

Evoluční počítání v kapalném krystalu

Autor: Kateřina Fořtová

Pojem evolution-in-materio

- Manipulace fyzikálního systému pomocí počítačem kontrolované evoluce (**computer controlled evolution - CCE**)
- Aplikace konfiguračních proměnných ovlivní měřený výstup převedený na výstupní data
- Získání užitečné výpočetní funkce na základě aplikace fyzikálních signálů různých vlastností a následné konfigurace materiálu
- Přidělená fitness funkce na základě porovnání výstupní a ideální funkce
- Fitness je přidělena každému jedinci z populace
- **Materiál by měl být ideálně resetován do původní podoby při aplikaci nové konfigurace**

Pojem evolution-in-materio - příklad problému TSP (Travelling Salesman Problem)

- Minimální cena při navštívení každého z měst pouze jednou
- Využití CAP (Configurable Analogue Processor)
- **Mapování na elektrodové pole** – výstupní a konfigurační elektrody
- **Výstupních elektrod je tolik jako měst**
- **Cílem je nalézt množinu výstupních napětí, které mohou být mapovány na permutaci měst**
- Evoluční algoritmus rozhodne jaké elektrody budou mít výstupní, konfigurační, případně vstupní napětí

Pojem evolution-in-materio - příklad problému TSP (Travelling Salesman Problem)

Nechť V_i určuje napětí výstupních elektrod. Definujeme 2D pole:

$$a_{ij} = \begin{cases} V_i & j = 0 \\ i & j = 1 \end{cases}$$

Proměnná a_{i0} určuje naměřená výstupní napětí a a_{i1} danou permutaci. Pokud jsou prvky a_{i0} seřazeny, pak a_{i1} určuje danou permutaci.

Např. mějme šest měst pro problém TSP, pak zaznamenejme daná výstupní napětí:

$$\begin{pmatrix} 0.72 & 0.15 & 0.91 & 0.23 & 0.54 & 0.03 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$$

Pokud seřadíme první dimenzi, tak dostaneme danou permutaci měst:

$$\begin{pmatrix} 0.03 & 0.15 & 0.23 & 0.54 & 0.72 & 0.91 \\ 5 & 1 & 3 & 4 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

