

Beschleunigte automatische CT/PET-Registrierung basierend auf partiellem Volumen-Matching und Mutual Information

Evelyn Firle¹, Stefan Wesarg¹ und Christian Dold¹

¹Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung,
Abteilung Cognitive Computing and Medical Imaging
Fraunhoferstr. 5, 64283 Darmstadt

Email: evelyn.firle{stefan.wesarg,christian.dold}@igd.fraunhofer.de

Zusammenfassung. Die Berücksichtigung mehrerer tomographischer Bildgebungsmodalitäten nimmt eine zunehmend bedeutendere Rolle im Bereich der Diagnose und Therapieplanung ein. Hierdurch können vermehrt die Stärken der einzelnen Modalitäten genutzt werden. Insbesondere im Bereich der Krebsbehandlung bietet die Kombination von CT – zur Darstellung der Knochenstruktur – und PET – zur Visualisierung der funktionellen Information – etliche Vorteile. Das statistische Maß der Mutual Information ist eine Möglichkeit zur Bestimmung der für die Registrierung benötigten Transformation. Die hier vorgestellte Entwicklung beschäftigt sich mit dem Problem rigider Registrierung von CT- und PET-Volumina basierend auf Mutual Information. Es wird ein neuer Ansatz zur Beschleunigung des Matching-Prozesses unter gleichzeitiger Erhaltung der Genauigkeit und Robustheit dieser Methode vorgestellt.

1 Einleitung

Zur Diagnose und Therapieplanung eines Patienten werden zumeist mehrere tomographische Bildgebungsmodalitäten herangezogen. Hierbei ist eine separate Berücksichtigung der Knochen-Struktur (CT - Computertomographie), der funktionellen Information (SPECT oder PET - Single Photon Emission oder Positron Emission Tomographie) oder der Weichteil Anatomie (dargestellt durch MR - Magnet Resonanz bzw. U/S - Ultraschall) in dreidimensionalen Datensätzen nur unzureichend. Eine Kombination der Stärken von CT und PET bietet etliche Vorteile im Bereich der Krebsbehandlung. Während CT die genaue Größe, Form und Lage des Tumors identifizieren kann, erkennt PET Veränderungen im Stoffwechsel, welche durch das Wachstum krankhafter Zellen verursacht werden.

Eine Fusion von CT mit funktioneller Bildgebung könnte die Zukunftsvision, Areale mit erhöhter Tumoraktivität, oder hypoxisch strahlenresistenten Zellen zu lokalisieren, Realität werden lassen. Diese könnten lokal höher bestrahlt werden, und somit als Zielvorgabe eine homogene Tumorkontrollwahrscheinlichkeit statt homogener Dosisverteilung angestrebt werden.

Neuartige hybride PET/CT-Scanner kombinieren einen CT-Scanner mit einem PET-System in einer einzigen Gantry. Mit dieser Technik können sowohl

anatomische als auch funktionelle Bilddaten simultan erfasst werden. Diese Technologie hat zwar auch Vorteile im Vergleich zu Bildregistrierungstechniken, welche Bildakquisition durch separate Scanner und Registrierung sowie Fusion mittels Software durchführen. Der entscheidende Nachteil liegt jedoch in dem imens hohen Kostenfaktor (ca. \$2.5 Millionen Anschaffungskosten).

Im Unterschied zu dem hybriden PET/CT-Scanner werden bei der Bildregistrierungstechnik an einem Arbeitsplatz die Ergebnisse multipler Modalitäten zusammengefasst. Damit ein Arzt den Nutzen jeder einzelnen dieser Modalitäten ausschöpfen kann, ist eine Vorverarbeitung und Visualisierung der komplexen Informationen unablässig. Für die klinische Verwendbarkeit - insbesondere im Falle intra-operativer Nutzung - ist entscheidend, dass dem Mediziner die registrierten Daten sowohl schnell als auch übersichtlich zur Verfügung gestellt werden.

Die hier vorgestellte Entwicklung löst das Problem rigider Registrierung von CT- und PET-Volumina basierend auf Mutual Information. Es wurde ein neuer Ansatz zur Beschleunigung des Matching-Prozesses unter gleichzeitiger Erhaltung der Genauigkeit und Robustheit dieser Methode erarbeitet. Die neue Strategie wurde unter Verwendung mehrerer klinischer Studien untersucht. Das Registrierungs-Tool wurde in die über mehrere Jahre am Fraunhofer IGD entwickelte Visualisierungs-Software „InViVo“ integriert.

2 Material und Methode

Multimodale Registrierung medizinischer Bilddaten kann auf verschiedenste Weisen durchgeführt werden. Diverse Ansätze zur Volumen-Registrierung wurden in der Vergangenheit veröffentlicht. Zusammenfassende Darstellungen zu diesem Thema sind zu finden bei Maintz et al. [1] und van den Elsen et al. [2].

