

Digitaal speuren
naar degradaties

Het Lam in nullen en enen



Onderzoekers zien meer lagen dan ooit in een schilderij. Met *deep learning* brachten Gentse specialisten de scheurtjes en het verfverlies op het *Lam Gods* gedetailleerd in kaart. Dat leidde tot inzichten over eerdere overschilderingen, en zelfs tot nieuwe interpretaties.

Aleksandra Pizurica

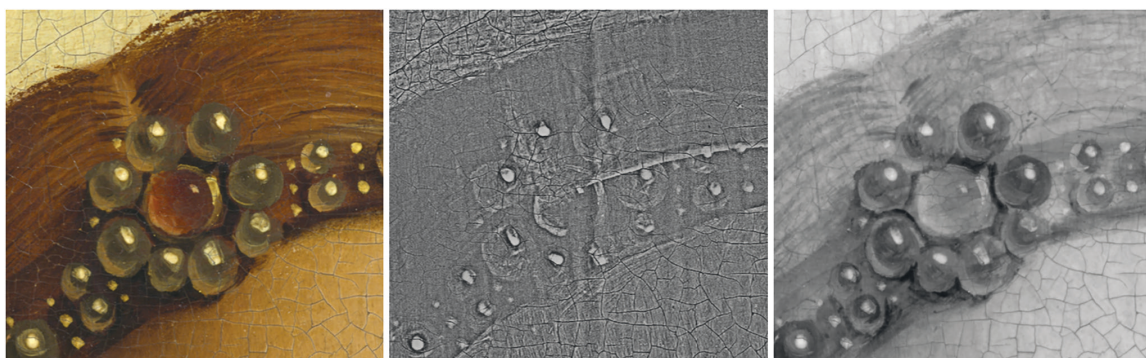
Door de jaren heen hebben onderzoekers massaal veel kunstwerken gedigitaliseerd. Ze scannen ze en brengen ze vervolgens op verschillende manieren in beeld. Dat gebeurt met 'gewone' optische camera's, maar ook met infrarood- en röntgenfoto's. Dikwijls worden die dan nog aangevuld met andere beeldvormingstechnieken, waaronder hyperspectrale beelden, röntgenfluorescentie en röntgendiffractie.

Met die beelden kunnen onderzoekers door de verf-lagen van een schilderij heen kijken. Het laat hen toe om interessante patronen bloot te leggen die anders onopgemerkt zouden blijven, zoals onder- of overschilderingen. En ze kunnen degradaties als scheurtjes veel nauwkeuriger in kaart brengen. Op die manier helpt de moderne beeldvormingstechnologie kunsthistorisch onderzoek en conserverings- en restauratiebehandelingen vooruit.

Beeldverwerkingstechnieken en machinaal leren toon-



Onderzoekers bestuderen overschilderingen met een 3D-microscop.



Een detail uit het paneel *Zingende engelen*. De scheurtjes variëren van dunne, haarfijne structuren tot bredere lijnen. Sommige scheurtjes zijn niet zichtbaar in het optische macrofotografiebeeld (links), maar wel in de röntgenfoto (midden) en het infraroodbeeld (rechts).

den al een enorm potentieel voor kunstonderzoek. Bijvoorbeeld om een schilderij te karakteriseren, vervalsingen te detecteren, een canvasstructuur te analyseren en om een schilderij virtueel te restaureren. Dat is ook gebeurd met het *Lam Gods*.

Zo'n tien jaar geleden stelde Ingrid Daubechies, de wereldvermaarde Belgische wiskundige die nu werkzaam is aan de Amerikaanse Duke University, een interdisciplinair team samen. Het team begon aan een uitgebreide digitale analyse van het beroemde schilderij (zie *Eos* 2012, nr. 6). Het team bood bijkomende ondersteuning bij het werk van restaurators Hélène Dubois (Koninklijk Instituut voor Cultureel Erfgoed, KIK-IRPA) en Bart Devolder (Princeton University Art Museum).

Bij de werkzaamheden letten we in het bijzonder op barsten (craquelé) en verfverlies (lacunes). We bedienden ons daarvoor van opkomende concepten van *deep neural networks*.

