
**EMLŐS RETINA MODELLEZÉSE ÉS
VALÓS-IDEJŰ TANULÁS CNN ARCHITEKTÚRÁN
- ELMÉLET, MODELLEZÉS ÉS ALKALMAZÁSOK -**

Ph.D. disszertáció tézisei

Bálya Dávid

Magyar Tudományos Akadémia
Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézete
Analogikai és Neurális Számítások Kutatólaboratórium

Tudományos vezető:

**Dr. Roska Tamás
az MTA rendes tagja**

Budapest, 2003

“Ha agyunk annyira egyszerű lenne, hogy megérthetnénk a működését, mi magunk annyira egyszerűek lennénk, hogy nem volnánk erre képesek.”

Jonathan Evans

Bevezetés

A digitális technológia rohamos fejlődésével több fontos alkalmazási területről szorult ki az analóg megoldás. Maradt azonban számos problémakör - példaként megemlíthető az érzékelő közeli, valós idejű feldolgozás (szűrés és felismerés) -, amelyekben a feladatok jelentős számításgénye miatt a teljesen digitális és szekvenciális elvű tervezés a belátható jövőben sem vezethet elfogadható eredményre. A felismert korlátok motiválták a neurális/nemlineáris elvű párhuzamos processzortömbökkel kapcsolatos kutatásokat és az első hardver prototípusok elkészítését, amelyek azonban a várakozással ellentétben nem hozták meg a remélt áttörést. Ennek legfőbb oka nem a limitált analóg pontosság problémájában rejlik. A széles körű elterjedést és ipari alkalmazást sokkal inkább az akadályozta meg, hogy ezen új típusú számítási eszközök gyors átprogramozhatóságára nem volt lehetőség - így felhasználásuk csak egy jól meghatározott feladat megoldására korlátozódott. Az a tervezési szemlélet is zsákutcát jelentett, hogy a legtöbb kutató-fejlesztő teljesen összekötött processzorhálókból gondolkodott, amelyek implementációs komplexitása a processzorok számának növekedésével exponenciális ütemben nő.

A celluláris nemlineáris hálózatok (CNN - cellular nonlinear network) paradigmából kiinduló új számítógépes architektúrák megoldást kínálnak a fent említett problémákra. A CNN egy síkon egyenletes sűrűséggel elhelyezett, analóg nemlineáris számítási egységeket (bázis cellákat) tartalmazó, egy vagy több rétegű, párhuzamos működésű rendszer. Az egyes egységek térben lokálisan összekötött folytonos jelfeldolgozó processzorok. A hálózat programjának egy utasítása a számítási egységek közötti kapcsolatot egyértelműen meghatározó lokális interakciós mintázat, az ún. template, míg a számítás eredményét a processzorok dinamikája és a template-operátor által együttesen meghatározott analóg tranziens tér-időbeli lefolyása illetve adott idő eltelte után az egyensúlyi vagy nem egyensúlyi állapotban kiolvasott eredménye jelenti. A CNN háló bázis celláit érzékelő egységekkel, lokális adatmemóriával, aritmetikai és logikai egységgel, továbbá globális programmemóriával és vezérlő egységgel kiegészítve jutunk a CNN Univerzális Gép (CNN-UM - CNN Universal Machine) architektúrájához. A CNN-UM a CNN alapú hardver megvalósítások tervezési kerete, egy összetett feldolgozási feladatokat valós időben megoldani képes - Turing értelemben és nemlineáris hálózati operátorként is univerzális - analogikai (analóg és logikai) szuperszámítógép. Ezen architektúrának ma már többféle fizikai megvalósítása is van a hagyományos CISC (általános célú processzor) szimuláción kívül: kevert jelű analóg VLSI, emulált digitális VLSI és optikai.

