TEMPLATE KÖNYVTÁR AZ OPTIKAI ANALOGIKAI TÖMB SZÁMÍTÓGÉPHEZ (POAC)

AZ OPTIKAI CELLULÁRIS NEURÁLIS HÁLÓZAT PROGRAMOZÁSA

Ph.D. disszertáció tézisei

Ayoub Ahmed

Magyar Tudományos Akadémia
Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézetének
Analogikai és Neurális Számítások Kutatólaboratóriuma

Tudományos vezető
Tőkés Szabolcs, Dr.

Budapest, 2004

"Everything should be made as simple as possible, but not simpler."

Albert Einstein

T A R T A L O M J E G Y Z É K

BEVEZETÉS **1**
A VIZSGÁLATOK MÓDSZEREI **3**
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK **4**
ÚJ GYAKORLATI EREDMÉNYEK **6**
AZ EREDMÉNYEK ALKALMAZÁSI TERÜLETEI **7**
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS **8**
A SZERZŐ FOLYÓIRAT PUBLIKÁCIÓI **9**
A SZERZŐ A DISSZERTÁCIÓ TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ DÍJAINAK JEGYZÉKE **10**
A DISSZERTÁCIÓ TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE **11**

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 számításigénye miatt a teljesen digitális és szekvenciális elvű tervezés a belátható jövőben sem vezethet elfogadható eredményre. Ez különösképpen érzékelő-tömbök, mint pl. a mesterséges retina esetén érvényes. 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 processzorhálókban 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 (CNNUM - 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 programozható optikai analogikai tömb számitogép (POAC) a CNN optikai implementációja. Ennek alapját a módosított koherens és/vagy nem koherens Joint Fourier Transform Correlator /t2-JTC/ alkotja. Ennek a fényfizika segítségével kialakított nagy kapacitása, különlegesen nagypárhuzamosságú és nagysebességű alakfelismerést és képfeldolgozást tesz lehetővé.

Ebben a disszertációban a fő hangsúly a POAC jelenleg rendelkezésre álló architektúráinak megértésére és elemzésére, valamint ezen architektúrák működését segítő új módszerek kifejlesztésére került. Kutatómunkám legfontosabb célja az volt, hogy kidolgozzak egy optikai template-könyvtárat, mely letetővé teszi a POAC programozását. Megterveztem és szimulációval kipróbáltam 18 optikai lokális interakciós mintázatot és egy ezekből felépülő komplex algoritmust. Összegyűjtöttem és kategórizáltam /osztályoztam/ számos képfeldolgozó műveletet, ennek alapján javaslatot tettem a template-könyvtár továbbfejlesztésének útjára.

Elvégeztem különböző CNN optikai számítógép architektúrák számítógépes szimulációját, amelyet néhány esetben a kísérleti munkával igazoltam. A kidolgozott rendszer az optikai feldolgozó algoritmusok, többek között a képklasszifikáció és a felismerés területén használhatóak fel.

A vizsgálatok módszerei

Munkám során a digitális számítástechnika hardver és szoftver architektúráinak, a képfeldolgozási technikáknak, a neurológiai modelleknek az eredményeit és módszereit használtam fel az optikai számítógép modellezéséhez. Ezen kívül részletesen tanulmányoztam a korábbi optikai korrelátor megvalósításokat és ezek elméleti hátterét.

Tanulmányoztam a jelenlegi CNN-UM template-könyvtárat és tervezési stratégiáját. Ezen tanulmányokra alapozva kidolgoztam egy empirikus egyenletet, mely a hagyományos feed-forward CNN templatek értékeit átalakítja optikailag megvalósítható értékekké. Ezután egy új technika kialakításával bebizonyítottam, hogy negatív template-értékek is megvalósíthatóak koherens optikai úton. Végül megalkottam az első optikai CNN template könyvtárat, melynek létrehozásához és verifikálásához szimulációt alkalmaztam.

Különböző szoftver eszközöket használtam az optikai CNN szimulátor tervezéséhez, fejlesztéséhez. Így az Alladin CNN szimulátort, melynek kidolgozása az Analogikai és Neurális Számítások Kutatólaboratóriumban történt. A MATLAB-ot használtam az optikai CNN szimulátor létrehozásához. Továbbá írtam egy programot hologramok számítógéppel történő generálására (CGH) és azok mikro-fotolitográfiai módszerrel történő levilágítására. A Mask Editor v.1.6. a CGH-k gyártására szolgál.

