



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Model-driven segmentation of X-ray left ventricular angiograms

Oost, C.R.

Citation

Oost, C. R. (2008, September 30). *Model-driven segmentation of X-ray left ventricular angiograms*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/13121>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/13121>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

やれやれ、これで一安心だ
'Well, we don't have to worry about that for a while...'

Chapter 8

Samenvatting en Conclusies

8.1 Samenvatting

Het hoge aantal gevallen van cardiovasculaire aandoeningen wereldwijd onderstreept het belang van cardiale beeldacquisitie en diagnostiek. Röntgen linkerventrikel angiografie is al geruime tijd een belangrijke klinische standaard in het beoordelen van de hartfunctie. De snelle opkomst van zowel op MRI (Magnetic Resonance Imaging) en MSCT (Multi Slice Computed Tomography) gebaseerde technieken ten spijt, zal röntgen linkerventrikel angiografie haar waarde in de klinische praktijk blijven behouden. Zolang röntgen angiografie wordt ingezet om de coronaire vaten af te beelden tijdens katheterisatieprocedures, zullen linkerventrikel angiogrammen in het merendeel van de procedures gelijktijdig worden geacquireerd. De manier waarop het linkerventrikel angiogram wordt geanalyseerd kan echter nog verbeterd worden. In sommige gevallen zal de expert cardioloog door middel van visuele interpretatie van de beeldsequentie de globale ejectiefractie en mogelijke wandbewegingsdefecten kunnen bepalen. In de meeste gevallen zal de arts handmatig een contourlijn moeten tekenen rondom de endocardiale wand in zowel het eind diastolische (ED) als in het eind systolische (ES) beeld. Deze laatste methode verdient de voorkeur, aangezien het een bepaalde diagnostische standaardisatie introduceert en aangezien het vervolgstudies bij patiënten mogelijk maakt. Echter, het handmatig tekenen van contouren is arbeidsintensief, tijdrovend en onderhevig aan inter- en intraobserver variabiliteiten. De noodzaak van een geautomatiseerde techniek voor de analyse van linkerventrikel angiogrammen is daarom evident.

Het voornaamste doel van het in dit proefschrift gepresenteerde werk was de ontwikkeling van een algoritme voor de geautomatiseerde contourbepaling van het cardiale linkerventrikel in de ED en ES fase in röntgen linkerventrikel angiografie, dat voldoende robuust is om toegepast te kunnen worden in de klinische praktijk. Om dit te bereiken is gebruik gemaakt van Active Appearance Modellen (AAM). Met behulp van deze statistische modellen, waarin tegelijkertijd de vorm en grijswaardes van een afgebeeld object worden gemodelleerd, kan een automatische omlijning van het linkerventrikel worden gerealiseerd. In dit proefschrift zijn zowel de uitdagingen van het automatisch interpreteren van linkerventrikel angiogrammen belicht, alsmede de beperkingen van Active Appearance Modellen in het algemeen en de beperkingen bij de toepassing van deze modellen op het segmenteren van het linkerventrikel in röntgen angiografische beelden. Om dit medische beeldverwerkingsvraagstuk op te lossen werden in hoofdstuk 1 de onderstaande doelstellingen geformuleerd:

- De geobserveerde overeenkomsten tussen het ED en het ES beeld dienen benut te worden door het gelijktijdig modelleren van vormkennis en grijswaardekennis van beide beelden met behulp van AAM technologie.
- De gevoeligheid van de op AAM gebaseerde segmentatie methode, ten opzichte van het instabiele karakter van het fout-criterium, dient beperkt te worden.

- Om de prestaties van AAM segmentatie te verbeteren moet onderzoek gedaan worden naar de optimale omvang en samenstelling van de dataset waarop het model getraind wordt.
- Om de locale omlijning van het linkerventrikel te verbeteren dient het effect van statistische, model-intrinsieke beperkingen te worden geneutraliseerd.
- De klinische relevantie van de ontwikkelde methode dient te worden gedemonstreerd.

