

# **Beszámoló a 2017/2018/1 félévről**

Balogh Gáspár Sámuel

Statisztikus Fizika, Biológiai Fizika és Kvantumrendszerek Fizikája doktori program

A 2017/2018/1 félévben két különböző problémakört elemeztem. Az egyik idegsejtek korrelációs hálózatának vizsgálatával, a másik pedig általánosított entrópia fogalmakkal foglalkozott.

## **1, Idegsejtek korrelációs hálózatának elemzése**

### **1.1, Bevezetés**

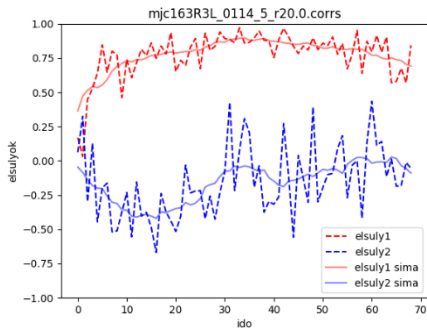
A következőkben részletesen tárgyalt problémakörrel Baracska Péter, biológus kereste meg témavezetőimet Pollner Pétert és Palla Gergelyt 2017 nyarán. Baracska Péter Csicsvári József kutatócsoportjában dolgozik a Klosterneuburgi *Institute of Science and Technology Austria (IST Austria)*-ban, ahol állatok (patkányok) különböző agyi tevékenységének vizsgálatával, főként a tanulás folyamatával foglalkoznak, *in vivo*. Az együttműködés célja a tanulásra fókuszáló, biológiai kísérletekből kinyert korrelációs adatok feldolgozása és a tanulást reprezentáló mintázatok hálózatelméleti szempontból való elemzése. Mivel ezek a mintázatok a tanulási folyamat során időben változnak, és várhatóan több, különböző szintű irányító sejt/sejtcsoport határozza meg a tanulás sikerességét, a doktori témámhoz kapcsolódó, kísérletközeli kutatásba kapcsolódtam be.

A kísérletben az állatok (több, különböző egyed) egy jutalmazás alapú, komplex tanulási folyamaton mentek keresztül. Ennek során a hippocampusba injektált elektromos jeleket mértek együtt-tüzelési, együttmozgási görbéket, amelyek alapján a neuronok között egy korrelációs hálózat építhető fel.

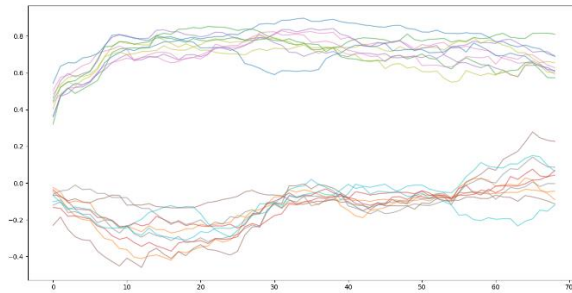
A tanulás hajtóereje az állat étellel történő jutalmazása volt, amely részletesen a következőképpen történt: az állatot a megszokott, általa jól ismert környezetéből ( $R_0$ ) engedték ki a kísérletnek teret adó ún. 'cheese board'-ra, melyen az előzetesen elhelyezett jutalmazási étel-darabokat tudta keresni ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ ). A kísérleti elrendezés részletei megtalálhatók az [1] publikációban. A hipotézisünk szerint a jutalmazás ténye bizonyos, ún. helysejtek együttmozgását, azaz a megfelelő sejtek közötti pozitív korrelációt idéz elő, amely a kísérlet többszöri megismétlésével (időfejlődés) tovább erősödik. A kutatás egyik célja a megfelelő sejtek együttmozgásából kialakuló egyedi, csak az adott jutalmazási-lokációra ( $R_i$ ) jellemző hálózati mintázatok keresése és időfüggésük vizsgálata.