A kibontakozó számítási mód, amelyre a CNN-UM architektúra is épül bizonyítottan igen alkalmas képfolyamok vagy állóképek feldolgozására. Ezek az érzékelő-közeli gyors, adaptív számítások kritikusak lehetnek a későbbi hasznosítás hatékonyságának szempontjából. Az érzékelőt tartalmazó CNN cellák interakciójaként a kép végcélja szempontjából érdekes részét kell csupán a további feldolgozáshoz a digitális processzornak elküldeni, ezáltal a hagyományos rendszerek általános problémája, az érzékelőtől a számító

egységig történő képtovábbítás sávszélessége csökkenthető. További csökkentést, értelmes absztrakciót lehet megvalósítani, ha a kép vagy képváltás jellegét továbbbítjuk, azaz ha osztályozzuk az előfeldolgozás eredményét.

Az emlős retina modellezésének célja strukturálisan és működésében egyszerű mérnöki retinamodell kialakítása, amely azonban minőségileg helyes eredményre vezet. Ezáltal lehetőség nyílik a retina egyes strukturális elemeinek és feldolgozásbeli szerepének megértésére, valamint jóslatokat lehet adni tetszőleges bemeneti mintázatokra, melyeket a jelenlegi technológiával nem lehetséges közvetlenül a biológiai retinában megmérni. A retina, mint komplex előfeldolgozó egység számos alkalmazásban felhasználható. A retinaképek segítségével újszerű, hatékonyabb objektum-felismerést, -követést, -osztályozást lehet megvalósítani. Ráadásul a modell műszaki használhatóságán túl a biológusok kutatásait is segítheti. A modellezés, a természetes „megoldások” megismerésének igazi haszna azonban az újszerű megközelítésekből adódik. A retina képfeldolgozásának szervezési elveit illetve hasznos elemekkel bővíthetjük a feladatok nehézségeinek leküzdéséhez használt fegyvertárunkat. Ilyen alapelv például a komplementer események, helyzetek keresése (párhuzamos feldolgozás – 1. téziscsoport), a folyamatok feldolgozásának szakaszolása a váltásokkor (2. tézis) és a párhuzamos jelutakból adódó normalizálás és felismerés (osztályozás – 3. téziscsoport).

A vizsgálatok módszerei

A dolgozatban bemutatott eredményekhez felhasználtam a közönséges és parciális differenciálegyenlet-rendszerekre vonatkozó tételeket és állításokat, a neurális hálózatokkal kapcsolatos stabilitási, plaszticitási, robusztussági és megvalósíthatósági vizsgálatok eredményeit, továbbá a robusztus statisztikai elemzések módszertanát. A biológiai modellezésben morfológiai, farmakológiai és elsősorban neurofiziológiai megfigyelések és mérések adataira támaszkodtam.

A tervezett és felhasznált CNN template-eket és algoritmikus megoldásokat szoftver szimulátorokon (CANDY illetve AladdinPro), valamint VLSI CNN-UM chipet tartalmazó fejlesztő rendszeren (AceBox – ACE4K ill. CACE1K vizuális CNN mikroprocesszorokkal) teszteltem, amelyek fejlesztésében folyamatosan részt vettem. Elkészítettem a kidolgozott módszerek magas szintű, implementáció független, "CNN nyelvű" leírásait (UMF, Alpha), amellyel az eredmények különböző hardver platformokon is felhasználhatók. A retina modellt megadtam számítógépes szabvány formanyelven (XML formátumban). A tervezésben törekedtem a VLSI komplexitás minimalizálására, így a problémamegoldásban közvetlen szomszédságú interakciókra épülő template-osztályokat használtam fel. Ezek olyan lineáris interakciók a nemlineáris rendszerben, amelyek a működő prototípus VLSI chipeken rendelkezésre álltak, vagy programozással megvalósítottam azokat. Az algoritmusok általánosításaiban olyan egyszerű nemlineáris interakciókra épülő nemlineáris operátorokat is használtam, amelyek hardver megvalósítása a közeljövőben várható. Szoftver szimulációban a CNN hálózatot leíró csatolt differenciálegyenletek numerikus megoldására elsőrendű

explicit és adaptív lépésközű Euler formulát illetve ahol szükségesnek mutatkozott magasabb rendű formulát (Cash-Karp adaptív 4/5-rendű Runge-Kutta) használtam. A képfeldolgozási algoritmusokat nemzetközileg elfogadott referencia képeken, illetve a kutatásban aktívan együttműködő partnerekkel közösen létrehozott adatbázisokon teszteltem.

