

Az emberi kar inverz kinematikája

Stojanovic Márk
Mechatronikai mérnök Bsc hallgató
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Konzulens:
Patkó Dóra
Tanszéki mérnök GPK, Műszaki Mechanikai Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Absztrakt

Az inverz kinematika problémája régóta jelentős kihívást jelent az antropomorf manipulátorok mozgástervezése során. Mi az emberi kar mozgását vizsgálva keresünk a feladatra megoldás. Mivel az emberi kar redundáns, így trajektória követési feladat során nem egyértelmű a megoldás a csuklótérben. A problémát le lehet úgy írni, mint egy optimális megoldás keresését a rendszer kinematikai kényszerei által meghatározott megoldáshalmazban. A dolgozatban lehetséges kritériumokat vizsgálunk az optimális megoldás megtalálására, ezenkívül áttekintjük a szakirodalomban megtalálható módszereket. Minden módszer esetén szimulációkat készítünk, majd az eredményeket összehasonlítjuk az emberi résztvevők segítségével elvégzett mérésekből származó adatokkal, hogy megállapítsuk, az agyunk által alkalmazott megoldások egyeznek-e bármely ismert módszerrel vagy általunk javasolt kritériummal.

Tartalomjegyzék

1. A rendszer bemutatása	5
1.1. Kinematikai és a robotikai alapok	5
1.1.1. A mechanizmusok építőelemei	5
1.1.2. A mechanizmusok és manipulátorok szerkezete	5
1.1.3. Szabadsági fok	6
1.1.4. A redundancia tárgyalása manipulátorok esetében	6
1.2. A model	7
1.2.1. Tipikus értékek az l_1 , l_2 és l_3 számára	7
1.3. Direkt kinematika	8
1.3.1. Denavit-Hartenberg	8
1.4. Inverz kinematika	9
2. A megoldások halmazának meghatározása	10
2.1. Bevezetés	10
2.2. Kétcsuklós eset	10
2.2.1. Singularitások	12
2.3. Három csuklós egyenlet	12
2.3.1. A megoldáshalmaz csökkentése	13
2.3.2. Durva becslés	14
2.3.3. Precíz model	14
3. Lehetséges paraméterek a megoldás kiválasztásához	15
3.1. Minimális csuklómozgás összege	15
3.1.1. Minimum csukló mozgás négyzet összege	18
3.2. Minimum csukló sebességkülönbség	20
3.3. Energia különbség minimuma	22
3.3.1. Teljes energia különbség	25
3.3.2. Teljes energia különbség virtuális rugóval	27
4. A mérés és annak felállításának leírása	30
4.1. Pályatervezés	30
4.2. Konstrukció	31
4.3. LED-ek és elektronika	32
4.4. A mérési berendezés egyéb részei	33
4.5. Mérés	33
4.5.1. Mérés előtti előkészületek	33
4.5.2. Mérés menete	33
5. A mérési adatok kiértékelése	35
5.1. Kiértékelő eszközök	35
5.1.1. Euklideszi távolság	35
5.1.2. Hausdorff távolság	35
5.1.3. Fréchet távolság	35
5.2. Az emberi kéz mozgásainak összehasonlítása önmagával	36
5.3. Madárkák és banánok	37
5.4. Mérési hibák	38
5.5. Szimulált metódusok összehasonlítása	39

5.6. A módszerek valós használhatósága	40
5.7. A többi módszerek alkalmazásának vizsgálata	43
5.7.1. Sebesség alapú módszerek	45
6. Konkluzió	46

1. fejezet

A rendszer bemutatása

Ebben a fejezetben szeretném bemutatni az általunk használt modell részleteit. Néhány alapfogalmat is tárgyalni fogunk, hogy jobban megértsük a dolgozat keretein belül tárgyalt témákat. Emellett megnézzük, hogyan vezettük le az emberi kéz modelljét, a szükséges egyszerűsítésekkel együtt, valamint a modell néhány jellemző értékét, amelyeket mérésekből és antropometriai táblázatokból vettünk. Végül röviden megvizsgáljuk a modell direkt kinematikáját is.