Vertakkende scheurtjes

Scheurtjes ontstaan in verschillende verflagen, naarmate de gebruikte materialen verouderen. Ze behoren tot de meest voorkomende en onvermijdelijke vormen van verwerking in oude schilderijen. Ze kunnen ook ontstaan doordat de houten panelen rond het schilderij krimpen en uitzetten. Dat komt op zijn beurt door schommelingen in de vochtigheidsgraad in de omgeving. De meeste vijftiende-eeuwse Vlaamse schilderijen op Baltische eik, inclusief het *Lam Gods*, hebben zulke scheurtjes.

Ouderdomsscheurtjes en scheurtjes die te wijten zijn aan mechanische stress hebben een impact op de hele structuur van de verflagen. Ze beïnvloeden dus ook de grondlaag en de verflagen erboven. Er is nog een andere vorm van craquelé. Scheurtjes kunnen zich ook vormen

als de technische uitvoering tijdens het schilderen te wensen overlaat. Anders dan ouderdomsscheurtjes ontstaat deze craquelé in slechts één enkele verlaag. Deze vertoont minder scherpe randen.

Het scheurtjesnetwerk kan vele patronen aannemen: van vrijwel rechthoekig tot cirkelvormig of eerder webvormig. In sommige gevallen verspreiden de scheurtjes zich in één enkele richting, soms vertakken ze zich als een boom of lijken ze bijna willekeurig.

Om kort te gaan: scheurtjes en het patroon waarin ze voorkomen hangen af van de materialen en de methodes die de kunstenaar heeft gebruikt. Dat betekent dat je door het scheurtjesnetwerk te analyseren de authenticiteit van een schilderij kan beoordelen. Of, algemener, dat je de structurele onderdelen van een schilderij op een niet-invasieve manier kan identificeren.

Een analyse van het craquelépatroon kan bovendien onthullen wat de oorzaken zijn van de degradatie van het verfoppervlak, wat zeer belangrijk is voor conservatiespecialisten. Lokale verschillen in het craquelépatroon kunnen verder ook overschilderingen en retouches aangeven.

Opletten met wimpers

Helaas is scheurtjes detecteren in het *Lam Gods* een zeer uitdagend proces. Dat komt doordat ze sterk variëren – scheurtjes komen voor als haarfijne structuren en evengoed als grotere barsten. Verder nemen ze diverse kleuren aan, denk aan donkere scheurtjes op een heldere achtergrond en omgekeerd. Tot slot zijn er dikwijls grote gelijkenissen met doelbewust geschilderde details, zoals oogwimpers en haren.

De meeste manieren om scheurtjes te detecteren zijn semiautomatisch: een gebruiker moet manueel onderdelen aanduiden op het schilderij waar scheurtjes voor-

komen. Hij stelt ook parameters van een algoritme in, zoals kleuren, lengtes, breedtes of andere vormenmerken. Het algoritme zoekt daarna zelf verder in het schilderij.

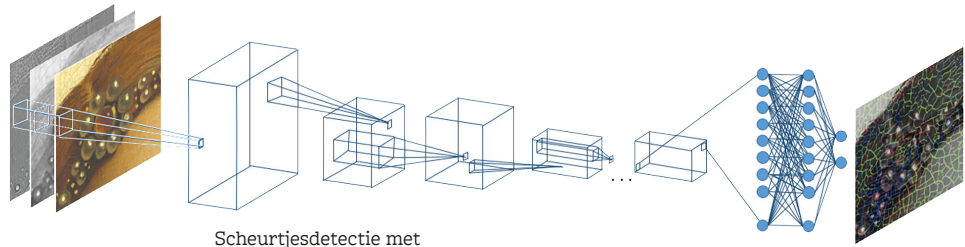
Zulke methodes zijn dikwijls gebaseerd op zogeheten binaire morfologische operaties. Het beeld wordt eerst naar een grijschaalvariant omgezet, en dan op basis van een drempelwaarde naar een binair beeld getransformeerd. Daarop worden wiskundige technieken toegepast om geometrische structuren te analyseren ten opzichte van hun grootte, vorm, connectiviteit en andere kenmerken. Geavanceerdere methodes combineren morfologische operaties met andere beeldfilters voor lijndetectie, wat de detectie nauwkeuriger maakt of beter bestand tegen ruis.

Aan die traditionele manieren hangen beperkingen vast. Ze zijn immers afhankelijk van de beeldkenmerken die de ontwikkelaar van het algoritme heeft gedefinieerd, en dat brengt problemen met zich mee. De parameters moeten bijvoorbeeld meestal handmatig ingesteld of aangepast worden voor elke beeldmodaliteit en elk schilderij. Bovendien zijn de vooraf gekozen beeldkenmerken dikwijls nogal beperkend. Ze laten niet toe om de data optimaal te benutten. Meestal worden methodes op elke beeldmodaliteit afzonderlijk toegepast en dan pas gecombineerd. Maar daarmee gaat belangrijke informatie verloren.

