

**Téridőbeli eseményfelismerés és metastabil oszcillációk
vizsgálata CNN hullámszámítógéppel**



PhD. disszertáció tézisei

Koller Miklós

Tudományos vezető:
Dr. Roska Tamás
az MTA rendes tagja

Konzulens:
Cserey György, PhD.

Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológiai és Bionikai Kar

Budapest, 2014

1. Bevezetés, kitűzött feladatok

Hétköznapi élethelyzeteinkben, tájékozódásainkban rengeteg felismerés kötődik tér-időbeli dinamikák azonosításához. Gyakran nem egy-egy jellemző kép vagy látvány az, ami miatt valamit ismerősnek vélünk, hanem egy sajátos mozgás, jellemző mozdulatsor vagy látványsorozat. A tenisz szerelmesei a fonák mozdulatából felismerik kedvenc klasszisukat a pályán, a lovak rajongói az állat testtartásából és ügésének finomságából felismerik kedvenc ménesük egyedét. A tánc is egy olyan tevékenység, aminek fajtája nem feltétlenül állapítható meg pusztán egy vagy több állóképből. Viszont ha a testmozgás teljes lefutását, dinamikáját látjuk, pontosan megállapítható, hogy melyik népi vagy modern tánc mely műfaját, fajtáját láthatjuk.

Jelfeldolgozási feladatoknál időbeli elemzésre egy remek egydimenziós példa a hangfeldolgozás. Akár valamilyen zajnak a kiszűréséről, akár valamilyen frekvencia-tartománynak (magas / mély) elhagyásáról legyen szó. Térbeli (pontosabban szólva „síkbeli”) elemzés esetében a legegyszerűbb klasszikus képfeldolgozási feladatokra gondolhatunk. Adott a kétdimenziós képünk, amin valamilyen tulajdonságot szeretnénk kinyerni: éleket, sarkokat, bizonyos típusú felületet, nagy vagy éppen kis foltokat, vagy bármi egyebet. Ha a tér és időbeli elemzés összekapcsolására gondolunk, akkor a klasszikus videofeldolgozás képkockáról-képkockára történő iterálásához juthatunk. Ezzel a szemlélettel próbál szakítani a Celluláris Neurális Hálózatok (CNN) „képkocka-mentes” feldolgozási filozófiája: nem csak az idő és a jelérték reprezentálódik folytonos (nem diszkrét) mennyiségként, hanem maga a teljes bemeneti folyam feldolgozás is folytonosan zajlik, nem pedig különálló képkockákon egyesével. Habár a képkockák egymásutáni (klasszikus) elemzése is választ ad minden kérdésre, ez sok esetben – a megoldás összetettsége miatt – megfelelően felépített memóriarendszert és kiértékelő/döntéshozó egységet is igényel. Ezzel szemben, ha az időben kifejlődő dinamika egy-egy jellegzetessége (például egy-egy állandósuló mintázat) jelez egy-egy időben lezajló eseményt, akkor semmiféle további kiegészítő-architektúrára nincs szükségünk, a dinamika időbeli fejlődése egymaga biztosítja a felismerést, amely lényegesen „olcsóbb” számítási komplexitásban.

Doktoranduszi kutatómunkám egy részében téridőbeli dinamikák felismerésével foglalkoztam. Arra a kérdésre kerestem a választ, hogy milyen felismerési feladatok és hogyan oldhatóak meg olyan esetekben, amikor a rendszerhez érkező vizuális bemenet összefüggése, folytonossága szolgáltatja azt a többletinformációt, ami megoldhatóvá teszi a feladatot az állóképek pusztán különálló feldolgozásához képest.

Mérnöki feladatoknál nagyon szeretjük a stabil megoldásokat, amelyek az esetleg felmerülő apró környezeti hatások / változások ellenére egyértelműen megőrződnek. Ez lehet akár egy stabil konstans érték, de lehet egy stabilan időben ismétlődő változás, periodikus oszcilláció is. Általában elvárt, hogy ez a kimenet megbízhatóan jelenjen meg, robosztusan ellenállva az apróbb környezeti, mérési zajoknak. Érdekes és különleges esetnek számít az, amikor csak látszólag stabilan jelentkező időben ismétlődő változással (metastabil periodikus oszcilláció) találkozunk. Sokáig hagyományos periodikus oszcillációnak tűnik, aztán egyszerűen hirtelen bezuhan a rendszer egy stabil pontba, konstans értéket vesz fel. Ez gyakran mindenféle előre árulkodó jel nélkül következik be, esetleg csak a változás előtti nagyon rövid időszakban látunk ráutaló jeleket. Az agyi működés során jelentkező bizonyos hullámok mutatnak például ilyen jelenséget, egyes feltételezések szerint az itt jelentkező metastabil periodikus oszcillációk funkcionális szerepet (felismerés, megértés, „ráasszociálás”) töltenek be.

Doktoranduszi kutatómunkám másik részében metastabil periodikus oszcillációk tanulmányozásával foglalkoztam. Bizonyos architektúráis keretek között (egydimenziós, periodikusan körbecsatolt analog CNN processzortömb) vizsgáltam a fellépő jelenséget. Arra a kérdésre kerestem a választ, a rendszer bizonyos paramétereinek mely tartományában milyen típusú oszcillációval találkozhatunk, az oszcilláció hossza (metastabilitásának mértéke) hogyan függ az adott paramétertől, az esetleg fellépő különböző oszcillációk között milyen kapcsolat áll fenn.