1.1. Kinematikai és a robotikai alapok

Ebben a részben áttekintjük az alapvető mechanizmusok és a manipulátor mozgásszintézishez tartozó definíciókat, valamint a robotika alapfogalmait, a redundancia szerepét, és megvizsgálunk néhány jelentős példát redundáns és nem redundáns manipulátorokra.

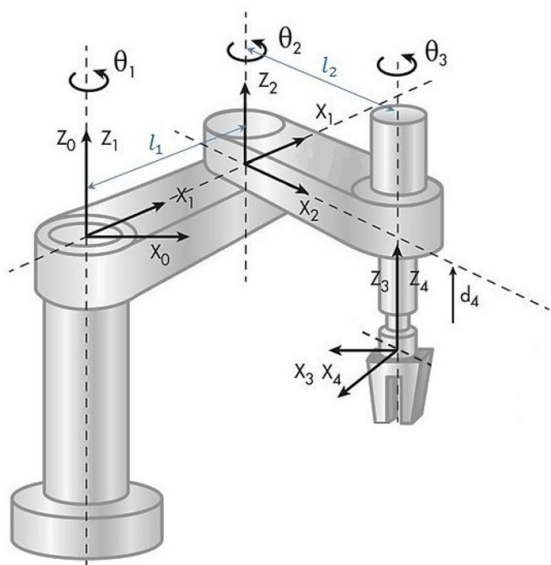
1.1.1. A mechanizmusok építőelemei

A mechanizmusok, így a manipulátorok is, csuklókból és elemekből épülnek fel. Az elemek merev testek, amelyek legalább két csomóponttal rendelkeznek, amelyek csuklókon keresztül kapcsolódási pontként szolgálhatnak más elemekhez. Az elemeket kinematikai és dinamikai paraméterek határozzák meg. A kinematikai paraméterek közé tartozik egy helyi vonatkoztatási rendszer, amely az elemhez van rögzítve, valamint a csomópontok helyzetét leíró távolságvektorok. A dinamikai paraméterek a tömeget és annak tehetetlenségi nyomatékát foglalják magukban. Az elemeket a csomópontok száma alapján kategorizálhatjuk, például bináris, ternáris, kvarternáris, és így tovább. A csukló két elem közötti kapcsolatot jelent, amely bizonyos fokú mozgást engedélyez a csukló által összekapcsolt elemek között. A csuklók esetében megkülönböztetünk két fogalmat: alsó és felső párokat. Felső párok esetén felületi érintkezés jön létre, mint például egy csap egy furaton keresztül, míg az alsó pároknál pont- vagy vonalérintkezés áll fenn, például egy vezérműtengelynél. Hat lehetséges alsó pár létezik: rotációs (R), prizmatikus (P), csavar (H), hengeres (C) és gömbcsuklós (S). Ezek közül csak az első kettő használható síkbeli mechanizmusok leírására, míg a többi ezekből építhető fel. A csuklókat ezen kívül egy másik szempont szerint is osztályozhatjuk, hogy hány szabadsági fokú mozgást engedélyeznek.

1.1.2. A mechanizmusok és manipulátorok szerkezete

Megállapítottuk, hogy a mechanizmusok rudak és csuklók összekapcsolásával (kinematikai párok) épülnek fel, most pedig tekintsünk át néhány definíciót ezeknek az összeállításáról. Az összekapcsolt kinematikai párok sorozata egy kinematikai láncot alkot. A kinematikai láncok a következőképpen kategorizálhatók: egyszerű, összetett, nyitott és zárt. Egy olyan lánc, ahol egy elem nem lép be több mint két kinematikai párosba, egyszerűnek tekinthető, különben összetett láncról van szó. A zárt kinematikai lánc olyan, ahol minden elem több mint két kinematikai párhoz tartozik, míg nyitott lánc esetén legalább egy elem csak egy kinematikai párhoz tartozik. Innen definiálhatjuk a mechanizmust, mint egy kinematikai láncot, amelynek legalább egy "földelt" eleme egy vonatkoztatási rendszerhez van rögzítve.

