

BIOMORF IDŐBELI HIPERPONTOSSÁG ÉS „FUNCTION IN LAYOUT” VLSI TERVEZÉS

A gyöngybagoly irányhallás-rendszerének implementálása CNN-architektúrájú idő-digitális átalakító integrált áramkörrel

Ph.D. disszertáció tézisei

Mozsáry András

Témavezető:

Dr. Roska Tamás
az MTA rendes tagja

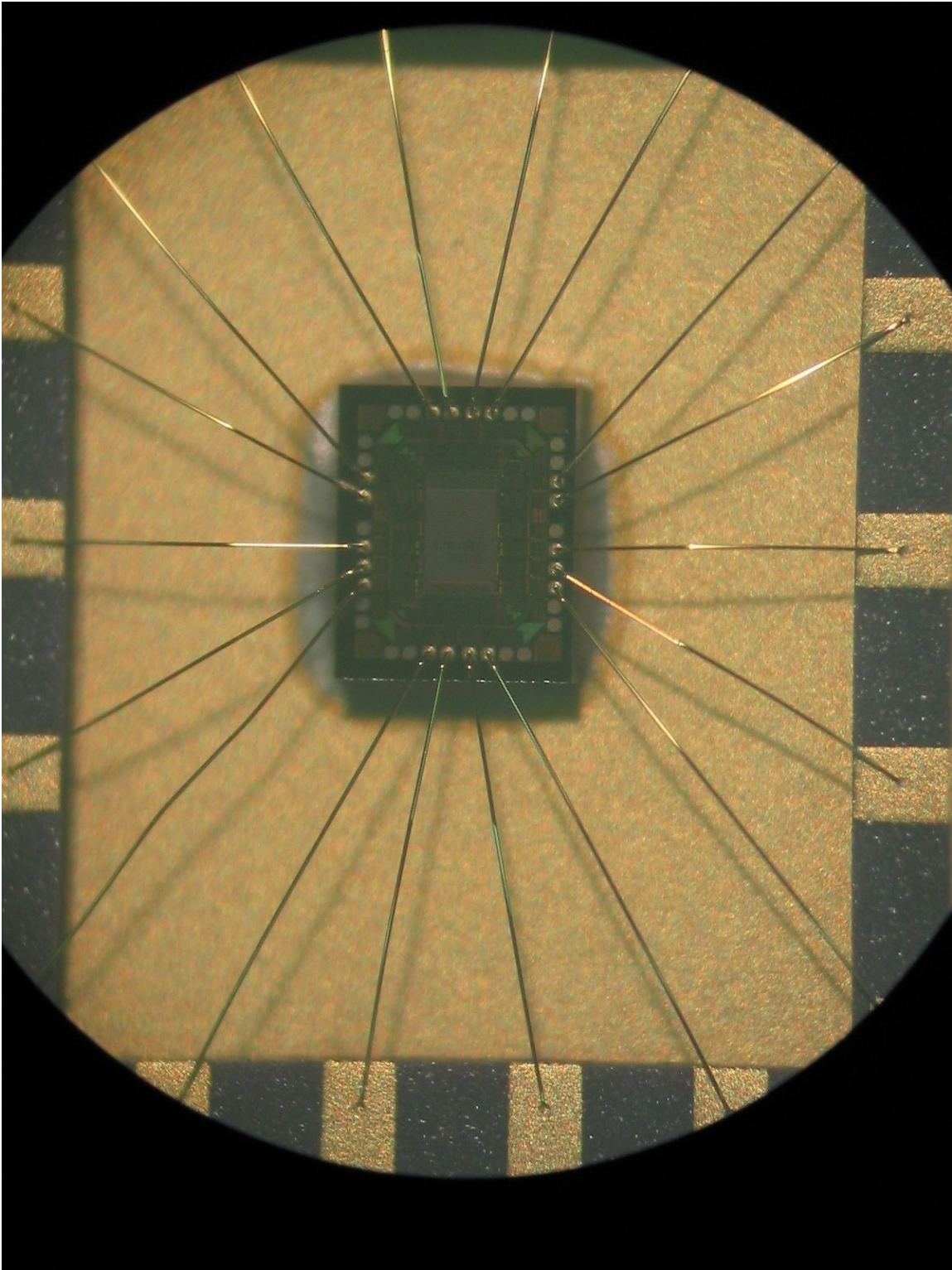


Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológia Kar
Interdiszciplináris Műszaki Tudományok
Doktori Iskola



