

SmartWoodID

Smart classification of Congolese timbers: deep learning techniques for enforcing forest conservation

Contract - B2 / 202 / P2 / SmartWoodID

SAMENVATTING

Context

Een aanzienlijk deel van de houthandel is nog steeds illegaal en illegale houtkap is de meest winstgevende misdaad inzake biodiversiteit. Het VN-Milieuprogramma schat dat illegale houtkap en de daarmee gepaard gaande houthandel jaarlijks een waarde vertegenwoordigen van 50 tot 152 miljard dollar. Illegale houtkap brengt een hoog risico met zich mee van onherstelbare schade aan ecosystemen als gevolg van de exploitatie van zeer gewilde, soms beschermde, soorten. Er is wetgeving inzake hout (CITES, FLEGT, EUTR), maar de implementatie en handhaving vormen een uitdaging. België heeft momenteel de negatieve connotatie van 'het knooppunt van de illegale houthandel'. 27,5% van de totale import van primaire tropische houtproducten uit de EU28 wordt via België geïmporteerd (voornamelijk via de haven van Antwerpen). Houtidentificatie is een belangrijk proces in de handhaving, waarbij gecontroleerd moet worden of de zending overeenkomt met de producten die op de begeleidende documenten vermeld staan. Daarom is er een groeiende vraag naar houtidentificatietools die door wetshandhavers kunnen worden gebruikt.

Het xylarium van Tervuren is de Belgische overheidscollectie van houtmonsters. Het is een internationaal gerenommeerd onderdeel van het federaal wetenschappelijk erfgoed, ondergebracht bij het Koninklijk Museum voor Midden-Afrika, en omvat referentiemateriaal van 13.000 verschillende botanische soorten. Een van de groeiende actuele functies van de collectie is het ondersteunen van forensisch onderzoek door middel van verificatie van de identiteit van een soort. De meest gebruikte techniek voor houtidentificatie is een houtanatomische beoordeling. Machine learning-methoden kunnen het houtidentificatieproces vergemakkelijken voor niet-specialisten. Houtsoorten hebben karakteristieke kenmerken bij verschillende microscopische vergrotingen. Sommige van deze kenmerken zijn echter zeer variabel, wat de ontwikkeling van klassieke dichotomie-identificatiesleutels die door niet-specialisten kunnen worden gebruikt, belemmert. Bovendien moeten veel kenmerken die op houtoppervlakken worden waargenomen, worden opgevat als artefacten (scheuren, sporen van mechanische schade, schimmels en insectenaanvallen) en zijn ze voor het ongetrainde oog niet altijd gemakkelijk te onderscheiden van diagnostische kenmerken. Het xylarium van Tervuren biedt de meest complete verzameling referentiemateriaal voor de ontwikkeling van nieuwe houtidentificatiemethoden.

Het SmartWoodID project beoogt om een deel van het houtidentificatieproces te automatiseren door kunstmatige intelligentie toe te passen voor de analyse van anatomische beelden van houtsoorten uit de Democratische Republiek Congo. De boomflora van Centraal-Afrika omvat 3013 soorten, waarvan er 27 behoren tot de klasse 1 commerciële houtsoorten van de DRC en daadwerkelijk intensief worden gekapt en verhandeld. 20 boomsoorten behoren tot klasse 2 (met een potentieel grote commerciële waarde), 44 tot klasse 3 (worden beschouwd als gepromoot) en 879 tot klasse 4 (de commerciële waarde is nog niet bekend). Het project heeft xylariummonsters van alle soorten uit de vier klassen gebruikt en profiteerde van de kracht van moderne deep learning-methoden. Het project vertrouwde op deskundige anatomische beschrijvingen van hout, die dienen als geannoteerde trainingsdata voor de ontwikkeling van de software. Het project was uniek vanwege het grote aantal Afrikaanse soorten, de toepassing van deep learning en een database met gestandaardiseerde beschrijvingen die online beschikbaar is. In een eerste werkpakket zijn expertannotaties gemaakt van microscopische en mesoscopische beelden van dwarsoppervlakken van 1000 Congolese houtsoorten. In Werkpakket 2 werd een beeldverwerkingspijplijn ontwikkeld voor semi-automatische annotatie van microscopische en mesoscopische houtdoorsneden. Werkpakket 3 richtte zich op de productie van een gebruiksvriendelijke interface.

Doelstellingen

Het SmartwoodID-project was gericht op het verbeteren van het analyseproces van houtsoorten uit de Democratische Republiek Congo (DRC), een groot land met veel soorten waar identificatie een lastige opgave is, wat regelmatig leidt tot wetsovertredingen. De algemene ambitie was om de mogelijkheden te verkennen voor het automatiseren van de identificatie van houtsoorten door machine learning toe te passen, met behulp van grote datasets met macroscopische kenmerken en optische scans met hoge resolutie van kopshoutoppervlakken.

