



QoS alapú kommunikáció hálózatmenedzselési algoritmusai

című Ph.D. értekezés tézisei

Fancsali Alpár

Témavezető: Dr. Levendovszky János egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Híradástechnikai Tanszék

2005

1. Az értekezés tárgya

A modern csomagkapcsolt hálózatok elterjedésével egyre nagyobb figyelmet fordítanak a megnövekedett adatmennyiségek biztonságos és elfogadható minőségű továbbítására [14, 15, 16, 17]. Az értekezés olyan hálózatmenedzselési eljárásokat közöl, amelyekkel előírt minőségi (Quality of Service - QoS) paramétereken nyugvó információátvitel valósítható meg, egyúttal a csomagkapcsolás által nyújtott jó hálózati kihasználtság is garantálható. A minőségbiztosítás érdekében a dolgozat kétféle forgalomszabályozási módszert tárgyal:

1. a QoS paramétereket figyelembe vevő útvonalkeresést (*QoS routing* [27]), ahol az a feladat, hogy a QoS előírásokat legnagyobb valószínűséggel teljesítő útvonalat határozzuk meg (tekintettel arra, hogy csak hiányos ismeretek állnak rendelkezésünkre a linkek tulajdonságairól);
2. a hívásengedélyezést (*Call Admission Control - CAC* [19]), amelynek az a célja, hogy a hálózatba kerülő forgalom mennyisége kézben tartható legyen: azokat a hívásigényeket, amelyek a hálózatban torlódást okoznak, vissza kell utasítani.

A fenti eredmények segítségével a következő praktikus előnyökhöz jutunk:

- Az útvonalkeresés hatékonyabbá tételével el lehet érni, hogy a gerinchálózatokhoz kapcsolódó ún. elérési hálózatok számára nagyobb sáv szélesség legyen biztosítva (ugyanis nagyobb forgalmat lesz képes elvezetni a hálózat)[18].
- Ha olyan hívásengedélyezést használunk, amely a lehető legjobban figyelembe veszi a felhasználók statisztikus tulajdonságait, akkor az elérési hálózatok több felhasználót szolgálhatnak ki biztonságosan. Ez alapvető cél, hiszen minél több felhasználó kommunikál a hálózatban, annál nagyobb a szolgáltató bevétele.

A dolgozat látszólag két elkülönülő témát ölel fel. Mégis mind a cél, mind az algoritmikus apparátus szempontjából szorosan összekapcsolódnak, hiszen a kettő együtt képes biztosítani a QoS alapú kommunikációt. Pontosabban a hívásengedélyezés korlátozza a hálózatba menő forgalmat; illetve a hatékony útvonalválasztással az érhető el, hogy a beengedett forgalom a lehető legbiztosabban eljusson a célba.

Algoritmikus szempontból pedig azért hasonló a két feladat, mert a hívásengedélyezésnél az egyes felhasználók által generált összeforgalom farokeloszlását kell vizsgálni, míg az útvonalkeresésnél az egyes utakat felépítő linkek összkésleltetésének farokeloszlását.

A fenti hasonlóságokon túl az értekezés 4. fejezete rámutat arra, hogy az algoritmusok megvalósítási platformjukban is összeegyeztethetőek, minthogy mindkét feladatnál lehetőség nyílik analóg számítógépes realizációra.

2. A kutatás célkitűzései

Az említett forgalomszabályozási mechanizmusok akkor lehetnek hatékonyak, ha egyfelől képesek alkalmazkodni az időben változó forgalomhoz, másfelől valós időben képesek együttműködni a hálózattal. Minél összetettebb algoritmusok kerülnek felhasználásra, annál pontosabb forgalomszabályozásra nyílik lehetőség. Ugyanakkor a valós idejű működési kényszer miatt finom egyensúlyt kell tartani az algoritmikus bonyolultság és a pontosság között. A kutatás ebből a szempontból közelítette meg a problémákat, és az értekezésben bemutatott eredmények is ezt az igényt elégítik ki.

Napjainkban egyre többet lehet hallani az analóg számítógépekről (celluláris neurális hálózatok - CNN [78, 79, 80]), amelyek rendkívül gyors jelfeldolgozási eszközök. Mivel eddig csak a képfeldolgozásban használták hatékonyan, a dolgot megvizsgálta, milyen lehetőségei vannak a távközlésben való alkalmazásuknak. Mivel az igazán hatékony hálózati algoritmusok nagy számításigényűek, ugyanakkor a valós idejű működés miatt nagyon gyorsan kell futtatni őket, a modern hírközlésben áttörést jelenthet a CNN-ek alkalmazása.

3. A témakörök előzményei

QoS útvonalkeresés hiányos információk alapján

A *Bevezetés* utáni 2. fejezet a hiányos információk melletti QoS útvonalkeresés problémakörét vázolja fel. A jelenlegi IP hálózatok útvonalválasztása nagyon gyakran az OSPF [25] (ill. ATM esetén PNNI [21, 26]) protokoll szerint történik. Ebben a linkekhez rendelt költségeket a hálózatfelügyelő adminisztrátor állítja be (általában a hálózat működésének megfigyelése alapján). Mivel a forgalom gyakran változik, ez a módszer nem támogatja a minőségi paramétereken nyugvó adatátvitelt. Olyan valós idejű útvonalválasztásra van szükség, amelynél az útvonalra tett minőségi előírások (pl. a két végpont közti késleltetés vagy a sávszélesség kritériumok) kielégülnek. Ennek az igénynek megfelelően a [23, 27] munkákban kiterjesztették az OSPF szabványt (erre QOSPF néven történik hivatkozás), ahol a link állapotait adott időközönként mérik. Többek között ez is az oka, hogy a csomópontokat összekötő linkek tulajdonságait leíró mérőszámok pontosan nem ismertek, ezért R. Guérin [28, 29, 30] adott eloszlású valószínűségi változókkal közelítette őket. Az így keletkező útvonalválasztási feladatról belátható, hogy NP-nehéz. A probléma megoldására több heurisztikus közelítő megoldást kínál [28], de az egyenletekben mindig benne marad az út linkszáma, így nem kapunk könnyen kezelhető megoldásokat. Témavezetőmmel és több doktorandusz társammal is dolgoztunk jobban viselkedő megoldásokon [2, 39]. A [39] cikk farokeloszlás becslésre vezeti vissza a problémát, amelyre a Csernov korlátot alkalmazza. Habár a szimulációs eredmények alapján igen jó hatékonyságú algo-

ritmusokat mutat be, a közelítés hibájára vonatkozólag formulát nem közöl. Az értekezés a determinisztikus linkmértékekkel dolgozó Bellman-Ford algoritmus (ld. a [34, 35]-ben) egy absztrakt algebrai kiterjesztésével oldja meg a problémát. Belátható, hogy az így keletkező polinomiális algoritmusokkal az eredeti NP-nehéz feladat optimális megoldásának nagyon jó közelítése kapható [1].

