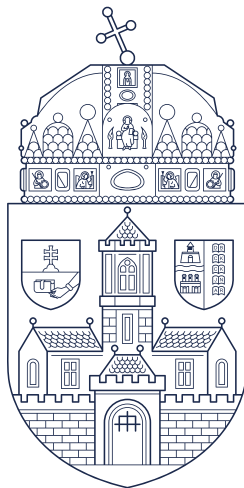


Óbudai Egyetem

Doktori Tézisfüzet



Folyamatok modellezése és szabályozása gépi tanulás
segítségével

írta

Dénes-Fazakas Lehel

Témavezetők:

Dr. habil Eigner György

Prof. Dr. habil Szilágyi László

Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai
Doktori Iskola
Budapest, 2025

Tartalom

Rövidítések jegyzéke	3
1 Motiváció	1
2 Célkitűzés	3
3 Módszerek	5
4 Új tudományos eredmények	6
4.1 Diabétesszel kapcsolatos kutatás	6
4.2 MRI képek feldolgozása	9
Szakirodalom	12
Tézishez tartozó publikációk	14
Tézishez nem tartozó publikációk	16

Rövidítések jegyzéke

AI	Artificial Intelligence	mesterséges intelligencia
CGMS	Continuous Glucose Monitoring System	folytonos glükóz monitorozó rendszer
CNN	Convolutional neural network	konvolúciós neurális hálózat
CT	Computed Tomography	komputertomográfia
ELU	Exponential Linear Unit	exponenciális lineáris egység
MRI	Magnetic Resonance Imaging	mágnesesrezonancia-képalkotás
OCT	Optical Coherence Tomography	optikai koherencia tomográfia
PET	Positron Emission Tomography	pozitronemissziós tomográfia
PPO	Proximal Policy Optimization	
RL	Reinforcement learning	megerősítéses tanulás
RNN	Recurrent Neural Network	rekurrens neurális hálózat
TIR	Time In Range	időarány a tartományon belül

1. Motiváció

A mesterséges intelligencia (AI) a technológiai innováció egyik legdinamikusabban fejlődő területe, és az orvostudományban való alkalmazása az utóbbi években kiemelt figyelmet kapott [R1, R2]. Az AI-alapú rendszerek napjainkra a klinikai munkafolyamatok széles spektrumát támogatják, ideértve a folyamatok automatizálását, a betegségek előrejelzését, a személyre szabott terápiák kidolgozását, valamint a diagnosztikai döntéshozatalt. Ezen technológiák alkalmazása hozzájárul az egészségügyi ellátás strukturális átalakításához, amely így egyre prediktívebbé, személyre szabottabbá és hatékonyabbá válik.

Annak ellenére, hogy az AI potenciálja rendkívül széleskörű, kutatásom két olyan kiemelt területre koncentrál, ahol ezek az eszközök közvetlen társadalmi hatást gyakorolhatnak: a cukorbetegség kezelésére, valamint az orvosi képfeldolgozásra. E két terület kiválasztása a növekvő előfordulási arányuk, a rendelkezésre álló adatmennyiség, valamint a betegek és az egészségügyi dolgozók számára kínált konkrét előnyök alapján történt.

Az első kutatási irány a cukorbetegséget, ezen belül is a mesterséges hasnyálmirigy rendszerek fejlesztését célozza meg [R3, R4, R5]. A cél három fő innováció megvalósítása: a fizikai aktivitás automatikus felismerése viselhető szenzorok segítségével, gesztusalapú étkezésdetektálás, valamint megerősítéssel tanuló alapuló intelligens inzulin dózis-szabályozás. E komponensek kulcsfontosságúak a terápiás pontosság növelésében. A nem azonosított fizikai aktivitás például képes utánozni az inzulin hatását, hipoglikémiát okozva, míg a nem regisztrált étkezések váratlan glükózszint ingadozáshoz vezethetnek. Emellett a manuális inzulin dózis beállítás időigényes, és gyakran nem optimális. A megerősítő tanulás révén azonban lehetővé válik a beteg egyéni glükózdinamikájához adaptálódó, valós idejű, optimalizált inzulin szabályozás. A különböző AI megoldások integrálásával kutatásom célja egy biztonságosabb és hatékonyabb diabéteszmenedzsment kialakítása, amely csökkenti a betegek kognitív terheit és támogatja az orvosokat a pontosabb döntések meghozatalában.

A második fő kutatási irány az orvosi képfeldolgozás, ezen belül is a mágneses rezonanciás képalkotás (MRI) elemzése. Az olyan korszerű képalkotó technikák, mint az MRI, PET, CT vagy OCT lehetővé teszik az anatómiai és fiziológiai folyamatok részletes vizsgálatát, de értelmezésük szakértelmet igényel és időigényes lehet. Kutatásom célja olyan mélytanuláson alapuló módszerek kidolgozása, amelyek képesek agyi MRI-felvételeken szegmentálást és tumoros elváltozások osztályozását végezni. Ezen megközelítések alkalmazása mind újszülött, mind felnőtt MRI-adatkészleteken történik. Újszülöttek esetében az agyi szövetek például a szürkeállomány, fehérállomány és agyi gerincvelői folyadék pontos szegmentálása nélkülözhetetlen a fejlődési rendellenességek korai felismeréséhez. Felnőtt pácienseknél a daganatok úgymint gliómák, meningeómák vagy agyalapi mirigy eredetű tumorok kategorizálása segíti a diagnózis gyorsabb és pontosabb felállítását, ezzel támogatva a személyre szabott kezelés megtervezését.

Összefoglalva, kutatásom célja a mesterséges intelligencia technológiai fejlődése és annak klinikai hasznosítása közötti szakadék áthidalása. A kifejlesztett modellek valós alkalmazási lehetőségeket céloznak meg legyen szó akár okosórákba integrált viselhető rendszerekről, akár döntéstámogató eszközökről az orvosi gyakorlatban. Munkám során mindig szem előtt tartom, hogy a megoldások gyakorlati előnyöket biztosítsanak a betegek

1. Motiváció

és a klinikusok számára egyaránt.

