

AI and Mathematics (AIM)

Het belang van wiskunde voor het Nederlandse AI onderzoek

De afgelopen 10 jaar heeft AI ons leven veranderd, en de komende jaren zal het ons leven nog veel meer veranderen - AI wordt wel gezien als de belangrijkste technologie voor de komende decennia. AI is bij uitstek een multidisciplinaire technologie die wetenschappers uit een grote variëteit aan onderzoeksgebieden verbindt, van gedragswetenschap en ethiek tot wiskunde en informatica. Zonder tekort te willen doen aan het belang van die variëteit, willen we met dit pamflet de bijdrage van de wiskunde aan het Nederlandse AI onderzoek benadrukken. Met een heldere visie op waar de wiskunde een bijdrage kan leveren aan AI willen we wiskundigen faciliteren om het gesprek aan te gaan met onderzoekspartners vanuit andere wetenschapsgebieden.

Wiskundige AI in Nederland is heel succesvol. Verschillende thema's waarin de wiskunde een grote rol speelt, worden genoemd in recente AI onderzoekagenda's en onderzocht in grote onderzoeksprogramma's (responsibility, transparancy, generalizability, explainability). Wij onderschrijven het belang van deze thema's volledig en willen vanuit de wiskunde een bijdrage leveren aan consortia die deze onderzoeksuitdagingen aangaan. Naast onderzoek in multidisciplinaire consortia blijft fundamenteel wiskundig onderzoek belangrijk in de AI, als basis voor nieuwe ontwikkelingen op de langere termijn. In de begindagen van de AI lag veel nadruk op theoretische informatica en logica, intussen zijn veel meer soorten wiskunde van belang: onder andere wiskundige statistiek, speltheorie, grafentheorie en dynamische systemen. Vaak zitten de grootste uitdagingen en kansen op het snijvlak van verschillende gebieden, en deze snijvlakken zijn ook in de wiskunde vaak nog onontgonnen terrein. Excellent wiskundig onderzoek kan en moet een grote rol spelen in het Nederlandse AI onderzoek van de toekomst.

We illustreren dit aan de hand van drie belangrijke rollen van wiskunde in de AI: als basis voor het ontwerp van AI methoden, als basis voor analyse en begrip van AI methoden en direct bij de toepassing van AI methoden.

Wiskunde en het ontwerp van AI methoden

Tegenwoordig wordt bij succesvolle AI vaak aan deep learning gedacht, het leren uit grote hoeveelheden data met behulp van enorme neurale netwerken, met succesvolle toepassingen in spraak- en beeldherkenning. Deep learning is ontstaan door briljante intuïties en gegroeid door intensieve trial-and-error engineering en het gebruik van enorme hoeveelheden data; wiskunde speelde tot voor kort een bescheiden rol. Hierdoor raakt wellicht ondergesneeuwd dat wiskundige concepten en methoden de basis vormen van zo'n beetje alle andere succesvolle methoden en innovaties in de AI: support vector machines, kernel methods, boosting (state-of-the-art methodes voor machine learning als er weinig data is), Bayesian learning, causaal leren en redeneren, graphical models (cruciaal voor explainable AI): allemaal even succesvol als wiskundig van aard. Ook hele recente ontwikkelingen op het belangrijke gebied van machine learning en

Geometric Deep Learning

Dit veld richt zich op het aanbrengen van geometrische structuur in leersystemen om deze te verbeteren of juist mogelijk te maken voor nieuwe datastructuren. Groepen en representatietheorie kunnen bijvoorbeeld worden ingezet om symmetrieën in data en problemen te benutten waarmee generalisatie wordt bevorderd en de zoekruimte voor nuttige functies (diepe netwerken) wordt gereduceerd.

Bekkers, E. J. (2019). B-Spline CNNs on Lie groups. *International Conference on Learning Representations*.

privacy leunen sterk op de wiskunde, waar het begrip differential privacy al in 2011 werd geïntroduceerd.

Onmisbare wiskundige onderwerpen aan de basis van al deze methoden zijn kansrekening, statistiek, optimalisatie- en approximatietheorie en logica. Maar ook heel andere vormen van wiskunde spelen een rol: zo zien we wiskunde in de vorm van differentiaalmeetkunde en PDEs terugkeren in het ontwerp van nieuwe, geavanceerde machine learning methoden. Gerichte grafen zijn van onmisbaar belang in onderzoek naar redeneren, argumentatie en onzekerheid. De studie van logica, speltheorie en dynamische systemen is nuttig voor het ontwerpen van kennis, sociale procedures en interactie.

Wiskunde en de analyse van AI methoden

Belangrijke toepassingen van deep learning zijn spraakherkenning (Siri, Alexa, Google Assistant), automatisch vertalen en beeldherkenning – waarbij AI in de medische beeldherkenning vaak beter scoort dan menselijke experts. Maar er is iets vreemds aan de hand: belangrijke AI methoden leveren ‘black box’ algoritmen op die niet zijn uit te leggen in domeinrelevante concepten. Ze zijn gebaseerd op extreem grote neurale netwerken die via een arbeidsintensief proces worden gevonden: er worden allerlei netwerken en parameterwaarden uitgetest, en in toepassingen waarin zeer grote hoeveelheden data beschikbaar zijn krijgt men uiteindelijk iets dat heel goed