Szembetűnő a különféle vizsgálatok és kísérletek interdiszciplináris jellege. Számos munkában dolgoztam együtt neurobiológusokkal, az ő útmutatásaikra támaszkodott a modellek felépítése és használhatósági vizsgálata is.

Új tudományos eredmények

1. Tézis: Emlős retinamodell építése a neurobiológiai működésből és adatokból kiindulva a hardver megvalósításig.

Megmutattam, hogy az emlősök tipikus retinájának teljes, minőségileg helyes modellje felépíthető egy olyan celluláris neurális hálózati (CNN) számítási keretben (architektúrában), amely megvalósítható szilíciumon, programozható integrált-áramkörü chipként (VLSI). A retina sejtrétegjeinek többrétegű CNN modelljét a kidolgozott magas szintű modellező környezetben terveztem meg tér-invariáns közvetlen szomszédságú interakciókkal és monoton folytonos szinaptikus karakterisztikák felhasználásával. Ellenőrzésként a modell kimeneteinek tér-időbeli mintázatát a nyúl retinájának mérési adataival vettem össze.

Publikációk: IJBC, CTA, ISCAS, CNNA, ECCTD, a disszertáció 2. fejezete

1.1: Meghatároztam a többrétegű celluláris neurális nem-lineáris (CNN) retina modell struktúráját és megadtam a modell hangolásának módját.

A retinára vonatkozó morfológiai és fiziológiai ismeretek alapján meghatároztam a többrétegű CNN retina modell struktúráját. Megadtam a modell hangolásának egy módszerét. Az elektro-fiziológiai mérések alapján hangoltam a rendszert, úgy hogy a nyúl retinájának több csatornáját minőségileg helyesen visszaadja a szimuláció. Ez az első olyan emlős retina modell, amely képes a sok párhuzamos képfolyam-transzformációt igazolhatóan neuromorf módon reprodukálni.

1.2: A kidolgozott retina modell megvalósíthatósága programozott integrált-áramkörü chipen.

Az előző pontban kifejtett sokrétegű emlős retina modell implementációjának lehetőségét vizsgáltam programozott VLSI chipen. Megadtam a modell dekomponálásának módját a megvalósított általános célú, univerzális komplex-cellás CNN-UM chipre (CACE1K) analogikai algoritmus formájában. A dekomponált modell egyes blokkjait implementáltam a CACE1K prototípus vizuális mikroprocesszoron. Eljárást adtam faj-specifikus retina modell építésére, a modellalkotás folyamatának lépéseit definiálva a neurobiológiai adatoktól a CNN modellen át a chip programozásáig.

2. Tézis: Hatékonyan implementálható algoritmust dolgoztam ki az olyan globális tranziensek felismerésére, melyek retinális gátló folyamatok kiváltására képesek.

A hirtelen egyirányú globális változások mérhető gátlást okoznak a retinában. Ezen téridőbeli esemény felismerésére neurobiológiai jellemzői alapján algoritmust készítettem. Az algoritmust implementáltam egy általános CNN-UM chipen (ACE4K), ami így valós-idejű feldolgozásra alkalmas eszközként alkalmazható, mivel a számítás csupán másfél mikroszekundumig tart. Az eljárás beilleszthető a korábban kidolgozott és dekomponált retina modellbe is.

