

Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskola Természettudományi
Tanszék

Az idegrendszer tárolási folyamatának dinamikája

Jólesz Ferenc

Az idegrendszer tárolási folyamatainak dinamikája az utóbbi évtizedek idegrendszeri kutatásainak homlokterébe került. Nehéz kiigazodni a hipotézisek látszólag kusza szövedékében, ami elsősorban a multidiszciplináris megközelítés következménye. A memória kutatása tipikusan határterületi jellegű és már ebből is számos nehézség adódik, a határozott előnyök ellenére. Nem csak arra gondolunk, hogy a definíciók különbözőek és nem minden esetben feleltethetőek meg kölcsönösen egyértelműen, hanem arra is, hogy a problémamegközelítés utjai is annyira szerteágazóak, hogy a módszerek és a kísérleti objektumok változatossága bizonyos esetekben lehetetlenné teszi az eredmények összevetését, és így a felhasználható adatok nagy része elkerüli a témakörben érdekelt figyelmét. Természetesen a problémakör komplexitása eleve megköveteli a komplex megközelítést, de ez nem zárja ki, sőt feltételezi az egységes szemléletre való törekvést.

Nem lehet célunk a témában érdekelt szaktudományok problémáinak megfelelő, a teljesség igényével fellépő, egységes szemlélet kifejtése, csupán megemlítünk a különböző elméleti elképzelések és kísérleti adatok interpretálásával kapcsolatos néhány olyan kérdést, amely esetleg elősegítheti ennek a szemléletnek a kialakulását. Elsősorban az előző előadásunkban (Jólesz, Szilágyi 1974) elhangzottakra támaszkodunk, ahol kiemeltük a mérési kölcsönhatások szerepét az idegrendszer működésében. A jelen előadásban viszont megkíséreljük a mérési szemléletet az idegrendszer tárolási folyamatainak dinamikájával kapcsolatos kérdéskomplexum megközelítésére felhasználni.

Kétségtelen, hogy az egységes szemléletmód szaktudományos bázisa elsősorban a biológia. Minden információ-tárolási mechanizmus megismerésének és leírásnak "etálonja" az idegrendszer tárolási folyamata, amit a memória szó általános alkalmazása is mutat. Megítélésünk szerint - figyelembevéve a kibernetika és ezen belül az automataelmélet és számítógéptudomány fejlettségét - még ma sem nélkülözhetők egyetlen alapvető koncepció kialakításánál sem a biológiai (élettani és pszichológiai) adatok. Valójában ezek a tapasztalatok (beleértve a konkrét kísérleti adatokat is) lényegében a jelenségek körére szorítkoznak, azonban a jelenségek szintjén történő megismerés feltétele a teljes megértésnek. Ezt a jelenségek körét egészítik ki a más tudományterületek értelmezése során kialakuló elméleti rendszerek és kísérleti módszerek, melyek valószínűleg jelentősen megrövidítik a jelenségszférától a lényegi megismeréshez vezető utat.

Az idegrendszeri memóriával kapcsolatos kutatásoknak és a kísérleti adatok értelmezésének kiindulópontja ma elsősorban az elméletalkotás és ezen belül a modellalkotás. Ez egyes esetekben oda vezetett, hogy a modellt tekintették elsődlegesnek, vagyis a biológiai jelenségekben mutatkozó analógiát szinte másodlagosként hozzáidomították - a modell szemléletessége érdekében - a leíráshoz. Ez, szerintünk, mindenképp negatív mozzanat, aminek elsősorban az az oka, hogy egy jól sikerült, azaz komplex információ-tárolásra képes tárgyi, vagy matematikai jellegű mechanizmus nem szükségképpen modellje a biológiai memóriának. A biológiai jelenségeket a modellek megalkotásánál figyelmen kívül hagyó és utólag analógiát kereső információ-tárolási módszerek kutatása rendkívüli eredményeket ért el, amelyek jól ismertek a számítógépek "történelméből". Felsorolásuktól, ill. elemzésüktől eltekintünk. Ami a memória általános fogalmát illeti, az a kibernetika kialakulása idején teljes összhangban volt az idegrendszer tárolási folyamatainak kutatási feladataival és megismerési módszereivel és ezért, részben az általános fogalom következményeként jelentkező említett negatív tendenciák ellenére, még ma is heurisztikus szerepet játszik.