2. A vizsgálatok módszerei

Az általam vizsgált problémák mindegyike erősen kapcsolódik a CNN Hullámszámítógép számítási modelljéhez. Eredményeim első lépésben szimulációs úton készültek, de néhány dologot valódi hardveres méréssel is megvizsgáltam, ahol a bemeneti folyamat egy általunk készített infravörös szenzormező szolgáltatta. Ez a szenzortömb 8×8 darab távolságmérő LED- fototranzisztor párt tartalmaz, ahol a szenzorok a fényforrások környezetről / mért objektumról visszaverődött fényét mérik. Minden egyes LED különállóan vezérelhető, valamint a fototranzisztorok is tetszőleges sorrendben olvashatók ki. A szenzormezőhöz tartozik vezérlő és kiolvasó áramkör is, így soros porton keresztül, magas szinten lehet kommunikálni a PC-n futó, szimulátor formájában megvalósított hullámszámítógéppel.

A folytonos bemeneti folyamattal rendelkező, képkocka-nélküli számítási modellben morfológiai- és hullámoperációkat is alkalmaztam. Megvizsgáltam különböző hullámterjesztő template-ek hatását a változó bemenetre. A vizsgálatok során alapvetően egy korábban publikált template osztályra támaszkodtam, illetve abból kiindulva, finomhangolással igyekeztem a megfelelő működést elérni. Ez a template osztály egy kevés nemnulla elemet tartalmazó, előjel antiszimmetrikus, csatolt template, mely a korábbi publikációkban hullámterjesztő tulajdonsága kapcsán és a fellépő állapot-átmenetek révén (stabil egyensúlyi pont – periodikus pálya – kaotikus viselkedés) került a középpontba. A részletesebben kiemelt méréseim esetében megvizsgáltam a rendszer sajátértékeinek viselkedését, a kialakuló jelenség bizonyos paramétereiktől való függését, robosztusságát.

A megvalósítás folyamán ezek a szimulátorok C++ nyelven és MATLAB környezetben is elkészültek. MATLAB környezetben úgy általában könnyebb ilyen kísérleti kiértékelőt implementálni, ugyanakkor bizonyos méréseknél használtam olyan függvénykönyvtárat, ami csak C++ nyelven volt elérhető. A hardveres mérések során a szenzormező vezérlő-mikrokontrollerjét C nyelven programoztam. A dinamikus szinterek valós mérési összeállításait részben egy vezérelhető, 10 mikrométer pontosságú léptetőasztal segítségével készítettem el.

A metastabil periodikus oszcillációk esetében először dinamikus

szimulációkkal vizsgáltam a jelenséget, naívan próbáltam felderíteni a különböző tranziens-jellemzőket és paraméter-érzékenységeket. Dinamikus futtatásokból származó adatokon numerikus kiértékelést végezve előre vetítettem Garay Barna Tanár úr által készített analitikus sajátérték-vizsgálat eredményét, mely utóbbi szigorú matematikai bizonyítása a metastabilitás példánkban való létezésének.

A szimulációk mind C++ nyelven, mind MATLAB környezetben elkészültek. A MATLAB beépített *ode45* megoldója bizonyos esetekben (szimmetrikus kezdetiértékek) nem várt módon stabilizálta a megoldást, ugyanakkor a saját készítésű megoldók (MATLAB: Explicit Euler (EE) módszer; C++: EE, RK45) mind megmutatták a stabil ponthoz való konvergenciát az összes esetben. Bizonyos paraméter-változásokat és a paraméter síkon megjelenő bifurkációkat AUTO bifurkáció-elemző szoftverrel is megvizsgáltam.

Az olaszországi partner-kutatócsoport (Mauro Forti, Luca Pancioni, Mauro Di Marco, Massimo Grazzini) irányítása alatt elkészítettem egy diszkrét komponensekből álló egydimenziós, periodikus határfeltételű CNN tömböt, mely eszközön kísérletesen is megvizsgálhattam metastabil periodikus oszcillációk létezését.

3. Új tudományos eredmények

1. Tézis: *Mélységi tartományban mérő, saját fényforrásokkal rendelkező kétdimenziós szenzormezővel kiegészített CNN Hullámszámítógéppel képkockákon (térben és/vagy időben) átívelő tulajdonság felismerése.*

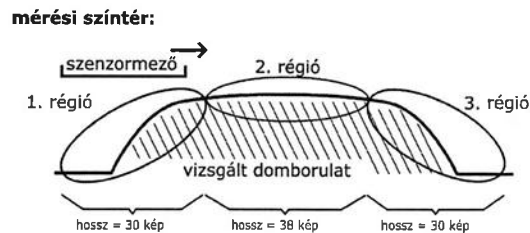
A hagyományos, Celluláris Hullámszámítógéppel megvalósított képrögzítési és feldolgozási módszertől két ponton térünk el a saját mérési / feldolgozási rendszerünkben. Egyrészt a szokásos, *passzív* képrögzítéssel ellentétben a mért objektum képe *aktív* módon áll elő: minden egyes elemi fototranzisztor mellett egy fénykibocsátó LED is található, melyeknek a visszavert fénye mérhető az elemi szenzorokkal. Ez a mérési mód annyiban újszerű, hogy a számító mezőn kifejlődő globális eredmény még a számítás lefutásának folyamatában befolyásolható, módosítható (egy korábbi, inspiráló kézirat [14]). Másrészt magának a feldolgozó számításnak a folyamata folytonos, nem képenként diszkrét. Tehát nem az egyes képeket külön-külön dolgozzuk fel és értelmezzük, hanem egyetlen, folytonos feldolgozási folyamat van, mely a bemenetén időről időre megkapja az aktuális bemeneti képet, a kimenetén pedig egy állandósuló mintával / oszcillációval jelzi a számítás eredményét. Egy másik, folytonos feldolgozási módú példa közleménye [15], egy analóg példa pedig [16].

