



## Celluláris neurális/nemlineáris hálózatok alkalmazása a fizikában

*Ph. D. disszertáció tézisei*

Ercsey-Ravasz Mária-Magdolna

Tudományos vezetők:

Dr. Roska Tamás,  
az MTA rendes tagja

Dr. Néda Zoltán  
az MTA külső tagja

Pázmány Péter Katolikus Egyetem  
Információs Technológia Kar

és a

Babeş - Bolyai Tudományegyetem  
Fizika Kar

Budapest, 2008

”The real danger is not that computers will begin to think like men, but that men will begin to think like computers.”

”Az igazi veszély nem az, hogy a számítógépek elkezdenek emberekhez hasonlóan gondolkodni, hanem az, hogy az emberek kezdenek számítógépekhez hasonlóan gondolkodni.”

Sydney J. Harris

# 1. Bevezetés, kitűzött feladatok

A gyors technikai fejlődés ellenére még mindig nagyon sok tudományág elégedetlen a mai számítógépek sebességével és teljesítményével. Egyre komplexebb feladatokat próbálunk megoldani, egyre nagyobb rendszereket szimulálunk, olyan óriási adatbázisokat akarunk feldolgozni, amelyeknek a tárolása is gondot okoz. Ez néhány példa, ami emlékeztet arra, hogy a számítógépek teljesítményének, a Moore törvény által kifejezett [11], exponenciális növekedését tartani kell. Ugyanakkor tudjuk, hogy ez a gyors növekedés már nem folytatódhat ugyanilyen ütemben, ha csak a megszokott, maximum néhány processzorból felépített, klasszikus digitális számítógépekkel dolgozunk. Új számítástechnikai paradigmákra van szükség.

A számítástechnika fejlődését mindig is mélyen befolyásolta és irányította a rendelkezésre álló technológia. A Neumann János találmánya, a digitális tárolású programozható számítógép [12], okozta áttörés után a számítástechnikában nagyon sok ideig csak diszkrét változókat és aritmetikai illetve logikai műveleteket használtak, mindig egyetlen egy processzoron. A mikroprocesszorok forradalma az 1970-es években kezdődött, és az 1980-as évek személyi számítógép (PC) iparához vezetve, szinte mindenki számára elérhetővé tette a számítógépeket. Azóta folyamatosan jelennek meg az egyre nagyobb sebességű processzorok. A növekvő sebesség a processzorok karakterisztikus méretének a csökkenéséből ered. Ez a folyamat most már lassulóban van, mivel az atomi méretek határa közeledik, ugyanakkor egy CMOS chip vesztesége lassan üti a  $\sim 100$  W értéket. Ha folytatni akarjuk a sebesség és teljesítmény fejlődését új elveken működő számítógépekre lesz szükség.

Egy másik jelenség, amelyből kiderül, hogy a mai digitális számítógépek önmagukban már nem állják meg a helyüket, az a szenzorok gyors fejlődésében látható. Ez az 1990-es években kezdődött és valószínűleg egy új iparághoz vezet. Nagyon olcsó mikro-elektromechanikus rendszerek, különböző érzékelők (mesterséges szem, fül, orr) jelennek meg és válnak elérhetővé. Ezek mind feldolgozásra váró analóg jeleket gyártanak. A digitális számítógépek, még egy tucat

vagy 20 processzorral sem megfelelőek erre a feladatra.

Egész mostanig, a számítástechnikára gondolva nemcsak az volt triviális, hogy az adatok diszkrét változók, az idő diszkrét és a műveletek aritmetikai illetve logikai műveletek, hanem a processzorok geometriai elhelyezése - ha egyáltalán több volt mint egy - teljesen irreleváns volt. Ma a helyzet teljesen más. Egy millió 8-bites mikroprocesszor helyezhető el egyetlen 45 nm-es CMOS chipen, a legnagyobb szuperszámítógépben (Blue Gene) negyed millió processzor van, és az új vizuális mikroprocesszor, a Q-Eye chip, 25 ezer processzort tartalmaz, mindegyik 4 optikai szenzonnal. Itt már a fizikai paraméterek, mint a vezetékek okozta késések, illetve az energia veszteség is szerepet játszanak a számítástechnika algoritmikai elméletében. Tehát felmerül a kérdés: mi lesz a prototípus architektúrája a talán millió processzort is tartalmazó és több billió művelet/szekundum teljesítményű, nanoskálájú rendszereknek, és milyen algoritmusokkal lehet irányítani ilyen rendszereket?

A folyamatosan fejlődő kvantitatív idegtudomány fényében lehetőség nyílt annak a megértésére, hogy az idegrendszer az információkat milyen jelek segítségével és hogyan közvetíti. Ezzel párhuzamosan egy forradalmian új számítástechnika fejlődik ki. A több ezer, egyetlen chipre elhelyezett, lokálisan kölcsönható mikroprocesszor (cella) hasonlóná válik egy réteg neuronhoz, imitálva az idegrendszer bizonyos alaptulajdonságait. Ennek a nem konvencionális számítástechnikának egy javasolt architektúra prototípusa a Celluláris Hullám Számítógép (Cellular Wave Computer) [13, 14], ennek egy speciális esete pedig a Celluláris Nemlineáris/Neurális Hálózat Univerzális Gép (Cellular Nonlinear/Neural Network Universal Machine, CNN-UM) [15, 16].

A CNN számítógépek története 1988-ban kezdődött, amikor a celluláris nemlineáris/neurális hálózatok (CNN) elméletét bemutatták [17]. Pár évvel később egy celluláris neurális hálózatokat alkalmazó számítógép részletes tervét is kidolgozták. Ezt nevezzük CNN Univerzális Gépnek (CNN-UM) [15]. Ez egy analogikai (analog+logikai) számítógép, amelynek a fő processzorán több ezer lokálisan kölcsönható, párhuzamosan működő komputációs egység (cella) van elhe-

lyezve. Azóta több kísérleti hardvert is készítettek és teszteltek [18, 19, 20]. Amint említettük a legújabb chip, a Q-Eye, amely az Eye-Ris kamera számítógépben található [21], 25000 cellát tartalmaz, mindegyiken 4 optikai szenzorral. 10000 ezer képet is fel tud venni egy másodperc alatt, és a fogyasztása csak 2500 mW egy 30 mm<sup>2</sup> chip esetében. Ezeket a chipet könnyen csatlakoztatni lehet a digitális számítógépekhez és speciális nyelveken programozni lehet őket. Annak ellenére, hogy a CNN-UM számítógép egy univerzális Turing gép [22], a struktúrája és tulajdonságai főleg bizonyos komplex problémák megoldására teszik alkalmassá, ezért nem helyettesítője, hanem sokkal inkább kiegészítője a jelenlegi számítógépeknek.

