

**Parciális differenciálegyenleteken alapuló
előfeldolgozási és immunválasz motivált algoritmusok
implementációja CNN univerzális gépen**



Ph.D. disszertáció tézisei

Cserey György

Tudományos vezető:
Dr. Roska Tamás
az MTA rendes tagja

Konzulens:
Dr. Rekeczky Csaba Ph.D.

Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológiai Kar

Budapest, 2006

1. Bevezetés, kitűzött feladatok

Életünk minden napján érdemes rácsodálkozni a természet szépségére, az életre, annak biológiai folyamataira, sőt akár egyetlen sejt komplexitására. Csodálkozhatunk és ámulhatunk nyugodtan, mert teljesen megérteni nem leszünk képesek. Gyakran vesszük magunknak a bátorságot – néha talán nem is elég nagy alázattal –, hogy lemásoljuk vagy beleavatkozunk a biológia folyamataiba. Az orvostudomány alibije egyértelmű: az emberi élet védelme. A mérnök pedig megpróbálhatja tudásával segíteni az orvost, jobb eszközt adni a kezébe, vagy ötleteket meríthet a medicina megismeréséből, melyek alkalmazásával hatékonyabb megoldásokat adhat mérnöki problémákra.

Kutatásaim során két olyan problématerülettel foglalkoztam, amelyek erősen kapcsolódnak a orvosbiológia tárgykörébe. Az egyikben a kardiológus munkáját szeretném segíteni, a másikban az immunrendszerünk folyamatait tanulva próbálok ötleteket meríteni.

A két terület és nyitott probléma a következő:

- **zajos ultrahangképek diagnosztikájában valósidejű szűrőalgoritmus megvalósítása**
- **valósidejű, sokcélpontos, téridőbeli újdonság felismerés képfolyamokban**

Az orvosi ultrahangfelvételek esetleges további feldolgozása, üregdetekciója során számos problémával meg kell küzdeni, a alacsony kontraszt és a jelentős zaj nehezíti a munkát. A legmodernebb technológiák (pl. 3D echokardiográfia) igen gyors,

valós idejű feldolgozást igényelnek. **Kutatásaim során olyan módszert kerestem, amelynek segítségével a bemeneti képen a kontraszt javítását, a zaj csökkentését és alakkiemelést lehet elérni valósidejű feldolgozással,** hogy az így kapott eredmény megfelelő bemenet lehessen a feldolgozás további fázisában, ahol az üregek vagy egyéb objektumok detekciója történik.

Az orvosi képfeldolgozásban, az előfeldolgozási fázisban felmerülő problémákra (kontrasztkiemelés, zajcsökkentés, alakkiemelés, stb.) számos megoldás született. A legelterjedtebb megoldások a nemlineáris diffúzió és kontúrgörbe fejlődés területéről kerültek ki, ahol a parciális differenciálegyenletekre épülő algoritmusok futását, az egyre nagyobb számítási igényt támasztó eszközök számára, hagyományos számítási módszerekkel nem lehet valós időben megoldani.

Ugyanakkor egy bonyolult algoritmus analóg implementációjának működésre bírása sem triviális mérnöki feladat. Célom volt az is, hogy megmutassam: az implementáció lehetséges, és megfelelő sebességnövekedés érhető el.

Ha figyelmesen megvizsgáljuk immunrendszerünket talán azt is mondhatnánk, hogy „gondolkodik”. Szorosan együttműködő sejtjeinek milliárdjai között gyakran molekulárisan kódolt absztrakt információ továbbítódik. Emlékezik a múltra és megjósolja a jövőt. Környezetének dinamikus modelljét megalkotva plasztikusan szabályozza kapcsolatait, egyes sejtjeinek populáció méretét sőt génjeit. Ha kivágjuk az agy egy részét jelentősen károsul annak működése, ellentétben az immunrendszerrel, mely nagymértékű veszteségek után is képes megfelelően ellátni feladatait. A neuronok ritkán szaporodnak, míg az immunsejtek

folyamatosan termelődnek és cserélődnek, hiszen minduntalan háborúznak és védik szervezetünket a betolakodó vírusoktól, baktériumoktól, illetve a káros mutációktól. Nincs szüksége védő csontburokra, mint az agynak. Olyan elosztott rendszer, aminek nincs központi irányítása, nincs achilles sarka. Intelligentis, folyamatosan figyeli nem csak a külső világot, de összes sejtünket is. Pontosán ismeri, hogy mi történik bennünk molekuláris szinten, miközben agyunk feledékeny. Lehet, hogy „intelligenciahányadosa” nem mérhető, beszélgetésbe sem elegyedtünk vele, de míg az okos agy nem kötelező az élőlények számára, az okos immunrendszer létfontosságú.

Az immunrendszer sejtszintű interakciója 3D molekula mintázatok felismerésén és azonosításán alapszik. Kutatásaim során egy olyan modell megalkotását tűztem ki célul, ami a 3D térbeli mintázatok azonosító immunrendszer analógiája alapján dinamikus objektum detekciót és felismerést képes megvalósítani 2D képfolyamokban. **Olyan topografikus algoritmusok modellezését és kísérleti megvalósítását tűztem ki célul, melyek nagy számú célobjektum vizsgálatát végzik el valós időben, hogy korábban ismeretlen eseményeket detektáljanak. A cél tehát tér-időbeli újdonság felismerés.**

Az újdonság felismerés számos helyen lehet feladat. Egyik ilyen terület napjainkban a robotika, ahol az újdonság felismerés - az általános szenzoros bemenet és a korábban nem tapasztalt érzékelési minta megkülönböztetése - nagyon hasznos tudás a mobil robotok dinamikusán változó környezetében.

