

TÉR-IDŐBELI MINTÁK
ÉS
AKTÍV-HULLÁM SZÁMÍTÁS

Ph.D. Értekezés tézisei



PETRÁS ISTVÁN

Témavezető:
Dr. Roska Tamás

Analogikai és Neurális Számítógépek Laboratórium
Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet
Magyar Tudományos Akadémia

2004

TARTALOMJEGYZÉK

| | |
|--|-----------|
| KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS..... | 1 |
| BEVEZETÉS..... | 3 |
| KUTATÁSI MÓDSZEREK..... | 10 |
| ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK..... | 12 |
| ELSŐ TÉZIS..... | 14 |
| <i>Tér-időbeli lenyomatok a CNN-ben.....</i> | <i>14</i> |
| MÁSODIK TÉZIS..... | 16 |
| <i>Kaotikus dinamika, attraktorok szimultán létezése</i> <i>egydimenziós CNN-ben.....</i> | <i>16</i> |
| HARMADIK TÉZIS..... | 18 |
| <i>Görbület vezérelt trigger-bullám.....</i> | <i>18</i> |
| LEHETSÉGES ALKALMAZÁSI TERÜLETEK..... | 23 |
| ELSŐ TÉZIS..... | 23 |
| MÁSODIK TÉZIS..... | 23 |
| HARMADIK TÉZIS..... | 26 |
| A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI..... | 29 |
| A SZERZŐT HIVATKOZÓ CIKKEK..... | 33 |
| IRODALOMJEGYZÉK..... | 35 |
| FÜGGELÉK..... | 41 |

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani:

Dr. Roska Tamásnak, aki mindenben segített és sokféleképpen támogatott.

A Szüleimnek.

prof. Marco Gilli-nek, a beszélgetésekért és ötletekért.

prof. Leon O. Chua-nak, aki fogadott a kutató laboratóriumában Berkeley-ben (*Nonlinear Research Laboratory in University of California at Berkeley*).

prof. Joos Vandewalle-nak, *Katholieke Universiteit Leuven*, ahol egy hónapot tölthettem.

Kollégáimnak, akikkel együtt dolgoztam különböző kutatásokban és megbeszéltük az ötleteinket:

Bálya Dávid, Cserey György, Földesy Péter, Gál Viktor, Jónás Péter, Karacs Kristóf, Kék László, Orzó László, Rekeczky Csaba, Szatmári István, Szlávik Zoltán, Tímár Gergely; Idősebb kollégáim: *Zarándy Ákos, Szolgay Péter, Szirányi Tamás.*

Keserű Katalinnak (asszisztens) és *Kék Gabriellának* (titkár-nő) a kedves segítségükért.

Az MTA-SZTAKInak, ahol Ph.D éveimet eltölthettem.

(<http://lab.analogic.szta.hu/>)

Professzoraimnak és tanárainak:

Veszprémi Egyetem (<http://www.vein.hu/>)

Bánki Donátb Műszaki Főiskola (<http://www.banki.hu/>)

Erkel Ferenc Gimnázium (<http://www.erkel.hu/>)

Gyulai 1. számú Általános Iskola

A városomnak, Gyulának (<http://www.gyula.hu/>), ahol felnőttem.

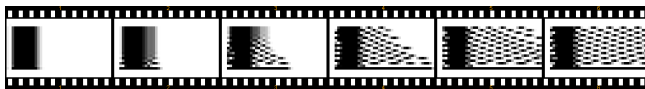
Szeretném megköszönni továbbá az alábbi intézmények anyagi támogatását:

Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Pályázatok: *TeleSense NKFP*
2001/02/035

Európai Unió, "Information Society Technologies" Program: *Locust IST-2001-38097*

BEVEZETÉS

A MINTÁK és a hullámok annyira szokásos jelenségek mindennapi életünkben, hogy nem is szentelünk nekik különösebb figyelmet. Még csak észre sem vesszük legtöbbjüket. De mégis, világunknak alapvető jelenségei. *Hullám* akkor keletkezik, amikor valamilyen közeg állapota vagy a pozíciója helyileg megváltozik és ez a változás továbbterjed. Általános értelemben a *mintázat* a közeg valamelyik jellemzőjének egyfajta eloszlása. A hullámok és minták egyfajta keveréke is lehetséges: *utazó mintázat* alkothat hullámot és megfordítva: egy hullámnak is lehet mintázata. (lásd az 1. ábrát).



1. ábra: Újfajta utazó mintázat. Az aktív közeg egymás utáni pillanatfelvételei.

Amikor hullámokról hallunk az ember rendszerint a klasszikus hullámokra gondol, amik energetikailag konzervatív rendszerekben terjednek. Egy mindenki által jól ismert példa erre a víz felszínén terjedő hullám. Ebben az esetben a rendszerbe táplált energia megmarad.

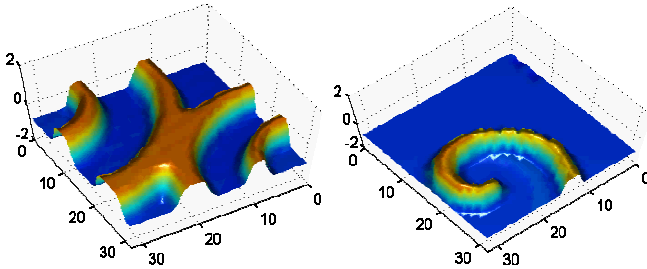
Az aktiválható (nem konzervatív) közegben terjedő nemlineáris hullámok alapvetően különböznek a klasszikus hullámoktól. A klasszikus értelemben vett hullámok (pl. a vákuumban terjedő elektromágneses hullámok)

többnyire fizikailag önmagukban is zárt rendszert képeznek, azaz nem állnak kölcsönhatásban más rendszerrel, pl. valamilyen közeggel. Az ilyen hullámok energiamérlegébe elegendő beleszámítani a zárt rendszer állapotváltozóit, s az azok figyelembevételével számított energia a mozgás folyamán megmarad. Az aktiválható hullámok esetén az energia-megmaradás csak a hullám és a közeg állapotának, valamint a köztük fennálló kölcsönhatásnak a figyelembevételével teljesül, a hullámra, mint részrendszerre nézve viszont sérülni látszik. Az aktiválható hullámok terjedése úgy történik, hogy a közeg egy pontja átbillen az egyik energetikailag stabil állapotból a másikba (aktiválódik) és az aktivált pontok kiváltják az aktivitást a szomszédságban is, fenntartva ezzel a hullám terjedését. Ebből a tulajdonságból származik a név *autohullámok* (autowaves [18,19]), ami jelzi, hogy a terjedés önfenntartó. A terjedő hullám csillapodási és diszperziós tulajdonságai is lényegesen különböznek a klasszikus hullámok ilyen sajátosságaitól: a hullám nem csillapodik, s a hullámforma sem torzul terjedés közben. Az autohullámok nem verődnek vissza és nem is interferálnak egymással. Amikor ütköznek, kioltják egymást. A diffrakció az egyetlen klasszikus hullámokkal közös tulajdonság.

Napjainkig számos típusukat írták le és tanulmányozták. A megfigyelt jelenségektől függően különböző nevekkel találkozhatunk az irodalomban, úgymint autohullámok, utazó hullámok vagy trigger-hullámok, cél-tábla vagy koncentrikus hullámok és spirális hullámok [20-23]. Lásd a 2. ábrát

Sok, részletesen leírt auto-(aktív)-hullám jelenséget ismerünk. Egy jellegzetes példa a lángterjedés, pl. a robbanó motorokban. A kémiai reakció-diffúziós rendsze-

rekben is találhatunk auto-hullámokat [24]. Számos hasonló jelenséget figyeltek meg az élőlényekben. Talán az egyik legismertebb ilyen jelenség az ingerület terjedése az idegrostokban [25]. Fontos auto-hullám folyamat található a szívizomban is. Az összehúzódnak utazó hullámok mintáját követi az izomban történő elektromos impulzus terjedés miatt [22, 23].