### **1.2, Az elvégzett kutatások ismertetése**

Az adatok numerikus feldolgozásának első lépéseként a korrelációs mátrixok (ezzel ekvivalens megfogalmazásban korrelációs hálózatok) bizonyos (ismeretlen, vagy rossz) elemeit interpoláltam vagy extrapoláltam, míg a kísérletekből eredő zajt az ún. mozgó-átlag módszerrel mérsékeltem (1.a. ábra).

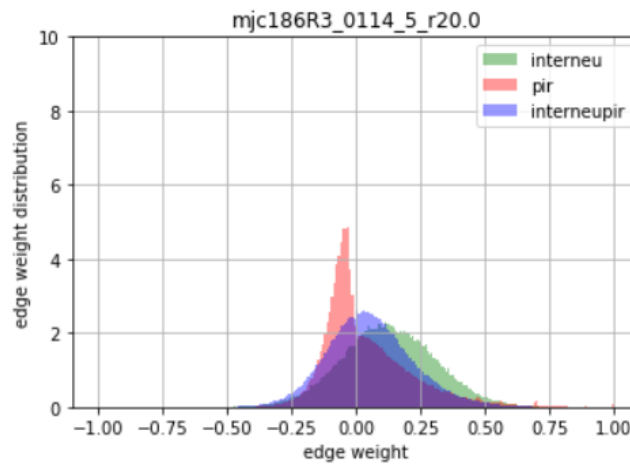


1.a. ábra: Simítás.



1.b. ábra: Élek időfejlődése.

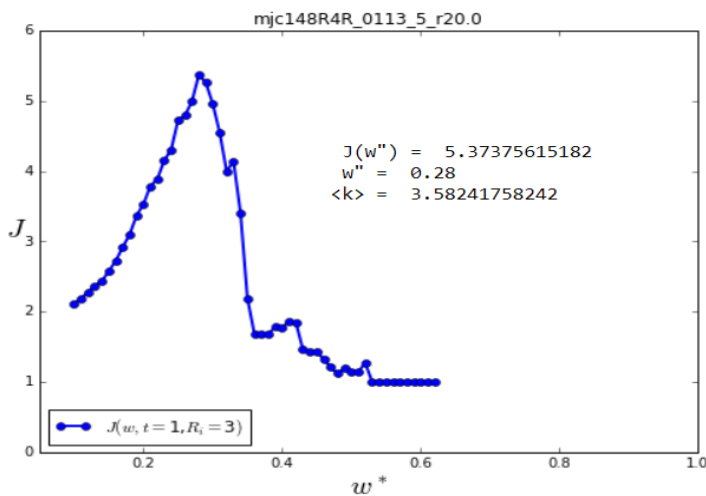
Az első statisztika, amit vizsgáltam a különböző korrelációs mátrixok élsúlyeloszlása volt, egy példát az 2. ábra mutat. Mivel biológiailag a hippocampusban jelenlévő piramis és interneuron sejtek más funkciót látnak el, a különböző típusú sejtek közötti élek eloszlásait külön görbéken ábrázoltam.



2. ábra: A piramis-piramis (piros), interneuron-interneuron (zöld) és piramis-interneuron (kék) típusú sejtek közötti élek eloszlásának alakja.

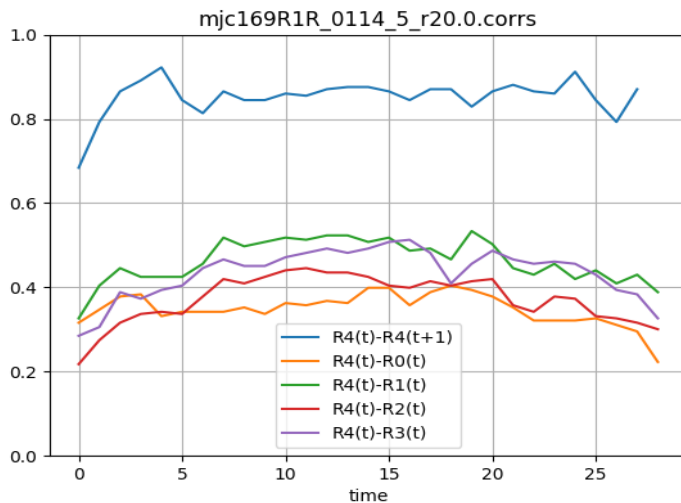
A korrelációs mátrix hálózatként való elemzése során általában meg szokás szűrni a hálózatot a gyenge élek eldobásával (hiszen szűrés nélkül a korrelációs mátrix egy teljes gráfot adna). Az ideális élsúlyküszöböt a *Je*fficiency nevű mennyiség maximuma alapján állapítottam meg,