Az érzékelő-közelű számítások kritikusak lehetnek a későbbi hasznosítás hatékonyságának szempontjából, hiszen azzal a ha-

gyományos rendszerek általános problémáját, az érzékelőtől a számítógépig történő képtovábbítás sávszélességét, illetve annak valósidejű feldolgozásához szükséges idejét csökkenteni lehetne.

2. A vizsgálatok módszerei

Kutatásaim során számos diszciplínához tartozó eszköztárat alkalmaztam. A parciális differenciálegyenletek és a nemlineáris diffúziós szűrők elméletét használtam előfeldolgozási algoritmusaimhoz, ahol beágyazott morfológiai- és hullámoperációkat alkalmaztam szinthalmazokon (level-set). A szinthalmazok elméletének alkalmazása elterjedt objektum-szegmentációnál és görbék változásának követését igénylő feladatok implementációjánál. Vizsgálataim során egyesítettem a bináris matematikai morfológiai operátorok előnyeit a szinthalmazok módszerének alkalmazásával. Szimulációs és különböző hardvereken implementált kísérleti eredményeim futási sebességét mennyiségileg és minőségileg is összehasonlítottam.

Az emberi immunválasz által inspirált algoritmusok tervezése során megismerkedtem az orvosi immunológia alapvető fogalmaival és funkcionális ismereteivel.

Az immunrendszer feladatmegoldó képessége és tulajdonságai (mintafelismerés, elosztottság, zaj és hibatűrés, rugalmasság, immuntanulás és memória, robusztusság, önszerveződés, decentralizáltság) mérnöki törekvéseimet abba az irányba terelték, hogy hatékony módszereit megpróbáljam alkalmazni kutatási területemen.

Az algoritmus tervezése során felhasználtam az immunválasz ismert eljárásait:

- a thymusban történő immunsejtek érésének és kiválasztódásának (negatív szelekciójának) folyamatát
- az antigén bemutatás elvét

A tervezett rendszert és algoritmusokat a mesterséges immunrendszerek (AIS) elméletének megfelelő leírásával is megadtam. A hardveren implementált rendszer sebességét különböző típusú bemenetekre megmértem. Az algoritmus mutációs modulját a genetikai algoritmusok mérőszámaival jellemeztem.

Feladataimhoz celluláris nemlineáris/neurális hálózatot (Cellular Nonlinear/Neural Network – CNN) illetve CNN univerzális gép VLSI szilícium félvezető chip implementációit használtam, melyek mind PDE térbeli diszkrét modellezésére, mind nagy sebességű mintaillesztésre egyaránt előnyösen alkalmazhatóak.

A CNN-UM hullámszámítógépre tervezett algoritmusokban a korábban már publikált templét osztályokra támaszkodtam. Fontos szempont volt a kiválasztott templéteknél, hogy a rendelkezésre álló fizikai CNN-UM rendszereken is megbízhatóan futtathatóak legyenek. Az irodalomban meghatározott templétek mellett, néhány esetben a valós idejű kísérletek során templét hangolást is végeztem.

Analogikai CNN algoritmusaim implementálása során törekedtem a hatékonyság növelésére, ezért felhasználtam CNN-UM és hagyományos digitális megoldásokat is, törekedve arra, hogy mindkét gépen az ott leghatékonyabban végrehajtható lépések

fussanak. A fejlesztés során első lépésben a MATLAB szoftvercsomag környezetét használtam, MatCNN szimulációs modullal, melyek Intel x86 architektúrájú PC-ken futottak. A kísérletek során az ACE-BOX valamint Bi-i rendszerekkel dolgoztam, melyekben 64×64 -es Ace4k illetve 128×128 -as Ace16k analóg/bináris VLSI CNN-UM chip található.

Elkészítettem a kidolgozott algoritmusok magas szintű, implementáció független "CNN nyelvű" leírásait (UMF), amellyel az eredmények különböző hardver platformon is felhasználhatóak.

3. Új tudományos eredmények

1. Tézis: *Parciális differenciálegyenleteken alapuló morfológiai és hullám operációkkal, szinthalmazokon történő hisztogram módosítás és kontrasztkiemelő zajcsökkentés CNN algoritmusokkal.*

Az orvosbiológia mérnöki gyakorlatában és más nehéz dinamikus képdiagnosztizálási feladatokban gyakran előfeldolgozási eljárásokra van szükség, melyek a felvételeken javítják a kontrasztot, csökkentik a zajt és egyéb eljárásokkal segítik a későbbi feldolgozást. Kutatásaim során olyan parciális differenciálegyenleteken alapuló algoritmust dolgoztam ki és valósítottam meg CNN-UM hullámszámítógép segítségével, mely hisztogram-ki-egyenlítést és -módosítást alkalmaz, miközben meghatározott szinthalmazokon morfológiai- és hullámoperációkat végez. A morfológiai- és hullámoperációk a zajcsökkentés mellett az alakkiemelést is segítik, így a kapott kimeneti kép javíthatja a későbbi feldolgozás objektumdetekciójának sikerességét. Publikációk: [2], [13], [18] és a disszertáció 2. illetve 3. fejezete.