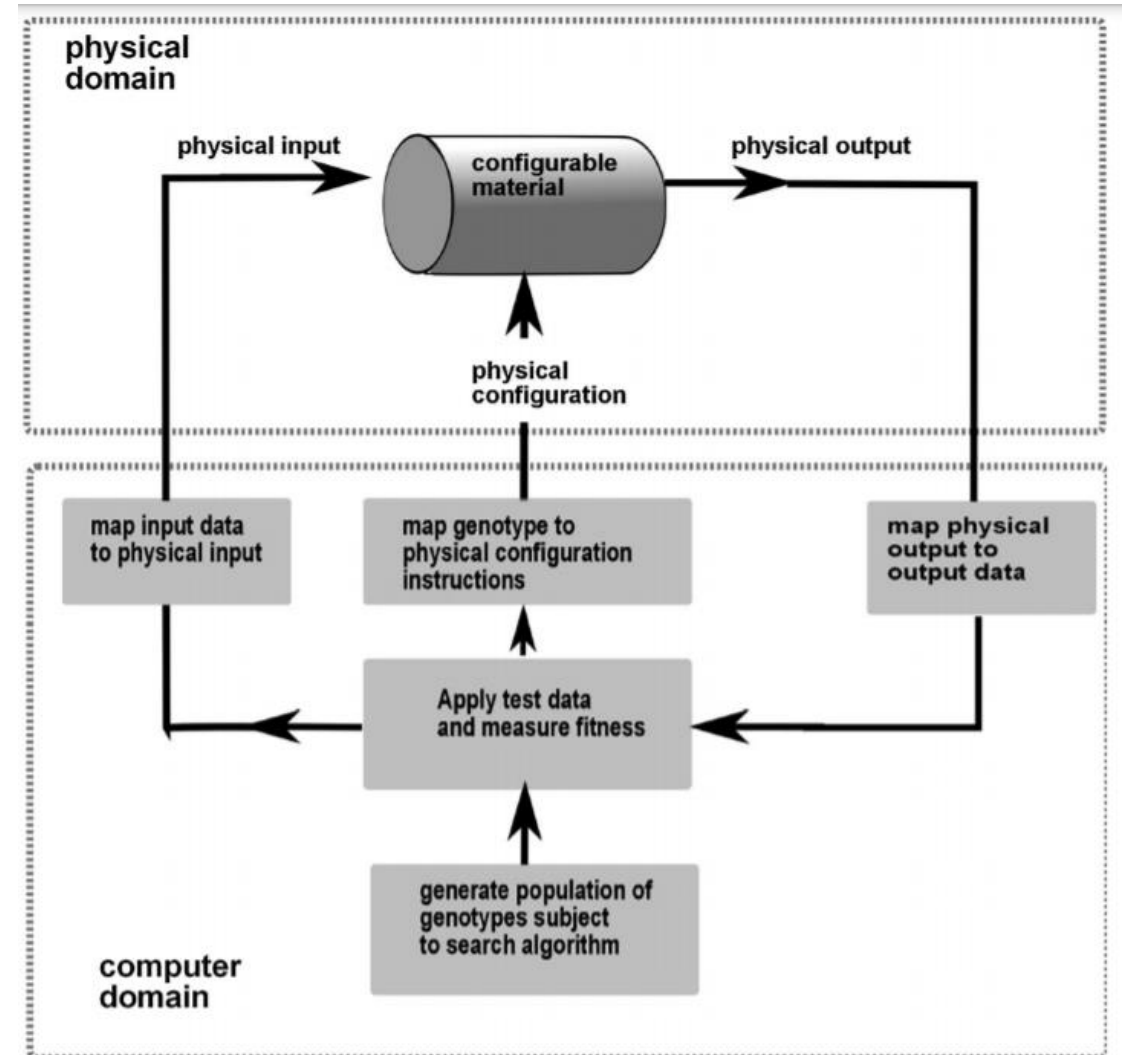
Koncept evolution-in-materio

Fyzikální doména

- **Konfigurační materiál**, na který mohou být aplikovány fyzikální signály
- Signály dělíme na vstupní, výstupní, konfigurační

Výpočetní doména

- **Počítač** kontroluje aplikaci fyzikálních vstupů, čtení fyzikálních signálů z materiálu, aplikaci fyzikálních konfigurací pro materiál
- Genotyp evolučního algoritmu převeden do konfiguračních instrukcí
- Fyzikální výstupní signály převedeny počítačem do výstupních dat
- Hodnota fitness získána z výstupních dat a přidělena jako fitness genotypu



Aspekty evolution-in-materio

Výhody

- Fyzikální proměnné mohou být využity evolucí bez toho, aby nám byly předem známe
- Nepožadovaný počítačový model fyzického systému
- **Možná potenciální řešení problémů, která si zatím nedokážeme představit**
- Možnost dosud nových neobjevených výpočetních zařízení

