



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
MECHATRONIKA, OPTIKA ÉS GÉPÉSZETI INFORMATIKA TANSZÉK

TÉZISFÜZET

AZ ÁLLÁS KÖZBEN EGYENSÚLYOZÓ EMBERI TEST ÉS BIOLÓGIAILAG INSPIRÁLT ELEMI SZINTŰ JELFELDOLGOZÁS

PETRÓ BÁLINT

TÉMAVEZETŐ:

KISS RITA M.

EGYETEMI TANÁR, MTA DOKTORA

2022.

1. Bevezetés

A mozgások tanulmányozása egyidős az emberiséggel, kezdve a mindennapos tevékenységek mozdulataitól, a fizikai munkavégzésen, vadászaton, küzdelmen át a sportig és a táncig. A motoros koordináció folyamata maga az egyensúlyozás. Az egyensúly fenntartása, különösen a kétlábú emberek esetében, egy összetett folyamat, amelyet az ideg- és a mozgató szervrendszer integráltan lát el. A statikus egyensúlyt a poszturográfia területe vizsgálja, míg a dinamikus egyensúlyozás kiterjed minden mozdulat vizsgálatára [1]. A posztúra (testtartás) megtartása időkéleltetéssel terhelt nem-lineáris szabályozást igényel; az idegrendszernek a másodperc törtrésze alatt kell beavatkoznia az egyensúly és a pozíció pontosságának megtartása vagy visszanyerése érdekében [2]. Ezt a kihívást a központi idegrendszer betanult és gyorsan előhívható motoros stratégiákkal, vagyis a vázizomrendszer összehangolt működési mintáival oldja meg [3]. Ezen stratégiák intenzíven kutatott területnek számítanak mind elméleti, mind tapasztalati vizsgáldásokat tekintve [4–6].

Az egyensúlyozás, valamint azon keresztül a mozgáskoordináció tanulmányozása meghatározó mind az életminőség javítására irányuló erőfeszítéseink, mind a biológiailag inspirált mérnöki tervezés tekintetében. Jelen dolgozat négy egymáshoz kapcsolódó tématerülettel foglalkozik: az egyensúlyvizsgáló módszerekkel, egy bizonyos egyensúlyfelmérő teszttel, az emberi test nyílt láncú kinematikai modelljeivel, valamint biológiailag inspirált elemi jelfeldolgozással.

Az egyensúlyvizsgáló gyakorlatok és tesztek egyre nagyobb szerepet kapnak a gyógyászat és a sport területén egyaránt. A mozgáskoordináció és a propriocepció fejlesztése nem csupán a sportteljesítmény fokozását szolgálja, hanem szerves részét képezik a gyermekek képességfejlesztésének, valamint rehabilitációs programoknak számos ortopédiai (pl. keresztszalag-szakadás, artrózis, ízületi protézis) vagy neurológiai elváltozások (pl. stroke, demencia, Alzheimer-kór) esetén. A fejlesztés mellett az egyensúlyfeladatokat diagnosztikai célra is használhatjuk, mely intenzíven kutatott terület.

A statikus poszturográfia mellett a dinamikus egyensúlyvizsgálatok is egyre nagyobb teret nyernek. Ilyen például a hirtelen irányváltoztatási teszt [7][8]. A PosturoMed dinamikus egyensúlyozó eszköz 1995-ben került forgalomba, de csak 2004-ben jelent meg a szakirodalomban mint fejlesztő- és tesztrendszer [7]. Az eszközt széles körben alkalmazzák Európában sportolók edzésére, rehabilitációs és terápiás célokra, de elterjedt az egyensúlyozó képesség tesztelésére is. Az eszköz egy merev acéllemezből készült platformból áll (12 kg, 60x60 cm széles), amely nyolc darab merev acélszállal vagy -rugóval van felfüggesztve, ezáltal a vízszintes síkban szabadon mozoghat. A rugóra szerelt platform, mint egy instabil elem nehezíti a normál egyensúlyozást. Egy zárszerkezettel hirtelen perturbáció (kilökés) is biztosítható; a platform hirtelen elmozdulása egyensúlyvesztést idéz elő, amely egyensúlyvisszanyerési mozdulatot indukál. Az egyensúlyvisszanyerés hatékonyságának jellemzésre annak időtartamát, a mozgás csillapítási tényezője, valamint az izmok aktiválási ideje és szintje használható [3,9,10].

Az egyensúlyvizsgálatok során az emberi test hagyományosan egyetlen pontként (a tömegközéppont vagy a talpnyomásközéppont), egy- vagy kéttagú fordított ingaként, vagy több szegmentumból álló testként modellezhető [11]. A modell összetettségének növelésével nő annak pontossága és érzékenysége. A bonyolultabb modellek nehezebben alkalmazhatóak a klinikai gyakorlatban, mert az azokhoz szükséges mérések és számítások speciálisabb és drágább eszközöket és tudást igényelnek. A modell kiválasztásánál figyelni kell arra, hogy az megfelelően részletes legyen a szükséges és helyes következtetések levonásához, ugyanakkor kellőképpen egyszerű mérések tartozzanak hozzá.

