

AUGMENTED REALITY MARKEREKEN ALAPULÓ MOZGÁSVIZSGÁLÓ RENDSZER VALIDÁLÁSA

Nagymáté Gergely, Kiss Rita M.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

rikiss@mail.bme.hu

DOI: 10.17489/2018/1/02

Absztrakt

A mozgásvizsgálatok iránti igény egyre jelentősebb napjainkban, azonban a mozgásvizsgáló rendszerek magas költsége elterjedésének gátat szab. Így igény van az olcsóbb mozgásvizsgáló rendszerek fejlesztésére is. A kutatás célja egy Augmented Reality (AR) markereken alapuló mozgásvizsgáló rendszer validálása. A validálás első lépése az AR markerek pozíció számítási hibájának vizsgálata OptiTrack Flex13 hagyományos mozgásrögzítő rendszer segítségével. A vizsgálat kiterjed emberi alanyon végzett járásvizsgálat származtatott távolság-idő és szög jellegű járásparamétereinek összehasonlítására az AR markeren alapuló és az OptiTrack mozgásvizsgáló rendszer egyidejű mérései esetén. A marker abszolút pozícióhibája visszavezethető a referenciarendszerrel való koordináta-rendszer összerendelés véges pontosságára. A távolság-idő paraméterek pontossága az AR markeres rendszerben kielégítő, azonban a szögjellegű járásparaméterek eltérést mutatnak, melyek az AR marker orientáció meghatározásának pontatlanságára vezethetőek vissza. Az orientáció meghatározás továbbfejlesztésével a bemutatott AR markeres rendszer a hagyományos optikai mozgásvizsgáló rendszereknek egy olcsó alternatívája lehet.

Kulcsszavak: járásvizsgálat, augmented reality, validálás

Validation of a gait analysis system based on Augmented Reality markers

Abstract

The demand for motion analysis is increasingly significant nowadays, but its spreading is limited by the high costs of the motion analyzer systems. Therefore there is a need for cheaper motion analysis solutions. This paper introduces the validation of an Augmented Reality (AR) marker based motion capture system. First step of the validation process is the study of position error of the AR marker detection using an OptiTrack Flex13 conventional motion capture system. Further analysis have been conducted on the gait analysis of a human participant where time-distance and angular gait parameters have been compared between the simultaneous measurement of the AR marker and the OptiTrack system in two measuring setup. Absolute position errors of the marker can be explained by the insufficient coordinate system alignment between the two systems. The accuracy of time-distance gait parameters is sufficient, but the angular parameters indicate inaccuracies which can be explained with the orientation determination of the AR markers. By improving the orientation determination the AR marker system can be a cheap alternative to the conventional optical motion capture systems.

Keywords: gait analysis, augmented reality, validation

Bevezetés

Napjaink a biomechanikai kutatásokban a mozgásvizsgálatok jelentősége nő, a klinikai gyakorlatban és a rehabilitáció területén egyaránt széles körben elterjedt.¹ A különböző mozgásvizsgáló rendszerek közül (inerciális, ultrahangos, optikai) a legrobusztusabb és legpontosabb eredményt a többkamerás, sztereofotogrammetriai elveken alapuló mozgásrögzítő rendszerek szolgáltatják.² Az ilyen típusú mozgáslaborokban a mozgástér körül számos kamera telepítése szükséges. A vizsgált személy biomechanikai modellek szerint meghatározott anatómiai pontjaira³ fényvisszaverő markereket helyeznek, amelyek térbeli helyzetét (térbeli koordinátáit) a kamerarendszer határozza meg. Inverz kinematikai számításokkal a kijelölt pontok mozgásából (térbeli helyzet időbeni függvénye) szögjellegű és távolság-idő jellegű járásparaméterek számíthatók, amelyekkel a mozgás numerikusan jellemezhető.

Egy másik megoldás, amikor a vizsgált személy testszegmenseire széles elasztikus pántokkal úgynevezett markerklaszttereket rögzítenek. A klasztert alkotó (legalább három) markerekkel egy merev test mozgása leírható. Ha a klaszter a testszegmensen elmozdulásmentesen, mereven együtt mozog, akkor a testszegmens mozgása a klaszter mozgásával megegyezik. A kalibrálás fázisában a klaszter lokális koordinátarendszerében a kijelölt anatómiai pontok helyzete megadható. Az anatómiai pontok helyzete a globális koordinátarendszerben –homogén koordináta-transzformáció segítségével– a klaszter három markerének mért térbeli helyzetéből számítható.³ Előnye, hogy a bőrmozgás okozta hiba nagymértékben csökken,⁴ valamint a testszegmens tetszőleges számú és helyzetű anatómiai pontjának térbeli helyzete a három ténylegesen mért marker helyzetéből számítható.

A többkamerás mozgásvizsgáló rendszerek által nyújtott vizsgálatok iránti igény nagy, ezek elterjedésének azonban gátat szab magas beszerzési és telepítési költség, továbbá állandó, nagy helyigény. A megfizethető mozgásvizsgálatok iránti igény megköveteli olyan alternatív módszerek fejlesztését, amelyek a drága sokkamerás rendszerekhez képest olcsóbbak, hordozhatóak, de pontosságuk hasonló.