Nevýhody

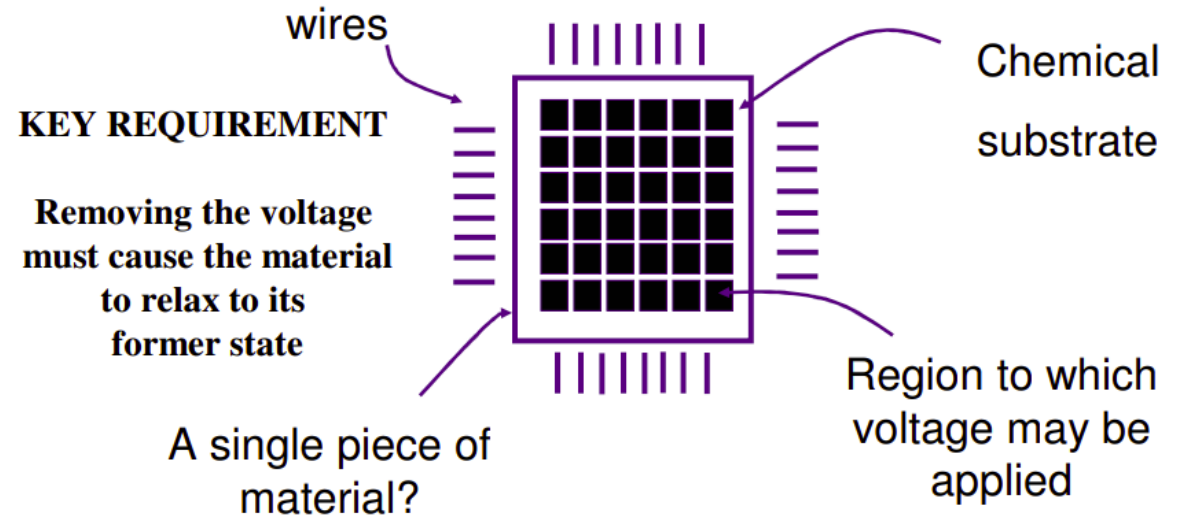
- Není vždy jasné, jaké fyzikální proměnné pro konfiguraci systému jsou nejvýhodnější
- **Horší reprodukovatelnost systému**
- Aplikování testovacích signálů může změnit vnitřní vlastnosti systému
- Někdy je třeba vynaložit vyšší čas pro konfiguraci materiálu
- Mnohdy delší konfigurace systému pro provedení zadaného výpočtu

Field Programmable Matter Array (FPMA)

- Zařízení umožňující manipulaci s materiálem pod kontrolou počítače pomocí napětí vyvolávajícího fyzické změny v látce
- Interakce vyvolaných změn využitelných v evoluci
- Při vhodně zvolených hodnotách konfiguračního napětí dochází ke změně v materiálu na molekulární úrovni