A manipulátor szerkezete egy rendezett n -szeres, ha a földelt elemtől indulva a másik végpont felé haladva, egy egyszerű nyílt kinematikai lánc esetén, és felsoroljuk a csuklók egybetűs azonosítóit, akkor megkapjuk a szerkezetet. Például vegyük a SCARA robotot, amely a 1.1 ábrán látható, a szerkezete RRPR lenne.



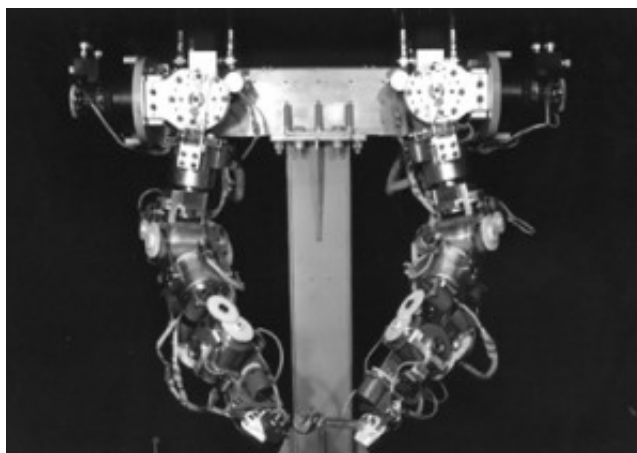
(a) A SCARA robot felépítésének sematikus ábrája [6]

(b) Egy EPSON által gyártott SCARA manipulátor [7]

1.1. ábra. SCARA robotok

1.1.3. Szabadsági fok

A szabadsági fokokat a mechanikai rendszerek mozgékonyságának osztályozására használjuk. A szabadsági fokok definiálhatóak a skalár változók számával, amelyre szükség van az adott objektum vagy mechanizmus pontos helyzetének leírásához. A továbbiakban a szabadsági fokot DoFként említjük az angol "degrees of freedom"-ből.



1.2. ábra. Redundáns manipulátor példa: két 7 szabadsági fokú MELARM robot [5]

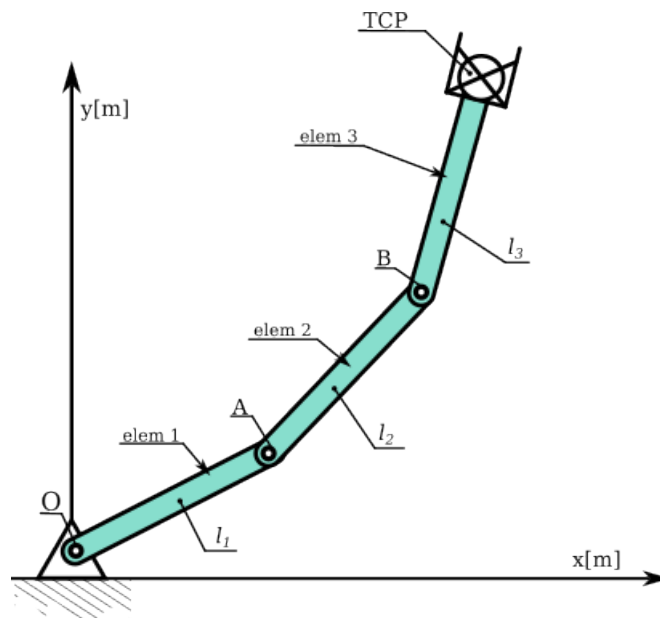
1.1.4. A redundancia tárgyalása manipulátorok esetében