2.1 Mutual Information

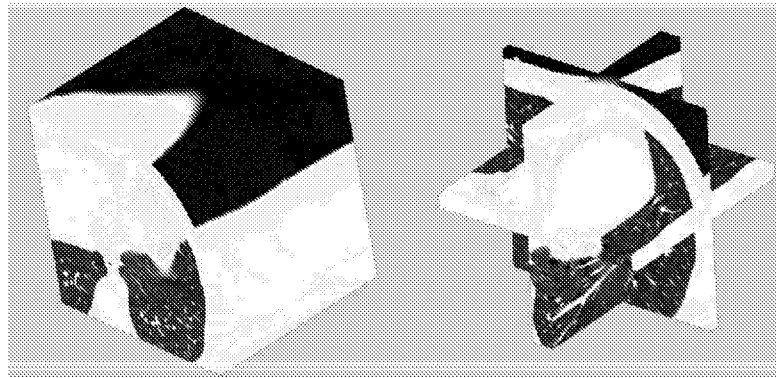
Neben der manuellen, Marker-basierten und Kontur-basierten Vorgehensweise [9] existieren in der Literatur diverse Ansätze einer Voxel-basierten Registrierung. Am weitesten verbreitet ist zur Zeit der Ansatz beruhend auf der sogenannten „Mutual Information“.

Dieser aus der Informationstheorie entlehene Ansatz, ist ein Voxel-basiertes Ähnlichkeitsmaß der statistischen Abhängigkeit zweier Zufallsvariablen, welcher unabhängig voneinander von Collignon et al. [3] und Viola et al. [4] vorgestellt wurde. Hierbei wird der Informationsgehalt einer Variablen in Bezug auf eine andere Variable gemessen. Eine detaillierte Übersicht über diese Methode wurde durch Plum et al. (IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003) erarbeitet.

2.2 Partielles Volumen Matching

Die Berechnung der Transformation basierend auf Mutual Information ist ein sehr zeitaufwendiges Optimierungsverfahren. Eine bekannte Möglichkeit zur Beschleunigung des Registrierungsprozesses existiert durch die sogenannte „coarse-

Abb. 1. Darstellung des 3D-Kreuz-Modells eines CT Volumens.

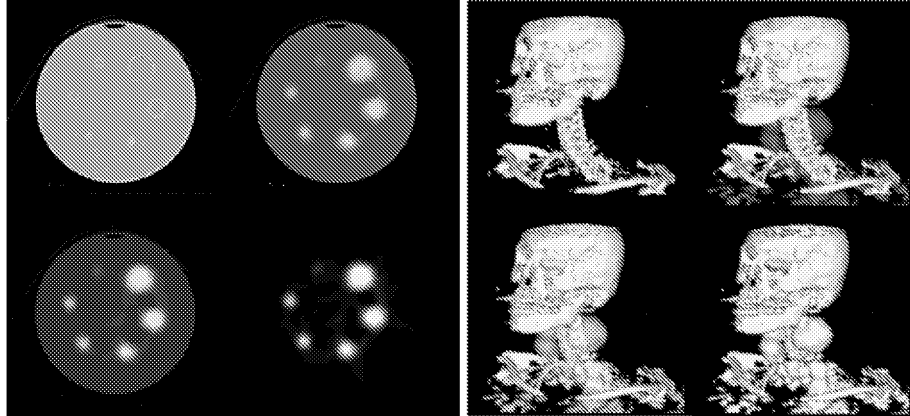


to-fine“-Strategie (Pluim et al., Image and Vision Computing, 2001). Dieser pyramidenförmig angelegte Ansatz führt jedoch häufig zu Genauigkeitsverlusten. Daher haben wir speziell zur CT/PET Registrierung einen neuen Ansatz entwickelt, der auf einem partiellen Volumen-Matching basiert. Dieser beschleunigt einerseits den Prozess, behält jedoch gleichzeitig die Genauigkeit bei. Wir sind davon ausgegangen, dass die Mehrheit der überlappenden Information beider Volumina in einem gewissen Bereich um das Zentrum des Volumens liegt. Durch diese Annahme entstehen gewöhnlich keine Einschränkung bei multimodalen PET- und CT-Datensätzen. Der Registrierungsprozess wird folglich auf einen gewissen Prozentsatz des Originalvolumens beschränkt. Die Daten des Referenz Volumens [7] werden mittels eines 3D-Kreuz-Modells ohne hohe sub-sampling Faktoren oder Einschränkung der Histogramm Stufen, wie in verschiedenen anderen Publikationen beschrieben [6], verwendet. In Abbildung 1 ist ein solches 3D-Kreuz-Modell eines CT Volumens dargestellt. Dadurch wird ein präzises Registrierungsergebnis in kürzester Zeit erreicht.