1.1. Megmutattam, hogy nemlineáris parciális differenciálegyenletekkel leírható, morfológiai és hullámoperációkra épülő, párhuzamos hisztogram módosítás megvalósítható térben véges számú, szinthalmazokon (level-set) operáló közelítéssel.

Az algoritmus – röviden összefoglalva – egy adott képen minden két szomszédos küszöbölt szinthalmaz kizáró vagy eredményét veszi, ezen morfológiai és hullámoperációkat végez, ez az aktuális bináris kép. Az így kapott bináris képeket iteratív

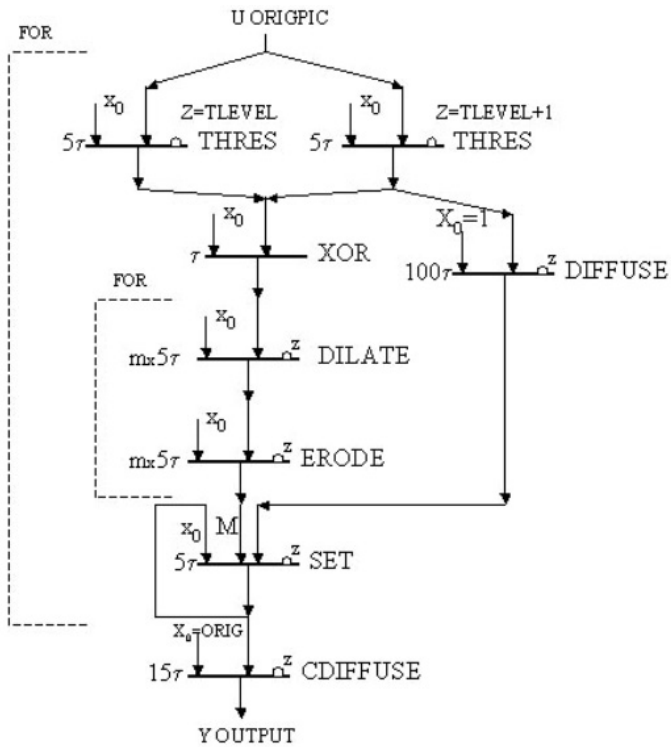
módon összegezi (aktuális bináris maszk) és az aktuális bináris kép területével arányos értékkel (mely értéket diffúzióval kapunk meg) növeli az aktuális bináris maszk által lefedett képi pixeleket. Az végeredményt diffúziós szűrés után kapjuk meg (1. ábra).

Az algoritmus végrehajtási ideje az i szinthalmazok számának és m morfológiai lépések függvényében $(20 + i(111 + 10m))\tau$, ahol a τ a CNN implementációtól függő időállandója. A megadott, paramétereiktől függő végrehajtási időfüggvény alapján a kiválasztott optimális kimenet (3. ábra) futási ideje 2276τ .

A lokális és globális csatolásokat tartalmazó komplex analógikai (analóg és logikai) algoritmust tárolt programozású celluláris hullámszámítógépen (CNN-UM) implementáltam tisztán lokális operációkra alapozva. A globális csatolást a kontrasztjavító hisztogramkiegyenlítés jelenti.

1.2. Megmutattam, hogy a választott level-set alapú algoritmus egy analóg CNN-UM chipen (Acex) implementálható és kísérletekkel igazoltam, hogy az elméleti várakozásokat kvalitatívan és kvantitatívan jó közelítéssel visszaadja, 128x128 felbontású képekre 200 frame/sec futási sebességet sikerült elérnem.

Összehasonlító kísérleteket végeztem az algoritmus különböző megvalósításaira, különböző hardver-szoftver platformokon, PC, DSP és CNN-UM mikroprocesszorokon egyaránt. Az eredmények azt mutatták, hogy a morfológiai operációk végrehajtási sebessége pár ezer, a teljes algoritmus végrehajtási sebessége pedig több száz kép/másodperces sebességet is elérheti (2. ábra).



1. ábra. Az algoritmus UMF (Universal Machines on Flows) diagramja

A 2a. ábrán látható, hogy a teljes algoritmus futási ideje ACE4k esetén adja a legjobb eredményt és a morfológiai lépések növekedésével ellentétben a többi eszközzel a sebesség lényegében nem változik. A 2b. ábrán megfigyelhető, hogy a bináris morfológia futási ideje a CNN-UM esetében nagyságrendekkel jobb a többi hardver-szoftver eszközhöz képest.

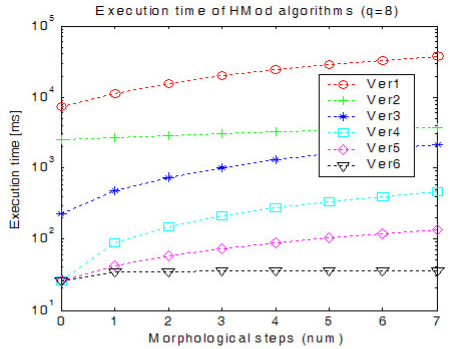
A 3. ábrán különböző paraméterekre kapott futtatási eredmények láthatóak. A képeken jól megfigyelhető hogyan módosítja a beágyazott morfológiai eljárás a szinthalmozokat és vezet szegmentáció szempontjából értelmesebb eredményre.

A teljes algoritmus aktív hullámterjedéssel operáló hardver (ACE16k-box) implementációját is sikeresen megvalósítottam. Ekkor 128×128 -as felbontásban, 4 szinthalmaz esetén 3.93 msec/kép futási sebességet mértem.