Publikációk: JCSC, ISCAS, a disszertáció 3. fejezete

3. Tézis: Globális tanulás a CNN univerzális gép (CNN-UM) architektúrán: osztályozás neurális hálózatokkal.

A kiterjedt irodalommal rendelkező neurális hálózatok tipikus megvalósítási módja a szimuláció. Célprocesszorok is készültek a szükséges számítások felgyorsítására, de ezek szükségképpen egy szűk osztályt valósítják meg a lehetséges hálózatoknak. Kidolgoztam egy un. állapotelosztáson alapuló módszert az általános előre-csatolt neurális háló CNN-UM architektúrára történő átalakítására, amikor is nem a neuronoknak felel meg egy cella, hanem a kapcsolatoknak. Az eredeti hálózat így számítható a programozható, univerzális és párhuzamos működésű CNN-UM környezetben, mint analogikai algoritmus. A módszert felhasználtam az ART osztályozó hálózat hatékony CNN-UM implementációjára.

Publikációk: IJNS, CNNA, ECCTD, a disszertáció 4. fejezete

3.1: Valós-idejű módszert adtam általános előre-csatolt neurális hálózatok CNN struktúrára való alakítására.

A módszer kulcsa, hogyan lehet az általános előre-csatolt hálózat súlyait a CNN cellák állapotaiként reprezentálni. Erre szolgál az állapotelosztási lépés, majd a számítást a CNN-UM párhuzamosan, mint analogikai algoritmus végzi el. Minden cella állapota egy hálózati súlyt tárol, a cellatömb egy sora feleltethető meg egy neuronnak. A módszer megteremti annak lehetőségét, hogy az ismert, széles körben használt neurális hálózati megoldásokat hardver eszközön, az általános célú CNN-UM-en alkalmazzák.

3.2: Megvalósítottam az adaptív rezonancia elmélet (ART) osztályozó hálózatot CNN-UM architektúrán.

A CNN-UM bizonyítottan igen alkalmas képfolyamok előfeldolgozására, azonban gyakran van szükség az eredmények osztályozására is. Megmutattam hogyan lehetséges a széles körben használt ART osztályozó hálózatot a CNN-UM architektúrán megvalósítani. Az eredeti algoritmust az architektúra szempontjából kedvezőbbé tettem és megadtam az optimális logikai döntési függvényeket. Az algoritmus alkalmas az osztályok számának előzetes megadása nélkül tetszőleges bemeneti mintasorozatok önálló vagy felügyelt robusztus, konvergens és stabil csoportosítására, állítható érzékenységgel. A kidolgozott algoritmust ACE4K vizuális mikroprocesszoron (CNN-UM) implementáltam, amely több mint félezer 32 bit hosszú vektort képes osztályozni másodpercenként.

Kísérleti és alkalmazási környezethez kapcsolódó eredmények

1. Megadtam egy elsősorban analóg módon működő sok hasonló neuronból felépülő celluláris hálózatok modellezésére alkalmas leírási módot, amelyben lehetséges magas szinten leírni az egyes elemeket és kapcsolataikat. Megadtam a modellezési környezet CNN differenciálegyenletekre való átalakítását. Elemeztem a modellkörnyezet elemeit és egyes tipikus esetekben explicit formulákat adtam az impulzusválasz maximumának elérési idejére és a túllövés értékére.
2. A retina modell téridőbeli szimulációjának különböző módjait vizsgáltam és levezettem egy változó lépésközű explicit univerzális formulát, amely csekély (15%) többletszámítást igényel és nem alkalmaz visszalépést, ugyanakkor jelentősen gyorsítja a differenciálegyenletrendszer tranziensének kiszámítását.
3. A globális tranziens felismerésére alkalmas eljárást alkalmaztam video-vágások helyének meghatározására.

