

NEM-TOPOGRAFIKUS PROBLÉMÁK  
MEGOLDÁSA TOPOGRAFIKUS ÉS  
SZINKRONIZÁCIÓS SZÁMÍTÁSI  
ALGORITMUSOK ÉS ARCHITEKTÚRÁK  
SEGÍTSÉGÉVEL



Horváth András

Doktori disszertáció tézisei

Pázmány Péter Katolikus Egyetem  
Információs Technológiai Kar

TÉMAVEZETŐ:  
Dr. Rásonyi Miklós  
KONZULENS:  
Prof. Roska Tamás

Budapest, 2012

# 1. Bevezetés

Érdekes, hogy gondolkodásunk mily végtelen és határtalan, képzeletünknek, s absztrakcióknak nincsenek korlátai. Talán ez lehet létezésünk legnagyobb ajándéka, hogy képesek vagyunk bármit elképzelni időbeli és fizikai korlátok nélkül. Nem érzünk jelentős különbséget tíz vagy tízmilliárd változó elképzelése között. Azonban, mikor implementálnunk kell egy algoritmust, eszközeink mind kötöttek időben és térben. Amíg csupán egy feldolgozó eszközt használtunk elég volt az idő problémájával megküzdenuünk, a tér nem számított. A sokmagos architektúrák megjelenésével azonban akaratlanul is meg kell fontolnunk, milyen módon, térbeli elrendezésben helyezzük el feldolgozó egységeinket, mivel megoldásunk legvégül egy kétdimenziós szilícium lapra kerül, ahol térben kötött lesz. Az integrált áramköri technológia fejlődése elvezetett a több-milliárd tranzisztoros és a sok-ezer processzoros chippek világába emiatt a két távoli reprezentáció miatt egy szakadék keletkezett a magas-szintű absztrakció és algoritmustervezés, valamint az eszközközeli nyelvek, műveletek között. Hogy a problémát elkerüljük, szem előtt kell tartanunk a lokális számítások előnyét az algoritmustervezés alatt is, hiszen végül a módszerünk akaratlanul is topografikus, s celluláris lesz, mivel térben kötött; s a kiloprocesszoros („sokmagos”) eszközökön csupán celluláris kapcsolatok implementálhatóak hatékonyan.

Az elmúlt években megfigyelhető a többmagos architektúrák előtérbe kerülése. Ezen eszközökre nem elég a hagyományos eljárások egyszerű alkalmazása, új módszerekre, megoldásokra van szükség, mivel az eddigi mód –melynél a processzor órajelét emelték– s az eljárás lépéseinek gyorsítását célozták megváltozott, s jelenleg a processzáló egységek száma –melyek sokszor specializált egységek– emelkedik. Ezáltal felvetve új mérnöki kérdéseket, tervezési szemléleteket, kiemelve a lokalitás precedenciáját, hiszen napjainkban az egységek közti kommunikáció, mind fogyasztásban, mind a számítási sebesség meghatározásában jelentős részét teszi ki a teljes algoritmusnak.

Az így megjelent sok processzoros architektúrák rengeteg esetben megmutatták már hatékonyságukat, használhatóságukat. Számos topografikus eljárásban (legnagyobb részben a molekuláris dinamika, a nemlineáris parciális differenciálegyenletek megoldása és a képfeldolgozás terén) tapasztalhattuk hatékonyságukat s újszerűségüket, melyek mind az elosztott s lokális kommunikációra épülő számításoknak köszönhetőek.

A jelenlegi kihívások egyik legfontosabbja azonban nem az, hogy miképpen tudjuk a már meglévő topografikus módszereket még

hatékonyabb architektúrákon, optimális körülmények között végrehajtani, hanem, hogy felismerjük azon problémákat és lehetőségeket, melyek módosíthatóak, átalakíthatóak egy-egy topografikus problémává, s ezáltal könnyedén implementálhatóak egy ilyen újszerű architektúrán.

Dolgozatomban szeretném megmutatni, hogy a módszer, mellyel egy véletlen minta elemeit választjuk ki hogyan befolyásolhatja különböző algoritmusok, például az identifikáció és sztochasztikus optimalizáció hatékonyságát. Valamint az algoritmusoktól eltekintve vizsgáltam két különböző szelekciós-mechanizmus a globális és lokális szelekció által eredményezett mintasorozatok minőségét, változatosságát.

Ezt egyszerűsített modelleken keresztül hajtottam végre, mellyel igazolom a lokális szelekció használhatóságát, s belátom, hogy ezen módszerrel helyettesíthető az algoritmusok egy adott csoportjában a globális szelekció, valamint a lokális mintavételezés további előnyös tulajdonságait is igazolom ezen modellben.

