

Roska Tamás

az MTA rendes tagja

Térben-időben tájékozódó analogikai számítógépek

Elhangzott 1999. április 15-én

Azt reméljük, hogy egy olyan gyökeresen új számítógépelvnek vagyunk a kidolgozói, amely új irányt jelent az elektronika-számítástechnika fejlődésének egy újabb szakaszában. A mai előadáson a következőkről szeretnék beszélni. Először is szeretném motiválni, hogy mit jelent az információtechnika harmadik hulláma, amit a mikroérzékelők és beavatkozók forradalmának is tekintenek, másrészt konkrétan szeretnék öt kérdéskörrel foglalkozni: (1) röviden szeretném bemutatni az analogikai és celluláris számítógépeket és fizikai implementációjukat, (2) ezután egy új elvet ismertetek, amely a tér-időbeli plaszticitás modellje és implementációja ezen analogikai CNN univerzális gépnek nevezett architektúrán, (3) majd az ezen definiált, nem egyensúlyi téridőbeli algoritmusokkal, (4) valamint a biológiai relevanciával és korlátaival foglalkozom, (5) végül az analogikai celluláris algoritmusok komplexitáselméletében tett első lépésekről szeretnék beszámolni (CNN: cellular neural/nonlinear network).

Bevezetés

Egypár hónapja olvastam azt az elemzést, amit egy kaliforniai technológia-elemző cég készített az elmúlt harminc év és a következő évtized számítás-technikai-információtechnikai fejlődéséről. Ez úgy kezdődik, hogy az 1970-es években létrehozták a mikroprocesszorokat, ez biztosítja az olcsó számítási teljesítményt, ez indikálta a nyolcvanas években a PC-ipart. A következő

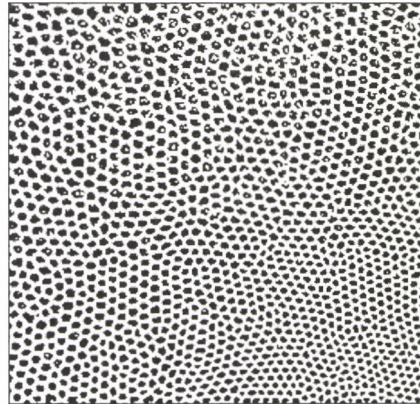
fontos mérőföldkő az olcsó lézer volt, a nyolcvanas évek végén, ami megteremtette az olcsó sávszélességet és a kommunikáción keresztül az internet-ipart. Ezek az elemzők azt írják, hogy a kilencvenes évek végén most éljük a *mikroérzékelők forradalmát*, beleértve az olcsó kamerákat, a mikroelektromechanikus rendszereket (MEMS), a halló, tapintó, szagló, elektromágneses érzékelőket, tehát rövidesen olyan helyzetbe kerülünk, hogy térben és időben érzékelt sok ezer folytonos, analóg jel érkezik a számítástechnikai és kommunikációs berendezésekhez. Ez az a jelenségkör, amelyben fölmerül az a kérdés, hogy milyen számítógépek kellenek ehhez. Hogy ez az elemzés mit javasol, a végére hagynám. Mindenesetre új termékek és szolgáltatások vannak a látóhatáron.

Mit jelent az, hogy számítási teljesítmény? Az INTEL cég körülbelül egy jó éve telepítette az első 10^{12} (tehát billió) művelet/másodperces szuper számítógépét, amely közel tízezer, akkori Pentium mikroprocesszort tartalmazott. Mi volt a cél? Nagy, komplex téridőbeli nemlineáris dinamikus rendszerek hullámjelenségeinek a számítása. Nagyon érdekes, hogy annak idején a második világháború táján és utána szintén ezek voltak a teszt példák a nehéz számítási feladatokra. Amit szeretnék megemlíteni, az az, hogy a kezemben lévő analogikai vizuális mikroprocesszor-csip, ez az optikai érzékelőkkel ellátott 4 ezer kis processzort egy csipen tartalmazó CNN univerzális gép, ez körülbelül hasonló, tehát 10^{12} ekvivalens műveletet képes másodpercenként elvégezni. A mi alapműveleteink azonban mások. Az elemi műveletek ugyanis a digitális szuperszámítógépekben az összeadást, kivonást, szorzást, osztást, elemi logikát jelentik. Az analogikai egycsipes szuperszámítógépekben az elemi művelet egy nemlineáris, dinamikus hullámegyenletnek a megoldása. Elővesszük tehát a legnehezebb problémát, és azt mondjuk, hogy ez lesz az elemi művelet. És ezt a fizika oldja meg. Hogyan lehet mindezt tárolt programmal csinálni? Ez az analogikai celluláris (CNN) számítógép. Ezt az elvet dolgoztam ki L. O. Chua professzorral 1992 táján. A legújabb csip, tehát amit pár hete fejeztek be Sevillában, 4096 processzort tartalmaz egy csipen. Ehhez a számítástechnikai infrastruktúrát munkatársaimmal az MTA SZTAKI-ban készítettük. Kérdés, hogy mire lehet használni ezt a hihetetlen számítási teljesítményt.

