

TDK-dolgozat

Molnár Dávid

3D felületintegrál alapú pontosságérték sztereo-EEG elektródabeültetésekhez

Szerzők:

Molnár Dávid

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Matematika és Informatika Kar, Informatika szak, III. év

Témavezetők:

dr. Kolumbán Sándor, egyetemi adjunktus

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Matematika és Informatika Kar

Kivonat

Az SEEG egy olyan eljárás, melynek során az agyba elektródákat helyeznek, majd az elektródák mérései alapján azonosítható, hogy hol helyezkedik el az agyban epilepsziás rohamok kiindulópontja. A műtét előtt tervezett pozíció és műtét során beépülő elektróda tényleges pozíciója közötti eltérés mérése fontos a beültetési eljárások pontosságának meghatározásához. A hagyományos mérőszámok bizonyos pontok közötti térbeli euklideszi távolságok és szögek segítségével mérik az elektródák tervezett és megvalósított pozíciói közötti eltérést. Ezek a mértékek figyelmen kívül hagynak olyan eltérési jellegzetességeket, amelyek fontosak a klinikai hatékonyság szempontjából. A dolgozatban rávilágítunk a hagyományos módszerek korlátára, és egy új, 3D felületintegrálokra alapuló megközelítést javasolunk, amely átfogóbban jellemzi az elektródaelhelyezés pontosságát, figyelembe véve a terv és megvalósítás térbeli elhelyezkedését. Az általunk javasolt mérték bemutatására és használatának megkönnyítésére egy szoftvereszközt biztosítunk, amely képes a tervezett és megvalósított elektródapozíciók közötti eltérés kiszámítására, valamint ezek megjelenítésére, a szakterületen használt, sztereotaxiás paraméterek felhasználásával.

Tartalomjegyzék

Bevezető	1
1. Elektrodabeültetés pontossága	3
1.1. Elektrodák paraméterei	3
1.2. Jelenlegi módszerek	3
1.3. Felület alapú mérték	3
1.3.1. Vetítés	5
1.3.2. Vitorla meghatározása	5
1.3.3. Vegleges forma	5
1.4. Hibák dimenziómentessé tétele	7
2. A szoftver bemutatása	8
2.1. Fő ablak	8
2.2. Páciensek felvétele, szerkesztése és exportálása	8
2.3. Elektrodák felvétele, szerkesztése	10
2.4. Hibaérték mélység szerinti megjelenítése	10
2.5. Vizualizáció	10
2.5.1. Kamera irányítása	12
2.5.2. Kezelőfelületek mozgatása és átméretezése	12
2.5.3. Elektroda kiválasztása	13
2.5.4. Elektroda szerkesztése	13
2.5.5. Hibák	13
2.5.6. Színtér beállításai	13
3. Technikai megvalósítás	16
3.1. Általános technológiák	16
3.2. Adatkezelő kliens	16
3.2.1. .NET MAUI	16
3.2.2. XAML	16
3.2.3. MVVM	17
3.2.4. Hibaszámítás	17
3.2.5. Grafikon	17

3.3.	Vizualizáció	17
3.3.1.	Silk.NET	18
3.3.2.	OpenGL	18
3.3.3.	ImGui	18
3.3.4.	Megjelenített elemek modellje	18
3.3.5.	Hibaszámitás	19
3.3.6.	Kamera	20
3.3.7.	Megvilágítás	20
4.	Kiértékelés	21
	Következtetések és továbbfejlesztési lehetőségek	24

Bevezető

Az epilepszia egy krónikus agyi rendellenesség, amely rohamokat okozhat. A rohamok során az idegsejtek egy csoportja a normálisnál gyorsabban küld jeleket, ezzel akaratlan mozgást vagy viselkedést kiváltva. Az epilepszia nemtől, kortól és etnicitástól függetlenül jelen lehet bárkiben, világszerte körülbelül 50 millió személyt érint, így az egyik leggyakoribb neurológiai betegség [8]. Okait tekintve lehet genetikai eredetű, de válthat ki rohamokat fertőződés, traumás agysérülés, tumor, vagy egyéb hatás, ami megzavarja az idegrendszer normális működését. Hatásai szerint széles skálán mozog rövid eszméletvesztéstől életet veszélyeztető görcsrohamig, gyakoriságát tekintve előfordulhat nagyon ritkán, de akár több százszor is naponta. Az epilepszia kezelésére a változatossága miatt több módszer létezik, többek közt gyógyszerek használata, életmódváltás vagy műtét [7]. A továbbiakban ez utóbbit részletezzük.

Egy műtét előkészítéséhez meg kell határozni az epileptogén zónákat. Ez azokat az agyterületeket jelenti, amelyek eltávolításával a páciens rohammentes lesz. Ezek meghatározására az egyik legpontosabb módszer a sztereoelektroenkefalográfia (SEEG), egy minimálisan invazív módszer, amely során a páciens agyába elektródákat helyeznek, amelyeken bizonyos közökkel szenzorok helyezkednek el. Az elektródákról leolvasható az agyi elektromos aktivitás, így beazonosítható a rendellenes viselkedésért felelős zóna [4]. A műtétet megelőzi egy előkészítési szakasz, amely során a szakemberek meghatározzák az elektródák tervezett paramétereit. A megvalósításhoz sztereotaxiás keretre (1. ábra¹) rögzített, fúrásra és elektródabeillesztésre alkalmas eszközt használnak. A terv és megvalósítás eltéréseért felelhet a keret pontatlansága vagy helytelen beállítása, a fej elmozdulása, vagy a csont és bőr szerkezete miatt a fúró elmozdulása. Ennek az eltérésnek a számszerűsítésére léteznek és gyakori használatban vannak pontok távolságára alapuló módszerek [12], amelyek egyszerűen kiszámolhatóak, de nem reprezentálnak megfelelően bizonyos nagyban különböző konfigurációkat.

A dolgozat célja meghatározni egy olyan módszert, amely szakaszok közötti felület alapján határoz meg hibaértéket, így jobban kiemelve a terv és megvalósítás elrendezései közötti eltéréseket. A dolgozatban emellett, a kiszámítás nehézsége miatt, biztosítunk egy szoftvereszközt, amely ezt a hibát kiszámítja és összehasonlíthatóvá teszi a klasszikus

¹Forrás: Renata Serpejante, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stereotactic_Frame_TM03B_Micromar.jpg (elérés dátuma 2024. máj. 4.)

hibamértékkel, emellett lehetőséget ad páciens és elektródaadatok összesítésére, kezelésére, valamint az elektródák és hibáik térbeli vizualizációjára.

A dolgozat négy fejezetből áll. Az 1. fejezet részletezi az elektródabeültetés paramétereit és ezek alapján a jelenleg használt és általunk javasolt hibamértékek kiszámításainak módjait, a 2. fejezet a módszerünk mellé biztosított szoftvereszköz használatát és funkcióit mutatja be, a 3. fejezet a szoftver működésének technikai részleteit tartalmazza, és a 4. fejezet az említett módszerekkel kapott eredményeket hasonlítja össze.



1. ábra. Példa sztereotaxiás keretre. Megfigyelhetők a három merőleges tengely és két ív menti beállítások.

1. Elektródabeültetés pontossága

1.1. Elektródák paraméterei

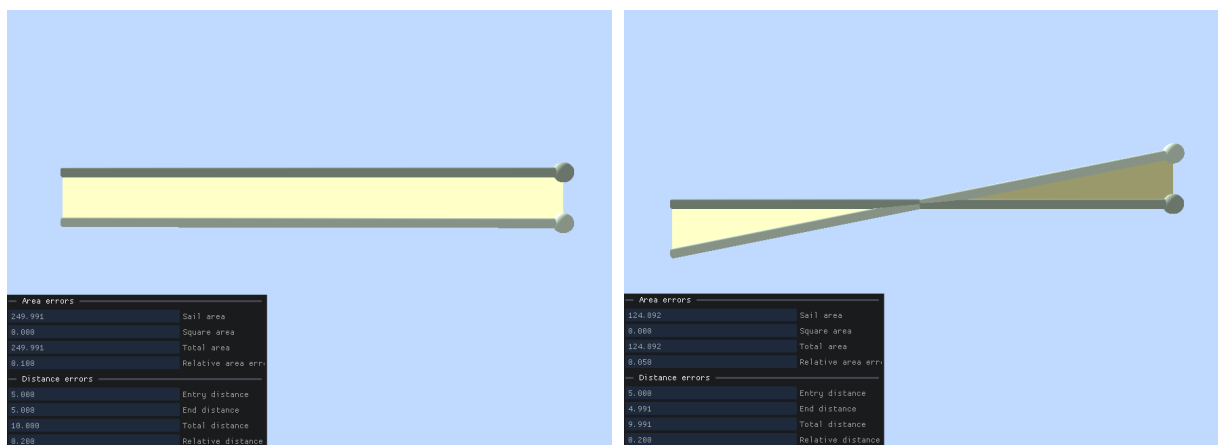
A sztereotaxiás keret beállításai határozzák meg az elektróda célpontját és belépési szögét. A fúrószerkezet a kereten mozdítható három ortogonális tengely mentén, amelyek a következők: a vízszintes síkban az anterior-poszterior és a laterális, függőleges irányban pedig a vertikális. Ezek a paraméterek jellemzik az elektróda célpontját. A kereten beállítható továbbá két szögérték, amelyek az elektróda belépési irányát határozzák meg. A sztereotaxiás kereten beállított paramétereket, valamint az elektróda hosszát ismerve meghatározható egy elektróda belépési pontja a koponyába. A továbbiakban a hibák kiszámításához a terv és megvalósított elektródák belépési és végpontjait használjuk fel.