De hoofdstukken 2 tot en met 6 geven een uitgebreide beschrijving van de methodologie, de voordelen en de klinische relevantie van het ontwikkelde algoritme voor de geautomatiseerde contourbepaling van het linkerventrikel in röntgen linkerventrikel angiografie.

In hoofdstuk 2 werd het Multi-View Active Appearance Model geïntroduceerd, waarmee de gewenste gecombineerde modellering van het ED en ES beeld van een röntgen linkerventrikel angiografie beeldsequentie werd gerealiseerd. Met deze uitbreiding van het gangbare AAM werd de statistische vormkennis van beide beelden gecorreleerd door voor elk trainingsvoorbeeld de vormvectoren aaneen te schakelen en vervolgens een Principal Component Analysis (PCA) uit te voeren op de gekoppelde vectoren. Een identieke methode werd toegepast om de statistische intensiteitskennis van het ED en ES beeld te koppelen. Door vervolgens de verkregen vorm- en intensiteitsmodellen aaneen te schakelen en wederom een PCA uit te voeren, werd uiteindelijk het Multi-View Active Appearance Model geconstrueerd. Om triviale verschillen in pose tussen beide beelden te kunnen modelleren, werden de schaling, orientatie en locatie afzonderlijk gemodelleerd voor ED en ES. Een andere innovatie die in hoofdstuk 2 werd geïntroduceerd was de opeenvolgende toepassing van twee Multi-View AAMs, met als doel de segmentatie van het linkerventrikel in ED en ES beelden. Het eerste model was het voorgestelde ‘generieke’ Multi-View AAM, het tweede was een model dat zich specifiek richtte op het verbeteren van de locale detectie van de rand van het linkerventrikel. In dit laatste model waren enkel de karakteristieken van de beeldintensiteit in de directe omgeving van de rand van het ventrikel gemodelleerd en werd de overgebleven beeldinformatie genegeerd.

De mogelijk effecten van deze innovaties van het AAM werden getest door het model toe te passen op de detectie van het linkerventrikel in een dataset van 70 patiënten, waarin een veelheid aan ziektebeelden en beeldacquisitie-artefacten gerepresenteerd was. Zonder handmatige initialisatie werd 81% van de beelden globaal goed geïnterpreteerd. Na handmatige initialisatie in de 13 overgebleven gevallen werd de robuustheid van het algoritme verhoogd tot 87%. Een goede correlatie in geprojecteerde oppervlakten en berekende volumes tussen de automatisch gegenereerde contouren en de handmatig getekende contouren kon worden aangetoond. Desalniettemin liet het automatische algoritme een lichte onderschatting van de oppervlakten en volumes zien. De verschillen tussen de automatische en handmatige analyse met betrekking tot het positioneren van de

rand van het ventrikel waren over het algemeen klein en de berekende ejectiefracties vertoonden geen systematische fout.

De verwaarloosbare verschillen in robuustheid tussen het vinden van het linkerventrikel in ED en in ES, de vergelijkbare trends in lineaire regressie en de vergelijkbare correlatie coëfficiënten, tonen het voordelig effect van het Multi-View AAM aan. De toegevoegde waarde van het model waarin enkel de intensiteiten rond de rand van het ventrikel werden gemodelleerd kon niet aangetoond worden. Hoewel er regelmatig voorbeelden waren waarin een positief effect kon worden geobserveerd, kon er geen systematische verbetering worden bewezen.

