

Signalling Games: hoe evolutie optimale strategieën selecteert

Reinhard Blutner Erik Borra Tom Lentz
Arnold Obdeijn Jasper Uijlings Reinier Zevenhuijzen

October 16, 2006

1 Filosofie en Empirie

Als filosofie de rechtvaardiging van kennis is, dan is één van de onderwerpen waar zij zich mee bezig kan¹ houden de empirie. Kan empirie echter ook filosofische principes rechtvaardigen? In ons onderzoek gebruiken we simulatie, een vorm van empirie, om een tot nu toe onbewezen² theorie uit de taal filosofie te testen.

Eén van de fundamenteën van theorieën over taal is een verklaring voor het ontstaan en de groei van taal. Omdat historisch onderzoek nauwelijks mogelijk is, zijn deze theorieën vrijwel niet te toetsen. Over het algemeen wordt aangenomen dat taal ontstaan is door het koppelen van signalen aan betekenissen en andersom. De vraag is alleen hoe dit gelukt is. Een taallose populatie kan immers geen afspraken maken over het ontwikkelen van een taal. Een individu kan wel een bepaald signaal (geluid) produceren in een bepaalde situatie. Dit signaal is dan zijn uiting van de situatie, maar deze "taal" is nog individueel. Zijn er wetmatigheden aan te wijzen in het ontstaan van een gemeenschappelijke taal?

Een voorbeeld van een wetmatigheid in taalontwikkeling is de regel van Horn.

1.1 Inleiding Horn-strategie

Mensen gebruiken de meest simpele signalen voor de meest gangbare boodschappen en meer complexe signalen voor meer vreemde boodschappen. Een voorbeeld:

- (1) Jan zingt een liedje
- (2) Jan produceert geluiden die lijken op een liedje

Bij de eerste zin denk je aan een normale situatie waarin iemand een liedje zingt. Bij de tweede zin krijg je het gevoel dat er iets vreemds aan de hand is. Waarom zou je immers een vreemde zin gebruiken voor een boodschap waar ook een normale zin voor bestaat? In het algemeen geldt voor communicatie de volgende regel:

Normale situaties worden verwoord met een simpele boodschap en
vreemde situaties met een meer complexe boodschap.

¹of moet

²maar aannemelijke

Deze regel is beschreven in (Horn, 1984) en staat bekend als *Horn's division of pragmatic labor* of ook wel als de Regel van Horn of de Horn-strategie.

Horn rechtvaardigt zijn regel op empirische gronden; hij heeft dit waargenomen. Het nadeel van empirische benadering is dat we maar weinig voorbeelden van taalontwikkeling kennen. Empirie ontleent kracht aan een veelheid van waarnemingen die met een theorie stroken. Geldt de regel van Horn altijd bij taalontwikkeling of is er sprake van toeval? Wij simuleerden een populatie die een taal ontwikkelt en kwamen zo tot een illustratie van Horn's *Division of Pragmatic Labour*.

2 Signalling Games

Het concept Signalling Games is bedacht door (Lewis, 1969). Er is een populatie van agents, die met elkaar communiceren. Goed communicerende agents krijgen punten en maken daarmee een grote kans om nageslacht te krijgen. Wij hebben een genetisch algoritme gemaakt dat zo'n Signalling Game implementeert. De communicatie is als volgt gemodelleerd: Er zijn twee rollen, zender en ontvanger:

- Een zender stuurt een boodschap die correspondeert met de *betekenis* die hij wil overbrengen.
- - De ontvanger interpreteert de boodschap; hij kent er een *betekenis* aan toe.

Voorwaarde voor goede communicatie is dat de *betekenis* in beide gevallen dezelfde is. Alleen dan begrijpt men elkaar.

De agents krijgen punten voor iedere boodschap die ze goed overbrengen c.q. interpreteren. Degenen met de meeste punten hebben de grootste kans om te overleven en om nageslacht te krijgen. Een agent wordt volledig gedefinieerd door zijn communicatiestrategie. Het enige wat hij doet is communiceren en dat is dan ook het enige wat belangrijk is voor zijn overleven en voor het krijgen van nageslacht. Het is een bilateraal spel: elke agent moet zowel zenden als ontvangen.

Het nageslacht van twee agents zal een communicatiestrategie hebben die een combinatie is van de strategieën van beide. Zo zou gemeenschappelijke taal ontstaan kunnen zijn, maar we zijn ons ervan bewust dat dit niet bewezen is en ook waarschijnlijk niet zal worden.