1.2. Jelenlegi módszerek

A jelenleg legelterjedtebb hibaszámítási módszerek, az egyszerűségük miatt, bizonyos elektródák által meghatározott pontok közötti távolságokra alapulnak. A kiválasztott pontok tekintetében általában a terv és megvalósítás elektródák belépési és végpontjai közötti távolság kerül meghatározásra. Ez a távolság lehet térbeli euklideszi távolság, vagy szembőli vagy oldalnézeti vetületen síkbeli távolság [12]. A dolgozat során a módszerünkkel való összehasonlítás alapként a belépési pontok közötti és végpontok közötti térbeli euklideszi távolságok összegét számoljuk, a továbbiakban erre távolság alapú hibamértékként hivatkozunk. A módszer hátránya, hogy nagyon eltérő elektróda konfigurációkra eredményezhet ugyanolyan értékeket, például ahogyan a 2. ábrán látható.

1.3. Felület alapú mérték

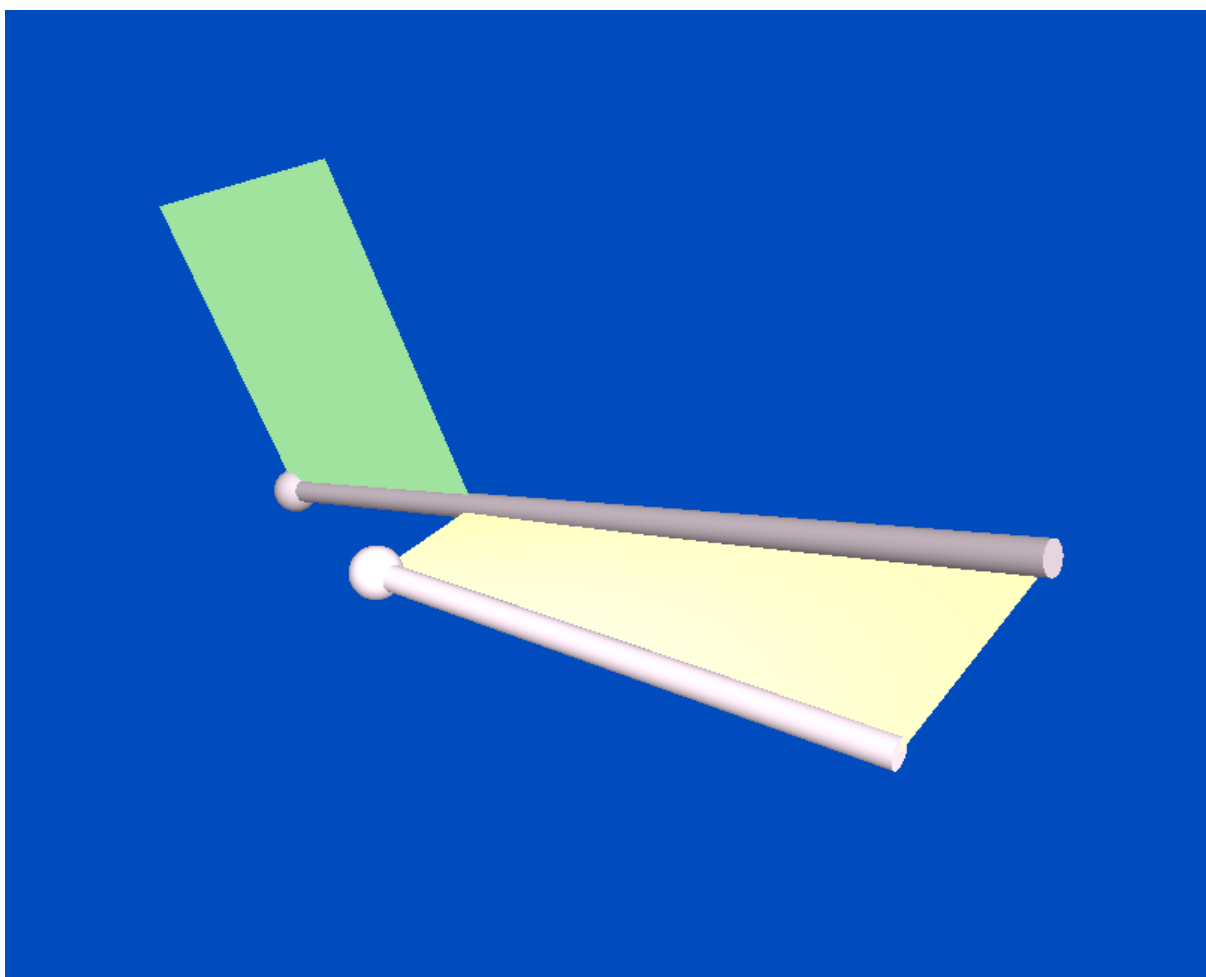
Az előbb említett hátrányok kiküszöbölésére egy új, felületeken alapuló hibamértéket vezetünk be. A továbbiakban ennek a meghatározását és kiszámítási módját mutatjuk be. A módszerből származó hibaérték két komponensből áll: a terv és megvalósítás elektródák bizonyos szakasza közötti felület (a továbbiakban vitorla) területéből, és egy távolság négyzetéből (3. ábra).



(a) A hibafelületek összterülete kb. 250 mm².

(b) A hibafelületek összterülete kb. 125 mm².

2. ábra. Két különböző elrendezésű terv-megvalósítás elektródapár amelyeknél a belépési pontok és célpontok távolságának összege közel megegyezik (összesen kb. 10 mm).



3. ábra. Egy terv-megvalósítás elektródapár, közöttük halványsárgán a vitorla, rá merőlegesen halványzölden a fennmaradó távolság négyzete ábrázolva.

1.3.1. Vetítés

Legyen t a terv, m a megvalósított elektróda által meghatározott egyenesek, B_t és B_m az elektródák belépési, C_t és C_m az elektródák végpontjai. Az előbb említett komponensek határainak megállapítására először egy vetítést alkalmazunk: a C_m pontot levetítjük a t egyenesre, legyen a levetített pont V_t . Jelölje $[B_t, C_t]$ a tervelektróda belépési és végpontja közötti szakaszt. Amennyiben $V_t \notin [B_t, C_t]$, meghatározunk egy V_m pontot, amelyre $V_m \in [B_m, C_m]$ és V_m levetítve t -re egybeesik C_t -vel.

1.3.2. Vitorla meghatározása

A vitorla egy négy térbeli pont között értelmezett felület, a négy ponton kifeszített gumilepedőként lehet elképzelni. $V_t \in [B_t, C_t]$ esetben a négy pont körbejárási sorrendben B_t, V_t, C_m, B_m , különben B_t, C_t, V_m, B_m . A felület területe kiszámítható analitikusan, de a dolgozat során egy közelítő módszert alkalmazunk. Jelölje $T, T' \in t$ és $M, M' \in m$ a vitorla megfelelő pontjait, legyen $n_h, n_{sz} \in \mathbb{N}^*$. A 1. algoritmus szerint TT' és MM' szakaszok mentén n_h és a kapott pontok között n_{sz} felosztással lineáris interpolációt végzünk, ezzel egy térbeli négyszögháló pontjait meghatározva.

1. Algorithm Vitorla felosztása négyszöghálóra

```
1: for  $j \leftarrow 0$  to  $n_{sz}$  do
2:   for  $i \leftarrow 0$  to  $n_h$  do
3:      $u \leftarrow i/n_h$ 
4:      $v \leftarrow j/n_{sz}$ 
5:      $T_i \leftarrow u * T + (1 - u) * T'$ 
6:      $M_i \leftarrow u * M + (1 - u) * M'$ 
7:      $P_{i,j} \leftarrow v * T_i + (1 - v) * M_i$ 
8:   end for
9: end for
```