Dolgozatomban megpróbáltam általános szemszögből, a problémák reprezentációjától függetlenül megközelíteni a sztochasztikus optimalizációt. Az optimalizáció kulcskérdésének, s dolgozatom egyik központi lépésének a szelekciót tekintetem.

A dolgozat második felében celluláris oszcillátor-tömbök (O-CNN) spintorque oszcillátorokból (STO) megvalósított szinkronizációjával foglalkozom, valamint igyekszem ezen szinkronizációs jelenségeket a számítási képességek szemszögből, elsősorban asszociatív memória alkalmazásában, is megközelíteni. Az oszcillátorok alaposabb vizsgálatához készítettem egy általános szimulátort mellyel különböző típusú spinoszccillátorok tetszőleges hálózata szimulálható. Analitikus megoldást adtam az 'in-plane' oszcillációval rendelkező spinoszccillátorok differenciálegyenletének megoldására, valamint a „harmonic balance” és „describing function” módszerek alkalmazásával megmutattam, hogyan számítható ki egy ilyen elemekből készített tetszőleges hálózatban a különböző oszcillátorok közötti fázis eltolódás. Megmutattam, miként állít elő spinoszccillátorok celluláris hálózata egy egydimenziós frekvencia-kódolt bemenetből egy egydimenziós fázis-kódolt kimenetet. Továbbá megmutattam, hogy ezen fázisszög hogyan függ a csatolás erősségétől és a bemenő áramtól két csatolt oszcillátor esetén. Eredményeim hozzájárultak ahhoz, hogy hatékony O-CNN tömböket lehessen tervezni STO-k alkalmazásával. Megjegyzendő hogy a „számítás szinkronizációval” a celluláris hullám-számítógépek és a CNN technológia egy új lehetőségét tárja ki.

## 2. Módszerek, eszközök

Sajnos az általános probléma, a sztochasztikus optimalizáció túl bonyolult és összetett ahhoz, hogy elméletben próbáljam megbecsülni miképpen teljesít egy-egy implementáció egy többmagos architektúrán, ugyanakkor az architektúrák típusai is szerteágazók, s ily módon lehetetlen egy minden architektúrát s minden problématípust lefedő módszer vizsgálata.

Bevezettem néhány általános modellt, melyek a problémától függetlenül képesek reprezentálni a sztochasztikus mintavételezés legfontosabb tulajdonságait. A modellek különböző mélységekben mutatják meg a sztochasztikus mintavételezés különböző képességeit, előnyeit s hátrányait egyaránt.

Hogy összekapcsoljam az általános modelleket a konkrét problémákkal, s megmutassam, hogy ezen eljárások nem csupán elméleti vizsgálódásra, hanem gyakorlati problémák megoldására is hasznosak igyekeztem általános problémákra kiterjeszteni a korábban leírt modelleket.

Így amint azt általában az irodalomban is teszik egy-egy esettanulmánnyal próbáltam meg megmutatni, miképpen használható a celluláris implementáció a gyakorlatban.

Két népszerű algoritmust választottam, melyekben fontos elem a sztochasztikus mintavételezés. Ezen két eljárás a genetikus algoritmus és az identifikáció: celluláris Particle Filter használata volt. A teszt problémák a genetikus algoritmus esetében az N- királynő, Hátizsák és az Utazó ügynök problémák voltak. Ezen problémák mindegyike NP teljes, s általános problémák, melyek kiterjeszthetők számos gyakorlati problémára.

Hogy méréseimben kiküszöböljem a véletlen hatását, minden mérést legalább 10.000-szer ismételttem, s a véletlen hatásokat ezen kísérletek átlagolásával próbáltam elkerülni.

A mérések másik fontos eszköze maga a topografikus architektúra volt. Mivel a ma kapható kiloprocesszoros chipek (FPGA,GPU) többféle különböző architektúrára épülnek egy virtuális gépet implementáltam, mely tükrözi a sokmagos architektúrák főbb tulajdonságait, s melyben a feldolgozóegységek és memóriák egy térben rendezett rácson találhatóak. Ezen architektúrát ugyanúgy, mint a szimulációkat Python nyelven implementáltam.

Szerettem volna a módszereket egy valós, már meglévő architektúrán is kipróbálni. Választásom a *Xenon<sub>v</sub>3* eszközre esett, mivel programozásával a korábbiakban már volt szerencsém megismerkedni. Ezen

eszköz programozása Assembly nyelven történik, mely hardverközeli mégis lehetőséget ad a dolgozatban vázolt algoritmusok egyszerű implementálására.

A spin-oszcillátorok vizsgálata inkább elméleti és szimulációs eredménykét tartalmaz, így itt a szükséges eszközök száma jóval kisebb volt. Azonban mindig jó kiegészítése, igazolása az elméleti munkáknak egy-egy szimuláció vagy mérés. Így elkészítettem a spin oszcillátor tömbök egy általános szimulátorát MATLAB, C és PYTHON nyelven. Ezen szimulátor lehetőséget biztosít tetszőleges paraméterű STO-k tetszőlegesen csatolt hálózatának szimulálására, akár a térbeli korlátok miatt fizikailag meg nem valósítható, nem celluláris topológiák viselkedése is vizsgálható. Az STO makromodelleket az ezzel foglalkozó kutatóktól kaptam.