Het spel zelf is een versimpeling van menselijke communicatie:

- De agents kunnen zich in twee verschillende situaties bevinden: de *normale situatie* en de *afwijkende situatie*. In ons model zullen ze dan trachten respectievelijk de *normale betekenis* en de *afwijkende betekenis* uit te drukken.
- Agents kunnen twee verschillende signalen doorgeven: het *simpele signaal* en het *complexe signaal*.

Elke combinatie van betekenis en signaal is toegestaan. Daarmee zijn er dus 2 (betekenissen) $\times 2$ (signalen) = 4 zendstrategieën mogelijk en ook 4 ontvangstrategieën. Gecombineerd levert dit 4 (zendstrategieën) $\times 4$ (ontvangstrategieën) = 16 communicatiestrategieën.

Het spel verloopt als volgt: steeds komen twee agents elkaar tegen en communiceren met elkaar. Eén begint te praten. Hij bevindt zich eerst in de normale situatie, dus hij communiceert de normale betekenis met de volgens zijn strategie daarbij behorende vorm. De ander interpreteert dit signaal als de volgens zijn strategie daarbij behorende betekenis. Als dit inderdaad de bedoelde, normale betekenis is, dan krijgen beiden daarvoor een punt. Dan communiceert de zender de afwijkende betekenis en gebeurt hetzelfde. Vervolgens worden de rollen omgedraaid. Zo zijn per spel voor beide agenten vier punten te verdienen.

2.1 De representatie van een agent

Een agent wordt gerepresenteerd door een *bitstring* (een rij bits, oftewel nullen en enen). Deze bitstring stelt zijn communicatiestrategie voor. De bitstring van een agent met de Horn-strategie bijvoorbeeld, ziet er als volgt uit: 0101. De bits zijn nul voor simpel en één voor complex en de posities geven het volgende aan:

1. Het signaal dat voor de simpele betekenis wordt gebruikt
2. Het signaal dat voor de complexe betekenis wordt gebruikt
3. De betekenis die aan het simpele signaal wordt toegekend
4. De betekenis die aan het complexe signaal wordt toegekend

Deze bitstring is te zien als het genoom van de agent.

2.2 De selectie

Een selectieprocedure kiest steeds de agents uit die overleven en de agents die nageslacht krijgen. De kans op selectie is gebaseerd op het aantal punten van de agent, maar het is niet uitgesloten dat een agent met weinig punten overleeft en nageslacht krijgt, de kans is alleen klein.

Het aantal punten dat twee agents a en b krijgen, wordt bepaald door de som over de twee betekenissen i (dus de simpele en de complexe) te nemen, als volgt:

$$\text{Punten}(a) = \text{Punten}(b) = \sum \delta[H_b(S_a(i)), i] + [H_a(S_b(i)), i]$$

$$\delta(x, y) = 1 \text{ als } x = y, \text{ anders } 0.$$

$H_x(f)$ geeft voor een signaal f de interpretatie door agent x .

$S_x(m)$ geeft voor een betekenis m het signaal dat agent x daarvoor gebruikt.

2.3 Kruisingen (het ontstaan van nieuwe agents)

Er wordt een willekeurig punt uitgekozen in de bitstring. Daarna worden twee nieuwe agents, kinderen van twee ouders, gemaakt. Voor het ene kind geldt: de bits links van het punt komen van de ene ouder, de bits rechts van de andere. Voor het andere kind geldt: de bits rechts van het punt komen van de ene ouder, de bits links van de andere ouder.

2.3.1 Mutatie

Bij de geboorte van nageslacht kan mutatie optreden. Voor iedere bit is er een zeer kleine kans dat het verandert nadat het is bepaald uit de eigenschappen van de ouders. Deze kans is bijvoorbeeld 1/1000 en heet de *mutatieratio*. Uiteraard hebben we geëxperimenteerd met verschillende mutatieratio's.

2.4 Het convergeren van de populatie

Als een strategie binnen de populatie veel gebruikt wordt, dan is dat meestal gunstig voor de agents met die strategie, omdat die dan vaak goed begrepen zullen worden en vaak goed zullen begrijpen (vergelijk het met mensen: in Nederland is het handig om Nederlands te spreken, omdat veel mensen je dan begrijpen; in Japan doe je er beter aan om Japans te spreken). Onze verwachting is dat agents met die strategie veel nageslacht zullen krijgen, waardoor de populatie naar die strategie convergeert. Een definitie van convergentie bij genetische algoritmes is de volgende:

Een populatie is geconvergeerd als 95% van de populatie dezelfde strategie deelt.

Wij zijn van deze definitie afgeweken en hanteren de volgende definitie:

Een populatie is geconvergeerd als de meerderheid van de populatie de op dat moment meest optimale strategie deelt. De meerderheid is in te stellen, wij gebruikten waardes tussen 70 % en 100 %.