Az említett két mérési / feldolgozási sajátosságból mindkét elvet felhasználtuk már konkrét detekciós feladat megoldására, de a jelen disszertáció csak a folytonos feldolgozáshoz kapcsolódó eredményeket ismerteti. Úgy hisszük, hogy ezeknek a számítási megközelítéseknek kulcsszerepe lehet az időkritikus objektum- és eseményfelismerési feladatokban.

Kapcsolódó publikációk: [3], [9], [10], [13].

1.1. Megmutattam, hogy egy adott, kevés nem-nulla elemet tartalmazó, csatolt template osztály mellett, a mélységi tartományban mérő, saját fényforrásokkal rendelkező kétdimenziós szenzormezővel kiegészített CNN Hullámszámítógép bemenetén alkalmazott folytonos képfolyam a hagyományos, képkockákon értelmezett feldolgo-

zással ellentétben lehetővé teszi, hogy a számító mezőn kialakuló dinamika egyértelműen azonosítson (képkockákon térben és/vagy időben átívelő) objektum- vagy szintértulajdonságokat. Eljárást adtam adott, nagy méretű objektum domborúságának detektálására, amelynek alkalmazhatóságát mérésekkel is igazoltam.



1. ábra. Mérési összeállítás a folytonos feldolgozási üzemmód példájában: a szenzormező balról jobbra halad el a felszíni domborulat felett, melynek három fő régiója van: emelkedő, felső plató, lejtő.

A folytonos feldolgozási üzemmóddal olyan tulajdonságot tudtam detektálni, melyet a képkockák egyenkénti feldolgozásával csak lényegesen körülményesebben azonosíthattam volna. A szenzormező méreténél nagyjából három és félszer nagyobb domborulat (felszíni mintázat) felett haladt el a szenzormező, a talajjal párhuzamos síkban (mérési összeállításért lásd az 1. ábrát), a szenzormező aktivációs fényforrásai végig világítottak. A domborulat három fő régiójában (felfutás, felső plató, lefutás) három különböző kimeneti minta vált uralkodóvá, amik az adott régió feldolgozásának végéig meg is őrződtek. Ha képkockánként dolgozzuk fel a bemeneti folyamatot (tehát nem egy hosszú számítás van, hanem sok rövid önálló), akkor az egyes régiókban több különböző kimeneti stabil minta vagy oszcilláció is meg tudott jelenni. Ez azt jelenti, hogy egyetlen / néhány különálló kép alapján nem lehet egyértelműen eldönteni, hogy a domborulat mely régiója felett van a

szenzormező. Ugyan lehetőségünk lenne sok bemeneti képből készített statisztika alapján megmondani, hogy mely régió felett volt a szenzormező, de ez külön memóriát és utólagos kiértékelő rutint igényelne. A folytonos feldolgozás esetében ugyanakkor magának a dinamikának a kifejlődése és állapota reprezentálja a megoldást, tehát lényegesen kevesebb számítást igényel, egyszerűbb. A végrehajtó architektúra futtatja, „magába foglalja” ezt a dinamikát. Amennyiben a számítás belső állapota kívülről könnyen leolvasható-lekérdézhető, akkor mindenféle plusz architektúrális egység nélkül a számítás eredménye – a végrehajtás alatt folyamatosan rendelkezésre állva – megtehető.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ s & p & q \\ 0 & r & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, z = z \quad (1)$$

$$s = 1.1, p = 1.0, q = -1.1, r = -0.7, b = 1.0, z = 0.0 \quad (2)$$

A számító mezőn az (1) formula szerinti template-családba tartozó program futott, a (2) formula szerinti paraméterértékekkel. A szakirodalomban elterjedt template-ek általában több nullától különböző értékkel tartalmazzanak, ennek a template-nek a kitöltöttsége ritkásnak számít. A számító mező zero-flux határfeltétellel volt ellátva, a kezdeti érték a legelső képkocka volt. Ez a template Petrás István doktori dolgozatából [17] vált ismerté, de ott a Szerző csak különálló képeket dolgozott fel. Feltérképezte a template-paraméterter egy részét a különböző kimeneti állapotok (stabil egyensúlyi pont, stabil oszcilláció, kaotikus viselkedés) szempontjából, mely eredményeket én a kiindulási vizsgálatok és paraméter hangolások során felhasználtam.

A jelenség segítségével megvalósított detekció teljesítményének lemerése igen nehézkes, nincsen kész célarchitektúra, amin valós időben lehetne futtatni a számítást. Ugyanakkor gondolva a járulékos modulok (pl. kiolvasó, memória) szükségletességére, valószínűleg a végrehajtási idő és energiafelhasználás szempontjából is hatékonyabbnak bizonyulna ez a megoldás más, általánosabban felépített rendszerekhez képest.

2. Tézis: *Mélyégi tartományban mérő, saját fényforrásokkal rendelkező kétdimenziós szenzorrel kiegészített CNN Hullámszámítógéppel a mélyégi mérési dinamikartomány adaptálása, állandó nagyságú változó irányú sebességgel mozgó objektumok detektálása, valamint billenő-típusú mozgás detektálása.*

Kapcsolódó publikációk: [1], [4], [5], [7], [11].

2.1. Lokális és adaptív algoritmust adtam mélyégi irányban a mérés dinamikartományának hangolására egy olyan összeállítás esetében, ahol egy mélyégi tartományban mérő, saját aktivációs fényforrásokkal rendelkező kétdimenziós szenzorrel kapcsolódik egy CNN Hullámszámítógéphez.