A továbbiakban a különböző memória-elméletek és az előző előadásban vázolt idegrendszeri kölcsönhatástípusok összefüggéseire szeretnénk rámutatni.

Az idegéletteni kutatásoknak eredetileg kizárólag az idegrendszerben és annak elemeiben: a neuronokban lejátszódó folyamatok leírása és megismerése volt a feladata. Ez azonban csak látszólag funkcionális elemzés, mert szemlélete alapvetően strukturális jellegű. Bár a leglényegesebb szempont az ingerületi folyamatok elemzése volt, de feltételezték, hogy az egyes neuronális objektumok igen nagyfokú individualitással rendelkeznek, azaz a strukturális jellemzők, amelyek az A típusu kölcsönhatások megnyilvánulási formái, a küszöb alatti (B típusu kölcsönhatások) és a küszöb feletti (C típusu kölcsönhatások) folyamatok során nem változnak. Ennek a szemléletnek a következménye, hogy az ingerülettel kapcsolatos állapotváltozások az objektum (agy, részrendszerei, idegsejtek) egészét változatlanul hagyják, alapvető strukturális minőségét nem befolyásolják. Ezt úgy fejeztük ki, hogy a B és C kölcsönhatások nem módosítják az A típusuak együttesét, azaz az objektum minősége és alkotórészeinek száma az ingerületi folyamatok alatt változatlan, stabil. Az idegsejtek nem osztódnak és a csatolásaikat lehetővé tevő kapcsolatok, huzalozások (axon, dendrit, szinapszis) száma és térbeli elrendeződése állandó, illetve az ingerületi folyamatokkal kapcsolatban nem módosul. Csupán egyik vagy másik állapothatározója (küszöb, membránpotenciál, ingerületvezetési sebesség, intra-, vagy extracelluláris ionkoncentráció), ill. azok egy csoportja változik meg.

Az objektumok individualitásával kapcsolatos felfogás közvetlen következménye volt, hogy bár az állapotváltozást mindig kölcsönhatással magyarázták (inger-ingerület), nem vették figyelembe, hogy a kölcsönhatás egyben mérés is, vagyis a mérési kölcsönhatás nem hanyagolható el a mért állapotváltozást (membrán-potenciál változása, a neuron kislüléseinek gyakorisága) meghatározó kölcsönhatásokhoz (inger) képest. Éppen a neuronális objektumok nagyfokú individualitása miatt volt ennek a korszaknak alapvető fogalma a neuron. Természetesen a

kölcsönhatások realitását elismerték, de ezeket mindig a neuronhoz rendelték, ezzel fejezve ki azt, hogy az objektumok nagyfokú individualitása úgy nyilvánul meg, hogy az ingerületi folyamatok során önmagukkal azonosak maradnak. Ez a felfogás az állapotokat és az állapotváltozásokat nem a kölcsönhatásokhoz, hanem a neuronális objektumokhoz rendeli.

A memória feltételezése olyan elméleti megfontolásokhoz vezetett, amelyek nem illeszthetők be az említett szemléletmódbba. A tárolás folyamata ugyanis elvileg összeegyeztethetetlen a neuronális objektumok alapvető és megváltoztathatatlan individualitásával. Az ingerület következtében fellépő nyomfolyamatok megváltoztatják a neuronális objektumok belső stabilitását, azaz az ezt biztosító A típusú kölcsönhatások együttesét. A továbbiakban D típusú kölcsönhatásoknak nevezzük azokat, amelyek az A típusú kölcsönhatások spektrumát módosítják. Ezek feltételezése azt is jelenti, hogy az információs folyamatok egyben energetikaiak is, a nyomjelenségekkel kapcsolatban olyan fizikai változások lépnek fel, amelyek a neuronális objektumok strukturális (morfológiai) módosulásához vezetnek. Az A típusú kölcsönhatások révén biztosított strukturális állandóság egyben a rendszer elemeinek csatolási lehetőségeit is stabilizálja. Ez egy meghatározott keretet jelent, azonban nem determinálja a rendszer egyes részei között létrejövő, különböző tér- és időbeli viszonyokat megvalósító konkrét csatolásokat. A struktúra adott lehetőségein belül a B típusú kölcsönhatások véletlen jellegű, térben és időben instabil laza csatolásokat valósítanak meg a rendszer egyes részei között, míg a C típusú kölcsönhatások a mérés időtartamára stabil és szoros csatolást biztosítanak a mérésben résztvevő két részrendszer között (kölcsönhatási egyensúly). A csatolás, amely egy dinamikus rendszer részét egy nagyobb rendszerré egyesíti (a mérendő objektum és a mérőobjektum, amelyek szerepe felcserélhető a mérés során, egy rendszerként kezelendők) energetikai és információs kapcsolat. Az energetikai és az információs kapcsolat között nincsen éles határ, azonban a mérési kölcsönhatásban fel kell tételeznünk az információs csatolást is, mert a mérés időtartamára egyesített rendszer változásainak törvényeit nem lehet teljes egészükben olyan külön-