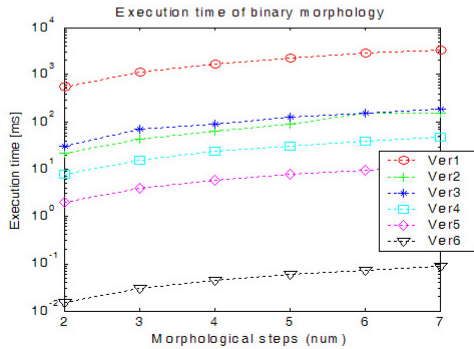
A megvalósított módszer igény szerint paraméterezhető minden olyan valósidejű képfeldolgozási feladathoz, ahol a bemeneti kép erősen zajterhelt és hisztogram kiegyenlítésre van szükség.

2. Tézis: *Az emberi immunrendszer T-sejtes immunválasza által inspirált mintázat felismerő topografikus algoritmusok kidolgozása, CNN-UM-en történő modellezés és kísérleti megvalósítás téridőbeli újdonság-felismerés detektálására nagy számú cél-objektum esetében.*

Az általam kidolgozott, CNN-UM hullámszámítógépen modellezett és kísérletileg is megvalósított analogikai algoritmusokban az emberi immunválasz negatív szelekciós elvét használom fel arra, hogy 2D képfolyamokban található mintázatok vizsgálata alapján valószínűben a **feldolgozó rendszer számára korábban ismeretlen képi eseményeket** detektáljak.

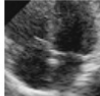



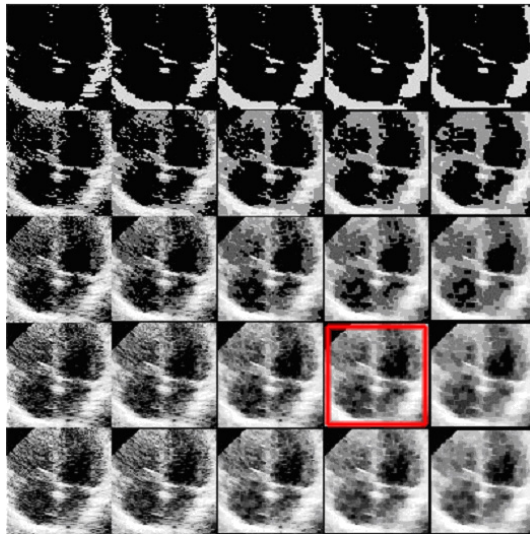
(a)



(b)

2. ábra. Különböző algoritmikus implementációk összehasonlítása. (a) az algoritmus végrehajtási ideje 8 szintalmaz esetén, (b) bináris morfológia végrehajtási ideje. (Ver1 – Ver6: MATLAB, MATLAB - C, C, DSP, DSP - ASSEMBLY, ACE4k)

Eredeti bemeneti kép:  Módosított kép: 



3. ábra. Programozható, globális PDE alapú hisztogram-módosítás alkalmazása beágyazott morfológiai zárással CNN architektúrában. A fenti példa a hisztogram módosítás különböző változatait mutatja be, ahol a kontraszt erősítés zajszűréssel és beágyazott morfológiai operációkkal együtt valósul meg. Az eredeti bemeneti kép egy optimális eredmény (4. sor, 4. oszlop) felül látható. Balról-jobbra a morfológia lépésszáma növekszik 0-tól 4-ig. Fentről lefele a szinthalmozatok száma duplázódik 2-től 32-ig.

Az algoritmusok előnyösen aknázzák ki a CNN-UM hullám-számítógép architektúrájában rejlő párhuzamos feldolgozási lehetőségeket. Publikációk: [1], [5-7], [12], [18] és a disszertáció 4. illetve 5. fejezete.

2.1. Megmutattam, hogy az immunválasz funkcionális modellje celluláris neurális hálózati (CNN) számítási keretbe foglalható és hatékony képfeldolgozási eljárásokban alkalmazható.

Az immunrendszer 3D molekula mintázatok felismerésén és azonosításán alapuló, sejtszintű interakcióját modellezve olyan mintázatfelismerő topografikus analogikai algoritmusokat dolgoztam ki, melyek dinamikus objektum detekciót és felismerést képesek megvalósítani 2D képfolyamokban. A kidolgozott módszerek nagy erejét adja – az immunrendszer eljárásaihoz hasonlóan – igen nagy számú célobjektum valós időben történő vizsgálata és kiértékelése.

Az algoritmus két fő részből – tanulás és felismerés – áll, melyek központi eljárása nagyon hasonló. A tanulás során véletlenszerűen kiválasztott CNN Match templét halmazból kiindulva és a negatív szelekció elvét felhasználva olyan templét halmazt készítek, amelyek a megtanított objektumokat többé nem ismerik fel veszélyesnek. Ez a kimeneti templét halmaz végzi a felismerést az algoritmus további részében. Ennek a templét halmaznak az elemei tesztelik a felismerés fázisában a képfolyam aktuális mintázatait; és ismeretlen mintázat esetén a rendszer figyelmeztető jelzést generál. A megvalósított algoritmus olyan templétmutációs eljárásokkal dolgozik, melyek lehetővé teszik a viszonylag egyszerű, futás közbeni, dinamikus környezethez

történő alkalmazkodást, ami robosztus működést biztosít.