A kiterjesztett valóság (angolul: Augmented Reality, továbbiakban AR) fogalmával főleg marketing célú mobil alkalmazásokban találkozhatunk. Ez a technológia valamilyen síkbeli (pl. QR kódhoz hasonló) markerek segítségével teszi lehetővé a tetszőleges objektumok számítógéppel generált 3D képének a markerhez képest helyes orientációban történő, élő kameraképre történő rajzolását. Ezekben az alkalmazásokban a változó pozíciójú kameranézetrel olyan hatás érhető el, mintha a 3D-s számítógépes modell a valóság része lenne. A feladat megoldásához az AR markerek ugyanazon pozíció- és orientáció-jellemzőinek meghatározása szükséges, mint a mozgásvizsgálatokban alkalmazott markerklasztterek esetén. A különbség az, hogy az AR marker használata esetén ezt általában egyetlen kamera használatával (pl. okostelefon kamerája) oldják meg.

A jelen kutatás célja egy olyan AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer validálása,⁵ mérési pontosságának meghatározása, amely a testszegmens orientációját és pozícióját a markerklasztteres megközelítést alkalmazva, AR marker használatával határozza meg. Az új mozgásvizsgáló rendszer pontosságát egy hagyományos sok kamerás mozgásrögzítő rendszerrel két módon is meghatároztuk: először az AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer abszolút pozíciókövetési pontosságát vizsgáltuk, míg a második validálási módszer során szimultán rögzített járásvizsgálattal a két rendszer által mért jellemzőkből számított járásparamétereket hasonlítottuk össze.

Mérési módszerek

Az új fejlesztésű AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer validálásához az OptiTrack (Natural Point, Egyesült Államok, Oregon) optikai-alapú mozgásvizsgáló rendszert használtuk. Mindkét mozgásvizsgáló rendszer a mozgásvizsgálatoknál elterjedt klasztermarkeres eljárás elvét használja az anatómiai pontok térbeli helyzetének meghatározására.⁶

AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer

AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer esetén a testszegmentumok, mint merev testek, mozgását a testszegmentumra elmozdulásmentesen, elasztikus pánttal rögzített, sík négyzetlapra nyomtatott AR markerekkel követjük. Az AR marker mozgását videokamerával kell rögzíteni. Az Olson féle AprilTag algoritmuson⁷ alapuló, saját fejlesztésű, C++ nyelven írt mérést vezérlő program a marker detektálása után az AR marker pozícióját és orientációját a kamerához képest számítja. Ennek ismeretében a klasztermarkeres eljárással⁶ megegyező módon a kalibrációs fázisban megadott anatómia pontok térbeli helyzete saját fejlesztésű MATLAB-alapú programmal számítható (The MathWorks, Inc., Egyesült Államok, Massachusetts, Natick, verzió: R2017b).

A méréshez szükséges videofelvételek GoPro Hero 5 akciókamerával (GoPro Inc. Egyesült Államok, San Mateo) készítettük. Az akciókamera választását a pontosságot befolyásoló nagy felbontás (maximum 4k), a mintavételezési sebesség széles tartománya (50- 240 képkocka/másodperc) és a kedvező ár indokolta. A mérések során az AR markereket 2,7k felbontás mellett, 50 képkocka/másodperc sebességen, 1/200 másodperc záridővel rögzítettük.

OptiTrack optikai-alapú mozgásvizsgáló rendszer

A validáló mérések 18 kamerát tartalmazó OptiTrack Flex13 (Natural Point, Egyesült Államok, Oregon) mozgásvizsgáló rendszerrel történtek. Az OptiTrack kamerarendszer markerpozíció meghatározása milliméter alatti pontosságú,² a mintavételezési frekvencia 120 Hz. Jelen esetben a mintavételezési frekvenciát a GoPro felvételek 50 képkocka/másodperc sebességéhez igazítottuk.

Az OptiTrack mozgásvizsgáló rendszer esetén a testszegmentumok, mint merev testek, mozgását a testszegmentumra elmozdulásmentesen, elasztikus pánttal rögzített, három infrareflexiós markert tartalmazó klasztermarkerrel követjük. A klasztermarker három markerének térbeli helyzetét Motive mérést vezérlő programmal (1.10.3-as verzió) rögzítettük. A három marker alkotta merev test térbeli helyzetéből a kalibrációs fázisban megadott anatómia pontok térbeli helyzete - az AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszerrel történő mérésnél is használt MATLAB mérőprogrammal - számítható.

A validáláshoz fejlesztett összetett klasztermarker

Mindkét mozgásvizsgáló módszer a klasztermarkeres eljárás elvét használja, így a szimultán mérések elvégzéséhez célszerű egy olyan, összetett markert (hitelesítő markerklaszter) fejleszteni, amely az AR markert és az OptiTrack méréshez szükséges 3 infrareflexiós markert egyaránt tartalmazza. A fejlesztésnél figyelembe kell venni, hogy a validáló markerklaszter a testszegmentumra elmozdulásmentesen rögzíthető legyen.

