

1. félévi beszámoló

**Furuglyás Kristóf** (78furu@gmail.com)

Statisztikus fizika, biológiai fizika és  
kvantumrendszerek fizikája program  
Témavezető: Dr. Somogyvári Zoltán

A dolgozat címe: Neurális agyi stimuláció  
optimalizálása lokális neurális aktivitás  
kiváltására

2021 január

## 1. Bevezetés

Doktori munkám során implementáltam egy szimulációt, melyben külső elektrodák segítségével tudjuk optimalizálni az agyi neurális aktivitást. Ennek segítségével a későbbiekben később mérhető lesz a célzott (valamint a mellékhatások következtében elkerülhetetlenül máshol is fellépő) aktivált terület kauzális konnektivitása. Munkám során különböző matematikai eszközöket használtam, melyek vagy a megoldás pontosságát vagy a numerikus stabilitást szolgálták.

## 2. Kutatás témája

Az agy non-invazív (avagy szemi-invazív) stimulálása elektromos jelekkel régóta használt felszíni, illetve felszín-közeli területeken depressziós tünetek enyhítésére (pl. transzkraniális egyenáramú stimuláció (tDCS)). Azonban az epilepsziás rohamok forrása többször az agy mélyebb rétegeiben van (hippokampusz), melyek elérése bonyolultabb feladat. Váltakozó irányú áram segítségével, kihasználva az elektromágneses tér szuperpozícióját valamint ismerve a szövetek külső térre gyakorolt válaszát mátrixinverzióval elérhetjük azt a legoptimálisabb stimulációs szekvenciát, mely a kiválasztott területet adott mértékben ingerli, mialatt az agy többi részére a legkisebb mellékhatást gyakorolja.

### 2.1. Matematikai konstrukció

A matematikai modellünket egy  $\mathbf{M}$  transzfermátrix optimális pszeudoinverzének megtalálása köré építjük. A transzfermátrixot az egyes hurok által generált tér adja, ahol húr alatt az egy elektródapárra kapcsolt feszültséget értjük. Továbbá, ebben a közelítésben kvázisztatikus megoldást vizsgálunk. Adott  $\mathbf{x}$  elektróda stimulációs szekvencia esetében  $\mathbf{b}$  tér fog képződni:

$$\mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \quad (1)$$

melyben a transzfermátrix elemeit ekképpen számoljuk ki:

$$\mathbf{M}_{ij}^k = \frac{\mathbf{e}_k}{\sqrt{|\mathbf{r}_{i1} - \mathbf{r}_j|^2}} - \frac{\mathbf{e}_k}{\sqrt{|\mathbf{r}_{i2} - \mathbf{r}_j|^2}}, \quad (2)$$

ahol  $\mathbf{r}_{i1}$  és  $\mathbf{r}_{i2}$  a 3 dimenziós helyvektora az  $i$ . húr két végének,  $\mathbf{r}_j$  a  $j$ . 3D voxel helyvektora, valamint  $\mathbf{e}_k$  az egységvektor a  $k \in [x, y, z]$  irányokban.

A transzfermátrix általában nem lesz négyzetes, a pszeudoinverz megoldás pedig numerikusan instabil eredményt ad. A Tikhonov regularizáció a szélsőségesen nagy értékeket bünteti, így ennek segítségével egy kívánt térhez ( $\mathbf{b}^t$ ) tartozó legjobb stimulációs szekvencia előáll:

$$\hat{\mathbf{x}}_l = (\mathbf{M}^\top \mathbf{M} + \mathbf{\Gamma}_l^\top \mathbf{\Gamma}_l)^{-1} \mathbf{M}^\top \mathbf{b}^t, \quad (3)$$

ahol  $\hat{\mathbf{x}}_l$  a Tikhonov-regularizált stimulációs szekvencia,  $\mathbf{\Gamma}_l = \alpha_l \mathbf{I}$  a Tikhonov mátrix ami jelen esetben egy megfelelő méretű egységmátrix az  $\alpha_l$

regularizációs hiperparaméterrel megszorozva. Az  $l$  alsóindex mindenhol a lineáris módszert jelenti.