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

Budapest 2007



„Не кожен, хто каже до Мене:
Господи, Господи!” Mt 7:21

1. Bevezetés

Régi vágya az emberiségnek, hogy mesterségesen tudja utánozni az élőlények képességeit, köztük a látást és a hallást. Az elmúlt évtizedek neurobiológiai kutatási eredményei lehetővé tették e funkciók (illetve egyes részleteik) mesterséges utánzását. Egyes érzékelő funkciók idegi feltérképezettsége oly mértékű, hogy szilícium integrált áramkörökkel megvalósított modelljeik kitűnően reprodukálják az idegi funkciót. Például az elmúlt években integrált áramkörökkel megvalósítottak egy-két retinafunkciót, egy elektromos hal tájékozódási mechanizmusát, elemi mélységérzékelő funkciót stb. A magasabbrendű élőlények idegrendszerének felépítése azonban annyira összetett, hogy ennek megismerése és modellezése még csupán napjaink és a jövő feladata lesz. Ezen a területen szorosan együtt dolgoznak az idegrendszer működését vizsgáló biológusok és a számítástudományt művelő mérnökök, matematikusok stb.

Az idegi funkciók nagysebességű modellezésének hasznos eszköze az 1988-ban kidolgozott celluláris neurális hálózat (CNN), amelyet úgy lehet definiálni, mint analóg, nemlineáris, dinamikus processzor tömb, ahol a processzorok (legegyszerűbb esetben néhány elemből álló áramkörök) szabályos síkbeli rácsban helyezkednek el és csak lokálisan (kis távolságban) vannak összekötve ([1, 2, 3, 4]). Az elektromos hal térbeli hiperpontosságú architektúráját követve a CNN lokális összeköttetés rendszerét ritkás (soronkénti) globális huzalokkal is kiegészítették: [5]. A processzorokat logikai és folytonos aritmetikai egységekkel valamint lokális memóriával és megfelelő vezérlőkkel kibővítve kapjuk a CNN Univerzális Számítógépet [6], az első tárolt programú analogikai (analóg + logikai) számítógépet. A mikroelektronikai technológia és a számítástechnika rendkívül gyors ütemű fejlődésének köszönhetően a CNN Univerzális Számítógép egyetlen ún. *analogikai szuperszámítógép mikrochipen* megvalósítható és így mintegy 10^{12} ekvivalens műveletet tud másodpercenként végrehajtani.

A CNN-struktúra, a celluláris hullámszámítógép a biológiai érzékelő és feldolgozó mechanizmusok számára is eléggé univerzálisan használható modell. Az első CNN univerzális számítógép chipek Sevilla -ban, a kaliforniai Berkeleyben, Münchenben, Helsinkiben és Leuvenben készültek. Ezeken a chipeken a cellákat egyszerűen és rendkívül gyorsan lehet programozni és újraprogramozni, amely a gyakorlati alkalmazások szempontjából nagyon vonzó. Újabban ez a lokálisan összekötött és globálisan elérhető architektúra kezd elterjedni mind a 3 dimenziós szuperszámítógépekben (pl. IBM Blue Gene), mind a sokprocesszoros chip-ekben (pl. IBM Cell

multiprocessor és Intel2800), mind az új FPGA-kban, de a CNN Univerzális Számítógép emulált digitális változataiban is. Mindez, és a méretcsökkentés a 100nm alatti világban új kérdéseket vet fel: a layout fokozott funkcionális szerepét, és a sokprocesszoros topografikus architektúrák tervezési módszerét illetően.

Jelen dolgozatban az idegrendszer érzékelési információt feldolgozó egyetlen részletének modelljét mutatom be; a gyöngybagoly hanglokalizáló rendszerének egy CNN modelljét, a CNN alapú szimulációtól az integrált áramkörös megvalósításig. Az általam megtervezett és bemért chip CNN architektúrájú, viszont az eddigi CNN univerzális számítógépekkel ellentétben nem programozható. Ez ugyan visszalépést jelent a funkcionális komplexitás szempontjából, azonban éppen a hatékony alkalmazás diktálja az egycélú, dedikált áramkör kialakítását: a megvalósított chip 30 pikoszekundumos egységekben képes időt mérni, és ezzel élvonalbelinek számít a manapság létező nem CNN-alapú időmérők között.

