

Co-evolutie

Geen bioloog twijfelt eraan of evolutie opgetreden is, omdat er genoeg direct geobserveerde bewijzen voor zijn.

Het huidige debat gaat over de vraag hoe evolutie tot stand is gekomen en welke mechanismen erin een rol spelen.

In dit college gaan we de volgende aspecten behandelen:

- Natuurlijke selectie
- Co-evolutie
- Replicator dynamics
- Daisyworld
- Gaia hypothese
- Recycling netwerken
- Co-evolutie voor optimalisatie

Evolutie door natuurlijke selectie

In Darwin's evolutionaire theorie speelt survival of the fittest de belangrijkste rol als verklaring van de evolutie van organismen.

Beschouw een wereld bevolkt met organismen met een aanzienlijke reproductie snelheid.

Zolang de omstandigheden goed zijn, zal de populatie groeien, maar op een gegeven moment zijn er te weinig bronnen of ruimte om alle organismen zich te laten voortplanten.

Daarom zullen enkel bepaalde individuen zich voortplanten en de vraag is welke.

Organismen verschillen omdat ze verschillende genen hebben. Deze verschillen geven een voordeel aan bepaalde organismen om met de omgeving om te gaan.

Organismen met voordelen zullen meer kans hebben zich voort te planten en daarom zullen er meer nakomelingen komen met deze genetische eigenschappen.

Evolutie in een computer

Omdat evolutie door natuurlijke selectie een mechanisme is, kunnen we het programmeren in een computer programma.

Een bekend voorbeeld van een programma dat gebruik maakt van kunstmatige evolutie d.m.v. natuurlijke selectie is het **genetische algoritme**.

Hierbij wordt er een fitness functie gebruikt welke door de programmeur is gedefinieerd.

De fitness functie bepaald (indirect) hoeveel nakomelingen een individu kan genereren.

Hoewel GA geschikt zijn voor optimalisatie doeleinden, lijkt het niet perfect op natuurlijke evolutie.

De fitness functie moet namelijk gedefinieerd worden, en in natuurlijke evolutie is er niemand die de fitness functie bepaalt.

Co-evolutie

In het echt hangt de fitness van een individu af van zijn omgeving waaronder de andere species die erin voorkomen.

Zo'n fitness functie is daarom niet-stationair, maar verandert met de tijd aangezien de groottes van de verschillende populaties veranderen.

We hebben voorheen reeds 2 verschillende modellen bekeken om de dynamiek van interacterende species te bestuderen:

- Met differentiaal vergelijkingen (wiskundige regels die specificeren hoe bepaalde variabelen veranderen)
- Met cellulaire automaten

Een bekend voorbeeld van de eerste zijn de Lotka-Volterra vergelijkingen.

We kunnen de Lotka-Volterra vergelijkingen ook generaliseren voor meerdere organismen.

Replicator Dynamics

Laten we eerst een model bekijken waarin de fitness van een organisme (phenotype) wel gegeven is.

De replicator vergelijking beschrijft het gedrag van een populatie welke verdeeld is in n phenotypes E_1 tot E_n .

De relatieve frequenties noteren we als x_1 tot x_n gespecificeerd door de vector $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ (hier is $\sum_i x_i = 1$)

De fitness van phenotype E_i wordt genoteerd als $f_i(\vec{x})$

De gemiddelde fitness van de populatie is:

$$\hat{f}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n x_i f_i(\vec{x})$$

Vervolg replicator dynamics

De snelheid van toename van de frequentie van E_i is gelijk aan het verschil in fitness van E_i en de gemiddelde fitness van de populatie:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = x_i (f_i(\vec{x}) - \hat{f}(\vec{x}))$$

Nu krijgen we de replicator vergelijking met adaptie snelheid α :

$$\Delta x_i = \alpha x_i (f_i(\vec{x}) - \hat{f}(\vec{x}))$$

Als de fitness waarden van de phenotypes verschillen, verandert de vector van relatieve frequenties $\vec{x}$.

Als de omgeving niet verandert en de fitness functies blijven ook gelijk (constant selection) dan zal de phenotype met de hoogste fitness de hele populatie overnemen.