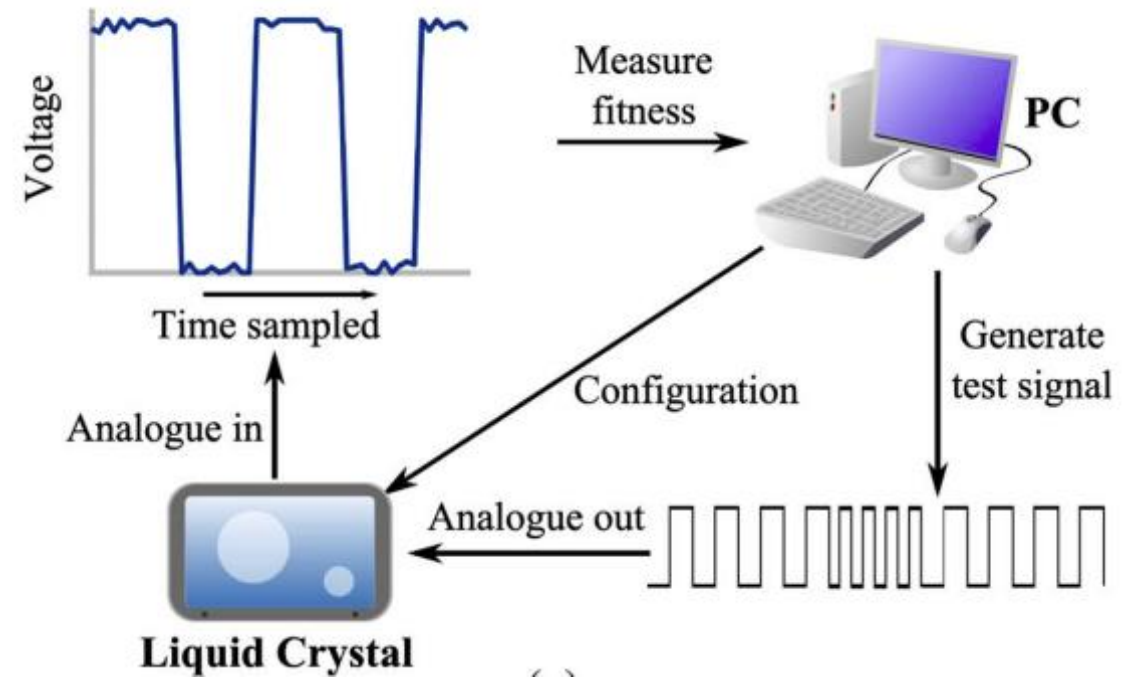
Vhodný materiál pro FPMA

- **Konfigurovatelný pomocí napětí / proudu**
- Ovlivňuje optické, elektrické signály
- **Resetovatelný do původní podoby**
- Např. **kapalný krystal**, elektroaktivní polymery, společenství bakterií



Liquid Crystal Analogue Processor (LCAP)

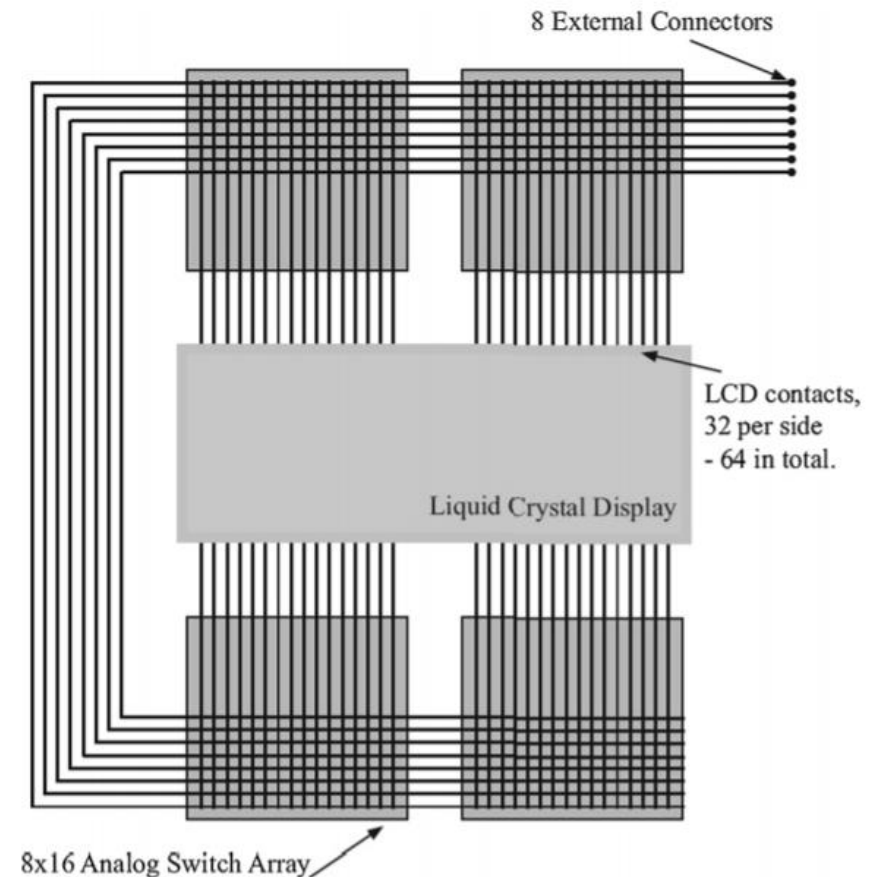
- 4 cross-switch zařízení dynamicky konfigurují obvody připojené k tekutému krystalu
- **Externí propojení (spojené s analogovými V/V počítače)** - vstupní napětí, uzemnění, signály, spojení s měřicími zařízeními
- **Propojení přiřazené vstupním signálům, měření, fixnímu napětí**
- Fixní napětí zjištěno pomocí genetického algoritmu, napětí je konstantní během evoluce



Poznámka: Některé vědecké články užívají název Liquid Crystal Evolvable Motherboard (LCEM)

Příklady využití LCAP

- **Tónový diskriminátor** – odlišení mnoha obdélníkových průběhů signálu
- **Logická hradla** – navrhnutí dvouvstupových hradel – kapalný krystal je schopen univerzálních výpočetních operací
- **Kontrolér pro robota** – systém pro vyhýbání se překážkám