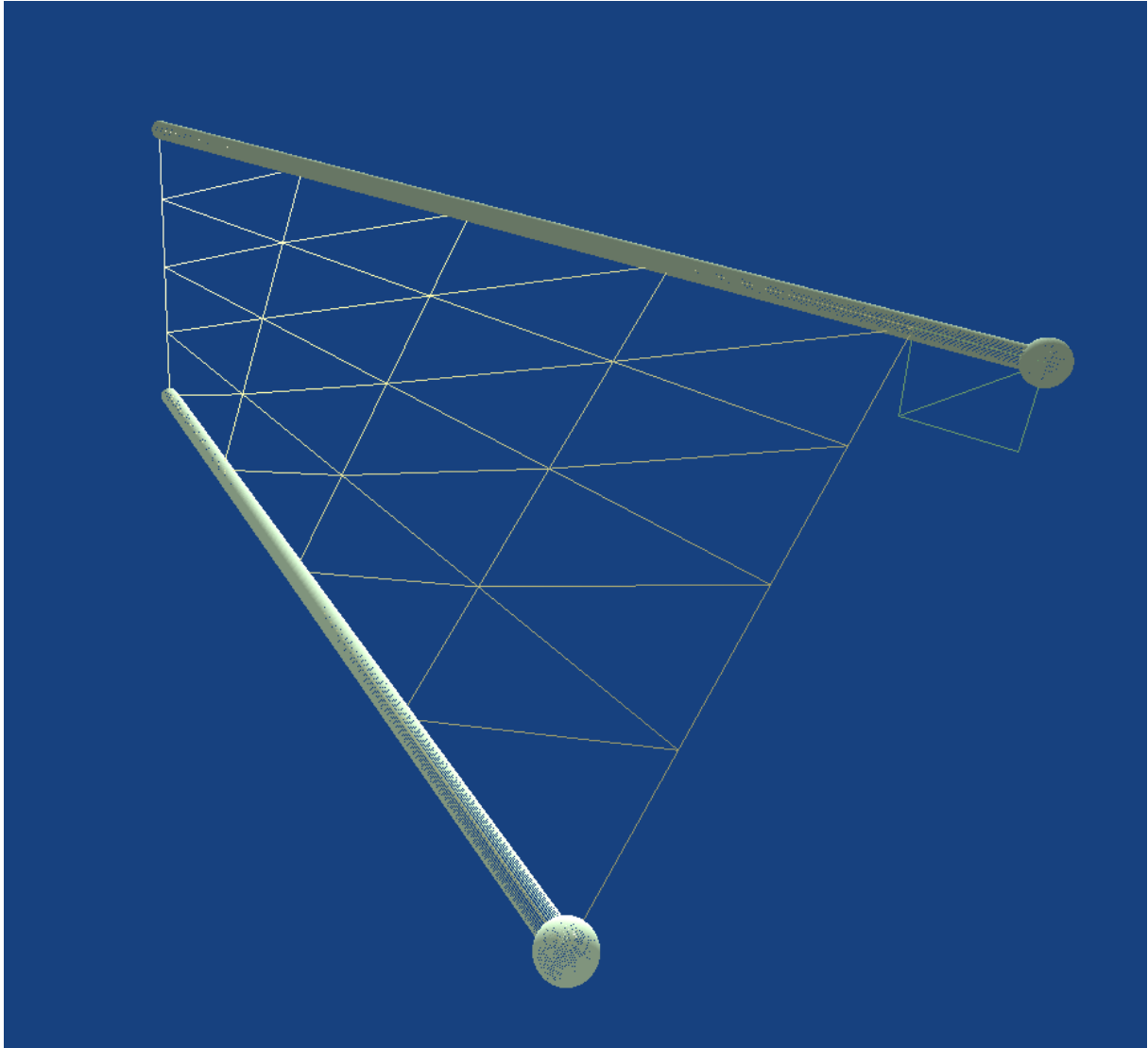
Jelölje $area(A, B, C)$ az A, B, C pontok által meghatározott háromszög területét. A 2. algoritmus szerint a négyszögeket átlóik mentén háromszögekre osztjuk, és ezen háromszögek területeinek az összege adja meg a közelítésünket a vitorla területére (4. ábra).

1.3.3. Vegleges forma

Ha csak a vitorla területét vesszük figyelembe, rögzített tervelektróda és rögzített megvalósítás belépési pont és irány mellett a megvalósítás hosszának növelésével a hiba is folyamatosan nőne, majd konstans értéket venne fel. Ennek megoldására a hibafüggvényünkben

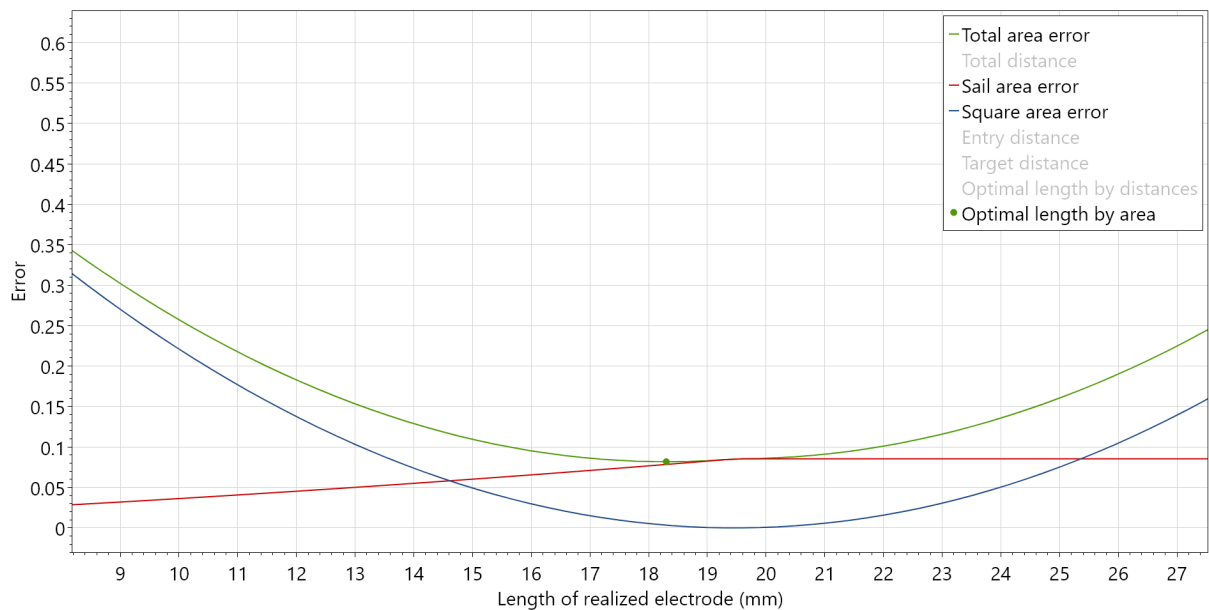
2. Algorithm A terület közelítése háromszögek területeinek összegével

```
1:  $sumArea \leftarrow 0$ 
2: for  $j \leftarrow 0$  to  $n_{sz} - 1$  do
3:   for  $i \leftarrow 0$  to  $n_h - 1$  do
4:      $sumArea \leftarrow sumArea + area(P_{i,j}, P_{i+1,j}, P_{i+1,j+1}) + area(P_{i,j}, P_{i,j+1}, P_{i+1,j+1})$ 
5:   end for
6: end for
7: return  $sumArea$ 
```



4. ábra. Egy terv-megvalósítás elektródapár és a köztük megjelenített hibafelületek drótváza. Megfigyelhető a négyszögháló és ennek a háromszögekre való felosztása.

a vitorla területéhez hozzáadunk egy $\|V_t C_t\|^2$ értékű tagot, amely a hossz növelésével amíg a vitorlaterület nő, csökken, majd a vitorlaterület konstanssá válásával növekedni kezd (5. ábra).



5. ábra. Egy terv-megvalósítás elektródapár felület alapú hibájának és komponenseinek (vitorla és négyzet) értéke a megvalósított elektróda hosszának függvényében. Megfigyelhető, hogy a vitorlaterület növekedése abban a pontban áll meg, amikor a négyzetes tag eléri a nullát.

1.4. Hibák dimenziómentessé tétele

Mivel az elektródák különbözhetnek a hoszaikban, így hogy összehasonlítható értékeket kapjunk dimenziómentessé kell tegyük ezeket. A távolság alapú hibák esetén a kapott értéket elosztjuk a tervelektroda hosszával, a felület alapú hibák esetén pedig a tervelektroda hosszának négyzetével.

2. A szoftver bemutatása

A fejezetben az általunk készített szoftverezköz kerül bemutatásra. A szoftver lehetőséget ad a páciensek és elektródák adatainak és paramétereinek kezelésére, elektródák hibáinak kiszámolására és ábrázolására grafikonokon, valamint egy interaktív 3D vizualizációban. A szoftver használható a műtét tervezési fázisában az adatok összesítésére, műtét után a megvalósítás kiértékelésére, valamint az optimális hossz meghatározásának köszönhetően akár műtét közben is, amikor már a belépési paraméterek ismertek.

2.1. Fő ablak

Az alkalmazás elindításakor a fő ablakban látható két lista, a bal oldali a pácienseket, a jobb oldali a kijelölt páciens elektródáit jeleníti meg (6. ábra). A páciensek megjelenített adatai a nevük, valamint az eljárás dátuma, kezdési és befejezési ideje. Az elektródák esetén a megjelenített adatok változnak attól függően, hogy csak a terv paraméterei ismertek, vagy a megvalósítás is. A csak tervvel megadott elektródáról a beillesztési szám és a terv sztereotaxiás paraméterei kerülnek megjelenítésre, míg a megvalósítással rendelkező elektródánál láthatóvá válnak a terv mellett megvalósítás paraméterei, elégedettség, valamint a távolság és felület alapú hibaértékek és ezeknek megfelelő optimális hossz. A listaelemeken találhatóak gombok a releváns műveletek elvégzésére. A menüsávban ezek a műveletek mellett továbbiak is megtalálhatóak: a páciens menü alatt új páciens létrehozása és páciens importálása, az elektróda menü alatt új elektróda létrehozása.

2.2. Páciensek felvétele, szerkesztése és exportálása

Új páciens bevezetésére két lehetőség áll rendelkezésre: az alkalmazáson belüli űrlapon keresztül (7. ábra), valamint meghatározott sablon szerint kitöltött Excel táblázat (8. ábra) importálásával. Egy űrlapon keresztül bevezetett páciens kezdetben nem rendelkezik elektródákkal, ezek szintén manuálisan kell bevezetésre kerüljenek. Egy importált páciens esetében a forrástáblázat tartalmazhatja az elektródák adatait is. A páciens szerkesztése a hozzáadáshoz használt űrlapon keresztül történik, a mezők a szerkeszteni kívánt páciens adataival előre fel vannak töltve. Egy páciens és elektródái adatainak mentésére az exportálás ad lehetőséget. Az adatok mentése az importáláshoz is használt sablon szerinti Excel táblázatba történik, az elektródák bejövő adatai mellé kiírásra kerülnek a kiszámolt hibaértékek is.