Dolgozatom *célja* többretű. Egyrészt, szeretném megmutatni, hogy azzal az új technikával, amelyet a CNN paradigma hozott, a fent említett feladatra technikailag versenyképes megoldást nyújt gyakorlati megvalósításban is. Másrészt szeretném bemutatni, hogy a CNN paradigmát az áramköröm nyomán új irányban lehet általánosítani, a késleltetési idő dimenziójában (1. tézis) illetve a hanglokalizálás funkciója milyen hatást gyakorolt a közvetlen áramköri terv megrajzolására, nevezetesen a „funkció a maskrajzolatban” (function in layout) tervezési elv kimunkálásával (2. tézis). A két módszertani tézisen felül a Hiperpontos Csip kifejlesztésével kapcsolatban is megfogalmaztam egy tézist: A meglévő neurobiológiai és numerikus CNN modellekből kiindulva VLSI implementációra alkalmas absztrakciós szintre hoztam a gyöngybagoly hanglokalizációs funkcióját (3. tézis). Az eredmény a hat tranzisztoros CNN cella, és benne az egy tranzisztoros szinapszis. Valószínűsíthető, hogy a bemutatott technika a VLSI gyártástechnológia továbbfejlődésével más architektúrájú implementációkban is teret nyer. Különösen azért, mert a nano-VLSI-ben (100nm alatt) a huzalok késleltetése nagyobb, mint a logikai művelet során keletkező késleltetés, valamint amikor a mikroelektronikai eszközök fejlesztése eléri fizikai korlátait. Ez különösen igaz a chipen belüli és a chippek közötti összeköttetések problémájára is.

2. Alkalmazott módszerek

Kutatásaim gerincét a funkció analízise és az azt követő VLSI tervezés folyamata alkotta. A gyöngybagoly hanglokalizálási funkció szimbólikus leírását és a hozzá tartozó architektúrát készen vettem a CNN és a Neurobiológiai tudományos irodalomból. Ennek az időmérésre való kismértékű átalakítását és verifikálását CNN hálózat működését szimuláló CANDY és ALADDIN szoftverrel végeztem. Az áramköri tervezéshez és szimulációkhoz az HSPICE, CADENCE Design Framework II és MAGIC rendszereket használtam. A megtervezett intergált áramköreimet a tajvani TSMC gyár készítette el a tajvani tudományos akadémia Chip Implementation Center (CIC) központjának szolgáltatásán keresztül. A bemérést Tajvanon és Budapesten végeztem, az eredmények statisztikai kiértékeléséhez és megjelenítéséhez MATLAB rendszert használtam.

A modell kialakításának lényege az áramköri cellák közötti összeköttetések beállítása, tehát a *template*-ek (összekötési minták, sablonok) megtervezése. A neurobiológia eredményeit felhasználva [7] egyenes úton jutunk el a *template*-ekhez [8]. Az egyszerű fizikai maszk realizálás érdekében többször a *template*-en is módosítottam, így jutottam el többek között az egy tranzisztoros szinapszis-ig is. Tehát a *template*-ek tervezése heurisztikus úton, próbálgatással történt, alapul véve a neuroanatómiai és a neurofiziológiai mérések eredményeit.

3. Az eredmények tézisszerű összefoglalása

1. *Tézis: Delay Domain Computing*

Bevezetem a késleltetési idő dimenziójában való számítás (Delay-Domain Computing) metodikáját. Az elnevezés azt a műveletvégzést jellemzi, amikor a rendelkezésre álló adatok fizikai jel-reprezentációja egyes események időzítése, és a műveletvégzés ezeknek az eseményeknek a jelterjedés közbeni kölcsönhatásán alapszik. A metodika egy újfajta értelmezése a meglévő CNN hullámszámítógépek működésének, azonban létezik olyan eszköz is, amelynek a működési elve kizárólag ebben az értelmezésben fogható fel. Idő-dimenziós számítógép a felhasznált technikai részmegoldásokban néha alig különbözik a szokványos digitális-logikai számítógépektől. Azonban az idő-dimenziós számítás értelmezési tartománya és értékkészlete idő, ezzel egy új fejezetet illeszt a „Non-Boolean Processing” fiatal és máris sok érdeklődéssel övezett világába. Az operátorok hullámok, amelyek sebessége a csipfelületen való lehető legrövidebb jelterjedési idő. A hullámtulajdonságok a fizikai megvalósítás miatt mindenképpen kauzálisak, de ezen belül az egyszerű késleltetéstől a téridőbeli visszacsatolt konvolúcióig mindenféle művelet értelmezhető. Az említett operátorok működését integrált áramkörrel kísérletileg is demonstráltam. A készülék felépítése és működése szerint is analóg áramkör. A klasszikus analóg feladatokról azonban

nagyban eltér azzal, hogy nemlineáris, és nagyszámú párhuzamos művelet zajlik benne egyszerre. Ezért tartozik a CNN, a Non-Boolean Processing világába, de egyben a Delay Domain Computing egyedülállóan nagyméretű példája.