A rögzítés kivitelezéséhez speciális markerelrendezéseket alakítottunk ki. A merev lapra rögzített AR markerekhez infrareflexiós markereket illesztettünk úgy, hogy a három

infrareflexiós marker egy merev testet (markerklasztert) határozzon meg. A merev test koordinátarendszerét és az AprilTag algoritmus által detektált AR marker koordinátarendszert a mérés során illesztettük (1. ábra). Így biztosított, hogy az AR markerek pozícióját és orientációját mindkét mérőrendszer azonos konvenció szerint adja meg. Az AR rendszer viszonyítási pontja a GoPro kamera optikai középpontja, míg OptiTrack rendszer viszonyítási pontja tetszőlegesen megadható a Motive mérést vezérlő programban.

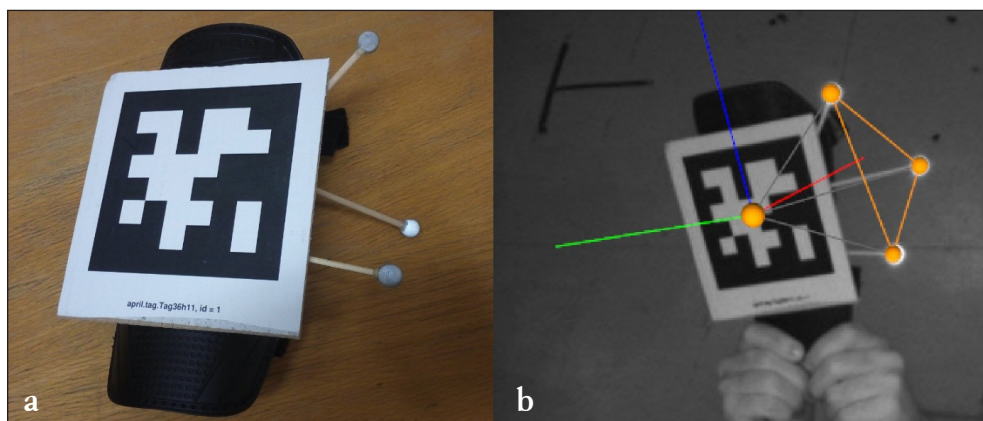
Marker pozíciókövetés pontosságának meghatározása

AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer validálásának első lépése a markerok pozíciókövetési hibájának megállapítása. Ehhez mindkét rendszerhez azonos referenciarendszer definiálása szükséges. Ezért az OptiTrack mozgásvizsgáló rendszer koordinátarendszerének középpontját a GoPro kamera középpontjában kell felvenni: első lépésként origónak az optikával egy vonalba helyezett markert tekintettük, ezt manuális translációval az

optikai tengely magasságába mozgattuk. Az OptiTrack mozgásvizsgáló rendszer koordinátarendszerének és a GoPro kamera optikai tengelyének párhuzamosításához a kamerát úgy állítottuk be, hogy a kamerától 2 méter távolságban, a kamera optikájának magasságába elhelyezett marker a kamera képének a középpontjában (az optikai tengelyen) legyen. Következő lépésként OptiTrack koordinátarendszeren olyan forgatási transzformációt alkalmaztunk, hogy a célpontként használt infrareflexiós marker a megfelelő tengelyre essen. Ezt a Motive programmal ellenőriztük.

Így feltételezhetjük, hogy a koordinátarendszer illesztési hibája nem befolyásolja a két mérőrendszerrel meghatározott pozíció értékét. A két mérőrendszerrel meghatározott pozíció különbsége az AR marker detektálás hibája.

A mérési protokoll szerint a validáláshoz az összetett klasztermarkert egy megközelítőleg 1 m^3 térfogatban szabadon kézzel mozgattuk, egy percen keresztül. A pontosság meghatározásához két mérési módszerrel meghatározott térbeli koordináták közötti korrelációt



1. ábra. a) A hitelesítéshez fejlesztett összetett marker (hitelesítő markerklaszter), amely az AR markert és az OptiTrack méréshez szükséges 3 infrareflexiós markert tartalmazza. A hitelesítő markerklasztert egy lábszárvédőre rögzítettük, így a különböző testszegumentumokra elasztikus tépőzárás pánttal elmozdulásmentesen rögzíthető;

b) Az infrareflexiós markerok által definiált merev test az AR marker definíció szerinti koordinátarendszerével összeillesztve a Motive mérést vezérlő programban

Pearson-féle korrelációval határoztuk meg, és elvégeztük a Bland-Altman analízist is.⁸

A mozgást jellemző paraméterek pontossága

AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer validálásának második lépése a két módszerrel meghatározott anatómiai pontok térbeli helyzetéből számított járásparaméterek összehasonlítása. Mindkét módszer esetén a mérési adatok azonos típusúak, az AR marker térbeli helyzete és a három marker által meghatározott merev test térbeli helyzete. Ezekből az adatokból a kalibrálási fázisban kijelölt anatómiai pontok térbeli helyzete saját fejlesztésű feldolgozó programmal számítható. A méréshez használt anatómiai pontokat a Kiss-Kocsis féle 19 pontos biomechanikai modellnek megfelelően választottuk.³

