



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Mesoscopic Computational Haemodynamics

Artoli, A.M.M.

Publication date
2003

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Artoli, A. M. M. (2003). *Mesoscopic Computational Haemodynamics*. [Thesis, fully internal, Universiteit van Amsterdam]. Ponsen en Looijen.

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, P.O. Box 19185, 1000 GD Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

Samenvatting

In dit laatste hoofdstuk vatten wij de belangrijkste resultaten en de conclusies samen die in dit proefschrift worden besproken, samen met toekomstig onderzoek om het numerieke model te verbeteren.

In dit proefschrift wordt de rooster-Boltzmann methode beschreven als een robuuste en nauwkeurige hemodynamische numerieke oplossingsmethode op mesoscopische schaal. Zowel de mogelijkheden als de tekortkomingen van deze methode worden besproken. Er wordt aangetoond dat de rooster-Boltzmann methode van tweede orde is in ruimte en tijd bij lage Mach-getallen. De spanningstensor wordt daarbij verkregen uit de niet-evenwichts delen van de distributiefuncties, zonder de afschuif snelheid te benaderen.

Diverse numerieke simulaties zijn uitgevoerd, die allen een uitstekende overeenkomst opleveren met analytische oplossingen, andere numerieke methodes, en/of beschikbare experimentele gegevens uit de literatuur. Machine-precisie nauwkeurigheid werd verkregen voor enkele eenvoudige stromingsproblemen, zoals Poiseuille en Couette stroming, zelfs met de "bounce-back" regel, van welke bekend is dat deze van eerste orde is.

Een quasi-onsamendrukbaar D3Q19 model voor de 3D simulaties van een oscillerende buisstroom reproduceert de analytische oplossing van Womersley opnieuw opgeleverd met een gemiddelde fout van ongeveer 15 procent met "bounce-back" op de verbinding met een vrij hoog Mach-getal en minder dan een procent bij lage Mach-getallen. Een gebogen randvoorwaarde, zoals onlangs door Bouzaidi *et al.* (2001) is voorgesteld, aangepast aan het object, levert betere resultaten op en is tot op tweede orde nauwkeurig.

Aangezien het doel van het ontwikkelen van deze numerieke methode het gebruik is als interactieve oplossingsmethode in het CrossGrid project dat momenteel in ontwikkeling is, werden de prestaties van de methode verbeterd door simulaties op een hoog Mach getal te starten en vervolgens tijdens de simulatie te verlagen naar de gewenste waarde (Mach-Annealing).

Hiermee is het mogelijk om simulaties uit te voeren die in de orde van de annealing factor sneller zijn. Samengestelde procedures waarin zowel de Reynolds- als Mach-getallen dynamisch worden ingesteld, kunnen voor verdere versnelling in de toekomst in aanmerking komen.

De invloed van de wand-, in- en uitvoer-randvoorwaarden op de nauwkeurigheid en prestaties is in detail bestudeerd als functie van de Mach- en Knudsen-getallen. Er is zo aangetoond dat de "bounce-back" op de verbindingen efficiënter zou kunnen zijn

indien toegepast bij de lage Mach-getallen wanneer de annealing techniek wordt gebruikt. Met de Mach-annealing techniek adviseren wij opnieuw de "bounce-back" op de verbindingen als beter alternatief in vergelijking met andere verfijnde randvoorwaarden die moeilijk te gebruiken zijn op het gebied van de hemodynamica.

Een andere toepassing van belang in simulatieomgevingen is het interactief veranderen van de geometrie en het bestuderen van de robuustheid van de numerieke methode bij het produceren van nauwkeurige resultaten zonder de simulatie opnieuw op te hoeven starten. De rooster-Boltzmann methode blijkt volledig aanpasbaar te zijn, zoals in eenvoudige tests is aangetoond. Meer onderzoek is noodzakelijk om het echte voordeel van deze eigenschap aan te tonen. Dit maakt onderdeel uit van huidig onderzoek.