A legtöbb CNN-UM chipet gyors képfeldolgozásra használják [23]. Ennek az oka, hogy a cellák optikai szenzorokat is tartalmazhatnak, így a CNN számítógép egy nagyon gyors és "okos" kameraként tud működni, amelyen a képfelvételt valós idejű képfeldolgozás is követi [20]. Mint számítógép-fizikus meggyőződésemm volt, hogy a fizikában is sok hasznos alkalmazása lehet a CNN alapú számítógépeknek. Már több előzetes tanulmány bizonyította, hogy ez az új számítástechnikai paradigma felhasználható parciális differenciál egyenletek megoldására [24, 25] és sejtautomata modellek tanulmányozására [26, 27]. Ezek az alkalmazások közvetlenül a CNN struktúrájából adódnak.

Doktori tanulmányaim alatt kidolgoztam néhány új, statisztikus fizikához kapcsolódó alkalmazást. Az első egy valószerű véletlenszám generátor, amely a CNN-UM chip természetes zaját felhasználva generál bináris véletlen-számokat [1] (3. Fejezet). Ezt a véletlenszám-generátort használva már különböző sztochasztikus (Monte Carlo típusú) szimulációkat lehet implementálni a CNN számítógépen. Kidolgoztam a rácspont perkolációs feladat és a két-dimenziós Ising modell CNN algoritmusait, tesztelve ezeket az ACE16k chipen [2] [4] (4. Fejezet). Kutatásaimnak egy sokkal elméletibb részében lokálisan változó paraméterekkel rendelkező CNN-t is tanulmányoztam. Kimutattam, hogy egy olyan CNN amelyben minden kötés paraméterei külön kontrollálhatóak, hasznos lehet NP-nehéz feladatok megoldásában. Egy speciális alkalmazásként két-dimenziós spinűvegek optima-

lizálásával foglalkoztam [3] (5. Fejezet). Utolsó témakörként olyan általánosított, nem-standard CNN hálózatot vizsgáltam, amelyben a cellák fényvel kommunikáló, globálisan csatolt, tüzelő oszcillátorok. Mivel ez egy hosszabb projekt első része, főleg a rendszer kollektív viselkedését és a fellépő szinkronizációs jelenségeket tanulmányoztam. Ezek megértése azért fontos, mert rávezethetnek, hogy milyen hasznos funkciókat képes megoldani egy ilyen összetett, komplex rendszer [5] (6. Fejezet).

## 2. A vizsgálatok módszerei

Kutatásaim során elméleti, számítógép szimulációs és kísérleti módszereket is használtam.

A megfelelő CNN műveletek és algoritmusok megtalálásában a celluláris neurális hálózatok elmélete segített, beleértve a Chua és Yang által bizonyított tételeket is [17], amelyek segítségével be tudtam bizonyítani a CNN és spinűvek közti analógiát. Munkám során statisztikus fizikai és jól ismert sztochasztikus szimulációs módszereket is használtam.

A valószínű véletlenszám generátor kidolgozásának módszere eredetien ötvözi a fizikai jelenséget (a CNN-UM chipen jelenlevő termikus zajt) az implementált algoritmussal, vagyis a választott kaotikus sejtautomata modellel. A véletlenszám generátort és a többi sztochasztikus CNN algoritmust mindig először az Aladdin programcsomagban található szimulátoron teszteltem [28]. A programok Analogic Macro Code (AMC) nyelven íródtak. Sikeres tesztelés után a programot átírányítottam a Bi-i v2 rendszerre [20], amely tartalmaz egy DSP-t és az ACE16k,  $128 \times 128$  cellás CNN chipet. Az időméréseket is ezen a chipen végeztem.

Amikor egy térben változó paraméterekkel rendelkező celluláris neurális hálózatot akartam szimulálni (lásd 5. Fejezet), már nem tudtam használni az Aladdin szoftver CNN szimulátorát, mivel abban a paramétereket nem lehet külön minden cellára kontrollálni. Ugyanakkor egy gyors szimulációs módszerre volt szükségem, mert a

spinűvegek optimalizálása, NP-nehez feladat lévén, nagyon időigényes. Végül én magam írtam meg C-ben a CNN szimulációját, a parciális differenciál egyenletek szimulációjánál a 4-ed fokú Runge-Kutta módszert használva. A szimulátort természetesen leterjesztettem ismert, sokat használt templétekkel, ugyanakkor az optimalizálási módszerem eredményeit is összehasonlítottam az - ugyancsak C-ben megírt - klasszikus szimulált hűtés eredményeivel.

A 6. fejezetben bemutatott, fényvel kommunikáló oszcillátorokból felépített celluláris nemlineáris hálózat kísérleti berendezését Tunyagi Arthur és Ioan Burda tervezte [5]. Kísérletezésre alkalmas rendszert építettek: egy számítógépes program segítségével vezérelni lehet a rendszert, beállíthatóak a paraméterek, ugyanakkor a mérési adatok automatikusan lementhetők adatfile-okba, amelyek utólag már könnyen feldolgozhatók Matlab vagy C segítségével.

### 3. Új tudományos eredmények

1. Tézis: *Valószerű véletlenszámok generálása a CNN Univerzális Gépen egy, a CNN-UM chip természetes zajával perturbált, kaotikus sejtautomata modell felhasználásával [1] [4].*

Sztochasztikus szimulációk sikeres implementálásához kulcsfontosságú egy jó véletlenszám generátor. Kihhasználva, hogy a CNN-UM chip részben analóg, felhasználtam a chip természetes zaját "valószerű" véletlenszámok, egész pontosan bináris random képek nem-determinisztikus szekvenciáinak, generálására. Ez fontos előnyt jelent a digitális számítógépekkel szemben, főleg Monte Carlo típusú szimulációk esetén. A CNN-UM chip természetes zaja általában térben és időben erősen korrelált, ezért nem lehet közvetlen módon felhasználni random képek generálására. Az én módszeremben egy kaotikus sejtautomata modellt használok, amelyet minden időlépés után megzavarok ezzel a zajjal. A használt, megfelelő CNN templétekkel generált, kaotikus sejtautomata tulajdonságai miatt, a zaj korrelációi nem hoznak be korrelációkat a random képekben, de az

igazi véletlen-zaj megszünteti a sejtautomata determinisztikus tulajdonságait [1].

