

Zautomatizovat automatizaci aneb budoucnost evoluční robotiky podle *R. U. R.*

GEOFF NITSCHKE



R. U. R. představuje příběh, který přichází s odpovědí na starou otázku, co rozlišuje lidstvo a roboty. Zřetelný rozpor mezi námi a nimi je, že se naši strojoví sluhové (roboti) nerodí, ale jsou vyráběni [51]. Sebereprodukce je dlouhodobě otevřeným problémem a tématem diskusí o umělém životě [52]. Diskutuje se i o velmi očekávaném budoucím využití makrorobotů a nanorobotů [53]. Sebereprodukce je poslední dobou předmětem výzkumu v rámci relativně nové vědní oblasti – evoluční robotiky [43, 45, 47], a samotné téma získalo dokonce pozornost mezinárodních médií [55, 56].

Evoluční robotika je multidisciplinární vědní obor, který čerpá ze ztělesněné umělé inteligence („embodied AI“), evoluční biologie, kognitivních věd a robotiky. Významně se také překrývá s umělým životem (ALife). Cílem evoluční robotiky a v širším kontextu i umělého života je uplatňovat principy inspirované biologií, jako jsou adaptivní mechanismy, při navrhování umělých organismů [57]. Po třiceti letech experimentálních výzkumů v evoluční robotice jsou mnozí frustrováni omezeními současných adaptací na přežití u fyzických robotů [58]. Tato omezení vyplývají z toho, že se stroj v rámci učebních metod učí použít pouze vytvořený metafyzický ovládací program (software, který šífruje senzorio-motorické korelace), jenž ztělesňuje chování robotů v jejich statických fyzických tělech (konfigurace senzorio-motorického hardwaru).

Pokud se podíváme na evoluční robotiku jako na celek, zjistíme, že současné experimentální systémy evoluční robotiky jsou stejně jako v *R. U. R.* pevně spjaty s tím, jak byly navrženy. A na rozdíl od svých biologických protějšků, jimž se chtějí vyrovnat, nejsou potom tyto robotické systémy soběstačné. Roboti sice mají jistou autonomii v určitých prostředích, ale nejsou schopni se samostatně rozmnožovat a zlepšovat design svého těla a mozku v časovém měřítku evoluce.

Přizpůsobivost je v evoluční robotice zastoupena ovládacím programem, který se učí chování robota vhodné pro řešení konkrétních úkolů v konkrétním prostředí. Fyzická forma, čidla, ovladače, motory a zdroje energie, které ovliv-

ňují tělo (morfologii) robotů, jsou dané (až na několik významných výjimek [43, 45, 47]) a jakékoli morfologické adaptace zdlouhavě implementují lidé, když manuálně rekonfigurují senzorio-motorický systém. Experimentální roboti sice mají ovládací programy, které přizpůsobivě interagují s fyzickým světem, ale rozsah jejich chování a přizpůsobivosti je značně omezený jejich morfologií [59]. V současné evoluční robotice se to projevuje tím, že roboti navržení pro určité prostředí se mohou přizpůsobit úkolům pouze v tomto prostředí. Přesto existuje několik významných příkladů, v nichž ovládací program reagoval adaptací na poškození senzorů a aktuátorů, které vzniklo během života robota [60].

Ve fiktivním světě *R. U. R.* jsou Čapkovi roboti kopiemi lidských těl. Tento významný morfologický rys jim dává obecnou (univerzální) schopnost fungovat v různých typech prostředí po celém světě a schopnost vykonávat široké spektrum úkolů. Ačkoli je chování robotů naprogramováno pouze pro určité úkoly, tak se stejně jako jejich tvůrci dokáží naučit jakoukoli dovednost a chování, a zvládnou pak jakýkoli úkol díky potenciálu univerzálního lidského těla. Co však na rozdíl od svých tvůrců nedokáží, je rozmnožovat se a sami se vylepšovat v evolučním měřítku generací.