Vlastnosti evolučního návrhu pro LCAP

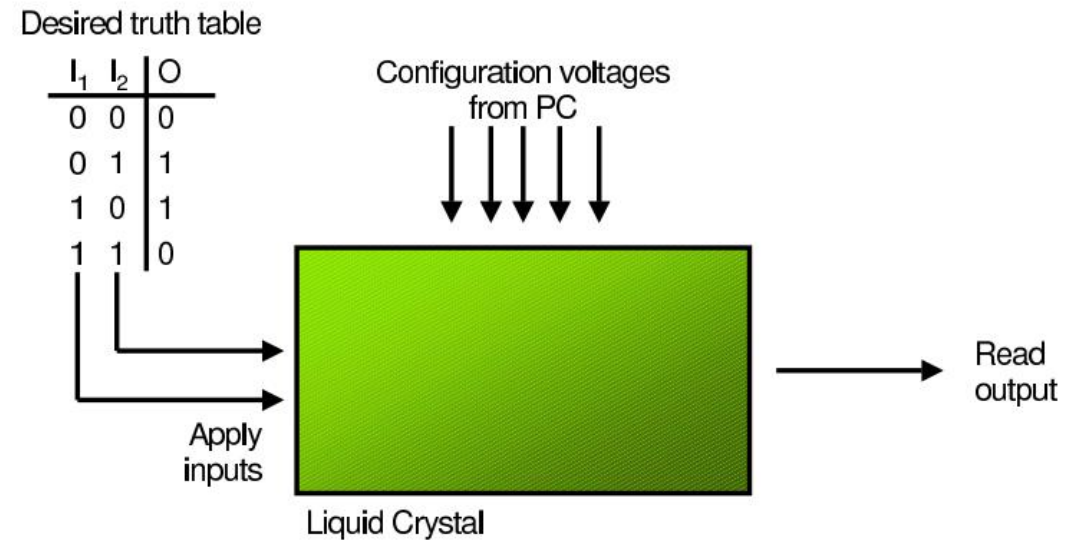
- **Genotyp dělen na 2 části**
- 64 celých čísel v rozsahu 0 až 8 - **64 LCD kontaktů**
- **5 16-bitových celých čísel reprezentující napětí od -10 V do 10 V**
- **Příklad nastavení pro tónový diskriminátor:**
- Populace 40 jedinců, běh 100 generací
- Využití mutace, turnaje
- Obecně snadné provedení evoluce, stačí pouze málo generací na rozdíl od řešení obdobných problémů na FPGA

Vývoj logických hradel v kapalném krystalu - Kódování genotypu

- **Cílové funkce: NOR, OR, AND, NAND, NOR, XOR**
- Dva možné stavy – **HIGH, LOW** reprezentující stavy **TRUE, FALSE** v Booleově logice
- **Genotyp dělen na 2 části - konektivita a konfigurační napětí**
- Opět **64 propojení na LCD** - řetězec 64 celých čísel v rozsahu 0 – 8
- Jedno spojení pro uzemnění, dvě spojení pro incidentní signály, jedno spojení pro výstup
- **Čtyři konfigurační napětí řízeny evolucí**
- **Evoluční algoritmus určí 3 možná napětí a umístění jejich aplikace na některé z 64 propojení na LCD**
- **EA dále určuje, na které z konektorů na LCD budou aplikovány příchozí signály, konektor pro čtení výstupních signálů a jaké konektory mají být uzemněny**

Vývoj logických hradel v kapalném krystalu - Fitness funkce

- Populace 40 jedinců, 5 mutací na jedince
- Užitý elitismus
- 5 nejlepších jedinců vybráno do další generace
- Selektce využívá turnaje na základě vzorku 5 jedinců
- 200 generací