A manapság elterjedt képi szenzorok a nagy fény- dinamikartományú színtereket csak részlegesen tudják rögzíteni. Ennek oka, hogy a bejövő fény mennyiséggel és a rögzített fény mennyiség érték lineáris arányban van. Így legfeljebb 2–3 nagyságrend fedhető le a rögzítés és utólagos megjelenítés korlátossága miatt. Vannak egyedi megoldások, ahol vagy a szenzor érzékenysége logaritmikus, vagy valamilyen adaptív (lehetőleg lokálisan adaptív) fény mennyiség-rögzítés történik, így elérve, hogy a nagy fény-dinamikájú kép egyetlen része se kerüljön telítődésbe. Celluláris Hullámszámítógép architektúrára is létezik már lokálisan adaptív megoldás Wagner Róbert doktori dolgozatában, amely alapvetően a fényérzékelő chip egyes celláinak (képpontjainak) lokálisan adaptív integrálási idő beállításán alapszik.

Az én megoldásom az architektúra különbözősége és a mérési modalitás szempontjából jelent újtonságot. A mélyégi tartományban mérő szenzorrel cellánkénti aktivációs fénynek erősségével operáló egy képenkénti iterációs algoritmusban, nem pedig a fényérzékelő cellák integrálási idejét adaptálom. A megoldásom előnye (CNN-UM architektúrális keretek között gondolkodva), hogy a fényviszonyok adaptív beállításához csak a cellák logikai műveletvégző egységére van szükségem, így az analóg műveletvégző egységnek csak a „fő” feladatként futó CNN-algoritmus végrehajtásával kell foglalkoznia. Mivel a valódi szenzorunk csak bináris megvilágítási módokat támogat (ki-

kapcsolt / bekapcsolt fényforrás), így ez az algoritmus csak szimulációs úton lett implementálva.

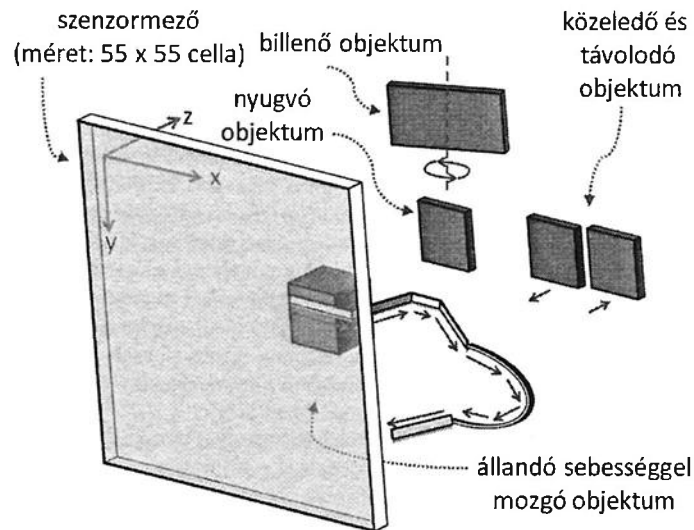
2.2. CNN-algoritmusokat adtam állandó nagysággal, de változó irányban mozgó objektum detektálására, valamint billenő-típusú mozgást végző objektum detektálására egy olyan összeállítás esetében, ahol egy mélyégi tartományban mérő, saját aktivációs fényforrásokkal rendelkező kétdimenziós szenzorrel kapcsolódik egy CNN Hullámszámítógéphez.

Mozgást detektáló, illetve adott irányban adott sebességgel mozgó objektumokat detektáló algoritmusok már ismertek a szakirodalomban. A működésük alapja lényegében a bemeneti képfolyam két egymást valamilyen időeltéréssel követő képe közötti különbségképzés.

A kiindulási rendszer egyedisége miatt (mélyégi mérés) lehetőségünk van arra, hogy egy mozgó objektum mélyégi elmozdulását (közeledés-távolodás) is nyomonkövessük. Az első algoritmus esetében (állandó nagysággal, de változó irányban mozgó objektum detektálása) a síkbeli (x - y irány) és mélyégi (z irány) komponenseket előbb külön-külön meghatározva lehetőségünk van a mozgásvektor eredőjének a kiszámítására is, ezáltal végezve a detektálást.

A második algoritmus a billenő típusú mozgásokat detektálja, amikor egy felület egy tengely mentén forduló / pördülő mozgást végez. A tengelynek a megfigyelt síkba kell esnie (ez a szenzorrel a síkjával párhuzamos sík). Az algoritmus a bemeneti képfolyam két egymást valamilyen időeltéréssel követő képe közötti különbségképzéssel kezdődik. Ezen a különbségképen futtatunk egy módosított élkereső eljárást, ami csak ott eredményez nagyobb, egybefüggő foltot, ahol a tengely körüli elfordulás következtében a szomszédos sorok / oszlopok rendre eltérő intenzitással vannak észlelve.

A 2. ábrán egy összetett szimulációs szintér látható, különböző mozgásokat végző objektumokkal. Ezen a szintéren futtattam a komplex mozgásokat detektáló algoritmusokat, ellenpéldákkal is vizsgálva a specifikusságot.



2. ábra. Szimulációs színtér a 2.2. altézishez kapcsolódóan. A színtéren álló objektumon kívül helyet kapott még egy billenő mozgást végző objektum, egy közeledő-távolodó objektumpár és egy térbeli trajektórián állandó sebességgel mozgó objektum is.

3. Tézis: *Hosszú lefutású, metastabil periodikus oszcilláció szimulációs és áramkörti vizsgálata.*

A szűk szakirodalomban más rendszerekben, de minőségileg hasonló jelenséget ismerhetünk meg [18] és [19] közleményekben.