Hívásengedélyezés statisztikusan multiplexált forgalmi folyamatokon

Bármilyen hatékony útvonalválasztó algoritmus kerül alkalmazásra, a rendszer csak korlátozott mennyiségű adatforgalom elvezetésére képes, amit a hálózat áteresztőképessége határoz meg. Éppen ezért a QoS-t biztosító távközléshez elengedhetetlen a forgalom korlátozása. A tervezés alapja az, hogy az előfizetői (ún. elérési) hálózatok egy adott kapacitású keresztmetszettel csatlakoznak a gerinchálózathoz. Ennek megfelelően a cél az áteresztőképesség legjobb kihasználása a felhasználók statisztikus tulajdonságainak figyelembevételével. A kihasználtság maximalizálását előre adott minőségi paraméterek (pl. átlagos csomagkésleltetés, csomagvesztési arány) mellett kell végrehajtani [20]. Ha a kommunikálni kívánó felhasználók által generált forgalom nem teljesíti ezeket a QoS előírásokat, úgy az adott igényt vissza kell utasítani. Ezt a feladatot a hívásengedélyezés (Call Admission Control - CAC) oldja meg. Ahogy azt az idevágó kutatások demonstrálták [52, 53], minél "változatosabb" a szállított forgalom, annál fontosabb szerepet játszik a forgalomirányítás a kommunikációs hálózatokban. Ugyanakkor kompromisszumot kell kötnünk az algoritmikus bonyolultság és a valósidejű működés között. Eddig csupán olyan hozzávetőleges számításokon alapuló, de egyszerű algoritmusokat használtak, amelyek erősen korlátozták a hálózati kihasználtságot [44]. A CAC feladatát az [54, 55] cikkekben (neurális háló alapú) halmazszeparálási feladatra vezetik vissza, amellyel jelentős kihasználtság növelés érhető el. Ezekben on/off forrásmodell alkalmaznak, ami durván közelíti a tényleges forgalmat, mert csak a felhasználók maximális és átlagos adási sebességét veszi figyelembe. Ugyan más adatok ismerete nélkül ez sem elvetendő modell, a dolgozat szót ejt pontosabb forrásmodellezési eljárásokról is. A 3. fejezet szerint két forgalmi osztály esetén neurális architektúra nélkül is, viszonylag kevés előzetes számításigény mellett, pontos halmazszeparálás valósítható meg [4, 7]. A [3, 4, 7] cikkek alapján ismertet egy interpolációs eljárást, amellyel kiterjeszthető a módszer három forgalmi osztályra.

Ha a forrás paraméterei pontosan nem ismertek, akkor a nem-parametrikus döntésemélet eredményeivel mérések alapján alkotják meg a CAC algoritmust [61, 66]. Neurális alapú nem-parametrikus módszereket mutatnak be a [44, 56, 62] munkák, ahol a halmazszeparálás továbbra is előrecsatolt neurális hálózattal történik. Ezek másfajta megközelítésben foglalkoznak a neurális hálózatok tanításának nehézségeivel, ezért az értekezés

a halmazszeparálásnak egy olyan megközelítését mutatja be, amely egy újszerű neurális architektúrához, a gömb-szeparátorhoz vezetett [4, 7]. Ennek tanítási algoritmus a robusztus, a kezdeti értékekre kevésbé érzékeny.

4. Algoritmikus egység és analóg számítógépes implementáció

A disszertáció kutatásait elsősorban a CNN alkalmazása motiválta. A CNN olyan neurális hálózat, ahol a neuronok egyszerű analóg áramkörrel vannak megvalósítva, amelyek csak a szomszédokkal vannak kapcsolatban, ezért integrálásuk nagy méretekben is könnyen megvalósítható [78, 79, 80]. A CNN-ek elsősorban képesek valósidejű feldolgozásában játszani nagy szerepet [81]. Az analóg működés következtében ezek jóval felülmúlják a sorrendi automatákon megvalósított algoritmusok sebességét (futási idejük $< 20 \mu s$).

A fenti tények alapján a dolgozat eredményeit két szempont foglalja egységbe. Nevezetesen, hogyan lehet a hálózati protokollokhoz tartozó algoritmusokat

- kvadratikus formába átírni, ill.
- képfeldolgozási (legközelebbi társ szabályon alapuló osztályozási) feladatként értelmezni, amely a CNN-en hullámterjedési modell formájában futtatható.

A fenti algoritmikus egységet az jelzi, hogy a dolgozat során sikerült az útvonalkeresési feladatot kvadratikus optimalizálásba, míg a hívásengedélyezési feladatot hullámterjedéssel alapuló klasszifikációs problémába leképezni. A problémák ezen "egységes" kezelése lehetővé teszi nemcsak a CNN, de más optimalizáló és klasszifikáló módszerek használatát is (pl. Hopfield háló, potenciál alapú szeparátor stb.)

Útvonalkeresés kvadratikus optimalizálással

NP-nehéz feladatok heurisztikus megoldásának egyik lehetséges módszere a kvadratikus programozás, amelynek kétféle előnye is megmutatkozik:

- Egyfelől algoritmikus téren jelentkezik előny, mivel a Hopfield rekurzióval P-beli megoldáshoz jutunk. (Ezt a módszert alkalmazták az utazóügynök probléma heurisztikus megoldására pl. a [82, 83, 84] cikkekben, ahol a célfüggvényhez additív kényszereket adva biztosították, hogy Hamilton kör adódjon megoldásként. Ezek az additív kényszerek okozzák a megoldás heurisztikus jellegét.)
- Másfelől technológiai szempontból előnyös, amennyiben lehetőség van gyorsan működő integrált neurális architektúrákon implementálni a megoldást. Ilyen neurális

architektúra a felsezűetűben említett celluláris neurális hálózati, amely μs -os nagyságrűdű futási idővel szolgáltat eredményt. Ez utűbbi akkor lehetsűges, ha az összekűttetűsi strűktűrát sikerűl úgy leegyszerűsűteni, hogy csak szomszűdos neuronok legyenek kapcsolatban egymással. A feladatok ilyen módon tűrtűnű megfoglalmazása új algoritmikus kihívást és kutatási területet jelent.