A szoftver eszközökön kívül egy optikai készüléket állítottam össze dinamikus CGH megjelenítésre, ehhez folyadékkristályos mikro-megjelenítőt (LCD SLM) használtam. A CGH-kat a fotolitografikus gyártás előtt térbeli fénymodulátorokkal teszteltem csak-fázis vagy csak-amplitúdó működési üzemmódban.

Új tudományos eredmények

1. Tézis: Megmutattam az alapvető különbségeket az optikai koherens és nem koherens korreláció között. Mindkét üzemmódot modelleztem, elemeztem és javaslatokat tettem az optikai CNN implementációkra.

Bemutattam, hogy az optikai CNN tökéletesebben megvalósítható a módosított Joint Fourier Transform Correlator (t_2-JTC) koherens módján, mint inkoherensen. Tanulmányoztam a különbségeket a két működési mód között, valamint megmutattam, hogyan lehet ezeket az architektúrákat megvalósítani. Végül kidolgoztam egy gyors utó-processzálási módszert a diszkriminációs képesség javítására.

Publikációk: JCSC, ECCTD03

1.1. Modelleket és algoritmusokat dolgoztam ki, melyekkel az optikai koherens és nem koherens korrelációk leírhatók és szimulálhatók. Megmutattam a különbségeket a két működési mód között.

Az időmultiplex nem koherens korreláció megkívánja a fotoelektronok akkumulációját a korrelációhoz szükséges eltolt és súlyozott képek integrálásához. Numerikus szimulációval kimutattam, hogy az inkoherens korreláció védett a fáziszajokkal szemben és egyszerűen megvalósítható. Rámutattam, hogy a koherens korrelációnak magasabb kontrasztja van, mint az inkoherensnek (lásd 5.2). Ezért küszöbölése egyértelműbben végrehajtható.

1.2. Szimulációval és kísérletekkel kimutattam, hogy a központi tükrözés szükségessége függ az optikai korrelátor felépítésétől. Készítettem egy táblázatot, hogy leírjam hogy hogyan használhatóak a különböző optikai elrendezések, különös tekintettel a t_2-JTC-re (lásd 5.1)

Ezeket az eredményeket kísérletekkel bizonyítottam különböző architektúrákra.

1.3. Mexican-hat függvényeket terveztem a korrelogramok gyors feldolgozására. Meghatároztam az optimális paramétereket az egyértelmű küszöbölés megoldására (lásd 5.4).

Szimulációs és mérési eredményeim szerint a tervezett templatekkel elkerülhető az adaptív küszöbölés (lásd 5.4). A template mérete és értékei kritikusak a korrelációs csúcsok háttérének kiküszöböléséhez és a futásidő minimalizálásához. Az általam tervezett függvények jelentősen javítják a jel/zaj arányt.

2. Tézis: Bizonyítottam, hogy a negatív template értékek optikai megvalósítása a fázis információ π-vel történő eltolásával lehetséges.

Rendkívül fontos megoldatlan kérdés volt a negatív template-értékek optikai megvalósítása. A probléma felismerését követően javaslatot tettem a negatív értékek hatásának optikai megvalósítására, e módszer működését szimulációval igazoltam.

Pusztán a fény intenzitását felhasználva nem ábrázolhatóak negatív értékek. Az általam kidolgozott eljárás a negatív értékű helyeken (pixelekben) a fény fázisát π-vel eltolva lehetővé teszi ezt (lásd 5.3.).

Digitális szimuláció segítségével ellenőriztem a javasolt eljárást, és megmutattam, hogy sorba-kapcsolt csak a fázisra és csak az amplitúdóra hatással levő térbeli fénymodulátorokat (SLMs) elhelyezve a POAC template karjában) az effektus optikailag megvalósítható. Ahol az első SLM-et a másodikra kell leképezni és az így kapott komplex amplitúdójú templatet egyetlen lencsével Fourier transzformáljuk (*ld 4.3.3.*).

Publikációk: JCSC, ECCTD03

3. Tézis: Kifejlesztettem az első optikai képfeldolgozó template- és algoritmus-könyvtárat, amely a programozható optikai tömb számítógép (POAC) programozására szolgál.