Az eredmények alkalmazási területei

A dolgozat valamennyi eredménye egy terepfelismerő rendszerben egyesíthető. A rendszer feladata egy képfolyamból megállapítani, hogy milyen környezetben van a kamera. Először egy retinaszerű, tér-időbeli csatornák szerinti absztrakció történik (1. tézis), majd statisztikai jellemzők kinyerése, végül osztályozás (3. tézis). Minden gyors kameramozgáskor, például automatikus fókuszáláskor vagy közelítés-, távolításkor kezdeti állapotba kell hozni a rendszer paramétereit (pl. homotopia), ezen események felismerésére szolgál a szakkád algoritmus (2. tézis). A retina sokcsatornás képfeldolgozási módját felhasználva e csatornák eredményét, mint tulajdonság-vektorokat alkalmaztam az osztályozásnál.

A CNN bázisú neuromorf retinamodellezés (1. tézis) egy olyan kis komplexitású nemlineáris számítási keretet határoz meg, amelyben a sejt szintű mérési eredmények egy jelentős része már reprodukálható. A retina modellezés kutatási eredményei mérnöki feladatok megoldásához is felhasználhatóak. A gyakorlatilag is fontos feladatok körébe tartozik az alakzatok osztályozása, felismerése és követése. A megvizsgált és megvalósított jelenségek közvetlenül is hasznosak lehetnek képfeldolgozási feladatokban.

- Él és sarok detektálása térben és időben
- Objektum-szintű mozgás detektálása méret kiválasztással (helyi összeköttetésekkel)
- Sebesség, méret, és intenzitásfüggő képfolyam-feldolgozás téridőbeli zajszűréssel

Az eredményekből levonható tanulságok, tervezési elvekre néhány példa

- A bemenő jelfolyam térbeli, időbeli és téridőbeli dekompozíciója
- Adaptív párhuzamos On-Off csatorna-feldolgozás jelfolyam normalizálással
- A feldolgozott folyamatok közötti kapcsolat minimalizálására a csatornák közötti interakcióval

A filmek egyes jeleneteit vágások és áttünések kötik össze. Amennyiben ezeket a váltásokat gyorsan és automatikusan fel tudjuk ismerni a kezdődő jelenet első képkockáját, mint kulcsképet sokrétűen felhasználhatjuk, legyen az egy hatékony tömörítési eljárás vagy akár gyorskeresés. Az algoritmus kis memória és számítási igénye miatt, alkalmas általános valós-idejű téridőbeli algoritmusok javítására, például

- Mozgás kompenzáció és képstabilizálás
- Képvágások felismerése (vágás, áttűnés, SONY)
- Tartalom-alapú videó tömörítéséhez kulcskockák kijelölése
- Történet alapú jelfeldolgozás újraindításának időpontja
- Kamera baleset felismerése (állvány felborulása)
- Retinamodell finomítása bizonyos fajta szakkadikus elnyomás beépítésével

A javasolt ART algoritmus bármely gyors osztályozási feladatban használható. Például

- Objektum azonosítás morfológiai információk alapján
- Terepazonosítás textúra alapján (pl. az út kátyús, köves, sáros)
- Biometrikus azonosítás (pl. ujjlenyomat, arcfelismerés)
- Orvosi jelfeldolgozás (pl. EKG)
- Mintázat-felismerés
- Követési feladatban objektum és modell összekapcsolása

Köszönetnyilvánítás

Először és mindenekeelőtt szeretnék köszönetet mondani Roska Tamás professzor úrnak a töretlen lelkesedéséért és atyai útmutatásaiért melyekkel nemzetközi tudományos kapcsolatokhoz és intellektuális élményekhez segített. Köszönöm, hogy kutatócsoportjának családi légkörében mindig volt módom és szabadságom ismeretlen területeket kipróbálni és elmélyülten gondolkozni.

Nagyon hálás vagyok Frank Werblin professzor úrnak két csodálatos szemeszterért, melyet a kaliforniai Berkeley egyetemen tölthettem, a neurobiológiai kutatás világszínvonalú környezetében, ahol mint kezdő doktorandusz hallgató komoly kihívásokkal találkoztam. Az együttműködés kutatócsoportjával, és különösen Roska Botonddal, nagy ajándék volt, sokat tanulhattam és nem csupán neurobiológiát a retinamodellhez...