Fallani és munkatásainak módszerét követve [2]. Egy példát az efficiency maximumának keresésére a 3. ábra mutat. Az efficiency alapú elemzések azt mutatták, hogy a hálózatok esetében olyan élsúlyküszöb használata optimális, amellyel a hálózat átlagos fokszáma teljesül, hogy  $\langle k \rangle = 3 - 5$ .



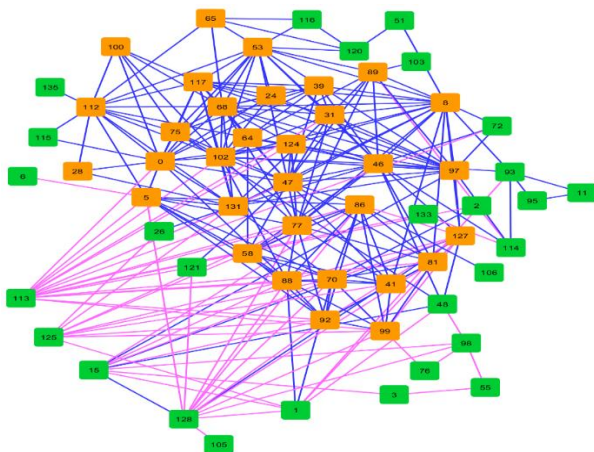
3. ábra: Egy hálózaton efficiency görbéje, az élsúly függvényében ábrázolva. A görbe maximuma  $\langle k \rangle = 3.58$ .

Az élek szűrése után kapott időfüggő hálózatok alapján az adott lokációk ( $R_i$ ) egyediségére, specifikusságára vonatkozó hipotézist vizsgáltam. Ennek során a Jaccard index nevű mennyiséget használtam, amellyel számszerűen megadható pl. két szomszédos időlépésnél látott hálózat hasonlósága. Az eredmények szerint azonos lokációhoz tartozó, de a tanulási folyamat egységnyivel későbbi időpillanatában lévő hálózatok (pl.  $R_1(t)$  és  $R_1(t + 1)$ ) nagyobb hasonlóságot mutatnak, mint ugyanazon időpillanatban, de különböző lokációk fölött értelmezettek (pl.  $R_1(t)$  és  $R_2(t)$ ). Ez egyértelműen a lokációkra jellemző specifikusságot igazolja.

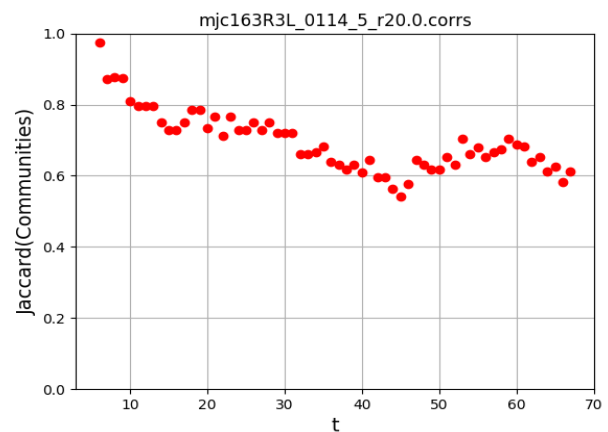


4. ábra: A jaccard index időbeli változása azonos lokációkra (kék görbe), illetve különböző lokációkat összehasonlítva.