werkt. Maar op de voor de hand liggende en belangrijke vraag ‘waarom?’ heeft het systeem geen antwoord. Er zijn paradoxale voorbeelden waarbij men sommige pixels in een plaatje van, zeg, een hond net een beetje verandert (een mens ziet het verschil niet), maar de computer denkt ineens dat het een kat is – en we begrijpen niet waarom de computer van mening verandert. Zonder fundamenteel begrip over dit soort zaken blijft de toepasbaarheid uiteindelijk beperkt – op toepassingen waar bijvoorbeeld weinig data beschikbaar is, waar een inschatting van betrouwbaarheid essentieel is (‘onzekerheidskwantificatie’) of waar data sterk ‘gebiased’ is, laten echt succesvolle AI toepassingen dan ook vaak vooralsnog op zich wachten. Wiskunde levert bij uitstek de middelen voor het bestuderen en begrijpen van de werking van AI methoden. In het bijzonder met methoden uit de analyse, de statistiek en de logica is het mogelijk om inzicht te krijgen in fundamentele mogelijkheden en beperkingen, theoretische prestatiegaranties, optimaliteit, en onzekerheidskwantificatie, uitlegbaarheid, verantwoordheid en sociaal gedrag. Juist door de wisselwerking tussen verschillende vormen van wiskunde en hun toepassing kan vooruitgang geboekt worden.

Sinds een aantal jaren begint het wiskundig onderzoek naar “waarom werkt deep learning zo goed?” op stoom te komen. Er komt ook steeds meer zicht op de fundamentele beperkingen, bijvoorbeeld voor uitlegbare algoritmen en verantwoord gedrag van AI systemen. Met haar sterke traditie in mathematische statistiek en logica kan Nederland hierin een grote rol spelen.

Bayesiaanse netwerken voor uitlegbaarheid

Bayesiaanse netwerken (BNs) gebruiken gerichte grafen om kansverdelingen compact en intuïtief te beschrijven. In het NWO Forensic Science onderzoeksprogramma is bijvoorbeeld onderzocht hoe en in hoeverre BNs kunnen worden ontworpen en uitgelegd voor de analyse van moordzaken. Belangrijke vraag voor de AI is hoe met BNs begrijpelijke causale structuren geleerd kunnen worden uit data. Dit is een veld waarin essentiële bijdragen worden geleverd vanuit allerlei verschillende disciplines, en waarin de achterliggende wiskunde de gemene deler is die synergie creëert en helpt om spraakverwarring te voorkomen.

Mooij, J.M., Magliacane, S., Claassen, T. (2020). Joint Causal Inference from Multiple Contexts. *Journal of Machine Learning Research* 21(99):1-108

Een andere belangrijke vraag is waarom AI systemen soms zulke enorme hoeveelheden energie gebruiken in vergelijking met de menselijke hersenen. Een fundamentele theoretische vraag die daarbij hoort is bijvoorbeeld of een continue stroom data alternatieven voor digitaal rekenen nodig heeft (bijvoorbeeld neuromorphic computing).

Wiskunde en de toepassing van AI methoden

In de toegepaste wiskunde is er een lange traditie van de transfer van wiskundige methoden naar concrete toepassingen. AI methoden worden in deze context steeds vaker gebruikt, in een veelheid van toepassingen. Daarbij worden vaak ideeën en methoden uit meerdere gebieden gecombineerd. Eén voorbeeld is causaal redeneren, vaak gebaseerd op Bayesiaanse netwerken. De theorieontwikkeling is gegrond in de wiskundige AI voor het correct modelleren van redeneren met onzekerheid en bleek later toepasbaar in tal van andere gebieden. Zo is causaal redeneren onmisbaar voor efficiënte rekenmodellen voor genetische data en wordt het intensief toegepast in onderzoek naar nieuwe medische behandelingen.

Waarom werkt Deep Learning?

Met behulp van technieken uit de statistiek en de approximatietheorie is het mogelijk om beter te begrijpen in welke situaties Deep Learning werkt en wat de optimale architectuur van diepe netwerken is. Zo blijkt dat, ondanks het enorme aantal parameters, de 'effectieve complexiteit' van neurale netwerken vaak beperkt is, hetgeen verklaart dat er niet al te veel 'overfitting' plaatsvindt.

Schmidt-Hieber (2020). Nonparametric regression using deep neural networks with ReLU activation function. *Annals of Statistics, Volume 48, Number 4, 1875-1897, 2020 (with discussion)*.

AIM for the best

De komende jaren wordt er veel geïnvesteerd in de ontwikkeling en toepassing van AI in Nederland. Wiskundig AI onderzoek kan een grote rol spelen in vele toepassingen, en is essentieel voor het leggen van een solide basis voor de toekomst van AI.

Het AIM netwerk

Het AIM netwerk verenigt Nederlandse onderzoeksgroepen die onderzoek naar AI doen waarin wiskunde een grote rol speelt. Deelnemende organisaties met hun vertegenwoordigers:

- Peter Grünwald, trekker (CWI)
- Karen Aardal, trekker (TU Delft)
- Etienne de Klerk (Universiteit Tilburg)
- Johannes Schmidt-Hieber (Universiteit Leiden)
- Christoph Brune (Universiteit Twente)
- Eric Cator (Radboud Universiteit Nijmegen)
- Sjoerd Dirksen (Universiteit Utrecht)
- Joris Mooij (Universiteit van Amsterdam)
- Wil Schilders (TU Eindhoven)
- Bart Verheij (Rijksuniversiteit Groningen)
- Harry van Zanten (VU Amsterdam)
- Steven Kelk (Maastricht University)
- Ilker Birbil (Erasmus University Rotterdam)