Vývoj logických hradel v kapalném krystalu – Fitness funkce

- Aplikace každého řádku pravdivostní tabulky **tříkrát**
- Měření odezvy v kapalném krystalu
- Fitness spočítána jako počet správných výstupů - **maximální hodnota fitness** (nejlepší možné řešení) - $4 * 3 = 12$
- Např. pokud je fitness 10, pak aspoň pro jednu aplikaci pravdivostní tabulky byly všechny výstupy správné
- Vstupní napětí - **+ 1 V – TRUE, 0 V – FALSE**
- Práh výstupního napětí - + 0,1 V (tedy **výstup vyšší jak + 0,1 V – TRUE, jinak FALSE**)

Vývoj logických hradel v kapalném krystalu – Výsledky experimentování

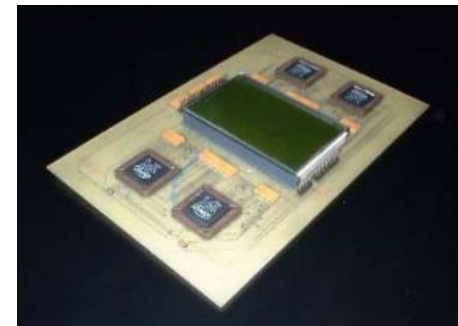
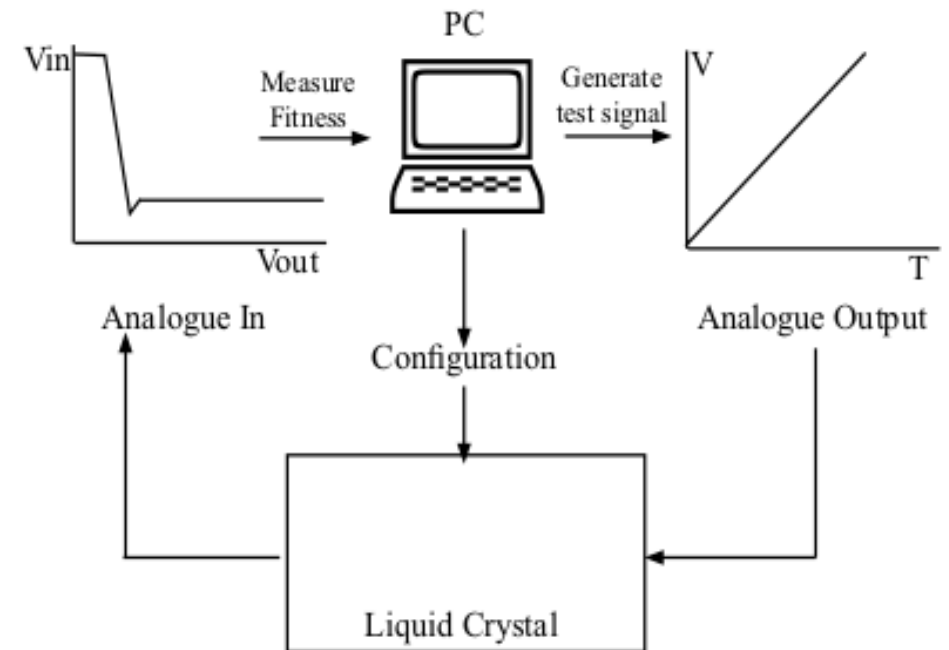
- Fitness dobrého řešení nejméně 10
- Většina typů hradel je evolucí vytvořena velmi rychle
- Je možné, že kapalný krystal má způsob pamatovat si přechozí konfigurace - rychlejší vývoj, systém by nemusel být zcela resetován
- Hradlo XOR nejnáročnější na vytvoření pomocí evoluce