Megadtam az általam készített modell elméletének és elemeinek matematikai összefoglalását a mesterséges immunrendszerek (AIS) általános leírásának segítségével is, melyben, eltérően attól, hogy ott az objektumok azonos típusú vektorokkal vannak reprezentálva, a mintázatok és templétek itt különböznek. Definiáltam, egy az általam használt CNN templét osztály és a felismerendő mintázatok közötti kapcsolatot jellemző távolságot, az un. templét affinitást, melynek segítségével megmutattam, hogy ahhoz, hogy minden mintázatot detektálni tudjunk nem szükséges a lehetséges összes templét futtatása, ugyanakkor becslést adtam a szükséges templét halmaz méretére.

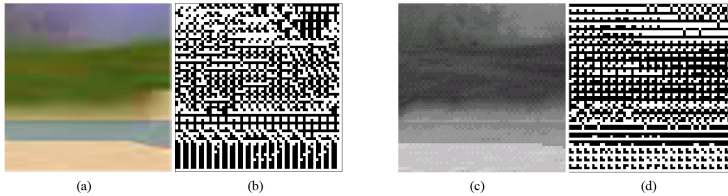
Olyan analogikai CNN algoritmusokat dolgoztam ki, melyek hatékonyan képesek elvégezni szürkeárnyalatos és színes képek bináris képpé történő konvertálását.

A konverziót úgy oldottam meg, hogy gyors legyen és a lehető legtöbb információ megőrzése mellett a feldolgozáshoz nincs szükség a képi adatok további mozgására.

Az algoritmus alulmintavételezi és kilenc különböző szinten küszöböli a képet úgy, hogy a kapott értékeket 3×3 -as almitázatokban tárolja el. A mintázatok síkbeli rendezése bináris maszkok és VAGY logika segítségével történik (4. ábra).

Színes képi bemenet esetén a három színcsatorna kombinációjával – minden csatorna három bináris értéket ad meg – határozhatóak meg a mintázatok.

2.2. Kidolgoztam az általam megalkotott modell alapján egy olyan valós idejű algoritmust és annak CNN-UM chipes (Acex) implementációját, ami



4. ábra. Különböző típusú bemeneti képek konverziójának eredményei. Az (a) színes bemeneti kép átalakításából kapott bináris eredmény a (b), míg a (c) szürkeárnyaltos bemenet konverziós eredményét (d) mutatja. A képeken azonos színárnyalatú területekhez, a konvertált képeken azonos bináris mintázatok felelnek meg

megbízhatóan képes detektálni újdonságot jelentő képi eseményeket, több mint 10000 templét futtatást végezve video-frame (25 frame/sec) sebességgel és 128x128 képméret mellett.

Az algoritmusokat implementáltam általános CNN-UM chipen (ACE4K, ACE16K) és a keretrendszerrel együtt valós idejű eszközként alkalmazható (ACE4K-box és Bi-i) implementációt is megvalósítottam, amely több mint tízezer templétfuttatást végez másodpercenként és ez közel negyven millió kiértékelt objektuminterakciót jelent másodpercenként. A CNN-UM implementáció erejét jól mutatja a normál PC-vel való összehasonlításának mérési eredménye (1. táblázat). Látható, hogy az ACE4k-

	Szimuláció	Valós hardver
Processzor:	3Ghz Pentium IV.	ACE4k
Bemenet mérete:	64×64	64×64
Template-ek száma:	5000	5000
Template-ek mérete:	3×3	3×3
Szoftver:	Aladdin 2.4	Aladdin 2.4
Futtatási idő:	312 sec	0.4 sec

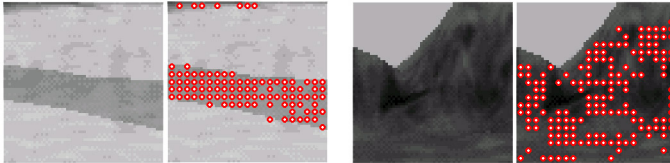
1. táblázat. Pentium és ACE4k futtatási idők összehasonlítása.

boxnál a szükséges futtatási idő jelentősen kevesebb.

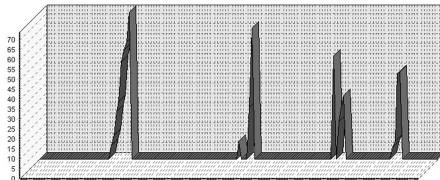
Definiáltam a képek egy statisztikus jellemzőjét, un. immunhisztogramot, mely a képek részmintázatain alapul.

A megvalósított rendszer tesztelését virtuális 3D környezetben és valós optikai bemenetekre egyaránt elvégeztem. Az implementált tesztalkalmazásban az algoritmusnak megtanított egy adott mintázathalmazt és az a felismerés során az ezektől független (eltérő) objektummintázatokot valós időben, ismeretlen mintázatoknak (objektumoknak) detektálja (5. és 6. ábra).

A rendszer egyik nagy előnye, hogy a mutációs és szelekciós eljárásokkal támogatott tanulási mechanizmus gyors és automatikus. Az elvégzett tesztek azt mutatják, hogy statisztikailag teljes a felismerés aránya.



5. ábra. Detekciós eredmények. Az első és harmadik képek a különböző bemenetek. A második és negyedik képen a piros pontok mutatják a detekció eredményét. Első esetben a homok színárnyalatai, a másodikban pedig az ég színárnyalatai voltak már korábban megtanítva a rendszernek, ezek pixeleit nem detektálta a rendszer. A detekciós pontok az második képen a folyó színárnyalatainak és negyedik képen a hegy színárnyalatainak különböző mintázatait jelzik.