Het project had drie onderzoeksdoelstellingen:

- **Onderzoeksdoelstelling 1:** Het samenstellen van een database met flatbed scans van kopshoutoppervlakken en macroscopische kenmerken van houtsoorten uit de Democratische Republiek Congo.
- **Onderzoeksdoelstelling 2:** Het ontwikkelen van geïllustreerde classificatiesleutels voor houtidentificatie in Congo.
- **Onderzoeksdoelstelling 3:** Het ontwikkelen van een geïllustreerde classificatiesleutel met behulp van machine learning.

Conclusies

De SmartWoodID-beeldendatabase biedt nieuwe mogelijkheden voor de ontwikkeling van identificatiesystemen gebaseerd op de herkenning van diagnostische anatomische houtkenmerken. Deze database is uniek omdat ze een groot aantal Afrikaanse boomsoorten en lagere taxa omvat waarvan de macroscopische structuur wordt gevisualiseerd en beschreven. De Houtcollectie van Tervuren biedt dit dankzij haar erfoeged van het verzamelen van betrouwbaar referentiemateriaal gedurende meer dan een eeuw. In totaal is 56% van alle boomsoorten en lagere taxa in de Democratische Republiek Congo momenteel beschikbaar in Tervuren. De eerste versie van de SmartWoodID-beeldendatabase die hier wordt gepresenteerd, bestaat uit een set van 954 houtsoorten en lagere taxa die voorkomen in de Congolese bossen. De database richt zich op de macroscopische anatomische kenmerken die kunnen worden aangetroffen op een hoge-resolutiescan van het kopshoutoppervlak. De database houdt rekening met onregelmatigheden en natuurlijke variabiliteit, door gebruik te maken van meerdere exemplaren met grote kopshoutoppervlakken. Dit maakt het een robuuste referentiedatabase voor onderzoek naar hout in het algemeen en zal de ontwikkeling van instrumenten mogelijk maken ter ondersteuning van de rechtshandhaving in de strijd tegen illegale houtkap.

Het onderzoek naar identificatiesleutels (WP2) benadrukt de inherente beperkingen van de 31 door experts gedefinieerde, toegankelijke macroscopische dwarsdoorsnedekenmerken voor taxonomische identificatie van een breed scala aan houtsoorten, zoals die in het Congobekken. Hoewel de classificatienauwkeurigheid verbetert bij hogere taxonomische rangen, blijven voorspellingen op genus- en familieniveau beperkt vanwege overlappende anatomische kenmerken tussen taxa. Desondanks behouden macroscopische dwarsdoorsnedekenmerken diagnostische waarde wanneer ze worden toegepast binnen nauwere taxonomische scopes. De succesvolle discriminatie van *Pterocarpus*-soorten – ooit beschouwd als zijnde niet onderscheidbaar zonder laboratoriummethoden – toont aan dat gemakkelijk waarneembare anatomische kenmerken identificatie op soortniveau in het veld mogelijk kunnen maken. Verdere verbeteringen in diagnostische nauwkeurigheid kunnen worden bereikt door de integratie van hoge-resolutie, grootschalige beeldvorming en multi-specimen datasets. Deze benaderingen leggen intraspecifieke anatomische variabiliteit effectiever vast dan conventionele methoden met één monster en maken de extractie van kwantitatieve anatomische informatie op een fijnere schaal mogelijk. De integratie van dergelijke verbeteringen biedt veelbelovende mogelijkheden om zowel de taxonomische resolutie als de betrouwbaarheid van de classificatie te verhogen. Praktische beperkingen in veldomgevingen – zoals tijdsdruk en beperkte apparatuur – vereisen echter alternatieve strategieën voor betrouwbare houtidentificatie in situ. Voortdurende vooruitgang zal afhangen van de ontwikkeling van CV-gebaseerde identificatiesystemen, met name CNN's, die macroscopische beelden direct kunnen verwerken voor nauwkeurige en snelle classificatie. Deze modellen bieden een sterk potentieel voor schaalbare, efficiënte en gebruiksklare houtverificatietoepassingen.

De resultaten van WP3 laten zien dat CNN's, zoals de toegepaste Xception-architectuur, succesvol kenmerken kunnen extraheren voor het classificeren van beeldvlakken van geschuurde dwarsdoorsneden om verschillende houtsoorten op genusniveau te classificeren en onderscheid