2. *Tézis: Function in Layout*

Új integrált áramkör tervezési módszert vezettem be, „funkció a maszkrajzolatban” (Function in Layout) néven. A módszert a megépített bio-inspirált idő-digitális átalakító szerkezete kényszerítette ki, melynek funkciójából adódóan meghatározott az egyes áramköri részek egymáshoz viszonyított helyzete. Miután mindennemű távolság egyben késleltetést is jelent, ez kötött szomszédsági viszonyt feltételez. Ez tranzisztorszinten, illetve a jövőben egyre hangsúlyosabban maszkrajzolat (layout) szinten lesz megtalálható, és ez magát az áramkör funkcióját is meghatározza. Természetesen a módszer alkalmazhatóságát maga az implementálni kívánt funkció befolyásolja, azonban egyre általánosabb a digitális mikroprocesszorok világában is szinkronitási hatósugárról beszélni (synchronity radius). Tehát az áramkörök, részegységek fizikailag elfoglalt helye a chipfelületen egyre inkább funkció-orientált lesz a CNN-től független architektúrákban is. Biológiai példák is ebbe az irányba mutatnak, hiszen a látó, halló és tapintó érzékelés és feldolgozás idegi központjai topografikusak, helyi összekötöttségűek maradnak egészen a magas rendű kérgi agyterületekig. E mellett vannak ritkás globális (busz) összeköttetések, de a globális huzalozás problémája itt teljesen ismeretlen, minden vonal csak a szomszédos celláig vezet. Ez később nagy előny lesz a száz nanométeres, és annál is kisebb csíkszélességű technológiákra (deep submicron) való áttéréskor. A paraziták növekvő jelentőségével eljön az az idő, mikor a kapcsolási rajz helyett egyfajta „térben folytonos áramkör” –ben való gondolkodás kerül előtérbe. A „Funkció a Maszkrajzolatban” (Function in Layout) metodika jellemzői a következők:

- Az elemi processzorok- a cellák- alkatrészei minimális tulajdonságúak a megvalósított cél szempontjából: minimum méret, minimum disszipáció, maximális sebesség, stb.). A többi paraméterből formálódik a kölcsönhatásuk, az elemi programlépés.
- A huzalok fontos funkcionális elemek, melyek jelentős késleltetést és hullámtulajdonságokat eredményeznek.
- A rendszerfunkciót a cellák helye és huzalozása adja, ezért a maszkrajzolat konkrét formája kulcsszerepet játszik a tervezésben.

3. *Tézis: A hiperpontosság funkciója hat tranzisztoros CNN cellában*

Átfogalmaztam és leegyszerűsítettem a gyöngybagoly irányhallására vonatkozó meglévő

biológiai (Mark Konishi) és neuromorf CNN-alapú (Lotz Károly) modellt. Az Időbeli Hiperpontosság meglévő funkcióját a VLSI implementáció érdekében olyan absztrakciós szintre alakítottam hogy gyakorlati elektronikai szempontokból is (chipméret, fogyasztás) kielégítő áramkör születhessen. Az Időbeli Hiperpontosság CNN-es alkalmazhatóságára vonatkozó eddigi numerikus szimulációs ismereteinket kísérleti úton is igazoltam. Ezenkívül az elektronikai mérések arról is tanúskodnak, hogy a létrejött eredmény versenyképes a szakirodalomban megtalálható manapság korszerű Idő-Digitális Átalakító integrált áramkörökkel, a felbontás és sebesség tekintetében.

4. Az eredmények alkalmazási területei

A fenti tézisek alkalmazásával tervezett idő-digitális átalakító 1.9 nanoszekundumos tartományban (-850 .. +850 ps) 6 bites felbontással 30 pikoszekundumos lépésekben képes időtartamot mérni. Az áramkör eredeti formájában 64 x 64 elemi cellát tartalmaz egy 1,59mm² nagyságú szilíciumchipen, amely 0.35µm –es CMOS technológiával készült. A Hiperpontos időmérő Csip masszív maszkrajzolat-szintű paralelizmusa teszi lehetővé, hogy olyan funkciót hozzunk létre, amelyben a mérési pontosság nem csupán az analóg áramköri blokkok egyéni pontosságára támaszkodik, hanem a struktúra egésze adja az összességében pontos végeredményt.