A dolgozat 4.1 fejezete megmutatja, hogy a CNN stabilitási kritűriumai őrvenyesek Hopfield hálózatiokra is ill. hogy a Hopfield hálózati műkűdű optimalizálási feladatok átűttetűhetűk CNN-re, amennyiben az összekűttetűsi strűktűra ezt megengedi. [85] eredményeinek felhasználásával a 4.2 fejezet műdszereket kűzűl a QoS routing kvadratikus megoldására [8, 11, 12, 13].

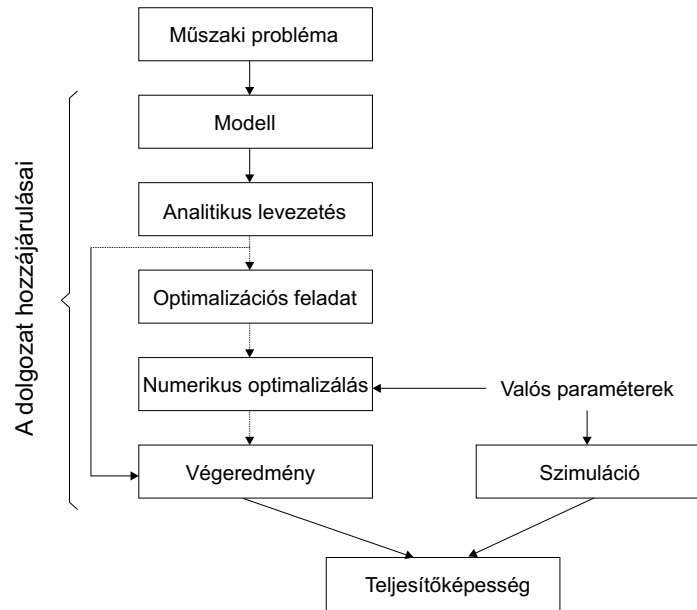
Celluláris neurális hálózati alkalmazása hívásengedűlyezűshez

A 4.3 alfejezet a nem-parametrikus hívásengedűlyezűst halmazszeparálási problűmaként fogalmazza meg, ahol a halmazszeparálást kűpfeldolgozási feladatként tekinti és megoldására CNN-t javasol [3, 9, 10]. Ebben a megkűzelítűsben a neuronok csak a szomszűdaikkal vannak kapcsolatban, ezért a műdszert valódi CNN csipen is lehetőség volt kiprűbálni. Mivel csak kűtdimenziűs CNN-eket gyártanak, ezért úgy tűnik, hogy csak kűt forgalmi osztályos hívásengedűlyezűst lehet egy CNN-nel megvalűsűteni. Viszont a 3. fejezetben ismertetűt interpoláciűs műdszer itt is alkalmazhatű a hárűmdimenziűs kűterjesztűshez [3].

5. A kutatás műdszere

A kutatás menetűt a problűma megfoglalmazásátűl a kidolgozott műdszerek teljesűtműnyanalízisűig az 1. ábra foglalja össze. A kidolgozott eredmények alkalmazhatűságrűt minden esetben analitikusan bizonyűtottam. A megoldások hatűkonyságrűvizsgálatáa az alábbi hárűm formában tűrtűnt:

1. *Analitikus levezetűs*: az adott problűma megoldása a diszkrét matematika (algoritműselműlet, kombinatorika, gráfelműlet), a lineáris algebra és a függűvűnyanalízis eszkűztárának felhasználásával tűrtűnt. Ez speciális, de a gyakorlattűl nem távoli megszorítűsokkal volt csak lehetsűges (pl. a QoS routing hiányos informáciűk alapján témakűrűben).
2. *Numerikus optimalizálás*: Az analitikus levezetűs gyakran egy optimalizáciűs feladatot eredményezett, amelynek megoldása numerikus úton tűrtűnt (pl. a CAC neurális hálózati megoldásánál és a CNN-ek template választásánál).



1. ábra. A kutatás menete.

3. *Teljesítményanalízis szimulációval:* A megoldások numerikus tesztelése is megtörtént valóság-hű környezetben. Ennek során az eredmények összehasonlításra kerültek az analitikus úton nyert becslésekkel (ha voltak ilyenek) ill. más módszerek hatékonyságával.

6. Az értekezés tudományos eredményei

A dolgozat struktúrájának megfelelően a tézisek két nagy csoportba oszthatók: az 1. és a 2. tézis az útválasztással, a 3. és 4. tézisek a hívásengedélyezéssel foglalkoznak. Mivel a 4. fejezet szintén a QoS routing és a hívásengedélyezés témakörében ad analóg számítógépes megoldásokat, ezért a tömörebb és követhetőbb eredményközlés kedvéért ezeket nem elkülönítve összegzem.

1. Tézis: Kiterjesztettem a Bellman-Ford algoritmust a QoS útvonalkeresés hiányos információs környezetű megoldására.

Az alábbi (1.1-3) résztézisekben megadtam a Bellman-Ford útválasztási algoritmusnak egy olyan általánosítását (az $[A, \beta]$ algebra), amely alkalmas a hiányos információk kezelésére. Az alkalmazott modellben a linkekhez nem valós költségek, hanem az additív költségek valószínűség-eloszlásai vannak rendelve. Ezeket az eloszlásokat az A halmaz foglalja magába. Az általánosítás az összeadás művelete helyett az A -n értelmezett β konvolúciót alkalmazza. Két út közül az tekinthető jobbnak, amelyik nagyobb valószínűséggel teljesíti

az előírt QoS paramétert. Ennek eldöntésére definiálható egy farokeloszláson alapuló \leq^* reláció, amely A elemeit rendezi:

$$C(R_1) \leq^* C(R_2) \Leftrightarrow \int_D^\infty C(R_1)(x)dx \leq \int_D^\infty C(R_2)(y)dy,$$

ahol R_1 és R_2 jelöli a két utat leíró élhalmazt, a $C(R)$ függvény az R út összköltségének sűrűségfüggvényét és D a QoS paramétert (pl. az előírt késleltetéskorlátot) jelenti. Ezzel a hiányos információs útvonalválasztás az

$$R_{\text{opt}} = \arg \min_R^* C(R)$$

optimalizációs feladatként írható föl, amelynek megoldása általánosan NP-nehéz.