A mozgás és a mozgáskoordináció vizsgálata számos különböző modalitású jel mérésén és elemzésén alapul, mint például a pozíciójel, az ízületi szögérték jele, elektromiográfiával mért izomaktivitási jel, elektroenkefalográfiával rögzített agykérgi aktivitás, valamint a pulzus értéke pulzoximéterrel vagy elektrokardiogrammal meghatározva. Ez a sokféle modalitás és fizikai mértékegység megnehezíti a jelek együttes feldolgozását és a közös információ kinyerését, továbbá tipikusan térben

erősen meghatározott időbeli jelekről van szó. Az ilyen adathalmazok feldolgozásához újfajta számítási módszerek szükségesek. Egy újszerű megközelítése a tér-idő adatok feldolgozásának az ún. tüzelő neurális hálózatok (Spiking Neural Network, SNN), amelyeket harmadik generációs neurális hálózatoknak is neveznek. Az SNN adatfeldolgozó elemei (neuronjai) a biológiai neuronokhoz hasonlóan működnek [12].

2. Az érintett tudományterületek jelenlegi állása

A dinamikus egyensúlyozás mérése

Az egyensúlyozás jellemzésére számos különböző egyensúlyozó feladatot, eszközt és tesztet dolgoztak ki, amelyek közül sokat a klinikai gyakorlatban vagy a sporttudományban is alkalmaznak. Ugyanakkor nem találtam az irodalomban egy átfogó leírást, áttekintést, kritikai elemzést az állás közbeni dinamikus egyensúlyozóképességet vizsgáló módszerekről.

A dinamikus egyensúlyozást széles körben a nem-statisztikus körülmények közötti szabályozási folyamatként definiálhatjuk. Jelen munkában leszűkítettem a vizsgálódást a felegyenesedett állás pozíciójára dinamikus körülmények mellett. Az állás közbeni dinamikus egyensúlyozás definíciója: a) az állás egyensúlyának megtartása folytonos perturbáció vagy dinamikus körülmények között; b) az állási egyensúly visszanyerése hirtelen perturbáció után; vagy c) előbbi kettő kombinációja. Az állás közbeni egyensúlyozás tartalmazza a poszturakontrollt, mivel az állási egyensúly megtartására vagy visszanyerésére irányul, illetve az egyensúly megtartási kontroll, mivel a perturbációból eredő zavaró erők hatására ellenerőket is létre kell hoznia.

Kutatás első kérdése: Hogyan csoportosíthatók az állás közbeni dinamikus egyensúlyozás vizsgálatára alkalmazott feladatok és eszközök?

Hirtelen kilökéses egyensúlyozóvizsgálat

A PosturoMed eszközt használó mérési protokollok a klinikai gyakorlatban a platform mozgáspályáját követik le. A platform mozgásából számítják az egyensúlyozás eredményességnek mérőszámait, úgymint az egyensúlyvisszanyerés idejét, a lengőmozgás csillapítási tényezőjét, valamint a platform által bejárt pálya hosszát a perturbációval párhuzamos és arra merőleges irányokban [9].

Az eddig alkalmazott mérőszámok a mozgás hatékonyságát, eredményességét mérik. Feltételezhető, hogy a platform mozgáspályájának alakja, azaz az egyensúlyvisszanyerő mozdulat kivitelezésének módja további információt hordoz a résztvevő koordinációs képességeiről. Az irodalom áttekintése során nem találtam olyan meglévő paramétert, amely a hirtelen irányváltoztatási teszt során számszerűsítene a bejárt pálya alakját. Ennek megfelelően a következő kérdések merültek fel:

Kutatás második kérdése: Milyen paraméter tudja hatékonyan jellemezni a platform pályájának alakját a hirtelen irányváltoztatás után? Hogyan használhatjuk az eredményesség és a mozgásalak paramétereit az egyensúlyvisszanyerő képesség jellemzésére?

Az emberi test nyílt láncú kinematikai modelljei

A szakirodalomban elfogadott, hogy az egyensúlyozás során az idegrendszer néhány bevett koordinációs stratégiát alkalmaz. Állás esetére az ún. boka-csípő stratégia megközelítés három stratégiát különböztet meg: a boka-domináns, a csípő-domináns, valamint a vegyes stratégiákat [13]. A vizsgálat kiértékelésében alkalmazott biomechanikai modellt a vizsgálandó, detektálandó mozgásstratégiáknak megfelelően állítják fel, például a boka-domináns vagy egyéb koordinációs stratégiát szeretnék vele detektálni.

A legtöbb, kinematikai láncú modell felírását egyetlen térbeli síkra szűkítik (az AP vagy az ML síkra) a zavarásnak vagy a mozgásfeladatnak megfelelően. Az irodalomban ritkán találkozunk teljes, három dimenziós

térbeli modellekkel [11]. Ugyanakkor a megzavart állást tekintve nem csupán a perturbáció irányában vagy síkjában, hanem az arra merőleges irányokban is várható szignifikáns mozgás. Ezen koordinációs mintázat vizsgálatához olyan biomechanikai modellt kell alkalmazni, amely a mozgást minden irányban leírja, valamint a mozgásszabályozást létrehozó aktív izomerőt vagy ízületi nyomatékot is képes megbecsülni. Ennek megfelelően olyan nyílt láncú kinematikai modellek vizsgálatát javasoltam, amely minden térbeli dimenziót figyelembe vesz, valamint könnyen konstruálható a Denavit-Hartenberg konvenciót követve.