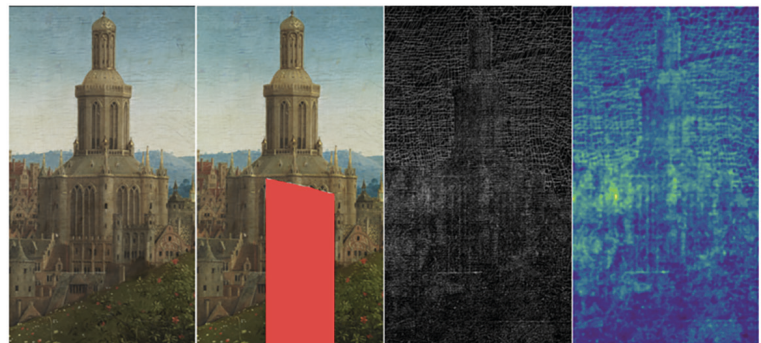
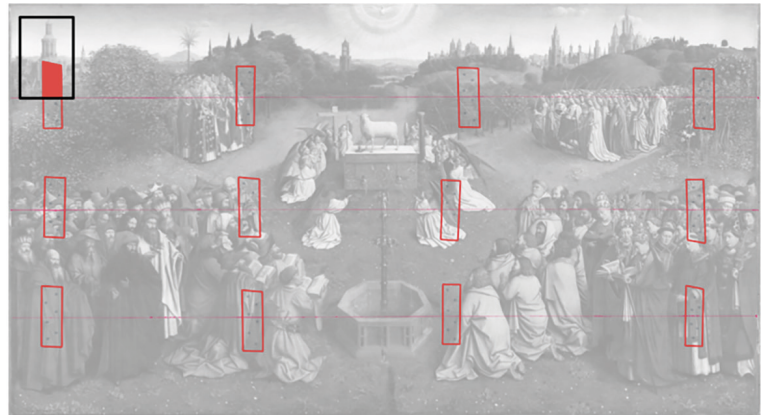
Onleesbare inscripties

Het vraagt dus bijzondere methodes om scheurtjes efficiënt te detecteren. Wij gebruikten technieken die diepe neurale netwerken aanwenden om zelf de onderscheidende kenmerken van scheurtjes te leren detecteren. Er zijn dus geen handmatige, vooraf gedefinieerde kenmerken nodig. Dat maakt het hele detectieproces algemener én krachtiger.

Het leerproces kan je begrijpen als draaien aan vele (soms miljoenen) knoppen. In het begin worden die willekeurig ingesteld. Een eerste resultaat geeft voor alle beeldpixels van een gedigitaliseerd schilderij aan hoe groot de kans is dat ze tot bepaalde klassen behoren. Door die resultaten te vergelijken met de gewenste resultaten van een aantal voorbeelden, wordt een foutsignaal berekend. Dat wordt door het neurale netwerk gestuurd, waarna aan de knoppen wordt gedraaid tot het verkregen resultaat en het gewenste resultaat overeenstemmen. Een getraind netwerk kan continu blijven leren uit nieuwe voorbeelden en daardoor steeds betere resultaten



Scheurtjesdetectie met een diep neurale netwerk.



Boven: Voormalige houten versterkingen (rood) aan de achterkant van het centrale paneel *Aanbidding van het Lam*. De zwarte rechthoek geeft een interessegebied aan voor het inspecteren van scheuren. Onder: Het versterkingsgebied in rood; de scheurkaart en de dichtheid van de scheurtjes, van laag (blauw) tot hoog (geel).



Scheurtjesdetectie en virtuele restauratie van het boek uit het paneel *Heilige Maagd*.

leveren naargelang het meer in gebruik is.

We ontwikkelden een specifieke *deep learning*-architectuur die in staat is om effectief en nauwkeurig scheurtjes in schilderijen te detecteren aan de hand van multimodale beelden. Ons *deep learning*-netwerk gebruikt drie zogeheten convolutionele lagen en werd getraind met manueel gelabelde beelden uit verschillende details van het *Lam Gods*. Voor zover wij weten, was ons onderzoeksteam het eerste dat resultaten van diep leren voor scheurtjesdetectie en verfverliesdetectie in schilderijen publiceerde.