2. ábra: Különböző auto-hullámok: céltábla (koncentrikus) hullámok ütközése és spirál hullám (CNN csipes mérés).

Egy másik érdekes példa az un. szociális amóbák (*Dictyostelium discoideum*) kommunikációs módszere [26,27]. A populáció tagjai – meglepő módon – spirális ill. koncentrikus hullámok segítségével kommunikálnak egymással. Amikor az élelem (baktérium) elfogyott és már éheznek, néhányan kémiai jeleket küldenek ki magukból spirális vagy koncentrikus hullám formájában, és így magukhoz vonzzák a szomszédaikat. Ezután spóratokká és spórákká alakulnak. Ha később lesz élelem a spórákból újra amóbák lesznek [28].

Alan Turing 1952-ben közölt cikkében [29] javasolt egy modellt, ami magyarázatként szolgálhat a mintázat képződés mechanizmusára reakció-diffúziós rendszerekben. Fölvetette, hogy a vegyületek reakcióba léphetnek

oly módon, hogy a reakció állandósult állapota egy heterogén koncentráció mintázatot ad és ez lehetne a morphogenezis kémiai alapja. Turing alapvető munkája óta cikkek százai és számos könyv foglalkozott a természetben megtalálható összetettség lehetséges magyarázataival és a vonatkozó matematikai modelljeikkel [27,30–37]. Kiindulásként lásd pl. [38].

Ezek a jelenségek jelentős figyelmet kaptak és számos különböző területen tevékenykedő kutató kapcsolódott be a munkába az utóbbi évtizedekben. Ennek következtében új, multidiszciplináris kutatási területek jöttek létre. Ugyanazt a jelenségekört a sokféle megjelenési forma miatt különböző névvel illették, s más és más keretben tanulmányozták, úgymint *order from disorder*¹ (Schrödinger, [39]), *synergetics*² (Haken [37,40–41]) *self-organization*³ (Nicolis & Prigogine, [42]), *dissipative structures operating far from thermodynamic equilibrium*⁴ (Prigogine, [30,43]), *edge of chaos*⁵ (Langton, 1990 [44]). Egy másik utóbb kifejlesztett elmélet, a *local activity*⁶ (Chua [32,45–49]) egységes keretet biztosít a fentebb említett jelenségcsoport eredetének tanulmányozásához. Matematikai értelemben pontos, szükséges feltételt ad meg az összetettség kifejlődéséhez aktív médiumban.

A területen dolgozó kutatók munkája eredményeképpen számos módszer és matematikai eszköz került kifejlesztésre. Egy kézenfekvő modellezési megközelítés a

¹ rend a rendetlenségből

² együttműködés

³ önszerveződés

⁴ disszipatív struktúrák távol a termodinamikai egyensúlytól

⁵ a káosz határa

⁶ helyi aktivitás

parciális differenciálegyenlet rendszerek (PDE) alkalmazása. Azonban, utóbb kiderült, hogy nem minden jelenség reprodukálható a folytonos PDE modellekkel [50].

Térben diszkrét, csatolt cellákból álló, a cellák közötti transzport folyamattal rendelkező rendszereket gyakran használtak az említett jelenségek modellezésére, amik pl. élő sejtekben, szövetekben, az idegrendszerben, közgazdasági rendszerekben és kémiai folyamatokat leíró reakció-diffúziós rendszerekben is előfordulnak.

Mások mellett (pl. celluláris automata, nemlineáris lattice⁷), a celluláris nemlineáris/neurális hálózat (CNN) egy ilyen diszkrét modellezési keretet biztosít.

A CNN egy helyileg összekötött nemlineáris dinamikus rendszerekből álló tömb [51,52], egy térben diszkrét, időben folytonos rendszer. Elemeit celláknak hívjuk. A cellák közötti csatolások vagy kapcsolatok határozzák meg a rendszer dinamikáját. A CNN egy jól meghatározott matematikai, valamint jól megvalósítható fizikai keretet biztosít a nemlineáris jelenségek és helyi kapcsolatok kódolta minták fejlődésének a tanulmányozásához. Az elv mikrocip formájába is jól átültethető - ez a fő előny a többi modellhez képest.

Habár a kurrens mikroprocesszorok többé-kevésbé párhuzamos működésű részeket is tartalmaznak, mégis, az algoritmusok döntően soros szervezésűek, hiszen a számítási elv a Turing-gépnek [55] nevezett absztrakt matematikai modellen alapul, ami soros működésű.

Ezzel szemben, az aktív közegekben a folyamatok párhuzamosan zajlanak. Ez igaz a CNN-re is.

⁷ „rács”

A CNN cellái rendszerint szabályos négyzetrácsos elrendezésűek. Implementációs okokból a cellák a közvetlen nyolc szomszéddal álnak többnyire csak kapcsolatban. Ezeket a kapcsolatokat minden cellára nézve ugyanaz a mátrix írja le. Ezt a kapcsolati mátrixot hívjuk *templétnek*; ez határozza meg döntően a rendszer működését. Elektronikus áramkör (VLSI csip) formájában történő megvalósítás egy optimális választás, mert az áramkörök jól kézbe tarthatóak és kontrollálhatóak szemben, pl. a kémiai oldatokkal. Továbbá a mai VLSI technológia nagy méretű tömbök tömeggyártását is lehetővé teszi. A tömbök elemi cellái azonos áramköri felépítésűek és párhuzamosan működnek. Ha ezt számításokhoz ki szeretnénk használni, másként kell gondolkoznunk a digitális számítógépeknél megszokottakhoz képest. Figyelembe kell venni, hogy a számítás párhuzamosan folyik, továbbá a feladatot a rendelkezésre álló paraméterekkel kell kifejezni. Ezek a rendszer kezdeti állapota, a csatolások és a határfeltételek. A számítás végeredményét a rendszer állandósult állapota vagy valamelyik köztes állapota adja, amit a cellák együttes működése alakít ki.

Az idegrendszerben számos réteges szerkezetű cellastruktúrát ismerünk, ahol a cellák egymásra hatásának eredményeképpen jöhet létre számítás. Egy ilyen struktúra a retina. A retina működése és egyes részegységei, mint például a receptív mező, egyszerűsítések után leképezhetők a CNN struktúrára. A receptív mező az idegrendszer egyik alapvető szerkezete [56], ami az idegpályák szinte minden szintjén fellelhető. Megtalálható úgy a tapintó rendszerben, mint a retinában és az agykéregben is. A receptív mező az a terület ill. neuronok halmaza, ahonnan egy neuron bemenetet kap. Ez sokszor a

közvetlen szomszédságot jelenti. A CNN-t felhasználva számos emlős retina modell [57] és receptív mező modell készült [3].

Az eddig leírtak alapján megállapítható, hogy a nemlineáris hullámterjedés alapvető jelenség és megtalálható mikro- ill. makroszinten, oldatokban és élőlényekben egyaránt. Ezért értekezésem témájaként az alapvetően párhuzamos működésű folyamatok, szűkebben meghatározva, a nemlineáris, hullámszerű jelenségek analízisét választottam felhasználva a CNN nyújtotta megalapozott gyakorlati és elméleti háttért.

A térben diszkrét rendszerekben, mint amilyen a CNN is, a keletkező utazó mintázat az egyes cellák összehangolt oszcillációinak együtteseként áll elő. Így kézenfekvő feltételezni, hogy a rendszer trajektóriája jellemző a mintázatra. Ha az attraktor, ami mentén a trajektória bolyong kaotikus, meglehetősen összetett minta képződhet. Ez azt sugallja, hogy a csatolt oszcillációk lehetnek a felelősek a formák és a minták létrejöttéért. Az értekezés első és második tézise (harmadik és negyedik fejezet) foglalkozik ezzel.