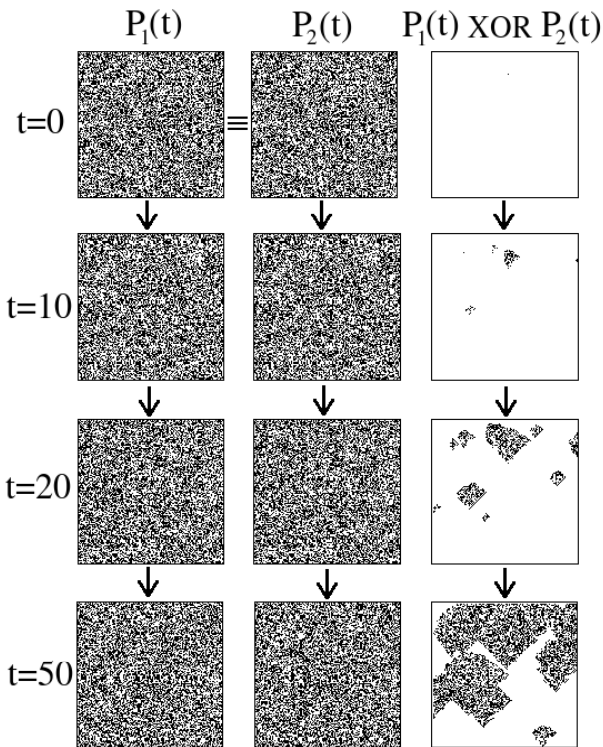
**1.1. A CNN-UM chip természetes zajával perturbált kaotikus sejtautomata modell felhasználásával kidolgoztam egy algoritmust, amely olyan bináris random képet generál, amelyeken a fehér és fekete pixelek valószínűsége  $1/2$ .**

Egy olyan pszeudo-random generátort használtam fel (PNP2D), amelyet már teszteltek a CNN Univerzális Gépen [27, 29]. Ez egy meglehetősen egyszerű és gyors, kaotikus sejtautomata, amely kis korrelációkat mutat, és tesztek alapján már kimutatták, hogy egy jó pszeudo-random generátor. Bináris, 0 (fehér) és 1 (fekete), értékeket generál, azonos  $1/2$  valószínűséggel, függetlenül a kezdeti állapottól.

Az én algoritmusomban a kaotikus sejtautomata által adott bináris képet (tömböt), minden időlépés után megzavarom egy zajos bináris képpel (kizáró-vagy művelettel). Ezt a zajos képet egy egyszerű CNN templéttel kapom, amely egy  $a$  értékű szürke-skálájú képet, bináris képpé alakít egy  $a + z$  küszöbértéket használva. Így a perturbáció eredménye végül is az, hogy minden olyan cella állapota (fehér, 0, vagy fekete, 1), amelyben az analóg értékeken levő zajszint meghaladja a  $z$  értéket, megváltozik. Ez a perturbáció általában elég kicsi, és természetéből kifolyólag nem rontja el a sejtautomata jó statisztikáját, amint ezt a korrelációs tesztek is igazolják (lásd 3. Fejezet) [1]. Ellenben a sejtautomata nem marad determinisztikus, a kis perturbációk miatt két azonos állapotból indított randomszekvencia nagyon hamar eltér egymástól (1. ábra).

A kísérleteket a  $128 \times 128$  cellával rendelkező, Bi-i v2 kamera számítógépbe beépített ACE16k chipen végeztem. Az időmérések azt mutatják, hogy egy véletlenszám generálásához szükséges idő átlagosan csak 7 ns. Egy 2.8 GHz-es Pentium 4. számítógépen, amely csak pszeudo-random számok generálására alkalmas, ez az idő megközelítőleg 33 ns. Látható, hogy a valószínű véletlenszámok generálásának előnye mellett, a CNN számítógép párhuzamossága se-





1. ábra. A generátor nem-determinisztikus jellegének bemutatása. Az ábra két első oszlopában,  $P_1(t)$  és  $P_2(t)$ , két azonos kezdeti állapotból indított ( $P_1(0) = P_2(0)$ ) random-kép sorozatot láthatunk a  $t = 0, 10, 20, 50$  iterációs lépésekben. A harmadik oszlopban mindig a két képen végzett kizáró-vagy művelet eredménye látható:  $P_1(t) \text{ XOR } P_2(t)$ . Egy determinisztikus generátor esetében, az azonos állapotból indított szekvenciák minden időlépésben azonosak lennének, így a kizáró-vagy művelet eredménye mindig egy fehér kép lenne. Itt látható ahogy a kis perturbációk megjelennek és szétterjednek, és nagyon hamar teljesen különböző random képeket eredményeznek.

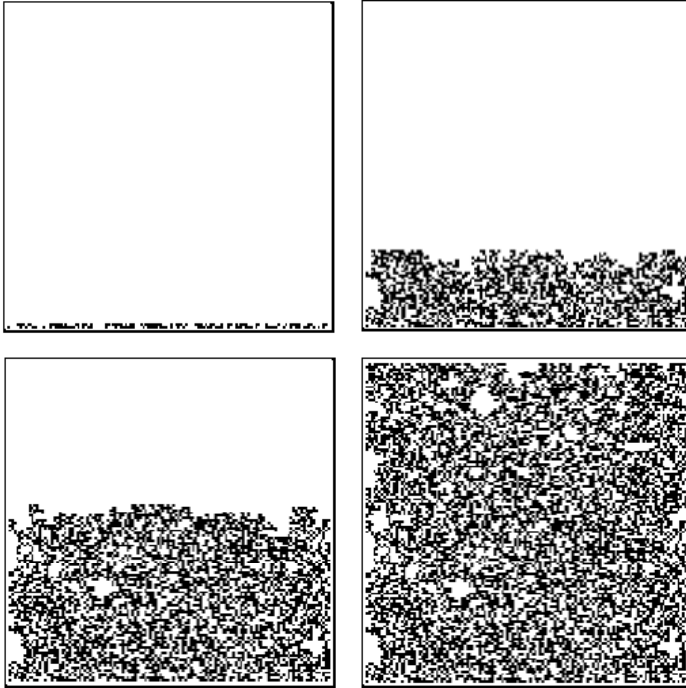
bességben is előnyt biztosít [1].

**1.2. Kidolgoztam egy algoritmust, amely több, az előző algoritmussal generált,  $1/2$  sűrűségű random képből, a fekete pontoknak akármilyen  $p$  valószínűségével rendelkező véletlen képet elő tud állítani.**

Amikor a véletlenszám generátort sztochasztikus szimulációkban kell felhasználnunk, fontos, hogy a véletlen kép fekete pontjainak sűrűsége változtatható és kontrollálható legyen. Ezt  $n$  darab, az előző algoritmussal generált,  $1/2$  sűrűségű kép,  $P_1, \dots, P_n$ , felhasználásával oldottam meg. Ezekből  $n$  darab olyan független, egymást nem fedő képet generálok,  $I_1, \dots, I_n$  ( $I_i$  AND  $I_j = \emptyset$  bármely  $i \neq j$ ), amelyeken a fekete pontok valószínűsége  $p_i = 1/2^i$ . Ezeket felhasználva már a fekete pontok valószínűségének akármilyen,  $n$  bittel reprezentált,  $p$  értékével rendelkező kép előállítható (lásd 3. fejezet) [1].