Az analogikai laborból elsőként Rekeczky Csabát kell említenem, aki mindig érdeklődött és bármikor bármiről kérdeztem készségesen válaszolt, segített. Köszönet Zarándy Ákosnak a hasznos beszélgetésekért és a disszertáció előbírálataért, valamint Vidnyánszky Zoltánnak szintén az előbírálataért. No és természetesen a fiatalabbaknak Timár Gergelynek, Gál Viktornak, Petrás Istvánnak, Szlávik Zoltánnak és a többieknek, akiknek ezúton is sok szerencsét és kitartást kívánok. Külön köszönet illeti a mindig segítőkész Keserű Katalint és Kékné Gabit a gyakorlati és hivatalos dolgok segítéséért.

Diákja lehettem néhány igazán kiváló tanárnak, akik közül csak néhányat tudok itt megemlíteni: Rózsa Pál, Péceli Gábor és Csurgay Árpád professzor urakat a mérnöki oldalról míg Hámori József professzort a doktoranduszi időszak neurobiológiai tanulmányaiból. A Budapesti Műszaki Egyetemen szerencsémre sok nagyszerű előadó óráján tanulhattam csupán kiragadva néhány nevet: Selényi Endre, Fodor György, Bach Iván, Vajda István, Horváth Gábor. Külön köszönet Rónyai Lajos professzor úrnak, aki az első TDK dolgozatom témavezetője volt és bevezetett az algoritmikus gondolkodásba.

A műszaki ismeretek mellett igen hasznosnak bizonyultak a humán tanulmányok is az alkalmazások megtalálásában és értelmezésében ezért meg kell említenem legalább tudományos diákköri konzulenseimet: Farkas János, Z. Karvalics László, Mészáros József. Nem hagyhatom ki középiskolai matematika tanáromat Mód Gábornét sem, aki lelkesen tanított az alapokra.

És végül, de valójában elsősorban, köszönök mindent Édesanyámnak és egész családuknak, akik mindig bíztak bennem és minden lehetséges módon segítettek.

A szerző folyóirat publikációi

Megjelenés alatt

- D. Bálya**, I. Petrás, T. Roska, R. Carmona, A. Rodríguez Vázquez: "Implementing the Multi-Layer Retinal Model on the Complex-Cell CNN-UM Chip Prototype", *International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)*, Vol. 14(2), February 2004.
- V. Gál, J. Hátori, T. Roska, **D. Bálya**, Zs. Borostyánkői, M. Brendel, K. Lotz, L. Négyessy, L. Orzó, I. Petrás, Cs. Rekeczky, J. Takács, P. Venetiáner, Z. Vidnyánszky, Á. Zarándy: "Receptive Field Atlas and Related CNN Models", *International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)*, Vol. 14(2), February 2004.
- D. Bálya**: "Sudden Global Spatial-Temporal Change Detection and its Applications", *Journal of Circuits, Systems, and Computers (JCSC)*, Vol. 12(6), December 2003.
- D. Bálya**: "CNN Universal Machine as Classification Platform: an ART-like Clustering Algorithm", *International Journal of Neural Systems (IJNS)*, Vol. 13(6), December 2003.

2002

- D. Bálya**, B. Roska, T. Roska, F. S. Werblin: "A CNN framework for modeling parallel processing in a mammalian retina", *International Journal on Circuit Theory and Applications (CTA)*, Vol. 30, 2002; pp. 363-393.

2001

- F.S. Werblin, B. Roska, **D. Bálya**: "Parallel processing in the mammalian retina: lateral and vertical interactions across stacked representations", *Progress in Brain Research* 2001, "Concepts and Challenges in Retinal Biology" Kolb, H., Ripps, H., & Wu, S. (Eds), Elsevier Science; 131:229-38.
- L. Fortuna, P. Arena, **D. Bálya** and Á. Zarándy: "Cellular Neural Networks: A Paradigm for Nonlinear Spatio-Temporal Processing", *IEEE Circuits and Systems Magazine*, Vol. 1-4, 2001; pp. 6-21.

