



The Color of X-rays. Spectral Computed Tomography Using Energy Sensitive Pixel Detectors

E.J. Schioppa

Samenvatting

Het netvlies van het oog is niet gevoelig voor deze straling: het oog dat vlak voor het apparaat wordt gehouden ziet niks.

W. C. Röntgen, 1895.

Professor Röntgen noemde de straling “X-straling”, omdat, zoals hij zei: *kortheidshalve*, en waarschijnlijk om het te benadrukken, *lichamen reageren hetzelfde op X-straling als troebele media reageren op licht*. Behalve deze waarneming wist hij heel weinig over de aard van dit verschijnsel. Zelfs zo weinig dat hij er geen moeite mee had om zijn ogen vlak voor een bron te plaatsen, die behoorlijk krachtig is geweest, aangezien *een deel van de straling door 2 mm dik platinum heen kwam*. Tegenwoordig zijn we goed op de hoogte van de gevaren van deze X-straling, of Röntgenstraling, en stralingsbeschermingsdiensten werken hard om dergelijke voorvallen te voorkomen.

Professor Röntgen was de eerste die Röntgenstraling wilde detecteren met een energiegevoelige pixeldetector: het menselijk oog. Natuurlijk kon hij niks zien, omdat de retina totaal niet gevoelig is voor Röntgenstraling. De technologie die nodig is om pixeldetectors te maken die gevoelig zijn voor Röntgenstraling is 100 jaar later beschikbaar. Deze detectoren zijn gemaakt door een halfgeleidende pixelsensor te verbinden met een uitleeschip die energie gevoelig is. De detectoren kunnen worden gebruikt om gekleurde (de kleur correspondeert met de materiaalsamenstelling) Röntgenfoto's te maken.

Het principe van kleurherkenning op het netvlies is gebaseerd op de aanwezigheid van drie type “pixels”, de kegelveceptoren. Elk type receptor is gevoelig voor een andere golflengte. Het inkomende licht wordt gefilterd door

elke receptor en het beeld wordt ontleed op basis van drie kleuren (rood, groen en blauw, zie figuur 1a).

De pixelchips werken volgens een ander concept. De gebruikte pixelchips voor Röntgendetectoren zijn in staat om, op pixelniveau, het binnenkomende stralingsspectrum te scheiden in meerdere energieniveaus. In het netvlies worden er drie beelden in verschillende kleuren gemaakt, waarbij de ruimtelijke resolutie vermindert (één van de drie receptoren wordt gebruikt voor elk beeld), terwijl bij de pixel chips verschillende beelden tegelijk gemaakt kunnen worden, zonder verlies van ruimtelijke resolutie (figuur 1b).

We zijn in staat om meer “kleuren” te onderscheiden in Röntgenstraling dan in zichtbaar licht. Maar de vraag blijft: wat betekent kleur voor Röntgenstraling?

Zoals verschillende oppervlakten het zichtbare licht verschillend reflecteren, zo zijn verschillende materialen gekenmerkt door verschillende Röntgenstraling transmissie eigenschappen. Het spectrum van de Röntgenstraling dat de pixels van de detector bereikt, geeft dus informatie over het materiaal waardoor de straling is gegaan gedurende de reis van de bron naar de detector.

Tot voor kort ging deze informatie volledig verloren, omdat Röntgen detectoren alleen één integrale waarde konden meten. Dit was ofwel de totale afgegeven energie, of, recenter, het aantal fotonen (de intensiteit van de bundel). Spectroscopische Röntgen detectoren, daarentegen, hebben de mogelijkheid om het volledige energie spectrum te meten. Zelfs als de data op pixelniveau wordt opgeslagen, kunnen deze detectoren een beter idee geven van de materialen waaruit het monster bestaat, dan de Röntgenfoto's in grijstinten.

Informatie over het spectrum kan gebruikt worden om verschillende materialen in het monster te identificeren en om iets te zeggen over de distributie van deze materialen. Als elk materiaal een andere kleur krijgt toegewezen, leidt dit tot gekleurde Röntgendiagnostiek.