A neurális aktivitást (pontosabban annak valószínűségét) szimulálhatjuk egy a térre hattatott aktivációs ( $f$ ) függvény segítségével:

$$f(x) = 2 \frac{e^{\frac{x-\theta}{\sigma}}}{e^{\frac{x-\theta}{\sigma}} + 1} - 0.5, \quad (4)$$

ahol  $\sigma$  és  $\theta$  a szigmoid függvény szélességét és küszöbértékét módosító, előre meghatározott paraméterek. A függvényt alkalmazva a transzfermárixra megkapjuk az  $\mathbf{A}$  aktivációs transzfermárixot, mely a stimulációs szekvenciával megszorozva adja az  $\mathbf{a}$  aktivált (skalár)teret:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{ij} &= f(\mathbf{M}_{ij}), \\ \mathbf{a} &= \mathbf{A}\mathbf{x}. \end{aligned} \quad (5)$$

A kialakult neurális aktiváció jóságát/lokalitását előbb két külön tényezővel ( $T_1^a(t)$  és  $T_2^a(t)$ ), majd a kettő szorzatával ( $T_3^a(t)$ ) jellemezzük:

$$\begin{aligned} T_1^a(t) &= \frac{\mathbf{a}(t)}{\max_{b \neq t}(\mathbf{a}(b))}, \\ T_2^a(t) &= \frac{\mathbf{a}(t)}{\frac{1}{N-1} \sum_{b \neq t} \mathbf{a}(b)}, \\ T_3^a(t) &= T_1^a(t) \cdot T_2^a(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Az első mérték a célvoxelben lévő aktiváció és a maximális aktiváció arányát vizsgálja, ami a célvoxelben lévő aktivitást mutatja, amennyiben a maximálisan elérhető aktivitás korlátozva van, míg a második esetben a nevezőben a maximum helyett az átlagot vesszük. Ez utóbbi a mellékhatások leírására szolgál. Összességében a lokalizáció sikerét a kettő szorzatában mérjük.

## 2.2. Eredmények

A fent említett konstrukciót Python programozási nyelvben implementáltam, és egy gyűrűben elhelyezett 16 elektródás rendszer volt a kiindulópont. A célvoxelt a sugár harmadára állítottam be. A fő kérdés az volt, hogy az elméleti leírása a módszernek mennyire állja meg a helyét a szimulációban.

Emellett, azt is szerettem volna tudni, hogy a térértékekkel vagy az aktivitásértékekkel rendelkező transzfermátrix ad-e jobb eredményt, illetve hogy a tér iránya hogyan befolyásolja az aktivitást.

Ötféle stimulációs módszert hasonlítottunk össze. Az első három esetben kézzel kapcsolt húrokat nézünk (egy aktív húr, három egymást egy pontban metsző húr illetve három egymást metsző húr ellentétes irányú húrokkal együtt), a negyedik esetben az aktivációs transzfermátrixot invertáltam, az ötödik esetben viszont a térértékekkel rendelkezőt. Jelenlegi eredmények azt mutatják, hogy a kézzel kapcsolt módszerekhez képest a két automatizált számítás két és fél-háromszor jobb lokalizációt biztosít. A tér irányának szerepét, valamint a sejt pontosabb választát még jelenleg is folyó kutatásaink során vizsgáljuk.

### **3. Tanulmányi tevékenység**

A félév során két kurzust végeztem el. Az egyik a Klaszterezés hálózatokkal, másik pedig a Kvantuminformáció-elmélet. Mindkét tárgyról úgy tartom, jelentősen segítette szakmai karrierem.

### **4. Konferenciák, iskolák**

A Wigner Fizikai Kutatóközpont által szervezett AIME20 Workshopon moderátorként és hallgatóként részt vettem, valamint a Magyar Fizikushallgatók Egyesületével (Mafihe) szervezendő Téli Iskola lebonyolításában is részt fogok venni.

### **5. Szakmai közéleti tevékenység**

Szintén a Mafihe ELTE helyi bizottságának honlapfelelőseként rendszeresen karbantartottam és frissítettem az oldalt az akutális programokkal.