



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Real-time tomographic reconstruction

Buurlage, J.

### Citation

Buurlage, J. (2020, July 1). *Real-time tomographic reconstruction*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/123182>

Version: 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/1887/123182>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/123182> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Buurlage, J.

**Title:** Real-time tomographic reconstruction

**Issue Date:** 2020-07-01

# Samenvatting in het Nederlands

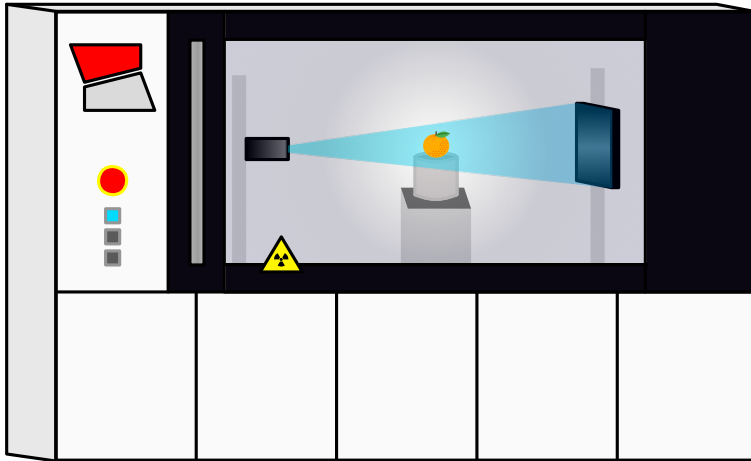
*This chapter contains a lay summary of the research presented in this dissertation, and is written in Dutch.*

Het in beeld brengen van het binnenste van een object zonder dit open te breken heeft een groot aantal toepassingen. Hier gebruik ik object in de breedste zin van het woord: denk bijvoorbeeld aan een patiënt in een CT scanner, een minuscule nanodeeltje onder de microscoop, of een brug die geïnspecteerd moet worden op barsten in het beton.

Tomografische reconstructie is de wiskundige methode achter veel 3D beeldvormingstechnieken. Deze technieken werken allemaal op basis van het zelfde principe. Met behulp van straling worden tweedimensionale projectiebeelden van het driedimensionale object gemaakt. Deze projectiebeelden vormen in zekere zin de schaduw van een object onder een bepaalde hoek. Bij een 3D scan worden projectiebeelden gemaakt onder meerdere hoeken, en door deze informatie slim te combineren kan de interne driedimensionale structuur van het object achterhaald worden.

Afhankelijk van de gewenste resolutie van het 3D beeld, kan deze *reconstructiestap* een lange tijd duren. Dat deze algoritmes duur kunnen zijn komt voornamelijk door de grootte van de data. Deze is eenvoudig te demonstrenen met een simpele berekening: één projectiebeeld bestaat op het moment typisch uit tot wel 4000 bij 4000 pixels, oftewel 16 megapixels. Van deze projectiebeelden wordt een 3D beeld gemaakt dat bestaat uit 4000 verschillende 16 megapixel plaatjes. Dit komt neer op 256 GB aan data voor een enkel 3D beeld.

Zelfs wanneer deze berekeningen op moderne computers worden uitgevoerd, kost het nog altijd minuten tot uren afhankelijk van de precieze methode die gebruikt wordt voor de reconstructiestap. Dit beperkt de mogelijkheid om veranderingen in het binnenste van een object in beeld te brengen



Figuur 1: Een illustratie van het FleX-ray lab bij het CWI. De scanner is ongeveer 2 meter breed, diep, en hoog. Achter het raam wordt een experiment gedaan met een sinaasappel. De röntgenbron, links, bestraalt de sinaasappel, en de detector, rechts, neemt projectiebeelden op terwijl de sinaasappel rond wordt gedraaid.

terwijl ze gebeuren. Met andere woorden, het is tot nu toe niet mogelijk geweest om een actief videobeeld te creëren van het binnenste van een object.

Het doel van het onderzoek gepresenteerd in mijn proefschrift is om de reconstructietijd flink omlaag te brengen, zodat het mogelijk wordt om dynamische veranderingen in het object te volgen terwijl ze gebeuren. Dit is van belang om het experiment te kunnen bijsturen. Een materiaal kan bijvoorbeeld verder verhit worden, een patiënt kan gevraagd worden zijn adem in te houden, of een regio waar ogenschijnlijk iets onverwachts gebeurt kan worden uitvergroot. Figuur 1 toont een illustratie van het FleX-Ray lab van het CWI, waarmee de methoden uit mijn onderzoek getest zijn.

