Universiteit
Leiden
The Netherlands

Automatic and efficient tomographic reconstruction algorithms

Lagerwerf, M.J.

Citation
Lagerwerf, M. J. (2021, October 5). *Automatic and efficient tomographic reconstruction algorithms*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/3214854

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/1887/3214854

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

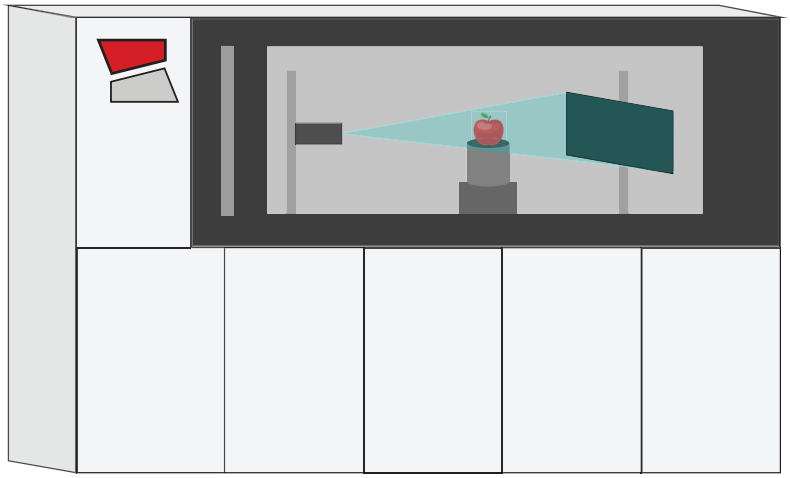
Samenvatting in het Nederlands

This chapter contains a layman summary of the research presented in this thesis, and is written in Dutch.

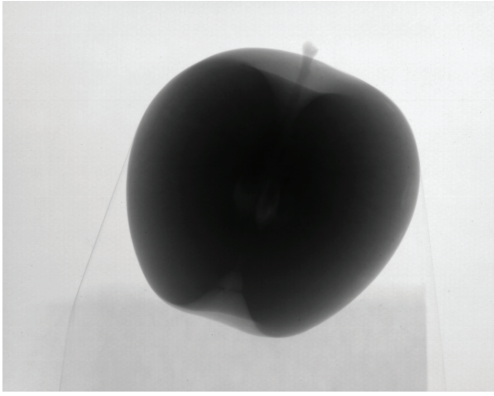
Voor een groot aantal toepassingen is het interessant om de binnenkant van een object in beeld te brengen, zonder het object te vernietigen. Voorbeelden van toepassingen zijn legio, en liggen op zeer diverse vlakken: het productieproces van computerchips controleren, het inspecteren van een brug op barsten in de ondersteunende balken, of het onderzoeken van de organen van een patiënt.

Tomografische reconstructie is de wiskundige rekenmethode die vaak gebruikt wordt voor dit soort toepassingen. In tomografie wordt een golf die door materialen heen kan bewegen gebruikt om metingen van het object te maken (zie **figuur 1**). Deze metingen worden gedaan uit verschillende posities en worden gecombineerd tot één grote dataset. Deze dataset wordt vervolgens gebruikt om berekeningen te doen die een beeld opleveren van het binnenste van het gemeten object. Deze beelden worden ook wel *reconstructies* genoemd. Een voorbeeld van een reconstructie is gegeven in **figuur 1c**. Voorbeelden van golven die gebruikt worden in de tomografie om reconstructies mee te maken zijn: geluidsgolven; gebruikt voor ultrasound en fotoakoestische metingen; X-rays gebruikt voor CT scanners, magnetische velden; gebruikt voor MRI scanners, en elektronen; gebruikt voor elektronemicroscopen.