Kutatás harmadik kérdése: Képes-e egy, az állás közben egyensúlyozó emberi testre felírt konvencionális, nyílt láncú kinematikai modell a mozgást kellő pontossággal leírni, valamint az ízületi nyomatékokat megbecsülni ahhoz, hogy az egyensúlyozási stratégiát detektálja?

Spiking neurális hálóak és a tüzelési kódolás

Egy spiking neurális hálózatban az információ a feldolgozó egységek között bináris tüzelési események sorozataként terjed, melyet a biológiai idegrendszerek működése inspirált. A fizikai valóságban lévő jelforrások azonban analóg, folytonos vagy diszkrét valós értékű időbeli jeleket szolgáltatnak, így szükséges egy kódolási eljárással az analóg értékeket tüzelési események sorozatára lefordítani, hogy az a hálózatnak bemenő adata lehessen. Ez az analóg-tüzelés kódolás jelentős adattömörítést is jelenthet, mivel csak bináris értékek sorozatát eredményezi [14]. A tüzelési kódolás akkor megfelelő, ha az adatredukció és -tömörítés mellett a megfelelő információtartalom megmarad a sorozatban [14–18]. Kritikus fontosságú, hogy az adott feladatnak megfelelő, releváns információtartalmat megőrizze a kódolás.

Minden kódolási eljárás egyedi módon nyer ki információt a bemenő jelből. A fő kérdés a kódolás hatékonysága, azaz, hogy milyen információt veszítünk, és mi marad meg. Általában az SNN-ekkel foglalkozó tanulmányok azzal a feltételezéssel indulnak ki, hogy a bemenő jel már tüzelési sorozat formájában rendelkezésre áll. Kevés kutatás foglalkozott az

egyres kódolási eljárások információtartalomra gyakorolt hatásával, az eredeti jel visszaállíthatóságával, vagy egyáltalán az alkalmazott kódolási eljárás kiválasztási folyamatával. Általában az analóg-tüzelési kódolási lépés önmagában vett optimalizálásával nem foglalkoznak. Ugyanakkor az SNN-ekkel foglalkozó szakirodalom nem állapodott még meg egy olyan módszerben, ami a kódolási eljárások kiválasztására és optimalizálására szolgálna.

Kutatás negyedik kérdése: Hogyan lehet az időbeli tüzelési kódolási eljárásokat az információ megtartás szempontjából optimalizálni?

Kutatás ötödik kérdése: Van-e olyan időbeli tüzelési kódolási eljárás, ami általános eljárásként javasolható?

Kutatás hatodik kérdése: Hogyan lehet az elterjedten használt BSA kódolási eljárást optimalizálni?

3. Az értekezés áttekintése, összefoglalása

Ez a fejezet a disszertáció lényegét foglalja össze tézisek formájában, háttérmagyarázattal és gyakorlati alkalmazással bemutatva.

3.1. Dinamikus egyensúlyozás vizsgálata

Az első kutatási kérdés vizsgálatára egy szisztematikus irodalomkutatást végeztem 2017-ben a PRISMA útmutatásnak megfelelően [19], melyet publikáltam [P1]. Az irodalomkutatás célja volt egy átfogó katalógus elkészítése a dinamikus egyensúlyozás vizsgálati módszereiről, továbbá meghatározni, hogy különböző vizsgálati csoportok esetén mely módszereknek van megfelelő megkülönböztető ereje. Javasoltam egy osztályozási rendszert a módszerek csoportosítására, amelyben a talált vizsgálati módszerek elhelyezhetők (1. táblázat).

1. táblázat. Osztályozási keretrendszer a dinamikus egyensúlyvizsgálatokhoz

Mozgáskényszer típusa	Hirtelen perturbáció	Folytonos perturbáció	Dinamikus körülmény
Szabad mozgás	<ul style="list-style-type: none"> • Szimulált előre esés • Húzás, meglökés, ütés perturbáció • Kéz hirtelen terhelése 	<ul style="list-style-type: none"> • Erőmérő plató vizuális visszajelzéssel • Érintéses perturbáció 	<ul style="list-style-type: none"> • Objektív funkcionális elérési tesztek • Láblóbálás feladat
Transzlációt megengedő	<ul style="list-style-type: none"> • Platform hirtelen transzlációs perturbációval (szabadon mozgó vagy irányított megállással) • Futópad hirtelen transzlációs perturbációval 	<ul style="list-style-type: none"> • Platform folytonos transzlációs perturbációval 	<ul style="list-style-type: none"> • Transzlációs, szabadon mozgó platform
Rotációt megengedő	<ul style="list-style-type: none"> • Platform hirtelen rotációs perturbációval 	<ul style="list-style-type: none"> • Platform folytonos rotációs perturbációval 	<ul style="list-style-type: none"> • Egy- és többtengelyű egyensúlyozó lapok

A kutatás eredményeképpen megfogalmazható az alábbi tézis:

1. tézis: Az állás közbeni dinamikus egyensúlyozás vizsgálati módszerei osztályozhatók együttesen a mozgáskényszer (szabad mozgás, transzlációt megengedő kényszer, rotációt megengedő kényszer) és az alkalmazott beavatkozás típusa (hirtelen perturbáció, folytonos perturbáció, dinamikus körülmény perturbáció nélkül) szerint.