Az általunk megfigyelt jelenség egy egy-dimenziós, periodikus határfeltételű, bemenet nélküli (autonóm) CNN tömbben jelenik meg. A cellák hagyományos elsőrendű cellák, a szomszédsági kapcsolatot megvalósító template formája a (3) képletsor szerint van. A cellák kimeneti függvénye a szakirodalomban jól ismert szakaszonként lineáris aktivációs-függvény (4).

$$A = [\alpha \ 0 \ \beta], \alpha > 0, \beta > 0, \quad B = [0 \ 0 \ 0], \quad z = 0 \quad (3)$$

$$y = f_{pul}(x) = \frac{1}{2}(|x+1| - |x-1|) \quad (4)$$

A [20] szakirodalom szerint egy „végérvényesen erősen monoton szemidinamikai rendszer” (eventually strongly monotone semiflow – ESM) mindig egyensúlyi ponthoz konvergál, a kezdeti értékek egy nulla mértékű halmazát leszámítva. Habár az általunk felírt rendszer a kimeneti függvény szaturációs régióinak préselő hatása miatt ([21]) csak egy monoton szemidinamikai rendszer (nem ESM), mégis, érvényes rá az ESM-rendszerek „határhalmaz dichotómiája” (limit set dichotomy) és legtöbb konvergencia-tulajdonsága ([22][23][24][25]), ily módon átmentődnek erre az esetre is az ESM-rendszerek esetében megismert „jó” tulajdonságok. Ez azt jelenti, hogy aszimptotikusan stabil egyensúlyi ponthoz kell konvergálnia a rendszernek.

Ezzel szemben mind szimulációs úton, mind áramkörti mérés keretein belül is meglepően hosszú (akár több száz periódusnyi) oszcillációkat figyelhetünk meg az (α, β) csatolási paraméterek egy széles halmaza mellett. Ezek a periodikus oszcillációk ugyanakkor nem stabilak, metastabil voltak a periodikus pályák Floquet sajátértékeinek kiszámolásával igazolom.

Kapcsolódó publikációk: [2], [3], [6], [8], [12].

3.1. Numerikus úton igazoltam a hosszú tranzienszi metastabil periodikus oszcillációk létezését egy egydimenzi-

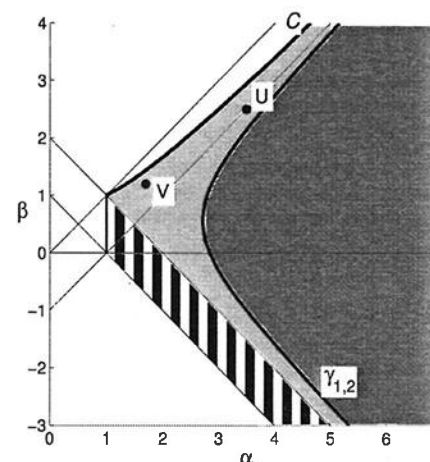
ós, periodikus határfeltétellel rendelkező (gyűrű topológiájú), csatolt, de bemenet nélküli (autonóm) template osztállyal programozott CNN Hullámszámítógép dinamikájában. Sajátérték-számítás segítségével meghatároztam azt a legerősebb metastabilitással rendelkező paramétertartományt, amelyben nagyobb tűrésű értékű alkatrészekből felépített áramkör esetén is biztosan reprodukálható a jelenség.

A Poincaré követőfüggvény alapján határoztam meg az erős metastabilitást mutató periodikus oszcillációk esetében a Floquet sajátértékeket és sajátvektorokat.

1. táblázat. A domináns Floquet multiplikatör exponenciális konvergenciája a tömb cellaszámának növekedésével. A csatolási paraméterek értéke $\alpha = 3.5$, $\beta = 2.5$ volt, a kezdeti feltétel $N/2$ darab egymást követő $\{+1\}$, majd $N/2$ darab egymást követő $\{-1\}$ (ahol N páros szám). Az egynél alig nagyobb sajátérték jelentősége abban áll, hogy a periodikus oszcilláció $1/(\lambda_1 - 1)$ nagyságrendű ideig érdeemben nem változik.

N	λ_1
6	2.5883
8	1.0985
10	1.00917
12	1.00089
14	1.00014
16	1.000097
18	1.000044

Rögzített csatolási paraméterek mellett, a tömb méretének növeledésével exponenciális rendben erősödik a periodikus pálya (Floquet-értelemben vett) metastabilitásának hatása, ahogy az 1. táblázat is mutatja. Mind a valódi metastabilitást, mind a cellaszám függvényében megfigyelhető aszimptotikus metastabilitás-erősödést Garay Bara tanár úr analitikusan bizonyította.

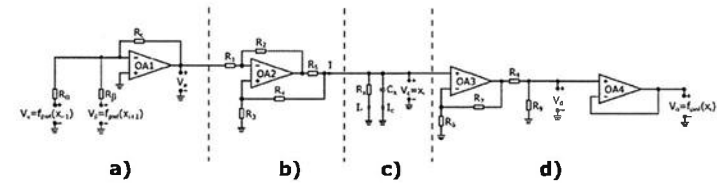


3. ábra. A metastabil periodikus forgóhullámok előfordulása a visszacsatoló A template α, β paramétereinek síkján ($\alpha \geq 1, -\alpha + 1 \leq \beta \leq \alpha$ tartományban értelmezve), ahol a szürke különböző árnyalatai valamint a csíkozott régió különböző típusú metastabil periodikus forgóhullámokra utalnak. A fehér régióban nincsen metastabil periodikus oszcilláció.

A 3. ábrán látható az α és β mint A template-beli csatolóparaméterek szerinti sík, ahol bizonyos negatív β csatolási értékek ($|\beta| \leq \alpha$) is értelmezve vannak már, ezzel a szerző tudomása szerint kiterjesztette a szürk szakirodalomban eddig vizsgált együttműködő (cooperative) viselkedési régiót. A szürke különböző árnyalatai esetében a cellákon kialakuló hullámok különböző módon kapcsolódnak egymáshoz, ezek határa $\gamma_{1,2}$ (a görbe pontos helye függ a cellaszámtól (N), annak függvényében exponenciálisan tart az ábrán elhelyezett határ-görbéhez). A csúszott régió belül a metastabil oszcilláció cellánkénti hullámainak viszonya további átalakuláson megy keresztül, a $\beta = -\alpha + 1$ egyeneshez közeledve (a pontos határok ismertek, az ábra csak szemléltető célú). A C görbe mentén teljesen lelassul az oszcilláció, a görbén heteroklinikus bifurkáció útján hal meg. A paramétersík $U = (3.5; 2.5)$ és $V = (1.7; 1.2)$ pontjaiban készült áramkörti mérés is a jelenségről (lásd 3.2. altézis), amely pontok környezetében leginkább tetten érhető elektromos mérés útján a metastabilitás.