Analogikai celluláris számítógép

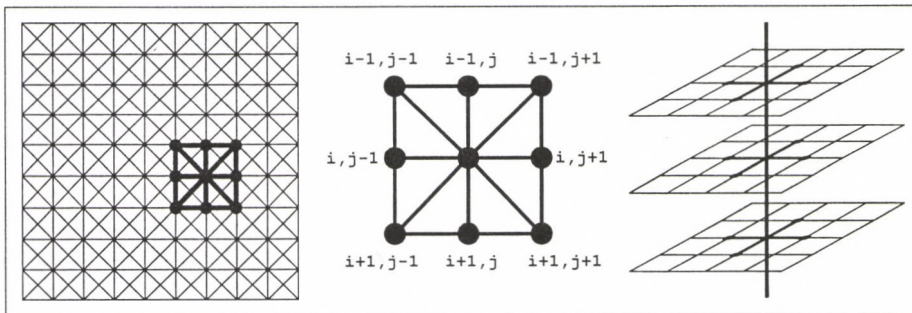
A gép magja egy CNN (celluláris neurális/nemlineáris hálózat), amelyet Chua professzor egy doktorandusz munkatársával, L. Yanggal dolgozott ki 1988-ban. Vegyünk egy két- vagy háromdimenziós rácsot, tegyük a rács-

pontokba kis dinamikus egységeket, cellákat. Ezeknek bemenete, állapota és kimenete van, az interakció ezek között a cellák között főleg lokális (mint például a receptív mezők a retinában), és a cellák jelei folytonosak. Ez az az alapeset, a CNN alapstruktúra, amelyikben az interakcióerősség-mintázatot, amely a cellák állapota és bemenete vagy kimenete között van, egy „templát”-tal, jellemzik. Ha megadjuk a cella lokális-állapot-egyenletét, akkor egy CNN-hálózat tervezése lényegében ezeknek a templátoknak a tervezését, ezeknek a lokális összeköttetési mintázatoknak a tervezését jelenti.



1. ábra

Ez a kép egy emberi retinának a mikroszkópos képét mutatja (1. ábra). Ha nem is nagyon szabályos a rács, de azért látjuk, hogy ez egy kétdimenziós rács, és ebből van egypár réteg. Tekintsünk egy egyszerű CNN-hálózatot (2. ábra)!



2. ábra

Tehát itt van egy cellarácsozat, mindegyik csak egy 3×3 -as környezettel van direkt összeköttetésben (ebből lehet egymás fölött is pár réteg). Ha tehát ez a struktúra és minden egyes réteg, minden egyes kis cella kap jelet a bemeneteire, akkor nagyon egyszerűen jutunk el egy olyan képprocesszorhoz, ahol minden egyes képelem (pixel) fényességével arányos jel segítségével kódoljuk a bemenő képet. Itt nagyon egyszerűek ezek az elemi „cellaprocesszorok”, elsőrendű dinamikával rendelkeznek, és az összeköttetés-mintázat, a „templát” ($3 \times 3 + 3 \times 3 + 1 = 19$ szám) adja a „program”-ot. Az γ