Tento fakt naráží na to, že byli vyrobeni. Každý robot v *R. U. R.* je pouhým produktem, který byl vyroben s určitým záměrem. Situace s našimi současnými roboty, které jsou využívány v globálním zpracovatelském průmyslu, vypadá podobně. Během své existence opakovaně vykonávají úkoly. A když se jejich fyzické součástky opotřebují nebo se vyčerpá zdroj jejich energie, výrobci je vyřadí z provozu. Genetická informace robotů z *R. U. R.* neobsahovala vzor jich samotných, jako to je u lidí. To znamenalo, že reprodukce nebyla možná. A roboti byli degradováni na úroveň biomechanického majetku, spíše než aby byli vnímáni jako umělý život.

Roboti z *R. U. R.* nebyli vyrobeni tak, aby se mohli evolučně vyvíjet. Nemohli se reprodukovat a jakkoli rozmnožovat umělý život, a proto ani nemohli nahradit své tvůrce. V současné evoluční robotice je umělá evoluce vnímána jako abstraktní mechanismus pro přizpůsobení chování robotů. Možnosti vývoje a sebe reprodukce se obvykle přehlížejí [Hale a kol., 2019]. Ale pokud má někdy dojít k realizaci fyzických evolučních robotických systémů, které jsou samostatné a přizpůsobivé, je nutné, aby se tyto systémy správně replikovaly a samy se vyvíjely. Díky tomu bude možná změna chování a morfologie v závislosti na úkolech a změnách prostředí [61, 49]. Současný vývoj experimentálních fyzických systémů pokročil k vývoji onlinového

ovládacího programu. Jeho chování se přizpůsobuje v reálném čase interakci s fyzickým světem [62]. Ale ještě se zatím nedosáhlo opravdových přínosů umělé fylogenetické adaptace, při níž se vyvíjejí morfologie i chování robotických systémů.

V přírodě lze pozorovat neustálý koloběh organismů, které se rodí a umírají. V průběhu mnoha generací se koloběh prolíná s evolucí. Organismy se bez přestání přizpůsobují nikám daného prostředí, aby si zajistily soběstačnost chování i morfologie. Přizpůsobení se projevuje vývojem morfologických vlastností a vlastností chování, které umožňují rozmnožování a přežití organismů v prostředí [63]. Žádný ekvivalent k tomu se ale v současné době mezi roboty nenachází. Neexistuje systém, který by produkoval jednu generaci fyzických robotů za druhou a zajišťoval, aby nová generace vznikla vylepšením morfologického designu a chování předchozí generace.

Danou situaci způsobila především nepraktičnost současných autonomních hardwarů, které jsou schopné vývoje [64] a obecný nezáměr o sebe-reprodukcii, která je pro evoluční robotiku užitečným adaptivním principem. Na druhou stranu vědci na velmi zkrácené časové ose umělé evoluce nedávno ukázali výhody souběžné adaptace morfologie a ovládacího programu fyzických robotů. Vývojáři robotů na tomto základě vylepšili vývoj designu robotů [43, 45, 47]. Stejný přístup se využívá v modulárních metodách pro navrhování produktu. Předem navržené součástky se mění podle potřeby a účelu. Není nutné navrhovat je od začátku, stačí upravit formu a účel, aby vyhovovaly kritériím úkolů, které se mění [65].

Ve fiktivním světě *R. U. R.* definovala roboty neschopnost se rozmnožovat a vyvíjet v průběhu generací. Byli vnímáni jako velmi složitá jednorázová zařízení, která byla navržena a vyrobena pro konkrétní účel určený uživatelem. V současné evoluční robotice vidíme stejný trend. Výzkum je zaměřen spíše na algoritmy a design aplikací než na řešení otázek, které jsou společné se souvisejícími obory. Výsledky evoluční robotiky by měly v ideálním případě mít mnoho dopadů na inovace, stejně jako potenciální použití v mnoha souvisejících oborech, jako je evoluční biologie, robotika, společenské a kognitivní vědy [66]. Vědci se ale uchýlili do pohodlí vlastních, ovšem omezených experimentálních nik a provádějí výzkumy, jejichž výsledky mají předem definované použití, omezený rozsah a předpokládaný dopad. Význam současné evoluční robotiky je proto ohrožen. Tato věda by se mohla stát nadbytečnou. Počet článků publikovaných v evoluční robotice během posledních třiceti let narůstá, ale dopad nových poznatků na související obory se snižuje.

