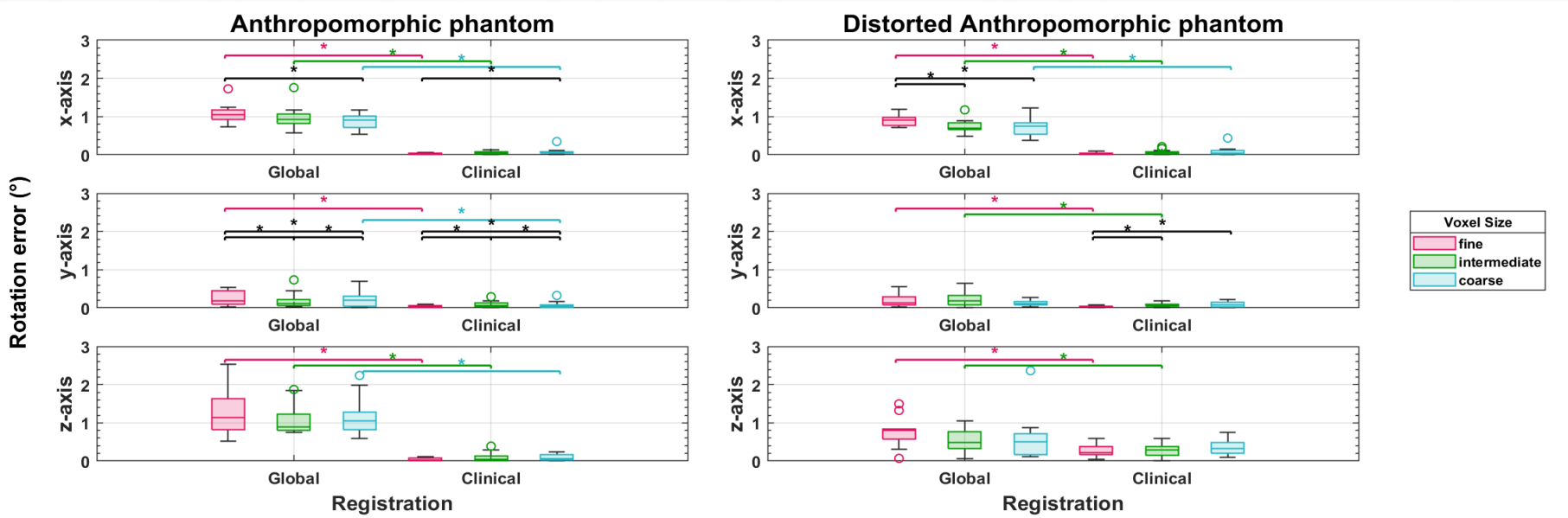
Εικόνα 2: Στιγμιότυπο οθόνης κατά την διαδικασία του Clinical (3ο ROI-based) registration. Το ROI (Region of Interest) απεικονίζεται σε μωβ πλαίσιο σε: (a) axial, (b) coronal, (c) sagittal επίπεδο.

Αποτελέσματα

- ΔR > 1mm μόνο για τις παραμορφωμένες MR εικόνες.
- Σφάλμα ανίχνευσης στροφής μεγαλύτερο από 1ο, ακόμη και 2ο, κατά την Global ευθυγράμμιση σε x- και z-άξονα.
- Επίδραση του συνδυασμού παραμέτρων Registration * Voxel Size στα δεδομένα.



Εικόνα 3: Box plots της απόκλισης της ευκλείδιας μετατόπισης (ΔR) για τα δύο ομοιώματα, διαχωρισμένη βάσει του είδους ευθυγράμμισης και των διαστάσεων ογκοστοιχείου. Οι (*) συμβολίζουν στατιστικά σημαντική διαφορά ($p<0.05$) μεταξύ των μεθόδων ευθυγράμμισης ή της ποιότητας εικόνας.



Εικόνα 4: Box plots της απόκλισης στροφής σε κάθε άξονα για τα δύο ομοιώματα, διαχωρισμένη βάσει του είδους ευθυγράμμισης και των διαστάσεων ογκοστοιχείου. Οι (*) συμβολίζουν στατιστικά σημαντική διαφορά ($p<0.05$) μεταξύ των μεθόδων ευθυγράμμισης ή της ποιότητας εικόνας.

Συμπεράσματα

Registration Επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια υπολογισμού του ΔR και των στροφών στο μεγαλύτερο βαθμό από όλες τις παραμέτρους ή συνδυασμό παραμέτρων που διερευνήθηκαν και στο εύρος τιμών που εξετάστηκαν.

SNR Σημαντική επίδραση στις στροφές γύρω από τον x-άξονα και στα δύο ομοιώματα, ενώ μόνο στο παραμορφωμένο ομοίωμα επηρέασε την ευκλείδια μετατόπιση (ΔR).

Voxel Size Το μέγεθος του ογκοστοιχείου επηρέασε το ΔR και τις στροφές γύρω από τον x-άξονα και για τα δύο ομοιώματα.

Distortion Η παρουσία ανομοιογενούς γεωμετρικής παραμόρφωσης στην MR εικόνα επηρέασε σημαντικά την ευκλείδια μετατόπιση (ΔR) και τις στροφές κατά τον x-άξονα ($p < 0.002$)

Αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία και υπολογιστικά εργαλεία για την ποσοτικοποίηση της ακρίβειας χωρικής ευθυγράμμισης εικόνων MRI/CT με κλινικά διαθέσιμους αλγορίθμους και πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στην Στερεοτακτική Ακτινοθεραπεία και Ακτινοχειρουργική. Έμφαση δόθηκε σε υποβαθμισμένης ποιότητας εικόνες και γεωμετρική παραμόρφωση MRI, διερευνώντας τα όρια του κλινικού αλγορίθμου ευθυγράμμισης εικόνων.

Βιβλιογραφία

M. Guckenberger *et al.*, "Definition and quality requirements for stereotactic radiotherapy: consensus statement from the DEGRO/DGMP Working Group Stereotactic Radiotherapy and Radiosurgery". *Strahlenther Onkol* **196**, 417–420 (2020). https://doi.org/10.1007/s00066-020-01603-1

S. Masitho *et al.*, "Accuracy of MRI-CT registration in brain stereotactic radiotherapy: Impact of MRI acquisition setup and registration method", *Z Med Phys*, vol. 32, no. 4, pp. 477–487, Nov. 2022, doi:10.1016/j.zemedi.2022.04.004.

K. Ulin *et al.*, " Results of a multi-institutional benchmark test for cranial CT/MR image registration". Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2010 Aug 1;77(5):1584-9. doi: 10.1016/j.ijrobp.2009.10.017. Epub 2010 Apr 8. PMID: 20381270; PMCID: PMC2906611.

E. P. Pappas *et al.*, "Target localization accuracy in frame-based stereotactic radiosurgery: Comparison between MR-only and MR/CT co-registration approaches," *J Appl Clin Med Phys*, vol. 23, no. 5, May 2022, doi: 10.1002/acm2.13580.

W. Schneider *et al.*, "Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions" *Phys. Med. Biol.*, vol. 45, no. 2, 459-478 (2000), **DOI** 10.1088/0031-9155/45/2/314