Az O-CNN-STO szimulátor hasznosnak bizonyult arra, hogy a dolgozatban bemutatott két példa alkalmazást, valamint az elméleti eredményeket (mivel a gyakorlati ellenőrzésre nem volt lehetőség) legalább szimulációk által ellenőrizni tudjam.

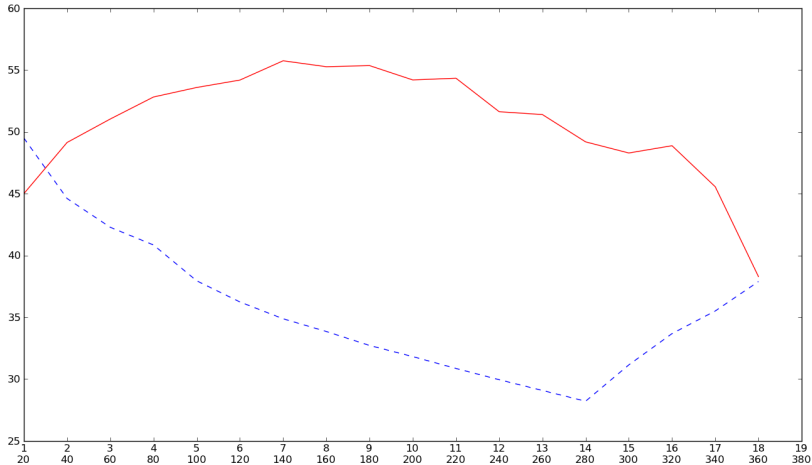
### 3. Új tudományos eredmények

#### 1. Tézis:

1.1. Tézis: *Általános modellek használatával megvizsgáltam, miképpen befolyásolja a lokális, biológia által motivált szelekció a sztochasztikus optimalizációt. Megmutattam, hogy megfelelő paraméterek (szomszédsági sugár, mutációs faktor) optimalizálása mellett az általános modellek esetében a lokális szelekció által biztosított eredmények összevethetők a globális szelekciós eljárás eredményeivel, miközben a lokális eljárás könnyedén párhuzamosítható, s tökéletesen illik a sokmagos, celluláris architektúrákra ezáltal olyan algoritmust hozva létre a futási idő csökkenthető további feldolgozó egységek számával, amíg a feldolgozó egységek száma nagyobb, mint a populáció elemeinek száma. Megmutattam a sztochasztikus szelekció –mely egy nem topografikus eljárás–, hogyan transzformálható térbeli algoritmussá, s ezáltal milyen újfajta előnyökhöz juthatunk.*

Bevezetem a biológia által inspirált, lokális sztochasztikus szelekció fogalmát, s két általános (valamint néhány specifikus) modell segítségével összevettem a hagyományosan használt globális eljárással. Az összevetést általánosnak tekinthető modelleken végeztem el, majd ezután igyekeztem ezen modellek apró módosításaival közelebb kerülni néhány gyakorlati problémához. Ezen modellek leírják, s megfelelően ábrázolják a sztochasztikus szelekció legfontosabb tulajdonságait. Ezeket keresztül megmutattam, hogy a lokális szelekció helyettesítheti a globális eljárást, valamint méréseimmel igazoltam, hogy szomszédsági sugár hangolásával beállítható az információ terjedési sebessége a mintahalmazon belül.

Megmutattam továbbá, hogy a lokális szelekció nem egy új, másfajta eljárás, hanem úgy tekinthetünk rá, mint a globális eljárás egy általános változatára, ahol a szomszédsági sugárral beállíthatjuk az információterjedés sebességét (ha a szomszédsági sugár nagyobb, mint a maximális távolság két kiválasztott elem között, visszakapjuk a globális eljárást. Valamint, ha a szomszédsági sugár értékét nullára állítjuk, visszajutunk a még egyszerűbb sztochasztikus eljáráshoz, ahol semmilyen szelekciót sem használunk). Megvizsgáltam, hogyan befolyásolja a szomszédsági sugár a minta változatoságát s a súlyozást, hogy mindig a lehető legjobb elemet válasszuk ('exploitation/exploration ratio'), ezen jelenség látható az 1 ábrán.



