

NEUROBIOLÓGIA ÉS INFORMATIKA

Érdi Péter

a kémiai tudományok doktora, Henry R. Luce Professor
Center for Complex System Studies, Kalamazoo College, Kalamazoo, MI
és MTA KFKI Rézecske- és Magfizikai Kutatóintézet Biofizikai Osztály
perdi@kzoo.edu

1. A kibernetika szelleme: „A számítógép és az agy”

1949 és 1954 között a Josiah Macy, Jr. Alapítvány által támogatott konferenciák sorozatán bontakozott ki a kibernetikai mozgalom. A konferencia a biológiai és a társadalmi rendszerekben található visszacsatolási mechanizmusok megértésére szerveződött, és olyan fogalmak kerültek a megbeszélések központjába, mint a cirkuláris okság és az önszabályozó rendszerek. A találkozások valóban interdiszciplinárisak voltak (ez egy nehéz fogalom, könnyű vele visszaélni), matematikusok, mérnökök, neurofiziológusok és persze mások is részt vettek rajtuk. Ross W. Ashby, Gregory Bateson, Margaret Mead, Heinz Von Foerster, Warren McCulloch és Norbert Wiener mellett Neumann János is a résztvevők között volt. A kibernetikusok mozgalma mögött, legalább hallgatólagosan, az a nagy utópia állt, hogy a bonyolult (fizikai, biológiai, társadalmi) rendszerek megérthetőek és irányíthatók lesznek a szabályozási, kódolási, kommunikációs és szerveződési mechanizmusok és algoritmusok segítségével.

Neumann posztumusz könyve: *A számológép és az agy* (1964) a két fogalom közötti analógiát (a különbségekkel együtt) elemzi. Mennyire tarthatta komolynak Neumann azt a feltevést, hogy a számológép az agynak reális modellje lehet? Az akkori ismeretek alapján arra lehetett következtetni, hogy mind a számítógépek alapegységei, mind az

idegsejtek (neuronok) kétállapotú elemek, a belőlük létrehozott hálózatok viselkedését hasonló logika írja le. Így az idegrendszer és a számítógép között az elemi hardver szintjén lenne analógia. Ezen analógia hasznosságába vetett hitet erősíthették azok a matematikai tételek, amelyek szerint a számítógépek matematikai modelljei – az ún. Turing-automaták – és az idegrendszer akkori matematikai modelljei – a McCulloch-Pitts hálózatok – lényegében ekvivalensek egymással. Neumann nemcsak az analógia erejét, hanem korlátait is jól látta. Könyvének utolsó fejezetében, amelynek címe *Az agy nem a matematika nyelvét használja*, ezt írja: „... a mi matematikánk külső formái nem feltétlenül relevánsak annak mérlegetésére, hogy milyen matematikai vagy logikai nyelvet használ valójában a központi idegrendszer.”

1.1. Megbízható számítás megbízhatatlan idegsejtekkel

Az egyik témakör, amely Neumannt és McCullochot közösen érdekelte, az agy megbízható működése volt. Egy sokat idézett anekdota szerint (például Arbib, 2000), McCullochot hajnal háromkor felhívta Neumann: „Épp most végeztem egy üveg Crème de Menthe-tel. Az összes idegsejtem ingerküszöbe pokolian alacsony. Hogyan lehetséges, hogy mégis tudok gondolkodni?” (Az anekdota másik változata szerint McCulloch hívta Neumannt, és az ital whisky volt.) Há-

rom válasz jött szóba. Először is, Neumann expliciten beépítette a redundanciát az idegrendszeri modellekbe, így ha az egyes neuronok nem is működtek megbízhatóan, az idegsejtek együttese már igen. Másodsor, McCulloch azt feltételezte, hogy jól működő neuronhálózatokat lehet építeni olyan idegsejtekből, amelyek nem érzékenyek az ingerküszöb mérsékelt eltolódására. Harmadszor, Shmuel Winograd és Jack D. Cowan (1963) a zaj jelenlétében megbízható kommunikáció shannoni elméletét alkalmazta az idegrendszerre. Közel negyven év múltán ma már sokkal többet tudunk azokról az agyi mechanizmusokról, amelyek segítenek miniket a konferenciák bankettjein („kóktélparti effektus”) abban, hogy egyetlen hangra figyeljünk, s minden mást elnyomjunk (mindaddig, amíg egy előmenetelünk szempontjából még fontosabbnak vélt személy nem kerül látó- és/vagy hallóterünkbe). Idegrendszerünkre jellemző, hogy egyrészt az idegsejtek közötti kapcsolat elég ritka, másrészt egy adott pillanatban csak igen kevés tüzel. Újabbban megmutatták (például Natschläger et al., 2001), hogy a gyorsan változó dinamikus szinapszisok segítségével végzi az agykéreg azt a kóktélpartin is segítő gyors információfeldolgozást, amelyben a mai számítógépek nem tudnak versenyezni velünk.