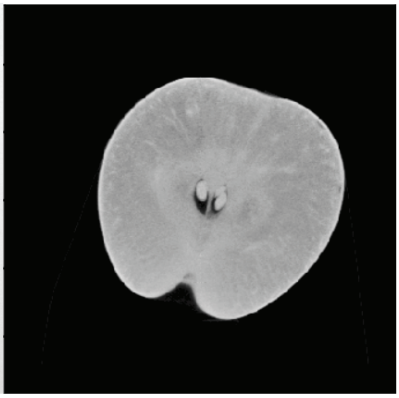
In dit proefschrift focussen we voornamelijk op *computed tomography*, ofwel CT. Deze vorm van tomografie wordt veel in medische toepassingen gebruikt, maar ook in het ontwikkelen van nieuwe materialen, en zelfs in het onderzoeken en digitaliseren van museumobjecten. In het algemeen worden eerst de CT-metingen gedaan, om daarna pas reconstructie te berekenen. Maar als deze reconstructie berekend zou kunnen worden terwijl de CT-metingen gedaan worden zijn er ineens een heleboel nieuwe interessante toepassingen mogelijk. Dit betekent dat het mogelijk is om het object direct te observeren tijdens de scan en op deze observaties te reageren. Neem bijvoorbeeld het stresstesten van een bouwmateriaal. Hier wordt druk op een materiaal geleverd tot het breekt. Doordat de scheuren



(a) Illustratie van een CT scan.

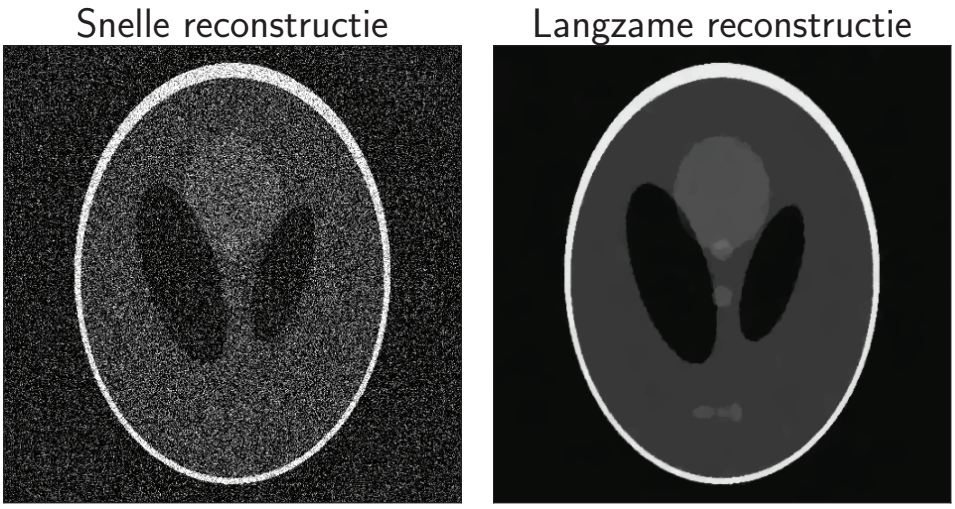


(b) Voorbeeld van een CT-meting



(c) Voorbeeld van een reconstructie.

Figuur 1: Tijdens een CT scan worden X-ray golven door een object gestuurd, in dit geval een appel. Achter het object staat een detector die meet hoeveel golven door het object zijn gekomen. Als er minder golven zijn gemeten, dan was 'meer object' aanwezig en wordt de meting donkerder. Een voorbeeld van zo'n meting zien we in figuur (b). Vervolgens draaien we het object en doen we nog een meting. Als het object een vol rondje heeft gedraaid dan is er voldoende informatie om een reconstructie te maken. Figuur (c) laat een 2D doorsnede zien van een 3D-reconstructie. Deze reconstructie laat een doorsnede zien van een appel zonder dat de appel is doorgesneden.



(a) Rekentijd: 0,09 seconden. (b) Rekentijd: 47,5 seconden.

Figuur 2: Twee verschillende reconstructiemethodes toegepast op computer gesimuleerde CT-metingen met veel ruis.

nu gezien worden op het moment dat ze ontstaan kun je ophouden met druk geven voordat het materiaal volledig is gebroken en kun je onderzoeken wat het effect is van andere veranderingen op deze scheuren, zoals bijvoorbeeld temperatuurverschillen. Een ander voorbeeld is het scannen van een patiënt. Als de dokter direct een reconstructie heeft van de ingewanden kan er ingezoomd worden als er niet voldoende detail is. Bovendien kan de dokter direct conclusies trekken uit de observaties en hoeft de patiënt niet onnodig lang te wachten op de uitslag van het onderzoek.