Az összetett jelenségek modellezése és tanulmányozása mellett a CNN lehetővé teszi új és lényegéből adódóan gyors (és párhuzamos) számítási elvek és módszerek megalkotását [53,54]. Egy ilyen párhuzamos számítási módszert mutat be az értekezés harmadik tézise (5. fejezet), amiben görbületesvezérelt terjedő hullámok matematikai analízise és néhány alkalmazási példa található.

KUTATÁSI MÓDSZEREK

A kutatások és kísérletek során felhasználtam a szűkebb szakterület – a CNN elmélet – eddig elért eredményeit, amik számos konferencián és rangos folyóiratokban jelentek meg (konferenciák: pl. CNNA, ISCAS, ECCTD; folyóiratok: pl. TCAS I-II., IJBC, CTA, JCSC).

Felhasználtam a CNN keretben már rendelkezésre álló tételek eredményeit és ezekre támaszkodva rendszer viselkedése szempontjából érdekesnek ígérkező paraméter tartományokat kerestem. Ezekben a tartományokban számítógépes szimulációval és a rendelkezésre álló CNN csipek segítségével vizsgáltam a rendszer dinamikáját. A terjedő mintázatok jellemzéséhez a rendszer egy állapotváltozójának idősorát frekvenciatérben elemeztem, valamint két állapotváltozóját fázistérben tanulmányoztam. Elkészítettem az egy-dimenziós CNN rendszer határfeltételektől és paramétereiktől függő két-dimenziós Ljapunov exponens térképeit. A különös attraktorok felérésére Poincaré-térképeket készítettem.

A görbület vezérelt nemlineáris trigger-hullám vizsgálatokor lokális, mozgó koordináta rendszerbe történő transzformáció segítségével a két-dimenziós PDE-t egydimenzióssá alakítottam, lehetővé téve így a probléma egyszerűbb kezelését.

Az új eredmények elérésében számos matematika eszköz is segítséget nyújtott:

- Dinamikus rendszerek elmélete

- Nemlineáris dinamika, stabilitás analízis
Ljapunov exponensek segítségével
- Idősorok analízise
- Nemlineáris hullámok elmélete
- Differenciál geometriai módszerek
- Parciális differenciál egyenletek elmélete

A kísérletekhez különböző szoftver és hardver eszközöket használtam:

- Az MTA-SzTAKI Analogikai és Neurális Számítások Kutatólaboratóriumában kifejlesztett szoftver szimulátor (CADETWIN [12,13]), az általános célú MATLAB programrendszer, amin a Ljapunov elemzést végeztem.
- VLSI CNN-UM csipet (ACE4k [58], CACE1k [6,59]) tartalmazó fejlesztőrendszer (CCPS, [14]).

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A következő tézisekben a CNN szerepel aktív közegként. Ezen a kereten belül vizsgáltam a mintázat generálás nemlineáris dinamikáját és egy konkrét aktív hullám típus viselkedését.

Az első tézisben bemutatok egy általam felfedezett új, kétdimenziós utazó minta osztályt, ami gazdag nemlineáris dinamikával rendelkezik, magába foglalva a tér-időbeli kaotikus viselkedést is. Tanulmányozom a vonatkozó dinamikus rendszert és meghatározom a paramétereiket, amik befolyásolják a minta jellegét és dinamikáját. Megmutatom, hogy a kétdimenziós minta csatolt egydimenziós sorokból tevődik össze, amik csatolt oszcillátorokból állnak. Ehhez mind szimulációt mind csipes mérést alkalmaztam. Az eredmények kvalitatív egyezést mutattak, megerősítve azt, hogy a jelenség nem valamely felderítetlen hatások kombinációja, hanem a rendszer inherens tulajdonsága.

A második tézisben egyetlen sor viselkedésének az elemzésére összpontosítok. Felismertem, hogy a határfeltételek, kezdeti állapot és a cellatömb dimenziója bifurkációs paraméterként viselkedik és átváltoztathatja a rendszer dinamikáját, pl. periodikusból kaotikusba. Ehhez a rendszer szimuláción alapuló Ljapunov exponenseit tanulmányoztam.

A harmadik tézisben bizonyítom, hogy adott paraméter tartományban a nemlineáris (*aktív*) trigger-hullám terjedését a hullámfront helyi görbülete vezérel. Azt is

megmutatom, hogy hogyan lehet gyakorlati képfeldolgozási célra használni az említett nemlineáris hullámjelenséget.

Első tézis

Tér-időbeli lenyomatok a CNN-ben






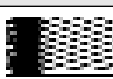
Felfedeztem egy lineáris, tér-invariáns, kevés nem nulla elemet tartalmazó, kétdimenziós templét⁸ osztályt, ami képes bonyolult, kaotikus, dinamikát is produkálni a templét paramétereiktől és a bemenettől függően. Térben korlátos ill. nem korlátos utazó mintázatot generál a paramétereknek megfelelően. Bevezettem a *tér-időbeli lenyomatot* – egy állókép, ami a rendszer kimenetének a pillanatfelvétele – mint a rendszer dinamikus állapotának leírására alkalmas jellemzőt. Ez a pillanatfelvétel térben tükrözi a rendszer dinamikus állapotának az időbeli történetét a terjedési effektus miatt.

Az általam meghatározott paraméter tartományok (p,r) irányt mutatnak a hasonló mintákat generáló templétek tervezéshez. Megadtam egy egydimenziós templétet, ami kaotikus viselkedést mutató CNN-t határoz meg.

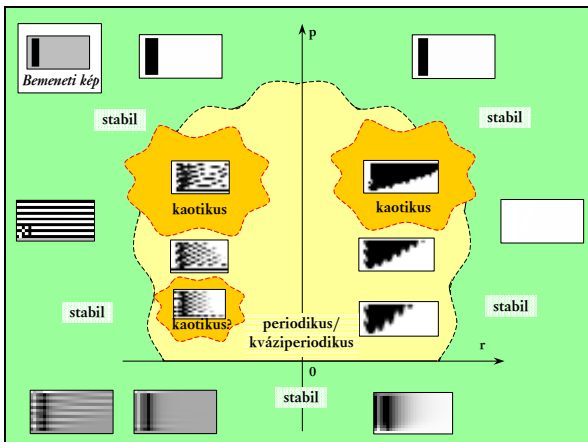
A vizsgált kétdimenziós templét osztály:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ s & p & -s \\ 0 & r & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad z$$

⁸ A cellák közötti csatolásokat leíró mátrix

| Stabil | Kaotikus | Periodikus |
|---|---|---|
|  $r > 0, p < 0$ |  $r > 0, p \gg 0$ |  $r > 0, p > 0$ |
|  $r < 0, p < 0$ |  $r < 0, p \gg 0$ |  $r < 0, p > 0$ |

3. ábra: r és p különböző értékeihez tartozó tér-időbeli lenyomatok ($b=1.2, z=0.1, s=1.1$).



4. ábra: r és p különböző értékeihez tartozó tér-időbeli lenyomatok ($b=1.2, z=0.1, s=1.1$).