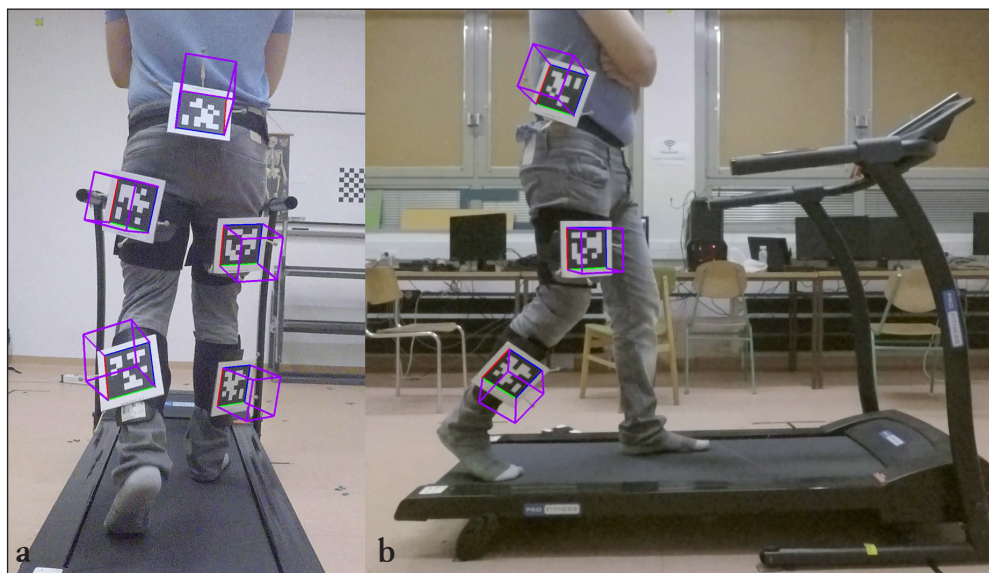
A vizsgált személy

A validálásba egy 27 éves, egészséges férfi (magasság: 176 cm, testtömeg: 82 kg) került bevonásra, akinek semmiféle ortopédiai, belgyógyászati és idegrendszeri elváltozása nem

volt. A vizsgált személy írásos beleegyezését adta a méréshez és az adatok anonim feldolgozásához, a vizsgálatot a helyi tudományos etikai bizottság a 21/2015-ös hivatkozási számon hagyta jóvá.

A mérési protokoll

Az összehasonlító mérés lépései: Az összehasonlító mérésekhez fejlesztett összetett klasztermarkert a vizsgált testszegmensekre (medence, comb és lábszár) (1. ábra) rugalmas, tépőzáras pánntal, elmozdulásmentesen erősítettük fel (3. ábra). A járásvizsgálatot két konfigurációban végeztük el. Első esetben az AR markerek hátrafelé néztek, és a GoPro kamera az alany mögött kettő méterrel volt elhelyezve (2.a ábra). A másik elrendezésben a GoPro kamera jobb oldalról úgy rögzített felvételeket (2.b ábra), hogy a rendszer járásparaméterekre vonatkozó irányfüggését is vizsgálni tudjuk. Ebben a mérésben a markereket jobbra kifordítottuk a testszegmentumokon. Utóbbi elrendezésben így csak a jobb láb vizsgálata volt kivitelezhető kitakarás miatt.



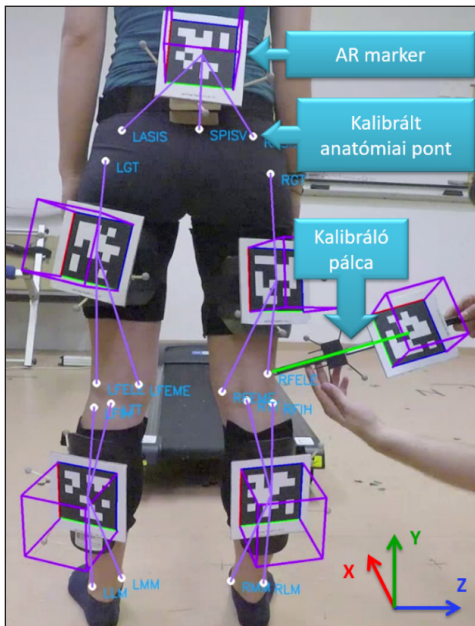
2. ábra. Mérési elrendezések a GoPro kamera belső nézetéből (mérés hátulról (a), mérés jobb oldalról (b))

A mérés menete:

1. A vizsgált személyen a hitelesítéshez fejlesztett, összetett klasztermarkert az alsó végtag testszegmenseire (medence, comb és lábszár) (1. ábra) rugalmas tépőzáras pánttal, elmozdulásmentesen felerősítettük úgy, hogy az összetett klasztermarker hátrafelé nézzen.
2. A GoPro kamera elhelyezése a futószalag mögött két méterrel.
3. Anatómiai kalibrálás a mutatópálccal a saját fejlesztésű mérőprogramban (3. ábra).
4. A futószalagon történő gyakorlás 5 percig, szabadon választott sebességgel, közben a GoPro kamera és az OptiTrack mozgás-

vizsgáló kamerarendszer működésének ellenőrzése.