1. ábra. Az ábrán a lokális (piros, folytonos) és globális (kék, szaggatott) szelekció összehasonlítása látható. Az X tengelyen szereplő számok a módszerek paraméterei: minden zárójelben az első szám a szomszédsági sugár a lokális módszer esetében, a második a megőrzött elemek száma a globális eljárás esetén. A kísérleteket 400 elemet tartalmazó mintán végeztem el. Az Y tengelyen a minta heurisztika által való kiértékelése, vagyis a fitness függvény értéke szerepel; nagyobb értékek jobb megoldást jelentenek. Amint az az értékekből látszik a lokális szelekció a különböző paraméterekre fordított „U” alakú görbét mutat. Ebből következtethetünk arra, hogy megfelelő hangolással optimális szomszédsági sugár választásával javíthatjuk eljárásunk konvergenciáját a lokális eljárás esetében.

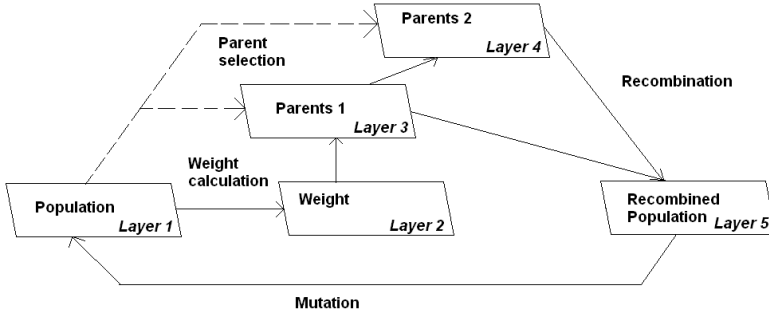
1.2. Tézis: *Általános módszert és irányelveket adtam, hogy a genetikus algoritmus miképpen implementálható egy általános, virtuális architektúrán, továbbá implementáltam a Xenon<sub>v</sub>3, CNN architektúrán a genetikus algoritmus egy módosított, általam készített celluláris változatát. Kísérletekkel igazoltam a párhuzamosított algoritmus konvergenciáját, valamint mérésekkel alátámasztottam a konvergencia sebességének gyorsulását.*

Három általános kereső probléma: utazó ügynök, az N-királynő és a hátizsák-probléma esetében is megmutattam, hogy egy CNN implementáció alacsony disszipált teljesítmény mellett képes összetett problémák gyors és hatékony megoldására. Másodpercenként 1884, 2982, 1373 iteráció futtatható az N-királynő, hátizsák és az utazó ügynök problémák esetén a Xenon<sub>v</sub>3 architektúrán. Ezen futási idők nagyságrendekkel gyorsabbak, mint más módszerek. Igyekeztem az eredményeket mostani, friss implementációkkal összevetni. A hátizsák probléma esetén a leggyorsabb általam talált megoldás hasonló komplexitású problémára 0.92 másodperc volt, mely nagyságrendi sebesség növekedést jelent az általam készített implementáció 2 milliszekundumos futási idejéhez képest. Az utazó ügynök probléma esetében egy CPU-GPU implementációval hasonlítottam össze, ahol a futási idő 0.20 másodperc volt, miközben az itt használt NVIDIA GTX 280 fogyasztása önmagában is 310 watt, a mellette futó számítógép nélkül, s ez össze sem vehető a Xenon chip 93 milliszekundumos idejével és kevesebb, mint 20 mW-os fogyasztásával. Ami azt jelenti, hogy kétszeres gyorsulás mellett a fogyasztás 1500-szor volt kisebb, mint a cikkben említett eljárásban. Így ezen implementáció sok problémában hasznos lehet, ahol optimalizációs feladatokat kell megoldanunk alacsony disszipált teljesítmény mellett, például mobil eszközökön navigáció, beszédfelismerés, vagy paraméterbecslés során.

A konkrét implementáció mellett, általánosan is leírtam, hogy miként implementálható a genetikus algoritmus egy többretegű CNN architektúrán. Így remélhetőleg ezen eljárás más celluláris eszközön történő implementációjában is segítséget nyújthat. Az általános implementáció vázlatos leírása rétegekre lebontva a 2 ábrán látható.

1.3. Tézis: *Megmutattam, hogy miként használható a lokális szelekció gondolata a Particle Filter esetében. Bevezettem a celluláris Particle filter algoritmust, melyet mind egy virtuális gépen, mind pedig a Xenon architektúrán implementáltam*





2. ábra. Az ábrán látható, hogy miként implementálhatóak és oszthatóak meg az eljárás különböző lépései egy többrétegű CNN architektúrán. Ezen módszer egy  $3 + P$  rétegű eszközön implementálható a legegyszerűbben, ahol  $P$  a rekombinációhoz kiválasztott szülők száma. Rekombináció nélkül, ha csupán egy szülő génállományát másoljuk ( $P = 1$ ) a módszer egy négyrétegű, két szülő esetében öt rétegű CNN eszközön implementálható a legegyszerűbben. A folytonos vonalak a műveleteket mutatják, melyek végrehajthatók nemlineáris CNN template-ek sorozataként, a szaggatott vonalak csupán egyszerű érték-másolások a rétegek között. Az ábra bemutatja, hogy melyik művelet eredménye mely rétegben tárolható, s milyen műveletek kapcsolják össze a rétegeket. Ezen vázlat az alapja a *Xenon\_v3* chipen történt implementációnak is.