2. Tézis: *Fontos, klasszikus statisztikus fizikai problémák CNN-UM algoritmusainak kidolgozása és implementálása a CNN Univerzális Gépen [1, 2].*

Ha már rendelkezésünkre áll egy jól működő véletlenszám generátor, akkor lehetőség nyílik két-dimenziós rács-modellek Monte Carlo típusú algoritmusainak implementálására a CNN Univerzális Gépen. Közvetlenül adódik a sejtautomata modellek véletlenszerű kezdeti feltételeinek generálása és sok sztochasztikus modell viszonylag egyszerűen megoldható. Én két fontos, klasszikus statisztikus fizikai modellt választottam: a rácspont perkolációs feladatot [30, 31] és a két-dimenziós Ising modellt [32]. Mindkettő egy elég tág és sokat tanulmányozott témakört képvisel, és sok esetben az én algoritmusaim könnyen átalakíthatók a témához kötődő speciális esetek tanulmányozására. Mindkét kidolgozott algoritmusban nagyon fontos szerepet játszik az előző tézisben bemutatott véletlenszám generátor, speciális CNN templétek, a CNN párhuzamos struktúrája és az analóg-és-logikai módú implementálás.



2. ábra. A perkolációt detektáló templét eredménye négy különböző időpillanatban. Az első sorban található fekete pontokból kiindulva folyamszerűen feketévé válik minden olyan pont, amely a bemeneti képen fekete és szomszédokon keresztül kötődik az első sor fekete pontjaihoz.

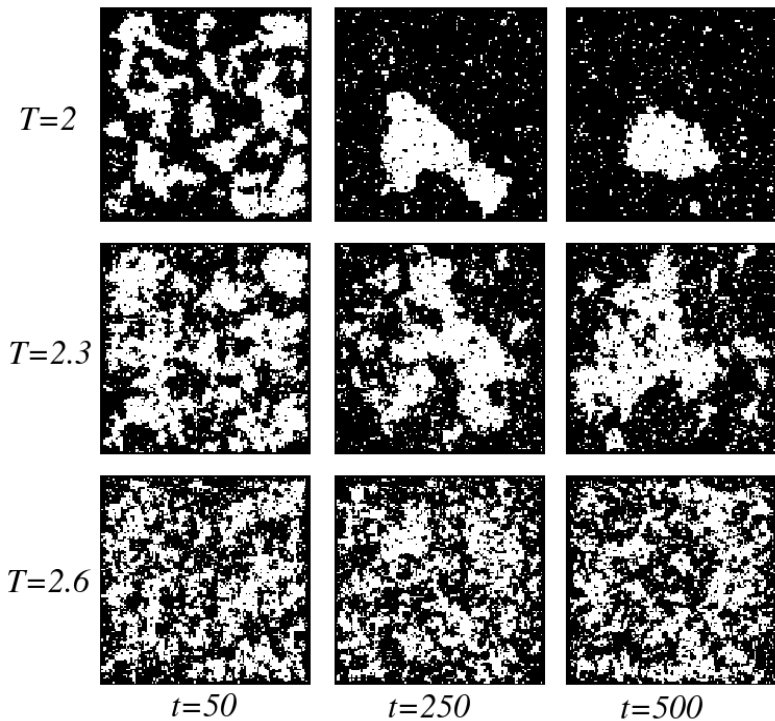
## **2.1. Kimutattam, hogy egyetlen CNN templét ("figure recall") segítségével detektálható a rácspont perkoláció egy bináris képen; az algoritmust a Bi-i v2 kamera számítógépbe beépített ACE16k chipen teszteltem [1] [4].**

A CNN templétet, amellyel hatékonyan sikerült detektálni a rácspont perkolációt bináris képeken, gyakran "kép visszahívó" ("figure recall") templétnek is nevezik (a Bi-i v2 képfeldolgozó könyvtárában is megtalálható [33]). A templét bemeneti képe maga a vizsgálandó kép, a kezdeti állapot ellenben ennek a bemeneti képnek csak az első sorát tartalmazza. A templét értékek úgy vannak meghatározva, hogy az első sorban található fekete pontokból kiindulva folyamatosan feketévé fog válni minden olyan pixel, amelynek van már fekete szomszédja, és a bemeneti értéke is 1 (fekete) (2. ábra). Ha a végső kimeneti képen lesznek fekete pontok az utolsó sorban, akkor a képen létezik perkoláció.

Ezt az egyszerű algoritmust nagyon sok, a fekete pontoknak különböző sűrűségével rendelkező bináris képen teszteltem. A rácspont perkoláció valószínűsége a fekete pontok sűrűségének a függvényében egy fázisátalakulást mutat a  $p = 0.407$  értéknél [34]. Az ACE16k chipen kapott eredmények jól egyeznek a digitális számítógépen, rekurzív algoritmussal kapott eredményekkel.

## **2.2. Kidolgoztam és az ACE16k chipen teszteltem a két-dimenziós Ising modell CNN algoritmusát, megfelelően párhuzamosítva a Metropolis algoritmust [2] [6].**

Az Ising féle spin-modell szimulálására sok Monte Carlo típusú szimulációs módszer létezik, de a legtöbb algoritmus soros jellegű. Én az egyik legismertebbet, a Metropolis algoritmust [35], alakítottam át úgy, hogy megfeleljen a CNN-UM párhuzamos architektúrájának. Ebben az algoritmusban először egyszerű CNN templétek, mint pl. eltolás, illetve logikai műveletek segítségével felépítem azokat a maszkokat, amelyek a különböző energiájú spineket jelölik. A Metropolis algoritmus szerint, a különböző energiájú spinek állapota különböző  $p$  valószínűséggel változik meg:  $p = \exp(-\Delta E/kT)$ , ha  $\Delta E > 0$  és



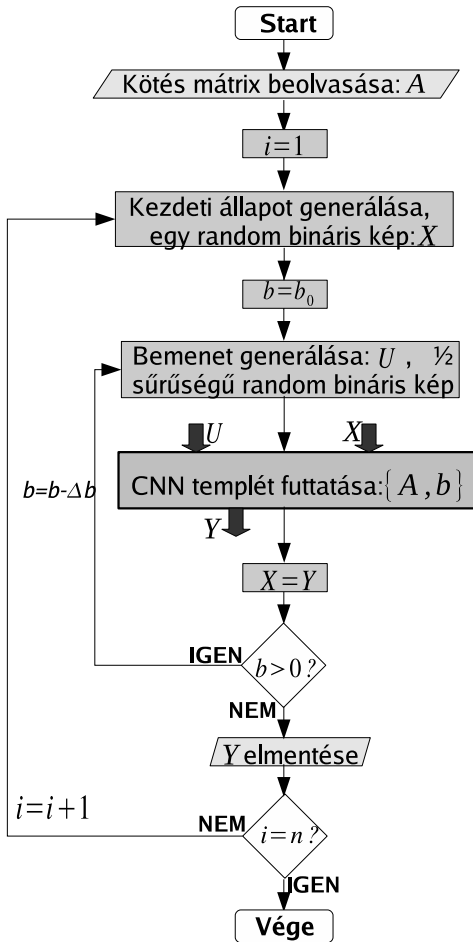
3. ábra. Az Ising modell szimulációja az ACE16k chipen,  $T = 2, 2.3, 2.6$  hőmérséklet értékeknél (a Boltzmann faktort itt  $k = 1$ -nek tekintjük),  $t = 50, 250, 500$  Monte Carlo lépés után. A kritikus hőmérséklet  $T = 2.3$  körül van. Kisebb hőmérsékleteknél ferromágneses rendeződés észlelhető, nagyobb hőmérsékleteknél már paramágneses rendezetlenség jellemzi a rendszert.