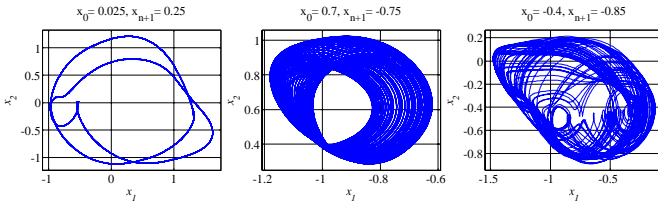
Második Tézis

Kaotikus dinamika, attraktorok szimultán létezése egydimenziós CNN-ben

Új komplex dinamikát fedeztem fel egydimenziós előjel antiszimmetrikus templét osztállyal leírt CNN-ben. Megvizsgáltam a határfeltétel, a kezdeti állapot és a rendszer dimenziójának hatását. Azt találtam, hogy a határfeltétel bifurkációs paraméterként viselkedik. Kimutattam attraktorok kezdeti állapottól függő szimultán létezését.

II/a. A határfeltétel hatása egydimenziós CNN-ben

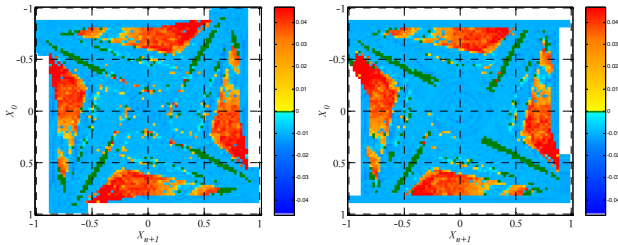
Megmutattam, hogy az előjel-antiszimmetrikus templét osztállyal jellemzett CNN dinamikus viselkedése függ a határfeltételtől. Példákat hoztam a CNN gazdag dinamikájának bemutatására, úgymint stabil, periodikus, kvázi-periodikus és kaotikus dinamika.



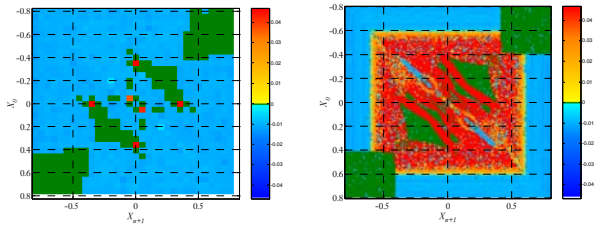
4. ábra: Periodikus, kvázi-periodikus és kaotikus dinamika 4×1 -es CNN-ben.

II/b. A kezdeti állapot és a dimenzió hatása, attraktorok szimultán létezése.

Megmutattam, hogy az állandósult állapotbeli dinamika függ a kezdeti állapottól: attraktorok szimultán léteznek ugyanazon rendszeren belül. Megmutattam, hogy hiperkaotikus viselkedés előfordulhat több mint öt cellából álló CNN-ben is. Demonstráltam, hogy a rendszer dimenziójának a párossága drasztikusan megváltoztatja a dinamikát.



5. ábra: 4×1-es CNN rendszer Ljapunov térképe 0 ill. -1 kezdeti állapot esetén.

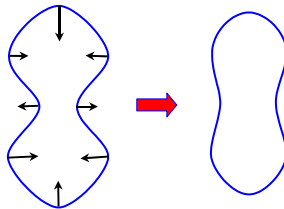


6. ábra: 5×1 és 7×1 dimenziójú CNN rendszer Ljapunov térképe a kétoldali határfeltétel függvényében.

Harmadik Tézis




Görbület vezérelt trigger-hullám

Megmutattam, hogy egy nemlineáris diffúzió jellegű templét osztállyal leírt CNN az alakzatok un. „Curve Shortening Flow”⁹-jának közelítését számítja ki (7. ábra). Tulajdonképpen a folyamat leírható CNN tömbben történő, lokális görbület vezérelt trigger-hullám terjedéseként (8. ábra). Ebben a keretben a görbét egy fehér alapon fekete, zárt, kitöltött alak kontúrja reprezentálja. A diffúzió jellegű tranzienst hatására az alak határán a fekete és fehér területek között egyenes (kétdimenziós) átmeneti zóna alakul ki, amit *batár régió*nak nevezünk (9. ábra). A régió szélességét a templét paraméterek határozzák meg. A régió alakjának az időbeli fejlődése megfelel az eredeti görbe fejlődésének. Hogy ezt megmutassam először is megvizsgáltam az időben fejlődő alak határrégiójának jellegzetességeit, majd tanulmányoztam ennek az átmeneti régióknak a dinamikáját.



7. ábra: Görbe-hossz csökkentő időbeli fejlődés.

⁹ „Görbe-hossz csökkentő időbeli fejlődés”

| | | | |
|--------|---|---|---|
| Output |  |  |  |
| idő | t: 0 | t: 4 | 14 |

8. ábra: Trigger-hullám - mint dinamikus alakzat - helyi görbületének változása.

III/a. A batár régió stabilitása

Bizonyítottam, hogy a batárrégió stacionárius ("stabil") feltéve, hogy a régió vízszintes vagy függőleges irányultságú. Összefüggést adtam a fekete és fehér területek közötti szürke, átmeneti cellák számára vonatkozóan vízszintes és függőleges batár régió esetében:

$$\frac{\pi}{\pi - \arccos(\mu)} - 2 < B < \frac{\pi}{\pi - \arccos(\mu)} - 1,$$

ahol B a lineáris cellák száma.

CNN egyenlet és feltételek:

$$\mu = \frac{\hat{p} - 1}{2\hat{s}}, \quad \hat{s} = 2r + s, \quad \hat{p} = 2s + p,$$

$$s, r > 0, \quad p < 1, \quad 4s + 4r + p > 1,$$

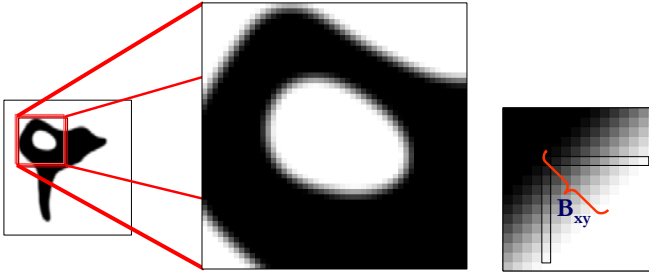
$$\dot{x}_{ij}(t) = -x_{ij}(t) + \sum_{k=-q}^q \sum_{l=-q}^q A_{kl} f(x_{i+k, j+l}(t)), \quad A = \begin{bmatrix} r & s & r \\ s & p & s \\ r & s & r \end{bmatrix}$$

Közelítő összefüggést adtam a minimális átmeneti cellák számára tetszőleges orientációjú egyenes batár régió esetében:

$$\frac{\pi}{\text{Arc cos} \frac{-1 + \sqrt{1 - 2\mu}}{2}} - 2 < B_{xy},$$

$$\text{ahol } \mu = \frac{p-1}{2s}, \quad s > 0, \quad p < 1, \quad 4s+p > 1, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & s & 0 \\ s & p & s \\ 0 & s & 0 \end{bmatrix}$$

Lásd még a 9. ábrát B_{xy} értelmezéséhez.