Om live reconstructies te kunnen berekenen tijdens de CT scan moeten twee processen real-time gedaan worden: de scan en de berekeningen. De standaard manier van CT scannen is te langzaam om live beelden te kunnen berekenen. Daarom moet het scanprocess versneld worden. Dit kan op twee manieren: 1) door minder metingen te doen of 2) door sneller een meting te doen. Ten eerste, minder metingen betekent minder informatie voor de berekeningen, en ten tweede, sneller meten betekent meer ruis in de metingen en dus minder precieze metingen. Dit levert een probleem op, want reconstructiemethodes die snel genoeg zijn om real-time uit te rekenen leveren slechte beelden op als de CT-metingen ruis of weinig informatie bevatten. En reconstructiemethodes die wel om kunnen gaan met dit soort CT-metingen kosten veel tijd om toe te passen. Een voorbeeld hiervan is gegeven in **figuur 2**. Hier laten we reconstructies zien

van computer gesimuleerde CT-metingen met veel ruis. Voor 2D-CT-reconstructies kunnen we snellere computers gebruiken en real-time reconstructies maken, maar voor 3D-CT-reconstructies is dit niet meer mogelijk. Dit betekent dat voor live 3D-CT-reconstructies een nieuwe reconstructiemethode moet worden bedacht die snelle berekeningen kan doen en alsnog accurate reconstructies kan maken van CT-metingen die veel ruis bevatten en weinig informatie. Dit hebben we onderzocht in **hoofdstuk 4** en **5**.

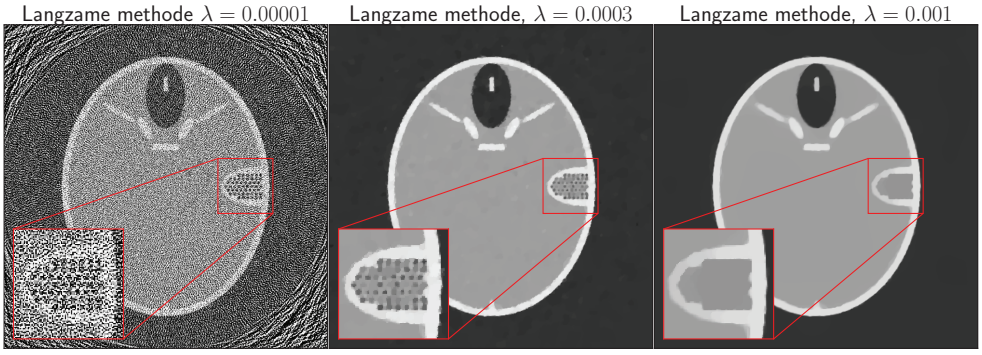
Het toepassen van reconstructiemethodes is niet altijd even makkelijk. In **hoofdstuk 2** en **3** hebben we nieuwe methodes ontwikkeld om bestaande reconstructiemethodes beter toepasbaar te maken.

Het automatisch correct toepassen van reconstructiemethodes

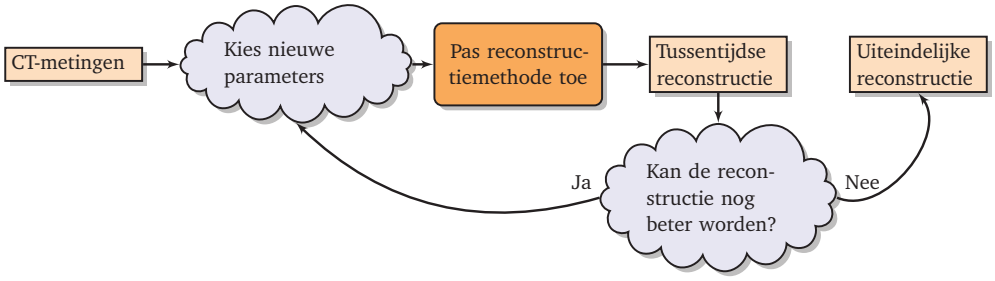
Een reconstructiemethode is vergelijkbaar met een kookrecept. Er zijn simpele recepten, waar zonder veel moeite iets lekkers uitkomt. Maar er zijn ook heel moeilijke recepten waar echt iets geweldigs uitkomt. De uitdaging met deze moeilijke recepten is dat als er iets misgaat de resultaten ook makkelijk minder goed kunnen worden. Zo ook met reconstructiemethodes.