$p = 1$  ha  $\Delta E \leq 0$ . Ahhoz, hogy minden lépésben véletlenszerűen kiválasszam, hogy éppen melyik spinek (cellák) változnak meg, az előző tézisben bemutatott véletlenszám generátort alkalmaztam. Az algoritmus párhuzamosítása ellenben nem ennyire egyszerű, a cellák állapotainak teljesen párhuzamos újítása meglepő gondokat okoz. Amiatt, hogy a spinek állapot-változásának valószínűségét mindig a 4 legközelebbi szomszéd állapota határozza meg (mivel ezektől függ a spin energiája), kerülnünk kell, hogy a szomszédokat ugyanabban a lépésben egyszerre változtassuk. Ez gyakran irreálisztikus mintázatok megjelenéséhez vezet (részletek a 4. fejezetben). Ahhoz, hogy elkerüljem ezeket a problémákat, de mégis kihasználjam a CNN számítógép párhuzamosságát, bevezettem még egy (sakktábla mintájú) maszkot, és minden páros (ill. páratlan) lépésben csak olyan spinek megváltozását engedélyezem amelyek a sakktábla maszk fehér (ill. fekete) pontjainak felelnek meg. Így legközelebbi szomszédok sohasem változhatnak ugyanabban a lépésben, de a párhuzamosságot továbbra is kihasználjuk, minden Monte Carlo lépést két lépésben végzünk el [2, 3].

Ezt az algoritmust is a Bi-i v2,  $128 \times 128$  méretű ACE16k chipjén teszteltem (3. ábra), ugyanakkor az eredményeket összehasonlítottam az algoritmus digitális gépen végzett szimulációjával, illetve a klasszikus Metropolis algoritmus által adott eredményekkel is. Az eredmények jó egyezést mutatnak, és a chipen végzett időmérések is ígéretesek [2, 3].

3. Tézis: *Frusztrált, két-dimenziós spinüveg rendszerek NP-nehéz optimalizációja, lokálisan változó CNN templétek felhasználásával [3] [7].*

Kimutattam, hogy egy olyan CNN Univerzális Gép, amelyen a kötések és a megfelelő templétértékek külön kontrollálhatóak minden cellában, komplex, NP-nehéz problémák [36] megoldására is alkalmas lehet. Egy speciális problémaként frusztrált spinüveg modellek optimalizációját vizsgáltam.



4. ábra. Az  $A$  kötés-mátrixsal jellemezhető, két-dimenziós spinüveg rendszerek optimális állapotának megtalálására írt CNN algoritmus folyamatábrája.

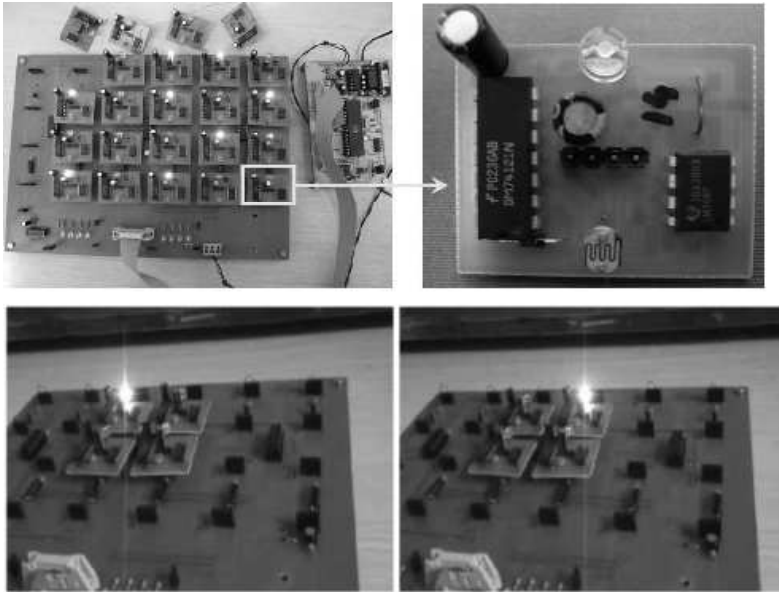
### 3.1. **Bebizonyítottam, hogy egy lokálisan változtatható kötésekkel rendelkező CNN analóg megfelelője egy spinüveg rendszernek, mert a két rendszerben a lokális energia-minimumok megegyeznek.**

Egy olyan CNN hálózatot használtam, amelyben az  $A$  paraméterek lokálisan definiálhatók:  $A(i, j; k, l) \in [-1, 1]$ , ahol  $(i, j)$  és  $(k, l)$  két különböző szomszédos cellát jelölnek; centrálisan szimmetrikus kötésekkel dolgozunk:  $A(i, j; k, l) = A(k, l; i, j)$  és  $A(i, j; i, j) = 1$  minden  $(i, j)$  esetében; a  $B$  paraméterek, amelyek a bemeneti kép hatását kontrollálják egyszerűen:  $B(i, j; i, j) = b$  és  $B(i, j; k, l) = 0$ ; és  $z = 0$ . A Chua és Yang [17] által bebizonyított tételre felhasználva igazoltam, hogy erre a CNN-re felírható Lyapunov függvény ekvivalens az  $A$  paraméterek által definiált spinüveg rendszer [37, 38] energiájával. Az egyetlen különbség az, hogy a CNN celláiban analóg értékeink vannak és nem diszkrét értékek ( $\pm 1$ ) mint a spinrendszerekben általában. Azt is bebizonyítottam, hogy egy ilyen CNN és a spinüveg rendszer lokális energia minimum állapotai megegyeznek, és a CNN templét végső stabil állapota mindig a spinüveg rendszer egy lokális energia minimum állapotát eredményezi.

### 3.2. **Kidolgoztam egy, a szimulált hűtéshez hasonló elveken alapuló CNN algoritmust, amely jó megközelítéssel és jó sebességet ígérve, megtalálja a frusztrált spinüveg rendszerek globális optimum állapotát.**

Felhasználva az előző altézisben bizonyított tulajdonságokat, kidolgoztam egy CNN algoritmust két-dimenziós spinüveg rendszerek optimális állapotának megtalálására. Az algoritmus alapja hasonlít a szimulált hűtéshez, a zajt itt a bemeneti képekkel visszük be a rendszerbe, és a hőmérséklet szerepét a  $b$  paraméter veszi át, amelyet fokozatosan csökkentünk a folyamat során. Az algoritmus folyamatábrája a 4. ábrán látható. Az algoritmust szimulációkkal teszteltem, mérve egy elfogadható hibarátahoz szükséges lépések számát. Megfelelő, lokálisan kontrollálható, CNN hardverek esetén az algoritmus nagyon gyorsnak ígérkezik (5. fejezet) [3].