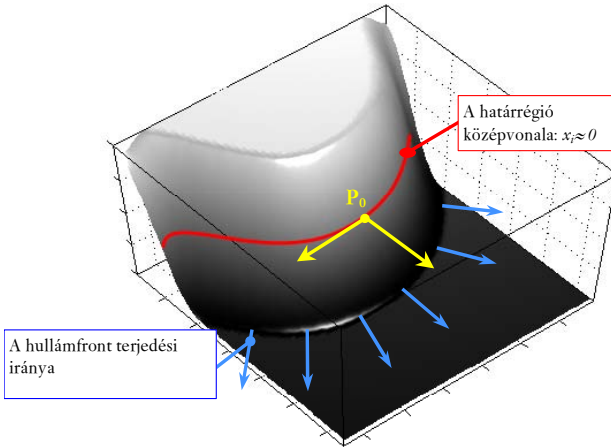
9. ábra: A határ régiók: a szürke cellák összessége a fekete és a fehér területek között. Az szürke - lineáris - átmeneti cellák száma: B_{xy}

III/b. A határ régió dinamikája

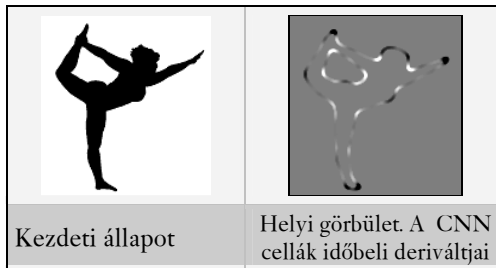
Megmutattam, hogy egy határ régióban levő átmeneti cella állapotváltozójának időbeli deriváltja a cellához tartozó izo-intenzitású vonal lokális görbületének kvázi lineáris függvénye feltéve, hogy a cella állapotváltozója közel van a nullához (11 – 12. ábra):

$$\frac{dx_i}{dt} = -x_i + s \left(1 + \frac{\kappa}{2} \right) x_{i-1} + (p + 2s)x_i + s \left(1 - \frac{\kappa}{2} \right) x_{i+1}$$

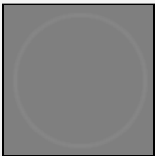
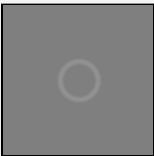
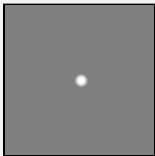
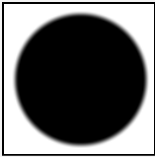
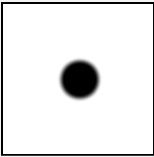
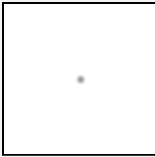
Az állapotváltozóra vonatkozó feltétel a batár régió közép-vonalában teljesül (10. ábra). Ennek eredményeképpen a batár régió – vagyis az alak kontúrja – kisimul feltéve, hogy a térbeli kényszerek ezt lehetővé teszik (8. ábra). Módszert adtam alakok konvex burkának egy tranzienssel történő kiszámítására. Továbbá, módszert adtam kétdimenziós pontbalmazok klaszterezésére.



10. ábra: A határrégió középvonala a terjedő hullámfrontban



11. ábra: Az alakzat helyi görbülete. A jobboldali képen a fekete a pozitív, a fehér a negatív görbületet jelenti.

| | | | |
|-----------------------------|---|---|---|
| Az áll. vált. Deriváltja |  |  |  |
| A CNN Kimenete |  |  |  |
| Idő | 230 | 2760 | 2980 |

12. ábra: A kör helyi görbületének változása, amit a CNN állapotváltozójának időbeli deriváltja ad meg cellánként.

LEHETSÉGES ALKALMAZÁSI TERÜLETEK

Első tézis

A fentebb említett tér-időbeli lenyomatok a rendszer dinamikájának egyszerű azonosítására használhatóak.

A templét osztály alkalmas lehet tér és/vagy időbeli mintázat generálására vagy egyfajta órajel generátorként (1. ábra), pl. mozgást vezérelhet az élőlények mozgásához hasonlóan (lásd [60]). Továbbá, több nem nulla elemmel rendelkező templétek alkalmasak lehetnek összetettebb minták létrehozására. (13. és 14. ábra).



13. ábra: A „madár” minta három pillanatfelvétele.

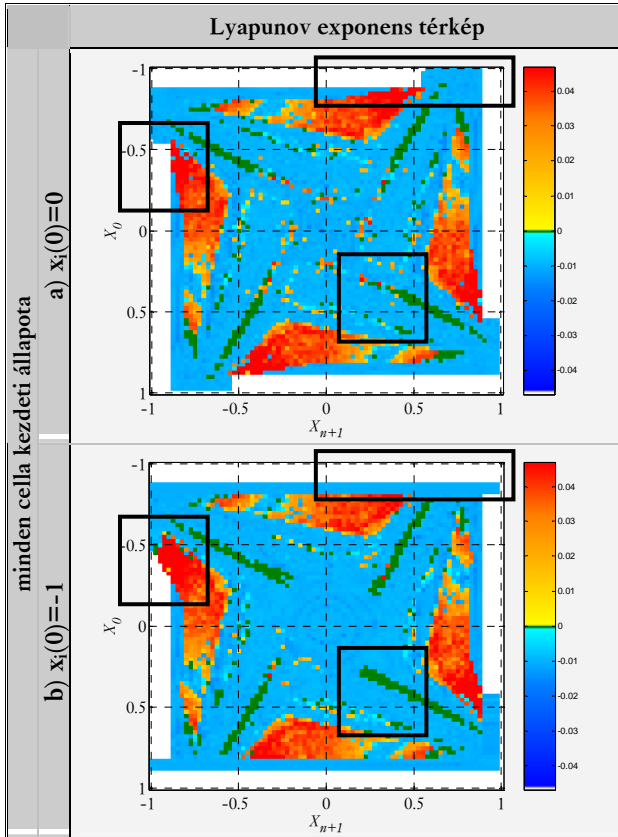


14. ábra: A „kitörés” minta három pillanatfelvétele.

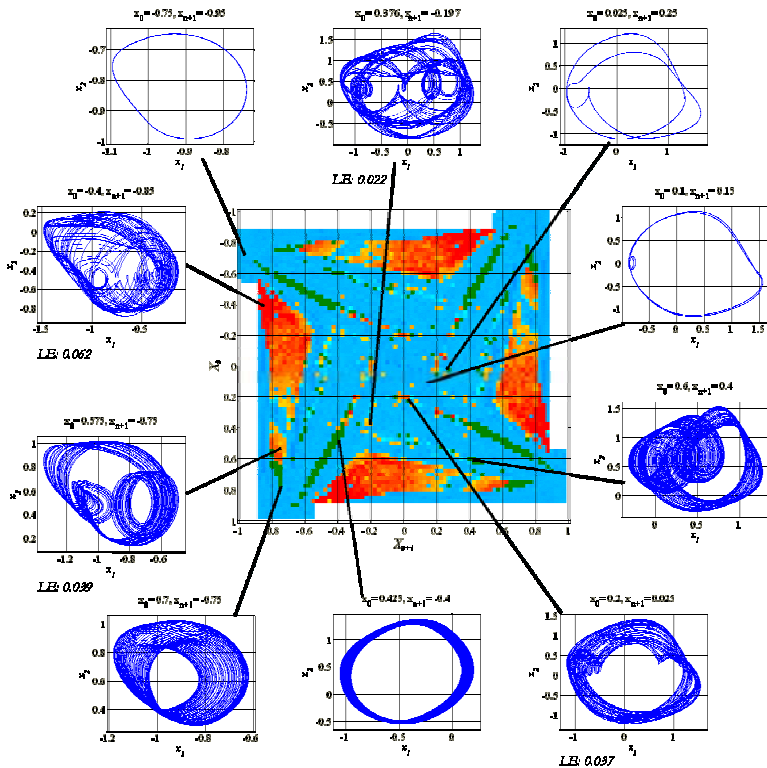
Második tézis

Az eredmények azt vetítik előre, hogy a rendszer különböző dinamikus állapotai szimultán létező attraktorok formájában (15. ábra) esetleg kihasználhatóak információ tárolására további kutatás után. Annak ellenére, hogy ez az értekezés a konstans bemenet hatását nem vizsgálja, megfogalmazható a sejtés, hogy a bemenet megváltoztathatja a rendszer dinamikáját hasonlóan a határfeltétel

hatásához (16. ábra) és így az effektus valószínűleg minta felismerésre és információátárolásra is használható.