2. Célkitűzés

Doktori kutatásom középpontjában olyan mesterséges intelligencia (AI) modellek tervezése állt, amelyek nemcsak technikailag megalapozottak, hanem valós klinikai környezetben is használhatók. A célom olyan robusztus és praktikus megoldások kidolgozása volt, amelyek támogatják az orvosokat a diagnosztikai és terápiás döntések meghozatalában, ugyanakkor csökkentik a betegek kognitív terhelését a mindennapi önmenedzselés során.

Kutatásom két nagy területre fókuszált: a cukorbetegség kezelésére és az orvosi képfeldolgozásra. Mindkét terület nagy mennyiségű, összetett adatot generál, és ideális terepet biztosít a gépi tanulási technikák alkalmazására legyen szó mintafelismerésről, predikcióról vagy optimalizálásról.

AI alkalmazások a cukorbetegség kezelésében

A cukorbetegség világszinten egyre növekvő egészségügyi kihívás, amelyre az AI és a viselhető technológiák integrációja új megoldásokat kínál. Kutatásom ezen szegmense három kulcselemre összpontosított:

1. Fizikai aktivitás felismerése

A mesterséges hasnyálmirigy-rendszerek kulcsfontosságú szereplői a cukorbetegség automatizált kezelésének, azonban a fizikai aktivitás figyelmen kívül hagyása komoly kockázatot jelenthet, például hipoglikémiát okozhat [R6]. Ennek ellensúlyozására olyan AI-alapú detekciós algoritmusokat fejlesztettem, amelyek képesek az aktivitás felismerésére viselhető szenzoradatok alapján. A modellek célja a minimális szenzorfelhasználás mellett nagy pontosság elérése, figyelembe véve a való világban történő alkalmazhatóságot. Az implementált megközelítések között szerepelnek klasszikus gépi tanulási algoritmusok, valamint rekurrens neurális hálózatok.

2. Gesztusalapú étkezésfelismerés

A manuális étkezésnaplózás gyakran pontatlan, ami negatívan befolyásolja a terápiás döntéseket. A kutatás során olyan gesztusfelismerő rendszert dolgoztam ki, amely képes az étkezési mozdulatok detektálására gyorsulásmérő adatok alapján [R7]. Ez a megközelítés csökkenti a kézi adatbevitel szükségességét, és lehetővé teszi a táplálkozás automatikus követését ezzel is növelve az orvosok számára elérhető információk pontosságát.

3. Inszulinszabályozás megerősítéses tanulással

Az inzulinadagolás optimalizálása érdekében megerősítéses tanulási (Reinforcement Learning, RL) algoritmusokat alkalmaztam [R8]. A cél egy adaptív szabályozó rendszer megalkotása volt, amely a beteg egyéni glükózprofilja alapján tanul, és valós időben képes finomítani a dózisokat. A legjobb eredményeket a Proximal Policy Optimization (PPO) algoritmussal értem el, amely hatékonyan alkalmazható az inzulinpumpákba való beágyazás esetén is.

AI az orvosi képfeldolgozásban

A kutatás második nagy területe a mélytanulás alapú orvosi képelemzés, különös tekintettel az MRI-felvételek feldolgozására. A cél az volt, hogy csökkentsem a radiológusok manuális munkaterhét, miközben növelem a diagnosztikai pontosságot.

1. Újszülöttkori agyi szövetek szegmentálása

A 6 hónapos csecsemők agyszövetének MRI alapú szegmentálása különösen nehéz a hasonló intenzitásértékek miatt [R9]. Ennek megoldására különböző U-Net architektúrákat (2D, 3D, (2+1)D konvolúcióval) fejlesztettem, amelyek képesek pontosan elkülöníteni a fehérállományt, szürkeállományt és agy-gerincvelői folyadékot. E modellek alkalmasak lehetnek a fejlődési rendellenességek korai detektálására.

2. Agydaganatok osztályozása felnőttek esetén

A felnőttek agyi MRI-felvételein végzett munkám során három gyakori tumortípus – glióma, meningeóma, hipofízisdaganat – automatikus osztályozását céloztam meg [R10]. A fejlesztett mélytanulási modellek gyors és konzisztens diagnosztikai javaslatokat nyújtanak. Emellett egy hibrid architektúrát is javasoltam, amely egyszerre végzi a tumorok szegmentálását és osztályozását, ezáltal növelve az analízis hatékonyságát és megbízhatóságát.

Összegzés

Kutatóm hozzájárul az AI-alapú rendszerek klinikai alkalmazásának elterjesztéséhez, különös figyelmet fordítva a praktikumra, megbízhatóságra és használhatóságra. A fejlesztett modellek beépíthetők viselhető eszközökbe (pl. okosórákba), vagy felhőalapú klinikai döntéstámogató rendszerekbe, elősegítve a prediktív, személyre szabott és automatizált egészségügyi ellátás kialakítását.

3. Módszerek

Tézisek 1:

- Fizikai aktivitás detekció
 - Fizikai aktivitás detekciója gépi tanulási algoritmusokkal
 - Fizikai aktivitás detekciója rekurrens hálózatokkal
- Gesztus detekció
 - Gesztus detekció gépi tanulási algoritmusokkal
 - Gesztus detekció rekurrens hálózatokkal
- Megerősítéses tanuláson alapuló inzulin szabályozás
 - Reinforcement learning algoritmusok vizsgálata
 - Hiperparaméterek vizsgálata
 - Jutalmazási függvény vizsgálata

Tézisek 2:

- Csecsemő agyi szöveteinek szegmentálása
 - U-net hálózat vizsgálata
 - 3 dimenziós U-net vizsgálata
 - Átalakított költségfüggvény vizsgálata
 - (2+1)D konvolúciós U-net vizsgálata
- Agyi MRI tumor képek osztályozása
 - VGG-szerű hálózat vizsgálata
 - Hiperparaméter beállítások
 - U-net és CNN hálózatok fúziója: az L-net

4. Új tudományos eredmények

4.1 Diabétesszel kapcsolatos kutatás

I. Téziscsoport: A cukorbetegséggel kapcsolatos vizsgálatok

Tézis I.1

Mesterséges intelligencia alapú módszereket fejlesztettem ki cukorbetegek fizikai aktivitásának felismerésére.