SEEG electrode visualizer									
Patient Electrode									
Patients		Electrodes							
G.G. 2/7/2020 6:25 AM 11:25 AM <button>Edit</button> <button>Export</button> <button>Visualize</button>	Insertion number: 1 Satisfaction: ok <button>Edit</button>	Plan	ID	Length (mm)	A-P (mm)	Lat (mm)	Vert (mm)	Ring (°)	Arc (°)
		Actual	O*	49.6	33.2	9.3	10.1	13.2	5.5
Sz.A. 11/14/2023 6:25 AM 11:25 AM <button>Edit</button> <button>Export</button> <button>Visualize</button>	<button>Show plots</button>	Entry distance		End distance	Total distance		Optimal length		Minimal distance
		0.100		0.056	0.156		46.820 mm		0.117
	<button>Edit</button>	Sail area		Square area	Total area		Optimal length		Minimal area
		0.011		0.003	0.014		46.390 mm		0.011
	Insertion number: 15 <button>Edit</button>	Plan	ID	Length (mm)	A-P (mm)	Lat (mm)	Vert (mm)	Ring (°)	Arc (°)
			A	57	40.5	2.4	55.1	-3.9	-1.7
	Insertion number: 2 Satisfaction: ok <button>Edit</button>	Plan	ID	Length (mm)	A-P (mm)	Lat (mm)	Vert (mm)	Ring (°)	Arc (°)
		Actual	F	58.3	54.5	3.5	10.4	17.1	-1.5
	<button>Show plots</button>	Entry distance		End distance	Total distance		Optimal length		Minimal distance
		0.220		0.023	0.243		45.670 mm		0.224
	<button>Edit</button>	Sail area		Square area	Total area		Optimal length		Minimal area
		0.017		0.001	0.018		45.550 mm		0.017
	Insertion number: 3 Satisfaction: ok <button>Edit</button>	Plan	ID	Length (mm)	A-P (mm)	Lat (mm)	Vert (mm)	Ring (°)	Arc (°)
		Actual	M	55.8	47.5	3.9	40	-1.4	2.8
		Entry distance		End distance	Total distance		Optimal length		Minimal distance
		0.000		0.007	0.146		55.110 mm		0.146

6. ábra. A fő ablak. Bal oldalon a páciensek listája, jobb oldalon a kijelölt páciens elektródáinak listája.

SEEG electrode visualizer											
Patient ID											
Pál Kata-Péter											
Date of procedure											
3/20/2024											
Start time of procedure											
10	00	AM									
End time of procedure											
4	00	PM									
OK											
Cancel											

7. ábra. Űrlap páciens hozzáadására és szerkesztésére.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	Beteg azonosítója Sz. A.																						
2	Beavatkozás napja (yyyy/mm/dd) 14/11/2023																						
3	Beavatkozás kezdete 06:25																						
4	Beavatkozás vége 11:25																						
5																							
6	Terv										Megvalósult										Elégedtség		
7	Elektroda neve	Hossz	AP	L	V	Ring	Arc	Behelyezési sorszám	Henger hiba terv	Elektroda neve	Hossz	AP	L	V	Ring	Arc	Elégedtség	Beléptési táv	Végpont táv	Hengerhiba	Vitorla hiba	Hossz hiba	Össz
8	O	32,5	40,9	-9	-2,4	17,8 L	2,8 P			O*	34,2	42,6	-8,7	-3,2	18,2 L	3,3 P							
9	A	39	2,7	-23,5	-13,3	-0,6 L	1,9 P	2		A*	38,6	5,2	-22,3	-12	-4,2 L	3,9 P							
10	B	49,4	-11	-22,5	-10,7	18,8 L	7,5 P	3		B*	48,3	-9,6	-22,6	-10,3	16,9 L	8,4 P							
11	C	47,7	-31,1	-21,3	-0,3	-2,1 L	4,7 P	4		C*	48	-31,1	-21	2,2	-4,3 L	4,7 P							
12	D	45,7	-2,8	-26,1	-22,5	23,8 L	12,3 P	5		D*	47,3	4,5	-31	-29,3	34,5 L	22,1 P							
13	H	23,6	-22,9	-46,2	12,5	-0,9 L	5,2 P	6		H*	22,3	-23,5	-46,2	13,6	-3,5 L	5,9 P							
14	T	20,1	-2,3	-47,7	0,5	7,3 L	17,6 P	7		T*	19,9	4,3	-47,7		23,8 L	20,2 P							
15	E	30,1	-39,1	-38,1	11	-0,4 L	1,1 P	8		E*	28,3	-41,6	-38,5	12,4	0 L	1,5 A							
16	L	41,7	-28,5	-27,1	-12,6	6 L	2,8 A	9		L*	41,8	-28,5	-26,7	-12,2	5,6 L	1,8 A							
17	J	33,9	17,7	-22,8	-26,3	12,0 L	0,4 P	10		J*	33,1	21,5	-21,6	-28,8	14,5 L	4,1 P							
18	M	33,1	-46,3	-36,8	4,4	-17,3 L	5,1 P	11		M*	31,8	-48,4	-36,4	4,6	-17,7 L	0,1 P							
19																							
20																							
21																							

8. ábra. Páciens importálásakor és exportálásakor használt táblázat sablon, néhány bemeneti adattal feltöltve.

2.3. Elektródák felvétele, szerkesztése

Új elektródák bevezetése és ezek szerkesztése szintén űrlapon keresztül történik (9. ábra). Mivel a műtét tervezésekor még nem állnak rendelkezésre a megvalósítás adatai, így az arra vonatkozó paraméterek opcionálisak. Az elektróda szerkesztése, a páciens szerkesztésénél látottakhoz hasonlóan, a szerkesztendő adatokkal feltöltött űrlap használatával történik.

2.4. Hibaérték mélység szerinti megjelenítése

Az alkalmazásban lehetőség van a hibaértékek ábrázolására grafikonon a megvalósított elektródabeültetés mélységének függvényében (10. ábra). A grafikonon láthatóak a távolság és felület alapú hibák, a hiba minimalizálásához optimális hossz mindkét esetben, valamint a hibákat alkotó komponensek. A bal egérgomb lenyomva tartásával és az egér mozgatásával lehet navigálni, a görgővel nagyítani és kicsinyíteni. A jelmagyarázatban szereplő komponensekre kattintva kapcsolható ki-be a megfelelő adatsor láthatósága a grafikonon.

2.5. Vizualizáció

A vizualizáció elindításakor egy 3D grafikát tartalmazó ablak nyílik. Indításkor látható az ablak jobb és bal oldalán grafikus kezelőfelület, egy egy elektródákat befoglaló fehér áttetsző gömb, a páciens elektródái terv-megvalósítás párokban, valamint a vitorla és négyzet hibafelületek (11. ábra). Az elektródapárokhoz véletlenszerűen különböző színek vannak rendelve, egy párban a sötétebbik a terv, a világosabb a megvalósítás. A hibafelületek esetén a vitorla halványzöld, a négyzet halványzöld és a vitorla végére merőlegesen van ábrázolva (3. ábra).