2000

- T. Roska, **D. Bálya**, M. Csapodi, Á. Zarándy: "Analogikai celluláris számítógépek. Egy új számítógépelv" *Természet Világa, Informatika különszám*, Természettudományi Közlöny Vol. 131, 2000; pp. 71-74.

1999

- D. Bálya** and T. Roska, "Face and eye detection by CNN algorithms", *Journal of VLSI Signal Processing Special Issue: Spatiotemporal Signal Processing with Analogic CNN Visual Microprocessors, (JVSP Special Issue)*, Vol. 23. No.2/3. pp. 497-511, guest editors: T. Roska and Á. Rodríguez-Vázquez, Kluwer, ISSN 0922-5773, 1999.

A szerző nemzetközi konferencia cikkei

2003

- D. Bálya**, T. Gergely, I. Szatmári, and Cs. Rekeczky: "Classification of Spatio-Temporal Features: the Nearest Neighbor Family", *IEEE European Conference on Circuit Theory and Design ECCTD 2003*, Krakow Sept., 2003
- Z. Szlávik, **D. Bálya**, T. Roska: "Properties of the adaptive integration formula to compute the CNN dynamic equations", *IEEE European Conference on Circuit Theory and Design ECCTD 2003*, Krakow Sept., 2003
- Cs. Rekeczky, I. Szatmári, G. Timár, **D. Bálya**: "Adaptive Multi-rate, Multi-grid and Multi-scale Algorithms Running on Analogic Architecture", *IEEE European Conference on Circuit Theory and Design ECCTD 2003*, Krakow Sept., 2003
- G. Timár, **D. Bálya**, I. Szatmári, and Cs. Rekeczky: "Feature Guided Visual Attention With Topographic Array Processing and Neural Network-Based Classification", *International Joint Conference on Neural Networks IJCNN 2003*, Portland July, 2003
- D. Bálya**: "Detecting Global Spatial-Temporal Events: Saccadic Suppression", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS 2003*, Bangkok May, pp. III-838-841
- Cs. Rekeczky, **D. Bálya**, G. Timár, and I. Szatmári: "Bio-Inspired Flight Control and Visual Search with CNN Technology", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS 2003*, Bangkok May, pp. III-774-777
- I. Szatmári, **D. Bálya**, T. Gergely, Cs. Rekeczky, and T. Roska: "Multi-Channel Spatio-Temporal Topographic Processing for Visual Search and Navigation", *SPIE Microtechnologies for the New Millennium 2003*, Gran Canaria May, pp. 297-306

2002

- D. Bálya**, Cs. Rekeczky, T. Roska: "Basic Mammalian Retinal Effects on the Prototype Complex Cell CNN Universal Machine", *Proceedings of 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications CNNA 2002*, Frankfurt/Main July, 2002; pp. 251-258
- D. Bálya** and T. Roska: "A Supervised and unsupervised ART-like Classification of Binary Vectors Implemented on CNN Universal Machine", *Proceedings of 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications CNNA 2002*, Frankfurt/Main July, 2002; pp. 616-623
- D. Bálya**, Cs. Rekeczky, T. Roska: "The Real Mammalian Retinal Model Implemented on Complex Cell CNN Universal Machine", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS 2002*, Scottsdale May, pp. IV-161-164.

2001

- D. Bálya**, B. Roska, T. Roska, F. S. Werblin: "A CNN model framework and simulator for biologic sensory systems", *15th IEEE European Conference on Circuit Theory and Design ECCTD 2001*, Helsinki Sept, 2001; pp. I-357-360.
- F. S. Werblin, B. Roska, **D. Bálya**, Cs. Rekeczky and T. Roska: "Implementing a retinal visual language in CNN: a neuromorphic study", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS 2001*, Sydney May, 2001, pp. III-333-336.