Reconstructiemethodes hebben een set aan parameters[1], en de keuze van deze parameters beïnvloedt de kwaliteit van de reconstructie, zoals we kunnen zien in **figuur 3**. In dit figuur zien we drie verschillende reconstructies met de langzame reconstructiemethode van precies dezelfde CT metingen. Hier is het enige verschil tussen de drie reconstructies de parameterkeuze λ. Hoe je deze reconstructieparameters moet kiezen is niet altijd even duidelijk voordat je een reconstructie ziet met de gekozen parameter. Daarom komt het uitrekenen van een reconstructie in de praktijk vaak neer op een proces van 'trial-and-error', zoals beschreven in **figuur 4**. Daarom hebben we in **hoofdstuk 2** en **3** wiskundige methodes ontwikkeld om de keuze voor parameters te optimaliseren. In **hoofdstuk 2** ontwikkelen we een methode voor langzame reconstructiemethodes, zoals de methode die we eerder gezien hebben in **figuur 2**. Het toepassen van deze reconstructiemethodes duurt lang en elke keer dat je een suboptimale reconstructieparameter kiest moet je de reconstructiemethode nog een keer toepassen. Om de ontwikkelde methode toe te kunnen passen moet je een paar keer een reconstructie uitrekenen. Maar als dit gedaan is kun je vervolgens voor (bijna) alle parameterkeuzes direct een voorbeeldreconstructie genereren en is de parameterkeuze zo simpel als gewoon de beste reconstructie kiezen uit een verzameling van reconstructies.

[1]Parameters zijn waardes die van tevoren gekozen moeten worden om een methode te laten werken. Voorbeelden hiervan in de echte wereld zijn: de versnelling en zadelhoogte van een fiets, of de stand en temperatuur van een oven.



Figuur 3: Voorbeelden van reconstructies met de langzame reconstructiemethode van **figuur 2**. Het enige verschil tussen deze drie reconstructies is de parameterkeuze λ. Dit laat zien dat de parameterkeuze erg belangrijk is en ook voor problemen kan zorgen als deze niet goed genoeg is.



Figuur 4: Schematische weergave van het toepassen van een reconstructie methode. Als de mogelijke keuzes voor de set van reconstructieparameters klein is en het effect van de parameterkeuze duidelijk is, dan is de reconstructie methode makkelijk te gebruiken.

In **hoofdstuk 3** formuleren we een wiskundig model om automatisch de beste parameterkeuze te vinden voor de eerder besproken snelle reconstructiemethodes. Vergeleken met de langzame reconstructiemethodes kan je veel meer parameterkeuzes testen. Maar als je dat met de hand moet doen, dan kun je deze methode niet meer gebruiken in een geautomatiseerde omgeving. De parameters die we hier optimaliseren zijn vergelijkbaar met de parameters die in de machine learning-methode van **hoofdstuk 4** worden geleerd, maar in dit geval leren we alleen de parameters voor één snelle reconstructie methode en hebben we helemaal geen voorbeeld CT-metingen nodig. Daarmee is deze methode toepasbaar voor een

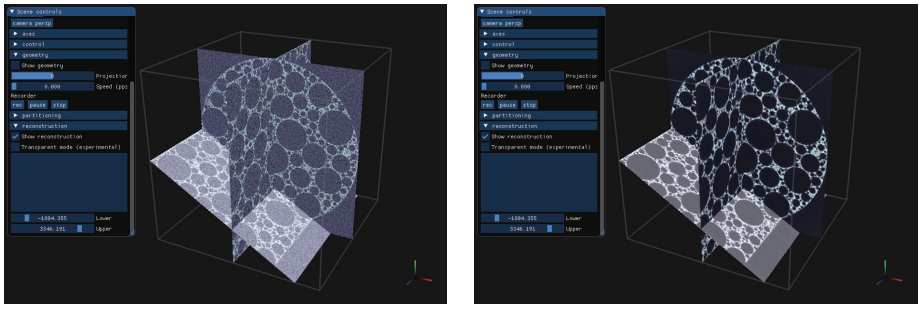
breed scala van CT-metingen.