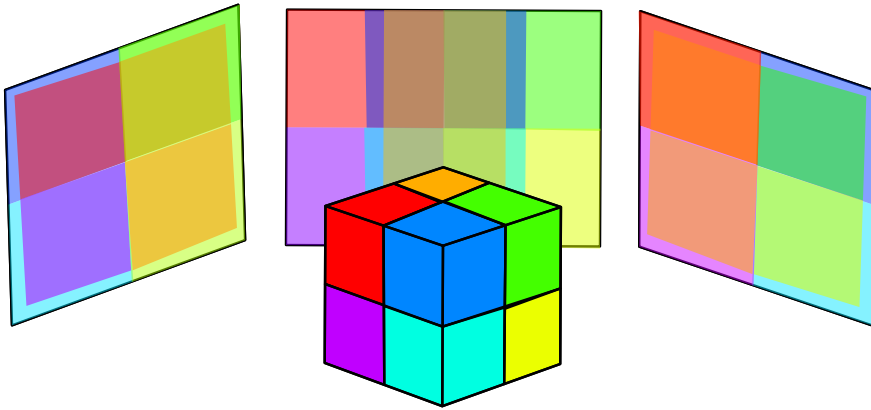
## Parallele berekeningen op supercomputers

Een duidelijke trend is dat computers steeds meer parallel worden. Een computer bestaat uit verschillende soorten processoren zoals de conventionele CPU, de processor op een grafische kaart, en eventueel andere acceleratoren. Deze verschillende processoren bestaan zelf vaak uit meerdere cores. Cores kunnen min of meer onafhankelijk van elkaar berekeningen uitvoeren. Een CPU bijvoorbeeld, bestaat typisch uit een paar tot tientallen cores, en dit aantal stijgt sterk. Een moderne grafische kaart bestaat uit duizenden (simpelere) cores.

Deze ontwikkeling naar parallele systemen is niet alleen zichtbaar in consumentenhardware zoals desktops, laptops en mobiele telefoons, maar ook bij supercomputers die gebruikt worden voor grootschalige (wetenschappelijke) berekeningen. Bij een supercomputer kun je denken aan een cluster van computers, die verbonden zijn in de vorm van een netwerk. Elke computer zelf kan bestaan uit meerdere CPU's, en kan ook meerdere grafische kaarten hebben. Supercomputers zijn erg krachtig, maar het is niet altijd eenvoudig om de gezamenlijke rekenkracht van alle processoren te bundelen en samen in te zetten voor het oplossen van één en hetzelfde probleem. Om een algoritme dat bedoeld is voor een enkele processor geschikt te maken om uitgevoerd te worden door een supercomputer, moet deze geparalleiseerd worden.

Een voor de hand liggende manier om de reconstructie in tomografie te versnellen is om gebruik te maken van de gezamenlijke rekenkracht van, bijvoorbeeld, tientallen grafische kaarten. Dit blijkt echter precies een voorbeeld van een probleem dat zich niet gemakkelijk leent voor het parallel oplossen. Wanneer een naïeve aanpak wordt gebruikt voor de parallelisatie, moeten de grafische kaarten dusdanig veel met elkaar communiceren om gezamenlijk tot een oplossing te komen, dat het netto niet genoeg winst oplevert om het algoritme op een supercomputer uit te voeren. Net als wiskundigen zijn computers namelijk beter in nadenken dan communiceren.

Voor het parallel uitvoeren van tomografische reconstructie splitsen we het 3D volume op in evenveel delen als het aantal processelementen dat we voor de berekening willen gebruiken. Ieder element is vervolgens verantwoordelijk voor het reconstrueren van één van de delen. Beeld je een röntgenstraal in die door een 3D object wordt gestuurd. Wanneer deze



Figuur 2: Het 3D volume is hier opgesplitst in 8 delen. Voor het begrip is een willekeurige kleur toegekend aan elk deel. Op de schermen achter het 3D volume, zien we in verschillende richtingen het schaduwspel van de opsplitsing. Waar schaduwen overlappen, zijn verschillende delen gekoppeld. Dit fenomeen wordt in dit proefschrift beschreven, en gebruikt om een goede opsplitsing te vinden.

straal door verschillende delen van het 3D object gaat, die elk toegewezen zijn aan verschillende elementen, worden elementen als het ware aan elkaar gekoppeld. Door deze koppeling moeten zij, tijdens de berekening, informatie uitwisselen over de tussenresultaten. Zie ook Figuur 2.