1.1 Bizonyítottam az $[A, \beta]$ -n működő Bellman-Ford algoritmus stabilitását, és megadtam az optimalitás feltételét.

Bebizonyítottam (ld. a 2. tételt az értekezés 14. oldalán), hogy akkor stabil az $[A, \beta]$ fölött működő Bellman-Ford algoritmus, ha a β asszociatív és kommutatív, a \leq^* tranzitív és teljesül a nem-negativitás, valamint akkor optimális, ha a monotonitás feltétele is fennáll. Azt is beláttam, hogy pozitív tartójú eloszlásoknál (márpedig a késleltetés pozitív) a monotonitás kivételével minden feltétel teljesül. Fontos következmény, hogy ekkor (a monotonitás teljesülése nélkül is) használható az általánosított Bellman-Ford algoritmus mint közelítő módszer. A monotonitás tulajdonság teljesülésekor az eredeti NP-nehéz feladat P-belivé redukálódik.

1.2 Felső becslést adtam az általánosított Bellman-Ford algoritmus hibájának várható értékére és szórására.

Megmutattam, hogy a gyakorlatban (a QOSPF-nek megfelelő környezetben) a monotonitás kritérium sérülése miatt bekövetkező hiba nagyon alacsony (ld. a 2.5 fejezetet). A $P_E = \int_D^\infty C(R^*)(x)dx - \int_D^\infty C(R_{\text{opt}})(x)dx$ ún. "valószínűség-hiba" $\mathbf{E}\{P_E\}$ várható értékével jellemeztem az algoritmus (és az általa adott R^* út) jóságát, amire a fenti megkötések mellett analitikus felső becslést adtam (ld. a 6. tételt a 27. oldalon). A P_E hiba szórását is kiértékeltem. Az eredmény felső korlát jellegéből és az eredményül kapott alacsony (néhány század) értékek alapján megállapítható, hogy a gyakorlatban jól használható a felső korlát és bizonyítja a kiterjesztett Bellman-Ford algoritmus alkalmazhatóságát.

1.3 Kiterjesztettem az eredményt normális eloszlású linkleírókra.

Bebizonyítottam, hogy a normális eloszlásra is teljesíthető a nem-negativitás feltétele és ezáltal használható a β -BF algoritmus (ld. a 3. tételt a dolgozat 21. oldalán). Ilyenkor a

linkleírókat $1 - \epsilon$ illeszkedési kritériummal normális eloszlásúaknak tekintjük, amellyel a konvolúció számításigénye jelentősen lecsökken.

2. Tézis: Megmutattam, hogy az útválasztás megoldható kvadratikus optimalizálással úgy, hogy garantáltan legális útvonalat írjon le az eredmény.

A 2.1-2 altézisekben (a 4.2.2 alfejezet szerint) kvadratikus megoldásokat közlök az útválasztás megoldására. Az R útvonalat fel lehet írni egy \mathbf{P} mátrixszal, amelynek minden sora megfelel egy csomópontnak és minden oszlopa az útvonal egy lépésének.¹ Az L hosszúságú utakat leíró \mathbf{P} útvonalmátrixok halmazát jelölje $\mathcal{P}^{(L)}$.

2.1 Megadtam a rögzített linkszámú útvonalkeresést megoldó Hopfield rekurzió összeköttetési súlyait, amely garantálja, hogy az eredmény a $\mathcal{P}^{(L)}$ halmazba eszen.

Megmutattam (a 10. tételben az értekezés 83. oldalán), hogy az

$$y_{ij}(k+1) = \text{usgn} \left\{ \alpha y_{ij}(k) - A \left(\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^N y_{lj}(k) - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^N y_{il}(k) \right) - \left(\sum_{\substack{l=1 \\ j < N}}^N \kappa_{il} y_{l,j+1}(k) + \sum_{\substack{l=1 \\ j > 1}}^N \kappa_{il} y_{l,j-1}(k) \right) + b_{ij} \right\} \quad (\text{ahol } \text{usgn}(z) = \frac{\text{sgn}(z)+1}{2})$$

rekurzió szerint működő Hopfield hálózat \mathbf{Y}^{st} stabil kimeneti állapota milyen A , α és b_{ij} konstansok mellett ír le legális L linkszámú útvonalat, $\mathbf{Y}^{st} \in \mathcal{P}^{(L)}$. Ekkor a kapott $\mathbf{P} = \mathbf{Y}^{st}$ a célnak megfelelő

$$\sum_{(u,v) \in R} \kappa_{uv} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{l=1}^N P_{ij} \kappa_{il} P_{l,j+1}$$

összkiöltséget minimalizálja (ahol R a \mathbf{P} -vel ekvivalens L linkszámú útnak felel meg).

A dolgozatban azt is beláttam (ld. a 4.1.2 alfejezetet), hogy változatlan konstansjelölésekkel érvényes az állítás celluláris neurális hálózatokra (CNN).

2.2 Kiterjesztettem a kvadratikus útválasztást változó linkszámú utak keresésére.

Megadtam a polinomiális SPR feladat kvadratikus megoldását az előbbi altézis változó linkszámú utakra történő kiterjesztésével. Ezzel nagy és összetett hálózatoknál gyorsabb

¹Pi. az $R = \{(s, v_1), (v_1, v_2), \dots, (v_{L-1}, f)\}$ útvonalnál a \mathbf{P} -ben $p_{s,1} = 1, p_{v_1,2} = 1, \dots, p_{f,L+1} = 1$, míg a többi elem zérus.

útvonalkeresés érhető el, ha mód nyílik analóg számítógépes implementációra. A kiterjesztés a következő rekurzió szerint működik:

$$y_{ij}(k+1) = \text{usgn} \left\{ \alpha y_{ij}(k) - A \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^N y_{lj}(k) - \left(\sum_{\substack{l=1 \\ j < N}}^N \kappa_{il} y_{l,j+1}(k) + \sum_{\substack{l=1 \\ j > 1}}^N \kappa_{il} y_{l,j-1}(k) \right) + b_{ij} \right\}.$$

A 11. tétel (85. oldal) szerint a kapott $\mathbf{P} = \mathbf{Y}^{st}$ a $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{l=1}^N P_{ij} \kappa_{il} P_{l,j+1}$ SPR célfüggvényt minimalizálja, amennyiben az A , α és b_{ij} konstansokra ugyanazok az előírások teljesülnek, mint a rögzített linkszámú esetben.