Ami a neurobiológia és informatika mai kapcsolatait illeti, két területet villantok fel. Az első: a Human Brain Project és a neuroinformatika, a második: az idegrendszeri modellezés alternatív stratégiái. Rövid megjegyzéseket teszek az idegrendszeri kódolásról is.

2. Neuroinformatika

A neuroinformatika fogalma újabban kezd elterjedni. A *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks* első kiadásában (1995) még nem is szerepelt, a másodikban (2002) már igen. A *neuroinformatika* kifejezést szűkebb és tágabb értelemben is használják. Szűk értelemben az idegrendszeri

adatokat tároló adatbázisokat és vizualizációs módszereket értik alatta, míg tág értelemben az idegrendszeri modelleket is, amelyek segítenek strukturálni a tengernyi adattömeget. Nyilvánvaló, hogy a neuroinformatika a bioinformatika nevet kissé jogtalanul kisajátító nukleotidszekvencia és fehérjeszekvencia adatbázisok létrehozásával és elemzésével foglalkozó diszciplína sikerei nyomán jött létre. Maga a Human Brain Project mintegy tíz éve a Human Genome Project mintájára indult. A vulgáris kérdés az, hogy informatikai eszközökkel mit lehet és kell csinálni az idegrendszer kutatásában.

2.1. Adatbázisok szövetsége

Az idegrendszeri működés megértéséhez a genetikai szinttől a viselkedési szintig való integrációra van szükség (de tényleg!). A sokáig szétszórót kísérleti adatok egy részét ma már világháló alapú adatbázisokba szervezik. Így azután létezik egy sereg, specifikus idegrendszeri adatokat tartalmazó adatbázis. (Egy lista az európai számítógépes agykutatás honlapjáról: <http://www.hirnforschung.net/cneuro/> több mint negyven tételt tartalmaz.)

Nyilvánvaló, hogy az adatbázisok igen eltérőek. Találunk egysejt morfológiát tartalmazót, receptorok szerkezetét leíró adatsepreget, kérgi konnektivitási táblázatokat, agyterületek atlaszát, humán agyleképezési adatbázisokat, tárolt EEG-felvételeket és egyéb elektrofiziológiai idősorokat stb. Világos, hogy az új neuroinformatika megkívánja, hogy a különböző adatbázisok összekapcsolhatóak legyenek, a bonyolultabb kérdéseket csak így lehet megválaszolni.

Ahhoz, hogy a neuroinformatika az idegtudományra jelentős hatást tudjon gyakorolni, nem elegendő a megfelelő hardver és szoftver feltételek megteremtése, a jogi és szervezeti kereteket is meg kell teremteni. Az OECD országok neuroinformatikai munkacsoportja nemrégiben kiadott jelentése

szerint (Eckersley et al., 2003) a tudományos közvéleményt két ellentétes erő húzza. Egyrészt, a „nyitott tudomány” hagyományos etikai szabályai szerint az információkat és eszközöket meg kell osztani, és a munkacsoportok közötti kooperációt maximálisan támogatni kell. (Jogtechnikai szempontból a „copyleft” licenckek lettek népszerűek. A kifejezés a „copyright” fogalom ellentétéként, szójátékként keletkezett. Arra a hatalomra utal, amit a „copyright” törvény garantál, és a célja, hogy inkább a „köznek”, mint a „copyright” birtokosainak biztosítson előnyöket.) Másrészt, a kormányzati politika, az üzleti világ nyomása az adatok titkosítása irányába és a kompetitív szellem felerősítésének irányába hat. A jelentős írói azt remélik, hogy lehetséges a két szemlélet összeegyeztetése.

A neurális adatbázisok tervezése, szervezése, visszakeresése, elérhetővé tétele forrongó téma. A tág értelemben vett neuroinformatika felismerte, hogy az óriási irodalmi adattömeget és a folyamatosan generált adatokat meg kell próbálni koherens képpé szervezni. Ez nem lehetséges modellek nélkül. Ezt mostanára szinte minden ország agykutatói belátták.