$$\begin{aligned}
 &\text{Celladinamika (elsőrendű)} \\
 &dx_{ij}/dt = -ax_{ij} \\
 &y_{ij} = f(x_{ij}) \\
 &\text{A templatok definiálják az interakciós mintázatot} \\
 &i_a = \sum A(ij,kl) y_{kl} \qquad \qquad \qquad \sum A^*(y_{ij}, y_{kl}) \\
 &\qquad \qquad \qquad kl \in N_r(ij) \\
 &i_b = \sum B(ij,kl) u_{kl} \qquad \qquad \qquad \sum B^*(u_{ij}, u_{kl}) \\
 &\qquad \qquad \qquad kl \in N_r(ij) \\
 &i_t = i_a + i_b + z_{ij} \\
 &\text{A CNN dinamika egyenletei} \\
 &dx_{ij}/dt = -ax_{ij} + i_t = -ax_{ij} + \sum A(ij,kl) y_{kl} + \sum B(ij,kl) u_{kl} + z_{ij} \\
 &y_{ij} = f(x_{ij})
 \end{aligned}$$

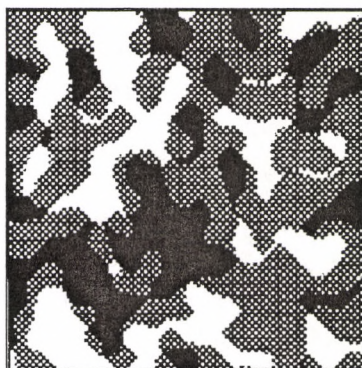
3. ábra

kimenetek kódolják a kimenő képet. Az ilyen egyszerű CNN-hálózat leírása egy olyan csatolt differenciálegyenlet-rendszer, aminek a változószáma mondjuk, tízezer vagy egymillió (3. ábra). $N_r(ij)$ jelenti az ij cella környezetét.

A kérdés az, hogyan lehet rendet teremteni ebben a sokaságban. Egyetlenegy példát szeretnék megmutatni azok számára, akik nincsenek olyan közel ehhez a területhez, hogy érzékeltessük, mivel lehet itt játszani. Ha egy képelem fekete, akkor értéke $+1$, ha fehér, akkor -1 , és a szürke árnyalat közöttük van. Ha ráteszünk egy képet a bemenetre, és beállítjuk a kis interakciós mintázatokat, (a „bűvös” 19 számot), akkor a bemenő képből egy mikroszekundum alatt egy kimenő kép lesz. Ezek után jön részben a szerencse meg a tudomány: hogyan lehet játszani ezzel a 19 számmal, ezt a mintázatot tervezni úgy, hogy sok mindent tudjunk csinálni? Ez a sok minden gyakorlatilag a

téridőbeli dinamika szinte teljességét lefedi. Ha most egy véletlenszerű bemenő képet adunk, és ezt a bizonyos templátot a visszacsatolási elemei (A elemei) alapján változtatjuk, akkor attól függően, hogy mit állítunk be, egzotikus mintákat kapunk. A természetben előforduló sok szép és egzotikus mintát ezekből elő lehet állítani. Ez például egy Turing-minta (4. ábra).

Sokan nem tudják, hogy Turing volt az, aki nemcsak a digitális számítástechnika alapjait vetette meg, hanem az ilyen minta előállítás alapjait is. A legkülönbözőbb mintázatok előállíthatók; a csiga háza, a leopárd bőre stb. Ha egy kicsit bonyolultabb cellát veszünk, akkor kapunk egy másodrendű CNN-cella-egyenletet és különböző időál-



A:	0,2	0,0	0,2
	0,0	0,8	0,0
	0,2	0,0	0,2

4. ábra

landókat, és akkor ezeket tudjuk beprogramozni és így tovább. De a mintázatot kódolhatja néhány különböző kaotikus attraktor is. Néhány mesteri CNN-algoritmustervező a legkülönfélébb vizuális illúziókat is be tudja programozni (Zarándy Ákos). De egy komplex kémiai reakciónak az egymás után következő pillanatképeit is elő tudjuk állítani, mint ennek a CNN-dinamikának speciális eseteit vagy egy felületi hullámot (például egy nyúl-szív modelljének a felületi hullámait).