Hoofdstuk 3 beschreef de toepassing van het Multi-View Active Appearance Model op twee verschillende modaliteiten. Ten eerste in röntgen linkerventrikel angiografie, zoals ook beschreven in hoofdstuk 2, en ten tweede in cardiale MRI beelden. Ten opzichte van hoofdstuk 2 werd een optimalisering bereikt in de percentages van vormkennis en grijswaardekennis die tijdens het trainen in het model opgenomen dienden te worden. Bij het toepassen van het Multi-View AAM in de cardiale MRI beelden, werd een model gecreëerd waarin de vorm- en beeldintensiteitskennis werden gekoppeld van drie verschillende aanzichten van één anatomisch object, met drie aanmerkelijk verschillende geometrische vormen. Voor de experimenten in röntgen linkerventrikel angiografie werd dezelfde dataset gebruikt als bij de experimenten beschreven in hoofdstuk 2. Zonder handmatige interactie werd 87% van de beelden globaal goed geïnterpreteerd. De automatisch bepaalde projectie oppervlakten lieten een lichte maar statistisch significante onderschatting zien. De automatisch bepaalde oppervlakte ejectiefracties vertoonden een lichte maar statistisch significante overschatting ten opzichte van de handmatig bepaalde oppervlakte ejectiefracties.

Voor de experimenten in cardiale MRI was een dataset met korte-as, twee-kamer en vier-kamer opnamen van 29 patiënten beschikbaar. Toepassing van het Multi-View AAM op deze dataset resulteerde in 27 gevallen in een succesvolle segmentatie van alle drie de aanzichten. In de twee andere gevallen werd slechts één van de drie aanzichten verkeerd geïnterpreteerd, waardoor de algehele score van het algoritme 98% bedroeg. Voor alle drie de aanzichten werd een goede correlatie gevonden tussen de handmatig en automatisch bepaalde projectie oppervlakten van het linkerventrikel. Verschillen tussen handmatige en automatische methode bleken statistisch insignificant. Aangezien het binnen de uitgevoerde experimenten niet beoogd was om volumes te bepalen is er geen aandacht besteed aan het registreren van de drie aanzichten tot een 3D reconstructie van het hart. In toekomstig onderzoek zouden meer aanzichten gelijktijdig gemodelleerd kunnen worden (bijvoorbeeld de gehele verzameling van korte-as slices, gecombineerd met de twee-kamer en vier-kamer aanzichten), waaruit een 3D reconstructie zou kunnen worden afgeleid.

De in hoofdstuk 3 gepresenteerde resultaten toonden aan dat het mogelijk is om een beeld van het linkerventrikel waarin weinig contrast aanwezig is, automatisch goed te kunnen interpreteren op basis van informatie van een gerelateerd beeld. Daarnaast werd de generieke kracht van het Multi-View AAM aangetoond door de excellente prestaties in de cardiale MRI studie, waarin totaal verschillende geometrische vormen tegelijkertijd werden gesegmenteerd.

De in hoofdstuk 4 beschreven studie was gericht op het vinden van de optimale omvang en samenstelling van een dataset die gebruikt wordt voor het trainen van een Active Appearance Model dat wordt ingezet voor het interpreteren van medische beelddata. Met het segmenteren van de endo- en epicardiale rand van het linkerventrikel in korte-as slices MRI beelden als toepassing, werden drie parameters geoptimaliseerd. Ten eerste de omvang van de dataset. Ten tweede de ratio tussen patiëntendata en data van gezonde personen. Ten derde werd het effect gemeten van de verhouding waarin data van drie verschillende MRI scanners in de training dataset aanwezig was.

Voor het trainen van een AAM op basis van korte-as cardiale MRI data van gezonde personen, bleek een dataset van rond de 200 tot 250 beelden een optimaal segmentatieresultaat op te leveren. Vergelijkbare experimenten met patiëntendata werden niet uitgevoerd, maar de optimale omvang voor het trainen van een dergelijk model werd groter ingeschat. Op basis van de experimenten viel op te maken dat bij een verhoging van de hoeveelheid trainingsdata er een asymptotische trend ontstaat in het segmentatieresultaat. Een verslechtering van de resultaten vanwege een overvloed aan trainingsdata kon niet worden vastgesteld.