5. ábra. A kísérleti berendezés. Az oszcillátorokat négyzetrács formájában, egy áramkör lapra helyezjük. Az egész rendszert sötétbe, egy doboz alá helyezhetjük, amelynek a belsejében matt üveglap van elhelyezve, így globális csatolás érhető el.

4. Tézis: *Szinkronizációs jelenségek tanulmányozása egy biológiailag inspirált, globálisan csatolt, fénypulzusokkal kommunikáló, elektronikus oszcillátorokból felépített nem-standard CNN hálózatban [5].*

Fénnyel kommunikáló, biológiailag inspirált, elektronikus oszcillátorokból felépített rendszert tanulmányoztam (5. ábra). Az elemek fényjeleket bocsátanak ki és képesek érzékelni, integrál-és-tüzel típusú oszcillátorok [39], kissé módosított (fékező jellegű) kölcsönhatási szabályokkal: a viselkedésüket egy állandó össz-fényerősség,  $W$ , megtartására tervezték. Minden oszcillátornak van egy jellemző

feszültsége,  $U_i$ , ami csökken a külső fényerősség növekedésével. A rendszerben van egy globálisan kontrollálható paraméterünk,  $G$ , amely minden oszcillátorra megegyezik. Ha egy oszcillátor feszültsége meghaladja ezt a küszöbértéket ( $U_i > G$ ), akkor az oszcillátor tüzelni fog, vagyis a LED felvillan. Ez a villanás csak akkor következhet be, ha egy minimális idő  $T_{min_i}$  eltelt az utolsó tüzelés óta. Egy maximális periódus is létezik, vagyis ha az utolsó villanás óta  $T_{max_i}$  ideig nem tüzelt az oszcillátor, akkor biztos felvillan. Úgyis mondhatnánk, hogy a villanásoknak a sötétség kedvez, és a "sötétség mértékét", ahol a villanás történik, a  $G$  paraméter jellemzi. Emiatt az egyszerű szabály miatt, a  $G$  paraméter határozza meg a rendszer átlagos kimeneti fényerősségét.

Kísérleti és szimulációs eredmények azt mutatják, hogy annak ellenére, hogy nincs egy direkt szinkronizációnak kedvező kölcsönhatás, a fényerősség,  $W$  (vagy a  $G$  paraméter), egy bizonyos tartományában, egy gyengébb szinkronizáció ("phase-locking") alakul ki [5]. Ennek a projektnek a távolabbi célja, hogy külön kontrollálva az oszcillátorokat, egy programozható rendszert alakítsunk ki. Így a négyzetlátsra helyezett oszcillátorok egyfajta általánosított celluláris nemlineáris hálózatként írhatók le, amelyben a cellák állapota mindig a mért fényerősség. Egy ilyen rendszer kollektív viselkedését tanulmányozva, olyan érdekes szinkronizációs jelenségek derülhetnek ki, amelyek esetleg programozható alap-funkciói lehetnének egy ilyen összetett rendszernek.

## 4. Az eredmények alkalmazási területei

Az első tézis által nyújtott alkalmazási lehetőségek egyértelműek, hiszen a véletlenszámok generálása nem csak a statisztikus fizikában fontos, ahogy a 2. tézisből kiderül. A random számok és sztochasztikus algoritmusok alkalmazása sok más területen is elterjedt (képfeldolgozás [40, 41], folyamatszabályozás, játékok, numerikus számolások, stb.). A pszeudo-random, megismételhető véletlenszám sorozat néha hasznos lehet és bizonyos algoritmusoknál szükséges, és

de fontos hátrányai is vannak: a determinisztikus, kaotikus generáló szabály miatt sok kezdeti feltétel esetén fordulhatnak elő véges ciklusok. A CNN-UM chip természetes zajának felhasználása előnyt jelent a digitális számítógépekkel szemben. Ez fontos lehet, pl. nagy sokaság-átlaggal rendelkező statisztikus fizikai problémák (lásd 2. tézis) Monte Carlo típusú szimulációinál.

Annak ellenére, hogy két jól ismert, klasszikus statisztikus fizikai problémáról van szó, a 2. tézisben bemutatott algoritmusok is hasznos alkalmazásokat nyújthatnak, főleg a CNN-UM hardverek további fejlődése esetén. A tézis fontossága abban rejlik, hogy CNN-kompatibilis algoritmust adnak erre a két feladatra. Amint kimutattam, a rácspont-perkolációt detektáló bonyolult rekurzív algoritmus egyetlen CNN templéttel helyettesíthető, és a rácsmodellekre alkalmazott Monte Carlo típusú algoritmusok (ezesetben a Metropolis algoritmus) is megfelelően párhuzamosíthatók a CNN Univerzális Gépen. Mindkét feladat ugyanakkor egy tágabb feladatkört is képvisel, sok speciálisabb esetet ezek közül napjainkban is tanulmányoznak. A CNN-UM hardverek további fejlesztése esetén (pl. lokálisan variálható templétek) az én algoritmusaim is tovább fejleszthetők, és implementálható lehet, a kötés-perkoláció, az irányított perkoláció, diluált Ising modellek stb. [42]

A 3. tézisben bemutatott algoritmust egyelőre csak szimulációkkal lehetett tesztelni, de ennek ellenére sok alkalmazási lehetőséget ígér. Az NP-nehéz feladatok megoldása mindig egy kulcskérdés mikor új számítástechnikai paradigmákat tesztelünk. Ezek a komplex problémák sok tudományághoz kapcsolódnak (élettudományok, biometrika, logisztika, parametrikus adatbázis keresés, wireless kommunikáció [36]). A digitális számítógépek fontos hiányossága, hogy ezeket a komplex feladatokat még mindig nem lehet megfelelő időn belül kezelni, ezért minden új számítástechnikai paradigmát tesztelnek ezekkel a feladatokkal. Ahogy a 3. tézis mutatja, a CNN számítógépek jó perspektívát mutatnak ezen a téren, ez tovább motiválhatja a hardverek fejlesztését is az általam javasolt irányban. A konkrétan vizsgált NP-nehéz feladatnak is sok alkalmazása van. A szilárdtest fizikában játszott fontos szerepe mellett, a spinüveg

modellek nagyon fontos interdiszciplináris karaktert nyertek, alkalmazták őket neurális hálózatok elméleteiben [43], számítógép tudományban [36], elméleti biológiában [44], gazdaság-fizikában [45] stb. Azt is kimutatták, hogy hiba-javító kódokként használva őket, kitűnő teljesítményt nyújtanak [46], sőt általában ezek a rendszerek nincsenek a frusztrált spinüveg fázisban, így a CNN párhuzamosságát tekintve könnyen lehetne gyors eredményeket kapni még nagy méretű rendszerek esetén is.