A redundanciát számos rendszerben alkalmazták a megbízhatóság javítása érdekében, és ma már az olyan dolgok, mint az utasszállító repülőgépek, űrhajók vagy áramellátó rendszerek párhuzamos rendszerek nélkül elképzelhetetlenek. Ilyen implementációk biztosítják a zavartalan és biztonságos működést. A manipulátorok esetében a redundancia azt jelenti, hogy több szabadsági fokkal rendelkeznek, mint amennyi egy adott feladat elvégzéséhez szükséges. Például egy manipulátor, amelynél a végrehajtó egység pozíciója és szöge meghatározott, legalább 6 szabadsági fokkal kell rendelkezzen. Ha ennél több, például 7 vagy több szabadsági foka lenne, akkor redundánsnak tekintenénk. Eddig az általános nézet a mechanikában az volt, hogy olyan, lehető legegyszerűbb robotot kell létrehozni, amely még képes elvégezni a feladatot, mivel az ilyen robotok olcsóbbak és egyszerűbben programozhatók. A redundancia a manipulátorok esetében előnyös, mivel ha nem korlátozzuk a mozgást csak egy vagy két lehetséges csuklóútvonalra, akkor a manipulátort úgy tudjuk programozni, hogy a feladatot kisebb csukló terhelésekkel, alacsonyabb gyorsulással és csuklóerőkkel hajtja végre. Egy másik alkalmazás lehet az

akadályok kikerülése a munkatérben. Vegyük például a SCARA robotot, amelyet úgy terveztek, hogy egy hengeres munkatérben végezzen be- és kirakodási feladatokat. Ha azonban akadályt helyeznénk el a munkatérben, mivel a 4 szabadsági fokú robot nem redundáns az adott feladathoz, nem garantálható, hogy képes lenne elvégezni azt. Gyakran az akadálymentes munkaterek biztosítása kihívást jelenthet és költséges lehet, de a redundáns manipulátorok megoldást nyújthatnak ilyen problémákra. A 1.2 ábrán látható egy redundáns manipulátor példája.

1.2. A model

A következő fejezetekben kizárólag az itt bemutatott emberi kar modelljét tárgyaljuk. Ez a modell az emberi kar kétdimenziós egyszerűsítése. Mint tudjuk, a vállhoz kötött vonatkoztatási rendszerben az emberi kar hét szabadsági fokkal rendelkező manipulátornak tekinthető, azonban az agyunk igen ritkán tervez rá 7 DoF-os mozgást, hiszen magát a vállat is mozgathatjuk, így az emberi kar kiegészítéseként szolgál a törzs és valóban 9 DoF-os manipulátorként viselkedik. Itt a hét szabadsági fokú modell egyszerűsített változatával foglalkozunk, vagyis a vállat rögzítettnek tekintjük, és a használt sík a szagítális sík, amelyet eltolunk úgy, hogy egybeessen a (bal) vállal. Modellünk így három csuklóból áll: váll, könyök és csukló, és mindegyik egyszerű síkbeli rotációs csuklóként szerepel. Ellentétben a korábbi megközelítéssel, ahol a csukló és a váll gömbcsuklókkal volt megközelíthető. Az eredmény egy három szabadsági fokú, nyílt kinematikai lánc, redundáns, RRR manipulátor.



1.3. ábra. Az emberi kar kétdimenziós síkbeli modelljének illusztrációja

A 1.3 ábrára pillantva láthatjuk a jelöléseket, amelyeket a továbbiakban használni fogunk. Az egyes, kettes és hármas elemek rendre l_1 , l_2 és l_3 hosszúságoknak felelnek meg, amelyek az alkar, a felkar és egy zárt ökölben tartott eszköz megfelelői. A három csukló elnevezése O, A és B; az O csukló a koordináta-rendszer origójában helyezkedik el, és a vállízület megfelelője, az A a könyököt, míg a B a csuklót jelöli. A kar végén található pontot a manipulátor eszköz középpontjaként nevezzük, amelyet a továbbiakban TCP-ként (az angol Tool Centre Point-ből) említünk.