Alle technieken die 3D Röntgenfoto's maken en die daarbij gebruik maken van de informatie over het energie spectrum van de bundel, worden samen spectraal Computer Tomografie (CT). Spectraal CT is een relatief nieuw onderzoeksgebied, omdat energie gevoelige Röntgen detectoren pas recentelijk zijn verschenen.

De grootste uitdaging in spectraal CT is om antwoord te vinden op de volgende vraag:

Wat is de beste manier om een set van twee dimensionale Röntgenfoto's te verwerken, zodat er een gekleurde drie dimensionale Röntgenfoto

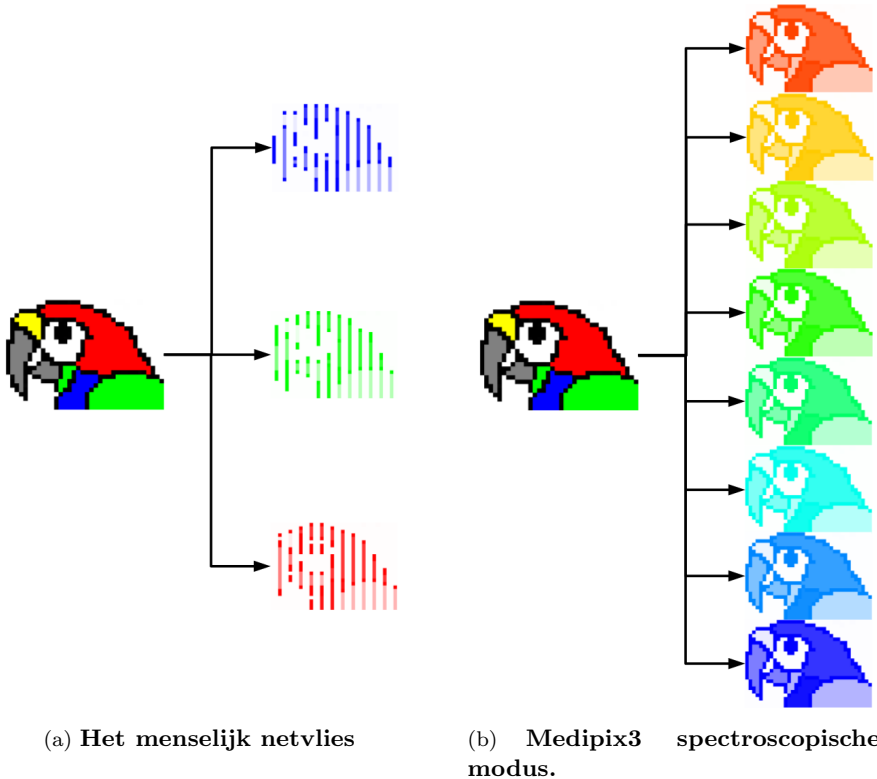


Figure 1: De ontleding van beelden in verschillende kleuren.

kan worden gemaakt?

Het doel van dit proefschrift is om deze vraag te beantwoorden voor een specifiek type detectoren: siliciumsensoren die verbonden zijn met de spectroscopische uitleeschips uit de Medipix familie. Om dit doel te bereiken moet er niet alleen een algoritme worden toegevoegd dat in staat is om de informatie over het energie spectrum te verwerken, maar moet er ook onderzocht worden wat de eigenschappen van de silicium sensoren zijn. Deze kennis van de sensoren is nodig om de detectorrespons toe te voegen tijdens de reconstructie.

Allereerst is er een kalibratiemethode ontwikkeld om de energieschaal van de detector te kunnen definiëren. Als monochromatische bron wordt fluorescentie gebruikt: karakteristieke straling die wordt uitgezonden door elementen als deze zijn geëxciteerd door de primaire bundel van de Röntgenbuis. Er is een model ontwikkeld om een efficiënte kalibratie op pixel niveau te bereiken. Dit is cruciaal om de verschillen tussen de pixels te kunnen corrigeren en om een gelijke respons te krijgen van de gehele detector.