Egyik feladatom a PhD kutatási munka során az volt, hogy megkeressem, megtervezzem, és szimulációval ellenőrizzem azokat a templateket, melyek az első optikai template könyvtárat alkothatják (*ld. 6.*). Tehát optikai programokat fejlesztettem a "Programozható Optikai Tömb Számítógépre" (POAC). Eddig tizenyolc optikai előrecsatolt templatet terveztem, valamint egy összetett algoritmust.

A hagyományos CNN template könyvtárból kiindulva és a legújabb POAC architektúrákat alapul véve, kifejlesztettem az előrecsatolt optikai CNN szimulátort. (*ld. 6.1*). Ennek segítségével elkészítettem a POAC-on alkalmazható 18 elemű első optikai template könyvtárat, melyekhez felhasználtam a 2. tézisben részletezett eredményeimet. Egy részük könnyen átalakítható és kiterjeszthető. (pl. a déli elem detektor template forgatásával előállíthatók a keleti, nyugati és északi változatok) (*ld. 6.2.*). A szimulációk közben létrehoztam egy macro nyelvet, hogy támogassam az előrecsatolt kaszkádolt templatek tervezését, amelyek egy komplex optikai szkeletonizációs algoritmust alkotnak (*ld. 6.3*).

Megmutattam, hogy a könyvtár implementálásához koherens működési módra és a negatív template értékeket megvalósító architektúrára van szükség *(ld. a 2. tézist)*.

Publikációk: ECCTD03, IEEE MWSCS, IEEE CNNA2004

Új gyakorlati eredmények

- A legfontosabb feladatom PhD tanulmányaim során az volt, hogy megkeressem, megtervezzem, és szimulációval ellenőrizzem az alapvető optikai műveleteket a fejlesztés alatt levő POAC architekturára. Tehát a tézisekben szereplő eredményeket felhasználtuk az elkészült optikai számítógép (Laptop-POAC) tervezése és megvalósítása során (*ld. 4.3.5*).
- Gyakorlati útmutatást készítettem az optikai korreláció elvégzéséhez (mind a koherens, mind az inkoherens üzemmódban).
- Gyors utófeldolgozó függvényeket dolgoztam ki jobb küszöbölés és diszkrimináció megvalósítására.
- Szimulációk segítségével megmutattam, hogy egy negatív template érték miként valósítható meg optikai eszközökkel, és javaslatot tettem ennek gyakorlati megvalósítására.
- Közzétettem az első optikai CNN template könyvtárat, 18 templattel a Programozható Optikai Analogikai Tömb Számítógéphez (POAC).
- Elkészítettem egy optikai algoritmust, amely, megvalósítása esetén kb. 5 ezredmásodperc alatt képes szkeletonizációt végezni, ami kevesebb a hagyományos video képfrissítés idejénél.

Az eredmények alkalmazási területei

Az általam elért eredmények legfőképpen POAC *mikro utasításokként* használhatóak. A POAC nagy processzáló teljesítménye kiaknázatlan a szükséges programok hiánya esetén. A munkám során kifejlesztett templatek és azok gyűjteménye segíti a szabványosítást és a rendszer kereskedelmi hasznosítását.

A legígéretesebb felhasználási területnek az alakfelismerési, kép-értelmezési és képfeldolgozási feladatok tűnnek, ahol jól kihasználható az optikai számítógép nagy párhuzamossága. Az optikai számítógép implementációk jobbak a digitális jelfeldolgozó processzoroknál, olyan feladatok esetén, ahol nagyfelbontású képeken kell nagy templatekkel korrelációt végezni.

A VanderLugt féle optikai szűrésen alapuló korrelátorok gyorsak a párhuzamos felépítés miatt. Azonban, mivel a holografikus illesztett szűrők tervezése rendkívül időigényes feladat, nem alkalmazhatóak gyors újra-programozást igénylő esetekben. Az általunk kidolgozott t_2-JTC architectúra esetén nincs szükség matched filter számításra, mivel a tértartományban alkalmazzuk a templatet, így például az előző képkockából nyert adatok felhasználhatóak céltárgykövetésre.

További lehetséges felhasználási terület a stereo képfeldoglozás , a kép tömörítésnél fontos szerepet játszó mozgás előrejelzés, vagy a *olyan különféle korreláció alapú felismerési* algoritmusok, ahol nem csak a gyors programozható optikai korreláció elvégzése szükséges, de a lokális párhuzamos(CNN) elő- és utófeldolgozás is kulcsszerepet játszik.