A 4. tézis elméletibb jellegű, mivel egy hosszabb projekt első részét képezi. Elektronikus oszcillátorok kollektív viselkedésének megértésére koncentrál. A rendszer érdekessége abban rejlik, hogy az oszcillátorok fényel kommunikálnak, így globális csatolás érhető el. Annak ellenére, hogy a fékező kölcsönhatás nem föltétlen segíti elő szinkronizáció kialakulását, mégis egyfajta rend alakul ki. A projekt további célja egy olyan rendszer kialakítása amelyben az oszcillátorok paraméterei és viselkedése külön programozható, így a négyzetrácsra helyezett oszcillátor rendszer egy általánosított CNN hálózatként kezelhető, amelyben a cellák állapota mindig a mért fényerősség. Egy ilyen nem-standard CNN hálózat tanulmányozása érdekes szinkronizációs jelenségeket tárhat fel, amelyek esetleg programozható, alap-műveletekként felhasználhatók majd egy ilyen rendszerben. Ilyen típusú vizsgálatok azért is fontosak, mert az információs technológiában a hangsúly lassan áttevődik egyetlen processzor továbbfejlesztéséről, sok együttműködő kis egységből felépített rendszerek fejlesztésére. Az ilyen rendszerek fejlődését azonban továbbra is a megfelelő algoritmusok hiánya jellemzi.

## 5. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Roska Tamás professzor úrnak és Néda Zoltán professzor úrnak, akik végig segítettek és támogattak mindenben, és mindig tökéletesen tudták mikor van szükségem irányításra és mikor fontos, hogy függetlenül érvényesüljek kutatásaim során. Egyetemi tanulmányaim alatt is Néda Zoltán professzor úr volt a témavezetőm, köszönöm neki, hogy korán bevezetett a kutatásokba és megszerettette velem ezt a világot.

Köszönöm a bírálóimnak, Groma István és Zarándy Ákos professzoroknak a lelkiismeretes bírálatokat.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani a kolozsvári kutatócsoportnak, akikkel utolsó kutatási projektben együtt dolgoztunk: Sárközi Zsuzsa, Tunyagi Arthur, Burda Ioan.

Sokat tanultam Sabine Van Huffel és Martine Wevers professzor asszonyoktól is a Leuvenben töltött félévem során.

Legjobb tanáraitam is meg kell említenem: doktori tanulmányaim során Csurgay Árpád, Vágó Zsuzsa, Gergó Lajos, Szolgay Péter; kolozsvári egyetemi tanulmányaim alatt: Néda Árpád, Darabont Sándor, Karácsony János, Lázár József, Nagy László, Lázár Zsolt, Búzás Gábor, Simon Alpár; iskolai tanulmányaim alatt pedig: Ravasz József, Balogh Attila, Sikes Ilona, Nagy Judit.

Köszönöm doktorandusz és fiatal kutató társaimnak a jó beszélgetéseket és az együtt töltött időt: Hegyi Barnabás, Benedek Csaba, Harczos Tamás, Soós Gergő, Gyimesi Gergely, Szálka Zsolt, Zeffer Tamás, Bankó Éva, Lázár Anna, Hillier Dániel, Mozsáry András, Gandhi Gaurav, Cserey György, Weiss Béla, Körtvélyes Judit, Tar Ákos; Kolozsvárról Deák Róbert, Kovács Katalin, Sumi Róbert, Derzsi Aranka, Járai Szabó Ferenc, Tóth István, Póra Kati, Borbély Sándor. A fiatalabbaknak sok sikert kívánok doktori tanulmányaik folytatásához.

Köszönöm Schulek Katalin, Szulyovszky Hajnalka és Adorján Livia segítségét adminisztratív és más egyéb problémák megoldásában.

A Pázmány Péter Katolikus Egyetem és a Babeş-Bolyai Tudo-

mányegyetem támogatását is szeretném megköszönni.

Doktori tanulmányaim elvégzése nem lett volna lehetséges férjem, Feri, szeretete, türelme és támogatása nélkül. Ugyanakkor hálás vagyok édesanyámnak, Erzsébetnek, és édesapámnak, Józsefnek, is akik végig törődtek velem és segítettek minden lehetséges módon. Nővéremnek, Erzsónak, és férjének, Pete-nek, is szeretném megköszönni a segítségüket. Disszertációmát szeretném ennek a néhány - a szívemhez mindig legközelebb álló - személynek dedikálni.

Legjobb barátaimnak - Levi, Éva, Ági, Bambi - is köszönöm a felejthetetlen beszélgetéseket, kirándulásokat és minden segítségüket. Az életem éneklés nélkül szürke és unalmas lenne, ezért szeretném megköszönni a sok szép éneklést a Visszhang kórusnak és éneklő barátaimnak: Timi, Balázs, Zoltán, Meli, Boti. Ha rövidebb időszakokra is, de nagyon jól éreztem magam az Információs Technológia Kar kórusával is, külön köszönet jár ezért Bércesné Novák Ágnesnek.

## 6. Publikációs lista

### 6.1. A szerző folyóirat publikációi

- [1] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Nédá, „Perspectives for monte carlo simulations on the cnn universal machine,” *International Journal of Modern Physics C*, vol. 17, no. 6, pp. 909–923, 2006.
- [2] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Nédá, „Stochastic simulations on the cellular wave computers,” *European Physical Journal B*, vol. 51, pp. 407–412, 2006.
- [3] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Nédá, „Statistical physics on cellular neural network computers,” *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. Special Issue: ”Novel Computing Paradigms: Quo Vadis”, 2008. accepted, <http://dx.doi.org/10.1016/j.physd.2008.03.028>.

## 6.2. A szerző nemzetközi konferencia publikációi

- [4] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Néda, „Random number generator and monte carlo type simulations on the cnn-um,” in *Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their applications*, (Istanbul, Turkey), pp. 47–52, Aug. 2006.
- [5] **M. Ercsey-Ravasz**, Z. Sárközi, Z. Néda, A. Tunyagi, and I. Burda, „Collective behavior of ”electronic fireflies”.” *SynCoNet 2007: International Symposium on Synchronization in Complex Networks*, Leuven, Belgium, July 2007.
- [6] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Néda, „Statistical physics on cellular neural network computers.” *International conference ”Unconventional computing: Quo vadis?”*, Santa Fe, New Mexico, U.S.A., Mar. 2007.
- [7] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Néda, „Spin-glasses on a locally variant cellular neural network.” *International Conference on Complex Systems and Networks*, Sovata, Romania, July 2007.
- [8] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Néda, „Applications of cellular neural networks in physics.” *RHIC Winterschool*, Budapest, Hungary, Nov. 2005.
- [9] **M. Ercsey-Ravasz**, T. Roska, and Z. Néda, „The cellular neural network universal machine in physics.” *International Conference on Computational Methods in Physics*, Cluj-Napoca, Romania, Nov. 2006.

