

8

Samenvatting en conclusies

Segmentatie, d.w.z. het opdelen van een beeld in regio's met een semantische betekenis, is veelal een noodzakelijke voorwaarde om klinisch relevante kwantitatieve metingen in medische beelden te kunnen verrichten. Als gevolg van de diversiteit in beeldinhoud, kwaliteit, orgaanvormen en weefselluminantie in medische beelden, zijn veel segmentatiemethoden afhankelijk van gebruikersinteractie van een menselijke waarnemer om een eerste, grove beeldinterpretatie uit te voeren. Het hoofddoel van dit proefschrift is het onderzoeken van verschillende benaderingen om deze initiële beeldinterpretatiestap verder te automatiseren voor MRI beelden van de borstholte door gebruik te maken van anatomische voorkennis over de vorm en ruimtelijke context van een aantal organen in de thorax.

De in dit proefschrift beschreven methoden zijn ontworpen om de computer uit te rusten met een notie van 'het algemene plaatje', zoals de thoracale anatomie naar voren komt in driedimensionale beeldvolumes van de thorax. Hierbij is een afweging tussen nauwkeurigheid en robuustheid gemaakt ten gunste van robuustheid. Een kritische ontwerp-eis voor de in dit proefschrift beschreven kennisrepresentaties was de conditie dat de modellen vormkennis dienden te bevatten over meerdere organen in hun driedimensionale ruimtelijke context. Dit in tegenstelling tot veel gangbare benaderingen, waarbij vormkennis over individuele organen wordt gemodelleerd zonder de omringende organen in beschouwing te nemen.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de verschillende anatomische modelleertechnieken en de toepassingen ervan zoals beschreven in de literatuur. Hierbij worden drie toepassingsgebieden behandeld: visualisatie en onderwijs, functieanalyse en beeldsegmentatie. De toepassing van anatomische modellen voor beeldsegmentatie wordt in meer detail besproken aan de hand van een gangbare onderverdeling van segmentatiemethoden in een aantal abstractieniveaus in een interpretatiepyramide.

In hoofdstuk 3 wordt een nieuwe toepassing uitgewerkt van een representatie voor anatomische voorkennis genaamd 'Voronoi arrangement', die geschikt is om het begrip 'tomografische gelijkvormigheid' kwantitatief uit te drukken in een graafrepresentatie van de ruimtelijke ordening van een set objecten. De originele formulering van Voronoi

arrangements werd uitgebreid met een efficiënte graaf-matching methode, die de berekening van een labelisomorfisme tussen een voorbeeldafbeelding en een doelbeeld mogelijk maakt. De methode werd toegepast op een beeldinterpretatieprobleem, waarbij de grote thoracale bloedvaten in Magnetische Resonantie afbeeldingen van de bloedstroomsnelheid in de aorta automatisch werden geïdentificeerd. Hiermee werd gedemonstreerd dat de Voronoi arrangement een krachtige beschrijving vormt voor de inhoud van beelden, waarin de objecten kunnen verschillen in plaats, afmeting en vorm, maar waarvan de spatiale distributie gelijkvormig is.

Hoofdstuk 4 beschrijft de ontwikkeling van een driedimensionaal vormmodel, waarmee de grensoppervlakken van het hart en de longen automatisch kunnen worden gelokaliseerd in thoracale Magnetische Resonantie beeldsets. De meest prominente organen in de thorax werden beschreven met een compact wiskundig model door middel van fuzzy impliciete oppervlakken in combinatie met een geometrische modelleertechniek genaamd Constructive Solid Geometry. Het resulterende wiskundige vormmodel beschrijft zowel de vorm van de individuele organen als de onderlinge spatiale relaties in een driedimensionaal potentiaalveld.

Deze modelpotentiaal maakt een automatische registratie mogelijk, waarin het model wordt uitgelijnd met een beeldset van een andere persoon. Hierbij worden anatomische en pathologische variaties beschreven als verschillen in afmeting, positie en oriëntatie van de diverse organen in de borstholte ten opzichte van elkaar. De registratiemethode werd getest in fantoomexperimenten en met behulp van klinische thoracale MR beeldsets. In 13 van de 15 gevallen convergeerde de methode naar een semantisch correcte oplossing, waarbij de oppervlakken van de beide longen en het hart-epicard werden gelokaliseerd binnen een marge van 10 millimeter. De registratiemethode bleek toepasbaar op thoracale MR data onafhankelijk van de beeldvlakrichting, zolang een groot gedeelte van de thorax was afgebeeld in het beeldvolume.

