



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

Spectral imaging and tomographic reconstruction methods for industrial applications

Zeegers, M.T.

Citation

Zeegers, M. T. (2023, May 31). *Spectral imaging and tomographic reconstruction methods for industrial applications*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3619550>

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/1887/3619550>

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

Summary in Dutch

Met de globalisering, groeiende wereldbevolking en andere schaalvergrotingen die nu plaatsvinden, wordt de mensheid steeds afhankelijker van efficiëntere industriële productie. Een essentieel component van industriële productie is het uitvoeren van kwaliteitscontroles. Deze controles zorgen ervoor dat het product doet waar het voor gemaakt is en er geen schade kan ontstaan wanneer een product gebruikt of geconsumeerd wordt.

Een belangrijk onderdeel van de industriële branche is de voedselproductie. Verschillende processen tijdens voedselverwerking in en rond fabrieken kunnen leiden tot contaminatie van het voedselproduct. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de aanwezigheid van organismen (bijvoorbeeld ongewenste bacteriën zoals *E. coli* in kaas) of de aanwezigheid van chemicaliën (zoals pesticiden en schoonmaakmiddelen op fruit) in of op het product. Een belangrijke categorie is fysieke contaminatie, waarbij kleine objecten in het product achterblijven. Dit kan zich uiten in kleine stukjes glas, metaal of plastic die achter zijn gebleven in voedselproducten. Deze kleine objecten worden in deze context (lichaams)vreemde objecten (*foreign objects*) genoemd, en kunnen schadelijk zijn wanneer deze per abuis worden geconsumeerd. Mede hierdoor moeten supermarkten regelmatig grootschalige terugroepacties op touw zetten. Het is vanzelfsprekend dat fysieke contaminatie leidt tot mogelijke gezondheidsrisico's, tijdverlies, financiële schade en verlies van vertrouwen in de fabrikant. Vanwege de mogelijkheid van voedselcontaminatie op allerlei niveaus zijn de methodes voor kwaliteitscontroles voortdurend in ontwikkeling.

Er bestaan vele methodes voor het detecteren van voedselcontaminatie. Veel methodes zijn gebaseerd op de interactie met röntgenstraling (*X-rays*), die voorwerpen (gedeeltelijk) kan doordringen. Een foreign object kan bijvoorbeeld meer röntgenstraling absorberen dan het product waar het in verscholen is. Als het product dus met behulp van een bron wordt blootgesteld aan röntgenstraling kan er een beeld gevormd worden door middel van een röntgenstralingsdetector, waarop het foreign object zichtbaar wordt. Hoewel de ontwikkelde methodes vaak in bredere zin inzetbaar zijn, vormt het detecteren van foreign objects met röntgenstraling de rode draad in dit proefschrift.

Hoewel röntgenbeelden veel kunnen laten zien, kan het voorkomen dat projecties van bepaalde materialen op elkaar lijken en moeilijk tot onmogelijk te onderscheiden zijn. Als oplossing hiervoor kan X-ray *computertomografie* (CT) gebruikt worden. Hierbij worden meerdere röntgenbeelden van een object opgenomen onder verschillende hoeken. Hierna kan het object in kwestie met een reconstructiealgoritme gevisualiseerd worden in een driedimensionaal volume. Omdat CT een 3D volume genereert in plaats van een 2D projectie, kan het voorwerp beter geanalyseerd worden en bijvoorbeeld beter gecontroleerd worden op de aanwezigheid van een foreign object.