te maken tussen anomalievrij en afwijkend hout. De prestaties op de testgegevens varieerden voor individuele geslachten, waarbij sommige profiteerden van training op anomalievrije beelden, terwijl voor andere geslachten, zoals *Cynometra*, een hogere recall werd waargenomen voor het model dat was getraind op afwijkende beelden. Grad-CAM-analyse toonde de voorkeur van het model aan voor gebieden op vlakken met onbedekt anatomisch houtweefsel, wat het belang van een heldere houtanatomie bij het trainen van CNN's voor houtidentificatie onderstreept. Dit zou CNN's in staat kunnen stellen diagnostische patronen effectiever vast te leggen, wat op zijn beurt zou leiden tot een betere discriminatie tussen houtsoorten, zelfs bij toepassing op afwijkende exemplaren in het veld. De toevoeging van afwijkende vlakken had een beperkte impact, maar verbeterde de prestaties op afwijkende vlakken subtiel. De bevindingen suggereren daarom dat CNN's (zoals Xception) de hoogste vaardigheid in houtclassificatie vertonen wanneer ze getraind worden op anomalievrije beelden, waardoor deze aanpak zeer effectief is voor de ontwikkeling van CV-gebaseerde houtidentificatiemodellen voor inzet in het veld. Dit toont het potentieel van deep learning voor geautomatiseerde identificatie van houtgeslachten aan. De resultaten benadrukken dat, hoewel alle classificatiemodellen vergelijkbare onderliggende patronen vastleggen, CNN's beter presteren dan identificatiesleutels op de 31 macroscopische cross-sectionele IAWA-kenmerken vanwege hun vermogen om onderscheidende beeldkenmerken te extraheren zonder afhankelijk te zijn van vooraf gedefinieerde descriptors. Prestatietrends over verschillende taxonomische scopes benadrukken het belang van diversiteit in trainingsdata, aangezien modellen die getraind zijn op bredere datasets grotere generalisatiemogelijkheden vertonen in vergelijking met modellen die uitsluitend getraind zijn op commercieel hout.

Naast standaard multiclass-classificatie-CNN's bieden CNN-benaderingen voor *object re-identification* waardevolle alternatieven, met name in forensische contexten waar identificatie minder kritisch kan zijn dan het uitsluiten van bepaalde houtsoorten. De binaire verificatiemethode toont in dit opzicht sterke prestaties, hoewel de effectiviteit wordt beperkt door rangschikkingsbeperkingen en rekenvereisten. *Embedding*-gebaseerde heridentificatie presteert, hoewel computationeel efficiënt, ondermaats in deze studie, wat suggereert dat verbeterde *mining* strategieën en verliesfuncties de betrouwbaarheid ervan zouden kunnen verhogen. Bovendien levert *object re-identification* informatie op over gelijkenis met specifieke referentiemonsters, in plaats van een directe voorspelling van klassen (bijvoorbeeld genera in deze studie), wat waardevolle informatie oplevert voor forensisch onderzoekers.

De resultaten van een geïntegreerde sleutel met behulp van CV en de 31 door experts gedefinieerde kenmerken tonen aan dat hoewel de integratie van door experts gedefinieerde macroscopische anatomische kenmerken matige verbeteringen kan opleveren in CNN-gebaseerde genusvoorspellingen, deze voordelen sterk afhankelijk zijn van zowel de specifieke genera als de diepte van de toegepaste herrangschikking. De algehele resultaten bevestigen dat CNN-modellen op zichzelf al aanzienlijke taxonomische informatie coderen, waarschijnlijk vanwege hun training in uitdagende diagnostische vergelijkingen die verder gaan dan traditionele anatomische beschrijvingen. Cruciaal is dat herrangschikking binnen de top twee tot vijf CNN-voorspellingen de meest consistente prestatieverbeteringen biedt op het gebied van nauwkeurigheid, precisie en recall – vooral bij de top drie drempelwaarden. Buiten dit bereik nemen de prestaties af als gevolg van misclassificaties die worden geïntroduceerd door het

overmatig benadrukken van zwakke of misleidende anatomische kenmerken. Deze bevinding ondersteunt het beperkte maar strategische nut van macroscopische dwarsdoorsnede-anatomie van hout voor het verfijnen van identificaties. Vanuit het perspectief van veldtoepassingen, met name in de context van houtverificatie aan de frontlinie, zijn de implicaties tweeledig. Ten eerste biedt het CNN-model een snelle en toegankelijke methode voor identificatie op genusniveau, die in de meeste gevallen al goed presteert. Ten tweede moeten verfijningsmethoden zoals herrangschikking selectief worden toegepast, aangezien willekeurig gebruik – met name op beschermde taxa – de terugroepactie kan verminderen en het risico vergroot dat houtsoorten met hoge prioriteit, zoals Khaya, over het hoofd worden gezien.

Toekomstig onderzoek zou de beperkingen van *embedding*-gebaseerde modellen moeten onderzoeken met behulp van de huidige stand van de techniek om een krachtige aanpak te bieden voor geautomatiseerde houtidentificatie. Deze modellen zouden moeten worden onderzocht in hybride studies die meerdere diagnostische datamodaliteiten integreren – macroscopische beelden, microscopische houtanatomie en chemische vingerafdrukken – om de classificatienauwkeurigheid te verbeteren en identificatie met een scherpere taxonomische resolutie mogelijk te maken. Naarmate de wereldwijde inspanningen om illegale houtkap te bestrijden en duurzame handelsregels te handhaven, intensiveren, zal de ontwikkeling van AI-gestuurde houtidentificatie essentieel zijn voor het versterken van forensische capaciteiten en het waarborgen van verantwoord beheer van hulpbronnen.

Sleutelwoorden

- Houtanatomie
- Houtidentificatie
- Macroscopische anatomische studie van hout
- Dwarsdoorsnede
- Computer Vision-gebaseerde houtidentificatie
- Object re-identification
- Gradient-weighted class activation mapping