Tézis I.1.1

Különböző módszereket fejlesztettem ki gépi tanulási algoritmusok alkalmazásával a fizikai aktivitás detektálására szintetikus betegadatokat esetén. Az eredmények azt mutatták, hogy ebben az esetben a fizikai aktivitás felismerése pusztán a vércukorszint adatok alapján is lehetséges.

Tézis I.1.2

Mesterséges intelligencia alapú megoldásokat dolgoztam ki a fizikai aktivitás felismerésére valós betegadatokat esetén. Az eredményeket összevettem az I.1.1. tézisben bemutatott megközelítéssel, és bebizonyosodott, hogy valós környezetben a vércukorszint önmagában nem elegendő a fizikai aktivitás megbízható azonosításához. A módszert sikeresen továbbfejlesztettem a pulzusszám adatainak bevonásával. A vércukorszint és a pulzus együttes értékelése már megfelelő pontosságú aktivitásfelismerést tett lehetővé.

Tézis I.1.3

Bemutattam, hogy a rekurrens neurális hálózatok használatával sokkal jobb eredményeket lehet elérni, mint az egyszerű gépi tanulási algoritmusokkal a fizikai aktivitás észlelésére, miközben figyelembe veszik a vércukorszint-adatokat, a pulzusszám-adatokat és más származtatott modalitásokat. Bebizonyítottam, hogy ezek a hálózatok nem igényelnek semmilyen előfeldolgozást.

Tézis I.2

Mesterséges intelligencia alapú megoldást fejlesztettem ki, amely kizárólag gyorsulásmérő adatok alapján képes felismerni az étkezési mozdulatokat. Ez a megoldás hasznos lehet annak meghatározásában, hogy a páciens mikor vesz magához szénhidrátot ez az információ pedig elengedhetetlen bármilyen étrendi döntéstámogató rendszer vagy vércukorszint szabályozó rendszer működéséhez.

Tézis I.2.1

Bemutattam, hogy lehetőség van személyre szabott mozdulatfelismerő modell létrehozására az egyes páciensek számára. Ezáltal nincs szükség arra, hogy egy általánosan robusztus modellt hozzunk létre több páciens adatainak felhasználásával. Elegendő, ha minden páciens számára külön modellt fejlesztünk, amely kifinomult és pontos eredményeket nyújt az étkezési mozdulatok felismerésében.

Tézis I.2.2

Bemutattam, hogy már egyetlen napnyi adat is elegendő egy olyan mesterséges intelligencia alapú módszer létrehozásához, amely nagy pontossággal képes felismerni az étkezési mozdulatokat.

Tézis I.3

Megerősítéses tanuláson alapuló módszereket dolgoztam ki a cukorbetegség vércukorszintjének szabályozására. Az általam fejlesztett megoldások kizárólag a folyamatos vércukorszintmérő szenzor adataira támaszkodnak, és az előre definiált értékelési mutatók szerint megbízható, kielégítő teljesítményt nyújtanak.

Tézis I.3.1

Több modellel végzett kísérletek során kimutattam, hogy a PPO modell teljesít a legjobban a vércukorszint szabályozási problémára és a vércukorszint szabályozására a legjobban működő inzulinsémák beadására. Bebizonyítottam, hogy még akkor is, ha a modellt csak egy korlátozott nap adatain képezték ki, sikeresen extrapolálja a szabályozást nagyobb időhorizontra, ha a képzési adatok a vércukorszint-adatok jó reprezentációját fedték le rendszeres körülmények között.

Tézis I.3.2

Igazoltam, hogy a bump jutalmazási függvény és az ELU aktivációs függvény együttes alkalmazása a neurális hálózatok utolsó rétegében különösen hatékony megközelítést jelent a vércukorszint szabályozásában. Emellett azt is kimutattam, hogy a mélyebb hálózati struktúrák ebben az esetben jobb teljesítményt nyújtanak, anélkül hogy túlilleszkedés következne be.

A téziscsoporthoz kapcsolódó publikációk: [C1, C2, C3, C4, J1, C5, J2, C6, J3, J4].

Kutatásom egy egységes, mesterséges intelligencia (AI) alapú megközelítés mentén valósult meg, amelynek célja a cukorbetegség kezelésének javítása volt. Bár a munka több, jól elkülöníthető altémára osztható, valamennyi hozzájárulás ugyanazon célkitűzéshez a betegek mindennapi életének megkönnyítése és az egészségügyi ellátás támogatása mentén készült.

A legtöbb időt és energiát a cukorbetegség fizikai aktivitásának detektálására fordítottam. Ezt a hangsúlyt a kapcsolódó tudományos publikációk is tükrözik, beleértve két lektorált folyóiratcikket [J1, J2] és egy konferenciaticket [C5]. A kutatás során igazoltam, hogy a vércukorszint és a pulzusszám alapján gépi tanulással hatékonyan felismerhető a fizikai aktivitás. Emellett kimutattam, hogy a rekurrens neurális hálózatok (RNN) jelentősen növelik a felismerési pontosságot még minimális adatelőfeldolgozás mellett is [J2], ugyanakkor az egyszerűbb gépi tanulási algoritmusok is elfogadható eredményeket nyújtanak [J1]. A modellek teljesítményét szimulációs és valós adatokon is validáltam, és megmutattam, hogy a szimulációs környezetben végzett kísérletek értékes betekintést nyújthatnak, anélkül hogy torzítanák a gyakorlati alkalmazhatóságot [C5].