Om de invloed van de hoeveelheid patiëntendata versus de hoeveelheid data van gezonde personen in te schatten, werden drie verschillende samenstellingen van trainingsdata getest. Bij één model was 80% van de trainingsdata van gezonde personen en 20% betrof patiëntendata. In een ander model waren beide groepen evenredig verdeeld en bij een derde model werd een verhouding gemaakt van 20% data van gezonde personen en 80% van patiënten. Alle drie de getrainde modellen werden getest op drie test-datasets, die vergelijkbare ratios hadden als in de drie getrainde modellen gebruikt was. Hieruit volgde dat met het model met 80% data van gezonde personen en 20% data van patiënten over de gehele breedte de beste resultaten werden behaald.

Daarnaast werden in hoofdstuk 4 experimenten beschreven met beelddata van drie verschillende merken MRI scanners. Het doel van deze experimenten was om te testen of een AAM waarin beelddata van verschillende scanners verwerkt was, beter zou werken dan merk-specifieke AAMs. De resultaten bewezen het tegenovergestelde; merk-specifieke Active Appearance Modellen vertoonden een hogere nauwkeurigheid, zowel in de automatische contourbepalingen als in de resulterende ejection fracties.

In hoofdstuk 5 werd het Multi-View Active Appearance Model verder geoptimaliseerd voor de geautomatiseerde segmentatie van het ED en het ES beeld in röntgen linkerventrikel angiografie. Een nieuwe manier om het model te sturen naar de correcte oplossing werd ontwikkeld, de zogeheten Controlled Gradient Descent. Met deze methode werd voorafgaand aan elke model-iteratie een analyse gemaakt van de updates van de model parameters en werden vervolgens enkel de meest significante updates voor de parameters van het AAM uitgevoerd. Verder werd een gespecialiseerd minimale kosten algoritme (ook wel Dynamic Programming genoemd) ontwikkeld om de lokale contourbepaling te verbeteren. De zoekruimte van dit minimale kosten algoritme werd beperkt tot de directe omgeving van de door het AAM berekende omlijning van het linkerventrikel. Verder werd gepoogd om in het minimale kosten algoritme de dynamiek van de

samentrekking van de hartspier op te nemen, door de kostenmatrix te baseren op zowel de grijswaarden van het ED en het ES beeld, alsook op de grijswaardekarakteristieken van een subtractiebeeld (ES beeld minus ED beeld). Het algoritme, bestaand uit alle hierboven benoemde componenten, werd getest voor een volledig automatische toepassing en voor een semi-automatische oplossing waarin de uiteinden van het aortaklepvlak en de locatie van de apex waren gespecificeerd.

Het semi-automatische algoritme presteerde goed in 100% van de ED beelden en in 99% van de ES beelden, waarvan slechts één verkeerd werd geïnterpreteerd. De foutmarge in de contourbepaling was laag, zelfs in gevallen waar de rand van het linkerventrikel moeilijk was te onderscheiden. Ondanks een lichte onderschatting door de semi-automatische methode, was een uitstekende correlatie te zien tussen de handmatig en de semi-automatisch bepaalde volumes en ejectiefracties ($R^2 = \{0.99; 0.95; 0.84\}$ voor ED, ES en EF, respectievelijk). De verschillen tussen de handmatige en de semi-automatische methode bleken statistisch insignificant.

De nauwkeurigheid van de volledig automatische methode bleek vergelijkbaar met de nauwkeurigheid van de semi-automatische methode, met vergelijkbaar goede correlatie-coëfficiënten ($R^2 = \{0.99; 0.96; 0.82\}$ voor ED, ES en EF, respectievelijk). Afgezien van de berekende ED volumes, bleken de verschillen tussen de handmatige en de volledig automatische methode statistisch insignificant. Echter, de robuustheid van de volledig automatische methode bleek beduidend minder. In 91% van de ED beelden en 83% van de ES beelden werd de omlijning van het linkerventrikel correct geïnterpreteerd.