3. Idegrendszeri modellek: a koherens értelmezés nélkülözhetetlen eszköze

Szentágothai János Erdős-száma kettő (aki véletlenül nem tudja, hogy mi is ez a szám, itt nézhet utána: <http://www.oakland.edu/~grossman/erdoshp.html>). Szentágothainak van egy 1956-os közös cikke Rényi Alfréddal, amelyben valószínűségszámítási módszereket használtak a szinaptikus hatások térbeli összegeződésének megbecslésére. 1968-as akadémiai székfoglalója pedig a neuronhálóról szól, annak a tudománynak a tárgyáról, amelyet akkor neurokibernetikának hívtak. Nagyon is tudatában volt annak, hogy milyen szerepet játszhatnak a modellek az agyműködés megismerésében, milyen fontos, hogy a modellszemléletet a

neuronhálózatok szerkezete és működése közötti összefüggések megértésére is alkalmazzuk. Talán nem érdektelen e folyóirat olvasóinak, hogy a Magyar Tudományos Akadémia egykori elnökének van egy társ-szerzőkkel írt posztumusz könyve, amely az adatok és modellek közötti folyamatos kölcsönhatás lehetőségeit mutatja be (Arbib et al. 1997).

Egy olyan nagy rendszert, mint az agyunkat, kétféle stratégiával közelíthetünk meg. Az egyik szerint a rendszer egészét tekintjük, és megpróbáljuk kitalálni, hogyan működik, majd kigondoljuk, milyen mechanizmussal – a mi esetünkben milyen neurális implementációval – teszi ezt. A másik: meg kell próbálni felépíteni a rendszert az alapelemekből, például a neuronokból. El kell képzelnünk, ezek hogyan kapcsolódnak össze, milyen viselkedést, ritmusokat mutatnak a maguk szintjén, milyen tanulási szabályokkal ismernek fel bizonyos mintázatokat, végül hogyan működik az egész.

Tehát felülről lefelé haladó (top-down) és aluról építkező (bottom-up) megközelítéssel dolgozhatunk. Az aluról építkező technikáknak is vannak azonban különféle szintjei. A neuronról mondhatjuk (a McCulloch-Pitts-modell szellemében), hogy tüzel vagy nem tüzel, tehát jellemezhetjük binárisan, vagy foglalkozhatunk azzal az egész elektrokémiai masinériával, amely akciós potenciált, vagyis egy jelet generál. Ilyenkor a megfelelően kiterjesztett Hodgkin-Huxley-egyenletet használva jó néhány differenciálegyenlet kell ahhoz, hogy egyetlen neuron viselkedését leírjuk. 10 neuron esetén ez nyilvánvalóan lehetetlen.

A neuronhálózati modellek (gyakran túlegyszerűsített) aktivitásdinamikát, továbbá tanulási szabályokat felírva kétszintű dinamikát használnak. Kissé pontosabban fogalmazva, a hálózatnak megfeleltetett gráf csomópontok és élek állapotai is változnak az időben. A tanulási szabályok Donald Olding

Hebb híres (verbálisan megfogalmazott) algoritmusait számos neurobiológiailag reális és/vagy számítástechnikailag hatékony algoritmust javasoltak (Érdi – Somogyvári, 2002).

Régóta foglalkozunk azzal, hogy – valamiféle kompromisszumot kötve – úgy építsünk fel statisztikus neurodinamikát, hogy a mikroszkopikus és makroszkopikus szintet valamiképpen összekötve megtartsunk az egyedi tulajdonságokból legalább annyit, amennyi feltétlenül fontos, és még számítható is maradjon a rendszer (Kiss – Érdi, 2002). A matematikai modellek idegrendszer-kutatásbeli szerepéről bővebben itt írtunk: Érdi – Lengyel, 2003.

4. Kódolás

Az idegrendszer lényege, hogy dinamikus mintázatokat generál. Az egyes idegsejtek az őket ért ingerek hatására jelek sorozatával válaszolnak. A neuronok nagyjából állandó amplitúdójú elektromos impulzusok (akciós potenciálok) sorozatával („tüzeléssel”) kommunikálnak egymással. Noha nem teljesen felderített az a kódolási séma, hogy az észleletek, fogalmak és döntések hogyan tárolódnak az ilyen sorozatokban, jelenleg úgy tűnik, az idegrendszerben több kódolási stratégia keveredik. Régóta ismert dogma, hogy az idegrendszer frekvenciakódot használ.

Újabbban az is kiderült, hogy a tüzelési mintázatok finomszerkezete is hordoz információt. (Szép összefoglalót ad az idegi kódolásról Fiser József és Nádasdy Zoltán, 2003).