3.2. Megépítettem egy diszkrét komponensekből álló, paradigmikus kísérleti áramkört, mely alkalmas egy egydimenziós CNN Hullámszámítógép működését megvalósítani. A cellák között kapcsolatokat létesítve elkészítettem a hosszúttranzienstű metastabil periodikus oszcillációk rekonstruálására alkalmas elektronikai implementációt, így elektromos közegben is kimértem a jelenséget, kísérletesen is igazolva annak robusztusságát.

Az elkészült áramkör ellenállásokból, műveleti erősítőkből és kapacitásokból épül fel, a kapcsolás eredeti formája [26] függelékében jelent meg. Egy cella felépítése a 4. ábrán látható. Összesen 16 darab ilyen cella készült el egy próbapanelen, így a be- és kimeneti terminálisok összekapcsolásával megvizsgáltuk több különböző gyűrűméret esetén is a jelenséget. A kezdeti állapotokat minden cellának a V_C pontjára kötött kapcsoló-áramkörrel állítottam be, a kapcsoló áramköröket egy függvénygenerátor vezérelte egységesen. A megjelenő oszcillációt az elsőnek sorszámozott cella V_C (belső állapot) és V_O (kimeneti terminális) pontján mértem.



4. ábra. A diszkrét komponensekből felépített CNN cella kapcsolási rajza. Egy cellát működése szempontjából négy alegységre bonthatunk, ezek: negatív összegző (a), feszültségvezérelt áramgenerátor (b), belső állapot (c), valamint a szakaszonként lineáris kimeneti függvény megvalósítása (d) egy stabilizáló egységnyi követővel.

4. Eredmények alkalmazási területei

Az első és a második téziscsoport (fényaktivációval segített objektum- és eseményfelismerés, komplex mozgások detektálása) által vizsgált terület nagyon gazdag alkalmazási lehetőségekben. A mobil robotika területén számtalan még megoldatlan, vagy csak részben megoldott probléma van, ahol egy általánosnál (klasszikus képfeldolgozás) hatékonyabbnak tekinthető megoldás előrehaladást jelentene. Erre egy jó példa a jelenlegi DARPA verseny keretei között kiírt feladatsor. Az egyenetlen (tagolt, göröngyös) talajfelszínen járás esetén, ha a talp lehelyezése előtt közvetlenül meg tudnánk mondani a talajfelszín néhány kritikus tulajdonságát (vagy néhány létező talajfelszín-típusból választanánk), az nagyban növelhetné a lábakon álló robot test stabilitását. Az ipari környezetben található létra megmászása esetén is, egy talpra szerelt szenzormező közvetlenül a talp lépcsőfokra lépése előtt meghatározhatná annak pontos kialakítását (felszín, dőlésszög, pontos pozíció), így elősegítve az eltervezett mozgás-koordináció megbízható kivitelezését.

Végeztem olyan szimulációkat és valódi méréseket is, amikor a talp aljára felszerelendő szenzormező nem várt módon egy kiálló objektumot, vagy túlságosan meredek talajfelszínt, esetleg egy másik mozgó objektumot azonosít. Ezekben az esetekben a központi mozgásirányító egység számára küldött „STOP” üzenettel jeleztem a perifériás egység mozgásának blokkolása iránti igényt. Készítettem továbbá olyan szimulációs környezetet is, amiben egy autonóm mobil robot próbál meg más mozgó objektumokat is tartalmazó színtéren eljutni egy előre kijelölt pontba. A robotunk az elejére felszerelt infravörös távolságmérő szenzormező mérései alapján próbálja meg adaptívan kikerülni a más / nem várt mozgó objektumokat, ily módon ütközésmentesen eljutni a kívánt célpontba.

A harmadik téziscsoport (metastabil periodikus oszcilláció) esetében az oszcilláció jelenségének részletes elemzésén túl leginkább (a biológiai motiváció révén – például [27], [28], [29]) információ reprezentálásra és feldolgozásra számíthatunk a közeljövőben. Különböző hullámformájú / frekvenciájú metastabil oszcillációk sorozata azonosíthat egy-egy (kvázi-)periodikus jelenség sorozatot; vagy egy-egy metasta-

bil oszcilláció kódolhat egy-egy emléknymot a megfelelő architektúrájú memóriában: ezek mind olyan példák, melyek a biológiában megfigyelt vagy feltételezett információ feldolgozást és reprezentálást próbálják követni.

Végeztem olyan szimulációs kísérleteket is, ahol a 3. Tézisben ismertetett számítási architektúrától csak egy kicsit eltérő CNN gyűrűn fellépő metastabil oszcillációt különböző mintájú és sebességű periodikus oszcillációk / jelsorozatok azonosítására használtam: amikor a kívánt jelsorozatot kapta a rendszer a bemenetén, akkor a metastabil oszcilláció stabilizálódott, egyéb esetekben viszont vagy elromlott a hullámképe, vagy stabil egyensúlyi pontba tért a belső dinamikája.

5. Köszönetnyilvánítás

Van mit megköszönnöm. Nem tudtam volna megvalósítani a tanulmányaimat az évek során kapott rengeteg bátorítás és segítség nélkül.