Kapcsolódó publikáció: [P1]

Gyakorlati alkalmazások:

A tézis célja az egyensúlyvizsgáló módszerek kiválasztásának segítése. Adott vizsgálandó csoport esetén a kutatóknak össze kell gyűjteniük a

vonatkozó példákat az irodalomból és a klinikumból, majd a talált módszereket el kell helyezniük az osztályozási rendszerben. Ezek alapján kiválaszthatják vagy a leggyakoribb, legeredményesebb típusú vizsgálati módszert, melyet követhetnek, vagy elkezdhetik kutatni a korábban nem alkalmazott módszereket.

3.2. Egyensúlyvisszanyerés módja

2. tézis: Legyen a hirtelen irányváltoztatási teszt során az alábbi mérőszám az irányultsági arányszám:

$$R = \frac{S_x}{S_y} \quad (1)$$

ahol S_x az alátámasztó platform által a kitéréssel párhuzamos irányban bejárt pálya hossza, S_y a kitérésre merőleges irányban bejárt pálya hossza. Az alkalmazott egyensúlyvisszanyerési stratégia a platform mozgáspályájának alakját számszerűsítő irányultsági arányszámot, valamint az egyensúlyvisszanyerés eredményességét számszerűsítő csillapítási tényezőt párban vizsgálva állapítható meg. Az irányultsági arányszám értékében konzisztens különbség van két és egy lábbon állás esetében az egyensúlyozás eredményességének azonos szintje mellett is.

Kapcsolódó publikációk: [P2-P7]

Háttér magyarázat

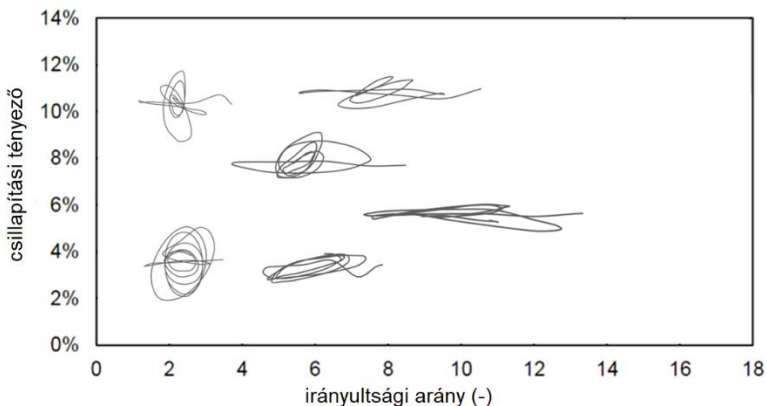
Kutatásokat folytattam a hirtelen meglökés utáni mozgáspálya leírására használható paraméterek leírására. Egy korai munkánkban [P2] műkorcsolyázók bevonásával végeztem vizsgálatokat, ami rámutatott a platform által bejárt trajektóriák különböző alakjára. Legfontosabb szempontnak az tűnt, hogy a mozgás mekkora mértékben marad a kezdeti kilendítés irányában. Bizonyos esetekben az oldalirányú lendítést követően a lengőmozgás idővel előre-hátra irányúvá is válhat. Ez vezetett az

irányultsági arányszám vizsgálatához, amely nem mutatott korrelációt a csillapítási tényezővel, tehát új információtartalmat hordozhat.

Az új paraméter további validálására fiatal, egészséges csoport bevonásával végeztem méréseket az egyensúlyozás eredményességét és annak módját párban vizsgálva [P5]. Azt találtam, hogy az egy- és két lábón végzett egyensúlyvisszanyerések esetében eltérő mozgáspályákat valósítottak meg a résztvevők, azonban ezek hasonló eredményességre vezettek. Későbbi munkáimban az arányszám képletét módosítva azt 0-1 közötti számmá transzformáltam, amely jobb eloszlást eredményez [P9, P10].

Gyakorlati alkalmazás:

A mozgó platform irányultsági arányának vizsgálata új kutatási utakat nyit meg. Az alkalmazott egyensúlyvisszanyerési stratégiák a mozgás alakjának és eredményességének együttes jellemzésével írhatók le (1. ábra). Az alkalmazott stratégia függhet az állás típusától vagy a résztvevő egyensúlyozási képességeitől, így ez a megközelítés alkalmas lehet annak eldöntésére, hogy egy terápiás protokoll az egyensúlyozás eredményességét, a mozgáskoordinációt, vagy mindkettőt módosítja.