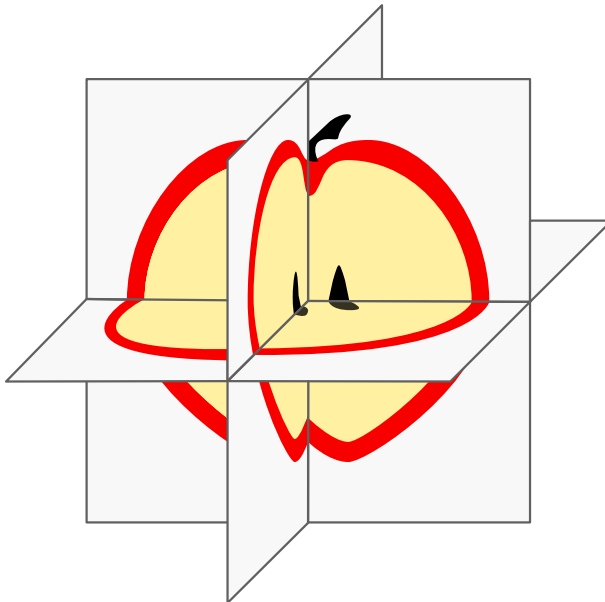
In Hoofdstuk 2 introduceer ik een softwarebibliotheek voor het implementeren van parallele algoritmes. In Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4 presenteer ik mijn onderzoek naar het paralleliseren van reconstructie-algoritmes in tomografie. Dit onderzoek richt zich met name op het vinden van de beste opsplitsing van het 3D object, afhankelijk van de richtingen waarop stralen door het object worden gestuurd. Het resultaat is een opsplitsing die de koppeling, en dus communicatie, tussen elementen waar mogelijk vermijdt. Gebruikmakend van deze nieuwe methodes, is tot wel  $10\times$  minder communicatie nodig. Dit vertaalt zich naar snellere reconstructietijden.

## Snelle weergave van doorsnedes

In het tweede deel van dit proefschrift bestuderen we een andere aanpak om de reconstructie te versnellen. Het idee achter deze aanpak is betrekkelijk eenvoudig. Vaak wordt de driedimensionale reconstructie weergegeven in de vorm van doorsnedes. Immers willen we in het binnenste van het object kijken. Normaal wordt eerst het 3D beeld gereconstrueerd, en vervolgens worden doorsnedes uit dit beeld berekend. Natuurlijk kan je niet naar alle doorsnedes tegelijk kijken, dus vaak wordt gekeken naar een selectie van bijvoorbeeld drie doorsnedes.

Wanneer we over een 3D videobeeld zouden beschikken van het binnenste van een object, zou dit in eerste instantie nog steeds via doorsnedes bestudeerd worden. Daarom draaien we in dit onderzoek de berekening om: we laten degenen die het experiment uitvoeren kiezen welke doorsnedes zij op elk moment willen bekijken en berekenen deze direct uit de projectiedata, in plaats van het volledige 3D volume uit te rekenen. De gekozen verzameling doorsnedes kan eenvoudig worden aangepast, en het resultaat is vervolgens direct zichtbaar. Hierdoor wekken we de illusie dat we een volledige 3D reconstructie maken, terwijl we eigenlijk alleen maar met doorsnedes en projectiebeelden hoeven te werken. Dit is een stuk goedkoper om uit te rekenen, maar is alleen mogelijk met een beperkt aantal reconstructiemethoden. Zie ook Figuur 3.

In Hoofdstuk 5 wordt deze nieuwe reconstructiemethode uitgelegd die we *quasi-3D* hebben genoemd. Hier laten we zien dat zelfs met een normale computer het minder dan een seconde kost om een hoge resolutie quasi-3D reconstructie te maken. Bij het kiezen van een andere doorsnede kunnen we zelfs in een tiende van een seconde dit nieuwe beeld laten zien. In Hoofdstuk 6 passen we deze methode toe bij een synchrotron. We demonstreren voor het eerst de mogelijkheid om een live 3D videobeeld te krijgen van het binnenste van een object bij een tomografisch experiment. In dit geval was het doel van het experiment om de wateropname te bestuderen van een synthetische stof. Door de beelden te bekijken kon bijvoorbeeld beslist worden om meer water toe te voegen aan het reservoir.



Figuur 3: Een illustratie van een quasi-3D reconstructie van een appel. We zien hier drie doorsnedes, die loodrecht op elkaar staan. Met de methode gepresenteerd in dit proefschrift kunnen deze doorsnedes eenvoudig gedraaid en verplaatst worden waarna de nieuwe doorsnede direct berekend wordt.