A kutatás második fókuszpontja a gesztusalapú étkezésfelismerés volt. Ennek célja az volt, hogy inerciális szenzoradatok alapján képesek legyünk automatikusan detektálni az ételfelvételt. A kezdeti kísérletek során gyorsulásmérő adatokon tanított gépi tanulási modellek körülbelül 90%-os pontosságot értek el az étkezés felismerésében. A módszer robusztusságát tovább növeltem egy közzétett adathalmazon [J3], ahol egy rekurrens neurális hálózaton alapuló architektúrát alkalmaztam. A modell több mint 300 beteg adatai alapján is kiemelkedő, 98% körüli pontosságot produkált. Mindezeket a modelleket egyéni napi adatokon tanítottam be, mégis figyelemre méltó eredményt nyújtottak, ami alátámasztja a személyre szabott, hosszú távon is használható étkezésfelismerő rendszerek gyakorlati megvalósíthatóságát.

A harmadik kutatási irány az inzulinszabályozás megerősítéses tanulással történő optimalizálását célozta. A cél az volt, hogy az orvosi gyakorlatban használt, manuálisan beállított protokollokat intelligens, adaptív AI-modellekkel váltsuk fel. Az első tanulmányban [C3] különböző megerősítő tanulási algoritmusokat teszteltem a vércukorszint szabályozására, és megállapítottam, hogy a Proximal Policy Optimization (PPO) módszer adja a legstabilabb és legjobb teljesítményt. Bár a hosszabb időtartamú tesztelés során a teljesítmény kissé csökkent, a modellek mindaddig stabilak maradtak, amíg a képzési adatok reprezentatív glükózdinamikát tartalmaztak.

Egy későbbi tanulmányban [C2] a különböző jutalomfüggvények hatását vizsgáltam az RL-modellek működésére. A vizsgálatok során a bump típusú jutalomfüggvény következetesen jobban teljesített, mint más megközelítések, például a koszinusz-alapú alternatívák. Ezen kívül megállapítottam, hogy a szimulációs környezet folyamatos futtatása a szakaszos leállítást helyett javítja a tanulás hatékonyságát. A további optimalizálás során a hiperparaméterek, különösen az aktivációs függvények szerepét vizsgáltam. Az ELU (Exponential Linear Unit) aktivációs függvény használata kritikusként bizonyult a 70% feletti Time-in-Range (TIR) érték eléréséhez, míg a mélyebb hálózati architektúrák a teljesítmény növelését szolgálták a túlillesztés kockázata nélkül.

A kutatás zárószakaszában [J4] egy komplex, betegspecifikus modellt fejlesztettem ki, amely különálló érték- és policy-hálózatokat, ELU aktivációt, valamint kiterjesztett be-tanítási időt alkalmazott. A modell különösen jól teljesített a 70 kg feletti testsúlyú betegek esetében, azonban a kisebb testsúlyú alanyoknál csökkent teljesítmény mutatkozott, ami megerősítette a személyre szabott modellek szükségességét. Emellett bebizonyosodott, hogy a hosszú távú, szimuláción alapuló tanulás elengedhetetlen a stabil működéshez és az optimális teljesítmény eléréséhez.

Összefoglalva, kutatásom mindhárom fő területen érdemi hozzájárulást nyújtott a cukorbetegség mesterséges intelligenciával támogatott kezeléséhez. Az eredményeket lek-

torált publikációk támasztják alá, és egymásra épülő módon járultak hozzá a fejlesztésekhez. A javasolt megközelítések gyakorlati AI-alapú eszközökként implementálhatók akár viselhető technológiákon (pl. okosórákon), akár mobilalkalmazásokon keresztül lehetővé téve a jelenlegi cukorbeteg-ellátási rendszerek automatizálását, személyre szabását és hatékonyságának növelését.

4.2 MRI képek feldolgozása

II. Téziscsoport: Az MRI adatokra alkalmazott fejlett feldolgozási technikákra összpontosító kutatások

Tézis II.1

Kifejlesztettem egy mesterséges intelligencia alapú megoldást, amely a csecsemő agyszöveinek pixeles szintű szegmentálását végzi MRI felvételeken. Az alkalmazott módszer jelentős támogatást nyújthat az orvosi szakemberek számára az agy fejlődési rendellenességeinek korai felismerésében és diagnosztikájában.

Tézis II.1.1

Kimutattam, hogy nem szükséges a hagyományos U-Net architektúra szigorú követése. Kísérleteim rámutattak, hogy a kódoló blokkokban alkalmazott szűrőszám csökkentése, illetve a dekódoló blokkokban történő növelése szintén képes kiváló szegmentálási eredményeket biztosítani.

Tézis II.1.2

Kimutattam, hogy a nem hagyományos költségfüggvények alkalmazása a tanítás során előnyös lehet. A Dice-hasonlósági mérőszámra épülő költségfüggvény használata lényegesen jobb eredményeket nyújt, mint a hagyományos kategóriánkénti keresztentropia alkalmazása.

Tézis II.1.3

Megmutattam, hogy érdemes a videófeldolgozásban gyakran használt (2+1)D konvolúciót alkalmazni a szegmentálási problémában. Egy volumetrikus MRI-felvétel egymást követő szeletei ugyanúgy korrelálnak, mint egy videó egymást követő képkockái.

Tézis II.2

Olyan megoldásokat fejlesztettem ki, amelyek az agyi MRI tumorfelvételek osztályozását pontosabban végzik, mint a jelenlegi legkorszerűbb modellek. Emellett egy olyan komplex megközelítést is kidolgoztam, amely képes a tumor egyidejű osztályozására és szegmentálására.