álló törvények együttesével kifejezni, amelyek csupán részrendszerek közötti energiacserét fejeznek ki.

A D típusu kölcsönhatások struktúra-módosító szerepe mindenképpen a tárolási folyamat energetikai jellegét fejezi ki. Azonban a memória egyben információ-tárolási mechanizmus is, az A típusu kölcsönhatások konfigurációjának változása egy meghatározott információt vagy információk egy lehetséges sorozatát reprezentálja. Mivel az információk (események) a mérési szemlélet értelmében mérési eredményeknek, vagy mérési eredmények sorozatának formájában valósulnak meg, melyekhez a rendszer meghatározott állapota vagy állapotai (sajátállapotok) tartoznak, feltételezzük, hogy egy információ vagy információk egy osztálya csak C típusu kölcsönhatások révén tárolódhat. Elképzelésünk szerint a C típusu kölcsönhatások együttesének egy bizonyos konfigurációja D típusu kölcsönhatást eredményez, hasonlóan ahhoz, mikor a B típusuak egy bizonyos konfigurációja C típusu kölcsönhatáshoz vezetett.

Ebből bizonyos konklúziók vonhatók le. Mivel a D típusu kölcsönhatás a C típusuak együttesének következménye, a tárolás nem egy meghatározott elemi információra, hanem az információk egy osztályára vonatkozik, melynek elemei között bizonyos szoros kapcsolat van. Mivel a C típusu kölcsönhatás egy neuronális objektumon vagy egy neuronális részrendszeren jött létre, a D típusu kölcsönhatás ezek sokaságára vonatkozik, tehát egy neuronhálózat, vagy neuronpopuláció A típusu kölcsönhatásainak spektruma, azaz a lehetséges csatolások térbeli elrendeződése fog megváltozni a tárolás során.

Az A típusu kölcsönhatásokban azonban nem is tárolható egy konkrét információ, mivel ezek a kölcsönhatások az objektum állapotát nem határozzák meg és a rendszerben egy meghatározott eseményhez vagy információhoz meghatározott állapot tartozik. Az A, B, C kölcsönhatások csak együttesen határozzák meg az objektum állapotát. A tárolt információk megismerése csak közvetett jelleggel képzelhető el, ha a tárolás D típusu kölcsönhatás eredménye. A tárolás, ill. előhi-

vás folyamatában egyaránt megnyilvánul az idegrendszeri folyamatok statisztikus-valószínűségi jellege. Az objektumok állapotának kialakításában és így egy információ mérésében nemcsak az \bar{A} típusu kölcsönhatások vesznek részt, hanem a rendszer egyéb részeiben lezajló események, kölcsönhatások aktuális konfigurációját reprezentáló \bar{B} típusu kölcsönhatások is. Mindebből az is következik, hogy az \bar{A} típusu kölcsönhatásokkal (és így a tárolt információkkal) kapcsolatos ismereteink közvetettek, vagyis megismerésük csak a \bar{B} konfigurációjának tér- és időbeli stabilitása, szoros csatolást létrehozó \bar{C} típusu kölcsönhatás, esetén lehetséges. Tehát az egész rendszer, mint kölcsönhatások halmaza, egy sajátos objektív vonatkoztatási rendszer szerepét játssza. A vonatkoztatási rendszer fogalmát abban az értelemben használjuk, hogy az mindig valamely \bar{A} típusu kölcsönhatások révén körülhatárolt neuronális objektumnak (részrendszernek vagy neuronpopulációnak) a vele kölcsönhatásban lévő más objektumokhoz való viszonyát jelenti. Az \bar{A} típusu kölcsönhatásokban lehetséges információk, vagy az információk egy lehetséges osztálya tárolódhat, de közvetlenül nem képezheti az észlelés (mérés) tárgyát. Saját szintjén egy konkrét strukturát jelent, amely meghatározott huzalozású és így csatolásban lehet más neuronális strukturákkal, függetlenül attól, hogy \bar{C} típusu kölcsönhatás létrejön, vagy sem.