2.5 Stabiliteit van een strategie

Wij hanteren de volgende definitie van stabiliteit:

Een strategie is stabiel als een reeds aanwezige meerderheid van gebruikers van die strategie niet afgepakt kan worden door een andere strategie. Dit betekent dat convergentie naar een stabiele strategie onomkeerbaar is. Een stabiele strategie in ons evolutionaire spel is vergelijkbaar met een Nash-equilibrium. Een Nash-equilibrium is een concept uit de speltheorie, bedacht door de wiskundige John Nash. Twee spelers bevinden zich in een Nash-equilibrium als geen van beide spelers er beter op wordt door zijn acties te veranderen. In ons spel gaat het echter niet om de interactie tussen twee agents, maar om de interactie tussen alle agents. Bovendien kunnen spelers zelf niets veranderen aan hun acties. Dus eigenlijk bevindt de gehele populatie zich in een equilibrium, een stabiele situatie, met een bepaalde strategie, als er geen strategie is waarmee een individu meer punten zou krijgen.

2.6 Tussenresultaten

We hebben alle strategieën getest en het blijkt dat er slechts twee strategieën stabiel zijn, de Horn-strategie en de anti-Horn-strategie. Even ter herhaling, de Horn-strategie gebruikt:

- Simpele vorm voor normale betekenis en andersom
- Complexe vorm voor afwijkende betekenis en andersom

De anti-Horn-strategie is precies het omgekeerde. Alle andere strategieën blijken niet stabiel te zijn; ze worden overheerst door Horn en/of anti-Horn.

2.6.1 Verklaring van de resultaten

Het is te verklaren dat alleen deze strategieën stabiel zijn. Twee Horn-agents communicerend met elkaar hebben optimale communicatie en dus het maximale aantal punten. Evenzo voor twee anti-Horn-agents. Alle andere strategieën hebben zwakheden, zoals bijvoorbeeld:

- De zend-strategie maakt geen onderscheid tussen de normale en de afwijkende betekenis. De zend-strategie is: "gebruik de simpele vorm voor de normale betekenis" maar tegelijkertijd: "gebruik de simpele vorm voor de afwijkende betekenis" Deze strategie maakt dus geen onderscheid naar situatie is. Een agent met deze strategie is dus nooit optimaal te begrijpen.
- De zend- en de ontvang-strategie zijn niet met elkaar in overeenstemming. De zend-strategie is "gebruik de complexe vorm voor de normale betekenis" De ontvang-strategie is "interpreteer de complexe vorm als de afwijkende betekenis" Agents met een dergelijke strategie kunnen niet optimaal met elkaar communiceren; als ze de normale betekenis over willen brengen, dan begrijpt de ander dat als de afwijkende.

2.7 Smolensky

(Tesar & Smolensky, 2000) gaat uit van een beginpopulatie van agents die alle een simpele strategie hebben: stuur voor alles wat je wilt zeggen een simpel signaal en interpreteer ieder signaal als een normale situatie, een simpele betekenis. De gedachte achter dit idee is dat een populatie begint met een dergelijke strategie, eenvoudigweg omdat complexe signalen nog niet geproduceerd konden worden in eerdere generaties, en afwijkende betekenissen niet onderscheiden werden van de simpele situaties. Als een dergelijke populatie naar de Horn-strategie zou convergeren, dan zou er een mooi verband zijn tussen het model en de werkelijkheid. In de testen die wij uitvoerden werd echter convergentie naar zowel Horn als anti-Horn waargenomen.

2.8 Het introduceren van kosten

Nu willen we onderzoeken waarom de Horn-strategie dominant zou kunnen zijn over de anti-Horn. We introduceren condities waaronder de populatie vaker convergeert naar de Horn-strategie. Die condities zijn de volgende:

- Het gebruik van de complexe vorm kost punten.
- De afwijkende betekenis komt minder vaak voor dan de normale betekenis.

Zo wordt de populatie gestimuleerd om vaker de simpele vorm te gebruiken dan de complexe vorm. Aangezien de normale betekenis vaker voorkomt dan de afwijkende betekenis is de verwachting dat de simpele vorm gekoppeld zal worden aan de normale betekenis en de complexe vorm aan de afwijkende betekenis: de eigenschappen van de Horn-strategie. Deze condities komen overeen met de door Horn gegeven omschrijving van 'Pragmatic Labour': men wil het liefst zo min mogelijk moeite doen. Toch is dit minder triviaal dan het lijkt. Het gebruik van de meest economische strategie heeft nauwelijks zin als men niet begrepen wordt.