5. 3 km/h sebességű futószalagon végzett járás rögzítése egy perc hosszan, mindkét mozgásvizsgáló rendszerrel szimultán (a GoPro rögzítése visszaszámlálólóval indult, aminek a végén hangjelzés hatására a Motive mérőprogramban is elindítottuk a rögzítést).
6. A GoPro kamera áthelyezése a futószalag jobb oldalára, attól két méterre. Az áthelyezéssel csak a jobb alsó végtag mozgása rögzíthető, de az irányfüggés hatása elmezhető.
7. A hitelesítéshez fejlesztett, összetett klasztermarker átforgatása, hogy az jobbra nézzen.
8. Ismételt kalibráció –a 3. pont alapján– az új marker elrendezéshez.
9. 3 km/h sebességű futószalagon végzett járás rögzítése egy perc hosszan, mindkét mozgásvizsgáló rendszerrel szimultán, az 5. pontban ismertetett módon.



3. ábra. AR markerek a testszegmenseken anatómiai kalibrálás közben egy női alanyon. A lila kockák, a fehérrel jelölt anatómiai pontok és kék címkék valamint a zöld mutatópálca kirajzolását a feldolgozó program végzi. A kép jobb alsó sarkában a feldolgozáskor használt koordináta-rendszer tengelyeinek iránya látható, amelynek valódi középpontja a kamera fókuszpontjában van

Az összehasonlításhoz számított járásparaméterek

A járást jellemző paramétereket a kijelölt anatómiai pontok térbeli koordinátáiból számítjuk (Kiss-Kocsis féle 19 pontos biomechanikai modell pontjai³). Az anatómiai pontok térbeli koordinátáinak segítségével a szög jellegű járásparaméterek a nyílt forráskódú OpenSim szoftverrel⁹ meghatározhatók. Az OpenSim csontváz modell vizsgált testszegmenseinek méretét az alkalmazott biomechanikai modell pontjainak távolsága alapján a szoftverben skáláztuk, hogy a szögek számolásához használt inverz kinematikai megoldás hibáját minimalizáljuk. Az adatok lépésciklusra bontásához a sarokütéseket Kiss szerint¹⁰ a belső boka és a megfelelő oldali csípőtővis menetirány szerinti koordinátakülönbség maximumánál detektáltuk. A lépésciklusra bontást és az erre épülő távolság-idő paraméterek számí-

tását a mérőrendszerek leírásánál már részletezett MATLAB program végezte. A következő paramétereket számítottuk:

- Lépéspár hossz
- Lépéshossz
- Támaszfázis és lendítófázis időtartama
- Lépésciklus ideje
- Lépésszélesség
- Térd és csípő flexió-extenzió szög mozgástartománya
- Térd flexió-extenzió szög első gördülés alatti maximuma

Az összehasonlításhoz páros paraméterek esetén a jobb lábra definiált paramétereket vizsgáltuk, mert a jobb oldalról végzett mérés során a jobb oldali láb adatai dolgozhatók fel. A szögértékek és a pozícióadatok lépésciklusokon belül 100 mintára interpoláltak a lépésciklus százalékos felbontásának megfelelően. Szögértékeknél összehasonlítjuk a mozgástartományt és az egymásra illesztjük a görbéket. A távolság idő jellegű paraméterek grafikus összehasonlítása mellett az átlagértékek százalékos hibáját is megadtuk.

Eredmények

Az AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer pozíciókövetési pontossága

Az AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszerrel történő pozíció meghatározás pontossági mérésének eredményét a 4. ábra mutatja be. Egyértelmű a szoros összetartozás a két rendszer méréseiben, melyet a korrelációs érték is jól mutat (két tizedes jegyig 1-re kerekíthető). A Bland-Altman analízis árnyaltabban mutatja be az eltéréseket, amelyek elsősorban eltolás jellegűek (x, y, z rendre 30, -7,1 és -6,6 mm). Az átlagos eltérés körüli 95%-os konfidencia intervallum szélessége x, y, z koordinátákra rendre 50,6, 19,4 és 24,6 mm.