Ezen probléma esetében is három esettanulmányon keresztül mutatam be az eljárás használhatóságát, hatékonyságát. Itt is mind a szimulációs eredmények, mind a fizikai implementáció a *Xenon\_v3* architektúrán megtalálható. Rejtett Markov modellek esetén megmutattam, miként használható állapotbecslésre a celluláris particle filter akár általános esetben is, olyan modelleknél, mikor a Kálmán-szűrő használata már nem lehetséges, valamint az állapottér folytonossága (vagy végtelensége) miatt a Baum-egyenlet alkalmazása sem segít. Megmutattam, hogy ezen eljárás nem csupán a rejtett állapotok állapotbecslésére használható, hanem eloszlásukat is pontosan közelíti, így a későbbiekben ezen eljárás használható lehet nem csupán állapotok, de feltételes várhatóértékek, valószínűségek vagy eloszlások becslésére is. Megmutattam általánosan használt modellek esetében is, hogy a celluláris változat nem csak rövidebb futási idővel rendelkezik, s könnyedén skálázható, hanem hogy

1. táblázat. A táblázatban egy általánosan használt, s az irodalomban sok helyen megtalálható modellen végzett vizsgálat eredményei láthatóak. Az első oszlopban láthatjuk a használt részecskék számát, a második oszlopban a hagyományos eljárás hibája, a harmadikban az általam készített topografikus, celluláris Particle Filter eredményei láthatóak. Az eredmények a helyes állapottól mért átlagos négyzetes hibát tartalmazák, így a kisebb értékek jobb eredményt takarnak. Minden érték 1000 átlagából készült, hogy kiküszöböljük a modell által származó véletlen zajt. Ahogy az az eredményekből látható megfelelő paraméterek esetén (sok részecske használatával), a celluláris eljárás hibája kisebb.

Részecskék száma	Pfilter	Celluláris PF
16	66.42	77.38
36	55.44	61.61
49	53.66	57.17
64	52.56	54.65
81	51.65	53.00
100	50.98	51.58
144	50.51	49.69
225	50.01	48.44
400	49.49	47.61
625	49.16	47.08
900	49.13	47.01

megfelelő paraméterek beállításával (ha a részecskék száma kellően nagy) kisebb hibával közelíti a rejtett állapotot. Valamint szintén néhány esettanulmány segítségével ezen helyesebb becslés okát is megmutattam, s megmértem, hogy a celluláris, topografikus eljárásban a részecskék halmaza sokkal változatosabb, az információ topografikus, diffúz terjedése miatt, mialatt a minta „minősége” megegyezik (vagy néhány esetben jobb) a hagyományos particle filter eljárásnál. Néhány példa eredmény látható a 1 táblázatban, mely egy az irodalomban általánosan használt modell állapotbecslése. Ahogy az az eredményekből látható megfelelő paraméterek esetén (különösen sok részecske használatával), a celluláris eljárás hibája kisebb.

## 2. Tézis:

2.1. Tézis: *Analitikus megoldást adtam egyetlen spin oszcillátort tartalmazó cella egyensúlyi helyzetére. Ezáltal nincs szükség a dif-*

*ferenciálegyenlet számításigényes numerikus megoldására, hanem egy zárt formula segítségével kiszámíthatjuk az oszcilláció paramétereit (az oszcilláció síkját és frekvenciáját) az oszcillátor geometriájának, bemenő áramának és mágneses permeabilitásának függvényében.*

A spin oszcillátorok egyszerű makromodellje az alábbi differenciálegyenlettel írható le:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma(\mathbf{M} \times \mathbf{H}) - \gamma\alpha\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}) - \gamma A\mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{S}) \quad (1)$$

Ahol  $\mathbf{M}$  a spin,  $\mathbf{H}$  a mágneses tér,  $\mathbf{S}$  az átfolyó áram iránya,  $A$  az átfolyó áram erőssége  $\times$  jelöli a vektorok közti keresztszorzatot,  $\gamma$  és  $\alpha$  pedig fizikai konstansok, a gyro-magnetikus állandó és a mágneses hatékonyság.

Ezen egyenletből levezethető az  $\mathbf{M}$  vektor harmadik komponensének ( $M_z$ -nek) fixpontja, mely meghatározza az oszcilláció síkját:

$$M_z^* = -\frac{A}{\alpha M_s(N_x - N_z)} = \frac{A}{\alpha M_s \delta} \quad (2)$$

Ahol  $\mathbf{N} = (N_x, N_y, N_z)^T$  az eszköz geometriáját leíró vektor, valamint  $\delta = N_z - N_x = N_z - N_y$ .