| Gate | Run | Max. Fitness | Evaluation | Gate | Run | Max. Fitness | Evaluation |
|------|-----|--------------|------------|------|-----|--------------|------------|
| AND | 0 | 10 | 48 | NOT | 0 | 10 | 3 |
| | 1 | 11 | 77 | | 1 | 10 | 48 |
| | 2 | 10 | 6 | | 2 | 9 | 23 |
| | 3 | 10 | 18 | | 3 | 9 | 82 |
| | 4 | 10 | 18 | | 4 | 11 | 101 |
| | 5 | 11 | 484 | | 5 | 10 | 43 |
| | 6 | 10 | 16 | | 6 | 11 | 120 |
| OR | 0 | 11 | 17 | NAND | 0 | 10 | 53 |
| | 1 | 10 | 184 | | 1 | 10 | 18 |
| | 2 | 11 | 452 | | 2 | 10 | 382 |
| | 3 | 11 | 24 | | 3 | 10 | 13 |
| | 4 | 10 | 10 | | 4 | 10 | 35 |
| | 5 | 11 | 6 | | 5 | 10 | 14 |
| | 6 | 12 | 1500 | | 6 | 10 | 149 |
| XOR | 0 | 9 | 1221 | NOR | 0 | 11 | 13 |
| | 1 | 9 | 31 | | 1 | 11 | 349 |
| | 2 | 9 | 329 | | 2 | 11 | 1405 |
| | 3 | 10 | 1255 | | 3 | 11 | 12 |
| | 4 | 9 | 953 | | 4 | 11 | 1342 |
| | 5 | 9 | 734 | | 5 | 11 | 77 |
| | 6 | 9 | 319 | | 6 | 11 | 957 |

Vývoj kontroléru pro robota v kapalném krystalu

- Dva senzory, dvě kola pro pohyb
- Naměřené hodnoty z senzorů převedeny do signálů pro LCAP
- Každý z senzorů vzdálenosti vrací výstup obdélníkové vlny s frekvencí úměrné vzdálenosti v přímce od senzoru k překážce

Pro zopakování: Schéma LCAP (Liquid Crystal Analogue Processor):



Vývoj kontroléru pro robota v kapalném krystalu

– Reprezentace vektoru genetického algoritmu

- **Genetická reprezentace každého jedince dělena na dvě části - popis konektivity a popis konfiguračních napětí**
- Každý z 64 propojení na LCD reprezentován číslem v rozsahu 0 – 7, žádné propojení značeno 0 - **řetězec 64 celých čísel (int) v rozsahu 0 – 8**
- Spojení pro uzemnění, dvě spojení pro čtení vzdálenosti, dvě spojení pro kontrolu motoru
- **Zbývající tři spojení mají statické napětí, které je určeno evolucí**
- Každé napětí reprezentováno 16-bit celým číslem - 65 536 možností se mapuje na úroveň napětí v rozsahu -10 V - $+10\text{ V}$ - **řetězec tří 16-bit celých čísel**
- **Každé spojení může být směrováno na různá místa na LCD na základě schématu propojení určeného evolucí**

Vývoj kontroléru pro robota v kapalném krystalu - Genetický algoritmus

- Populace 40 jedinců, 200 generací
- 5 mutací na jedince
- Užitý elitismus – 5 nejlepších jedinců zachováno do další generace
- Zhruba 1 minuto trvalo vyhodnocení 1 jedince
- **Cílem je prohledat co největší prostor bez kolize s překážkami**
- **Fitness funkce zvýhodnila řešení, které dosáhly tohoto cíle (0 - nejhorší řešení, 10000 - nejlepší řešení)**

Vývoj kontroléru pro robota v kapalném krystalu - Výsledky experimentování

- 36 % běhů blízko nejlepšímu skóre
- Průměrně 62 generací nutných pro nalezení dobrého řešení, nejrychlejší dobré řešení nalezeno při 22 generacích
- **Chronologické milníky učení robota: nepohybovat se v kruzích, jízda dopředu, otočení při výskytu zdi, pohyb při zdi, prohledání celého prostoru**