A fent említetteken kívül a következő alkalmazásokban használhatóak ki előnyei:

- Több célpontos felismerés és követés, ütközés elkerülés;
- Biztonsági alkalmazások (dokumentum titkosítás, és arc felismerés);
- Adat visszanyerés (jellemzően képi információk keresésében pl. ujjlenyomatok adatbázisokban vagy kép archívumokban való keresés);
- Hagyományos képfeldolgozási és alakzat felismerési feladatok;
- Ipari minőség biztosítás és alkatrész felismerés;
- Komplex értékű nagy adatigényű (pl. 1000×1000-es komplex mátrixokkal) függvény műveletek;

- Mikroszkopikus méretű alakzatok felismerése, követése és beavatkozó szervek irányítása

Köszönetnyilvánítás

Jelen dolgozat a Roska Tamás Professzor Úr által vezetett MTA SZTAKI Analogikai és Neurális Számítógépek Laboratóriumában végzett együttműködés eredménye. Köszönöm, hogy megadta az esélyt, hogy tudományos ismereteimet ebben a kítünő közegben fejleszthetem.

Köszönöm témavezetőmnek Dr. Tőkés Szabolcsnak, hogy fáradtságot nem kímélve bocsátotta rendelkezésemre tudományos és szakmai tapasztalatát. A társaságában töltött évek az optikai számítások csoportban, olyan meghatározó élményekkel gazdagítottak, melyek meghatározóak lesznek jövendő tudományos karrierem során.

Mélységes tisztelettel és elismeréssel adózom a Magyar Oktatási Minisztériumnak és az Egyiptomi Ösztöndíj Hivatalnak, hogy anyagilag támogatták elképzelésemet. Külön köszönöm Tokai Andrásnak a Budapesti Műszaki és Közgazdaságtudományi Egyetem Nemzetközi Kapcsolatok Hivatala vezetőjének, valamint Selényi Endrének a Mérnöki és Informatikai Kar tudományos dékanhelyettesének, amiért lehetővé tette, és támogatta az ösztöndíjat. További köszönet illeti az Egyiptom kulturális konzuljait, hogy rendelkezésemre bocsátották az ösztöndíj pénzügyi alapját.

Köszönet illeti kollégáimat és barátaimat, akik segítettek magyarországi tartózkodásom során. Külön köszönöm Fellner Hajnalkának őszinte tanácsait, valamint Tolnai Zsuzsa lelkesedését, amivel anyanyelvére tanított engem.

Drága családom folyamatos támogatása miatt érzett hálám szavakkal leírhatatlan.

A szerző folyóirat publikációi

Megjelenés alatt

Szabolcs Tőkés, László Orzó, **Ahmed Ayoub**, and Tamás Roska, "*POAC (Programmable Optical Array/Analogic Computer) Applied for Target Recognition and Tracking*", Accepted, proceedings of SPIE European Symposium on Optics/Photonics in Security and Defense, London, October 2004

2004

Ahmed Ayoub, Szabolcs Tőkés, László Orzó and Tamás Roska, "*Evolution of the Programmable Optical Array Computer (POAC)*", in proceedings of IEEE CNNA2004, Hungary, pp. 64-69, 2004

Szabolcs Tőkés, László Orzó, **Ahmed Ayoub** and Tamás Roska, "*Laptop POAC: A Compact Optical Implementation of CNN-UM*", in proceedings of IEEE CNNA2004, Hungary, pp. 70-75 , 2004

Ahmed Ayoub, Szabolcs Tőkés and László Orzó, "*Review of the Programmable Optical Array Computer*", Technical Report, DNS-2-2004, MTA-SZTAKI, Hungary, 2004

Ahmed Ayoub and Szabolcs Tőkés, "*Literature Collection of the Programmable Optical Array/Analogic Computer (POAC)*", Technical Report, MTA-SZTAKI, July 2004.