A kutatás egy másik célja annak vizsgálata volt, hogy vajon stabilizálódik-e a hálózat az időlépések során. Az eredmények alapján úgy tűnik, hogy igen, a tanulási folyamat első néhány időlépése során nagy változások mennek végbe a hálózatban, viszont kb. a tizedik időlépés után már csak kis „fluktuációkat” tapasztalunk. Ezt alátámasztják az általam alkalmazott csoportkeresési vizsgálatok is. A hálózatokban történő csoportkereséshez elsősorban a klikkperkolációs módszert használtam [3], majd ennek eredményeit összehasonlítottam más csoportkereső módszerekkel (Louvain metóda, infomap). A csoportszerkezet szintén stabilizálódik a tanulási folyamat során, míg a folyamat elején nagy változások tapasztalhatók (6. ábra).



5. ábra: Korrelációs hálózatban található klikkek.



6. ábra: A Jaccard index stabilizálódása

## 2, Általánosított entrópiafogalmak

### 2.1, Bevezetés

A kutatómunkám másik felébe tartozó problémakör általánosított entrópiafogalmak és nemlineáris Fokker-Planck egyenletek kapcsolatának vizsgálata. Doktori témámhoz ez egy általános leírási módszertanként kapcsolódik, ahol időben fejlődő rendszerek általános statisztikus jellemzéséhez használt elméleti eszközökkel való munkára nyílt lehetőségem. Ezt már a doktori képzésem megkezdése előtt vizsgáltam Czégel Dániel, valamint témavezetőim Palla Gergely és Pollner Péter együttműködésével. A projekt akkor még félkész állapotban volt, a doktori képzésem alatt elkészült egy kézirat, amely 2017 őszén a *Scientific Reports* nevű lapba lett beküldve. A kézirat eddig két körös referáláson ment át, ahol a bírálók viszonylag pozitív kritikával fogadták. A beküldött kézirat megtalálható az arXiv-on.

### 2.2, Az elvégzett kutatások ismertetése

A projekt során a  $c, d$  paraméterekkel általánosított entrópiákat vizsgáltuk, Hanel és Thurner munkája alapján [4]. Ennek során sikerült igazolni, hogy bizonyos, általános entrópiakifejezésekre felírt fázistérfogat skálázási relációt meghatározó paraméter bijektív kapcsolatban áll az entrópiákhoz társított nemlineáris Fokker-Planck egyenletek megoldásainak aszimptotikus szétfolyását jellemző paraméterrel. A doktori kutatás keretében a korábbi, heurisztikus levezetések szigorú analitikus eszközökkel végeztem el, valamint a bírálók kritikái alapján pontosítottam a kézirat egyes mennyiségeit, és kapcsolódó referenciák keresésében, adaptálásában vettem részt.

### 2.3, Publikáció

A projektből és a kutatásból arXiv kézirat áll rendelkezésre: <https://arxiv.org/abs/1708.09726>

## 3, Tanulmányi tevékenység

A félév során résztvevő voltam Jánosi Imre Miklós 'A káoszelmélet alkalmazása EA' , valamint Palla Gergely és Zafeiris Anna 'Biológiai Rendszerek statisztikus fizikája EA' című ELTE-s kurzusain.

## 4, Oktatási tevékenység

A doktori képzésem első félévében a fizika alapszakosoknak és matematika-fizika szakos tanári képzésben résztvevőknek kiírt 'Modern Fizika laboratóriumi gyakorlatok' -hoz tartozó *Diffúzió* mérést tartottam, 9 alkalommal, egyenként 4 óra hosszában.

### **Hivatkozások:**

- [1] D. Dupret, J. O'Neill, J. Csicsvari (2013) *Dynamic Reconfiguration of Hippocampal Interneuron Circuits during Spatial Learning*. Neuron, Volume 78, Issue 1
- [2] De Vico Fallani F, Latora V, Chavez M (2017) *A Topological Criterion for Filtering Information in Complex Brain Networks*. PLoS Comput Biol 13(1): e1005305.
- [3] G. Palla, I. Derényi, I. Farkas, T. Vicsek (2005) *Uncovering the overlapping community structure of complex network in nature and society*. Nature **435**, 814–818
- [4] R. Hanel, S Thurner (2011) *A comprehensive classification of complex statistical systems and axiomatic derivaton of their entropy and distribution functions*. EPL (Europhysics Letters), Volume 93, Number 2