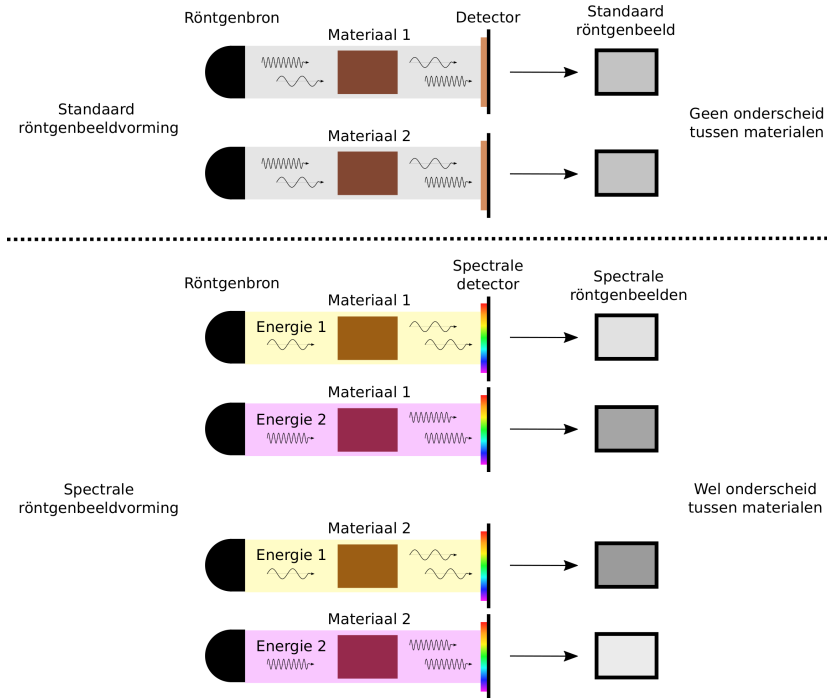
X-ray beeldvorming en computertomografie kunnen veel inzicht geven in de samenstelling van een object, maar er zijn veel uitdagingen om dit toe te passen voor industriële doeleinden. Het is belangrijk om op basis van de verkregen informatie een zowel *snelle* als een *accurate* beslissing te maken. Dit zijn conflicterende doelen: röntgenbeelden kunnen relatief snel geanalyseerd worden maar bieden niet altijd uitsluitel, terwijl CT volumes beter te analyseren zijn maar het berekenen en analyseren ervan meer tijdrovend is. Bovendien kan het in CT volumes toch zijn dat verschillende materialen te veel op elkaar lijken en moeilijk uit elkaar te halen zijn.

Twee relatief nieuwe technieken bieden mogelijkheden om inspectie van objecten zowel sneller als accurater te maken. Het onderzoeksgebied van kunstmatige intelligentie heeft recentelijk een grote groei doorgemaakt, mede door de ontwikkeling van *deep learning* methodes. Hierbij kan een diep neurale netwerk (die gebaseerd is op de netwerken van neuronen in de hersenen van de mens) door middel van voorbeelden met bijbehorende oplossingen getraind worden om zijn werking op een bepaalde klasse van problemen steeds te verbeteren. Een speciale categorie van neural netwerken zijn de *convolutionele neurale netwerken*. Deze zijn in staat om, eenmaal getraind, zeer snel objecten te detecteren op röntgenbeelden zonder dat daar menselijke handelingen aan te pas komen.

Desondanks kan op de beste röntgenbeelden een foreign object onzichtbaar blijven. Om dit te verbeteren is de techniek van spectrale röntgenbeeldvorming (*spectrale X-ray imaging*) bruikbaar. Spectrale röntgenstralingsdetectoren kunnen de fotonen, waaruit röntgenstralen zijn opgebouwd, niet alleen detecteren maar voor elke foton ook de energie bepalen die ze bij zich dragen. De absorptie van de fotonen afhankelijk van energie wordt een *absorptiespectrum* genoemd. Omdat de absorptie van fotonen niet alleen afhankelijk is van het materiaal maar ook van de energie, geeft dit voor ieder materiaal een uniek absorptiespectrum. Met spectrale röntgenbeeldvorming kan beter bepaald worden welke materialen er in een object zitten, waar dit bij standaard röntgenbeeldvorming vaak niet goed te meten is (zie Figuur S1 voor een voorbeeld).

Ook voor spectrale röntgenbeeldvorming geldt dat de samenstelling van een object beter geanalyseerd kan worden wanneer wordt overgegaan op *spectrale CT*. Dit kan bijvoorbeeld door de gemeten CT beelden voor elke energie apart te reconstrueren. Door meerdere CT volumes - elk behorende bij een zekere energie - met elkaar te vergelijken, kan nog beter bepaald worden welke materialen er in het object zitten. Desondanks geldt ook hier weer dat het maken van de reconstructies extra tijd kost. Daarom zijn spectrale CT reconstructiealgoritmes voortdurend in ontwikkeling om zowel de nauwkeurigheid als de snelheid te verbeteren.

Machine learning en spectrale röntgenbeeldvorming zijn twee belangrijke ingrediënten voor de methodes die in dit proefschrift ontwikkeld zijn. In **hoofdstuk 1** wordt uitgelegd hoe deze technieken werken en wordt een overzicht van de be-



Figuur S1: Schematische weergave van het voordeel van spectrale röntgenbeeldvorming ten opzichte van standaard röntgenbeeldvorming. Bij standaard röntgenbeeldvorming kunnen twee verschillende materialen resulteren in dezelfde intensiteit op het röntgenbeeld. Bij spectrale röntgenbeeldvorming kunnen de energieën in de röntgenstraal van elkaar gescheiden worden (door de bron anders in te stellen, of door beide energieën te meten in een spectrale detector, of beide). Hierdoor krijgen we per materiaal meerdere beelden. Op basis van de verschillen in deze spectrale röntgenbeelden tussen materialen kunnen we ze onderscheiden.

langrijkste bestaande methodes gegeven. De hoofdstukken daarna behandelen verschillende aspecten van de mogelijke toepassing van deze technieken.