De resultaten van de simulatie van een stabiele en instabiele stroming in een model van de menselijke aortavertakking die met behulp van een angiografie op basis van Magnetische Resonantie gereconstrueerd wordt, zijn beschreven als een typische hemodynamische toepassing. Voor onze simulaties werd een MRA beeld geleverd door Charles Taylor van de Universiteit van Stanford, U.S.A, met een oorspronkelijke resolutie van $512 \times 512 \times 64$ voxels, elke voxel ter grootte van 1 byte. De afstand tussen elke twee elkaar opeenvolgende geregistreerde snijvlakken is 0.9375 mm. Een beeldsegmentatie algoritme is toegepast op de originele gegevensreeks om de aorta te extraheren waarna de gesegmenteerde aorta eruit gelicht wordt en gefiltreerd om uiteindelijk het simulatiemodel uit Fig. 8.1 over te houden. De drukgradiënt bij de ingang van de aorta wordt verkregen uit een gemiddelde van de stroomsnelheid uit de literatuur (Moore *et al.*, 1994c; Taylor *et al.*, 1999). Het bestudeerde computationeel model betreft slechts het vertakkingsgebied, direct na IMA, en omvat delen van de linker en rechter iliac-slagaders. Het gehele model is onderwerp van studie. Wij hebben een aantal stabiele en instabiele stroomsimulaties voor het aortamodel uitgevoerd. Resultaten voor snelheidsvelden en de spanning zijn met succes verkregen en zijn kwalitatief vergeleken met de literatuur.

Aangezien de schuifspanning een essentiële rol bij cardiovasculaire ziekten speelt en aangezien deze direct wordt berekend, bevelen wij onderzoekers op het gebied van hemodynamica deze methode sterk aan als een alternatieve methode voor bloedstroming. Meer voordelen worden duidelijk door eenvoudige rooster generatie en recht-toe-recht-aan parallellisme en een eenvoudige en uitvoerbare aanpassing aan een veranderende geometrie. Verder onderzoek van het complete aorta model en experimentele validatie is in ontwikkeling in onze groep.

Een hoofdconclusie uit dit proefschrift is dat zelfs met de eenvoudigste rooster-Boltzmann methoden resultaten mogelijk zijn vergelijkbaar met de meest verfijnde traditionele oplossings methoden. Nochtans heeft dit proefschrift vele vragen onbeantwoord moeten laten. Enige opgelaten vragen zijn:

- De methode is nog niet rijp voor het oplossen van modellen die vloeistof-structuur interactie betreffen. Sommige recente ontwikkelingen gebaseerd op het koppelen van de vloeistof aan vaste stof rooster-Boltzmann modellen (Cho-

pard¹ *et al.*, 2002, persoonlijke mededeling) om trombose te onderzoeken zijn veelbelovend.

- De rooster–Boltzmann methode met BGK–benadering heeft vele problemen bij hoge Mach– en Reynolds–getallen, maar niet bij hemodynamische Womersley–getallen. Nochtans is deze kwestie vrij gevoelig voor de randvoorwaarden. Van de rooster–BGK grensvoorwaarden is bekend dat ze viscositeitsafhankelijk zijn, op enkele uitzonderingen na. Dit heeft directe invloed op de stabiliteit van de methode. Een oplossing is om gegeneraliseerde rooster–Boltzmann vergelijkingen te beschouwen (GLBE). Echter, de rekentijd die voor GLBE benodigd is moet worden afgewogen tegen de nauwkeurigheid en met de engineering–precisie worden vergeleken.
- Het is bekend dat de niet–Newtoniaanse modellen beduidend verschillen van Newtoniaanse. Hoewel de globale structuur gelijk blijft, is het profiel van de spanningstensor beduidend anders in de buurt van de wanden. Het is vrij gemakkelijk om niet–Newtoniaanse stromen in de modellen van rooster–Boltzmann uit te voeren, maar GLBE kan dan een betere optie zijn dan het rooster–BGK.
- Aangezien vroege turbulentie zich in de circulatie kan opbouwen, zijn turbulentie modellen noodzakelijkerwijs benaderd door een ideale hemodynamische oplossings methode. Een aantal turbulentie modellen zijn beschikbaar uit de literatuur, waarvan GLBE de meeste gebruikte is.
- Met de ontwikkeling in beeldtechnieken en het toegenomen microscopisch begrip van atherosclerose, kunnen traditionele CFD solvers niet nuttig blijken te zijn en kunnen mesoscopische modellen een plaats vinden.

Samenvattend zijn de rooster–Boltzmann methoden nauwkeurige en robuuste CFD oplossings methoden met elegante berekeningskarakteristieken die hen tot alternatieve technieken maken, meestal zonder enige beperkingen.

¹Het dient opgemerkt te worden dat Chopard aan de auteur in 2000 voorstelde dat deze koppeling, toegepast op de Hemodynamica, nuttig zou zijn. Op dat ogenblik waren wij er echter zelfs niet zeker van of de rooster–BGK methode aanvaardbare resultaten oplevert. Toen dat dat duidelijk was, was er geen tijd meer voor deze interessante suggestie.