De doeltreffendheid van de vier innovatieve elementen van onze aanpak (Multi-View AAM, Controlled Gradient Descent, specialistische Dynamic Programming als verfijningsmethode en de toevoeging van informatie over de dynamiek van de hartspier in Dynamic Programming) werd getest door ze te vergelijken met de standaard AAM en Dynamic Programming technieken. Ten opzichte van een AAM dat enkel getraind was op ES beelden, zorgde het Multi-View AAM voor een geweldige verbetering van de ES segmentatie, terwijl de goede kwaliteit van de segmentatie van de ED beelden gewaarborgd bleef. Zowel voor ED als voor ES beelden was een duidelijke verbetering in segmentatie te zien wanneer de Controlled Gradient Descent methodiek werd toegepast. Deze methode bleek vooral effectief in het geval van volledig automatische segmentatie. De sequentiele toepassing van het Multi-View AAM en Dynamic Programming bleek betere resultaten op te leveren dan de gevallen waarin beide methodieken afzonderlijk werden toegepast. Daarnaast werd duidelijk aangetoond dat het toevoegen in Dynamic Programming van informatie over de dynamiek van de hartspier, de verfijning van de segmentatieresultaten positief beïnvloed.

Het semi-automatische algoritme liet beduidend betere resultaten zien dan eerder gerapporteerde methoden. Bewezen werd dat, vanwege de grote hoeveelheid informatie die in het algoritme was verwerkt, het algoritme de capaciteit had om de manier van tekenen van een klinisch expert te imiteren. De behaalde resultaten realiseerden de eerste, tweede en vierde doelstelling, zoals geformuleerd in hoofdstuk 1. Aangezien de foutmarges in de berekende volumes binnen de grenzen van de inter-observer variabiliteit vielen, leek het vijfde doel, klinische relevantie, eveneens gehaald.

Hoofdstuk 6 was gericht op het inschatten van de klinische relevantie van het voorgestelde algoritme. Voor deze klinische validatie studie werd twee expert cardiologen gevraagd om een dataset van 30 patiëntenstudies te analyseren. In eerste instantie door middel van het handmatig tekenen van de contourlijnen rondom het linkerventrikel in ED en ES, en vervolgens door middel van de ontwikkelde geautomatiseerde methode. In het laatste geval dienden de experts de uiteinden van het aortaklepvlak en de locatie van de aorta handmatig aan te geven. Daarnaast was het de cardiologen toegestaan om de automatisch gegenereerde contouren zo nodig handmatig aan te passen. Het doel van de experimenten was om inzicht te krijgen in de nauwkeurigheid, de efficiëntie van de werkzaamheden en de inter- en intra-observer variabiliteiten, wanneer het geautomatiseerde algoritme werd gebruikt.

De verschillen tussen de geautomatiseerde en de handmatige methode bleken statistisch insignificant. Voor zowel ED volumes als voor ES volumes werd een uitstekende correlatie waargenomen tussen beide methoden: $R^2 = \{0.96; 0.99\}$ voor ED (voor de twee cardiologen) and $R^2 = \{0.96; 0.98\}$ voor ES. Ook de bepaalde ejectiefracties vertoonden een goede correlatie: $R^2 = \{0.92; 0.94\}$. Slechts een klein systematisch verschil van 2% ejectiefractie werd waargenomen bij het vergelijken van de geautomatiseerde resultaten met de handmatige resultaten.

De gemiddeld benodigde tijd voor het analyseren van een patiëntenstudie werd met 26% gereduceerd, van 4.2 minuten tot 3.1 minuten. Daarnaast was er volgens beide expert cardiologen voor 60% van de automatisch gegenereerde ED contouren geen noodzaak voor handmatige aanpassingen. Vanzelfsprekend was dit getal lager voor ES: 11%. Echter, wanneer handmatige aanpassingen nodig bleken, behoeft gemiddeld slechts 19% van de ED contourlengte en 25% van de ES contourlengte handmatig te worden verbeterd.