Ezután az oszcilláció egy körmozgás egyenletével, harmonikus mozgásként írható le, melynek paramétereit a következők:

Az oszcilláció frekvenciája:inbox

$$\omega = \frac{\gamma A}{\alpha} \quad (3)$$

$S$  az oszcilláció amplitúdója pedig:

$$B = \sqrt{(1 - M_z^{*2})} \quad (4)$$

Az elméleti eredményeket az általam írt szimulátorral is ellenőriztem, s a szimulációk tökéletesen egyeznek az elméleti eredményekkel.

Mivel mérnöki szempontból minket csupán az egyensúlyi helyzet érdekel, s nem a temporális változás, így ezen egyenlet nagy segítség lehet a spin oszcillátorok vizsgálatában, mivel nincs szükség a differenciálegyenlet számításigényes numerikus megoldására, hanem egy zárt formula segítségével kiszámíthatjuk az oszcilláció paramétereit.

2.2. Tézis: *Leképezést adtam egy spinoszillátorokból készült celluláris hálózat esetében a frekvencia-kódolt bemenet és a fáziskülönbség-kódolt kimenet között. A „Harmonic Balance” módszer segítségével közelítő megoldást adtam tetszőleges STO-k hálózatában a szinkronizálódott oszcillátorok fázisszögének kiszámítására. Megmutattam továbbá, hogy amennyiben a csatolási erősség az  $x$  és  $y$  komponensben azonos ezen megoldás pontos, a közelítő megoldás hibája nulla, valamint, hogy más esetekben is a közelítés hibája négy nagyságrenddel kisebb, mint az eredeti oszcilláció amplitúdója. Az egyenletek segítségével példát adtam rá, hogy milyen lehet egy architektúra melynél a feldolgozóegységek oszcilláló nano eszközök CNN hálózata (akár egy-egy, vagy néhány atomból állnak), valamint egy-egy egyszerűbb esettanulmányon keresztül bemutattam, milyen topografikus számítások végezhetőek el egy ilyen architektúrán.*

Gyengén csatolt hálózatban az oszcillátorok közötti kapcsolat s ezáltal a szinkronizáció is a mágneses mezőn keresztül történik:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{eff} &= -\mathbf{H}_i + \mathbf{G}_j \\ &= -M_s \begin{pmatrix} N_x M_{x_i} \\ N_y M_{y_i} \\ N_z M_{z_i} \end{pmatrix} + M_s \begin{pmatrix} C_x^j M_{x_j} \\ C_y^j M_{y_j} \\ C_z^j M_{z_j} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Az  $i$ -ik és  $j$ -ik oszcillátorok között között a csatolási erősség a  $\mathbf{C}$  vektorral adható meg. S ezáltal kiszámítható a effektív mágneses mező:  $\mathbf{H}_{eff}$ .

Tetszőleges STO hálózat közelítése lehetséges azon egyenletek segítségével, melyeket a „Harmonic Balance” és „Describing Function” spektrális megoldómódszerek segítségével vezettem le. Így kiszámolható a fázis eltérés a szinkronizálódott oszcillátorok között.

Ha bevezetjük az alábbi vektorokat:

- $\mathbf{P} = (P_1, P_2 \dots P_N)'$
- $\mathbf{K} = (K_1, K_2 \dots K_N)'$
- $\mathbf{\Theta} = (0, \theta_{0-1} \dots \theta_{0-N})'$
- $\mathbf{A} = (A_1, A_2 \dots A_N)'$

Ahol  $\mathbf{K}$  az oszcillációk síkjai, vagyis a fixpontok vektora a harmadik komponensben,  $\mathbf{A}$  a bemenő áramok erőssége,  $\mathbf{P} = \sqrt{1 - \mathbf{K}^2}$ , valamint  $\Theta$  az oszcillátorok közötti relatív fáziskülönbségek vektora.

$\mathbf{R}_{xy}$  a csatolási mátrix az  $x$  és  $y$  komponensekben, s ugyanígy  $\mathbf{R}_z$  a harmadik komponensben található csatolási erősség.