Mindenekelőtt szeretnék köszönetet mondani *Roska Tamás professzor úrnak*, aki útmutatásával és támogatásával segített tanulmányaim során, aki őszinte lelkesedésével új erőt adott a kísérleti áramkör megépítése hallatán. Hálás vagyok azért, hogy az elmélyült munka szükségszerűségét hangsúlyozta, és az idő számolatlan odaszánására buzdított kutatásainkkal kapcsolatban.

Köszönöm a Karnak és a Doktori Iskolának, hogy az elmélyült kutatásra alkalmas közeget és a kutatáshoz szükséges eszközöket a rendelkezésemre bocsátották, különösen személyesen *Nyékyné Gaizler Judit prodékán asszonynak* és *Szolgay Péter dékán úrnak*.

A Kar adminisztrátori és pénzügyi ügyintézői mindig segítőkészen és rugalmasan foglalkoztak a problémáimmal egyetemi tanulmányaim során. Igazán hálás vagyok *Haraszi Istvánnének*, *Mikesyné Jutikának*, *Mihálffy Andreának*, *Vida Tivadarnének*, *Szalay Mariannak*, *Adorján Líviának*, *Babiczné Rácz Máriának*, *Bayerné Zenthe Orsolyának*, *Aliné Csereháti Erikának*, *Sifter Viktóriának*, és a többi tanulmányi és gazdasági munkatársnak, akiknek mindig segítőkész munkája nélkül nem ment volna ilyen gördülékenyen tanulmányaim lebonyolítása.

Az első nyári robotika szakkör óta támogat témavezetőm, *Cserey György tanár úr* pártfogásával. Köszönöm, hogy bevezetett a tudományos kutatás világába, és mindig ennyire bízott a munkámban, lelkesített a kilátástalanabb helyzetekben. Az egyetemi diplomám elkészülte alatt *Tar Ákossal* voltak témavezetőim, a közösen tervezett és épített infraszenzor mező azóta már az első osztályt is kijárta. Hálás vagyok Ákos a közvetlen tervezési segítségért, forrasztásért és kódbuggolásért, amik megadták a kezdeti lendületet az egyetemi évek alatt. Doktori munkámnak egy jelentős részét képezi a metastabil oszcillációk vizsgálata, melyet itthon *Garay Barna tanár úr* felügyelt közvetlenül. Köszönöm, hogy kórboncnok lehettem ennél a roppant izgalmas elemi dinamikánál; hálás vagyok minden, tágabb-értelmű tapasztalat és világnézet megosztásáért is. Boldog leszek, ha életem alkonyán a kreatív minoritás tagjának érezhetem majd magam.

Harmadéves koromban négy hónapot a Sienai Egyetem áramkör-elméleti kutatócsoportjával tölthettem, ahol a metastabil oszcillációkat mérő áramkör is készült, valamint elmélyedhettem az egyensúlyipont számolás rejtelseiben. Hálásan gondolok a *Mauro Forti professzor úrral*, *Mauro Di Marco*, *Massimo Grazzini* és *Luca Pancioni adjunktus urakkal* eltöltött időre, és a tőlük kapott szakmai segítségre.

Szeretnék köszönetet mondani doktorandusz társaimnak és a Robotika Labor tagjainak minden segítségért. A szakmai és nem szakmai beszélgetések egyszerre tették átgondoltabbá és önfeledtebbé számomra ezen időszakot. Köszönöm Nektek, *Bihary Dóra*, *Borbély Bence*, *Földi Sándor*, *Fülöp Tamás*, *Füredi László*, *Gelencsér András*, *Gelencsér Zsolt*, *Gergelyi Domonkos*, *Hiba Antal*, *Horváth András*, *Horváth Anna*, *Jákli Balázs*, *Jani Mátyás*, *Józsa Csaba*, *Juhász Imre*, *Laki András*, *Laki László*, *László Endre*, *Ligeti Balázs*, *Nemes Csaba*, *Pilissy Tamás*, *Radványi Mihály*, *Rák Ádám*, *Reguly István*, *Rudan János*, *Sárkány Norbert*, *Siklósi Borbála*, *Stubendek Attila*, *Tisza Dávid*, *Tornai Gábor*, *Tornai Kálmán*, *Tuza Zoltán*, *Veres József*, *Zsedrovits Tamás*.

Mély hálával gondolok a kari keresztény közösségben megtapasztalt elfogadásra, a sok közös élményre és hitbeli gyarapodásra. Külön gondolok *Török Daniellára* és *Nyékly Kálmán atyára*, akiknek fáradhatatlan munkájával ez az egész elkezdődött.

Hegedűsné Láng Andrea osztályfőnököm középiskolai matematika és fizika óráin sokat tanulhattam, vitathatatlan ezek szerepe az egyetemre való felkészülésemben.

Hálásan köszönöm *Cserey Zsófia* segítségét a szöveg angol változatának türelmes javításáért.

És végül de leginkább szerető szüleimnek és feleségemnek vagyok nagyon hálás, hogy mindig mellettem álltak. Minden lehetőséget és támogatást megkaptam, hogy megvalósíthassam álmaimat, köszönöm a minden tekintetben nagy szabadságot, és a túláradó szeretetet, amivel elkísértetek *Apa*, *Anyá*, és drága *Csenge*.

6. Publikációs lista

6.1. A szerző folyóiratbeli publikációi

- [1] M. Koller and Gy. Cserey, "Spatial-temporal active wave computing using infrared proximity array," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 40, no. 12, pp. 1209–1218, 2012.
- [2] M. Forti, B. Garay, M. Koller, and L. Pancioni, "Long transient oscillations in a class of cooperative cellular neural networks," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2014.
- [3] A. Horváth, M. Koller, A. Stubendek, and T. Roska, "Spatial-temporal event detection via frameless cellular wave computing – a review," *Nonlinear Theory and Its Applications*, 2014. accepted.