Az \bar{A} típusu kölcsönhatások kombinációjában lehetségesként benne rejlő információk az objektumoknak a különféle \bar{B} kölcsönhatásokban való lehetséges viselkedési módjait fejezik ki. Ezek közül egy tényleges megvalósulás csak a megfelelő kölcsönhatáseggyüttesben lehet, amelynek feltételeit azonban már nem az objektum, hanem a vele kölcsönhatásban (csatolásban) lévő egyéb objektumok (részrendszerek) állapotai (kölcsönhatása) szabják meg. Tehát a rendszer egésze, mely egyben a mérési eredmények vonatkoztatási rendszere, aktív szerepet játszik a megvalósult állapot (információ) kialakításában. Ez a tárolás és az előhívás folyamatára egyaránt igaz, hiszen mindkettő mérési folyamat. A különbség csak az, hogy a tárolásnál a mérési aktust (\bar{C} típusu kölcsönhatás) regisztrálás (\bar{D} típusu kölcsönhatás) követi, míg az előhívás a \bar{D} típusu kölcsönhatások révén módosult \bar{A} típusu kölcsönhatások lehetséges spektrumán végrehajtott mérés.

Ha figyelembe vesszük, hogy a D típusu kölcsönhatások révén az objektumnak a rendszer egyéb részeivel való csatolási lehetősége megváltozik, akkor feltételezhetjük, hogy a vonatkoztatási rendszer aktív szerepe igen nagy jelentőségű a memória szempontjából. Passzív vonatkoztatási rendszer esetében, mikor $D = 0$ és $B = 0$, vagyis nem változik az objektumok individualitása, nincs nyomfolyamat és a rendszer egyéb részeivel sincs kölcsönhatás, akkor a memória létezését sem képzelhetjük el a rendszerben. Ha B nem egyenlő 0 , de $D = 0$, akkor a vonatkoztatási rendszer aktívan befolyásolja a neuronális objektumok megvalósult állapotát, tehát a mérést, de nem lehetséges, hogy az aktuális információkat időben megelőző információk is befolyásolják a mérést, mivel a B típusu kölcsönhatások mindig csak a rendszer pillanatnyi kölcsönhatásainak együttesét képviselik. Végül B és D fennállása esetén a vonatkoztatási rendszertől függően a rendszer lehetséges csatolásainak spektruma is megváltozhat úgy, hogy a mérés kimenetelét egyaránt befolyásolják az aktuális és a már lezajlott kölcsönhatások.

A tárolási folyamatok statisztikus jellege nem csak a B típusu kölcsönhatásokra vezethető vissza, azaz a neuronális objektumoknak az állandóan változó külső és belső környezettel való kölcsönhatására, hanem azzal is magyarázható, hogy a D típusu kölcsönhatások már eleve a valószínűségi lehetőségeket körvonalazó A típusu kölcsönhatások együttesére hatnak. Véleményünk szerint a memória anyagi meghatározottsága (tér- és időbeli stabilitása) és statisztikus-valószínűségi jellege nem mond ellent egymásnak. Ez azt jelenti, hogy a neuronális rendszerek állapotának változása saját belső kölcsönhatásai és más objektumokkal való kölcsönhatásai változásának a következménye, tehát a mért információk egyaránt tükrözik a már lezajlott és az aktuálisan végbemenő eseményeket. A rendszeren belül, a kölcsönhatások együttesében és egy kölcsönhatáson belül az információfeldolgozás folyamatát meghatározó tendenciák érvényesülnek. Egy konkrét mérés eredménye véletlen jellegű, az aktuálisan lezajló események, a kölcsönhatások konfigurációjának változása miatt. Ennek ellenére a struktúrát meghatározó A típusu kölcsönhatások stabil jellegéből kifolyólag a mérési eredmények eloszlása meghatározott, de csak az ob-

jektumok sokaságán végzett mérésekben, ill. a mérések halmozásban tükröződik. Azt ugyanis, hogy a neuronális objektumnak a környezettel való kölcsönhatása meghatározott karaktert mutat, pontosabban azt, hogy az objektum a környezet kölcsönhatásaira milyen korlátozásokkal és milyen módon reagál, elsősorban az A típusu kölcsönhatások együttese határozza meg. Az A típusu kölcsönhatások által alapvetően meghatározott rendszer változása a D típusu kölcsönhatások révén (C kölcsönhatások kombinációján!), így a rendszer környezettel való kölcsönhatásainak megváltozásához, a környezethez való alkalmazkodáshoz vezet, ez pedig memória-funkciót feltételez.