3. Tézis: Újszerű neurális alapú halmazszeparálási módszert dolgoztam ki a nem-parametrikus hívásengedélyezésre.

A következő résztézisekben (3.1-2) új osztályozási eljárást dolgoztam ki a CAC-hez, amely konvex halmazszeparálási feladatként fogalmazható meg. Az N forgalmi állapotteret úgy kell két részre osztani ($N^{(1)}$ -re és $N^{(-1)}$ -re), hogy az $N^{(1)}$ -be olyan forgalmi állapotok kerüljenek, amelyek teljesítik az előírt QoS kritériumokat (azaz elfogadható állapotok) ill. az $N^{(-1)}$ -be a visszautasítandó állapotok kerüljenek. A pontos hívásengedélyezés még primitív forgalmi modellek esetén is igen nagy számításigényű feladat, ezért a gyakorlatban mérések alapján fölvettem $(\tau^{(K)} = \{(\mathbf{n}_k, d_k), k = 1, 2, \dots, K\})$ mintahalmaz segítségével közelítik az optimális $g(\mathbf{n}) \in \{1, -1\}$ döntési szabályt. Ha a közelítő osztályozó függvényt az $f(\mathbf{n}, \mathbf{w})$ jelöli, akkor a feladat a \mathbf{w} súlyvektor olyan beállítása, amely a $P(f(\mathbf{n}, \mathbf{w}) \neq g(\mathbf{n}))$ hibavalószínűséget minimalizálja. A 3.3.3 alfejezetben bevezettem egy újszerű neurális architektúrát, amely képes konvex halmazszeparálásra, így a CAC-hoz is használható. Mivel két ponttól (gömbtől) egyenlő távolságra lévő pontok halmaza egy síkot határoz meg, ezekkel a pontokkal (gömbökkel) definiálható egy szeparátor, amelyet *gömb-szeparátornak* neveztem el.

3.1 Bizonyítottam, hogy a gömb-szeparátor alkalmas a téves döntések valószínűségének aszimptotikus minimalizálására, amikor csak mérési minták állnak rendelkezésre a forgalomról.

A dolgozat 8. tétele (63. o.) kimondja, hogy ha az

$$f(\mathbf{n}, \mathbf{w}) = \text{sgn} \left(|\mathbf{n} - \mathbf{b}|^2 - |\mathbf{n} - \mathbf{w}^{(+i)}|^2 \right) \Big|_{i=\arg \min_{j=1, \dots, M} |\mathbf{n} - \mathbf{w}^{(+j)}|}$$

(ahol $\mathbf{b} \in N^{(-1)}$ konstans vektor és $\mathbf{w} = (\mathbf{w}^{(+1)}, \dots, \mathbf{w}^{(+M)})$) architektúrát alkalmazzuk az

$$\tilde{E}(\mathbf{w}, \tau^{(K)}) = \frac{1}{2K} \sum_{\{\mathbf{n}_k | d_k=1\}} (1 - f(\mathbf{n}_k)) + \frac{1}{2K} \sum_{\{\mathbf{n}_k | d_k=-1\}} (1 + f(\mathbf{n}_k))$$

empirikus hibafüggvény minimalizálására, akkor aszimptotikusan optimális megoldás adódik. Az $\tilde{E}(\mathbf{w}, \tau)$ nem folytonos függvénye \mathbf{w} -nek, ezért ha kicseréljük $f(\mathbf{n}, \mathbf{w})$ "kemény" nemlinearitását egy szigmoid jellegű görbére, a megoldás továbbra is aszimptotikusan optimális marad.

3.2 Megadtam, hogyan alkalmazható a gradiensmódszer a gömb-szeparátor tanítására.

Megmutattam, hogy az $\tilde{E}(\mathbf{w}, \tau)$ hibafüggvény minimalizálására a gradiensmódszer biztonságosan használható (67. oldal). A hibafüggvény analizéséből kiderült, hogy ennél a feladatnál lényegesen kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkezik a gömb-szeparátor a "back-propagation" típusú neurális hálózatoknál (65. oldal).

4. Tézis: Kidolgoztam egy gyors adaptációs képességű, CNN alapú hívásengedélyezési módszert csomagkapcsolt hálózatokhoz.

Olyan CAC eljárást vezettem be, ahol a halmazszeparálást CNN végezte. A $\tau^{(K)}$ mintahalmaz alapján történő $f(\mathbf{n})$ közelítő döntési függvényt az ún. terjedési versenymoddal definiáltam (94. o.), amely közvetlenül átültethető celluláris neurális hálózatokra. A terjedési versenymodell lényegét tekintve a legközelebbi szomszéd szabály szerinti osztályozás gyors megvalósítása. Ez felfogható úgy, mintha az N állapottérben azokból az \mathbf{n}_k pontokból, amelyekhez "elfogadás" tartozik, egy "pozitív gömbhullám" indulna ki, amelyekhez pedig "visszautasítás" tartozik, egy "negatív gömbhullám". Ha a beérkező \mathbf{n} állapot-hoz pozitív hullám érkezik először, akkor a döntés legyen "elfogadás", ellenkező esetben "visszautasítás". A dolgozat 4.3.2 alfejezetében megmutattam, hogy ez a hullámterjedési modell (ún. terjedési versenymodell) implementálható analóg számítógépeken, CNN-eken két dimenzióban (két forgalmi osztály esetén).

Megadtam azt az algoritmust, amely meghatározza a terjedési versenymodell megvalósító CNN összeköttetési mintázatát és ezzel a megfelelő hullámokat triggereli. Az eredményt a [3, 10] cikkek alapján ismertettem a dolgozat 97. oldalán.

Az eredmény gyakorlati alkalmazásához megmutattam (a disszertáció 4.3.6 alfejezetében), hogy minden 2D-s CAC teljesíthető már 64×64 -es vagy 256×256 -os méretű CNN csippel is anélkül, hogy számottevő hibát követnénk el. Internet elérési hálózatokban 3 forgalmi osztály fordul elő (Internet access I, Internet access II, Voice over IP), ezért

már nem 2D-s, hanem 3D-s az állapottér. Különböző interpolációs technikákkal kiterjesztettem a kétdimenziós CNN-es hívásengedélyezést három forgalmi osztály kezelésére (ld. a 3.2.2 ill. a 4.3.5 alfejezetet).