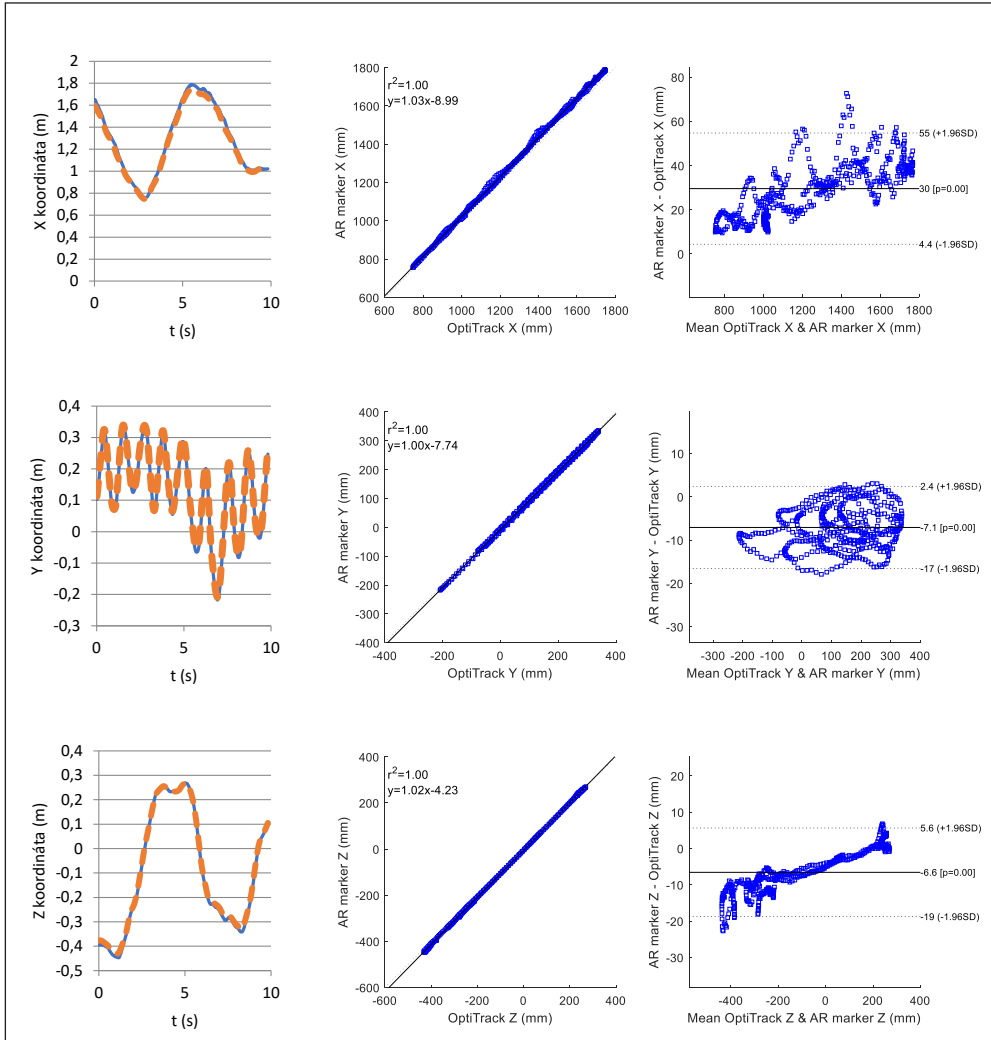
Az AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszer pontossága járásvizsgálat esetén

A távolság-idő jellegű járásparáméterek összehasonlítása a 1. táblázatban látható. A hátulról és az oldalról készült felvételek esetén is a hibaszázalék alacsony: lépésszélesség középértékében a maximum hiba 6 mm (2,78 %), míg a járásciklus lendítófázis időtartamában a maximum hiba 0,17 s (3,41 %). A járás szabályosságát jellemző szórás értékek mindkét irányból készült felvétel esetén a két rendszer mérési eredményeiből számítva azonosak (1. táblázat). A vizsgált szögjellegű járásparáméterek esetén (térd- és csípőszögek) eltérések mutatkoznak a két rendszer méréseinek összehasonlítása során, de a referenciarendszer hátulról és oldalról rögzített markerekkel végzett mérési elrendezései között is. Ezen szögek átlagolt lépésciklusra vetített értékeit a különböző mérési elrendezések alapján térdszög esetén az 5. ábra, míg csípő esetén a 6. ábra mutatja be. Az AR markeren alapuló mozgásvizsgáló rendszerrel történő különböző irányú mérések esetén a hiba különböző irányú, így a középérték (az ábrákon zöld szaggatott vonallal jelölve) a referencia rendszerrel jobb összetartást mutat, mint bármelyik különálló AR markeres mérés.

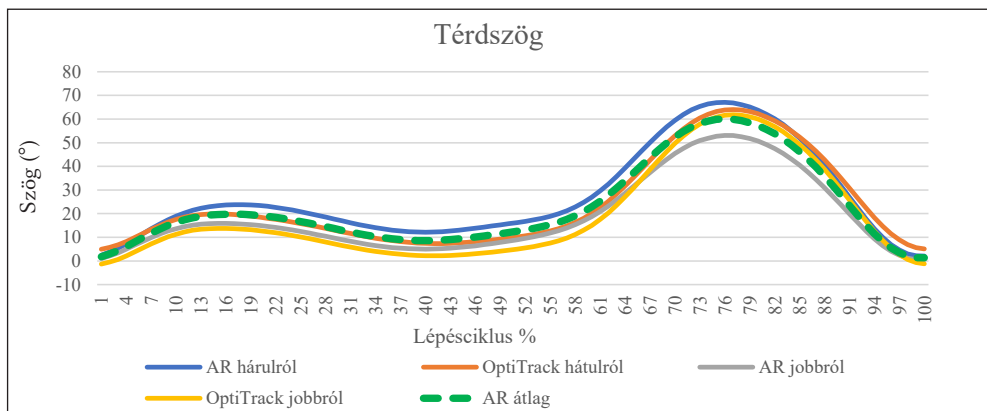
A vizsgált ízületi szögek jellegzetes értékeit a 2. táblázat foglalja össze. A mozgástartományok eltérései jobban láthatók: a hátulról történt felvétel során a térdszög mozgástartománya az OptiTrackes mérésekhez képest 5,91°-eltérést mutat, míg ez az érték az oldalról történt felvétel során 10,68° (2. táblázat). A csípőszög mozgástartomány relatív hibája is az oldalról való felvétel esetén nőtt 2,53°-ról 5,7°-ra. Ezzel szemben a térdszög lépésciklus első gördülése alatti maximum érték hibája 3,91°-ról 2,1°-ra csökkent. Érdekes, hogy az OptiTrack referencia rendszer esetén a két mérési elrendezés során az eltérés a csípő mozgástartománya esetén 6,93°, a térd mozgástartományában 4,12° és első gördüléskori maximum esetén 6,1°.