15. ábra Attraktorok szimultán létezése 4×1 -es CNN-ben a) $x_i(0)=0$, b) $x_i(0)=-1$, $i=1..4$ kezdeti állapottal. (minden cella kezdeti állapota ugyanaz). Figyeljük meg a különböző attraktorok szimultán létezését: kaotikus \leftrightarrow határ ciklus, kaotikus \leftrightarrow tórusz és tórusz \leftrightarrow határciklus. Színek: Sárga-vörös: kaotikus, zöld: kvázi periodikus, kék: periodikus, fehér: stabil.



16. ábra. Ljapunov térkép. Néhány megfigyelt attraktor az ábra körül látható.

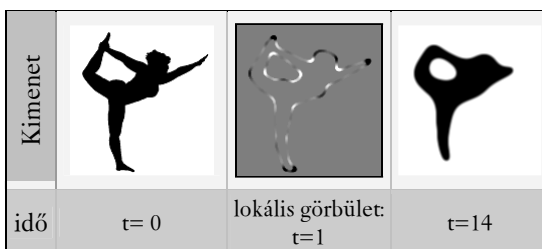
Harmadik tézis

Ennek a tézisnek az eredményei közvetlenebbül kapcsolódnak a képfeldolgozáshoz. A lokális görbület az alakok egy fontos jellemzője, ami forgatás és nagyítás érzéketlen. A lokális görbület párhuzamosan és hatékonyan számítható CNN-nel (17. és 19. ábra). Ez a képi jellemző összetett képfeldolgozó algoritmusok egyik elemi információját.

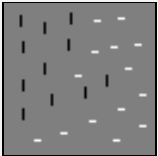
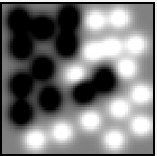

A kontúr simítás fontos szerepet játszhat a mintafelismerésben (17. és 19. ábra).

Pontok és foltok klaszterezése egy másik lehetséges alkalmazás (18. ábra).

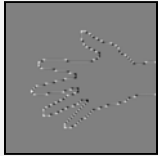
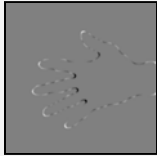
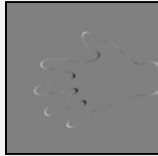
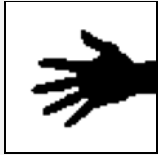

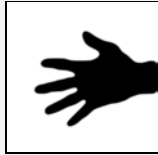
A konvex burok formája és területe a képfeldolgozásban az alakok fontos jellemzői. Ez szintén hatékonyan számítható CNN-nel (20. ábra).



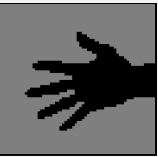
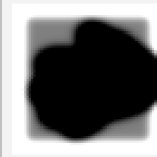
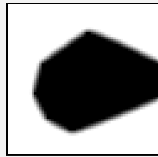
17. ábra: Kontúr simítás és a lokális görbület. Fekete a pozitív, míg a fehér szín a negatív görbületet jelöli.

| | | | |
|---------|---|---|---|
| Kimenet |  |  |  |
| idő | $t=0$ | $t=9$ | $t=24$ |

18. ábra foltok klaszterezése.

| | | | |
|-------------------------|---|---|---|
| áll. változó deriváltja |  |  |  |
| kimenet |  |  |  |

19. ábra Kontúr simítás. Felső sor az állapot változó egymás utáni pillanatfelvételeit mutatja. Az alsó a CNN kimeneteit ábrázolja.

| | | | |
|---------|--|--|--|
| Kimenet |  |  |  |
| idő | Kezdeti állapot | pillanatfelvétel $t=10$ | $z=0, t=1000$ |

20. ábra: A konvex burok számítása térbeli kényszer alkalmazásával. Ez azt jelenti, hogy kikötjük: a kezdetben fekete pixelek nem változhatnak. Technikailag ez **B** templét alkalmazását jelent.

A SZERZŐ PUBLIKÁCIÓI

- [1] R. Carmona-Galán, F. Jiménez-Garrido, C. M. Domínguez-Matas, R. Domínguez-Castro, S. E. Meana, I. Petrás and A. Rodríguez-Vázquez, “Second-Order Neural Core for Bioinspired Focal-Plane Dynamic Image Processing in CMOS”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, Vol. 51, No. 5, pp. 915-925, May 2004
- [2] I. Petrás, T. Roska, “CNN as Curve Shortening Flow Computer”, *Proceedings of 8th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*, Budapest, Hungary, 2004
- [3] V. Gál, J. Hámori, T. Roska, D. Bálya, Zs. Borostyánkői, M. Brendel, K. Lotz, L. Négyessy, L. Orzó, I. Petrás, Cs. Rekeczky, J. Takács, P. Venetiáner, Z. Vidnyánszky and Á. Zarándy “Receptive Field Atlas and Related CNN Models”, *International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)*, Vol. 14(2), pp. 551-584, February 2004
- [4] D. Bálya, I. Petrás, T. Roska, R. Carmona, A. Rodríguez-Vázquez “Implementing the Multi-Layer CNN Retina Model on the Complex-Cell Stored Program 2-Layer CNN Universal Machine Chip Prototype”, *Int. Journal of Bifurcation and Chaos, (IJBC)*, Vol. 14(2), pp. 551-584, 2004,
- [5] R. Carmona, F. Jiménez-Garrido, R. Domínguez-Castro, S. Espejo, T. Roska, Cs. Rekeczky, I. Petrás and A. Rodríguez-Vázquez, "A Bio-Inspired two-Layer Mixed-Signal Flexible Programmable Chip for

- Early Vision". *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 14, issue 5, pp. 1313-1336, ISSN 1045-9227, 2003
- [6] I. Petrás, C. Rekeczky, T. Roska, R. Carmona, F. Jimenez-Garrido, and A. Rodriguez-Vazquez, "Exploration of Spatial-Temporal Dynamic Phenomena in a 32×32-Cells Stored Program 2-Layer CNN Universal Machine Chip Prototype", *Journal of Circuits, Systems, and Computers (JCSC)* Vol. 12, No. 6, 2003
- [7] Cs. Rekeczky, I. Petrás, I. Szatmári and P. Földesy "Active Wave Computing on Silicon: Chip Experiments", *IEEE European Conference on Circuit Theory and Design - ECCTD 2003*, Krakow, pp. II-430-433, Sept., 2003
- [8] I. Petrás, Tamás Roska, Leon O. Chua "New Spatial-Temporal Patterns and The First Programmable On-Chip Bifurcation Test-Bed" *IEEE Trans. on Circuits and Systems I, (TCAS I)*, pp. 619-633, May 2003
- [9] I. Petrás, P. Checco, M. Gilli, and T. Roska, "On the Effect of Boundary Condition on CNN Dynamics: Stability and Instability; Bifurcation Processes and Chaotic Phenomena", *Proc. of ISCAS 2003*, pp. III 590-593, 2003
- [10] I. Petrás, T. Roska, "New spatial-temporal patterns and the first programmable on-chip bifurcation test-bed", *Proceedings of 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*, Frankfurt, Germany, 2002
- [11] I. Petrás, T. Roska, "Application of Direction Constrained and Bipolar Waves for Pattern Recognition" *Int. Workshop on Cellular Neural Networks and*