Az ezáltal kapott egyenletrendszer a következő:

$$\begin{aligned} & \eta\alpha\delta\mathbf{K} \circ \mathbf{P} - c\mathbf{A} \circ \mathbf{P} - \eta\alpha(\mathbf{R}_z\mathbf{K}) \circ \mathbf{P} = \\ & = -\eta\mathbf{R}_{xy}(\mathbf{P} \circ \sin(\Theta)) - \eta\alpha(\mathbf{R}_{xy}(\mathbf{P} \circ (\cos\Theta))) \circ \mathbf{P} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{P}\omega = \eta\alpha\mathbf{K} \circ \mathbf{P} + \eta(\mathbf{R}_z\mathbf{K}) \circ \mathbf{P} \\ & -\eta\mathbf{R}_{xy}(\mathbf{P} \circ \cos(\Theta)) \circ \mathbf{P} \circ \mathbf{K} + \eta\alpha\mathbf{R}_{xy}(\mathbf{P} \circ \sin(\Theta)) \end{aligned} \quad (7)$$

Megmutattam, hogy ha  $C_x$  egyenlő  $C_y$ -nal, a fenti megoldás pontos. Valamint, amennyiben a csatolások ezen két komponensben nem azonosak, oszcillációlép fel a  $z$  komponensben. Ezen oszcilláció azonban négy nagyságrenddel kisebb, mint a másik két komponensben lévő oszcilláció amplitúdója, így az általam leírt közelítés a gyakorlatban használható.

Valamint levezettem a fenti egyenletek egyszerűbb változatát két csatolt oszcillátor esetére:

$$\theta = asin\left(\frac{A_\Delta}{2rM_s}\right) \quad (8)$$

ahol  $A_\Delta$  a két oszcillátor bemenő feszültsége közti különbség,  $r$  a köztük lévő csatolás erőssége (mely a köztük lévő távolsággal arányos),  $M_s$  pedig a mágneses szaturáció.

Ezen egyenletből jól látható, hogy a fázisszög lineárisan függ a feszültségkülönbségtől, s hiperbolikusan a csatolás erősségétől (mivel  $M_s$  értéke a többi paraméter értékéhez viszonyítva nagy).

Továbbá a fenti egyenletek alapján terveztem, s szimuláltam két esettanulmányt ahol egy topografikus, celluláris STO makromodellekre épülő hálózatot számításra használhatunk: Az első esetben egy egyszerű szürke-skálás éldetekciót hajt végre a hálózat a bementi képekre, a második esetben pedig egy bonyolultabb térbeli változásdetekciót hajt végre, mely nem csupán a pixelek eltérését veszi figyelembe, hanem azok térbeli elhelyezkedését is, ezáltal jól használható zajszűrésre, objektum szegmentációra.

## 4. Az eredmények alkalmazási területei

A dolgozatban bemutatott modellek jól tükrözik a sztochasztikus szelekció fő tulajdonságait, így általában, s a legtöbb eljárásban érvényesek. Így az ott megmutatott módszerek is, mellyel megmutattam, miként használható a celluláris lokális szelekció a globális eljárás helyett. Így ez, mint példa sokat segíthet, hogy miként implementálható egy nem topografikus probléma megoldása topografikus algoritmusként.

A konkrét implementáció is sokat segíthet optimalizációs problémák esetében, így az előszeretettel (s különösen a képfeldolgozás, PDE megoldás területén gyakran) használt különböző fizikai megvalósítású CNN chipek illetve celluláris architektúrájú eszközök akár optimalizációra s identifikációra, állapotbecslésre is használhatóak, bizonyos problémák esetén. Ezen topografikus algoritmusok ideálisak olyan problémák megoldására, mikor alacsony fogyasztás mellett, rövid futási idővel kell problémákat megoldanunk. A *Xenon<sub>v3</sub>* chip 20 mW-os fogyasztása ideális lehet olyan alkalmazásokban, mint a robotika, mobil kommunikáció, navigáció. Valamint nem csupán a konkrét implementációk lehetnek hasznosak, hanem érdekes lehet ezen (sőt akár más hasonló) eljárások problémáspecifikus implementálása egyéb sokmagos eszközökön, mint például FPGA-kon vagy GPU-kon.

A dolgozat második felében bemutatott architektúrák pedig olyan rendkívül alacsony fogyasztású eszközök számítási modelljeit mutatják be, ahol az információhordozó nem a töltés, hanem a spin. Ezen architektúrák számítóegységei akár néhány (már egy-egy) atomból is megvalósíthatóak, így valós alternatívaként merülnek fel a Moore törvény utáni számítási eszközök között. Az általam adott analitikus megoldás nagyban segítheti az ilyen eszközök szinkronizációjának vizsgálatát. Az elméleten túl két példa által megmutattam, hogy egy ilyen hálózat hogyan használható egyszerű számítási feladatokra. Ugyan a fizikai korlátok miatt ezen hálózatok még nem megvalósíthatóak, de remélhetőleg a jövőben gyakorlatban is tesztelhetőek lesznek spinoszillátorokból készült eszközök, s ezek fejlesztésében hasznos lehet a tervezés során, ha csupán hagyományos egyenleteket kell megoldani a differenciálegyenletek helyett.