Om te kunnen begrijpen hoe een inkomend spectrum van de Röntgenstraling verandert door de detector, moet de energierespons-functie van de sensoren bekend zijn. Om dit te bereiken wordt er in dit proefschrift gebruik gemaakt van een op metingen gebaseerde methode. Hierdoor is het mogelijk om onzekerheden in fysische constanten te vermijden en is het niet noodzakelijk om de configuratie van het elektrische veld te berekenen.

De meting van de detectorrespons-functie is gedaan met een testbundel met relativistische, geladen deeltjes en met een synchrotron testbundel. Geladen deeltjes zijn gebruikt om de transporteigenschappen van de sensor te bestuderen. Door de informatie over de energie te gebruiken, kan de afgeleverde energie worden per pixel. Deze informatie wordt gebruikt om de ontwikkeling van het ladingsprofiel als functie van de driftafstand af te leiden. De testbundel wordt dus gebruikt als microsonde om te kijken naar ladingsdiffusie op microscopisch niveau.

De informatie over het ladingsprofiel wordt gebruikt als een numerieke structuur voor de berekening van de detectorrespons-functie. De synchrotron testbundel is nodig om de parameters voor dit model vast te stellen. Dit wordt gedaan door de berekening te vergelijken met metingen. De energierespons-functie van de detector kan gemeten worden over een groot energiespectrum door gebruik te maken van monochromatischesynchrotron straling van verschillende energieën.

Met de energierespons-functie is het mogelijk om het gedetecteerde spectrum te berekenen, uitgaande van het spectrum dat wordt gegenereerd door de transmissie van een Röntgenbundel door een object. Deze stap is cruciaal voor de implementatie van een spectraal CT reconstructie-algoritme dat geschikt is voor het nemen van data met siliciumdetectoren gebaseerd op Medipix.

Om te bewijzen dat deze procedure werkt, wordt een algoritme afgeleid waarvoor een bestaande iteratieve methode wordt uitgebreid met de informatie over het spectrum. Op dit moment is het algoritme alleen geschikt voor een beperkt aantal geometrieën van het monster. Toch laten de resultaten niet alleen een voorbeeld van spectrale Röntgen CT zien, maar laten ze ook de voordelen van spectraal CT boven de conventionele CT zien. De kwaliteit van

de reconstructie verbetert door gebruik te maken van de informatie over het energie spectrum.

Om de implementatie van deze methode efficiënter te maken, is er een statistisch reconstructie algoritme ontwikkeld, op basis van de meest aannemelijke schatting. De eerste resultaten op gesimuleerde data laten de validiteit van deze methode zien en duiden aan dat het noodzakelijk is om deze methode verder te ontwikkelen om zo de volledige potentie van de Medipix chip (en andere vergelijkbare technieken) te kunnen benutten voor het maken van afbeeldingen met Röntgenstraling. Het algoritme is toegepast door gebruik te maken van methodes uit de hoge-energiefysica, waarbij grote hoeveelheden data met een statistische methode worden verwerkt, en toont hiermee aan hoe fundamenteel onderzoek gebruikt kan worden in toepassingen in andere velden.

Hoewel de resultaten alleen zijn afgeleid voor een specifiek type detector, gebruikt in een bepaalde toestand (een silicium sensor van $300\ \mu\text{m}$ dik, uitgelezen door een Medipix chip en met een 100 V bias) is dit een veelgebruikte configuratie en vormt de standaard voor het grootste gedeelte van de toepassingen. De resultaten, en voornamelijk de gebruikte methodes, hebben een algemenere validiteit. De eerste toepassingen in verschillende velden, ook voor medische toepassingen, zijn niet ver weg. In het algemeen wordt aangenomen dat spectraal CT een grote invloed zal krijgen op het gebied van Röntgendiagnostiek.

Enrico Junior Schioppa
Amsterdam
30 November 2014