In hoofdstuk 5 wordt een belangrijke verbetering beschreven van het in hoofdstuk 4 beschreven anatomische model. Door modelkennis mee te wegen in de potentiaalfunctie op basis van een vergelijking tussen de lokale beeldgradiënt en de normaalvector van het modeloppervlak, werd de robuustheid van de methode aanzienlijk verhoogd. De verbeterde methode werd kwantitatief gevalideerd ten opzichte van een handmatig gedefinieerde gouden standaard in een studie gebaseerd op twintig beeldsets van patiënten en gezonde proefpersonen, opgenomen in twee centra. Deze studie toonde aan dat gemiddeld 90% (in het slechtste geval 77%) van de automatische gegenereerde contouren van het hart en de longen werd gelokaliseerd met voldoende nauwkeurigheid (gemiddelde positiefout 6 mm) om de initiële modellen te genereren voor lokaal nauwkeurige segmentatiemethoden.

Hoofdstuk 6 behandelt een nieuwe toepassing van het anatomische thorax model beschreven in de hoofdstukken 4 en 5, namelijk het automatiseren van de planprocedure van korte-as cardiale MR beelden. In de dagelijkse klinische praktijk is subjectieve gebruikersinteractie nodig om de optimale opnamerichting voor MR beelden van de linker hartkamer te bepalen. Door de automatische modelregistratie toe te passen op een set thoracale scout opnamen, zoals die in de praktijk voorafgaand aan elk cardiaal MR

onderzoek worden verworven, kunnen de positie en oriëntatie van de lange as van het linker ventrikel automatisch worden geschat; deze twee scanparameters zijn nodig om het korte-as beeldvolume te definiëren. In een studie met beeldsets van twintig patiënten werd aangetoond dat de automatisch gegenereerde acquisitieparameters met dezelfde nauwkeurigheid worden gedefinieerd als de handmatige geplande parameters, zelfs in de aanwezigheid van pathologische vormafwijkingen in de hartvorm.

Concluderend: dit proefschrift evalueert een aantal technieken om voorkennis te integreren in beeldsegmentatiemethoden. Hierbij werd gedemonstreerd, dat een set grove vormmodellen in combinatie met een beschrijving van de ruimtelijke orgaanconfiguratie een uitstekend uitgangspunt biedt voor het verder automatiseren van de beeldanalyse van cardiovasculaire MRI beelden.

Publications

Refereed papers in international journals

- B. P. F. Lelieveldt, R. J. van der Geest, M. Ramze Rezaee, J. G. Bosch, and J. H. C. Reiber, "Anatomical model matching with fuzzy implicit surfaces for segmentation of thoracic volume scans," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 18(3), pp. 218-230, 1999.
- M. Ramze Rezaee, B. L. Goedhart, B. P. F. Lelieveldt, and J. H. C. Reiber, "Fuzzy feature selection," *Pattern Recognition*, vol. 32(12), pp. 2011-2019, 1999.
- M. Ramze Rezaee, B. P. F. Lelieveldt, and J. H. C. Reiber, "A new cluster validity index for the fuzzy c-means," *Pattern Recognition Letters*, vol. 19, pp. 237-246, 1998.

Book chapters

- J. H. C. Reiber, B. Goedhart, H. G. Bosch, R. J. van der Geest, J. Dijkstra, G. Konig, M. R. Rezaee, B. P. F. Lelieveldt, A. de Roos, E. E. van der Wall, and A. V. G. Brusckhe, "Quantitative cardiovascular image analysis: current status and what are realistic expectations for the future?," in: *Vascular Medicine*, E. E. van der Wall, V. Manger Cats, J. Baan (Eds). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 103-131, 1997.

Refereed papers in conference proceedings

- B. P. F. Lelieveldt, M. Sonka, L. Bolinger, T. D. Scholtz, H. W. M. Kayser, R. J. v. d. Geest, and J. H. C. Reiber, "Anatomical modeling with fuzzy implicit surfaces: application to automated localization of the heart and lung surfaces in thoracic MR images," *proc. Information Processing in Medical Imaging*, vol. 1613 of Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag, Berlin, pp. 400-405, 1999.