Snelle en accurate reconstructiemethodes

In **hoofdstuk 4** ontwikkelen we een accurate en snelle reconstructiemethode voor snelle CT scans, dus voor CT scans die CT-metingen met weinig informatie en veel ruis opleveren. Het idee achter deze methode is dat we een snelle reconstructiemethode ontwikkelen door een bestaande snelle methode te combineren met een *machine learning*-methode. De machine learning-methode is in dit geval een wiskundig model dat vier snelle reconstructiemethodes combineert. In dit model is een deel van de parameters nog niet gekozen. Deze parameters worden vervolgens gekozen (of geleerd) door CT-metingen en bijbehorende accurate reconstructies te geven en de computer te laten bedenken welke parameters bij deze combinatie het beste passen. Als deze parameters geleerd zijn kunnen we het model toepassen op nieuwe CT-metingen die lijken op de metingen die we gebruikt hebben tijdens het leerproces. Ondanks dat we meer berekeningen aan het doen zijn, is deze methode nog steeds snel, omdat alle componenten een snel te evaluaren reconstructiemethode zijn. Doordat we de methode toepassen op CT-metingen die vergelijkbaar zijn met de voorbeelden die we hebben gebruikt tijdens het leerproces zijn de reconstructies niet alleen snel, maar ook accuraat.

Een uitdaging voor het gebruiken van deze machine learning-methode is het feit dat er CT-metingen beschikbaar moeten zijn voor het leerproces die vergelijkbaar zijn met de CT-metingen waar we het op toe willen passen en waar een accurate reconstructie voor is. Dit is moeilijk omdat voor sommige toepassingen het heel moeilijk is om een accurate reconstructie te krijgen, gezien we niet anders hebben dan snelle CT metingen met onvoldoende informatie.

Daarom combineren we in **hoofdstuk 5** de reconstructiemethode uit **hoofdstuk 4** met trainingsstrategie waarbij geen voorbeelden nodig zijn. Deze trainingsstrategie is gebaseerd op de observatie dat de ruis in één CT meting niet beïnvloed wordt door de ruis in een andere CT meting. Dit is vergelijkbaar met het feit dat twee dobbelsteenworpen elkaar niet beïnvloeden. Deze observatie kunnen we gebruiken om trainingsvoorbeelden te creëren vanuit de CT-metingen waar we de methode op willen toepassen. Dit betekent dat deze methode het meest effectief is voor CT-metingen met veel ruis. Bovendien laten we zien dat deze methode ook gebruikt kan worden om quasi-3D real-time reconstructies te maken. Met quasi-3D bedoelen we dat het geen volledige 3D-reconstructie is, maar 3 willekeurig te kiezen doorsneden van een 3D-reconstructie. We laten een voorbeeld van quasi-3D-reconstructies zien in **figuur 5**. Hier is links de originele methode voor deze strategie en rechts de methode ontwikkeld in **hoofdstuk 5**.



(a) Standaard snelle reconstructie (b) Nieuwe snelle reconstructie

Figuur 5: Real-time reconstructies gemaakt met de quasi-3D reconstructiestrategie. Het gescande object is een cilinder met bubbels erin. Hier rekenen we drie doorsneden van de 3D-reconstructie uit in plaats van de volledige 3D-reconstructie. Doordat er op elk moment kan worden besloten om een andere doorsnede weer te geven is het volledige 3D-volume real-time beschikbaar.

Conclusie en vervolg

Het onderzoek beschreven in deze thesis laat zien dat je CT reconstructiemethodes bruikbaarder kunt maken, en geschikt kunt maken voor een bredere doelgroep, door slim gebruik te maken van wiskundige modellen. Bovendien hebben we laten zien dat je bestaande reconstructiemethodes zodanig kan verbeteren dat je ze kan gebruiken om real-time CT reconstructies te maken. De volgende stap in het onderzoek zal zijn dat er gewerkt gaat worden om deze methodes toe te passen in de eerder beschreven voorbeelden. Dit zal, zoals het altijd gaat met nieuwe methodes toepassen in de praktijk, nieuwe uitdagingen, problemen en onderzoeksvragen opleveren.