Ezek után következik az a kérdés, hogy a számítógéppel végzett kísérleteken túl hogyan lehet megmutatni, hogy itt rend van. Ez a kvalitatív elmélet, ahol új templáttípusok kvalitatív tulajdonságait vizsgáljunk, valamint a legkülönfélébb parciális differencia-differenciál egyenleteknek (PDDE) a reprezentációját lehet megállapítani. Ezzel kapcsolatosan egy nagyon lényeges dologra szeretném felhívni a figyelmet. Fölmerül a kérdés, hogy a diszkrét térben – tehát minden folytonos, de a tér diszkrét – definiált ilyenfajta dinamikák gazdagabbak-e, mint a folytonos térbeliek. Nemrég, egypár évvel ezelőtt, egy matematikus egy nagyon érdekes példával megmutatta, hogy valóban gazdagabbak (Keener). Tehát egyrészt igaz az, hogy gyakorlatilag minden parciális differenciálegyenlet jól közelíthető ezekkel a térben diszkrét rácson definiált CNN-hálózatokkal, de fordítva ez nem áll. Vannak olyan jelenségek a térben diszkrét folyamaton, amelyek elképzelhetetlenek, realizálhatatlanok a folytonos térben. Ilyen például a „terjedési hiba”, nevezetesen hogy egy véges számú rácspont után megáll a terjedés.

Stabilitásfeltételek és stabilitás-ellenőrzés

Egy másik kérdés a stabilitás. Aszimmetrikus visszacsatoló templátok esetére sikerült megmutatni, hogy ha ennek a templátnak a nem központi elemei nem negatívok, és az időeltolt templátnak az elemei szintén nem negatívok, valamint nem széteső a hálózat, akkor fennáll a stabilitás. A kvalitatív elmélet egyik fő eredménye ma az, amit Leon Chua professzornak nemrég sikerült kidolgoznia, hogy egyértelműen meg lehet mondani, mi a szükséges feltétele annak, hogy komplex kibontakozó számítási jelenségek egyáltalán létrejöjjenek. Ez a „lokális aktivitás” elve.

A CNN univerzális gép-architektúra

Láttuk tehát, hogy egy-egy CNN-hálózat a legbonyolultabb hullámjelenségeket is elő tudja állítani. Készítsünk most már olyan számítógépet, ahol ez a téridőbeli dinamika egy elemi utasítás, a CNN univerzális számítógép éppen ezt tudja. Ebben az „analogikai” (analog és logikai) CNN számítógépben minden egyes kis cellaprocesszort kiegészítünk egy kis lokális analog memóriával, egy kis lokális logikai memóriával, egy lokális logikai egységgel, majd az egészet bekötjük egy vezérlőrendszerbe, ez utóbbi a globális analogikai vezérlőegység. Azért „analogikai”, mert egy analog téridőbeli dinamikát kombinálunk logikával: lokális és globális logikával. Van tehát egy olyan számítógépünk, aminek az elemi utasítása egy téridőbeli jelenség. Ez a téridőbeli jelenség nagyon sokféle lehet, például a termodinamikának egy nagyon nehéz, tipikus egyenlete, egy hullámegyenlet stb. Négy-öt fajta ilyen alapegyenlet van. Ezek a nem egyensúlyi termodinamikából származtathatók. Ezek használhatók komplex, praktikus feladatok megoldására is. Ugyancsak ilyen érdekes jelenség az úgynevezett sztochasztikus rezonancia jelensége. Ez azt jelenti, hogy ha például van egy bemenő kép, és ha zajt keverek hozzá, akkor a zajtól függően egészen más morfológiai struktúrák keletkeznek. Ez is mint egyfajta utasítás szerepel ebben a számítógépben. Van tehát egy olyan számítógépünk, egy számítógépelvünk, aminek az elemi utasításai téridőbeliek. Hogyan lehet ezt megcsinálni, ez a következő kérdés; a fizikai implementáció. Amikor 1992–93-ban Chua professzorral együtt megalkottuk ezt az új architektúrát, nem gondoltuk volna, hogy ma egy 4000 processzoros csip fog működni. Három típusú tárolt programú implementáció alakult ki az elmúlt években. Az egyikben analog és logikai áramköröket alkalmazunk egy CMOS csipen. A másik az optikai implementáció, ahol az előrecsatoló B templát fénysebességgel működik. A harmadik az emulált digitális megoldás.