Tézis II.2.1

Kimutattam, hogy az MRI agytumor képek méretének bizonyos mértékű csökkentése javítja az osztályozás pontosságát. Emellett igazoltam, hogy hatékonyabb tanítási stratégia, ha a modell mentése folyamatosan történik, amikor a validációs adathalmazon mért pontosság növekszik. Továbbá bebizonyítottam, hogy nem minden feladat igényel nagy hálózati méretet: különösen specifikus problémák esetén a kisebb architektúrák hatékonyabban oldhatják meg a feladatot.

Tézis II.2.2

Bebizonyítottam azt az elméletet, hogy ha egy hálózatot egyszerre két problémára képezünk, jobb eredményeket kaphatunk, mintha egyszerre csak egy problémára képeznénk. Ezenkívül létrehoztam egy olyan hálózati modellt, amely egyszerre képes szegmentálni és pontosan osztályozni, ha az összes adat rendelkezésre áll.

A téziscsoporthoz kapcsolódó publikációk: [C7, C8, J5, J6, J7].

Ez a kutatási rész két külön tanulmányt ölel fel az orvosi képelemzés területén. Az első tanulmány a csecsemők agyának MRI-képekből történő szegmentálására fókuszált, melynek célja 6 hónapos csecsemők agyszövetének, konkrétan a fehérállomány, a szürkeállomány, és az agyi gerincvelői folyadék, elkülönítése volt.

Erre a feladatra egy módosított U-Net architektúrát javasoltam, amint azt az első dolgozatomban részleteztem [C8]. A módosítás lényege abban állt, hogy a hagyományos U-Net kialakítástól eltérően csökkentettem a szűrők számát az egymást követő kódoló rétegekben, és növeltem a dekódoló rétegekben. A második dolgozatomban [J5] egy nagyobb kétdimenziós U-Net hálót értékeltem ki, valamint kísérleteztem egy háromdimenziós U-Net hálóval is. Az eredmények azt mutatták, hogy a 3D-s U-Net háló hasonló szegmentálási teljesítményt nyújtott, miközben kevesebb szűrőt alkalmazott, mint a 2D-s változat.

Ebben a tanulmányban bevezettem egy új költségfüggvényt is, amely eltér a megszokott kategorikus kereszt-entrópiától. Ehelyett a Dice hasonlósági együtthatót kombináltam a kategorikus kereszt-entrópiával egy hibrid veszteségfüggvény kialakításához. Pontosabban, kiszámítottam a négy osztály Dice-pontszámát, kivontam azt 1-ből, az eredményt 0,5-tel szoroztam, majd hozzáadtam a kategorikus kereszt-entrópiát (szintén 0,5-tel skálázva). Ez a kevert költségfüggvény hatékonynak bizonyult, és jobb szegmentálási eredményekhez vezetett.

Egy harmadik publikációban [J7] új megközelítést valósítottam meg a volumetrikus MRI-adatok szegmentálására a videók osztályozásában gyakran alkalmazott (2+1)D konvolúciók felhasználásával. Mivel a 3D MRI egymást követő szeletei ugyanúgy kezelhetők, mint a video felvételek egymást követő képkockái, ez a technika hatékonyabban rögzítette a szeletek közötti térbeli kapcsolatokat, és a tesztelt architektúrák között a legjobb szegmentálási eredményeket érte el.

A második kutatási irány az agydaganatok osztályozására irányult. A szokásos megközelítésekkel ellentétben, amelyek a daganat jelenlétét detektálják, az én célom a daganat típusának osztályozása volt, megkülönböztetve a gliómát, a meningeómát és az agyalapi mirigy daganatokat. Az első dolgozatomban [C7] egy általam kifejlesztett könnyű konvolúciós neurális hálózatot (CNN) hasonlítottam össze több korszerű modellel, különböző tanítási stratégiákat alkalmazva az egyik a veszteségfüggvény minimalizálására, a másik

pedig a validációs pontosság maximalizálására épült. A kísérletek alapján a maximális validálási pontosságon alapuló modell kiválasztása jobb teljesítményt eredményezett.

Továbbá azt tapasztaltam, hogy a bemeneti kép felbontásának csökkentése az eredeti 512×512 -es méretről 256×256 -ra javította mind a képzés hatékonyságát, mind a végső teljesítményt. A regularizáláshoz szükséges kieső rétegek használata szintén fontos megállapítás volt, míg a 9×9 -es kernelméret alkalmazása nem hozott további előnyöket. Érdekes módon a sűrű rétegekben lévő neuronok számának változtatása minimális hatással volt a modell általános teljesítményére, így egyszerű, jól hangolt hálózatok is felülmúlhatják a nagyobb, összetettebb architektúrák eredményeit bizonyos terület-specifikus feladatok esetében.

Egy következő tanulmányban [J6] a szegmentálás és az osztályozás egyesítésének lehetőségét vizsgáltam egyetlen modellben. Az U-Net utolsó konvolúciós rétegeit, a szegmentációs kimenet előtt, egy külön osztályozó hálózathoz kapcsoltam, amely a korábbi CNN-modellre épült. Mivel rendelkezésre álltak tumorszegmentációs maszkok, a modellt mindkét feladatra egyszerre képeztem ki. A végső kísérletek 128×128 bemeneti felbontással megerősítették a korábbi eredményeket, és kiváló teljesítményt értek el, különösen a közös szegmentálás klasszifikációs modell esetében, amely 0,99-et meghaladó F1-pontszámot ért el, javítva ezzel a kizárólag osztályozásra épülő modell 0,982-es eredményét.

Az orvosi képelemzés területén végzett munkám középpontjában az MRI-adatok feldolgozása áll. Mind a csecsemők agyképi szegmentálása, mind az agydaganatok osztályozása területén sikerült olyan modelleket kifejlesztenem, amelyek pontosan végrehajtják a kijelölt feladatokat. Továbbá, a két funkció egyetlen, többfeladatos modellbe történő integrációja bizonyítja a hatékony, kettős célú mélytanulási megoldások megvalósíthatóságát. Ezek a modellek könnyen telepíthetők klinikai környezetekben, akár felhőalapú rendszerek, akár helyi számítási platformok segítségével, ezáltal egyszerűsítve a diagnosztikai munkafolyamatokat és támogatva az egészségügyi szakembereket a döntéshozatalban.