1.ábra Különböző egyensúlyozási stratégiák a csillapítás-irányultság térképen

A bővített megközelítést biomechanikai közönségnek [P4] és ortopéd orvosoknak és szakgyógyászoknak is bemutattam [P3]. Fiatalkosárlabdázóknál a test kompenzáló mozgásait is összevettem az egyensúlyozás eredményességével és a platform irányultsági arányszámával [P8]. A hirtelen meglökés irányának hatását szintén vizsgáltam [P6]. Egy másik kutatás alkalmazta a módszert fiatal vitorlázó versenyzőket bevonva, a vizuális visszajelzés és a platform rugóbeállításának hatását vizsgálva [20].

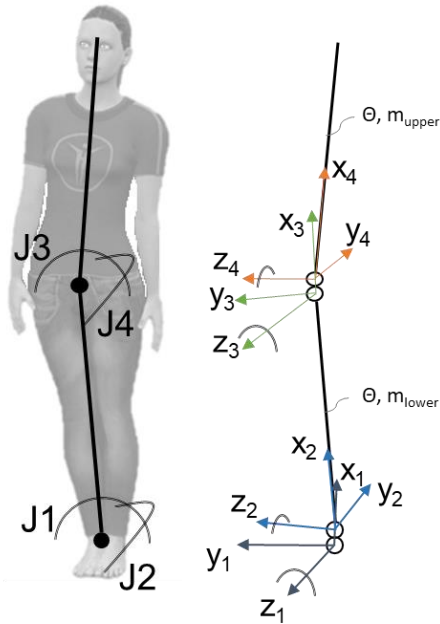
3.3. Egyensúlyozó test modellezése

3. tézis: Képezzünk az állás közben egyensúlyozó emberi test modellezésére a Denavit-Hartenberg konvenció alapján egy fordított ingamodellt, mely két tagból (alsó- és felsőtest) áll, valamint négy szabadsági fokkal rendelkezik (kettő-kettő a boka- és a csípőízület szintjénél). Ez a modell alkalmas az egyensúlyozási stratégiák detektálása céljából kellő pontossággal leírni a test mozgását és megbecsülni a test fő ízületeiben ébredő nyomatékokat.

Kapcsolódó publikációk: [P8-P11]

Háttér magyarázat

Munkám célja volt egy könnyen konstruálható, konvencionális kinematikai modellt felépíteni, amely kellően egyszerű a könnyen alkalmazható mérések kiértékelésére, ugyanakkor kellőképpen részletes is az állás közbeni egyensúlyozás koordinációjának leírására. A választásom emiatt egy két szegmentumból álló modellre esett (2. ábra) [P8].



2.ábra Kéttagú fordított ingamodell

A modell validálása céljából állás közbeni helyzetváltoztató méréseket végeztem egy egészséges felnőtt résztvevői csoporton; a csoport tagjai változatos testfelépítéssel rendelkeztek. A validálás a bokában ébredő, közvetetten mérhető, valamint a modell által becsült nyomaték összehasonlítására irányult [P8]. A nyomatékjelek alakja kiválóan egyezett; az előre-hátra irányban csak statikus hiba adódott. A nullától eltérő átlag mellett a hiba zajként jelentkezett és csak kis mértékben korrelált a nyomatékértékekkel, amely adódhatott a nyomatéki jelek közötti kis mértékű időbeli eltolódásokból.

A hirtelen irányváltoztatási teszt értékelésében is alkalmaztam a két tagú fordított ingamodellt [P9, P10, P11]. A modell segítségével elemezhetővé váltak az egyes ízületek hozzájárulásának mértéke az egyensúlyvisszanyerő mozdulathoz. A négy modellezett ízület lehetővé tette a boka és a csípő,

valamint az előre- és az oldalirányú mozgáskoordináció számszerű elemzését is.

Gyakorlati alkalmazás

Elsősorban a modell egyszerűsége adja a gyakorlati előnyöket: csak három térbeli pont követésére van szükség: a láb (boka), a medence és a fej követésére, akár optikai, vagy egyszerűbb ultrahang- vagy inerciális szenzorokkal. A modell alkalmazásával az eddigi állás közben végzett egyensúlyvizsgálatok egyszerűen műszerezhetők, és a főbb ízületekben ébredő nyomatékok számításával a vizsgálatok objektíven értékelhetővé válhatnak.

3.4. Tüzelési sorozattá alakító eljárások

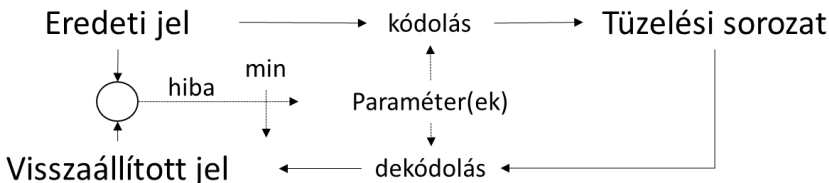
A negyedik, ötödik és hatodik kutatási kérdés megválaszolására kvantitatív és kvalitatív elemzést végeztem különböző időbeli tüzelési kódolási eljárás kapcsán, hogy útmutatást adhassak a kódolási eljárás kiválasztására, optimalizálására és validálására. Egy három lépésből álló folyamatra tettem javaslatot. Először az átalakítandó jel tulajdonságai alapján kiválasztjuk a kódolási eljárást. Másodszor, a kódolás paramétereit optimalizáljuk az eredeti és a helyreállított jelek közti hibametrikák szélső értékének keresésével (verifikálás az időtartományban). Harmadszor, a kódolást validáljuk az eredeti jel, és a tüzelési sorozat összehasonlításával az idő- és frekvenciatartományban.