1991-ben egy konkrét fix templáttal csinálták meg az első CNN csipet, 6x6-os méretű volt, 1995-ben már 0,8 mikronos technológiával optikai érzékelőkkel, univerzális tárolt programú, de bináris kimenetű csip készült Sevil-lában, 20 x 22-es méretben. Ezután Berkeleyben és Helsinkiben készültek csipek, majd ez a 64 x 64-es ez év elején. Ez valóban áttörés. Hogy érzékel-tessem, ezen a csipen mintegy egymillió analóg tranzisztor működik egy-szerre, programozottan. A legbonyolultabb, amit eddig csináltak, az százezer analóg tranzisztornál nem tartalmazott többet. Tervezés alatt van egy 128 x 128-as méretű.

Az adaptív CNN univerzális gép

A következő kérdés, hogyan lehet ebben az architektúrában bevezetni a *plaszticitást*. Mit jelent az, hogy plaszticitás? Amikor ilyen szavakat használunk, hogy tanulás meg egyebek, nagyon vigyázni kell, mert könnyen össze-keverjük ezeket az antropomorf fogalmainkat a valósággal, mintha tényleg gondolkodva tanulnánk. Nem erről van szó. Arról van szó, hogy lokálisan

Plaszticitás és „tanulás” az idegrendszerben

Elemi formák:

- | | | | |
|---|----------|---|---------------------------|
| ➤ | lokális | – | szinaptikus |
| ➤ | globális | – | nem szinaptikus moduláció |

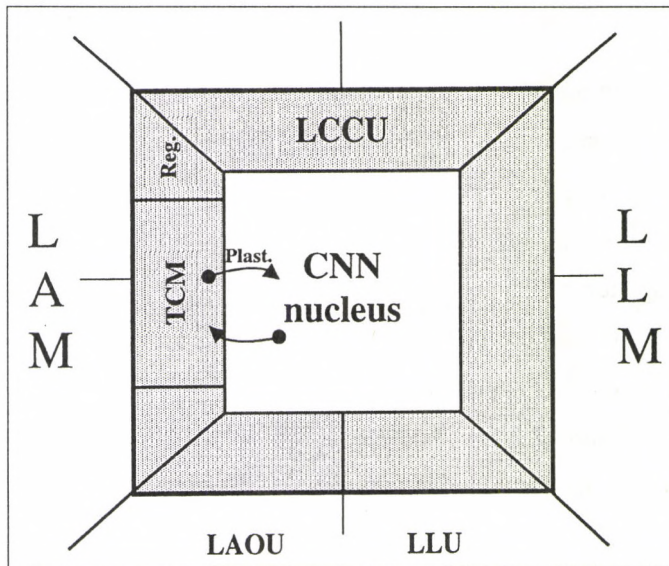
Implementációk típusai – térben és/vagy időben változó
templátok

- maszkolt területek
- időinvariáns-plaszticitás
- időben lassan változó plaszticitás
- valós idejű idővariáns-plaszticitás

Térben és időben programozható érzékelők

egy-egy szinapszis, egy-egy neuron közötti csatolóérték, ami a mi templát-értékünk, ezek változtatják az értéküket a környezet és a saját működésüktől függően. Itt szeretném megemlíteni, abban a szerencsés helyzetben vagyunk, hogy már több mint tíz éve itthon Hámori József professzor kutatócsoportjával tudunk együttműködni és megtanulni egymás eredményeit. Nem azt, hogyan működik az egész idegrendszer, de próbálni megtanulni legalább azt, hogy mik azok az elemi fiziológiai modellek és plaszticitásformák, amiket itt egyáltalán meg lehet érteni. Ami lényeges, az az, hogy kidolgoztunk négyféle, jól definiált, mérnöki módon tervezhető plaszticitási tanulási eljárást, ami implementálható is.