6. ábra. A vízszintes az időtengely, a függőleges tengely a templétek sorszámait mutatja. A csúcsok akkor jelentkeztek, ha a környezet nagymértékben megváltozott és legalább egy template új mintázatot detektált. Az első csúcs a hegyeknél jelentkezett, a második a tenger elérésekor, a harmadik a szárazföld mintázatainak detektálását mutatja, a negyedik pedig ismét a tenger elérését.

4. Eredmények alkalmazási területei

A munkám során elkészült algoritmusok és implementációk mindegyike valós alkalmazási területeken felmerülő problémákra kínál megoldást.

Mérési eredményeim bizonyítják, hogy a hisztogram módosító algoritmus (Első Tézis) futási sebessége valós idejű, képi előfeldolgozási rutinokban hatékonyan alkalmazható.

Az orvosi gyakorlatban való alkalmazása, ultrahangos felvételek feldolgozása során megfelelő megoldást adhat (i) egyrészt az echokardiográfia valós idejű diagnosztikájában, (ii) másrészt fMRI (funkcionális mágneses rezonancia képalkotás) képek kiértékelésében.

A Második Tézisben megadott modellt és algoritmusokat úgy terveztem, hogy komplex felügyeleti rendszerekben felhasználhatók legyenek, gyorsan tanuljanak, könnyen alkalmazkodjanak dinamikus környezetben és adott szabályok szerint riasztanak, ha szükséges.

A rendszer alkalmazási területe lehet minden olyan feladat, ahol a humán jelenlét nem lehetséges vagy a felügyelet nem valós idejű, de vizuális bemenet alapján azonnali döntésre van szükség.

Az alkalmazott templatek mindegyike futtatható a piacon lévő CNN-UM chipen, sőt remélhetőleg a rövidesen kereskedelmi forgalomba kerülő EYE-RIS¹ rendszerben is.

¹Az AnaFocus Ltd. (Sevilla) új chipje ill. OEM rendszer (176x144-es QCIF felbontással és 10000 frame/sec képsebességgel 100mW fogyasztás mellett)

5. Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani Roska Tamás professzorúrnak, aki segített és támogatott mindenben, aki mindig töretlen lelkesedéssel és atyai útmutatással irányított tanulmányaim során.

Nagyon hálás vagyok Wolfgang Porod professzorúrnak, hogy több mint egy évet Notre Dame egyetemen (Indiana, USA) tölthettem, ahol komoly szakmai kihívásokkal találkozhattam. Köszönöm Csurgay Árpád professzorúrnak pártfogását, tanácsait és a tudományról folytatott izgalmas beszélgetéseinket.

Köszönöm Falus András professzorúrnak, hogy megosztotta velem az immunológia rejtelseit; világos magyarázata a mérnök számára is érthetővé tette a biológia folyamatait.

Külön köszönetet szeretnék mondani Rekeczky Csabának, aki feladatokkal, tanácsokkal látott el tanulmányaim kezdetén és azóta is mindig készségesen segített.

Nagyon köszönöm bírálóimnak Szolgay Péter és Marco Gilli professzor uraknak lelkiismeretes bírázataikat.

Köszönöm Bálya Dávidnak és Timár Gergelynek az időzónákat nem ismerő eszmecseréket, baráti tanácsaikat és bátorításukat.

Örömmel emlékezem Mathias Scheutz professzorral, John McRaven-nel és Jasper Stolte-vel végzett közös munkára.

Köszönöm mind idősebb, mind fiatalabb kollégáimnak akik tanáccsal láttak el, és akikkel mindig megbeszélhettem ötleteimet: Radványi András, Szolgay Péter, Szirányi Tamás, Zarándy

Ákos,

Földesy Péter, Gál Viktor, Karacs Kristóf, Kék László, Orzó László, Tőkés Szabolcs, Szatmári István, Szlávik Zoltán, Petrás István, Czeilinger Zsolt, Török Levente, Jónás Péter, Binzberger Viktor, Soós Gergely, Lázár Anna, Wagner Róbert, Hillier Dániel, Szálka Zsolt, Mozsáry András, Kis Attila, Benedek Csaba, Gaurav Gandhi, Matyi Gábor, Hodász Gábor, Hegyi Barnabás, Fodróczy Zoltán és Vásárhelyi Gábor. A fiatalab-
baknak ezúton is sok szerencsét és kitartást kívánok.

Köszönöm támogatását a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Autómatizálási Kutató Intézetének (MTA-SZTAKI) és a Pázmány Péter Katolikus Egyetemnek (PPKE), ahol Ph.D. éveimet tölthettem.

Külön köszönet illeti a mindig segítőkész Keserű Katalint, Kékné Gabit a SZTAKI-ból, illetve a PPKE dékáni hivatalát és tanulmányi osztályát a gyakorlati és hivatalos dolgokban kedves segítségükért.

Korábbi tanulmányaim során diákja lehettem számos igazán kiváló tanárnak akik közül néhányat említve, köszönöm Recski András professzorúrnak és Friedl Katalinnak a Budapesti Műszaki Egyetemen, Binzberger Ákos (OSB) atyának a Pannonhalmi Bencés Gimnáziumban és Benkő Teréziának a Hősök-
terei Általános Iskolában kapott matematikai élményeket.