SEEG electrode visualizer

Electrode insertion number
15

Satisfaction
ok

ID
A Realized ID

Length
57 Realized Length

A-P
40.5 Realized A-P

Lat
2.4 Realized Lat

Vert
55.1 Realized Vert

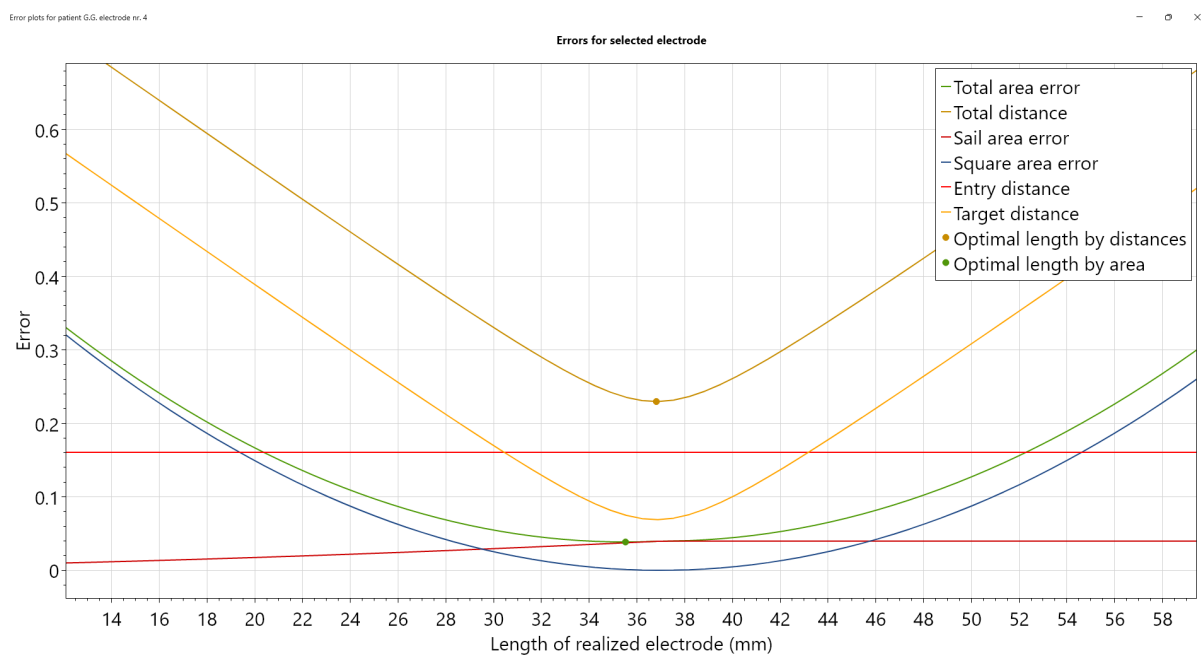
Ring
-3.9 Realized Ring

Arc
-3.9 Realized Arc

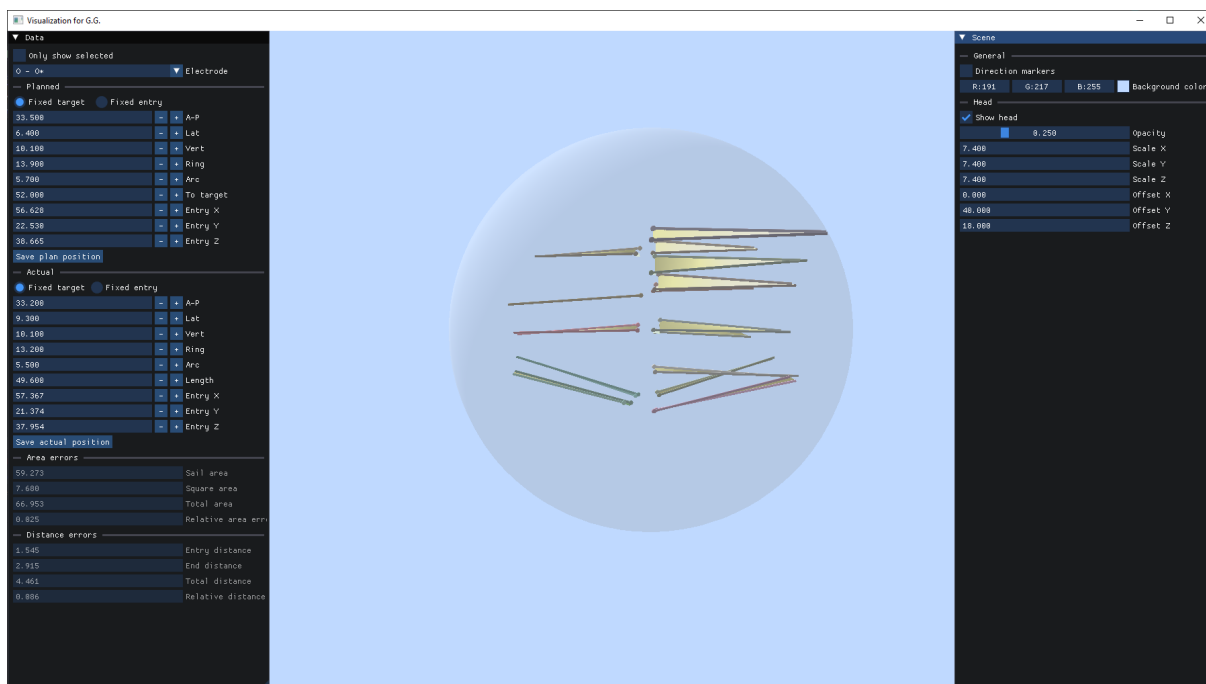
OK

Cancel

9. ábra. Űrlap elektróda hozzáadására és szerkesztésére.



10. ábra. Az elektróda hibáinak grafikonját megjelenítő ablak. Megjelennek a távolság és felület alapú hibák, a komponenseik, valamint a minimumaik.



11. ábra. A vizualizációt tartalmazó ablak. Az ábrán látható egy elektródákat befoglaló áttetsző gömb és a páciens összes elektródája terv-megvalósítás páronként, a hibafelületekkel köztük.

2.5.1. Kamera irányítása

A navigációhoz a billentyűzet és egér használandó. A felfele és lefele nyilak, vagy a W és S billentyűk az előre-hátra, a balra és jobbra nyilak, vagy A és D billentyűk a balra-jobbra, a Page Up és Page Down, vagy Q és Z billentyűk a fel-le mozgást teszik lehetővé. A kamera forgatása a jobb egérgomb lenyomásával és az egér mozgatásával elérhető. Szintén a jobb egérgomb lenyomása mellett a görgő használata nagyítás-kicsinyítést valósít meg. A Space billentyű lenyomásával a vizualizációban éppen kiválasztott elektródapárhoz ugrik a kamera.

2.5.2. Kezelőfelületek mozgatása és átméretezése

A bal és jobb oldalon található kezelőfelületek mozgatása a fejlécükön bal egérgomb lenyomva tartásával és egér mozgatásával lehetséges. A fejléc bal oldalán megjelenő kis nyílra kattintva összezsuktható vagy újra kinyitható a felület. A kezelőfelületek a jobb alsó sarkukban megjelenő háromszögön bal egérgomb lenyomva tartásával és egér mozgatásával átméretezhetőek.

2.5.3. Elektróda kiválasztása

A bal oldali kezelőfelület felső részében található egy jelölőnégyzet, amely bejelölésével csak a kiválasztott elektróda kerül kirajzolásra. Az elektróda kiválasztása egy legördülő listával történik, amelyben megjelenik a páciens összes elektródája. Amennyiben egy elektródához tartozik terv és megvalósítás, akkor a listában ezek azonosítói kötőjellel elválasztva jelennek meg, különben csak a terv azonosítója.

2.5.4. Elektróda szerkesztése

A tervhez és megvalósításhoz tartozó paraméterek ugyanolyan módon változtathatóak a kezelőfelületen, ezek a változtatások a vizualizáción valós időben megjelennek. Változtatható paraméterek a célpont sztereotaxiás koordinátái (A-P, Lat, Vert), a szögek (Ring, Arc), a belépési pont koordinátái, valamint a hossz (12. ábra). Az értékek változtatása történhet az érték beírásával, vagy a bemeneti doboz mellett található gombokra kattintással. Ezek a gombok az értéket 0,1-el változtatják kattintásonként, a Control billentyű lenyomása mellett kattintással pedig 1-el. A célpont vagy belépési pont koordinátáinak változtatásakor az elektróda hossza és szögei nem változnak. A felületen rádiógombokkal kiválasztható, hogy a célpontot vagy a belépési pontot tekintjük rögzítettnek, a szögek vagy a hossz változtatásakor ez a pont marad a jelenlegi pozíciójában. Az elektródára vonatkozó rész alján levő mentés gombbal a vizualizációban szereplő adatokat menthetjük a kinti modellbe.

2.5.5. Hibák

A bal felület következő részeiben megjelennek a kijelölt elektróda távolság és felület alapú hibáinak értékei (13. ábra). A hibák valós időben számolódnak ki a paraméterek változtatásaival. A vitorla, négyzet és összterület mm^2 -ben, a belépési, cél és össztávolságok mm-ben vannak kifejezve, így jobban köthetőek az értékek a vizualizációhoz. Mindkét módszer esetén a hiba végső értéke meg van jelenítve dimenziómentesen is.

2.5.6. Színtér beállításai

A jobb oldali kezelőfelületen (14. ábra) a színtér különböző beállításai találhatók. Általános beállítás kategóriában egy jelölőnégyzet bejelölésével megjelennek további objektumok amelyek a koordináta-rendszer középpontját és tengelyeit jelzik, valamint változtatható a

hátterszín. A gömb beállításai alatt kikapcsolható a megjelenítése, megváltoztatható az áttetszősége. A gömb skálázására és eltolására is lehetőség van más pozíció és alak eléréséhez.

Planned

☒ Fixed target ☐ Fixed entry

33.500	-	+	A-P
6.400	-	+	Lat
10.100	-	+	Vert
13.900	-	+	Ring
5.700	-	+	Arc
52.000	-	+	To target
56.628	-	+	Entry X
22.530	-	+	Entry Y
38.665	-	+	Entry Z

Save plan position

12. ábra. A tervezett elektróda beállításai a vizualizáció kezelőfelületén.

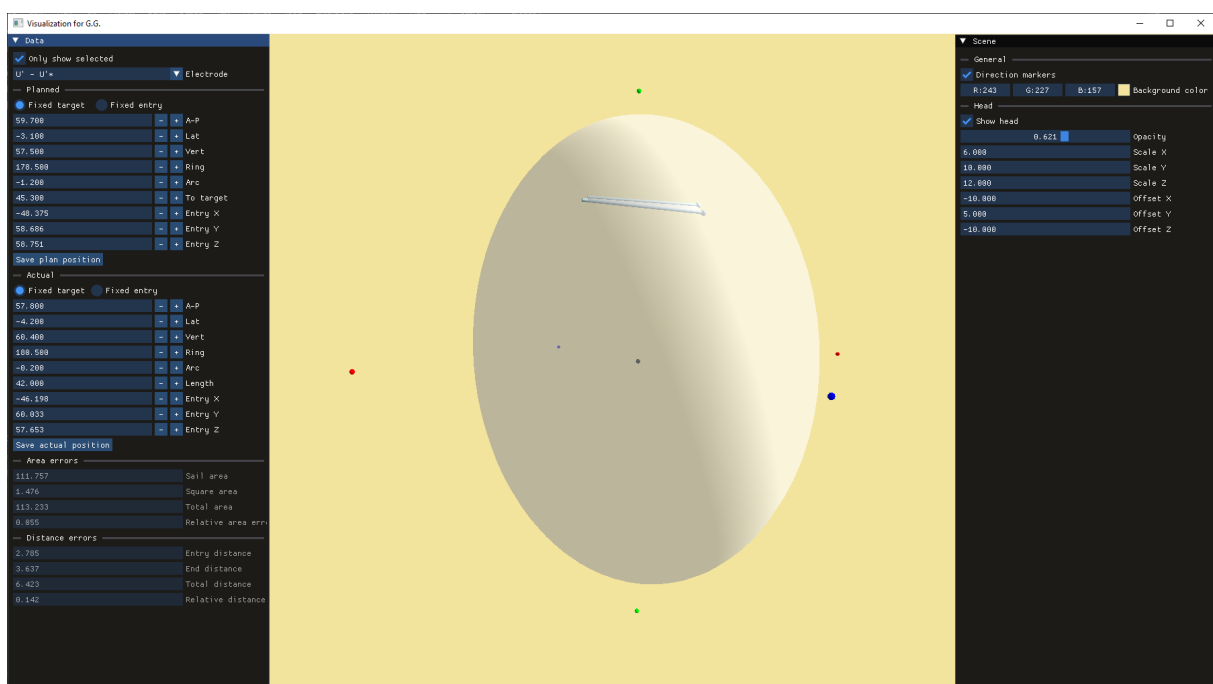
Area errors

59.264	Sail area
7.680	Square area
66.945	Total area
0.025	Relative area error

Distance errors

1.545	Entry distance
2.915	End distance
4.461	Total distance
0.086	Relative distance error

13. ábra. A vizualizáció kezelőfelületén megjelenített hibák.