In **hoofdstuk 2** richten we ons op een fundamenteel probleem van deep learning: er zijn veel *trainingsvoorbeelden* nodig om een getraind netwerk goed te laten functioneren. Ook voor inspectie met röntgenbeeldvorming zijn deze voorbeelden lang niet altijd gemakkelijk verkrijgbaar en vereisen veel manueel werk om te vervaardigen. Daarom ontwikkelen we een *werkstroom* waarbij enkel een gelimiteerd aantal objecten met CT gescand en gereconstrueerd hoeft te worden, waaruit op een efficiënte manier veel trainingsvoorbeelden verkregen kunnen worden. We laten aan de hand van een dataset opgenomen in het FleX-ray laboratorium van het CWI zien dat deze methode gebruikt kan worden voor foreign object detectie en andere op deep learning gebaseerde industriële toepassingen.

De werkstroom is zodanig vormgegeven dat het op vele manieren uitbreidbaar

is om nog betere trainingsdata te verkrijgen. Een belangrijke uitbreiding is om spectrale röntgenbeeldvorming te gebruiken. In **hoofdstuk 3** kijken we naar hyperspectrale beelden, waarbij zeer veel energieën tegelijkertijd kunnen worden opgenomen. Omdat deze hyperspectrale beelden zeer veel data kunnen bevatten en daardoor dus zeer groot kunnen zijn, kost het relatief veel tijd om deze te verwerken door een met deep learning getraind netwerk. Daarom is het nodig om deze beelden te *comprimeren*. Om de belangrijke eigenschappen in deze beelden te behouden voor de taken die uitgevoerd moeten worden (zoals herkenning van foreign objecten) kan de compressie op een *taakgedreven manier*. Dit doen we door twee neurale netwerken aan elkaar te koppelen en deze *tegelijk* te laten leren: het eerste deel is verantwoordelijk voor de compressie en het tweede deel is verantwoordelijk voor het uitvoeren van de taak. We laten met meerdere voorbeelden zien dat het gecombineerd trainen van dit samengestelde netwerk leidt tot sterkere en robuustere compressie dan met conventionele compressiemethodes. Deze compressiemethode heeft niet alleen voordelen bij industriële taken, maar ook in andere applicaties waarbij efficiënt data moet worden uitgewisseld (bijvoorbeeld bij het sturen van data van een satelliet naar de aarde).

In de opvolgende hoofdstukken leggen we ons toe op het verbeteren van de CT reconstructies met spectrale röntgenbeeldvorming. In **hoofdstuk 4** kijken we naar objecten die *weinig verschillende materialen* bevatten. Een bestaand algoritme dat op deze gevallen is gespecialiseerd gebruikt deze eigenschap om significant betere reconstructies te bewerkstelligen dan andere methodes die deze eigenschap niet (volledig) gebruiken. We ontwikkelen een uitbreiding van dit algoritme naar meerdere energieniveaus en tonen aan dat met het gebruik van spectrale data objecten die bestaan uit meer materialen accuraat kunnen worden gereconstrueerd.

In **hoofdstuk 5** bekijken we een alternatieve benadering van spectrale CT. We nemen aan dat er toegang is tot een spectrale detector die kan meten hoeveel röntgenstraling per energie door elk materiaal wordt opgenomen. Als deze spectra bekend zijn voor een scala aan materialen die mogelijk in het object voorkomen (resultierend in een ‘referentietabel’), kan dit als hulpmiddel worden gebruikt in een spectraal CT algoritme. We ontwikkelen een dergelijk algoritme en in een reeks experimenten tonen we niet alleen aan dat het robuust is, maar ook dat het betere resultaten kan opleveren dan huidige toonaangevende spectrale CT algoritmes.

Welbeschouwd worden er in dit proefschrift methodes voorgesteld voor het verbeteren van industriële processen, met specifieke aandacht voor de toepassing van voedselinspectie. De methodes maken gebruik van deep learning en spectrale röntgenbeeldvorming. De voorgestelde werkmethode om foreign objects te detecteren is toepasbaar in fabrieken, en is uitbreidbaar met de andere methodes die in dit proefschrift worden voorgesteld en geanalyseerd. Desalniettemin verwachten we dat de individuele methodes ook in bredere zin toepasbaar zijn voor medische doeleinden (zoals bij CT-scans in ziekenhuizen), veiligheidsdoeleinden (zoals het scannen van bagage op vliegvelden) en een wijd spectrum aan andere gebieden.