Nagyon köszönöm Majoros Zsófiának, Farkas Bálintnak és Wagner Róbertnek a dolgozatírás során nyújtott technikai és lektorálási segítséget.

Végül, de mégis elsősorban köszönöm Édesanyámnak és Édesapámnak és családuknak a szeretetét, törődését és segítségét, amellyel mindig támogattak.

6. Publikációs lista

6.1. A szerző folyóiratbeli publikációi

- [1] **Gy. Cserey**, A. Falus, and T. Roska, „Immune response inspired spatial-temporal target detection algorithms with CNN-UM,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 34, pp. 21–47, 2006.
- [2] **Gy. Cserey**, Cs. Rekeczky, and P. Földesy, „PDE based histogram modification with embedded morphological processing of the level-sets,” *Journal of Circuits, System and Computers*, vol. 12, no. 4, pp. 519–538, 2003.
- [3] Zs. Czeilinger, **Gy. Cserey**, L. Környei, and Cs. Rekeczky, „Objektumdetekción alapuló 3D echokardiográfia alkalmazása a gyermekkardiológiában,” *Informatika és Menedzsment az Egészségügyben*, vol. 2, no. 3, pp. 37–41, 2003. www.imeonline.hu.

6.2. A szerző nemzetközi konferencia publikációi

- [4] A. Tar, J. Veres, and **Gy. Cserey**, „Design and realization of a biped robot using stepper motor driven joints,”

in *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2006*, (Budapest, Hungary), July 2006. Accepted.

- [5] J. Stolte and **Gy. Cserey**, „Artificial immune systems based sound event detection with CNN-UM,” in *Proceedings of European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD '05*, vol. 3, (Cork, Ireland), pp. 11–14, Sept. 2005.
- [6] **Gy. Cserey**, A. Falus, W. Porod, and T. Roska, „An artificial immune system for visual applications with CNN-UM,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2004*, vol. 3, (Vancouver, Canada), pp. 17–20, May 2004.
- [7] **Gy. Cserey**, A. Falus, W. Porod, and T. Roska, „Feature extraction CNN algorithms for artificial immune systems,” in *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN 2004*, vol. 1, (Budapest, Hungary), pp. 147–152, July 2004.
- [8] **Gy. Cserey**, W. Porod, and T. Roska, „An artificial immune system based visual analysis model and its real-time terrain surveillance application,” in *Proceedings of International Conference on Artificial Immune Systems, ICARIS 2004*, (Catania, Italy), pp. 250–262, Springer-Verlag, Inc, Sept. 2004. Lecture Notes in Computer Science 3239.
- [9] J. McRaven, M. Scheutz, **Gy. Cserey**, V. Andronache, and W. Porod, „Fast detection and tracking of faces in uncontrolled environments for autonomous robots using the

- CNN-UM,” in *Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2004*, (Budapest, Hungary), pp. 196–201, July 2004.
- [10] M. Scheutz, J. McRaven, and **Gy. Cserey**, „Fast, reliable, adaptive, bimodal people tracking for indoor environments,” in *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2004*, vol. 2, (Sendai, Japan), sep 2004.
- [11] D. Bálya, G. Tímár, **Gy. Cserey**, and T. Roska, „A new computational model for CNN-UMs and its computational complexity,” in *Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2004*, (Budapest, Hungary), pp. 100–105, July 2004.
- [12] Cs. Rekeczky, V. Binzberger, D. Hillier, Zs. Czeilinger, G. Soós, **Gy. Cserey**, L. Kék, and D. L. Vilarino, „A diagnostic echocardiography system boosted by CNN technology,” in *Proceedings of the 8th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2004*, (Budapest, Hungary), pp. 243–248, July 2004.
- [13] **Gy. Cserey**, A. Falus, and T. Roska, „Immune response inspired CNN algorithms for many-target detection,” in *Proceedings of European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD '03*, vol. 1, (Krakow, Poland), pp. 405–408, Sept. 2003.

- [14] **Gy. Cserey**, Cs. Rekeczky, and P. Földesy, „PDE based histogram modification with embedded morphological processing of the level-sets,” in *Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2002*, (Frankfurt, Germany), pp. 315–322, July 2002.
- [15] Cs. Rekeczky, G. Tímár, and **Gy. Cserey**, „Multi target tracking with stored program adaptive CNN universal machines,” in *Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2002*, (Frankfurt, Germany), pp. 299–306, July 2002.
- [16] Cs. Rekeczky, Zs. Czeilinger, **Gy. Cserey**, L. Kék, I. Szatmári, and T. Roska, „3D echocardiography powered by CNN technology,” in *Proceedings of the 15th European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD '01*, vol. 3, (Espoo, Finland), pp. 289–292, Aug. 2001.

6.3. A szerző egyéb publikációi

- [17] **Gy. Cserey**, A. Falus, and T. Roska, „Immune response inspired spatial-temporal target detection algorithms,” tech. rep., Ányos Jedlik Laboratory, Péter Pázmány Catholic University, 2005.