Deze assumpties zijn natuurlijk onrealistisch: de omgeving en fitness functies zullen wel veranderen door de selectie.

Co-evolutie met replicator dynamics

We kunnen de fitness van een phenotype ook laten afhangen van andere aanwezige phenotypes:

$$f_i(\vec{x}) = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j$$

Hierbij is a_{ij} de fitness van E_i in de aanwezigheid van E_j

Hierbij zien we dat phenotypen de fitness van andere phenotypen kunnen laten afnemen of toenemen.

Hierbij kan het zijn dat a_{ij} en a_{ji} beide positief en groot zijn. Het gevolg daarvan is dat ze samen werken om beide in frequentie toe te nemen.

Hierdoor kunnen bepaalde mutuele coopererende phenotypes ontstaan. Deze groepen kunnen ook weer competitie hebben met andere groepen phenotypes.

Vraag: Wat voor soort waarden a_{ij} en a_{ji} hebben predator-prooi phenotypes?

Daisyworld

In 1983 presenteerde Lovelock het model Daisyworld welke hij maakte om de relatie tussen organismen en hun omgeving te verkennen.

Daisyworld is een computer model van een imaginaire planeet waarin zwarte en witte daisies leven.

Daisies kunnen hun omgeving veranderen, groeien, reproduceren, en sterven.

Er is een globale variabele: de temperatuur van de planeet welke langzaam toeneemt door een imaginaire zon.

Witte daisies hebben een favoriete temperatuur waarin ze het snelste groeien en deze temperatuur is hoger dan de favoriete temperatuur van zwarte daisies.

Daarom zal de populatie witte daisies sneller groeien als de temperatuur vrij hoog begint te worden dan de populatie zwarte daisies.

Vervolg Daisyworld

Witte daisies refecteren echter de zon en koelen de planeet af. Dus als zij in aantal toenemen zal de temperatuur van de planeet afnemen.

Zwarte daisies absorberen de hitte van de zon en daarom verhogen ze de temperatuur van de omgeving.

Daisies veranderen de omgeving, en de omgeving heeft een impact op de populatie groei van de daisies.

Groeiende aantallen witte daisies koelen de pla-

neet af hetgeen gunstig wordt voor de groei van zwarte daisies.

De populatie zwarte daisies zal daarom toenemen en de temperatuur zal weer stijgen.

Het is het toe- en afnemen van de temperatuur van de planeet welke de twee soorten daisies verbinden met hun omgeving.

Dus is er een **zelf-regulerende feedback loop**

CA model voor Daisyworld

We kunnen een CA gebruiken als ruimtelijk model van Daisyworld. Elke cel kan een (witte of zwarte) daisy of een (wit of zwart) daisy-zaadje bevatten.

Verder heeft elke cel een temperatuur. Elke cycle wordt de temperatuur van elke cel opgehoogd met 1 graad.

Als witte daisies de gemiddelde temperatuur niet afkoelen, zal de temperatuur overal 100 graden worden en al het leven dood gaan.

Vervolg CA model Daisyworld

Zwarte daisies hebben de meeste kans om te overleven bij 40 graden. Witte daisies bij 60 graden. Elke 20 graden daarvan weg, daalt de overlevingskans met 50%

Zwarte daisies verwarmen alle 49 cellen rondom hen met 3 graden. Witte daisies koelen de 49 cellen met 3 graden af.

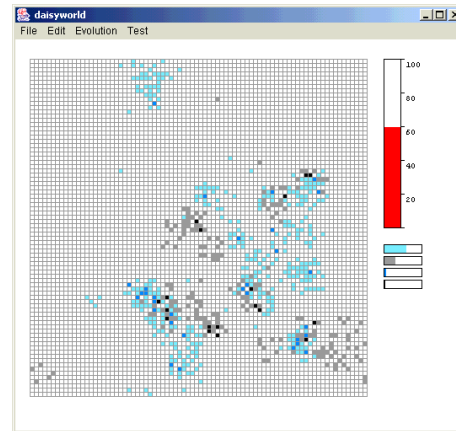
Witte daisies reproduceren 6 zaadjes op willekeurige lokaties in hun omgeving van 25 gridcellen met de meeste kans (40%) op 60 graden (en zwarte op 40 graden).