7. Az eredmények alkalmazhatósága

QoS útválasztás: A hiányos információs útválasztás témakörében született eredmény (1. tézis) akár már a jelenlegi OSPF protokollt használó útválasztókban is futtatható, amennyiben a Dijkstra algoritmust felváltja annak az 1. tézisben ismertetett kiterjesztése. (Ez a kiterjesztés a Bellman-Ford algoritmuson keresztül került bemutatásra, de magától értetődően érvényes Dijkstra algoritmusára is.) A hálózat változásaihoz igazodó pontosabb megoldáshoz már kismértékű protokoll módosításra is szükség van, amely a QOSPF-ben testesül meg. Ekkor az 1. tézis fontos hozadéka, hogy a jelzési információk alacsony szinten tartása esetén is jól teljesítő útválasztás valósulhat meg. Ebben az esetben a linkleírók folyton változnak, így feltétlenül szükséges az elosztottan működő és ún. szinkronizátorokkal (pl. Alfa [40]) összehangolt Bellman-Ford algoritmus alkalmazása, amely egy csomópontban csak a szomszédos linkek leíróit igényli.

Kvadratikus útválasztás: A 2. tézis eredményeinek gyakorlati alkalmazása akkor válik lehetségessé, ha azok celluláris neurális hálózaton implementálhatók. Ez még további kutatásokat igényel.

Hívásengedélyezés: A CAC témakörében született eredmények mind ATM hálózatok VBR szolgáltatásainál, mind az IP csomagkapcsolású elérési hálózatoknál alkalmazhatóak (pl. az ADSL-nél, amely gyakran ATM alapú). A 3. tézisben közölt megoldás legfőbb előnye a pontosság, míg a 4. tézis CNN alapú megoldása a gyors adaptáció tekintetében mutat előnyt.

Hivatkozások

A szerző publikációi (hivatkozási sorrendben)

- [1] Fancsali A.: "An extension of the Bellman-Ford algorithm for QoS routing with inaccurate information", *Informatica, An International Journal of Computing and Informatics*, Vol. 27, Number 4, 2003.
- [2] Levendovszky J., Rétvári G., Dávid T., Fancsali A., Végső Cs.: "QoS routing in packet switched networks - novel algorithms for routing with incomplete informa-

tion", *9th IFIP Conference on Performance Modelling and Evaluation of ATM & IP Networks*, 2001, Budapest

- [3] Levendovszky J., Fancsali A.: "Real-time call admission control for packet switched networking by cellular neural networks", *IEEE Transaction on Circuits and Systems-I*, Vol. 51, June 2004.
- [4] Fancsali A.: "Statisztikus multiplexelésen alapuló hívásengedélyezés gyors és pontos megvalósításai", *HTE-BME 2002 Diákkonferencia: Korszerű távközlő és informatikai rendszerek és hálózatok*, 2002. május 10.
Elérhető: http://www.mcl.hu/hte/abstracts/hte_FancsaliA.doc
- [5] Fancsali A., *Back propagation hálózatok alkalmazása általános hipotézisvizsgálati feladatokhoz*, BME TDK dolgozat, 1998 november.
- [6] Fancsali A.: "Back propagation típusú neurális hálók alkalmazása átlagos loss minimalizálására", *BME Végzős konferencia*, 1999. április 28.
- [7] Fancsali A., Vázsonyi M., dr. Levendovszky J.: "Gyors és pontos hívásengedélyezés csomagkapcsolt hálózatokban", *Híradástechnika*, 2002. szeptember.
- [8] Levendovszky J., Fancsali A.: *Application of CNNs in Modern Communication Technologies, Part-I: Quadratic Optimatization, Part-II: CNNs as Optimiziers*, Research report of the Analogic (Dual) and Neural Computing Systems Laboratory, (DNS-7-2000), Budapest MTA SZTAKI, 2000.
- [9] Levendovszky J., Fancsali A., *CNN based Call Admission Control in ATM Networks*, Research report of the Analogic (Dual) and Neural Computing Systems Laboratory, (DNS-2-2000), Budapest MTA SZTAKI, 2000.
- [10] Fancsali A., Levendovszky J.: "CNN Based Real-Time Call Admission Control in Packet Switched Networks", *2001 Polish-Czech-Hungarian Workshop on Circuit Theory, Signal Processing, and Telecommunication Networks*, Budapest, 2001.
- [11] Levendovszky J., Rétvári G., Fancsali A., Végső Cs.: "QoS Routing with Incomplete Information by Analog Computing Algorithms", *2nd International Workshop on Quality of future Internet Services*, Coimbra, Portugal, 24-26 September, 2001.
- [12] Levendovszky J., Fancsali A., Végső Cs.: "Quadratic optimization algorithms for QoS routing with incomplete information", *HSN Workshop - Spring*, Balatonfüred, 2001.

- [13] Levendovszky J., Fancsali A., Végső Cs., E.C.van der Meulen: "CNN Based Algorithms for QoS Routing with Incomplete Information", *22nd Symposium on Information Theory in the Benelux*, Twente University, Neederland, May 15-16, 2001.

A dolgozatban hivatkozott más szerzők munkái

- [14] Bertsekets D., Gallager, R., *Data Networks*, Prentice Hall 1987.
- [15] Tannenbaum, A., *Computer Networks*, Prentice-Hall Int. Ed., 1996.
- [16] Wang, Z., *Internet QoS - Architectures and Mechanisms for Quality of Service*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, USA, 2001.
- [17] Quittek, J., Brunner, M.: "QoS Management in the Internet" (Tutorial), *2001 IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*, Dallas, Texas, May 29-31, 2001.
- [18] Huitema, C., *Routing in the Internet*, Prentice Hall, 2000.
- [19] Prycher M., *Asynchronous Transfer Mode*, Prentice Hall, 1994.
- [20] J. Hui: "Resource Allocation for Broadband Networks", *IEEE JSAC*, vol. 6, pp. 1598-1608, 1988.
- [21] Cherukuri, R., Dykeman, D.: "PNNI draft specification", *ATM Forum 94-0471*, November, 1995.
- [22] Lorenz, D., Orda, A.: "QoS routing in networks with uncertain information", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 6., December, 1998.
- [23] Apostolopoulos, Guérin, Kamat, Tripathi: "Quality of Service Based Routing: A Performance Perspective", *Proceedings of SIGCOM*, pp. 17-28, Vancouver, Ontario, Canada, September 1998.
- [24] Jaffe, J.: "Algorithms for Finding Paths with Multiple Constraints", *Networks*, Vol 14, pp 95-116, 1984.
- [25] Moy, J.: "OSPF Version 2" *RFC 2328*, Ascend Communications, Inc., April 1998.
- [26] PNNI Specification Working Group: "Private Network-Network Interface Specification Version 1.0", *ATM Forum*, March 1996.