### 6.3. A szerző egyéb publikációi

- [10] M. Ercsey-Ravasz, T. Roska, and Z. Nédá, „Analogikai celluláris számítógépek - egy új paradigma a számítástechnikában (analogic cellular computers - a new computational paradigm),” *Műszaki szemle*, vol. 42, pp. 19–25, 2008.

### 6.4. A disszertáció témaköréhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

- [11] G. E. Moore, „Cramming more components onto integrated circuits,” *Electronics*, vol. 38, pp. 114–117, 1965.
- [12] v. J. Neumann, *Papers of John von Neumann on Computing and Computer Theory*. MIT Press and Tomash Publ., Los Angeles/San Francisco, 1987.
- [13] T. Roska, „Computational and computer complexity of analogic cellular wave computers,” in *Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2002*, (Frankfurt, Germany), pp. 323–335, July 2002.
- [14] T. Roska, „Cellular wave computers for nano-tera-scale technology - beyond boolean, spatial-temporal logic in million processor devices,” *Electronics Letters*, vol. 43, no. 8, 2007.
- [15] T. Roska and L. O. Chua, „The CNN Universal Machine,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 40, pp. 163–173, 1993.
- [16] L. O. Chua and T. Roska, „The CNN paradigm,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 40, pp. 147–156, 1993.



- [17] L. O. Chua and L. Yang, „Cellular Neural Networks: Theory and applications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 35, pp. 1257–1290, 1988.
- [18] G. Liñán, S. Espejo, R. Domínguez-Castro, and Rodríguez-Vázquez, „Ace4k: An analog i/o 64\*64 visual microprocessor chip with 7-bit analog accuracy,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 30, no. 2-3, pp. 89–116, 2002.
- [19] A. Rodriguez-Vazquez, G. Linan-Cembrano, L. Carranza, E. Roca-Moreno, R. Carmona-Galan, F. Jimenez-Garrido, R. Dominguez-Castro, and S. Meana, „Ace16k: the third generation of mixed-signal simd-cnn ace chips toward vsocs,” *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 5, pp. 851–863, 2004.
- [20] A. Zarándy and C. Rekeczky, „Bi-i: a standalone ultra high speed cellular vision system,” *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 36–45, 2005.
- [21] [www.anafocus.com](http://www.anafocus.com).
- [22] L. O. Chua, T. Roska, and P. L. Venetianer, „The CNN is universal as the Turing Machine,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 40, no. 3, pp. 289–291, 1993.
- [23] L. O. Chua and T. Roska, *Cellular neural networks and visual computing, Foundations and applications*. Cambridge University Press, 2002.
- [24] T. Roska, L. O. Chua, D. Wolf, T. Kozek, R. Tetzlaff, and F. Puffer, „Simulating nonlinear waves and partial differential equations via cnn - part i: Basic techniques,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 42, no. 10, pp. 807–815, 1995.

- [25] T. Kozek, L. O. Chua, T. Roska, D. Wolf, R. Tetzlaff, F. Puffer, and K. Lotz, „Simulating nonlinear waves and partial differential equations - part ii: Typical examples,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 42, no. 10, pp. 816–820, 1995.
- [26] J. M. Cruz and L. O. Chua, „Application of cellular neural networks to model population dynamics,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 42, no. 10, pp. 715–720, 1995.
- [27] K. R. Crouse, T. Yang, and L. O. Chua, „Pseudo-random sequence generation using the cnn universal machine,” in *Fourth IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*, (Seville, Spain), 1996.
- [28] A. Zarándy, C. Rekeczky, I. Szatmári, and P. Földesy, „The new framework of applications: The aladdin system,” *IEEE Journal on Circuits, Systems and Computers*, vol. 12, no. 6, pp. 764–781, 2003.
- [29] M. E. Yalcin, J. Vandewalle, P. Arena, A. Basile, and L. Fortuna, „Watermarking on cnn-um for image and video authentication,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 591–607, 2004.
- [30] D. Stauffer and A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory*. London: second edition, Taylor and Francis, 1992.
- [31] J. W. Essam, „Percolation theory,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 53, pp. 833–912, 1980.
- [32] B. M. McCoy and T. T. Wu, *The Two-Dimensional Ising Model*. Harvard University Press, Cambridge Massachusetts, 1973.
- [33] I. Szatmári, P. Földesy, C. Rekeczky, and A. Zarándy, „Image processing library for the aladdin visual computer,” in *Proceedings of the CNNA-2002*, (Frankfurt, Germany), 2002.

- [34] K. Malarz and S. Galam, „Square-lattice site percolation at increasing ranges of neighbor bonds,” *Physical Review E*, vol. 71, pp. 016125–016128, 2005.
- [35] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller, „Equation of state calculations by fast computing machines,” *J. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 1087–1092, 1953.
- [36] H. Nishimori, *Statistical Physics of Spin Glasses and Information Processing. An Introduction*. Clarendon Press, Oxford, 2001.
- [37] S. F. Edwards and P. W. Anderson, „Theory of spin glasses,” *Journal of Physics F: Metal Physics*, vol. 5, pp. 965–974, 1975.
- [38] D. Sherrington and S. Kirkpatrick, „Solvable model of a spin-glass,” *Physical Review Letters*, vol. 35, no. 26, pp. 1792–1796, 1975.
- [39] S. Bottani, „Synchronization of integrate and fire oscillators with global coupling,” *Physical Review E*, vol. 54, no. 3, pp. 2334–2350, 1996.
- [40] C. S. Won and R. M. Gray, *Stochastic image procesing*. Springer, 2004.
- [41] P. Barone, A. Frigessi, and M. Piccioni, *Stochastic models, statistical methods, and algorithms in image analysis*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [42] M. Sahimi, *Application of Percolation Theory*. London: Taylor and Francis, 1994.
- [43] M. Mezard, G. Parisi, and M. A. Virasoro, *Spin glass theory and beyond*. World Scientific, Singapore, 1987.
- [44] G. Rowe, *Theoretical Models in Biology: The Origin of Life, the Immune System and the Brain New edition*. Clarendon Press, Oxford, 1997.

- [45] R. N. Mantegna and H. E. Stanley, *An Introduction to Econophysics - Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge University Press, Cambridge, England, 2000.
- [46] N. Sourlas, „Spin-glass models as error-correcting codes,” *Nature*, vol. 339, pp. 693–695, 1989.
- [47] T. Roska, „Circuits, computers, and beyond boolean logic,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 35, no. 5-6, pp. 485–496, 2007.
- [48] S. Kirckpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, „Optimization by simulated annealing,” *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.