Daisy zaadjes hebben 10% kans om elke cycle dood te gaan. Witte (zwarte) zaadjes worden witte (zwarte) daisies met de meeste kans op 60 (40) graden.

Plaatje Daisyworld CA

Natuurlijke selectie in Daisyworld

In Daisyworld is er competitie (en daarom natuurlijke selectie) omdat de daisies allebei strij-



den om beperkte bronnen (namelijk de beschikbare ruimte).

Mutatie is een willekeurige verandering van het genotype van een organisme

Zo'n verandering kan resulteren in een klein verschil in de kleur van de daisy hetgeen een verandering betekent in de absorptie van hitte van de daisy.

In het algemeen kan een mutatie goed zijn voor een organisme, hoewel de meeste mutaties schadelijk of neutraal zijn.

Echter, zelfs als een mutatie maar in 1 op de miljoen gevallen gunstig is, zal deze zich snel door de populatie heen kunnen propagieren.

Zelf-regulatie en natural selection

Het meest interessante aspect in Daisyworld is echter de zelf-regulatie welke op een hogere level optreedt dan natuurlijke selectie.

De zelf-regulatie is gunstig voor alle individuen omdat het de temperatuur op een nivo houdt welke leven mogelijk maakt.

Omdat de zelf-regulatie gunstig is voor alle individuen, zou men kunnen denken dat zelf-regulatie bestaat door natuurlijke selectie.

In Daisyworld is de zelf-regulatie echter niet betrokken in een vorm van competitie of reproductie.

We kunnen echter wel zeggen dat natuurlijke selectie daisy eigenschappen prefereert welke leiden tot een zelf-regulerende omgeving.

Vraag: Wat is het verband tussen zelf-regulatie en de fitness functie?

Gaia Hypothese

Toen James Lovelock onderzocht of er leven op Mars is, bedacht hij de Gaia hypothese.

Hij realiseerde dat het niet noodzakelijk was om Mars te bezoeken, maar dat er slechts een klein onderzoek in de atmosfeer van Mars nodig was.

Omdat de atmosfeer van Mars in een chemisch evenwicht is, kan er geen activiteit of leven zijn op Mars.

Op aarde is er echter een chemisch niet-evenwicht; onze atmosfeer bestaat uit veel gassen welke met elkaar kunnen reageren, maar toch in andere proporties aanwezig blijven.

De Gaia theorie zegt dat dit niet-evenwicht een resultaat is van zelf-regulatie.

Het idee dat Gaia een zelf-regulerend systeem is leidde tot het idee dat Gaia zelf een levend organisme is.

Griekse Godin Gaea



Drie vormen van de Gaia Hypothese

Er zijn drie vormen van de Gaia Hypothese:

- **Co-evolutionary Gaia** is een zwakke vorm van Gaia. Het stelt dat het leven de omgeving bepaalt en deze feedback koppeling

tussen wezens en de omgeving kan de evolutie van beiden vormen.

- **Geophysiological Gaia** is de sterke vorm van Gaia. Het stelt dat de aarde zelf een levend organisme is en dat het leven zelf de fysieke en chemische omgeving optimaliseert.
- **Homeostatic Gaia** ligt hier tussenin. Het stelt dat de interactie tussen organismen en de omgeving gedomineerd worden door positieve en negatieve feedback loops welke de globale omgeving stabiliseren.

Lovelock zegt zelf dat zijn theorie een reactie van het systeem vereist, maar geen bewustzijn, planning, of intentie.