- [27] Guérin, R., Kamat, S., Orda, A., Przygienda T., Williams, D.: "QoS Routing Mechanisms and OSPF Extensions" *RFC 2676*, IBM, Technion, Lucent, December 1998.
- [28] Guérin, R., Orda, A.: "QoS routing in networks with inaccurate information: theory and algorithms", *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 7., June, 1999.
- [29] Shaikh, A., Rexford, J., Shin, K.: "Dynamics of Quality-of-Service Routing with Inaccurate Link-State Information", *Technical Report CSE-TR-350-97*, Computer Science and Engineering Division, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan, November 1997.
- [30] Shaikh, A., Rexford, J., Shin, K.: "Efficient Precomputation of quality-of-service routes", *Proceedings of Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video*, July 1998.
- [31] Lee, W.: "Spanning tree methods for link state aggregation in large communication networks", *Proc. INFOCOM*, Boston, MA, April, 1995.
- [32] D. B. West, *Introduction to Graph Theory*, Prentice Hall, 1996.
- [33] Dijkstra, E.: "A note on two problems in connexion with graphs", *Numerische Mathematik* 1, 269-271, 1959.
- [34] Bellman, R. E.: "On a routing problem", *quarterly of Applied Mathematics*, 16, 87-90, 1958.
- [35] Ford, L. R., Fulkerson Jr., D. R., *Flows in Networks*, Princeton University Press, Princeton, 1962.
- [36] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., *Introduction to Algorithms*, Cambridge, MA: MIT Press, 1990.
- [37] Garey, M.R. and Johnson, D.S., *Computers and Intractability*, Freeman, San Francisco, 1979.
- [38] Olav Osterbo, *Models for End-to-End Delay in Packet Networks*, Telenor, R&D Report 4/2003.
- [39] Levendovszky J., Végső Cs.: "QoS routing with incomplete information using Large Deviation Approach", *2001 Polish-Czech-Hungarian Workshop on Circuit Theory, Signal Processing, and Telecommunication Networks*, Budapest, 2001.
- [40] Nancy Ann Lynch, *Distributed Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, 2000.

- [41] Birkhoff, G. and Bartee, T. C., *Modern Applied Algebra*, New York, NY: McGraw-Hill, 1970.
- [42] Liming Wei and Deborah Estrin, "The trade-offs of multicast trees and algorithms", *Proceedings of ICCCN'94*, San Francisco, CA, USA, Sept. 1994.
- [43] Prékopa András: *Valószínűségelmélet műszaki alkalmazásokkal*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962.
- [44] Levendovszky J., Imre S., Pap L., E.C. van der Meulen, Varga B., *Comparative Analysis of Call Admission Control Algorithms for ATM Networks*, Annual Scientific Progress Report, COPERNICUS C579, August, 1995.
- [45] Levendovszky János, *Intelligent communication algorithms*, MTA doktori tézis, 2002.
- [46] Chen, S., Nahrstedt, K.: "On Finding Multi-Constrained Paths", *Proceedings of 7th IEEE International Conference on Communications*, Atlanta, GA, pp. 874-879, June 1998.
- [47] Comer, D. E., *Internetworking with TCPIP*, Volume I., Prentice Hall, 1995.
- [48] Chen, S., Nahrstedt, K.: "Distributed QoS Routing with Imprecise State Information", *Proceedings of 7th IEEE International Conference on Computer, Communications and Networks*, Lafayette, LA, pp. 614-621, October 1998.
- [49] Végső Csaba: *Traffic Engineering Algorithms for QoS Communications in Packet Switched Networks*, PhD Thesis, Budapest University of Technology and Economics, Department of Telecommunications, 2002.
- [50] Végső Cs., Levendovszky J., Molnár A., Boros P.: "Designing optimal link scaling for routing with incomplete information in packet switched networks" , *HSNLab WorkShop*, Budapest, 27-28 November, 2001.
- [51] J. Levendovszky, A Molnar P Boros E. C. van der Meulen: "Designing Optimal Link Scaling for Routing with Incomplete Information in Packet Switched Networks", *25th Symposium on IT in the Benelux*, Kerkrade, Netherlands, June 2-4, 2004.
- [52] Levendovszky J.: "Validation of novel CAC algorithms", *ICAM- IEEE 1999*, pp. 195-211
- [53] Levendovszky J.: "Call admission control of ATM networks based on modulated Markov chains", *Journal on Communication dedicated to ATM Networks*, VOL. XLVII, pp. 19-24, March 1995.

- [54] Hiramatsu, A.: *ATM Traffic Control Using Neural Networks*, Neural Networks in Telecommunications, edited by Yuhas, B. and Ansari, N., Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [55] Du-Hern Lee, Yoan Shin, Young-Han Kim: "A Neural Network Based ATM Call Admission Controller for Multiple Service Classes with Different QoS", *International Conference on Neural Networks (ICNN '96)* Washington, DC, USA June 2-6, 1996.
- [56] Levendovszky J., Mészáros Á.: "Neuron based penalty function classifiers", *19th WIC Conference*, Veldhoven, Holland, May, 1998.
- [57] J. Bickel, R. Ritov, and T. Ryden: "Asymptotic normality of the maximum likelihood estimation for general hidden markov models", *Annals of Statistics*, 26(4):1614-1635, 1998.
- [58] L. Baum: "A maximization technique occurring in the statistical analysis of probabilistic function of markov chains", *Annals of Mathematical Statistics*, 41(1):164-171, 1970.
- [59] T. Ryden: "Parameter estimation for markov modulated poisson processes", *Stochastic Modeling*, 10:795-829, 1994.
- [60] Lawson, C. L. and R. J. Hanson, *Solving Least Squares Problems*, Prentice-Hall, 1974, Chapter 23
- [61] R. J. Gibbens, F.P. Kelly, and P.B. Key: "A decision theoretic approach to call admission control in ATM networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special issue on advances in the fundamentals of networking – part 1*, 13(6), August 1995.
- [62] Levendovszky J., Végső Cs., van der Meulen E. C.: "Nonparametric decision algorithms for CAC in ATM networks", *Performance Evaluation*, 41 (2-3) (2000) pp. 133-147.
- [63] S. Crosby, I. McGurk, J. T. Lewis, R. Russel, F. Toomey: "Statistical Properties of a Near-Optima Measurement-Based CAC Algorithm", *Proc. IEEE ATM'97*, Lisbon, Portugal.
- [64] Jakabfy T., Szlávik Á., Seres G.: "Analytical Approach to a Large Deviation Based CAC Algorithm", *High Speed Networking 2002 Spring Workshop*, Budapest, 27-28 May, 2002.