Pokud chceme, aby se evoluční robotika opět stala experimentální platformou, která se věnuje širokému spektru multidisciplinárních otázek, můžeme čerpat poučení z *R. U. R.* Struktura těla robotů z *R. U. R.* odpovídá obecné morfologii *Homo sapiens*. Fyzické a biomechanické vlastnosti lidského těla spolu s velkým vyvinutým mozkiem umožňují používání nástrojů, rychlé ontogenetické učení a adaptaci na nové prostředí [67]. Ve fiktivním světě *R. U. R.* to znamenalo, že roboti mohli obsadit mnoho sociálních rolí, které dnes zastávají lidé. Ideální by pro evoluční robotiku bylo vyvinout umělé robotické spojení mozku a těla, které by bylo dostatečně obecné k adaptaci na široké spektrum prostředí (a rozličné úkoly v těchto prostředích), nebo dostatečně tvárné k adaptaci morfologie a chování při přesunu následných generací z jednoho prostředí do druhého. Důležitější však je, že by takoví roboti měli kromě schopnosti vyvíjet se také schopnost sebereplikace. Ta by jim umožnila širší spektrum přizpůsobivosti. Pro dosažení této flexibility a všeobecnosti umělé evoluce mozku a těla robotů je nutné formulovat základní mechanismy pro metodologii automatického navrhování robotů. V *R. U. R.* jsou roboti přímo vyráběni jinými roboty. Automatizovanou metodologií by tedy ztělesnila automatizovaná továrna, která konstruuje roboty. Mohla by se nacházet v jakémkoli prostředí a jejím cílem by bylo vyvíjet roboty vhodné pro řešení úkolů v daném prostředí.

Automatizované továrny, které konstruuje roboty, se mohou objevit pouze v prostředí vědeckofantastických příběhů. Ale nedávné pokroky ve zpracování materiálů, soft robotice a technologii rychlého prototypingu, jako je 3D tisk [68], vyřešily některé praktické problémy umělé evoluce fyzických robotů [69]. Reálné továrny by však musely mít vhodné určené cíle, které by upřesnil uživatel. Odpovídalo by to současným pokynům ředitelství vědeckých nebo průmyslových misí, např. hledání stop vody na planetách a planetkách nebo hledání lokalit pro těžbu ropy a zemního plynu.

Evoluce [70]. by tedy mohla být ztělesněna továrnou, která by opakovaně vyráběla nové generace fyzických prototypů robotů. Každý robot v generaci by fungoval v určitém prostředí. Továrna by roboty hodnotila a obodovala je podle toho, jak dobře plnili své úkoly. Poté by generaci robotů rozebrala a zrecyklovala ji na materiál a součástky. Ovládací programy, materiál a součástky nevhodnějších robotů by použila znovu a nakombinovala je s vylepšeným designem mozku a těla. Evoluční automatizované továrny robotů by zajistily nejen evoluci návrhů a metodologii výroby robotů, ale také by sloužily jako zdroj a informační databáze pro výrobu každé jejich generace. První

generaci by továrna vyrobila z omezeného počtu hardwaru robotů, materiálu a součástek. Ovládací programy by měly omezenou znalost prostředí. Při průzkumu prostředí by generace robotů shromažďovala data o terénu, úkolech, chování a fyzických překážkách, s nimiž se setkala. Továrna by potom tyto informace využila při navrhování a konstruování nové generace ovládacího programu. Nová těla pro ovládací program by vyrobila zkombinováním recyklovaných částí robotů a opětovným použitím částí robotů, kteří byli v předchozí generaci při plnění úkolů v určitém prostředí nejméně úspěšnější.