2003

Szabolcs Tőkés, László Orzó, **Ahmed Ayoub**, and Tamás Roska, "*Flexibly Programmable Opto-electronic Analogic CNN Computer (POAC) Implementation Applying an Efficient, Unconventional Optical Correlator Architecture*", Journal of Circuits, Systems, and Computers, Vol. 12, No. 6, pp. 739-767, December 2003

Szabolcs Tőkés, László Orzó and **Ahmed Ayoub**, "*Two-wavelength POAC (Programmable Opto-electronic Analogic Computer) using Bacteriorhodopsin as dynamic holographic material*", in proceedings of ECCTD'03 conference, vol. 3, p.p.97, 2003

Ahmed Ayoub, Szabolcs Tőkés, and László Orzó, "*A Study of Correlation Process of a Modified JTC for Optical CNN*", in proceedings of ECCTD'03 conference, vol. 3, p.p.105, 2003

Ahmed Ayoub, Szabolcs Tőkés, and László Orzó, "*Simulation of Optical CNN Template Library Based on t_2-JTC*", in proceedings of ECCTD'03 conference, vol. 3, p.p.257, 2003

Ahmed Ayoub and Szabolcs Tőkés, "*The First Version of the Optical Programmable Array/Analogic Computer (POAC) Template Library*", in proceedings of The 46th IEEE Midwest Symposium on Circuits & Systems, Cairo, Egypt, December 2003

2002

Ahmed Ayoub, Szabolcs Tőkés, and László Orzó, "*A Study and Simulation Results of Optical CNN Templates and Algorithms with a New Design for Implementation"*, Technical Report, DNS-9-2002, MTA-SZTAKI, Hungary, 2002

2001

Szabolcs Tőkés, László Orzó, Levente Török, **Ahmed Ayoub**, and Tamás Roska, "*An Advanced Joint Fourier Transform Correlator (JTC)*", Diffractive optics tropical meeting, Budapest-Hungary, 2001

2000

Ahmed Ayoub and Medhat M. El Messeiry, "*A Study of The Biothermal Effects that Lead to Pressure Ulcer with a New Design for Prevention*", November 2000, The International Congress on Environment Health, Issues in Primary Health Care, Toxicology, Biology & Social Issues., Cairo-Egypt, November 2000

A szerző a disszertáció témaköréhez kapcsolódó díjainak jegyzéke

- *Aspiránsok és doktoranduszok díja - a 2. éves kategoriában,* Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézete, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, November 2003

- *CNN Young Researcher Contest, Analogic CNN Algorithm Design*, 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and Their Applications, Frankfurt, July 2002

A disszertáció témaköréhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

L. O. Chua and L. Yang, "*Cellular Neural Networks: Theory and Applications*", IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 35, pp. 1257-1290, 1988

T. Roska and L. O. Chua, "*The CNN Universal Machine: An Analogic Array Computer*", IEEE Transactions on Circuits and Systems-II, vol. 40, pp. 163-173, March 1993

Tamás Roska, "*Towards a Visual Microprocessor*", John Wiley and Sons, 2001

Leon O. Chua and Tamás Roska, "*Cellular Neural Networks: Foundation and Primer*", Cambridge University Press, 2000

L. O. Chua, and T. Roska, "*The CNN Paradigm*", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 40, pp.147-156, March 1993

"*CNN Software Library (Templates and Algorithms)*", version 1.1, MTA-SZTAKI, Budapest, 2001, http://lab.analogic.sztaki.hu

Szabolcs Tőkés, "*Optical Implementation of the CNN-UM Computer and its Realization with Joint Fourier Transform Correlator (JTC)*", Ph.D. Dissertation, MTA-SZTAKI, Budapest, 2000

C. S. Weaver and J. W. Goodman, "*A Technique for Optically Convolving Two Functions*", Applied Optics, vol. 5 (7), pp. 1248-1249, July 1966

James E. Rau, "*Detection of Differences in Real Distribution*", Optical Society of America, vol. 56(11), pp. 1490-1494, November 1966

Mohammed S. Alam, "*Selected Papers on Optical Pattern Recognition Using Joint Fourier Transform Correlation*", SPIE Milestone series, Vol. MS 157, 1999

Ronald N. Bracewell, "*Two-Dimensional Imaging*", Prentice-Hall, 1995

Jari Turunen and Frank Wyrowski, "Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications", Akademie Verlag, Berlin, 1997

A.W. Lohmann and D. Paris, "*Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer*", Applied Optics, Vol. 6, No. 10, pp. 1739-1748, 1967

Bernard Kress and Patrick Meyrueis, "*Digital Diffractive Optics: An Introduction to Planar Diffractive Optics and Related Technology*", John Wiley and Sons, 2000

Victor A. Soifer, "*Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*", John Wiley and Sons, 2002