A saját áramköröm mellett egy másik műszaki területen is fölfedeztem az elosztott, párhuzamos működésű megoldást tranzisztorszinten. A Flash A/D átalakítók szintén tartalmaznak maszkrajzolat szinten reguláris struktúrákat. Az itt megtalált példákat is beillesztettem a „Funkció a Maszkrajzolatban” irányvonalába. Ugyanis ebben az esetben is egyforma cellák láncolatán létrehozott lokális összekötöttségű térbeli szűrőfunkciót valósítanak meg. Ezt átlagolásnak hívják a szakterületen belül, és az analóg áramkörök összesített pontosságát javítják vele az egyes cellák individuálisan meglévő pontatlanságain túllépve. Az „Átlagolás” módszere alig több mint tíz éves, tehát az egészen technikai szintű megvalósítási kérdésekben is hódítani kezd az elosztott, és párhuzamos struktúra egy rendszerszintű cél elérése érdekében. Valószínűsíthető, hogy a bemutatott „funkció a maszkrajzolatban” technika a VLSI gyártástechnológia továbbfejlődésével más architektúrájú implementációkban is teret nyer.

5. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani:

- Szüleimnek.

- Dr. Roska Tamásnak, akinek lelkiismeretes figyelme végigkísérte munkámat, és aki mindenben segített és sokféleképpen támogatott. Külön köszönetet szeretnék mondani az általa biztosított rengeteg és külön-külön is elképzelhetetlenül nagy lehetőségért, amiket a kutatómunkámban alig győztem kihasználni.

- prof. Angel Rodríguez-Vázquez -nek, aki vendégül látott Sevilla-ban: a beszélgetésekért és konstruktív kritikákért.

- prof. Chin-Teng Lin -nek (林進燈), aki fogadott a kutató laboratóriumában Tajvánon, és lehetővé tette a „Hiperpontos Csip” prototípusok gyártását és bemérését.

- Jen-Feng Chung -nak (鍾仁峰)

- Dr. Levendovszky Jánosnak

- Kollégáimnak, akik elméleti és gyakorlati szaktudásukkal, ötleteikkel és útmutatásukkal segítették kutatómunkámat.

- A Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai Kar valamennyi munkatársának a harmonikus környezet biztosításáért.

- Jelenlegi munkahelyemnek, az MTA-SZTAKI Analogikai és Neurális Számítások Laboratóriumának, ahol a disszertációmot készítettem és amellyel korábban is szoros munkakapcsolatban álltam.

- Továbbá köszönettel tartozom az OTKA támogatásoknak (legutóbb a TS40858 számú pályázat keretében)

6. Irodalomjegyzék

a.) Referenciák

- [1] L. O. Chua and L. Yang, "Cellular neural networks: Theory", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 35, pp. 1257-1272, 1988
- [2] L. O. Chua and L. Yang, "Cellular neural networks: Applications", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 35, pp. 1273-1290, 1988
- [3] L. O. Chua and T. Roska, "The CNN paradigm", *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, Vol. 40, pp. 147-156, March 1993
- [4] T. Roska and L. O. Chua, "Cellular neural networks with nonlinear and delay-type template elements and non-uniform grids", *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Vol. 20, pp. 469-481, Sept-Oct. 1992
- [5] W. Heiligenberg and T. Roska, "On biological sensory information processing principles relevant to Cellular Neural Networks", in '*Cellular Neural Networks*', edited by T. Roska and J. Vandewalle, published by J. Wiley and Sons, Chicester, 1993 pp. 201-210.
- [6] 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
- [7] C. E. Carr and M. Konishi, "A circuit for detection of interaural time differences in the brain stem of the barn owl", *J. Neuroscience* 10, pp. 3227-3246, 1990
- [8] K. Lotz, L. Bölöni, T. Roska and J. Hámori, "Hyperacuity in Time: A CNN Model of a Time-Coding Pathway of Sound Localization", *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Fundamental Theory and Applications*. Vol. 46. No. 8. pp. 994-1002. august 1999

b.) Az értekezés témájából készített publikációk

[9] **András Mozsáry**, Jen-Feng Chung, Angel Rodríguez-Vázquez, and Tamás Roska "Bio-inspired 0.35 μ m CMOS Time-to-Digital Converter with 29.3ps LSB" European Solid-State Circuits Conference ESSCIRC 2006 Montreux, Switzerland, Page(s):170 – 173 september 2006

[10] **András Mozsáry**, Jen-Feng Chung, Tamás Roska „Function-in-Layout: a Demonstration with Bio-Inspired Hyperacuity Chip” International Journal of Circuit Theory and Applications (CTA) Volume 35, Issue 2 , Pages 149–164 march 2007