Ezekből csak kettőt szeretnék röviden megemlíteni. Az egyik az, amelyikben mi először megmérjük lokálisan egy képen az intenzitást, és utána úgy emeljük ki a kontúrt, hogy minden egyes cellaprocesszor ehhez alkalmazkodva működjön. Ezt az effektust egy olyan adaptív cella biztosítja, amelynek lokális analóg memóriájában (LAM) egy TCM (template control memory) memóriában tárolt jel módosítja a lokális templátértéket (5. ábra). Nagyon jó példa erre Rembrandtnak több képe, ahol nagy intenzitáskülönbségek vannak.



5. ábra. Időinvariáns lokális vezérlést lehetővé tevő CNN-processzorcella

A mai fényérzékelő kamerák alkalmatlanok arra, hogy egyenetlen megvilágításban is jól tudjanak működni, mert az összes pixel, az összes érzékelő azonosan érzékeny. A mi szemünkben minden egyes kis fotoreceptornak külön élete van. Hogyan lehet most már olyat csinálni, hogy minden egyes pixelnek változtassuk az expozíciós idejét, még hozzá attól függően, amit lokálisan processzált? Az időben lokálisan programozható érzékelők azt jelentik, hogy van egy lokális jellemző, például legegyszerűbb esetben a lokális fényerő, ezt kiszámítjuk egy templáttal, berakjuk egy lokális analóg memóriába, és ezek után a következő lépésben az érzékelőnk ezen memóriában tárolt értékkel arányos ideig működtetjük. Nagyon lényeges, hogy mindez pixelenként lokálisan tárolódik és történik.

Nem egyensúlyi téridőbeli algoritmusok

A következő kérdés, hogy melyek azok az *algoritmikus alapelvek*, amelyeket most már ebben az új világban egy olyan processzornak a világában tudjuk alkalmazni, ahol az elemi utasítás egy nemlineáris téridőbeli dinamika (ezt egy darabig elengedjük, pl. egy diffúziót, egy hullámot; az eredményt lokálisan tároljuk pixelenként, aztán egy másikat indítunk és így tovább). A CNN univerzális gépbe egy komplex cellát teszünk, ezek leíró egyenleteit a 2. táblázat mutatja.

Ehhez hasonlókkal pl. a Brusselator-egyenlet is megvalósítható (3. táblázat).

Az analogikai algoritmus

Nagyon szépen kidolgozott az algoritmus fogalma a digitális világban. Minden, ember által kigondolható, az egészen értelmezett számítás biztosan reprezentálható az úgynevezett Turing-géppel vagy a μ -rekurzív függvénnyel. Most megpróbáljuk megnézni azt, hogy melyik az az algoritmikus tér, amelyben mi most az analogikai CNN univerzális gépen dolgozni tudunk. Ezek az általunk α -rekurzív függvénynek nevezett algoritmusok.

Egy *térbeli-időbeli utasítás halmazú számítógép* (spatial-temporal instruction set computer, StISC computer) képfolyamon működik, az *elemi utasítás* a következő:

$$\Phi_{\text{output}}(t) = \Psi(\Phi_{\text{input}}(t)), \quad t \in T = [0, t_d], \quad (1)$$

ahol Ψ egy képfolyamon értelmezett függvény, $\Phi(t)$ pedig a $\phi_{ij}(t)$ képelem időfüggvényekből álló képfolyam.

Másod- és harmadrendű komplex cella leíróegyenletei

Komplex cellák	
másodrendű	
$\frac{dx_{ij}}{dt} = -ax_{ij} + \sum_{kl \in N_r(ij)} A_{ij;kl} y_{kl} + \sum_{kl \in N_r(ij)} B_{ij;kl} u_{kl} + I_{ij} + \sum_{kl \in N_r(ij)} C_{ij;kl} x_{kl}$	τ_1
$\frac{dy_{ij}}{dt} = y_{ij} - f(x_{ij})$	τ_2
harmadrendű	
$\frac{dx_{ij}}{dt} = y_{ij} - x_{ij} - f^*(x_{ij}) + (x_{kl} - x_{ij}) G_{ij;kl}$	
$\frac{dy_{ij}}{dt} = x_{ij} - y_{ij} + z_{ij}$	
$\frac{dz_{ij}}{dt} = -z_{ij} + y_{ij}$	

A Brusselator-egyenlet

$$\frac{\partial X}{\partial t} = a - (b+1)X + X^2Y + D_1 \Delta^2 X$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = bX - X^2Y + D_2 \Delta^2 Y,$$

ahol

$$\nabla^2 \triangleq \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

A $(\Phi_{\text{input}}(t))$ képfolyamon értelmezett F funkcionált az alábbiak szerint definiáljuk:

$$P = F(\Phi_{\text{input}}(t)) \quad (2)$$

Ez lehet például a képfolyamon az adott idő alatt a maximális intenzitásokat tartalmazó kép.