Des weiteren wurde das Registrierungskriterium modifiziert. Sind die Bilder überlagert, so ist das Abhängigkeitsmaß maximal. Zusätzlich wird es stark von der Größe der Volumenüberlappung beeinflusst. Im vorliegenden Fall wirkt sich eine Verringerung der Überlagerung verstärkt bei der Berechnung der Entropie aus. Daher kann eine Verringerung der Überdeckung und eine dadurch auftretende Fehlregistrierung zu einer Maximierung des Mutual-Information-Kriteriums führen. Diesen Umstand wurde bereits von Studholme et al. [8] ausgearbeitet. Infolgedessen wurde die Verwendung der normalisierten Mutual Information als Abhängigkeitsmaß vorgeschlagen, welches infolgedessen auch in unserem Prozess verwendet wird.

Zur Bewältigung der Probleme, welche durch die Verringerung des Informationsgehalts des Referenzvolumens auftreten können, maximieren wir gleichzeitig die Mutual Information, die normalisierte Mutual Information und die Bildüberdeckung.

Abb. 2. Darstellung der registrierten und fusionierten CT-PET Datensätze. Links: 2D-Fusion des Phantom Datensatzes, Rechts: 3D-Fusion des Patientendatensatzes.



3 Ergebnisse

Es existieren verschiedene Möglichkeiten zur Ermittlung der Genauigkeit einer Registrierung unter Verwendung von Punkten, Landmarken oder anderen Strukturen, welche in beiden Modalitäten erkennbar sind. Nachdem eine Transformation bestimmt wurde, kann die Distanz zwischen diesen Punkten berechnet werden.

Wir verwenden Strukturen, welche in beiden Datensätzen erkennbar sind, um die Genauigkeit der Registrierung der Phantom-Studie zu bestimmen. Insgesamt wurden 6 CT-PET-Patienten-Studien und ein CT-PET-Phantom-Datensatz zur Evaluierung der hier vorgestellten Methode untersucht. Die Ergebnisse der Registrierung wurde beispielhaft in den Abbildungen 2 anhand eines fusionierten Phantom- und Patientendatensatzes dargestellt.

Unsere bisherige Untersuchung hat ergeben, dass die Verwendung von 10 Prozent des Original Volumens die Berechnung, unter Beibehaltung der Genauigkeit, um das 20fache beschleunigt.

4 Diskussion

Die vorgestellte Entwicklung bietet ein Tool zur beschleunigten automatischen Registrierung von CT- und PET-Datensätzen. Eine neue Methode basierend auf partiellem Volumen-Matching unter Verwendung des Ähnlichkeitsmaßes Mutual Information wurde ausgearbeitet. Dieses Verfahren geht davon aus, dass das Zentrum des Referenzvolumens mit einem Teil des anderen Volumens korreliert. Sollte dies nicht der Fall sein, kann es zu einer Fehlregistrierung führen. Dies könnte verhindert werden, indem der Mediziner aufgefordert wird, einen Punkt innerhalb des Referenzbildes zu setzen, welcher beispielsweise zur Bestimmung des ungefähren Mittelpunktes des 3D-Kreuz-Modells verwendet werden kann.

Weitere Recherche wird zur Bestimmung der optimalen Größe des partiellen Volumens betrieben.

Derzeit ist unsere Methode auf die Verwendung rigider Transformationen beschränkt. Weitere Entwicklungen werden den vorgestellten Ansatz im Bereich nicht-rigider Registrierungen erweitern. Zusätzliche Experimente zur Validierung und Fehleranalysen werden dann durchgeführt, um das Potential dieser Methode zu bewerten.

Literaturverzeichnis

1. Maintz JB, et al.: Survey of Medical Image Registration. *Med Image Anal* 2(1): 1–36, 1998.
2. Van den Elsen PA, Maintz JBA, Pol E-JD, et al.: Medical image matching—a review with classification. *IEEE Eng Med Biol* 12(4): 26–39, 1993.
3. Collignon A, Vandermeulen D, Suetens P, et al.: 3D Multi-Modality Medical Image Registration Using Feature Space Clustering. *Proc. Computer Vision, Virtual Reality, and Robotics in Medicine, Springer*: 195–204, 1995.
4. Viola PA, Wells WM: Alignment by Maximization of Mutual Information. *International Journal of Computer Vision* 24(2): 137–154, 1997.
5. Pluim JPW, Maintz JBA, Viergever MA: Mutual-information-based registration of medical images: a survey. *IEEE Trans Med Imaging* 22(8): 986–1004, 2003.
6. Capek M, Mroz L, Wegenkittl R: Robust and fast medical registration of 3D multimodality data sets. *Medicon 2001, IX Mediterranean conference on medical and biological engineering and computing, Pula, Croatia, Part I*: 515–518, 2001.
7. Maes F, Collignon A, Vandermeulen D et al.: Multimodality Image Registration by Maximization of Mutual Information. *IEEE Trans Med Imaging* 16(2): 187–198, 1997.
8. Studholme C, Hill D, Hawkes D: An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment. *Pattern Recognition* 32(1): 71–86, 1999.
9. Firlre EA, Wesarg S, Karangelis G, et al.: Validation of 3D ultrasound: CT registration of prostate images. *Proceedings of SPIE Medical Imaging Vol 5032*: 354–362, 2003.