Elemzésem során négy mesterségesen generált, jellegükben eltérő tesztelő jelre végeztük; lépcsős, zajos periodikus, trenddel rendelkező periodikus, valamint esemény jellegű jeleket használtam. Egy stimulus-kódoló típusú algoritmust: a Ben's Spiker Algoritmust (BSA), és három időbeli kontraszt típusú algoritmust: a Threshold-based Representation-t (TBR), a Step-forward kódolást (SF), valamint a Moving window kódolást (MW) elemeztem. Az eredeti és a helyreállított jeleket három hibametrikával is összehasonlítottam: a regressziós együtthatóval, a négyzetes hibával, és a jel-zaj viszonytal.

Az elemzés alapján kimondhatóvá vált az alábbi tézis:

4. tézis: Digitalizált időtartománybeli jel tüzelési sorozattá alakításakor a megmaradó információmennyiség optimalizálása érdekében az alábbi eljárást (3. ábra) célszerű alkalmazni:

- az eredeti jelből az átalakító eljárással előállítjuk a tüzelési sorozatot
- a tüzelési sorozatból az átalakító eljárásnak megfelelő inverz eljárással előállítjuk a visszaállított jelet
- az átalakítás paraméterét (paramétereit) egy célfüggvény szélsőértékének keresésével beállítjuk
- a célfüggvény a visszaállított jel és az eredeti bemenő jel közötti különbséget zajként értelmezve a bemenő jel-zaj viszony aránya, amely maximalizálandó.



3.ábra Tüzelési sorozattá alakítás optimalizálása

Kapcsolódó publikáció: [P12]

Gyakorlati alkalmazás

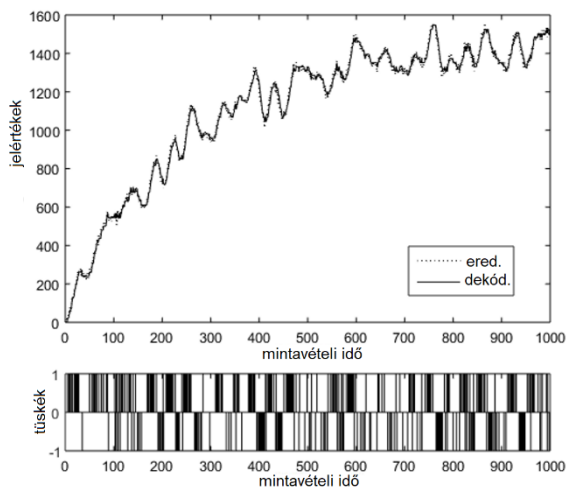
A tüzelési kódolás önmagában vett optimalizálása jelentősen csökkenti a teljes SNN-rendszer paramétoptimalizálásának terét és számítási igényét, valamint biztosítja, hogy a gépi tanulási rendszer a feladat szempontjából releváns információtartalommal kapcsolatos összefüggéseket dolgozza fel.

5. tézis: Digitalizált időtartománybeli jel ternáris (-1, 0, +1) tüzelési sorozattá alakításakor az ún. Step-Forward (SF) algoritmus robusztusan alkalmazható ugrás jellegű; aperiodikus jellegű; trendet tartalmazó; illetve különböző amplitúdójú eseményeket/kilengéseket tartalmazó, zajjal terhelt jelek tüzelési sorozattá alakítására. Az átalakítás optimalizálható a 4. tézisben ismertetett eljárással.

Kapcsolódó publikáció: [P12]

Gyakorlati alkalmazás

Az elemzésem alapján az időbeli kontraszt típusú eljárások közül az SF-algoritmus javasolható, mint általános célú kódolás. Egyrészt sokféle különböző bemenő jelalakot helyesen reprezentál (példa a 4. ábrán), másrészt az optimalizáció egyszerű (csak egyetlen paraméterrel rendelkezik), valamint plató jellege miatt robusztus.



4. ábra Eredeti és helyreállított jel (felül), tüzelési sorozat (alul) SF-kódolással

A kódolás önmagában vett optimalizálása jelentősen csökkenti a teljes SNN-rendszer paraméteroptimalizálásának terét és számítási igényét, valamint

biztosítja, hogy a feladat szempontjából releváns információ tartalommal kapcsolatos összefüggéseket dolgozza fel a gépi tanulási rendszer.