Járásparaméter	Hátulról			Oldalról		
	AR marker	OptiTrack	Hiba %	AR marker	OptiTrack	Hiba %
Lépéspár hossz [m]	1,042 ± 0,022	1,041 ± 0,019	0,10	1,046 ± 0,029	1,048 ± 0,024	0,48
Jobb lépéshossz [m]	0,522 ± 0,014	0,522 ± 0,015	0,00	-	-	-
Jobb lépésszélesség [m]	0,21 ± 0,018	0,216 ± 0,018	2,78	-	-	-
Lépés ciklusideje [s]	1,25 ± 0,023	1,249 ± 0,022	0,08	1,251 ± 0,028	1,257 ± 0,028	0,16
Jobb lendítő fázisa [s]	0,468 ± 0,015	0,455 ± 0,013	2,86	0,44 ± 0,016	0,457 ± 0,015	3,41
Jobb támasz fázisa [s]	0,781 ± 0,02	0,795 ± 0,019	1,76	0,811 ± 0,023	0,8 ± 0,023	1,97

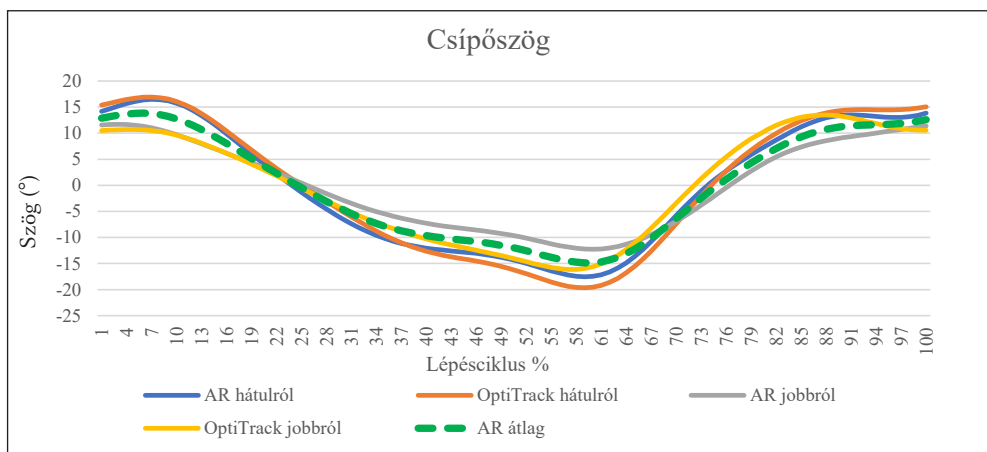
1. táblázat. Távolság-idő jellegű járásparaméterek összehasonlítása (átlag ± szórás)



4. ábra. AR marker pozíció meghatározási pontossága koordinátánként. A bal ábrák a két rendszer által egymásra vetített mérési eredmények (piros: OptiTrack, kék: AR marker). Középen a korrelációs ábrák. Jobb oldali ábrák a Bland-Altman analízis ábrái



5. ábra. Átlagos térdszög alakulása a különböző mérési konfigurációkban



6. ábra. Átlagos csípő flexió-extenzió alakulása a különböző mérési konfigurációkban

Szögparaméter	Hátról			Oldalról			AR átlag
	AR marker	OptiTrack	Hiba %	AR marker	OptiTrack	Hiba %	
Jobb csípő mozgástartománya [°]	34,03±0,03	36,56±0,17	6,92	23,93±0,14	29,63±0,37	19,24	28,98
Jobb térd mozgástartománya [°]	64,98±1,07	59,07±1,31	-10,01	52,51±0,65	63,19±1,17	16,90	58,745
Jobb térd első görbülés maximuma [°]	23,82±1,55	19,91±1,148	-19,64	15,91±1,54	13,81±1,8	-15,21	19,865

2. táblázat. Ízületi szögek jellegzetes értékeinek összehasonlítása a validálás során (átlag±szórás)

Megbeszélés

A kutatás célja, az AR markereken alapuló mozgásvizsgáló rendszer OptiTrack Flex13 mozgásvizsgáló kamerarendszerrel történő validálása a markerek pozíció-meghatározási pontosságának és számított járásvizsgálati

paraméterek összehasonlításával. A referencia rendszerhez képest a marker pozíciókövetése jó pontosságot mutat. A Bland-Altman diagramokon jól látható (4. ábra), hogy a tapasztalt hiba nagyrészt eltolás jellegű. Ennek oka, a pontatlan koordinátarendszer illesztés, mivel a GoPro kamera kameratestében lévő fókusz-

pont koordinátáit csak hozzávetőlegesen lehetett meghatározni. Az x és z tengelyek ábráin megfigyelhető az is, hogy a hibákban egy skálázási tendencia is megfigyelhető. Ez koordináta-rendszer illesztés szöghibájára vezethető vissza, amelyet a regressziós egyenesek 1-nél nagyobb meredeksége is alátámaszt (4. ábra középső oszlop).