14. ábra. A színtér beállításainak módosítása. Az ábrán láthatóak a háttérszín és a gömb skálázása, eltolása és áttetszősége megváltoztatásának hatásai, valamint irányjelző gömbök: a fekete a koordináta-rendszer középpontját, a piros az X, a zöld az Y, a kék a Z tengelyeket jelzik.

3. Technikai megvalósítás

A fejezetben a szoftver néhány technikai részlete, felhasznált technológiák és módszerek kerülnek bemutatásra. Az alkalmazás asztali környezetekre készült és két fő részből áll: az adatkezelő kliens és a vizualizáció.

3.1. Általános technológiák

Az alkalmazás mindkét része a .NET platformra épül és a C# programozási nyelvet használja. A függőségek kezelését a NuGet csomagkezelővel, a verziókövetést Git verziókövető rendszerrel és a GitHub platformon keresztül valósítottuk meg. A programozásra és debugolásra a Visual Studio programozói környezetet használtuk.

3.2. Adatkezelő kliens

Az adatkezelő kliens az alkalmazás azon része, amellyel a felhasználó indításkor először találkozik, és a páciensek és elektródák adatainak betöltését, szerkesztését, grafikonon ábrázolását és mentését teszi lehetővé, valamint a vizualizáció is ezen keresztül indítható.

3.2.1. .NET MAUI

A .NET Multi-platform App UI keretrendszer lehetőséget ad mobil és asztali alkalmazások fejlesztésére közös kódbázisból. A MAUI applikációk fejlesztése a C# programozási nyelvvel és XAML leírónyelvvel történik. A keretrendszer néhány jellemző erőssége a platformfüggetlenség, az oldalak tervezését megkönnyítő elrendezéskezelő, az adatkötés támogatása, valamint a fejlesztés és hibakeresés megkönnyítésére a hot reload támogatása [5].

3.2.2. XAML

Az eXtensible Application Markup Language egy XML-alapú leírónyelv, amely alternatívaként szolgál az objektumok inicializálására és szülő-gyermek hierarchiába rendezésére, ezzel megkönnyítve az alkalmazások nézeteinek fejlesztését, mivel átláthatóbb és egyértelműbb leírást ad egy nézetről, mint a vele ekvivalens programkód [6].

3.2.3. MVVM

A Model-View-ViewModel tervezési minta biztosítja az adatmodell és üzleti logika szétválasztását a nézettől egy köztes réteg, a ViewModel segítségével. A nézetek XAML kódja és a ViewModel C# kódja az adatkötési mechanizmuson keresztül kommunikál. Bármely ViewModel megvalósítja az `INotifyPropertyChanged` interfészt, ezzel a ViewModel beállíthatóvá válik, mint a nézet `BindingContext` tulajdonsága. A nézet ez után hivatkozhat a ViewModel tulajdonságaira, a ViewModel tulajdonságainak változása pedig a `PropertyChanged` esemény kiváltásakor frissül a nézetben. Az interaktivitás megvalósítható kétirányú adatkötéssel, ahol explicit kód nélkül a nézeten eszközölt változtatások megjelennek a ViewModel-ben is, vagy a `Command` osztály vagy `ICommand` interfész használatával, amelyek egyes, nézettel történő interakciók hatására a ViewModel-ben meghatározott viselkedést váltanak ki.

3.2.4. Hibaszámítás

Az adatkezelő kliens a hibaszámítást a 1. fejezetben leírtak alapján végzi. A vetítéshez, forgatásokhoz és térbeli pontok kezeléséhez a `System.Numerics` csomagot használtuk, amely tartalmaz több méretű vektor és mátrix típusokat és ezeken végzett műveleteket. Az itt meghatározott típusok 32 bites lebegőpontos értékeket tárolnak komponenseikként, így a hibaszámítás során végzett műveletek ezzel a pontossággal történnek.

3.2.5. Grafikon

A grafikonok megjelenítéséhez az `OxyPlot` csomagot használtuk, amely egy MIT licenz alatt használható cross-platform könyvtár, amely lehetőséget ad különféle tengelyek és grafikontípusok ábrázolására, valamint biztosít MAUI-val használható nézetet és modellt, amelyek között megvalósítható az adatkötés, így az MVVM minta betartása [9].

3.3. Vizualizáció

Az alkalmazás látványosabb és interaktívabb része a vizualizáció. Ez egy 3D környezet, amelyben a felhasználó tetszőleges pozíciókból megfigyelheti és szerkesztheti a betöltött páciens elektródáit, a változtatásaira azonnali visszajelzést kapva.

3.3.1. Silk.NET

A Silk.NET egy nagy teljesítményű számításokat és grafikus megjelenítést lehetővé tevő könyvtár. Több, mint 17 API-hoz szolgál wrapper-ként, köztük az általunk használt OpenGL-hez is [11].

3.3.2. OpenGL

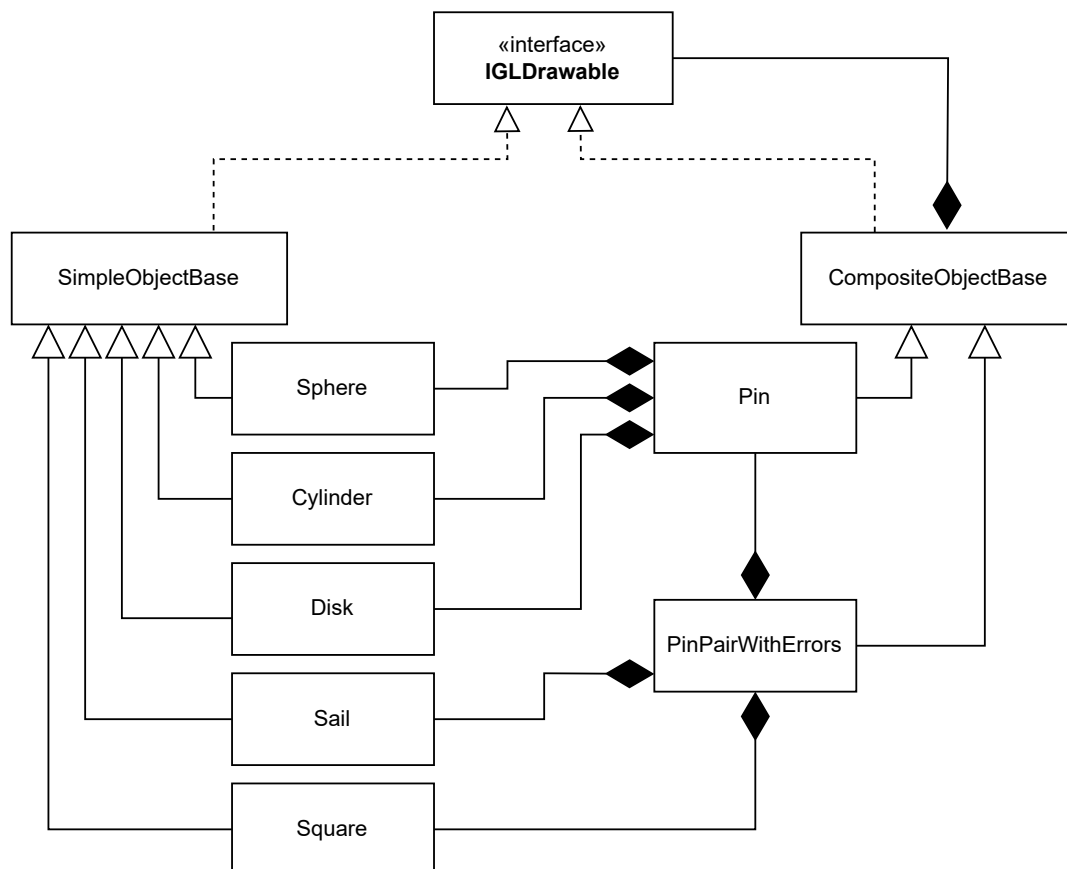
Az OpenGL egy alacsony szintű, nagy teljesítményű, cross-platform 2D és 3D grafikai API. Néhány erőssége a hardveres gyorsítás és a GLSL nyelv segítségével programozható grafikus pipeline [3].

3.3.3. ImGui

Az ImGui egy C++-hoz írt grafikus kezelőfelület könyvtár, amellyel megjeleníthetők kezelőfelületek többek közt OpenGL renderelő környezetben. [1] A projektünkben a Silk.NET-en keresztül használjuk, így a vizualizáció kezelőfelülete is íródhatott C# nyelvben. Az ImGui érdekessége megszokott C# GUI könyvtárakkal szemben, hogy az interakciókat nem eseményeken keresztül kell a programozó kezelje, hanem a widget-eken keresztül bevitt változtatások közvetlenül a hozzájuk rendelt változókon hatnak.