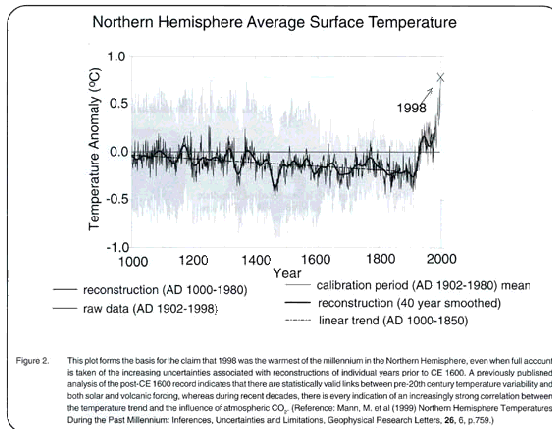
Voorbeelden van Gaia processen

- **Zuurstof:** Lovelock toont aan dat Gaia werkt om de zuurstof gehalte in de atmosfeer hoog te houden. De atmosfeer van Venus en Mars bevat slechts 0 en 0.13 procent aan vrije zuurstof.
- **Temperatuur:** De gemiddelde grondtemperatuur van de aarde ligt al meer dan 120 miljoen jaar tussen de 10 en 20 graden celcius. Op Mars varieert de temperatuur elke dag veel meer.
- **Koolstofdioxide:** De stabiliteit van de temperatuur van de aarde wordt gewaarborgd door variërende hoeveelheden aan koolstofdioxide in de atmosfeer. De vermindering van opgenomen zonne-radiatie komt door een vermindering van koolstofdioxide in die perioden.

Toenemende temperatuur van de aarde

Recycling netwerken

Als we meerdere co-evoluerende species in een omgeving hebben, kunnen ze ook interacteren met aanwezige bronnen in de omgeving, zoals chemische verbindingen.



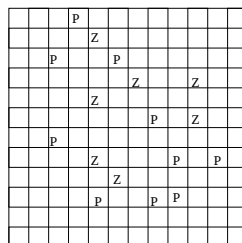
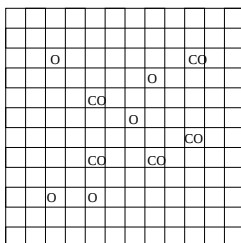
Een voorbeeld is als we planten en zoogdieren bij elkaar in een omgeving zetten en een gesimplificeerd model maken:

- Planten zetten CO_2 om in C en O_2 moleculen.
- Zoogdieren zetten C en O_2 om in CO_2 moleculen.
- Externe reacties zetten C en O_2 om in CO_2 .
- Zoogdieren kunnen planten eten en daarmee massa aan C erbij krijgen.

Dit model kunnen we implementeren in een cellulaire automaat bestaande uit planten, zoogdieren, en moleculen.

Voor de inzichtelijkheid kunnen we 2 CA gebruiken die in wisselwerking met elkaar staan; 1 geeft aan waar planten en dieren zijn, 1 geeft aan waar de moleculen zitten.

CA voor recycling netwerken



Let op dat we ook het gehalte aan C in planten (P) en zoogdieren (Z) moeten modelleren. We hebben boven dus niet alle toestanden getoond. Een interne toestands-variabele is hiervoor nodig.

We moeten ook regels opstellen om planten en zoogdieren zich te laten reproduceren en dood te laten gaan. Verder moeten zoogdieren zich kunnen bewegen en eventueel op zoek gaan naar planten.

Recycling in het model

Door de ecologie worden de moleculen gerecycled.

Wat zien we nu:

- Zonder planten worden alle (vrije) C en O_2 moleculen omgezet in CO_2 . Er treedt dus een evenwicht op.
- Als er heel veel planten zijn, groeit de hoeveelheid O_2 . Hierdoor zal er weinig CO_2 meer over zijn voor de planten.
- Als er zowel planten als zoogdieren zijn, recyclen ze de moleculen. Dit zorgt ervoor dat er meer planten en zoogdieren naast elkaar kunnen bestaan.
- Als er te veel zoogdieren zijn, worden alle planten snel opgegeten. Als er echter weinig planten meer over zijn, zullen de zoogdieren sneller sterven.

Recycling treedt op in veel Co-evolutionaire systemen en ecologieën. B.v. in regenwouden zorgt het voor een efficiënte manier om met beperkte hoeveelheden H_2O om te gaan.