A rendszer pontosságáról árnyaltabb képet ad a két rendszerrel mért értékekből számított járásparaméterek összehasonlítása. A távolság- és időjellegű paraméterek pontossága jó (1. táblázat) (maximum 2,86% hátulról és maximum 3,41% oldalról történő mérésnél). A szögjellegű paraméterek esetén az eltérés jóval nagyobb (maximum 5,91° [10,01%] hátulról és 10,68° [16,9%] oldalról) (2. táblázat, 4. és 6. ábra). Az ízületi szögek a markerekhez képest definiáltak, ezért a mérőrendszerek koordináta-rendszer illesztésének pontatlansága itt nem befolyásoló tényező. Az OptiTrack és az AR markereken alapuló mozgásvizsgáló rendszerrel mért értékek közötti hiba oka az AR markerek orientáció meghatározási hibája, amelyet csak közvetve vizsgálunk. A két mérési elrendezésben az AR markereken alapuló mozgásvizsgáló rendszerrel mért értékek mérési hibája ellentétes előjelű, így átlagértékük kisebb mértékben tér el a referencia értékektől. Szembetűnőbb, hogy a kétféle mérési elrendezésben a referencia rendszer mérései között is eltérés található, amelynek nagyságrendje

megegyezik a két mérőrendszer hibájával. A járásvizsgálatok ismétlési pontosságai az irodalomban is hasonló nagyságrendűek,¹¹ melyet anatómiai pontok kalibrálási hibája⁶ okozhat, de nagyságát a mérési elrendezés is okozhatja. Míg a hátulról történő mérés során a marker-klaszter a keresztcsontra feküdt fel, addig az oldalról történő mérés során a csípőhöz illeszkedett, ahol a felfekvési felület jóval kisebb. Ez mozgás közbeni beremegést, elmozdulást is okozhat. Az eredmények alapján az oldalról történő marker elhelyezés (felvétel) az ebben a tanulmányban használt marker rögzítéssel nem javasolt.

A tanulmányban bemutatott mérőrendszer - több szempontot figyelembe véve - alkalmas lehet mozgásvizsgálatok végzésére. A rendszer különösen pontosnak bizonyult a távolság- és idő-alapú járásparaméterek vizsgálata során. A szögjellegű járásparaméterek esetén pontatlanságok mutathatók ki (maximum 5,91° [10,01%] hátulról és 10,68° [16,9%] oldalról). Azt, hogy ez a hiba kezelhető-e, azt az adott mérés kritériumait figyelembe véve lehet eldönteni. A szöghibák nagyobb felbontású kamerával, az AR markerdetektáló algoritmus javításával, vagy más jellegű AR markerdetektáló algoritmus¹² használatával javíthatóak. A szögjellegű hibák csökkentésével a rendszer a hagyományos optikai mozgásvizsgáló rendszereknek egy gazdaságos és hordozható alternatívája lehet.

IRODALOM

1. *Bejek Z, Paróczai R, Illyés Á, Kiss RM.* The influence of walking speed on gait parameters in healthy people and in patients with osteoarthritis. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc* 2006;14: 612–22.
2. *Aurand AM, Dufour JS, Marras WS.* Accuracy map of an optical motion capture system with 42 or 21 cameras in a large measurement volume. *J. Biomech.* 2017;58: 237–240.
3. *Kocsis L, Kiss R, Illyés Á.* Mozgásszervek biomechanikája. *TERC.* 2007.
4. *Leardini A, Chiari A, Della Croce U, Cappozzo A.* Human movement analysis using stereophotogrammetry Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. *Gait Posture* 2005;21:212–25.

5. *Ábrahám Gy, Wenzel K.* Az optikai rendszerek minősítése. *Kép és Hangtechnika* 1989. XXXV:(2) pp. 39-42.
6. *Rácz K, Nagymáté G, Kiss RM.* Effect of Anatomical Landmark Placement Variation on the Angular Parameters of the Lower Extremities. *Biomed. Eng. (NY)*. Calgary, AB, Canada: ACT-APRESS; 2017.
7. *Olson E.* *AprilTag*: A robust and flexible visual fiducial system. *Proc - IEEE Int Conf Robot Autom* 2011:3400–7.
8. *Bland JM, Altman DG.* Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*. 1986 Feb 8;1(8476):307-10.
9. *Delp SL, Loan JP, Hoy MG, Zajac FE, Topp EL, Rosen JM.* An Interactive Graphics-Based Model of the Lower Extremity to Study Orthopaedic Surgical Procedures. *IEEE Trans Biomed Eng* 1990;37:757–67.
10. *Kiss RM.* Comparison between kinematic and ground reaction force techniques for determining gait events during treadmill walking at different walking speeds. *Med Eng Phys* 2010;32:662–7.
11. *Collins TD, Ghousayni SN, Ewins DJ, Kent JA.* A six degrees-of-freedom marker set for gait analysis: Repeatability and comparison with a modified Helen Hayes set. *Gait Posture*. 2009;30(2): 173-180.
12. *Tanaka H.* A Visual Marker for Precise Pose Estimation Based on a Microlens Array. *Int Conf Pattern Recognit* 2012:837–40.

A közlemény az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával és az OTKA K115894 azonosítószámú pályázatának támogatásával készült.

Kiss Rita M.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

H-1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4-6.

Tel.: (+36) 1 463-1738

EZ AZ ÖN HIRDETÉSÉNEK HELYE