Az elmúlt évek fontos fejleménye, hogy a mozgó állat helyét a tüzelések időzítése kódolhatja (O’Keefe – Recce, 1993). A fázis-előrecsúszás hármas kapcsolatot fejez ki az

állat helye, a helysejtek aktivitása és a lokális térpotenciálok időmintázatai között. Ifjú munkatársaimmal anatómiailag reális mozgárgyázó modellt adtunk arra, hogy a sejt különböző alstruktúrái miként járulnak hozzá a többfajta kódolási mechanizmus csatolásán alapuló információkódolás kialakításához (Lengyel et al., 2003).

5. Záró megjegyzések

A Turing-gépek és az idegrendszer logikai szerkezete közötti hasonlóságra alapozva a kibernetikusok mozgalma ötven évvel ezelőtt talán túlhangsúlyozta a számítógép és az agy közötti analógiát. Mindazonáltal újra és újra felmerül az a kérdés, hogy az idegrendszeri mechanizmusokról szerzett ismeretek hogyan használhatók fel egyrészt új elvű „intelligens” számítási rendszerek, másrészt hatékony algoritmusok tervezésében.

A jelenlegi számítástechnikai berendezések ugyanis nem rendelkeznek azzal a rugalmassággal és megbízhatósággal, amellyel a biológiai információfeldolgozási rendszerek. Noha az idegrendszer strukturális, funkcionális és dinamikus megközelítésének integrálásában az elmúlt évtizedben értünk el haladást, az eredményeknek kevesebb hatása volt a számítástudományra, mint lehetne.

Nem vitás, hogy a matematikai és informatikai módszerek az új neurobiológiának letagadhatatlanul részévé váltak. Ugyanakkor azt is reméljük, hogy az idegtudományi eredmények új típusú számítógép-architektúrákhoz vezetnek (Wermter et al., 2001).

Kulcsszavak: *neurobiológia, informatika, kibernetika*

IRODALOM

- Arbib, Michael A. (1995, 2002): *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. MIT Press, Cambridge, Mass
- Arbib, Michael A. (2000): Warren McCulloch’s Search for the Logic of the Nervous System. *Perspect Biol. Med.* 43, 193-216
- Arbib, Michael A – Érdi Péter – Szentágothai János (1997): *Neural Organization: Structure, Function and Dynamics*. The MIT Press, Cambridge–London
- Eckersley, Peter – the OECD Working Group in Neuroinformatics (2003): *Neuroscience Data and Tool Sharing: A Legal and Policy Framework for Neuroinformatics*. *Neuroinformatics*, 1, 149-166.

- Érdi Péter – Lengyel Máté (2003): Matematikai modellek az idegrendszer-kutatásban. In Pléh Csaba – Kovács Gyula – Gulyás Balázs (szerk): *Kognitív idegtudomány*. Osiris, Budapest, 126-148.
- Érdi Péter – Somogyvári Zoltán (2002): Post-Hebbian Learning Algorithms. in Arbib, Michael A. (ed.) *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*. second ed. The MIT Press, Cambridge, 898-901.
- Fiser József – Nádasdy Zoltán (2003): Neurális kódolás térben és időben. in Pléh Csaba – Kovács Gyula – Gulyás Balázs (szerk): *Kognitív idegtudomány*. Osiris, Budapest, 171-201.
- Kiss Tamás – Érdi Péter (2002): *Mesoscopic Neurodynamics*. *BioSystems*. 64, 119-126.
- Lengyel Máté – Szatmáry Zoltán – Érdi Péter (2003): Dynamically Detuned Oscillations Account for the Coupled Rate and Temporal Code of Place Cell Firing. *Hippocampus*. 13, 700-714.
- Natschläger, Thomas – Maass, Wolfgang – Zador, Anthony M. (2001): Efficient Temporal Processing with Biologically Realistic Dynamic Synapses. *Network: Computation in Neural Systems*. 12, 75-87.
- Neumann János (1964): *A számológép és az agy*. Gondolat, Budapest
- O’Keefe, John – Recce, Michael (1993): Phase Relationship Between Hippocampal Place Units and the EEG Theta Rhythm. *Hippocampus*. 3, 317-330.
- Szentágothai János – Rényi Alfréd (1956): Az ingerületátvitel valószínűsége egy egyszerű konvergens kapcsolású interneuronális synapsys modellben. *MTA Matematikai Kutató Int. Közl. I.*, 83-91.
- Szentágothai János (1968): Neuronhálózatok és neuronhálózati modellek. *MTA Biológiai Osztály Közleményei*. 11, 61-71.
- Wermter, Stefan – Austin, Jim – Willshaw, David (eds.) 2001. *Emergent Neural Computational Architectures Based on Neuroscience*. Springer, Heidelberg
- Winograd, Shmuel – Cowan, Jack D. (1963): *Reliable Computation in the Presence of Noise*. MIT Press, Cambridge, MA