3.3.4. Megjelenített elemek modellje

A kirajzolható elemek kezelésének megkönnyítésére egy kompozit tervezési mintát [2] alkalmazó adatmodellt implementáltunk (15. ábra). A kirajzolható objektumok mind tranzitívan implementálják az általunk bevezetett IGLDrawable interfészt, amely a Draw metódust határozza meg. Két absztrakt osztály implementálja közvetlenül az interfészt. A SimpleObjectBase a közvetlenül kirajzolható objektumoknak az őse, tartalmazza az OpenGL rajzoláshoz szükséges adattagokat (csúcstömb, indextömb) és az ezeket felhasználó, OpenGL függvények köré épülő implementációt a Draw metódushoz. Az egyszerű objektumok, mint az elektródák kirajzolásához használt gömb, henger, lemez, vagy a hibafelületekhez használt vitorla és négyzet ennek az osztálynak leszármazottai, konstruktorban határozzák meg és töltik fel a csúcs- és indextömbjeiket. A CompositeObjectBase egy lista IGLDrawable interfészt implementáló objektumot tartalmaz, a Draw metódusa meghívja a lista minden elemére a Draw metódust. Összetett objektumok az elektródát reprezentáló tű (Pin), valamint



15. ábra. Az IGLDrawable interfész és leszármazottai osztálydiagramja.

két tűből, egy vitorla és egy négyzet felületből álló, terv-megvalósítás elektródapárnak megfelelő PinPairWithErrors. Az összetett tárgyakra is alkalmazhatóak transzformációk, ekkor minden részobjektumra alkalmazva lesznek sorban lentől felfele az ezeket tartalmazó objektumok transzformációi.

3.3.5. Hibaszámítás

A vizualizáció, az adatkezelő klienshez hasonlóan a hibaszámításhoz a 1. fejezetben szereplő módszereket alkalmazza. Mivel a vitorla háromszögekre való felosztása szükséges a megjelenítéshez, így a vizualizációban levő hibaszámítás is ezeket az adatokat használja fel. A vektor és mátrixműveletek a Silk.NET által biztosított vektor és mátrix típusokkal, 32 bites lebegőpontos számokkal kerülnek elvégzésre.

3.3.6. Kamera

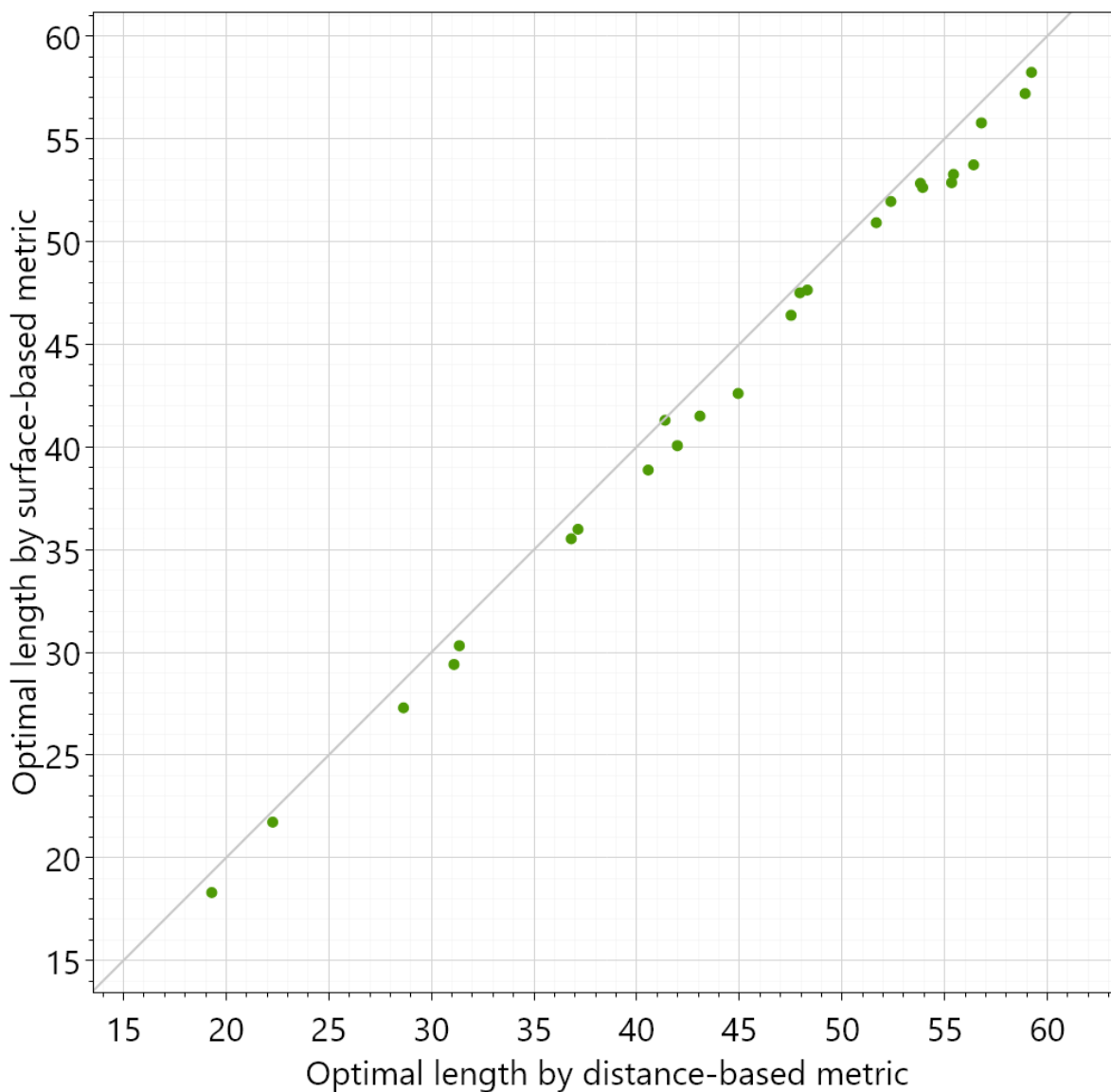
A vizualizációban a kamera szabadon mozoghat a térben. A kamera pozícióját öt paraméter jellemzi, a koordinátái, valamint a pozitív Z egységvektortól való vízszintes és függőleges eltérést jelentő két szög. A kamera mozgatása három merőleges tengely mentén történhet. Az előre irány meghatározható a pozitív Z egységvektor két szöggel való elforgatásával. Az oldalirány meghatározása az előre irány és a világban függőlegesen felfelét jelentő pozitív Y vektorok vektorszorzatával. A harmadik merőleges irány, a nézet szerinti fel-le mozgás az előre és oldalirányok vektorszorzatából számolódik. Annak elkerülésére, hogy a kamera felfordulhasson, a függőleges szög korlátolva van -90° és 90° közé. A vetítési mátrixhoz szükséges paraméterek meghatározásához négy paraméter szükséges: a képarány, a látószög és a közeli meg távoli vágósíkok távolsága. A közelítés és távolítás a látószög változtatásával történik meg, nagyításhoz csökken, kicsinyítéshez nő.

3.3.7. Megvilágítás

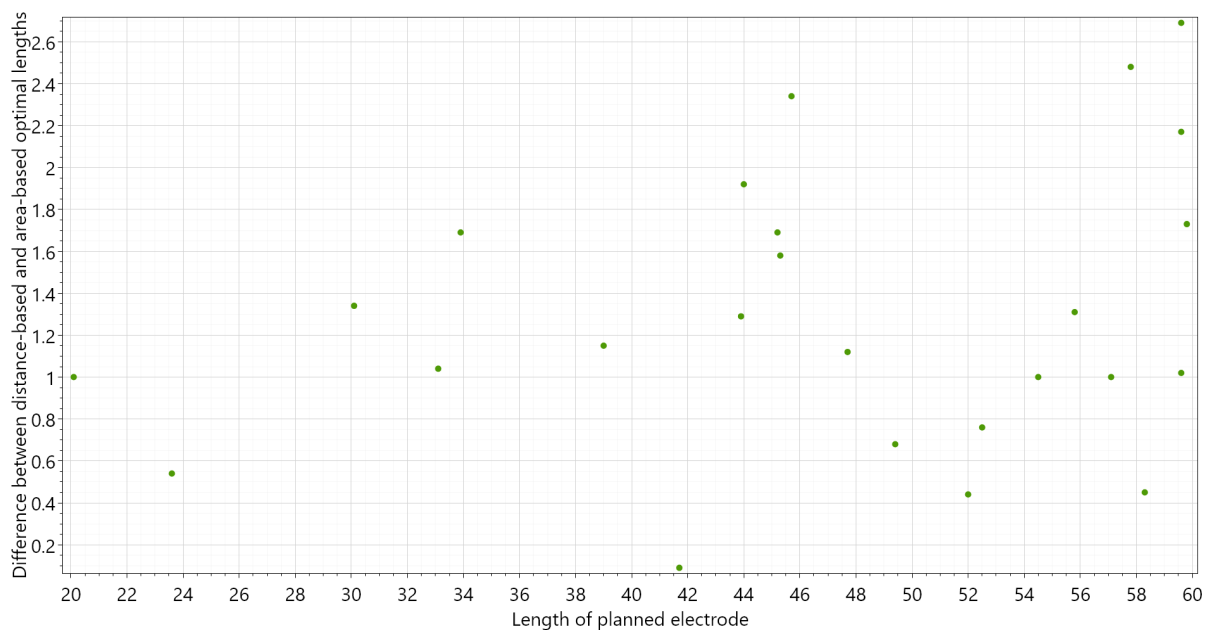
A térhatás kiemeléséhez a megjelenített objektumok meg vannak világítva, a színtérben jelen van egy irány fényforrás. Egy egyszerűsített Phong-modellt [10] használtunk, amely csak az ambiens és diffúz komponenseket tartalmazza. A megvilágításhoz szükséges paraméterek így az ambiens fény színe, a fényforrás iránya és színe, valamint a kirajzolandó elem színe (az ambiens és diffúz színt egyenlőnek tekintjük).