A jelenleg elfogadott elméletek a tárolással kapcsolatos maradandó változásokat különböző celluláris és szubcelluláris szinteken feltételezik. A memória alapjait képező fizikai változások azonosításuk még máig sem megoldott kérdés és többé-kevésbé elfogadott kísérleti eredmények ellenére lényegében hipotézisek. Véleményünk szerint ezek az A típusu kölcsönhatások módosulásával egységes szemléletbe illeszthetők. Ezek közül a legfontosabbak a neuronok huzalozásának módosulása, a szinapszisok, axonok, dendritek számának, ill. térbeli elrendeződésének változása, amelyeknek oka lehet az idegsejtek nukleinsav szerkezetének, ill. tartalmának változása a D típusu kölcsönhatások révén. Minden bizonnyal a memóriával kapcsolatos kutatások további eredményes fejlődése elsősorban azon múlik, hogy sikerül-e az általunk D típusu kölcsönhatásoknak nevezett minőségi átalakulásoknak, vagy ami ugyanaz, a neuronális objektumok individualitása időbeli korlátozottságának adekvát elméleti kifejezését megtalálni.

Diszkusszió

Véleményünk szerint a tárolási folyamatok és az aktuális információfeldolgozás éles elkülönítése nem indokolt. Figyelembe véve az említett kölcsönhatástípusok (A, B, C, D) szerepét az idegrendszer működésében a következőket mondhatjuk:

1. Egy meghatározott információ (esemény) mérése és tárolása mindig mérési kölcsönhatás (C) eredménye, mely az A típusu kölcsönhatások révén körülhatárolt (lokalizált) neuronális objektum

(részrendszer) meghatározott állapotában (sajátállapot) tükröződik. Ennek az állapotnak és a hozzá tartozó mérési eredménynek a kialakításában azonban a rendszernek a mérőobjektummal csatolásban lévő (B típusu kölcsönhatások) egyéb részei is résztvesznek. A mérést követő regisztrálás aktusa már eleve nem lokalizált jellegű, hanem térben és időben elosztott folyamat, mert a D típusu kölcsönhatások a C típusu kölcsönhatások együttes konfigurációját tükrözik; az információs csatolások energetikai jellegét az A típusu kölcsönhatások változása fejezi ki. Az objektum individualitásának időbeli korlátozottsága azonban az információs csatolások lehetőségeinek módosulásához vezet. Az objektumon végrehajtott további mérések alkalmával a mérési eredmények lehetséges spektruma már más lesz. A tárolás tehát nem egy meghatározott információra, hanem az információk egy osztályára vonatkozik, mivel az A típusu kölcsönhatásokban tárolt lehetséges információk egyikének méréséhez a B típusu kölcsönhatások konfigurációjának, azaz a háttérnek egy meghatározott tér- és időbeli eloszlása szükséges. Utalunk itt Wiener elképzeléseire, melyek szerint a memória és a jelenidejű információfeldolgozás kapcsolatban van az idegrendszer "háttéraktivitásával", ami nem más, mint az idegrendszer egészében aktuálisan végbemenő folyamatok összességének hatása egy meghatározott részfolyamatra, ami természetesen más folyamatok szempontjából maga is intern része a háttérnek. Ezzel kapcsolatos elképzeléseit a csoportletapogatósi módszerek alkalmazásának kérdésénél is felveti, de részletesebben az un. "affektív tónus" elemzése során körvonalazza (Wiener 1961).

2. Mivel a mérés (C típusu kölcsönhatás) a kölcsönhatásban résztvevő objektumok egyensúlyi állapotra vezető folyamata, két kölcsönhatás-halmaz asszociatív kapcsolatát, azaz részrendszerek szoros csatolását jelenti. Mivel a mérés és a tárolás, vagy regisztrálás egyazon mérési folyamat két oldala, az asszociációs mechanizmusok nem kizárólag a memóriára vonatkoznak, hanem az idegrendszer kölcsönhatásokkal leírható működésének általános jellemzői (Nakuono 1972). Mivel minden jelenidejű információfeldolgozás egyben előhívás (az A típusu

kölcsönhatásokban tárolt lehetőségek megvalósítása) és a tárolás is (a C típusu kölcsönhatások együttese D típusu kölcsönhatáshoz vezet), az idegrendszer mérési folyamata "memóriaorientált információs folyamat" (Post 1969).