De puntentoekeningsformule wordt enigszins uitgebreid:

$$\text{Punten(a)} = \text{Punten(b)} = \sum P(i)(\delta(H_b(S_a(i)), i) - k(S_a(i)) + \delta(H_a(S_b(i)), i) - k(S_b(i)))$$

$P(i)$ is de waarschijnlijkheid van betekenis / situatie i .

$k(f)$ geeft voor signaal f de kosten aan.

Voor de eenvoudige betekenis stellen we de waarschijnlijkheid op 1, de waarschijnlijkheid van de afwijkende betekenis lag tussen 0 en 1. Net zo werden de kosten van het simpele signaal op 0 gesteld, en de kosten van het complexe tussen 0 en 1 (om te voorkomen dat een succesvol gesprek toch een negatieve opbrengst heeft).

2.9 Resultaten na het introduceren van kosten

De resultaten na de aanpassing zijn zoals verwacht. Zelfs bij lage kosten en een klein verschil in distributie van de normale en de afwijkende betekenis, convergeert de populatie iedere keer naar de Horn-strategie (als het aantal evoluties nadert naar oneindig). Als we de kosten en de mutatie-ratio hoog genoeg maken is de anti-Horn-strategie zelfs niet meer stabiel en ontstaat een populatie van agents met de Horn-strategie. De mutatie-ratio moet hoog genoeg zijn, want de kinderen van een populatie die dezelfde strategie gebruikt, zijn identiek aan de ouders als er geen mutatie optreedt.

3 Conclusies en mogelijk toekomstig onderzoek

1. Zonder kosten convergeert de populatie ofwel naar de Horn-strategie, ofwel naar de anti-Horn-strategie. Dit zijn de enige twee strategieën waarvan de gebruikers optimaal met elkaar kunnen communiceren.
2. Met kosten convergeert de populatie naar de anti-Horn-strategie. Deze strategie is efficiënter dan de Horn-strategie en heeft dus minder puntenaftrek.

De resultaten die we hebben verkregen zijn niet verbazingwekkend. Het is op papier makkelijk te bewijzen dat de Horn-strategie onder de gegeven voorwaarden de meeste punten oplevert. Dat de evolutie neigt te gaan naar de strategie die het beste is voor een populatie als geheel, lijkt een voor de hand liggende conclusie. Het interessante is echter dat deze evolutie in staat is om een reeds ingeslagen weg (een bepaalde strategie die in meerderheid in de beginpopulatie aanwezig is) te verlaten en van alle zestien strategieën bij Horn uitkomt. Dit alles gebeurt dus zonder expliciete afstemming door de agents, bovendien maken de agents zelf geen afweging.

Er zijn vele uitbreidingen mogelijk op dit onderzoek. Hieronder worden enkele behandeld.

Meer signalen, meer situaties We kunnen een interessanter en meer waarheidsgetrouw model maken door de agents meer verschillende signalen te laten gebruiken en ze in meer verschillende situaties te laten belanden. Zo zouden er wat meer nuances komen in ons zo wel erg simpele model. Bovendien zou een agent in een situatie meerdere keuzes kunnen hebben uit signalen, ieder met een bepaalde kans om uitgezonden te worden.

Subgroepen binnen de populatie Nu is het zo dat ieder agent met alle anderen even vaak praat. Het zou logischer zijn om de agents meer te laten praten met anderen die dicht bij ze in de buurt zijn. Zo zouden subgroepen kunnen ontstaan die elkaar onderling goed begrijpen, maar leden van andere subgroepen minder goed. Dit zou te vergelijken zijn met een dialect.

Filosofische rechtvaardiging Filosofisch zou het interessant zijn te onderzoeken wat de waarde is van het testen van een theorie op deze manier, aangezien de omstandigheden worden bepaald door de theorie zelf.

References

- Blutner, R., 2000. "Some Aspects of Optimality in Natural Language Interpretation". *Journal of Semantics*, 17 (2000), 189–216.
- Horn, L.R., 1984. "Toward a new taxonomy for pragmatic inference: Q-based and R-based implicatures". In *Meaning, Form, and Use in Context*, Schiffrin, D. (red.), p. 11–42. Georgetown University Press, Washington.
- Lewis, D., 1969. *Convention*. Cambridge, MA, Harvard University Press.
- Nash Jr, John F., 1950. "Equilibrium points in n-person games". *Proc of the Nat Ac of Sc of the U S of A*, 36-1 (1950), 48–49.
- Rooij, R. van, 2002. "Signalling games select Horn strategies". Manuscript ILLC.
- Tesar, Bruce Benson & Paul Smolensky, 2000. *Learnability in Optimality Theory*. Cambridge, MA, MIT Press.