4. Kiértékelés

A javasolt módszer kiértékelésére és összehasonlítására klasszikus módszerrel 25 terv-megvalósítás elektródapár adatai álltak rendelkezésünkre, amelyeknek kiszámoltuk a távolság és felület alapú módszerrel a hibáit és optimális hosszait (csatolva mellékletként). A 16. ábrán látható, hogy az összes általunk vizsgált elektródára a felület alapú módszer által javasolt optimális hossz kisebb volt, mint a távolság alapú módszer szerinti optimális hossz.



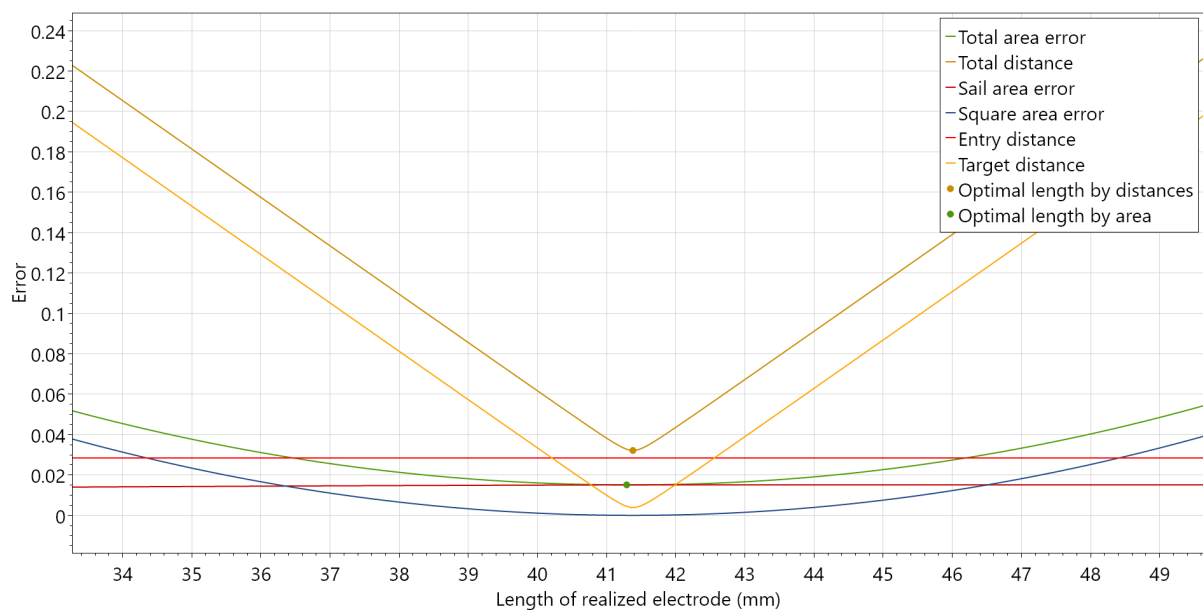
16. ábra. A vizsgált elektródapárok optimális hosszai a távolság alapú és felület alapú mértékek szerint.



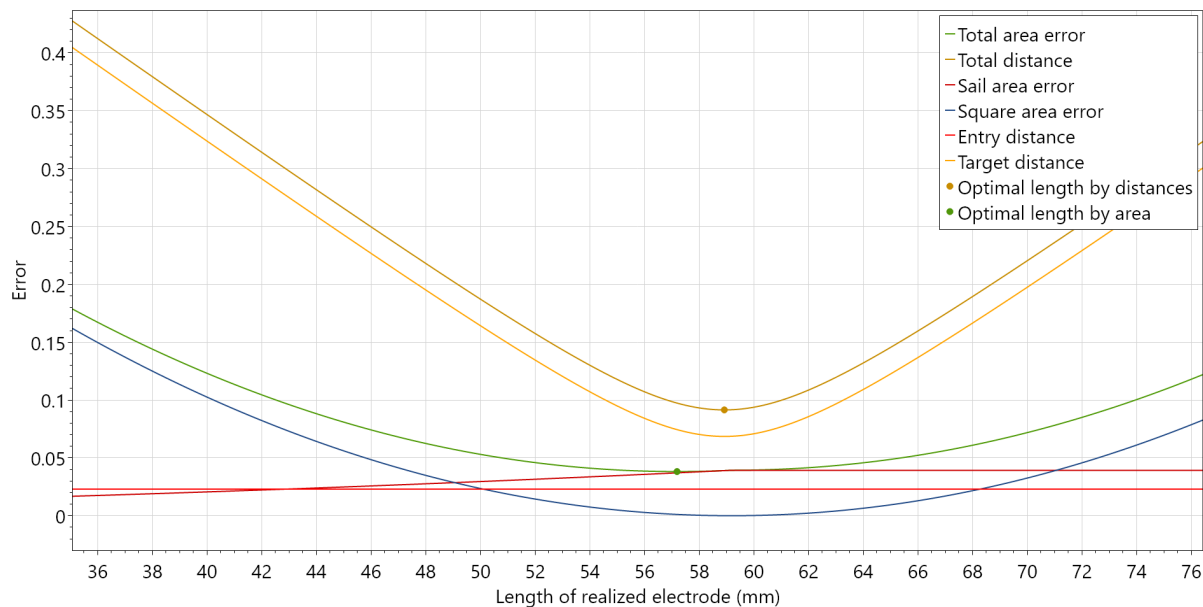
17. ábra. A vizsgált elektródapárok két módszer szerinti optimális hosszainak különbsége a tervezett hossz függvényében

Mivel az elektródák tervezett hosszai nagyon különbözőek lehetnek, így a hibamódszerek eredményei közötti eltérést vizsgáltuk és ábrázoltuk a tervezett hossz függvényében. A 17. ábrán látható, hogy a módszerek közötti eltérés hosszabb tervezett elektródákra lehet nagyobb, viszont nem függenek szorosan össze.

Az adathalmazunkból a legkisebb eltérés a két módszer által javasolt optimális hossz között 0.09 mm (18. ábra), a legnagyobb 2.69 mm (19).



18. ábra. Sz. A. páciens 9. számú elektródája: a távolság alapú mérték optimális hossza (41.38 mm) és a felület alapú mérték optimális hossza (41.29 mm) között 0.09 mm az eltérés.



19. ábra. G. G. páciens 12. számú elektródája: a távolság alapú mérték optimális hossza (56.41 mm) és a felület alapú mérték optimális hossza (53.72 mm) között 2.69 mm az eltérés.

Következtetések és továbbfejlesztési lehetőségek

A dolgozatban meghatároztunk egy javított hibamértéket SEEG elektródaültetések tervezett és megvalósított pozíciói közötti eltérésre és biztosítottunk egy olyan alkalmazást, amely a klasszikus és javított módszerek alapján kiszámolja és megjeleníti a hibákat, valamint mindkét hiba minimalizálásához megadja az optimális elektródahosszt. Az alkalmazás emellett rendelkezik az adatok kezelésére és megjelenítésére szolgáló funkciókkal.

A klasszikus és általunk javasolt módszerek eredményeit 25 terv-megvalósítás elektródapáron hasonlítottuk össze. A kapott eredmények és megfigyelések alapján a jövőben feladatunk neurológus szakorvosok segítségével kiértékelni a módszer klinikai hatékonyságra gyakorolt hatását.

A fejlesztés következő lépése egy olyan rendszer kidolgozása lenne, amely szenzorok, kamerák vagy 3D szkennerek segítségével műtét közben meg tudja határozni az éppen beültetendő elektróda belépési pontját és szögét és ezt továbbítja az alkalmazásnak, ezzel az optimális elektródahossz műtét közbeni meghatározását könnyítve.

Hivatkozások

- [1] *Dear ImGui*. URL: <https://github.com/ocornut/imgui> (elérés dátuma: 2024. máj. 5.)
- [2] Erich Gamma és mások. *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1995. ISBN: 0201633612.
- [3] Khronos Group. *OpenGL Overview*. URL: <https://www.khronos.org/opengl/> (elérés dátuma: 2024. máj. 5.)
- [4] Koji Iida és Hiroshi OTSUBO. „Stereoelectroencephalography: Indication and Efficacy”. *Neurologia medico-chirurgica* 57 (2017. jún.). DOI: 10.2176/nmc.ra.2017-0008.
- [5] Microsoft. *What is .NET MAUI?* 2023. URL: <https://learn.microsoft.com/en-gb/dotnet/maui/what-is-maui?view=net-maui-8.0> (elérés dátuma: 2024. máj. 5.)
- [6] Microsoft. *XAML*. 2023. URL: <https://learn.microsoft.com/en-gb/dotnet/maui/xaml/?view=net-maui-8.0> (elérés dátuma: 2024. máj. 5.)
- [7] National Institute of Neurological Disorders és Stroke. *Epilepsy and Seizures*. URL: <https://www.ninds.nih.gov/health-information/disorders/epilepsy-and-seizures> (elérés dátuma: 2024. máj. 4.)
- [8] WHO (World Health Organization). *Epilepsy*. 2024. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/epilepsy> (elérés dátuma: 2024. máj. 4.)
- [9] OxyPlot. *OxyPlot*. URL: <https://oxyplot.github.io/> (elérés dátuma: 2024. máj. 5.)
- [10] Bui Tuong Phong. „Illumination for computer generated pictures”. *Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the field* (1975). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1439868>.
- [11] Silk.NET. *Silk.NET*. URL: <https://dotnet.github.io/Silk.NET/> (elérés dátuma: 2024. máj. 5.)
- [12] Vejay N. Vakharia és mások. „Accuracy of intracranial electrode placement for stereoelectroencephalography: A systematic review and meta-analysis”. *Epilepsia* 58.6 (2017), 921–932. oldal. DOI: <https://doi.org/10.1111/epi.13713>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/epi.13713>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/epi.13713>.