A 3.4-es pontban ismertetett elemzés alapján kimondhatóvá vált az alábbi tézis:

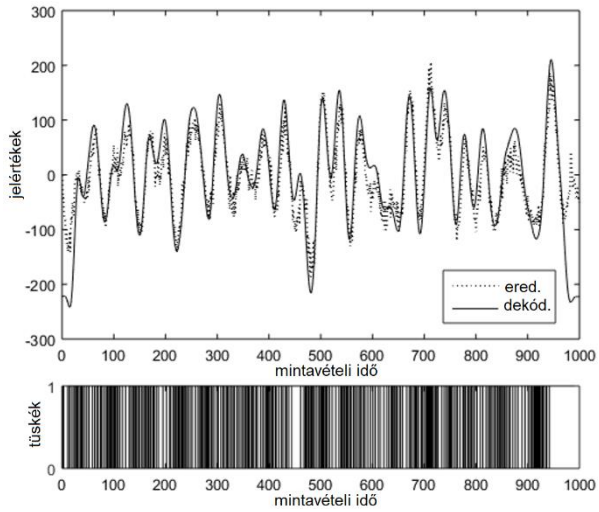
6. tézis: Digitalizált időtartománybeli jel az ún. Ben's Spiker Algorithm (BSA) algoritmus alkalmazásával való bináris tüzelési sorozattá alakításakor a megmaradó információ mennyiség optimalizálása érdekében az alábbi eljárást célszerű alkalmazni:

- először megtervezzük a BSA-algoritmus során használt FIR-szűrőt figyelemmel arra, hogy a szűrő frekvenciaátviteli függvénye illeszkedjen a bemenő jelben lévő hasznos, megtartandó információt tartalmazó frekvenciatartományhoz
- azután felskálázzuk a FIR együtthatóit úgy, hogy az együtthatók összege a bemenő jel amplitúdójának kétszerese legyen
- végül pedig beállítjuk a BSA-algoritmus hibahatár jellegű paraméterét figyelemmel arra, hogy az előállított tüzelési sorozat és az átalakításhoz használt FIR-szűrő konvolúciójaként adódó helyreállított jel, valamint a bemenő jel közti különbséget zajként értelmezve a bemenő jel-zaj viszony aránya maximális legyen.

Kapcsolódó publikáció: [P12]

Gyakorlati alkalmazás

Az optimalizált kódolásra egy példa látható az 5. ábrán. A BSA-kódolás kiemelkedő jelentőségű, mert bináris jelsorozatot generál és a legtöbb SNN-rendszer csak ilyen bemenő adat fogadására képes. Ezért a BSA-kódolás információ megtartásának optimalizálása, illetve használhatóságának kiterjesztése alapvetően segíti az SNN-alapú gépi tanulási kutatásokat és alkalmazásokat.



5. ábra Eredeti és helyreállított jel (felül), tüzelési sorozat (alul) BSA-kódolással

5. Irodalomjegyzék

- [1] D.A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, Wiley, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470549148>.
- [2] J.R. Chagdes, S. Rietdyk, M.H. Jeffrey, N.Z. Howard, A. Raman, Dynamic stability of a human standing on a balance board, *J. Biomech.* 46 (2013) 2593–2602. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.08.012>.
- [3] L.-S.S. Giboin, M. Gruber, A. Kramer, Task-specificity of balance training, *Hum. Mov. Sci.* 44 (2015) 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.012>.
- [4] S. Rietdyk, A.E. Patla, D.A. Winter, M.G. Ishac, C.E. Little, Balance recovery from medio-lateral perturbations of the upper body during standing, *J. Biomech.* 32 (1999) 1149–1158. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(99\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(99)00116-5).
- [5] K. Terry, V.K. Gade, J. Allen, G. F. Forrest, P. Barrance, W. Thomas Edwards, Cross-correlations of center of mass and center of pressure displacements reveal multiple balance strategies in response to sinusoidal platform perturbations, *J. Biomech.* 44 (2011) 2066–2076. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2011.05.018>.
- [6] C. Shirota, A.M. Simon, T.A. Kuiken, Trip recovery strategies following perturbations of variable duration, *J. Biomech.* 47 (2014) 2679–2684. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.05.009>.
- [7] O. Müller, M. Günther, I. Krauß, T. Horstmann, Physical Characterization of the Therapeutic Device Posturomed as a Measuring Device - Presentation of a Procedure to Characterize Balancing Ability, *Biomed. Tech.* 49 (2004) 56–60. <https://doi.org/10.1515/bmt.2004.011>.
- [8] B. Petró, A. Papachatzopoulou, R.M. Kiss, Devices and tasks involved in the objective assessment of standing dynamic balancing – A systematic literature review, *PLoS One.* 12 (2017) e0185188. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185188>.