2000

- D. Bálya**, B. Roska, T. Roska, F. S. Werblin: "A Qualitative Model-Framework for Spatio-temporal Effects in Vertebrate Retinas", *Proc. of 6th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications CNNA*, Catania April, 2000; pp. 165-170.

1999

- 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", *Proc. 7th Intl. Conf. on Microelectronics for Neural, Fuzzy, and Bio-Inspired Systems, (MicroNeuro'99)*, Granada, IEEE Computer Society, 1999; pp. 54-60.

A disszertáció témaköréhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

- L. O. Chua and L. Yang, "Cellular Neural Networks: Theory", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 35, pp. 1257-1272, 1988.
- L. O. Chua, and T. Roska, "The CNN Paradigm", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 40, pp.147-156, March 1993.
- 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.
- L. O. Chua, T. Roska, and P. L. Venetianer, "The CNN is as Universal as the Turing Machine", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 40, pp. 289-291, April 1993.
- G. Liñan, S. Espejo, R. Domínguez-Castro, E. Roca and A. Rodríguez-Vázquez "The CNNUC3: An Analog I/O 64x64 CNN Universal Machine Chip Prototype with 7-Bit Analog Accuracy", *Proc. Cellular Neural Networks and their Applications*, (CNNA'2000), Catania, pp. 201-206.
- R. Carmona, F. Jiménez-Garrido, R. Domínguez-Castro, S. Espejo, Á. Rodríguez-Vázquez, Cs. Rekeczky and T. Roska "A Bio-inspired two-layer Mixed-signal Flexible Programmable Chip for Early Vision", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 14(5), pp.1313-1336, 2003
- I. Petrás, Cs. Rekeczky, R. Carmona, F. Jiménez-Garrido "Exploration of complex dynamic phenomena in a 32x32-cells stored program 2-layerCNN Universal Machine Chip Prototype with 7-bits Analog Accuracy," *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, Vol. 13(6), 2003.
- Á. Zarándy, Cs. Rekeczky, P. Földesy, I. Szatmári "The New Framework of Applications - the Aladdin System," *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, Vol. 13(6), 2003.
- B. Roska and F. S. Werblin "Vertical Interactions across Ten Parallel Stacked Representations in Mammalian Retina," *Nature* 2001. Vol. 410 pp. 583-587.
- Cs. Rekeczky, B. Roska, E. Nemeth and F. S. Werblin "The network behind spatio-temporal patterns," *Int J Circuit Theory and Applications* 2001. Vol. 29, pp. 197-239.
- J. E. Dowling, "The retina: an approachable part of the brain", The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge 1987.
- F. Werblin, T. Roska, and L. O. Chua, "The Analogic CNN Universal Machine as a Bionic Eye", *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Vol. 23, pp. 541-569, 1995.
- F. Werblin, A. Jacobs, and J. Teeters, "The Computational Eye", *IEEE Spectrum*, pp. 30-37, 1996.
- B. Roska and F. S. Werblin "Rapid global shifts in natural scenes block spiking in specific ganglion cell types" *Nature Neuroscience* 2003, Vol. 6(6), pp. 600-608.
- Lienhart Rainer "Reliable Transition Detection in Videos: A Survey and Practitioner's Guide", *International Journal of Image and Graphics (IJIG)*, 2001. Vol. 1, No. 3, pp. 469-486.
- F. Rosenblatt F. "The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization of the Brain," *Psychol. Rev.*, 1958, Vol. 65, pp. 386-408.
- G. A. Carpenter and S. Grossberg "A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine", *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1987. Vol. 37 pp. 54-115.
- T. Serrano, B. Linares, and A. Andreou "Adaptive resonance Theory Microchips" *Norwell MA: Kluwer Academic*, 1998.