De lehet ez a kép bináris is, egy M maszk, ahol M például a mozgó részeket detektáló bináris kép.

Ha $t = t_d$ után a kimenet még változik, azaz létezik legalább egy olyan cella, amelyre

$$ij \rightarrow d \quad \phi_{ij}(t)/dt \neq 0,$$

akkor az ezt reprezentáló utasítást nem egyensúlyinak mondjuk.

Ennek illusztrálására utalunk arra az analogikai algoritmusra, amivel egy echokardiogramon a bal kamrának a belső kontúráját megtaláljuk. Tahy Ádám főorvos úrral amikor először kezdtünk erről a problémáról beszélgetni, azt gondoltam, hogy ezt lehetetlen megcsinálni, de szerencsére aztán Rekeczky Csaba munkatársam kidolgozott egy olyan algoritmust, amivel ezekkel a hullámokkal egy belső kontúrt kiszámolhatunk.

4. táblázat

Az analogikai celluláris számítógép tehát képes az alábbiak végrehajtására:

- nem egyensúlyi térbeli-időbeli utasítások, Ψ és F ,
- térbeli logikai utasítások maszkokon pixelenként (pl. sejtautomata),
- képfolyamok térbeli és időbeli kombinációja pixelenként és
- algoritmusok (rekurzív függvények) a fenti utasításokkal.

Az így definiált algoritmusok a

nem egyensúlyi térbeli-időbeli algoritmusok

vagy

analogikai $\propto$ rekurzív függvények.

Biológia inspirálta számítás és modellek

Néhány szót szeretnék mondani a biológia motiválta modellekről. Először egy fontos állítást teszek. A modellezési körben van egy alapvető kérdés. Nevezetesen, ha én kidolgozok egy modellt, és azt mérem, mint amit számoltam, akkor azt hiszem, hogy megtaláltam a jó modellt. De nem ez az igazság.

Megmutattam, hogy három kvalitatíve is különböző modellt tudok ugyanarra az egyszerű kontúrszámításra csinálni, és mégis mind lényegében ugyanazt számolja ki. Három kvalitatíve különböző CNN-modellről van szó, csak egészen röviden vázolom fel, hogy mi itt a 3 rétegű CNN-modellnek a lényege. Itt van három réteg, τ_1 , τ_2 , τ_3 időállandókkal. Mindegyik rétegen lehet egy lokális diffúzió, λ_1 , λ_2 , λ_3 térállandókkal, az input, ill. a rétegek közötti jeltranszfernek pedig egy Gauss típusú eloszlása lehet, σ_1 , σ_2 , σ_3 szórással. Ugyanazt a detekciót elő tudom állítani, ha a τ értékek azonosak, de úgy is, hogy a λ értékek azonosak, és a τ értékeket hangolom különbözőre. A két kvalitatíve is különböző modell ugyanazt számolja.

Az elmúlt tíz évben sok „neuromorf” CNN-modellt alkottunk, főleg a látásban. Ezeket egy „Atlasz”-ban időről időre közreadtuk.