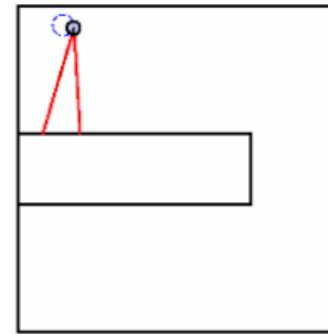


Fig. 4. Fitness=515

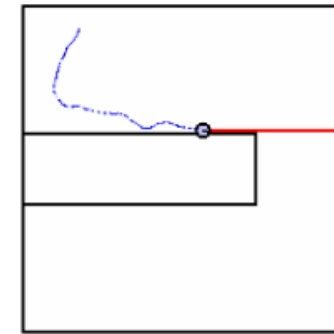


Fig. 5. fitness=3819

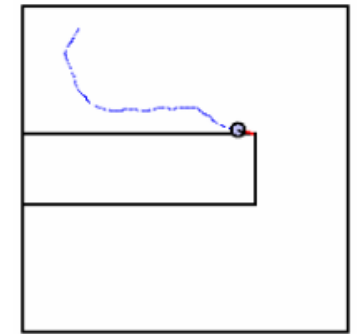


Fig. 6. fitness=4607

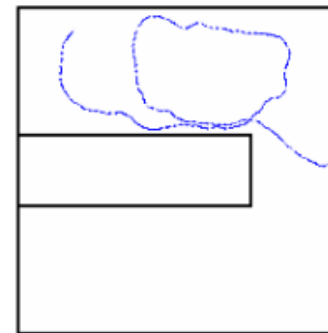


Fig. 7. fitness=6772

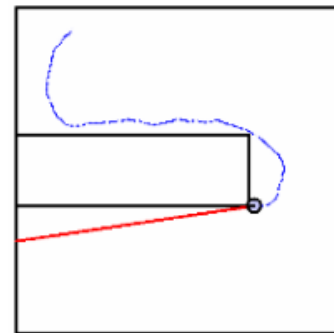


Fig. 8. fitness=7229



Fig. 9. fitness=9796

Vývoj kontroléru pro robota v kapalném krystalu - Zkoumání stability řešení

- **Změna konfigurace kapalného krystalu na základě aplikovaných signálů** - směr molekul se mění
- Mapování genotypu na fenotyp - **není zaručené stejné uspořádání molekul při dvou stejných konfiguracích** - kapalný krystal je vysoce komplexní systém
- **Možné ovlivnění přechozími konfiguracemi** - např. kondenzátory stále udržují elektrický náboj z předešlého testovaného obvodu

Závěr a zhodnocení evolution-in-materio

- **Evoluce umožňuje nalézt nekonvenční řešení**
- Umožnění provádět užitečné výpočty a experimenty
- **Možnost vývoje nových výpočetních zařízení**, které využívají fyzikálních vlastností pro počítání způsobem, které lidstvo zatím nedokázalo vynalézt
- **Mnoho dalších zajímavých oblastí ke studiu** vedle evoluce v kapalném krystalu - např. **evolute in vitro** (zlepšení vlastností amfifilních látek např. mýdla, lipidy buněčných membrán), **evolute in silico** (využití elektrických vlastností křemíku), nukleární magnetická rezonance (**NMR**) (implementace dvouvstupových logických hradel s využitím radiofrekvenčních pulsních parametrů - např. amplituda, frekvence, fáze)

Použitá literatura

- Miller, J.F., Harding, S.L. & Tufte, G. Evolution-in-materio: evolving computation in materials. *Evol. Intel.* **7**, 49–67 (2014). <https://doi.org/10.1007/s12065-014-0106-6>
- Harding, Simon & Miller, Julian. (2008). Evolution In Materio : Evolving Logic Gates in Liquid Crystal. Unconventional Computing 2005: From Cellular Automata to Wetware. 3. 10.1007/978-0-387-30440-3_190.
- Moreno J.M., Madrenas J., Cosp J. (eds) Evolvable Systems: From Biology to Hardware. ICES 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol 3637. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/11549703>
- Harding S., Miller J.F. (2005) Evolution In Materio: Investigating the Stability of Robot Controllers Evolved in Liquid Crystal. In: Moreno J.M., Madrenas J., Cosp J. (eds) Evolvable Systems: From Biology to Hardware. ICES 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol 3637. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11549703_15
- Sekanina, L. Nanotechnologie v kontextu bio-inspirovaných počítačů [online]. Poslední změna 27. dubna 2021 [cit. 5. května 2021]. Dostupné na: <https://bit.ly/3eZY0o3>.