Výroba robotů, průzkum, shromažďování informací, nové navrhování mozku a těla, vyřazení robotů z provozu, aby byli zrecyklováni, a následně opětovně použití a zkombinování při další výrobě. Koloběh by mohl pokračovat nepřetržitě. Z praktického hlediska by evoluční navrhování, výroba a evoluce pokračovala, pouze dokud by továrně nedošel zdroj energie, nebo dokud by se roboti dokonale nepřizpůsobili svému prostředí a úkolům. Jednalo by se o obdobu přírodního vývoje. Každá generace robotů, která by z továrny vyšla, by ztělesňovala vyvíjející se návrhy ovládacích programů a morfologie. Důležité je, že umělá evoluce by probíhala řádově rychleji než přirozená evoluce. Byla by totiž urychlena opětovným využitím již existujících návrhů a znalostí.

Tento koncept přináší otázky, proč přesně a pro jaké typy prostředí bychom takovou továrnu potřebovali. Předpokládá se, že klíčovým přínosem továrny by byl mobilní charakter. Výrobní centra by mohla být umístěna v odlehlých a nepřátelských prostředích jako nástroj pro řešení problémů [71]. Továrna by automaticky vyráběla kolonie robotů, kteří by řešili složité a obtížné úkoly, o nichž jsme měli minimální nebo nulovou předchozí znalost. Jedná se především o úkoly v nepředvídatelných, dynamických a neznámých prostředích. V takových prostředích není možné předem nastavit optimální stavbu mozku a těla robotů. Proto je vhodné, aby roboti sami přizpůsobili svoji morfologii a chování podle výsledků průzkumu prostředí.

Příklad možného využití zahrnuje průzkum vesmíru [72], pátrání a vyprošťování [73], krizové řízení [74], monitorování prostředí [75] a těžbu surovin z asteroidů [76]. I v *R. U. R.* byli roboti vytvořeni jako nástroje pro řešení problémů. Byli ovšem obdobou otrocké pracovní síly, navrženi systematicky a vyrobeni na továrních linkách, aby zaplnili role, které tradičně zastávali lidé. Z toho lze vyvodit, že automatizovaná pracovní síla a nahrazení lidské práce je ekonomicky výhodná a celkově levnější varianta. Předpokládá se, že zcela automatizovaná robotická pracovní síla, i když je neadaptivní, nahradí lidi v některých odvětvích průmyslu, jako např. ve zpracovatelském. Přesto

ze současných ukazatelů vyplývá, že v mnoha odvětvích je stále mnohem praktičtější a ekonomicky výhodnější zaměstnávat pro manuální práci levnou a využitelnou lidskou pracovní sílu [77].

Opravdový potenciál plně automatizovaných robotických systémů, které se samy rozmnožují a přizpůsobují, bude spočívat spíše v plnění úkolů, které lidé neumějí vyřešit, zejména v neprozkoumaných nebo vzdálených, nehostinných prostředích, která jsou příliš nebezpečná na to, aby v nich žili a pracovali. Hrdinové *R. U. R.* chtěli kapitalisticky snížit náklady a zvýšit zisk. To ale není jediný možný přístup. Pokud se postaví plně automatizované továrny, které na nevyřešené úkoly napříč různými prostředími budou reagovat tím, že zkonstruují roboty, otevře se nesmírný potenciál pro vědecké objevy a průmyslové přínosy. Očekává se, že plně automatizované soběstačné kolonie robotů, které se uměle vyvíjejí, se stanou nepostradatelným nástrojem pro řešení problémů. A umožní nám vhodně řešit stále složitější problémy zde na Zemi a později i v prostředích, která si zatím neumíme ani představit.



Geoff Nitschke | Jihoafrická republika

Vědec (evoluční strojové učení, umělý život, neuro-evoluce, evoluční a rojová robotika)

University of Cape Town
(Univerzita v Kapském Městě), Ústav
počítačových věd