De methode toonde zich op meerdere vlakken nuttig. De conservators van het KIK-IRPA waren geïnteresseerd in de verticale houten versterkingen die restaurators in de negentiende eeuw op de achterkant van het paneel hadden aangebracht. Ze wilden weten hoeveel die de vorming van scheuren aan de voorkant hadden beïnvloed. Vooral omdat de houtnerf van deze blokken verticaal loopt – dat wil zeggen in de tegenovergestelde richting van het originele paneel – viel dergelijke schade te verwachten.

De analyse wees inderdaad op een enigszins verhoogde scheurdichtheid in de gebieden rond de scherpe hoeken van de blokken. Op een bepaald moment moeten de blokken dus spanningen in de verflagen hebben veroorzaakt. De blokken werden vervangen door bevestigingen waarbij het graan parallel loopt met de richting van het hout in het paneel. Zo werden verdere spanningen en lokale vervormingen van de steun voorkomen.

De scheurtjesdetectie met virtuele restauratie hielpen verder om sommige inscripties in het schilderij te ontcijferen en interpreteren. Een uitdagend voorbeeld is het boek van het paneel *Annunciatie aan Maria*. Onze techniek vulde gedetecteerde scheurtjes automatisch op, en respecteerde daarbij de lokale en globale beeldcontext. Na die virtuele restauratie werden de inscripties inderdaad veel duidelijker. Onderzoekers werken nog aan de precieze ontcijfering.

Onder het vernis

Naast scheurtjes hebben oude schilderijen te lijden onder verfverlies. Stukken verf kunnen bijvoorbeeld afbreken na een stoot tegen het doek. In olieverfschilderijen worden zulke lacunes vaak overschilderd door restaurators. Bij een moderne behandeling verwijderen conservators oud vernis, samen met overschilderingen. Dat legt de lacunes opnieuw bloot.

Detectie van dergelijke verfverliesgebieden is vereist om de totale beschadigingen van een schilderij te kunnen inschatten. Dat is noodzakelijk voor documenta-

Scheurtjes kunnen heel erg lijken op doelbewust geschilderde details, zoals oogwimpers en haren

tiedoeleinden, maar het is ook een cruciale stap voor een eventuele virtuele restauratie, die als simulatie kan dienen voor de werkelijke restauratie.

Met bestaande commerciële middelen is de restaurator ofwel verplicht om minutieus zelf beschadigde zones aan te duiden – een tijdrovende taak – ofwel de zones slechts ruw te annoteren. Een vijftal jaar geleden vroeg restaurator Bart Devolder ons of wij een automatische methode konden ontwikkelen voor dat saaie en tijdrovende werk.

Tot onze verbazing toonde de literatuurstudie geen enkel gepubliceerd werk rond automatische detectie van verfverlies in schilderijen. In tegenstelling tot crackle-detectie, die een ruime belangstelling heeft genoten in de literatuur, werd de detectie van lacunes weinig behandeld.

Op het eerste gezicht leek het probleem eenvoudiger dan scheurtjesdetectie. Al snel beseften we dat dat dikwijls niet het geval is. In digitale kleurbeelden kan verfverlies namelijk dezelfde kleur vertonen als sommige geschilderde gebieden. Daarom moesten we ook andere beeldmodaliteiten gebruiken. En omdat de types van effectief opgenomen beelden verschillen van schilderij tot schilderij, was het ook belangrijk dat we een generieke aanpak ontwikkelden. Een aanpak op basis van diepe neurale netwerken bleek ook hier erg flexibel en efficiënt te zijn.

We zijn enthousiast over de resultaten. Ze tonen dat computertechnieken een waardevolle ondersteuning bieden bij de kunsthistorische analyse, conservatie en restauratie van schilderijen. De opkomende concepten van *deep learning*, samen met beeldverwerkingstechnieken, leiden tot efficiënte en nauwkeurige detectie van scheurtjes en verfverlies. En uiteindelijk tot volledig automatische virtuele restauratie. ■

Aleksandra Pizurica is professor aan de Group for Artificial Intelligence and Sparse Modelling (GAIM) van de UGent. Dit artikel kwam tot stand in samenwerking met Shaoguang Huang (UGent-GAIM), Laurens Meeus (UGent-GAIM), Roman Sizyakin (UGent-GAIM), Maximiliaan Martens (UGent) en Bruno Cornelis (VUB-ETRO).