Szakirodalom

- [R1] Khadijeh Moulaei, Atiye Yadegari, Mahdi Baharestani, Shayan Farzanbakhsh, Babak Sabet, and Mohammad Reza Afrash. “Generative artificial intelligence in health-care: A scoping review on benefits, challenges and applications”. In: *International Journal of Medical Informatics* 188 (2024), p. 105474. ISSN: 1386-5056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2024.105474>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1386505624001370>.
- [R2] Shouroug A Alowais, Sahar S Alghamdi, Nada Alsuhebany, Tariq Alqahtani, Abdulrahman I Alshaya, Sumaya N Almohareb, et al. “Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice”. In: *BMC Medical Education* 23.1 (Sept. 2023), p. 689.
- [R3] Samer Ellahham. “Artificial Intelligence: The Future for Diabetes Care”. en. In: *Am J Med* 133.8 (Apr. 2020), pp. 895–900.
- [R4] Zhouyu Guan, Huating Li, Ruhan Liu, Chun Cai, Yuexing Liu, Jiajia Li, et al. “Artificial intelligence in diabetes management: Advancements, opportunities, and challenges”. en. In: *Cell Rep Med* 4.10 (Oct. 2023), p. 101213.
- [R5] Farida Mohsen, Hamada R H Al-Absi, Noha A Yousri, Nady El Hajj, and Zubair Shah. “A scoping review of artificial intelligence-based methods for diabetes risk prediction”. en. In: *NPJ Digit Med* 6.1 (Oct. 2023), p. 197.
- [R6] Sun Joon Moon, Inha Jung, and Cheol-Young Park. “Current Advances of Artificial Pancreas Systems: A Comprehensive Review of the Clinical Evidence”. en. In: *Diabetes Metab J* 45.6 (Nov. 2021), pp. 813–839.
- [R7] Tri Vu, Feng Lin, Nabil Alshurafa, and Wen Yao Xu. “Wearable Food Intake Monitoring Technologies: A Comprehensive Review”. In: *Computers* 6.1 (2017). ISSN: 2073-431X. DOI: 10.3390/computers6010004. URL: <https://www.mdpi.com/2073-431X/6/1/4>.
- [R8] Miguel Tejedor, Ashenafi Zebene Woldaregay, and Fred Godtliebsen. “Reinforcement learning application in diabetes blood glucose control: A systematic review”. In: *Artificial Intelligence in Medicine* 104 (2020), p. 101836. ISSN: 0933-3657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2020.101836>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0933365718304548>.
- [R9] Param Ahir and Mehul Parikh. “A Review of Recent Advancements in Infant Brain MRI Segmentation Using Deep Learning Approaches”. In: *Smart Trends in Computing and Communications*. Ed. by Tomonobu Senjyu, Chakchai So-In, and Amit Joshi. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 439–452. ISBN: 978-981-99-0769-4.

- [R10] Mohamed Y. Zaky, Nahed S. Lamloum, Nour Y. S. Yassin, and Osama M. Ahmed. “Brain Tumors: Types, Diagnostic Biomarkers, and New Therapeutic Approaches”. In: *Handbook of Oncobiology: From Basic to Clinical Sciences*. Ed. by R. C. Sobti, Nirmal K. Ganguly, and Rakesh Kumar. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 1–21. ISBN: 978-981-99-2196-6. DOI: 10.1007/978-981-99-2196-6_21-1. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2196-6_21-1.

Tézishez tartozó publikációk

- [J1] Lehel Dénes-Fazakas, Máté Siket, László Szilágyi, Levente Kovács, and György Eigner. “Detection of Physical Activity Using Machine Learning Methods Based on Continuous Blood Glucose Monitoring and Heart Rate Signals”. In: *Sensors* 22 (2022). DOI: 10.3390/s22218568.
- [J2] Lehel Dénes-Fazakas, Barbara Simon, Ádám Hartvég, Levente Kovács, Éva-Henrietta Dulf, László Szilágyi, et al. “Physical Activity Detection for Diabetes Mellitus Patients Using Recurrent Neural Networks”. In: *Sensors* 24.8 (2024). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s24082412. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2412>.
- [J3] Lehel Dénes-Fazakas, Barbara Simon, Ádám Hartvég, László Szilágyi, Levente Kovács, Amir Mosavi, et al. “Personalized food consumption detection with deep learning and Inertial Measurement Unit sensor”. In: *Computers in Biology and Medicine* 182 (2024), p. 109167. ISSN: 0010-4825. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.109167>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010482524012526>.
- [J4] Lehel Dénes-Fazakas, László Szilágyi, Levente Kovács, Andrea De Gaetano, and György Eigner. “Reinforcement Learning: A Paradigm Shift in Personalized Blood Glucose Management for Diabetes”. In: *Biomedicines* 12.9 (2024). ISSN: 2227-9059. DOI: 10.3390/biomedicines12092143. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9059/12/9/2143>.
- [J5] Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, Levente Kovács, and László Szilágyi. “Two U-net Architectures for Infant Brain Tissue Segmentation from Multi-Spectral MRI Data”. In: *IFAC-PapersOnLine* 56.2 (2023). 22nd IFAC World Congress, pp. 5637–5642. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.479>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896323008467>.
- [J6] Lehel Dénes-Fazakas, Levente Kovács, György Eigner, and László Szilágyi. “Enhancing Brain Tumor Diagnosis with L-Net: A Novel Deep Learning Approach for MRI Image Segmentation and Classification”. In: *Biomedicines* 12.10 (2024). ISSN: 2227-9059. DOI: 10.3390/biomedicines12102388. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9059/12/10/2388>.
- [J7] Lehel Dénes-Fazakas, Levente Kovács, György Eigner, and László Szilágyi. “Enhanced U-Net for Infant Brain MRI Segmentation: A (2+1)D Convolutional Approach”. In: *Sensors* 25.5 (2025). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s25051531. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/5/1531>.
- [C1] Dénes-Fazakas Lehel, Máté Siket, László Szilágyi, György Eigner, and Levente Kovács. “Effect of Hyperparameters of Reinforcement Learning in Blood Glucose Control”. In: *2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2023, pp. 1333–1340. DOI: 10.1109/SMC53992.2023.10393930.