- Their Applications (CNNA2000), Proc., pp. 3-8, Catania, Italy, 2000
- [12] Á. Zarándy, T. Roska, P. Szolgay, S. Zöld, P. Földesy and I. Petrás, "CNN Chip Prototyping and Development Systems", European Conference on Circuit Theory and Design - ECCTD'99, Design Automation Day proceedings, (ECCTD'99-DAD), Stresa, Italy, 1999
- [13] P. Szolgay, K. László, L. Kék, T. Kozek, L. Nemes, I. Petrás, Cs. Rekeczky, I. Szatmári, Á. Zarándy, S. Zöld and T. Roska, "The CADETWIn Application Software Design System - A Tutorial", European Conference on Circuit Theory and Design - ECCTD'99, Design Automation Day proceedings, (ECCTD'99-DAD), Stresa, Italy, 1999
- [14] P. Szolgay, Á. Zarándy, S. Zöld, T. Roska, P. Földesy, L. Kék, T. Kozek, K. László, I. Petrás, Cs. Rekeczky, I. Szatmári and D. Bálya, "The Computational Infrastructure for Cellular Visual Microprocessors", Proceedings of Seventh Int. Conf. on Microelectronics for Neural, Fuzzy, and Bio-Inspired Systems, (MicroNeuro'99), pp. 54-60, Granada, IEEE Computer Society, 0-7695-0043-9, 1999

A SZERZŐT HIVATKOZÓ CIKKEK

- [15] Cembrano GL, Rodriguez-Vazquez A, Galan RC, et al. "A 1000 FPS at 128 x 128 vision processor with 8-Bit digitized I/O", IEEE Journal OF Solid-State Circuits 39 (7): 1044-1055 Sp. Iss. SI, Jul 2004
- [16] Levendovszky J, Fancsali, "A Real-time call admission control for packet-switched networking by cellular neural networks", IEEE Transactions on Circuits and Systems I-REGULAR PAPERS 51 (6): 1172-1183, Jun 2004
- [17] Biey M, Checco P, Gilli M, "Bifurcations and chaos in cellular neural networks", Journal of Circuits Systems and Computers, 12 (4): 417-433, Aug 2003

IRODALOMJEGYZÉK

- [18] V. I Krinsky, V. N. Biktashev, and I. R. Efimov, "Autowave Principles for Image Processing", *Physica D* 49, pp. 247-253, 1991.
- [19] V. I. Krinsky and A. M. Zhabotinsky, "Autowave Process in Systems with Diffusion", Ed. M. T. Grekhova, Gorki IPF Acad. Sci USSR, p. 6, 1981
- [20] L. O. Chua, Ed., "Special Issue on Nonlinear Waves, Patterns and Spatio-Temporal Chaos in Dynamic Arrays," *IEEE Transactions on Circuits and Systems: I*, vol. 42, no. 10, Oct. 1995.
- [21] L. O. Chua, M. Hasler, G. S. Moschytz and J. Neiryneck, "Autonomous Cellular Neural Networks: A Unified Paradigm for Pattern Formation and Active Wave Propagation," *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 42, pp. 559-577, 1995.
- [22] M. Allesie, F. I. M. Bonke, J.G. Schopman, "Circus movement in rabbit atrial muscle as a mechanism of tachycardia," *Circ. Res.* 33, 54-62.
- [23] A. V. Holden, M. J. Poole and J. V. Tucker, "An algorithmic model of the mammalian heart: propagation, vulnerability, re-entry and fibrillation," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 6, No. 9-10, 1623-1636, 1996.
- [24] A. N. Zaikin, A. M. Zhabotinsky, "Concentration waves propagation in two-dimensional liquidphase self-oscillating system," *Nature* 225, 535-537, 1970

- [25] A.C. Scott, "The electrophysics of a nerve fiber", *Rev. mod. Phys.* Vol. 47, pp 487–533, 1975
- [26] P. C. Newell, "Microbial Interactions, Receptors and Recognition", Series B, J. L. Reissig, ed., pp. 1–57, Chapman & Hall, 1977
- [27] B. Goodwin, "How the leopard changed its spots", Charles Scribner's Sons, New York, 1994
- [28] P. C. Newell, "Attraction and adhesion in the slime mold *Dyctyostelium*," in *Fungal Differentiation: A Contemporary Synthesis* ed. Smith, J. E., *Micology Series* 43 (Marcel Dekker, NY), p. 43, 1983
- [29] A. M. Turing, "The chemical basis of morphogenesis", *Phil. Trans. R. Soc. London*, B327, 37–72 (1952).
- [30] I. Prigogine, "From being to becoming", W. H. Freeman and Company, New York, 1980
- [31] Ser. Ed: L. O. Chua, Ed: V. Pérez-Villar V. Pérez-Muñuzuri, Pérez García and V. I. Krinsky, "New Trends in Pattern Formation in Active Nonlinear Media," *World Scientific Series in Nonlinear Science, Series B*, Vol. 3, 1995
- [32] L. O. Chua, "CNN: A Paradigm for complexity", World Scientific Pub Co; ISBN: 981023483X, 1998.
- [33] S. Wolfram, *A New Kind of Science*, Wolfram Media, Inc., Champaign IL, 2002.
- [34] S. Wolfram, *Cellular Automata and Complexity*, Westview press, Member of the Perseus Books Group, 1994.
- [35] H. Meinhardt, *The Algorithmic Beauty of Sea Shells (The Virtual Laboratory Series)*, Springer-Verlag New York, ISBN: 3540440100, 2003

- [36] A. Sanz-Anchelergues, A. P. Munuzuri, “Experimental and Quantitative Modeling Studies of Turing Pattern Formation Under Stochastic Spatial Fluctuations”, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 11, No. 11, 2739–2749, 2001
- [37] H. Haken, “Vision of Synergetics,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 7, No. 9, 1927-1951, 1997
- [38] H. Meinhardt, “Biological Pattern Formation as A Complex Dynamic Phenomenon,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 7, No. 1, 1-26, 1997
- [39] E. Schrödinger, “What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell & Mind and Matter” University Press, Cambridge, 1967
- [40] H. Haken, ”Synergetics: From Pattern Formation to Pattern Analysis and Recognition”, *International Journal on Bifurcation and Chaos*, Vol. 4, No. 5, pp. 1069-1083, 1994.
- [41] H. Haken, *Synergetic Computers and Cognition*, Springer Verlag, Berlin, 1991.
- [42] G. Nicolis, I. Prigogine, “Exploring Complexity,” W. H. Freeman, New York, 1989
- [43] Krinsky, V. I. (ed.) “Self Organization. Autowaves and Structures Far from Equilibrium” (Springer, Berlin, Singapore), pp. 9–19. 1984
- [44] C. G. Langton, “Computation at the edge of chaos: Phase transitions and emergent computation,” *Physica D*, Vol. 42, pp. 12–37, 1990
- [45] L. O. Chua, “CNN: a Vision of Complexity”, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 7, No. 10, pp. 2219-2425, 1997.

- [46] R. Dogaru, L. O. Chua, “Edge of Chaos and Local Activity Domain of the Gierer Meinhardt CNN”, *International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)*, Vol. 8, No. 12, pp. 2321–2340, 1998
- [47] R. Dogaru, L. O. Chua, “Edge of chaos and local activity domain of FitzHugh–Nagumo Equation,” *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol. 8, No. 2, pp. 211–257, 1998
- [48] R. Dogaru, L. O. Chua, “Edge of chaos and local activity domain of the Brusselator CNN,” *Int. J. Bifurcation and Chaos*, Vol. 8, No. 6, 1107–1130. 1998
- [49] L. O. Chua, “Passivity and Complexity”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 46, No. 1, 1999.
- [50] J. P. Keener, “Propagation and its Failure in Coupled Systems of Discrete Excitable Cells”, *SIAM J. Appl. Math.*, Vol. 47, 556–572, 1987.
- [51] L. O. Chua and L. Yang, “Cellular Neural Networks: Theory”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 35, pp. 1257–1272, Oct. 1988.
- [52] L. O. Chua and L. Yang, “Cellular Neural Networks: Applications”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 35, pp. 1273–1290, Oct. 1988.
- [53] L. O. Chua, and T. Roska, “The CNN Paradigm”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 40, pp.147–156, March 1993.
- [54] T. Roska and L. O. Chua, “The CNN Universal Machine: an Analogic Array Computer”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 40, pp. 163–173, March 1993.
- [55] J. E. Hopcroft, R. Motwani, J. D. Ullman, “Introduction to Automata Theory, Languages and Computation”, Addison Wesley, 2000.