6.2. A szerző nemzetközi konferencia publikációi

- [4] A. Tar, M. Koller, and Gy. Cserey, "3D geometry reconstruction using large infrared proximity array for robotic application," in *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2009*, (Malaga, Spain), 2009.
- [5] M. Koller and Gy. Cserey, "CNN computational abilities of large infrared proximity arrays," in *Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2010*, (Berkeley, CA), 2010.
- [6] M. Forti, B. Garay, M. Koller, and L. Pancioni, "An experimental study on long transient oscillations in cooperative CNN rings," in *Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2012*, (Torino, Italy), 2012.

- [7] M. Koller, "3D spatio-temporal movement detection with adaptively tuned 2D active sensorarray," in *Proceedings of the IRUN Winter School on Nonlinear Dynamics in Cellular Wave Computing*, (Budapest, Hungary), 2013.
- [8] M. D. Marco, M. Forti, B. Garay, M. Koller, and L. Pancioni, "Multiple metastable rotating waves and long transients in cooperative CNN rings," in *Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD 2013*, (Dresden, Germany), 2013.
- [9] M. Koller, A. Horváth, and T. Roska, "Frameless computing for spatial-temporal events," in *Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD 2013*, (Dresden, Germany), 2013.
- [10] M. Koller and T. Roska, "Activation light pattern helps detection," in *Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2014*, (Notre Dame, IN), 2014.
- [11] M. Koller and Gy. Cserey, "Uncertain ground detection by CNN based infrared proximity arrays," in *Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2014*, (Notre Dame, IN), 2014.

6.3. A szerző egyéb publikációi

- [12] M. Forti, B. Garay, M. Koller, and L. Pancioni, "Floquet multipliers of a metastable rotating wave," Tech. Rep. 2013-2, Department of Information Engineering and Mathematical Sciences, University of Siena, 2013.
- [13] M. Koller and T. Roska, "Frameless spatial-temporal event detection via lighting activation," Tech. Rep. JLR – 4 / 2013, The

Jedlik Laboratories, Faculty of Information Technology and Bionics, Pázmány Péter Catholic University, 2013.

6.4. A disszertáció témaköréhez szorosan kapcsolódó publikációk jegyzéke

- [14] T. Roska and Á. Zarándy, "Proactive, adaptive, cellular sensory-computer architecture via extending the CNN univesal machine," in *Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD 2003*, (Krakow, Poland), 2003.
- [15] A. Horváth and T. Roska, "Frameless spatial-temporal event detection via delay-templates," Tech. Rep. JLR – 2 / 2013, The Jedlik Laboratories, Faculty of Information Technology and Bionics, Pázmány Péter Catholic University, 2013.
- [16] B. Molnár and M. Ercsey-Ravasz, "Asymmetric continuous-time neural networks without local traps for solving constraint satisfaction problems," *PLoS ONE*, vol. 8, 2013.
- [17] I. Petrás, *Spatio-temporal patterns and active wave computing*. PhD thesis, Interdisciplinary Doctoral School, FITB, Pázmány Péter Catholic University, Budapest, Hungary, 2005.
- [18] Y. Horikawa and H. Kitajima, "Duration of transient oscillations in ring networks of unidirectionally coupled neurons," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 238, no. 2, pp. 216 – 225, 2009.
- [19] Y. Horikawa, "Metastable dynamical patterns and their stabilization in arrays of bidirectionally coupled sigmoidal neurons," *Physical Review E*, vol. 88, no. 6, p. 062902, 2013.
- [20] M. Hirsch and H. Smith, "Monotone dynamical systems," in *Handbook of Differential Equations, Ordinary Differential Equations (second volume)* (A. Canada, P. Drabek, and A. Fonda, eds.), Elsevier, 2005. available at: <http://math.la.asu.edu/halsmith/book.html>.
- [21] M. D. Marco, M. Forti, M. Grazzini, and L. Pancioni, "The dichotomy of omega-limit sets fails for cooperative standard CNNs," in *Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, CNNA 2010*, (Berkeley, CA), 2010.
- [22] M. D. Marco, M. Forti, M. Grazzini, and L. Pancioni, "Limit set dichotomy and convergence of semiflows defined by cooperative standard CNNs," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 20, no. 11, pp. 3549–3563, 2010.
- [23] M. D. Marco, M. Forti, M. Grazzini, and L. Pancioni, "Limit set dichotomy and convergence of cooperative piecewise linear neural networks," *IEEE Transaction on Circuits and Systems I*, vol. 58, no. 5, pp. 1052–1062, 2011.
- [24] M. D. Marco, M. Forti, M. Grazzini, and L. Pancioni, "Convergence of a class of cooperative standard Cellular Neural Network arrays," *IEEE Transaction on Circuits and Systems I*, vol. 59, no. 4, pp. 772–783, 2012.
- [25] M. D. Marco, M. Forti, M. Grazzini, and L. Pancioni, "Further results on convergence of cooperative standard Cellular Neural Networks," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2011*, (Rio de Janeiro), 2011.
- [26] L. O. Chua and L. Yang, "Cellular Neural Networks: Theory and applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 35, no. 10, pp. 1257–1290, 1988.
- [27] J. S. Kelso, "Multistability and metastability: understanding dynamic coordination in the brain," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 367, no. 1591, pp. 906–918, 2012.

- [28] G. Werner, "Metastability, criticality and phase transitions in brain and its models," *Biosystems*, vol. 90, no. 2, pp. 496–508, 2007.
- [29] B. Deng, "Metastability and plasticity in a conceptual model of neurons," *Journal of Integrative Neuroscience*, vol. 9, no. 1, pp. 31–47, 2010.