Other conference papers

- B. P. F. Lelieveldt, R. J. van der Geest, and J. H. C. Reiber, "Automated model driven localization of the heart and lung surfaces in thoracic MR images," *IEEE Computers in Cardiology*, vol. 25, pp. 9-12, 1998.
- B. P. F. Lelieveldt, J. T. Rijsdam, R. J. van der Geest, D. P. Huijsmans, and J. H. C. Reiber, "Model driven interpretation of velocity encoded aortic flow images by means of Voronoi Arrangement Matrices," *IEEE Computers in Cardiology*, vol. 25, pp. 753-756, 1998.
- B. L. Kaptein, C. W. Spoor, and B. P. F. Lelieveldt, "Morphological parameters for a biomechanical shoulder model," *proc. 15th Conference of the International Society of Biomechanics*, pp. 452-453, 1995.

Awards

- Best IPMI Poster Award, *16th biannual conference on Information Processing in Medical Imaging, Visegrad, Hungary, 1999.*
- Cardiovascular Imaging Award 1998, *International Symposium on Cardiovascular Imaging, Leiden, the Netherlands, 1998.*
- Award finalist 'Rosanna Degani Young Investigator Award', *Computers in Cardiology, Cleveland, USA, 1998.*

Submitted journal papers

- B. P. F. Lelieveldt, P. M. J. van der Zwet, R. J. van der Geest, M. Ramze Rezaee, and J. H. C. Reiber, "Anatomical modeling with CSG-trees consisting of hyperquadric shape primitives."
- B. P. F. Lelieveldt, M. Sonka, L. Bolinger, T. D. Scholz, H. W. M. Kayser, R. J. van der Geest, and J. H. C. Reiber, "Anatomical modeling with fuzzy implicit surface templates: application to automated localization of the heart and lungs in thoracic MR volumes."
- B. P. F. Lelieveldt, R. J. van der Geest, H. J. Lamb, H. W. M. Kayser, and J. H. C. Reiber, "Observer independent acquisition of cardiac MR short-axis views."

Published abstracts

- B. P. F. Lelieveldt, R. J. van der Geest, and J. H. C. Reiber, "Model driven segmentation of thoracic MR-data," *International Symposium on Cardiovascular Imaging, Leiden, the Netherlands*, p84, 1998.

-
- B. P. F. Lelieveldt, R. J. van der Geest, and J. H. C. Reiber, "Automated localization of the heart and lung surfaces in thoracic volume data," *NVPHBV newsletter 30*, 1999.
 - B. P. F. Lelieveldt, P. M. J. van der Zwet, R. J. van der Geest, and J. H.C. Reiber, "Anatomical modeling with CSG-trees consisting of hyperquadrics and deformable superquadrics," *NVPHBV newsletter 25*, 1996.

Acknowledgements

This study was performed within the Knowledge Guided Image Processing (KGB) section of the Laboratory for Clinical and Experimental Image Processing, under supervision of prof. dr. ir. J.H.C. Reiber. This work couldn't have been accomplished without the help and support of many people to whom I'd like to express my gratitude:

- My former supervisors and KGB brothers in arms, Pieter van der Zwet and Mahmoud Ramze Rezaee,
- All colleagues at the Laboratory for Clinical and Experimental Image Processing and the Radiology department,
- Some people who gave the just the right tips at the right moments, sometimes without even knowing it: Milan Sonka, Theo van Walsum and Frits Post,
- Dr Sewrajsingh and Dr Rietveld,
- Annelies,
- My father.

Curriculum Vitae

Boudewijn Lelieveldt werd geboren op 20 oktober 1969 te Leiden. In 1988 behaalde hij het eindexamen gymnasium β aan de Stedelijke Scholengemeenschap in Middelburg. In hetzelfde jaar werd de studie Werktuigbouwkunde aangevangen aan de Technische Universiteit Delft. Zijn afstudeerhoogleraar (prof. dr. ir. H.G. Stassen) introduceerde hem in de biomedische technologie, waarna de studie in 1994 werd afgerond met een onderzoeksverslag over de toepassing van Magnetic Resonance Imaging om de anatomie van de schouder kwantitatief te beschrijven ten behoeve van een biomechanisch model van het schoudergewricht. Als assistent-in-opleiding (AIO) verrichtte hij vanaf maart 1995 promotieonderzoek bij de vakgroep Radiologie van de faculteit Geneeskunde van de Rijksuniversiteit Leiden, verbonden aan het Laboratorium voor Klinische en Experimentele Beeldverwerking (Promotor: prof. dr. ir. J.H.C. Reiber), resulterend in dit proefschrift. Momenteel is hij als wetenschappelijk medewerker verbonden aan het LKEB, waarbij de ontwikkeling van kennisgestuurde segmentatietechnieken voor medische beelden centraal staat.