A dolgozatomban szerettem volna megmutatni, hogy a topografikus korlátok figyelembevétele miként befolyásolhatja az algoritmusfejlesztést, mit tehetünk, hogy elkerüljük ezen korlátokat, s hogyan segíthet nekünk, hogy nem topografikus problémákat oldjunk meg. Remélhetőleg ezen gondolatmenet a továbbiakban segíthet más problémák,

s problémaosztályok kilo- és mega-processzoros architektúráján történő leképezésében.

## 5. Köszönetnyilvánítás

Mindenek előtt szeretném megköszönni *Rásonyi Miklósnak* és *Roska Tamásnak* állandó, kitartó segítségüket, irányelveiket, témavezetésüket, töretlen lelkesedésüket és atyai iránymutatásukat tanulmányaim során.

Szeretném megköszönni minden idősebb és fiatalabb kollégámnak, akikkel minden ötletemet, vad gondolatomat megvitathattam: *Tornai Gábornak*, *Radványi Mihálynak*, *Fülöp Tamásnak*, *Zsedrovits Tamásnak*, *Koller Miklósnak*, *Stubendek Attilának*, *Szabó Vilmosnak*, *Füredi Lászlónak*, *Reguly Istvánnak*, *Józsa Csabának*. Nagymértékben megkönnyítették tanulmányaimat, s önfeledtebbé tették ezen időszakot számomra, melyért köszönet illeti őket.

Köszönet illeti azon kitűnő matematika tanárokat is akik remek előadásokkal tették érdekesebbé, izgalmasabbá tanulmányaimat, s akiktől rengeteget tanulhattam, rendkívül hálás vagyok *Garay Barnának* és *Gerencsér Lászlónak*.

Köszönöm a *Pázmány Péter Katolikus Egyetem* támogatását, hogy ezen programban részt vehettem, valamint ugyanígy köszönöm a *Leuveni Katolikus Egyetem* és a *Politecnico di Torino* támogatását, ahol tanulmányaim során egy-egy szemesztert tölthettem.

Munkám, tanulmányaim kevesebbet érnének a *Rekeczky Csabával* és a *Eutecus Inc.* tagjaival folytatott megbeszélések nélkül, s köszönöm, hogy minden próbálkozásban ötletben segítettek, s gyakorlati problémákon is lemérhettem, vizsgálhattam ötleteimet.

Nagy hálával tartozom *Fernando Corinto*-nak, *Giovanni Paziienza*-nak, *Csaba Gyurinak* és *Jan D'hooge*-nak szívélyes segítségükért, tapasztalatukért és tanácsaikért.

Különösen hálás vagyok *Timinek* aki folyamatosan biztatott és segített tanulmányaim és a dolgozat megírása során. A legnagyobb köszönet pedig édesanyámat, édesapámat és családomat illeti, akik mindig hittek bennem s minden kísérletemben az összes lehetséges módon támogattak.



## 6. A szerző publikációi

- [1] **András Horváth** and M. Rasonyi, „Implementation of cellular genetic algorithms on a cnn chip: Simulations and experimental results,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2012.
- [2] **András Horváth** and M. Rasonyi, „Topographic implementation of particle filters on cellular processor arrays,” *Elsevier Signal Processing (Submitted)*, 2012.
- [3] **András Horváth**, T. Roska, A. Stubendek, D. Voils, F. Corinto, G. Csaba, W. Porod, T. Shibata, D. Hammerstrom, and G. Bourianoff, „O-cnn vice spin torque oscillator cells and cellular spin-wave interactions in an associative memory,” *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2012.
- [4] E. An, **András Horváth**, and L. Dirk, „3d cardiac strain estimation using spatio-temporal elastic registration : in-vivo application,” in *IEEE International Ultrasonics Symposium*, (Beijing,China), IEEE, November 2008.
- [5] **András Horváth** and M. Rasonyi, „Fast computation of particle filters on processor arrays,” in *12th IEEE international workshop on cellular nanoscale networks and applications*, (Berkeley, California), IEEE, February 2010.
- [6] **András Horváth**, F. Corinto, G. Csaba, W. Porod, and T. Roska, „Synchronization in cellular spin torque oscillator arrays,” in *13th IEEE international workshop on cellular nanoscale networks and applications*, (Turin, Italy), IEEE, August 2012.
- [7] G. Csaba, M. Pufall, D. Nikonov, G. Bourianoff, **András Horváth**, T. Roska, and W. Porod, „Spin torque oscillator models for applications in associative memories,” in *13th IEEE international workshop on cellular nanoscale networks and applications*, (Turin, Italy), IEEE, August 2012.
- [8] T. Roska, **András Horváth**, A. Stubendek, F. Corinto, G. Csaba, W. Porod, T. Shibata, and G. Bourianoff, „An associative memory with oscillatory cnn arrays using spin-torque oscillator cells and spin-wave interactions – architecture and end-to-end simulator,” in *13th*

*IEEE international workshop on cellular nanoscale networks and applications*, (Turin, Italy), IEEE, August 2012.