- [C2] Dénes-Fazakas Lehel, Máté Siket, László Szilágyi, György Eigner, and Levente Kovács. “Investigation of reward functions for controlling blood glucose level using reinforcement learning”. In: *2023 IEEE 17th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. 2023, pp. 000387–000392. DOI: 10.1109/SACI58269.2023.10158621.
- [C3] Lehel Dénes-Fazakas, Máté Siket, Gábor Kertész, László Szilágyi, Levente Kovács, and György Eigner. “Control of Type 1 Diabetes Mellitus using direct reinforcement learning based controller”. In: *2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2022, pp. 1512–1517. DOI: 10.1109/SMC53654.2022.9945084.
- [C4] Marcell Szántó, Gergő Strasser, László Szász, Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, Gábor Kertész, et al. “Utilization of IMU-Based Gesture Recognition in the Treatment of Diabetes”. In: *2022 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*. 2022, pp. 1–5.
- [C5] Lehel Dénes-Fazakas, László Szilágyi, Jelena Tasic, Levente Kovács, and György Eigner. “Detection of physical activity using machine learning methods”. In: *2020 IEEE 20th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*. IEEE. 2020, pp. 167–172.
- [C6] Lehel Dénes-Fazakas, Győző Dénes Fazakas, György Eigner, Levente Kovács, and László Szilágyi. “Review of Reinforcement Learning-Based Control Algorithms in Artificial Pancreas Systems for Diabetes Mellitus Management”. In: *2024 IEEE 18th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. 2024, pp. 000565–000572. DOI: 10.1109/SACI60582.2024.10619866.
- [C7] Lehel Dénes-Fazakas, Levente Kovács, György Eigner, and László Szilágyi. “Brain Tumor Segmentation from Multi-Spectral MRI Records Using a U-Net Cascade Architecture”. In: *2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2023, pp. 3003–3008. DOI: 10.1109/SMC53992.2023.10394588.
- [C8] Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, and László Szilágyi. “Segmentation of 6-month infant brain tissues from multi-spectral MRI records using a U-Net neural network architecture”. In: *2022 IEEE 10th Jubilee International Conference on Computational Cybernetics and Cyber-Medical Systems (ICCC)*. 2022, pp. 000077–000082. DOI: 10.1109/ICCC202255925.2022.9922800.

Tézishez nem tartozó publikációk

- [N1] György Eigner, Dénes-Fazekas L., László Szilágyi, Máté Siket, and Levente Kovács. “Physical Activity Detection Using Machine Intelligence. ATTD 2021 Invited Speaker Abstracts”. In: *DIABETES TECHNOLOGY AND THERAPEUTICS* 23 (2021), A-102-A–102. ISSN: 1520-9156. DOI: 10.1089/dia.2021.2525.abstracts.
- [N2] A. Köble, A. Gyórfi, S. Csaholczi, B. Surányi, L. Dénes-Fazakas, L. Kovács, et al. “Identifying the most suitable histogram normalization technique for machine learning based segmentation of multispectral brain MRI data”. In: *Proc. IEEE AFRICON*. 2021, pp. 71–76.
- [N3] Margit Antal and Lehel Denes-Fazakas. “User Verification Based on Mouse Dynamics: a Comparison of Public Data Sets”. In: *2019 IEEE 13th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. 2019, pp. 143–148. DOI: 10.1109/SACI46893.2019.9111596.
- [N4] Lehel Dénes-Fazakas, Eszter Kail, and Rita Fleiner. “Two-factor, continuous authentication framework for multi-site large enterprises”. In: *2020 IEEE 20th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*. 2020, pp. 173–178. DOI: 10.1109/CINTI51262.2020.9305817.
- [N5] Ágnes Gyórfi, Szabolcs Csaholczi, Ioan-Marius Lukáts-Pisak, Lehel Dénes-Fazakas, Andrea Köble, Olga Shvets, et al. “Effect of spectral resolution on the segmentation quality of magnetic resonance imaging data”. In: *2022 IEEE 26th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*. 2022, pp. 000053–000058. DOI: 10.1109/INES56734.2022.9922634.
- [N6] Máté Siket, Lehel Dénes-Fazakas, Levente Kovács, and György Eigner. “Numba-accelerated parameter estimation for artificial pancreas applications”. In: *2022 IEEE 20th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*. 2022, pp. 279–284. DOI: 10.1109/SISY56759.2022.10036259.
- [N7] Orsolya Csiszár, Luca Sára Pusztaházi, Lehel Dénes-Fazakas, Michael S. Gashler, Vladik Kreinovich, and Gábor Csiszár. “Uninorm-like parametric activation functions for human-understandable neural models”. In: *Knowledge-Based Systems* 260 (2023), p. 110095. ISSN: 0950-7051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.110095>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705122011911>.
- [N8] Barbara Simon, Ádám Hartveg, Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, and László Szilágyi. “Translating Hungarian language dialects using natural language processing models”. In: *2023 IEEE 23rd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*. 2023, pp. 000309–000316. DOI: 10.1109/CINTI59972.2023.10382068.