Co-evolutie voor optimalisatie

We hebben reeds kennis gemaakt met Genetische algoritmen welke voor optimalisatie doeleinden gebruikt kunnen worden.

Sommige onderzoekers proberen een GA efficiënter te maken door co-evolutie te gebruiken.

Stel dat het probleem vereist om N taken op te lossen (b.v. sorteren van verschillende reeksen getallen).

Als fitness functie kun je nu gebruiken hoeveel van de N taken door een individu opgelost worden.

Het probleem hiervan is dat er steeds veel tijd in de evaluatie gestoken wordt.

Verder is het mogelijk dat er steeds door de beste individuen $0.7N$ taken opgelost worden, maar niet meer. Er is dan geen goede richting voor de volgende evolutie stap.

Individen

I	I		I
	I	I	
I	I	I	I
		I	

Parasieten

P	P	P	P
P	P	P	P
P	P	P	P
P	P	P	P

Co-evolutie voor optimalisatie, vervolg

Een mogelijke oplossing hiervoor is om co-evolutie te gebruiken tussen probleem-instanties (parasieten) en oplossers (de individuen).

Er zijn K parasieten welke een kleine deelverzameling van de N probleeminstanties bevatten (dit maakt het efficient).

Er zijn ook K individuen die elk getest worden op een bepaald gekozen parasiet.

De fitness van het individu is hoger naar mate het individu beter scoort op de testproblemen gegenereerd door de toegewezen parasiet.

De fitness van de parasiet is hoger naar mate het individu slechter scoort op zijn testproblemen.

Op deze manier co-evolueren parasieten en individuen. Parasieten maken de taken steeds moeilijker, terwijl de individuen op de moeilijker taken steeds beter moeten gaan scoren.

Spatiele co-evolutie voor optimalisatie

Sommige onderzoekers gebruiken een spatiele ruimte (een CA) waarin de individuen en parasieten co-evolueren.

De propagatie van een individu is dan lokaal en van de parasieten ook, zodat een individu niet te snel met totaal verschillende parasieten in aanraking komt.

Differentierende parasieten

Een probleem kan zijn dat alle individuen slecht scoren omdat de parasieten zich hebben ontwikkeld tot te lastige problemen.

Daarom kunnen we beter de fitness van een parasiet laten afhangen van de mate waarin hij

verschil kan maken (differentieren) tussen verschillende individuen.

Bv. als een parasiet door alle individuen of juist door helemaal geen individu opgelost wordt, dan heeft hij een lage fitness.

Als twee parasieten dezelfde onderscheidingen maken tussen de populatie individuen kan de fitness van 1 van hen ook omlaag gebracht worden.

Pareto front in Co-evolutionaire GA

Individen kunnen gedomineerd worden door andere individuen als alle parasieten die zij oplossen ook door ten minste 1 ander individu opgelost wordt:

Stel we noemen de fitness van individu i op parasiet j : $f_i(j)$

Als nu geldt; domineert(k, i) =

$$\forall j f_i(j) \leq f_k(j) \wedge \exists l f_i(l) < f_k(l)$$

Dan wordt i gedomineerd door de individu k .

Het pareto front bestaat uit alle individuen die helemaal niet gedomineerd worden.

Nu kunnen we evolueren door gebruik te maken van individuen die in het pareto-front zitten

Dit is ook een goede methode voor multi-objective optimization; als er meerdere verschillende fitness waarden voor een individu zijn.

Conclusie

We hebben gekeken naar natuurlijke selectie en het probleem van de fitness functie.

In ecologieën wordt de fitness van een organisme bepaald door de andere aanwezige organismen. Er is hier sprake van co-evolutie.

De verschillende organismen kunnen ook samenwerken, waardoor een zelf-regulerend systeem kan ontstaan.

De (zwakke) Gaia-hypothese zegt dat het leven de omgeving bepaalt en dat deze feedback koppeling tussen wezens en de omgeving de evolutie van beiden vormt.

In bepaalde ecologieën hebben organismen elkaar nodig om resources te recyclen. Er kunnen dan recycling netwerken ontstaan.

Ook optimalisatie algoritmen kunnen goed gebruik maken van co-evolutie.