- [56] E.R. Kandel, J.H. Schwartz, "Principles of Neural Science", second edition, Elsevier, New York, Amsterdam, Oxford, 1985
- [57] B. Roska, F.S. Werblin, "Vertical Interactions Across Ten Parallel Stacked Representations in the Mammalian Retina," *Nature*, Vol. 410, pp. 583-587, 2001
- [58] G. Liñán, S. Espejo, R. Dominguez-Castro and A. Rodríguez-Vázquez, "ACE4k: an Analog I/O 64x64 Visual Microprocessor Chip with 7-bit Analog Accuracy", *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Vol.30, pp.89-116, 2002
- [59] Cs. Rekeczky, T. Serrano-Gotarredona, T. Roska and A. Rodríguez-Vázquez, "A Stored Program 2nd Order/3-Layer Complex Cell CNN-UM", Proc. *Sixth IEEE Intern. Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications*, Catania, Italy, May 2000, pp.219-224.
- [60] P. Arena, L. Fortuna, M. Branciforte, "Reaction-Diffusion CNN Algorithms to Generate and Control Artificial Locomotion," *IEEE Transaction on Circuits and Systems, I: Fundam. Theory and Applic.*, Vol. 46 No. 2, pp.259-266, Feb. 1999

FÜGGELÉK

A CNN–UM mobil robotban

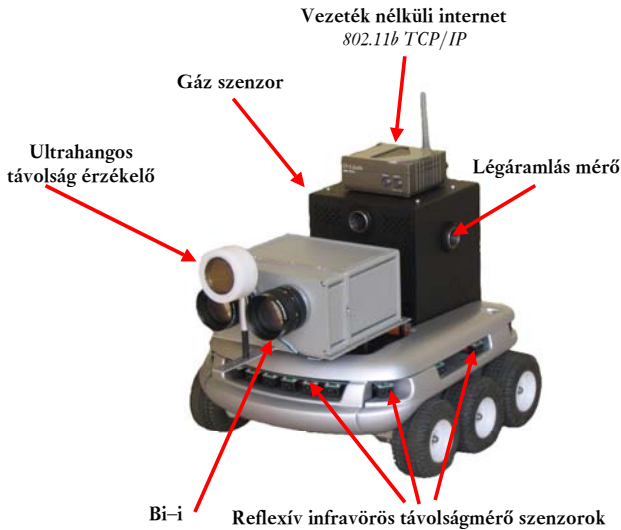
A harmadik tézis kapcsán ismertetett görbület és konvex-burok számításra vonatkozó módszerek nagyobb rendszerekben is alkalmazásra kerülhetnek. Egy ilyen rendszer az általunk fejlesztett mobil megfigyelő rendszer, ami képes lesz eseményeket és objektumokat azonosítani azok egyszerű jellemzői alapján (alak, mintázat, mozgás, stb.), továbbá, képes azokat önállóan megközelíteni, és azokról információt gyűjteni és továbbítani a földi állomásnak. A mobil egység vezeték nélküli összeköttetésben van a földi állomással, ami a mobil egység vezérlésébe bármikor beavatkozhat.

A robot rendszer számos szenzorral van ellátva. Akkumulátorról működik és a *Bi-i CNN-UM* alapú *kamera-számítógép* vezérli. A robot platform maga kereskedelmi forgalomban kapható.

A rendszer egységei számos partner együttműködésének az eredménye. A Bi-i rendszert az *Analogic Computers kft.* tervezte és gyártotta. Az áramlásmérő szenzort az MTA-KFKI-MFA kutatóintézet csoportja készítette. (21. ábra). A magas szintű robotvezérlő program algoritmikus keretét és alrendszereit az MTA-SZTAKI-ban a szerző tervezte (22. ábra).

A rendszer fő komponensei: a bázis állomás, ami egy PC-ből és egy vezeték nélküli adapterből áll, valamint a mobil egység. A mobil egység a robot platformból (Ko-

ala), a CNN-UM-et tartalmazó Bi-i kamera számítógépből és a szenzorok platformjából áll. A Koala robot egy mikroprocesszor vezérelt, infravörös és ultrahangos távolság szenzorokkal ellátott, önálló mobil platform. A távolságszenzorok az alacsonyszintű navigációt teszik lehetővé. A szenzoros platform a gáz és áramlásmérő szenzorokat tartalmazza.

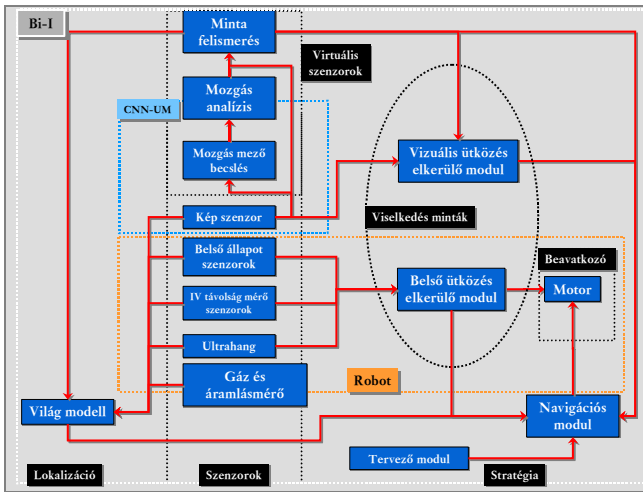


21. ábra Mobil megfigyelő rendszer.

A Bi-i rendszer a magas szintű vezérlésért felelős. Három különböző speciális processzort tartalmaz (CNN-UM, DSP¹⁰, Kommunikációs processzor). A robot autó mikroprocesszora a motorok vezérléséért felelős. Alacsonyszintű akadályelkerülő algoritmus fut rajta folya-

¹⁰ *digital signal processor*, digitális jel processzor

matosan, amit a Bi-i rendszer vezérlő jelei modulálnak. Az autó irány és sebesség parancsokat kap a Bi-i-től, ami az un. hibrid robot vezérlési stratégia legnagyobb részét számítja folyamatosan. A fő hangsúly a képfeldolgozáson van, ami a legszámításigényesebb része a vezérlési algoritmusnak (22. ábra).



22. ábra: A mobil robot vezérlési struktúrája.

A rendszer a CNN-UM processzoron futtatja a képfeldolgozó algoritmusok számításigényes részeit. Ez magába foglalja a képek topografikus előfeldolgozását (mozgás és képi jellemzők kiemelése és ezek fűziója). A DSP vezérli a CNN-UM-et, méri adatokat gyűjt a szenzoroktól és a robot autótól. Az autó, ha szükséges, továbbítja a távolság szenzorok méréseit és a belső állapotot leíró szenzorok adatait. A DSP számítja, továbbá a mozgás analízáló algoritmus néhány részét és az eredmények kategorizálásához szükséges utófeldolgozást is elvégzi.

Más magas szintű modulok is futnak a DSP-n: a *világ modelt* karbantartó modul; a *tervező modul*, ami meghatározza az elérendő célt és elvégzi a különböző szenzoros modalitások fuzionálását, hogy alkalmas bemenetet biztosítson a *navigációs modulnak*, ami pedig kiválasztja a megfelelő *viselkedésmintát* (valamilyen irányú mozgás), hogy az autó elérje a célt.



23. ábra a mobil egység a teszt labirintusban.

A mobil egységet egy zárt világban teszteljük (23. ábra), amiben különböző objektumokat kell felismerni, és helyeket megtalálni a fuzionált infravörös, ultrahang, gáz és képi szenzorok jelei alapján.