3. Egy komplex esemény-, vagy információhalmaz mérése, az elemi információk által kiváltott C típusu kölcsönhatások halmaza. Ezek egymástól független mérési folyamatoknak tekinthetők és térben-időben elkülönülnek. A komplex információ mérése, ill. tárolása csak úgy lehetséges, ha ezek a független mérések, ill. kölcsönhatások egymással szoros kapcsolatba kerülnek. Ez csak úgy képzelhető el, ha

a.) a komplex információ mérésében résztvevő különböző rendszerek egymással huzalozásos kapcsolatban vannak (A típusu kölcsönhatások),

b.) az A típusu kölcsönhatások által biztosított csatolási lehetőségek aktuálisan meg is valósulnak (B típusu kölcsönhatások),

c.) a B típusu kölcsönhatások, egy újabb kölcsönhatási szinten, C típusu kölcsönhatást eredményező tér- és időbeli eloszlást mutatnak. Mivel az egyes B típusu kölcsönhatások (az újabb kölcsönhatási szint "hátterének" elemei) eredetileg (saját kölcsönhatási szintjeiken) C típusúak voltak, az újabb mérési kölcsönhatás az elemi információk együttesére vonatkozik. Mivel a D típusu kölcsönhatás a C típusúak együttes konfigurációjának következménye, egy komplex információ tárolása és előhívása is több lépésben (térben és időben elosztva) megy végbe.

Ezek alapján feltételezzük, hogy a regisztrálás aktusa nem pillanatnyi, hanem folyamat, a tárolt információ elemeinek mérésével egyidejűleg, a mérési eredmények különböző konfigurációi D típusu kölcsönhatásokat eredményeznek. A tárolási folyamat időfüggése (Harth 1966) a különböző kölcsönhatási szinteken történő mérés (Foerster és mtsi 1966) időbeli eloszlásával hozható összefüggésbe.

4. Mivel egy komplex információ rögzítése, elemeinek, ill. azok különböző konfigurációjának nem egyidejű és nem azonos lokalizációjú mérésével kapcsolatos, természetesen, hogy meghatározott információk előhívása esetén az információ elemeinek "elérési ideje" (Neumann 1959) is különböző lesz.

5. A mérési eredmények reprezentációja nem lokális és nem pillanatnyi, hanem térben és időben elosztott. A holisztikus jelleg következménye, hogy az információk feldolgozásának elemi jellege ellenére észlelésük már csak asszociációs (csatolt) rendszerükben történhet, hasonlóképpen a tárolás is az információk adott csoportjára vonatkozik. Egy esemény kölcsönhatása a rendszerrel bizonyos ideig tart. Ezzel magyarázható a dinamikus memória (Harth 1966), vagy más szóval short term memory feltételezése, ami szerintünk nem a tárolás egyik formája, hanem "dinamikus", vagy "mérési" folyamat jellegének következménye.

Irodalom

1. Harth, E.M.: Time dependence in memory in Oestreicher-Moore (ed.): Cybernetic problems in bionics. Gordon Breach N.Y. (1966.)
2. Jólesz F., Szilágyi M.: Dinamikus biológiai rendszerek stabilitásának elemzése és a mérési folyamat. NJSZT közlöny (1974.)
3. Foerster, H.V., A. Inselberg: Memory and inductive inference in Oestreicher-Moore (ed.) Cybernetic problems in bionics. Gordon and Breach N.Y. (1966.)
4. Nakauno, K.: Associatron- A model of associative memory. IEE Transaction on systems, man and cybernetic Vol. SMC 2/3, 380, (1972).

5. Neumann, J.V.: The computer and the brain. Yale University Press N.Y. (1959).
6. Post, P.B.: A lifelike model for association relevance. Proc. Int. Joint Computer Conf. Artificial Intelligence (1969.)
7. Wiener, N.: Cybernetics. MIT Press and John Wiley and Sons, N.Y. (1961.)