- [65] Andrea Baiocchi, Nichola Blefari Melazzi, Aldo Roveri: "Buffer dimensioning criteria for an ATM multiplexer loaded with homogeneous ON-OFF sources", *ITC 13*, Copenhagen, Denmark, June 1991.
- [66] R. J. Gibbens and F. P. Kelly: "Measurement-based connection admission control", *Teletraffic Contributions for the Information Age* (Editors V. Ramaswami and P.E. Wirth), *ITC15*, pp. 879-888, Elsevier, Amsterdam, 1997.
- [67] Vapnik, V.: *The Nature of Statistical Learning Theory*, Springer, 1995.
- [68] Haykin, S.: *Neural Networks - a comprehensive foundations*, John Wiley, 1999.
- [69] Hagan, M.T, Demuth, H.B., and Beale, M.: *Neural Network Design*, PWS Publishing Company, Boston, 1996.
- [70] Hornik, K. and Stinchcombe, M. and White, H.: "Universal Approximation of an Unknown Mapping and Its Derivatives Using Multilayer Feedforward Networks", *Neural Networks*, 1990, vol. 3, pp. 551-560
- [71] Hornik, K.: "Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks", *Neural Networks*, 1991, vol. 4, pp. 251-257
- [72] *Software Reference for Professional II/Plus and NeuralWorks Explorer*, NeuralWare, 1995.
- [73] Porto, V.W., Fogel, D.B., and Fogel, L.J.: "Alternative Neural Network Training Methods", *IEEE Transactions on Intelligent Systems*, Vol. 10, No. 3, pp.16-22, June, 1995.
- [74] T. Kohonen: "Self-Organizing Maps", *Springer Series in Information Sciences*, Vol. 30, Springer, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [75] T. Villman, B. Hammer, M. Stickert: "Supervised Neural Gas for Learning Vector Quantization", *Fifth German Workshop on Artificial Life*, IOS Press, pp. 9-18, 2002.
- [76] A. S. Sato, K. Yamada: "Generalized learning vector quantization", *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 7, MIT Press, pp. 423-429, 1995.
- [77] Golberg, M.A. and Chen, C.S.: "A bibliography on radial basis function approximation", *Boundary Element Communications*, 7(1996), 155-163.
- [78] Chua, L.O. and Roska T.: "The CNN Paradigm", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 40., March, 1993.

- [79] Roska T. and Chua, L.O.: "The CNN Universal Machine: an Analogic Array Computer", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 40., March, 1993.
- [80] Chua, L.O., Roska T. and Venetianer, P.L.: "The CNN is as Universal as the Turing Machine", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 40., March, 1993.
- [81] T. Matsumoto, T. Yokohama, H. Suzuki, R. Furukawa, A. Oshimito, T. Shimmi, Y. Matsushita, T. Seo, L.O. Chua, "Several Image Processing Examples by CNN", *Proceedings of IEEE Int. CNNA '90* pp.100-111, Budapest, 1990.
- [82] J.J. Hopfield and D.W. Tank: "Neural computation of decisions in optimization problems", *Biological Cybernetics*, 52:141-152, 1986.
- [83] E. Wacholder, J. Han, and R.C. Mann: "A neural network algorithm for the travelling salesman problem", *Biological Cybernetics*, 61:11-19, 1989.
- [84] G.V. Wilson and G.S. Pawley: "On the stability of the travelling salesman problem algorithm of Hopfield and Tank", *Biological Cybernetics*, 58:63-70, 1988.
- [85] Fantacci, R., Forti, M., Marini, M., Pancani, L.: "Cellular Neural Network Approach to a Class of Communication Problems", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, Vol. 46, No. 12., December, 1999.
- [86] Berg, Jan van den Bioch, Jan C.: "Constrained optimization with a continuous Hopfield-Lagrange model", *Discussion Paper*, no. 71, Erasmus University Rotterdam, Faculty of Economics, 1993.
- [87] E. H. L. Aarts, *Simulated annealing and Boltzmann machines: a stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing*, Wiley, 1989.
- [88] Jeney G., Levendovszky J.: "Stochastic Hopfield Network for Multi-user Detection", *Proceedings of ECWT'2000*, Paris.
- [89] B.C. Levy and M.B. Adams: "Global optimization with stochastic neural networks", *IEEE Conf. on Neural Networks*, San Diego, USA, 1987.
- [90] Jacek Mandziuk, *Optimization with the Hopfield network based on correlated noises: an empirical approach*, Technical Report, International Computer Science Institute, Berkeley, California (TR-97-019), 1997.
- [91] Levendovszky J.: "A Possible of the Fully Connected Neural Nets into Partially Connected Network", *Proceedings of IEEE Int. Workshop on Cellular Neural Networks and Their Applications*, (CNNA'90), pp.55-64, Budapest, 1990.

- [92] Cover, T.M. and Hart, P.E.: "Nearest Neighbor Pattern Classification", *IEEE Transactions on Information Theory*, Volume IT-13(1), pp.21-27, 1967.
- [93] Rekeczky Csaba, Leon O. Chua: "Computing with Front Propagation: Active Contour and Skeleton Models in Continuous-time CNN", *Journal of VLSI Signal Processing Systems*, Vol. 23, No. 2/3, pp. 373-402, November-December 1999.
- [94] Petrás I., Roska T., "Application of Direction Constrained and Bipolar Waves for Pattern Recognition", *Int. Workshop on Cellular Neural Networks and Their Applications (CNNA2000), Proc.*, pp. 3-8, Catania, Italy, 2000.
- [95] Wismer, D. A. and Chattergy, R.: *Introduction to nonlinear optimization*, System science and engineering, North-Holland, 1978.
- [96] G. Lián, S. Espejo, R. Domínguez-Castro E. Roca, and A. Rodríguez-Vázquez, "CNNUC3: A Mixed-Signal 64x64 CNN Universal Chip", *Proc. of the VII International Conference of Microelectronics for Neural, Fuzzy and Bio-inspired Systems*, pp.61-68, Granada, April 1999.
- [97] Analogic Computers Ltd., Aladdin Professional - CNNEdit manual and Extended Analogic Macro Code reference manual, Version 2.0, lab.analogic.sztaki.hu, Budapest 2002.