- [9] R.M. Kiss, A new parameter for characterizing balancing ability on an unstable oscillatory platform, *Med. Eng. Phys.* 33 (2011) 1160–1166. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.04.017>.
- [10] J. Pfusterschmied, T. Stöggel, M. Buchecker, S. Lindinger, H. Wagner, E. Müller, Effects of 4-week slackline training on lower limb joint motion and muscle activation, *J. Sci. Med. Sport.* 16 (2013) 562–566. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.12.006>.
- [11] A. Crétual, Which biomechanical models are currently used in standing posture analysis?, *Neurophysiol. Clin.* 45 (2015) 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2015.07.004>.
- [12] W. Maass, Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models, *Neural Networks.* 10 (1997) 1659–1671. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(97\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(97)00011-7).
- [13] F.B. Horak, L.M. Nashner, Central programming of postural movements: Adaptation to altered support-surface configurations, *J. Neurophysiol.* 55 (1986) 1369–1381. <https://doi.org/10.1152/jn.1986.55.6.1369>.
- [14] N. Sengupta, N. Kasabov, Spike-time encoding as a data compression technique for pattern recognition of temporal data, *Inf. Sci. (Ny).* 406–407 (2017) 133–145. <https://doi.org/10.1016/J.INS.2017.04.017>.
- [15] P. Lichtsteiner, T. Delbruck, A 64×64 AER logarithmic temporal derivative silicon retina, in: 2005 PhD Res. Microelectron. Electron. - Proceedings of Conf., IEEE, 2005: pp. 406–409. <https://doi.org/10.1109/RME.2005.1542972>.
- [16] T. Delbruck, jAER (Java tools for Address-Event Representation neuromorphic processing) open source project, <Http://Jaerproject.Net>. (2007). <https://github.com/SensorsINI/>.
- [17] S. Thorpe, A. Delorme, R. Van Rullen, Spike-based strategies for rapid processing, *Neural Networks.* 14 (2001) 715–725. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(01\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(01)00083-1).

- [18] A. Delorme, S.J. Thorpe, SpikeNET: An event-driven simulation package for modelling large networks of spiking neurons, *Netw. Comput. Neural Syst.* 14 (2003) 613–627. https://doi.org/10.1088/0954-898X_14_4_301.
- [19] A. Liberati, D.G. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P.C. Gøtzsche, J.P.A. Ioannidis, M. Clarke, P.J. Devereaux, J. Kleijnen, D. Moher, The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions : Explanation and Elaboration, 6 (2009). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>.
- [20] B. Kiss, G. Nagymate, R.M. Kiss, Examination of sailors' balancing ability with means of motion analysing system, in: *Proc. 13th IASTED Int. Conf. Biomed. Eng. BioMed 2017, ACTAPRESS, Calgary, AB, Canada, 2017: pp. 195–199.* <https://doi.org/10.2316/P.2017.852-050>.

6. Tézisekhez kapcsolódó saját publikációk

[P1] **Balint Petro**, Alexandra Papachatzopoulou, Rita Kiss: Devices and tasks of objective dynamic balancing assessment – A systematic literature review. PLOS ONE 12(9): e0185188 (2017)

[P2] **Petró Bálint**, Dr. Kiss Rita: Directional ratio: a proposed new variable of dynamic balance regain. Recent Innovations in Mechatronics, 4, 1-4, (2017)

[P3] **Petró Bálint**, Kiss Rita M: A dinamikus egyensúlyozó-képesség hirtelen irányváltóztatási tesztjének értékelési módszere (előadás, absztrakt). Magyar Ortopédiai Társaság 60. Kongresszusa, 2017. június 29. – augusztus 1., Nyíregyháza, Paper A-0041.

[P4] **Bálint Petró**, Gergely Nagymáté, Rita M. Kiss: A new method in dynamic balancing capability evaluation (presentation, abstract). 22nd Congress of the European Society of Biomechanics. Konferencia helye, ideje: Lyon, Franciaország, 2016.07.10-2016.07.13. Paper 79-1734-1. 1 p.

[P5] **Petro, Balint**; T Nagy, Judit; Kiss, Rita M: Effectiveness and recovery action of a perturbation balance test – a comparison of single-leg and bipedal stances. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 21(10), 593-600, (2018)

[P6] **Petró, B.**, & Kiss, R. M.: Effects of perturbation direction on single-leg stance balance recovery performance (presentation, abstract). Francesca Cosmi (ed.) "34th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, University of Trieste, Italy, 2017", Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2017

[P7] **Petró Bálint**, Kiss Rita: Az egyensúlyvisszanyerési mozgás formája és eredményessége a hirtelen irányváltóztatási teszt során fiatal kosárlabdázók esetében. Biomechanica Hungarica (*in press*)

[P8] **Petró, B.**, Kiss, R.: Validation of the Estimated Torques of an Open-chain Kinematic Model of the Human Body, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 66(2), 175-182, (2022).

[P9] Bernadett, Kiss; **Balint, Petro**; Rita, Kiss: Analysing human balance recovery action using calculated torques of a double pendulum model (abstract). Stefan, Dan Pastrama; Dan, Mihai Constantinescu (szerk.) 35th Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, Sinaia, Románia (2018) pp. 121-122.

[P10] **Balint, Petro**; Bernadett, Kiss; Rita, Kiss: Analysing human balance recovery action using calculated torques of a double pendulum model. Materials Today: Proceedings, 12(2), 431-439, (2019).

[P11] **Petró Bálint**, Kiss Rita M.: Az egyensúlyozó emberi test modellezése kéttagú, négy szabadságfokú fordított ingával. XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc-Egyetemváros, 2019. augusztus 27-29.

[P12] **Balint Petro**, Nikola K Kasabov, Rita M Kiss: Selection and optimization of temporal spike encoding methods for spiking neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 31(2), 358-370, (2020).