Számítási komplexitás

Az utolsó kérdéskör, amit szeretnék érinteni egész röviden, az a *számítási komplexitás*. Van most már egy olyan újfajta analogikai számítógép, amelyiken a legbonyolultabb hullámműveletek az elemi események, utasítások, és szeretném megtudni azt, hogy ha van egy konkrét feladatom, akkor mi ennek a komplexitása, egyáltalán hogyan tudom megragadni ezt a számítási komplexitást. A klasszikus digitális komplexitásnak nagyon mély elmélete van. Nemrég két-három világhírű matematikus (L. Blum et. al.) kezdett azzal foglalkozni, hogy ha a probléma alapvetően nem logikai, hanem valósokon értelmezett, tehát például egy nemlineáris egyenletet kell megoldani, akkor nem tudom megragadni ezt a kérdést a bit szintű számítási komplexitással, mert az egésznek a megoldása függ a pontosságtól. Kidolgoztak egy nagyon szép elméletet, amellyel nem a számítástudományra alapozott, hanem a tudományos számításokra vonatkozó komplexitást lehet kezelni. Valós számokon értelmezett iterációs komplexitás ez a „Newton”-gépen. Felvetjük a következő kérdést, nevezetesen azt, hogy egyáltalán miért kell ilyenekkel foglalkoznunk. Nem jó nekünk a számítógépünk? Jó, csak a komplexitás kérdése elméletileg is olyan kérdéseket vet fel, amik a tisztán digitális gépen kezelhetetlenek. Például egy kaotikus jel digitális számítógéppel elvileg nem kiszámítható. Már csak azért sem, mert véges számú állapot van. Ha veszem ezt a véges számú lépést, akkor legalább egy állapot ismétlődik, de onnantól kezdve periodikus lesz az egész. Vannak olyan jelenségek tehát, amelyek digitális számítógéppel elvileg sem modellezhetők. Mi tehát a számítási komplexitás a CNN univerzális gépen, azaz egy *folyamon* értelmezett univer-

zális gépen hogyan vethető fel ez a kérdés? Nagyon érdekes, amit 1951-ben Neumann János írt ezzel kapcsolatban: „Az automataelmélet digitális, minden vagy semmi típusú, a formális logika fejezete, kombinatorikus, nem analitikus... Azonban egy erősen matematikai és különösen analitikai automata- és információelméletre van szükség.” 1990-ben konfliktus alakul ki a tudományos számítás és a számítástudomány között.

Ezek után a kérdések úgy tehetők fel, hogy van három típusú gépem. Az egyik a Turing-gép az egészeken, a másik a Newton-gép a valósokon, és végül a CNN univerzális gép a folyamatokon. Az input/output jelek egészek, valósok, folyamatok. Az utóbbira megadtuk az alapvető problémafelvetés keretét.

Köszönetnyilvánítás

Végül megköszönöm azok – nagyon sokak – segítségét, akik lehetővé tették munkámat. Elsősorban feleségemnek, szüleimnek, családomnak tartozom hálával azért a harmonikus életért, amiben élhetek. Kollégáimnak, közvetlen munkatársaimnak tartozom hálával azért, mert sok munkás évet, tehetségüket áldozták ezért a kutatási irányért.

Sok kiváló kutatót illet még köszönet szerte a világban, különösen Berkeley-ben és Seville-ben. Köszönet illeti néhány gondolkozást formáló tanáromat és kollégámat, különösen Simonyi Károlyt és Csurgay Árpádot. Végül köszönöm munkahelyemnek, az MTA SZTAKI-nak a támogatását, ahol mindent megkaptam, amire szükségem volt.

Köszönöm a jelenlévők érdeklődését.

Irodalom

- Roska, T. and Chua, L. O.: The CNN Universal Machine: An Analogic Array Computer, *IEEE Transactions on Circuits and Systems, II*. Vol. 40, pp. 163–173, March 1993.
- Roska, T. and Hámosi, J. (eds.): Receptive Field ATLAS of the Retinotopic Visual Pathway and some other Sensory Organs using Dynamic Cellular Neural Network Models. *Technical Report*, Budapest (in print: DNS-8-2000).
- Roska, T.: Computer-Sensors: Spatial-Temporal Computers for Analog Array Signals, Dynamically Integrated with Sensors. *Journal of VLSI Signal Processing*, Special Issue: Spatio-temporal Signal Processing with Analogic CNN Visual Microprocessors, Vol. 23. pp. 221–238, Kluwer, 1999.
- Roska, T. and Rodríguez-Vázquez, Á. (eds.): *Toward the visual microprocessor-VLSI Design and the use of Cellular Neural Nonlinear Network (CNN) Universal Machine Computers*. J. Wiley, London, 2001.
- Chua, L. O. and Roska, T.: *Cellular Neural Networks and Visual Computing*. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.