- [N9] Lehel Dénes-Fazakas, László Szilágyi, György Eigner, Olga Kosheleva, Martine Ceberio, and Vladik Kreinovich. “Which Activation Function Works Best for Training Artificial Pancreas: Empirical Fact and Its Theoretical Explanation”. In: *2023 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. 2023, pp. 496–500. DOI: 10.1109/SSCI52147.2023.10371804.
- [N10] László Szilágyi, Ágnes Györfi, Lehel Dénes-Fazakas, Szabolcs Csaholczi, Ioan-Marius Pisak-Lukáts, and Levente Kovács. “Challenges and Difficulties of Multi-Spectral MRI Based Brain Tumor Detection and Segmentation”. In: *2023 1st International Conference on Health Science and Technology (ICHST)*. 2023, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICHST59286.2023.10565353.
- [N11] Lehel Dénes-Fazakas, Szabolcs Csaholczi, György Eigner, Levente Kovács, and László Szilágyi. “Using Resizing Layer in U-Net to Improve Memory Efficiency”. In: *System Dependability - Theory and Applications*. Ed. by Wojciech Zamojski, Jacek Mazurkiewicz, Jarosław Sugier, Tomasz Walkowiak, and Janusz Kacprzyk. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 38–48. ISBN: 978-3-031-61857-4.
- [N12] Barbara Simon, Ádám Hartveg, Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, and László Szilágyi. “Advancing Medical Assistance: Developing an Effective Hungarian-Language Medical Chatbot with Artificial Intelligence”. In: *Information* 15.6 (2024). ISSN: 2078-2489. DOI: 10.3390/info15060297. URL: <https://www.mdpi.com/2078-2489/15/6/297>.
- [N13] Máté Siket, András Nándor Kis, Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, and Levente Kovács. “Database for storing and accessing diabetes related data in a standardized way”. In: *2023 IEEE 23rd International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*. 2023, pp. 000285–000290. DOI: 10.1109/CINTI59972.2023.10381957.
- [N14] Barbara Simon, Ádám Hartveg, Máté Siket, Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, Levente Kovács, et al. “Data Collection Studies for the Better Understanding of Factors in Type 1 Diabetes Management”. In: *2024 IEEE 11th International Conference on Computational Cybernetics and Cyber-Medical Systems (ICCC)*. 2024, pp. 000375–000380. DOI: 10.1109/ICCC62278.2024.10582945.
- [N15] Lehel Dénes-Fazakas. *Mouse Dynamics Based Intrusion Detection System: Behavioural Artificial Intelligence*. Eliva Press, 2024. ISBN: 978-9999318013.
- [N16] Lehel Dénes-Fazakas. *Hogyan gondolkodik a mesterséges intelligencián a cukorbetegségről*. Globeedit, 2023. ISBN: 978-6206795490.
- [N17] Csaba Potyok, Barbara Simon, Ádám Hartveg, Máté Siket, Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, et al. “Mobile Application Development for Diabetes Patient”. In: *2024 IEEE 18th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. 2024, pp. 000559–000564.
- [N18] Miklos Nagy, Barbara Simon, László Szász, Máté Siket, Lehel Dénes-Fazakas, György Eigner, et al. “Web Application Development for Diabetes Patients”. In: *2024 IEEE 18th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*. 2024, pp. 000573–000580. DOI: 10.1109/SACI60582.2024.10619716.
- [N19] Eva-H. Dulf, Alexandru George Berciu, Lehel Dénes-Fazakas, and Levente Kovacs. “Nature Inspired Optimization Algorithms in Fractional Order Controller Design”. In: *2024 IEEE 28th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*. 2024, pp. 000055–000058. DOI: 10.1109/INES63318.2024.10629099.

- [N20] Moraru Andrei, Eva-H. Dulf, Lehel Dénes-Fazakas, and Levente Kovacs. “Human Body Motion Tracking for Rehabilitation”. In: *2024 IEEE 28th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*. 2024, pp. 000209–000214. DOI: 10.1109/INES63318.2024.10629141.
- [N21] Lehel Dénes-Fazakas, László Szilágyi, Gyorgy Eigner, Olga Kosheleva, Vladik Kreinovich, and Nguyen Hoang Phuong. “Why Bump Reward Function Works Well in Training Insulin Delivery Systems”. In: *Machine Learning and Other Soft Computing Techniques: Biomedical and Related Applications*. Ed. by Nguyen Hoang Phuong, Nguyen Thi Huyen Chau, and Vladik Kreinovich. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 7–13. ISBN: 978-3-031-63929-6. DOI: 10.1007/978-3-031-63929-6_2. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63929-6_2.
- [N22] László Szász, Barbara Simon, Lehel Dénes-Fazakas, László Szilágyi, Levente Kovács, and György Eigner. “Advancing Personalized Diabetes Management: Enabling Research-Driven Closed-Loop Control with AndroidAPS”. In: *IFAC-PapersOnLine* 58.24 (2024). 12th IFAC Symposium on Biological and Medical Systems BMS 2024, pp. 251–256. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.11.045>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896324021724>.
- [N23] Marcell Szántó, Lehel Dénes-Fazakas, Erick Noboa, Levente Kovács, Döníz Borsos, György Eigner, et al. “Developing a Health Support System to Promote Care for the Elderly”. In: *Sensors* 25.2 (2025). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s25020455. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/2/455>.
- [N24] László Szilágyi, György Eigner, Levente Kovács, and Dénes-Fazakas Lehel. “Elevating Security: Mouse Dynamics in Behavior Biometrics for User Identity Authentication”. In: *2024 IEEE 6th International Symposium on Logistics and Industrial Informatics (LINDI)*. 2024, pp. 000227–000232. DOI: 10.1109/LINDI63813.2024.10820440.
- [N25] Lehel Dénes-Fazakas, Kata Sándor-Rokaly, Laszló Szász, Henrik Csuzi, Levente Kovács, László Szilágyi, et al. “Exploring the Integration of Differential Equations in Neural Networks: Theoretical Foundations, Applications, and Future Directions”. In: *2024 IEEE 24th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*. 2024, pp. 221–226. DOI: 10.1109/CINTI63048.2024.10830908.