Met het toepassen van de geautomatiseerde methode werd de inter-observer variabiliteit verlaagd. De point-to-curve verschillen tussen beide experts daalden van 0.75 mm tot 0.64 mm voor ED en van 1.48 mm tot 1.33 mm voor ES. Daarnaast was de intra-observer variabiliteit laag: 0.82 mm voor ED en 1.08 mm voor ES.

De in hoofdstuk 6 gepresenteerde resultaten toonden aan dat, met het toepassen van het algoritme voor het geautomatiseerd analyseren van linkerventrikel angiogrammen, er een aanzienlijke vermindering kan worden bereikt van de benodigde analysetijd, van de hoeveelheid handmatig werk en van de inter- en intra-observer variabiliteiten, terwijl de berekende ED en ES volumes even nauwkeurig waren als handmatig bepaalde volumes. Deze resultaten bewezen daarmee dat de methode toegepast kan worden om de analyse van röntgen linkerventrikel angiogrammen in de dagelijkse klinische praktijk te optimaliseren.

8.2 Conclusies en Aanbevelingen

Op basis van de in de hoofdstukken 2 tot en met 6 gepresenteerde resultaten kan worden geconcludeerd dat alle geformuleerde doelstellingen grotendeels zijn behaald. Het gelijktijdig modelleren van meerdere aanzichten van één object resulteerde in een duidelijke verbetering van met AAMs behaalde

segmentatieresultaten. Verder werd door het toepassen van de ontwikkelde methodiek de robuustheid en de nauwkeurigheid van de geautomatiseerde contourbepaling van het linkerventrikel in röntgen angiogrammen verbeterd. In een klinische validatiestudie bleek dat het algoritme in staat was om zowel de analysetijd, als de noodzaak tot handmatig tekenen van (delen van) contourlijnen, als de inter-observer variabiliteit te reduceren. Tevens bleken de geautomatiseerd bepaalde ED en ES volumes geen statistisch significante verschillen met handmatig bepaalde volumes te vertonen.

Vanwege de bevredigende resultaten is het in hoofdstuk 5 en 6 gepresenteerde algoritme recent geïntegreerd in een klinisch software pakket (QAngio® XA, van Medis medical imaging systems bv, Nederland), dat wereldwijd wordt verkocht.

Ondanks de goede resultaten zijn er nog enkele verbeteringen op het algoritme denkbaar. In hoofdstuk 4 werd inzicht verkregen met betrekking tot de optimale omvang en samenstelling van de training dataset voor het AAM. Deze kennis is nog niet opgenomen in het huidige algoritme.

Het Multi-View Active Appearance Model werd getraind op de handmatig getekende linkerventrikel contouren van slechts één klinisch expert. Hierdoor kon in hoofdstuk 5 het uitzonderlijke kopieergedrag van het algoritme worden aangetoond. Hoewel de klinische validatie van dit model, uitgevoerd in hoofdstuk 6, geen statistisch significante verschillen liet zien tussen handmatig en automatisch gegenereerde ED en ES volumes, is de verwachting dat een model dat gebaseerd is op de handmatig getekende contourlijnen van meerdere klinische experts de standaardisatie in het analyseren van linkerventrikel angiogrammen nog sterker zal bevorderen.

Vanwege het gebrek aan beschikbare data zijn alle beschreven experimenten, die betrekking hebben op linkerventrikel angiografie, uitgevoerd op single-plane angiogrammen. Zodoende is het ontwikkelde Multi-View Active Appearance Model slechts gebaseerd op twee beelden; de ED en ES projecties in het zogeheten 30° right anterior oblique view. Een uitgebreider model van het linkerventrikel, met mogelijk verbeterde segmentatieresultaten als gevolg, zou gerealiseerd kunnen worden wanneer het AAM op bi-plane data gebaseerd zou zijn.