- [18] Cs. Rekeczky, V. Binzberger, D. Hillier, Zs. Czeilinger, G. Soós, **Gy. Cserey**, L. Kék, and D. L. Vilarino, „Analogic diagnostic system for echocardiography,” Tech. Rep. DNS-10, Analogical and Neural Computing Laboratory, Computer and Automation Research Institute, Hungarian Academy of Sciences (MTA SzTAKI), 2004.
- [19] **Gy. Cserey**, Cs. Rekeczky, and P. Földesy, „PDE based histogram modification with embedded morphological processing: CNN-UM chip experiments,” Tech. Rep. DNS-2, Analogical and Neural Computing Laboratory, Computer and Automation Research Institute, Hungarian Academy of Sciences (MTA SzTAKI), 2002.

6.4. A disszertáció témaköréhez kapcsolódó publikációk jegyzéke

- [20] L. O. Chua and L. Yang, „Cellular Neural Networks: Theory and applications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 35, pp. 1257–1290, 1988.
- [21] L. O. Chua and T. Roska, „The CNN paradigm,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 40, pp. 147–156, 1993.
- [22] T. Roska and L. O. Chua, „The CNN Universal Machine,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 40, pp. 163–173, 1993.

- [23] Cs. Rekeczky and L. O. Chua, „Computing with front propagation: Active contour and skeleton models in continuous-time CNN,” *Journal of VLSI Signal Processing*, vol. 23, no. 2, pp. 373–402, 1999.
- [24] Cs. Rekeczky, T. Roska, and A. Ushida, „CNN-based difference-controlled adaptive nonlinear image filters,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 26, no. 4, pp. 375–423, 1998.
- [25] M. Csapody and T. Roska, „Adaptive histogram equalization with cellular neural networks,” in *Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 1996*, (Seville, Spain), pp. 81–86, June 1996.
- [26] G. Sapiro and V. Caselles, „Histogram modifications via partial differential equations,” *Journal of Differential Equations*, vol. 135, pp. 238–268, 1997.
- [27] G. Sapiro and V. Caselles, „Contrast enhancement via image evolution flows,” *Graphical Models Image Processing*, vol. 59, pp. 407–416, 1997.
- [28] V. Caselles, J. L. Lisani, and G. Sapiro, „Shape preserving local histogram modification,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 8, pp. 220–230, 1999.
- [29] E. R. Daugherty, *An Introduction to Morphological Image Processing*. SPIE Optical Engineering Press, 1992.

- [30] G. Liñán, S. Espejo, R. Domínguez-Castro, and Rodríguez-Vázquez, „ACE4k: an analog I/O 64×64 visual micro-processor chip with 7-bit analog accuracy,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 30, no. 2-3, pp. 89–116, 2002.
- [31] T. Roska, „Computational and computer complexity of analogic cellular wave computers,” in *Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2002*, (Frankfurt, Germany), pp. 323–335, July 2002.
- [32] A. Zarándy, Cs. Rekeczky, I. Szatmári, and P. Földesy, „The new framework of applications: The aladdin system,” *IEEE Journal on Circuits, Systems and Computers*, vol. 12, no. 6, pp. 764–781, 2003.
- [33] A. K. Abbas and W. Schmitt, *Cellular and Molecular Immunology*. Saunders, 2000. 4th edition.
- [34] L. O. Chua, T. Roska, and P. L. Venetianer, „The CNN is universal as the Turing Machine,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 40, no. 3, pp. 289–291, 1993.
- [35] D. Dasgupta, *Artificial Immune Systems and Their Applications*. Springer-Verlag, 1999.
- [36] L. N. de Castro and J. Timmis, *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*. Springer, 2002.

- [37] S. Stepney, R. E. Smith, J. Timmis, M. J. Tyrell, A. M. Neal, and A. N. W. None, „Conceptual frameworks for artificial immune systems,” *International Journal of Unconventional Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 315–338, 2005.
- [38] S. A. Hofmeyr and S. Forrest, „Architecture for an artificial immune system,” *Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 4, pp. 443–473, 2000.
- [39] L. O. Chua and T. Roska, *Cellular neural networks and visual computing, Foundations and applications*. Cambridge University Press, 2002.
- [40] A. Falus, *Physiological and Molecular Principles of Immunology*. Semmelweis Press, Budapest, 1998. in Hungarian.
- [41] T. Roska, L. Kék, L. Nemes, A. Zarándy, M. Brendel, and P. Szolgay, „CNN software library (templates and algorithms), version 7.2.,” Tech. Rep. DNS-CADET-15, Analogical and Neural Computing Laboratory, Computer and Automation Research Institute, Hungarian Academy of Sciences (MTA SzTAKI), 1998.
- [42] L. Kék and A. Zarándy, „Implementation of large-neighborhood nonlinear templates on the CNN Universal Machine,” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 26, no. 6, pp. 551–566, 1998.
- [43] L. Alvarez, F. Guichard, P. L. Lions, and J. Morel, „Axioms and fundamental equations of image processing,” *Arch. Rational Mech. Anal.*, vol. 16, pp. 200–257, 1993.

- [44] J. Weickert, „A review of nonlinear diffusion filtering,” in *SCALE-SPACE '97: Proceedings of the First International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision*, (London, UK), pp. 3–28, Springer-Verlag, 1997.
- [45] S. Singh and M. Markou, „An approach to novelty detection applied to the classification of image regions,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 396–407, 2004.
- [46] M. Markos and S. Sameer, „Novelty detection: a review part 1: statistical approaches,” *Signal Processing*, vol. 83, pp. 2481–2497, 2004.
- [47] M. Markos and S. Sameer, „Novelty detection: a review part 2: neural network based approaches,” *Signal Processing*, vol. 83, pp. 2499–2521, 2004.