Zhang *et al.* [1] toonden de toegevoegde waarde van vorm-beschrijvende statistische modellen van het hart aan door ze in te zetten voor het onderscheiden van gezonde personen en pathologische gevallen. De twee sterkste variaties van een 3D of 4D statistisch model van het linker- en rechterventrikel bleken goede parameters voor het onderscheiden van gezonde personen van patiënten met Tetralogie van Fallot. Op vergelijkbare wijze lieten Suinesiaputra *et al.* zien dat gezonde personen en patiënten met een infarct van elkaar onderscheiden konden worden met behulp van de sterkste principal component van een statistisch kortekas MRI model [2]. Tevens kon de regio waarin het infarct zich bevond nauwkeuriger worden bepaald, wanneer er tijdens de constructie van het model gebruik werd gemaakt van independent component analysis in plaats van principal component analysis [3]. Mogelijk zou het in dit proefschrift beschreven algoritme voor de segmentatie van linkerventrikel angiogrammen op een vergelijkbare wijze bepaalde ziektebeelden kunnen herkennen. Echter, aangezien het ontwikkelde algoritme een combinatie van een statistische model en Dynamic Programming is, corresponderen de uiteindelijke contourlijnen niet volledig met de geregistreerde

model parameters. Dit zou het onderscheidend vermogen van het algoritme kunnen aantasten.

Eveneens zouden verbeteringen in het initialiseren van het model overwogen kunnen worden. De resultaten in hoofdstuk 2 toonden aan dat de nauwkeurigheid van het algoritme aanzienlijk lager was in de directe omgeving van het aortaklepvlak en rondom de apex. Vanwege de gevoeligheid van de area-length methode voor de sub-optimale plaatsing, vereist de commerciële versie van het algoritme een handmatige aanduiding van deze punten. Om een volledig automatisch algoritme te realiseren zou gebruik gemaakt kunnen worden van gespecialiseerde AAMs die zich richten op het detecteren van het aortaklepvlak of de apex. Deze modellen zouden de coördinaten voor de initialisatie van het linkerventrikel model kunnen genereren, of een vergelijkbare methode zoals ontwikkeld door Roberts *et al.* zou kunnen worden gebruikt [4].

Een laatste verbetering zou de automatische selectie van de geschikte ED en ES beelden uit een volledige linkerventrikel beeldsequentie zijn. Hiermee zou een volledig automatisch algoritme kunnen worden gerealiseerd.

Bibliografie

- [1] H. Zhang, N. Walker, S. C. Mitchell, M. Thomas, A. Wahle, T. Scholz, and M. Sonka, "Analysis of four-dimensional cardiac ventricular magnetic resonance images using statistical models of ventricular shape and cardiac motion," *Proceedings of SPIE Medical Imaging*, vol. 6143, 614307, 2006.
- [2] A. Suinesiaputra, A. F. Frangi, M. Üzümcü, J. H. C. Reiber, and B. P. F. Lelieveldt, "Extraction of myocardial contractility patterns from short-axes MR images using independent component analysis," *Proceedings of CVAMIA-MMBIA*, vol. 3117, Berlin: Springer Verlag, 2004, pp. 75-86.
- [3] A. Suinesiaputra, M. Üzümcü, A. F. Frangi, T. A. M. Kaandorp, J. H. C. Reiber, and B. P. F. Lelieveldt, "Detecting regional abnormal cardiac contraction in short-axis MR images using independent component analysis," *Proceedings of Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, vol. 3216, Berlin: Springer Verlag, 2004, pp. 737-744.
- [4] M. G. Roberts, T. F. Cootes, and J. E. Adams, "Linking sequences of active appearance sub-models via constraints: an application in automated vertebral morphometry," *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, Berlin: Springer Verlag, 2003, pp. 349-358.