1.2.1. Tipikus értékek az l_1 , l_2 és l_3 számára

Nagy Britanniai antropometriai adatok [11] szerint a szokásos értékek a következő táblázatban szerepelnek, l_3 nincs feltüntetve, mivel nem kapcsolódik az emberi anatómiához. A női és a férfi jellemző adatok külön szerepelnek illetve feltüntettem az $l_1 + l_2$ hosszt ami a válltól a csukló hajlatig mért hossz.

1.1. táblázat. Átlagos végtaghosszúságok

	l_1	l_2	$l_1 + l_2$
Női	321.4	256.6	538.3
Férfi	356.5	288.3	601.7

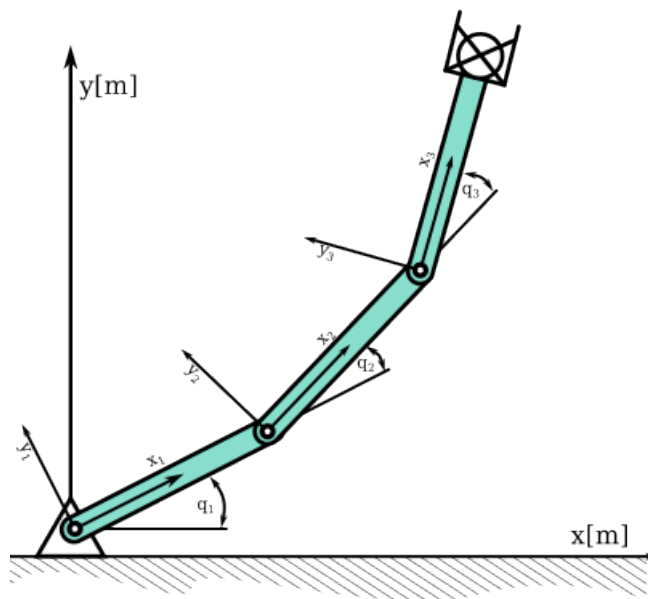
1.3. Direkt kinematika

Az direkt kinematika a TCP pozíciójának meghatározásával foglalkozik az egyes csuklók koordinátái alapján. Számos módszer létezik a direkt kinematikai problémára, mint például a Rodriguez-formula és a Denavit-Hartenberg-módszer. Itt röviden az utóbbit fogom tárgyalni.

1.3.1. Denavit-Hartenberg

A módszerhez jellemző homogén transzformációs mátrixok meghatározásához először definiáljuk a csuklósöveket, a vonatkoztatási koordináta-rendszert és az elemekhez rendelt koordináta-rendszereket, ahogyan az ábrán látható.

1.4



1.4. ábra. Az emberi kar kétdimenziós modelljének illusztrációja

A módszer általában négyszer négyes mátrixokat használ, de mivel az oszlopokban tárolt adatok nagyrészt nullák lennének, inkább háromszor hármas formában vezettem le a mátrixokat. Az elképzelés az, hogy leírjuk azokat a transzformációs mátrixokat, amelyek a vonatkoztatási rendszereket egymáshoz képest eltolják, azaz a csuklósövegek függvényében alakítják át őket. Például a O pontban elforgatjuk a vonatkoztatási keretet a csuklósöveggel, az A pontban pedig forgatjuk és eltoljuk az A ponthoz, és így tovább. A transzformációs mátrixok a következők:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & \sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & -\cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & \sin(q_2) & l_1 \\ \sin(q_2) & -\cos(q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & \sin(q_3) & l_2 \\ \sin(q_3) & -\cos(q_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Ezeknek a mátrixoknak a szorzásával kapunk egy olyan mátrixot, amely leírja a rendszer viselkedését a vonatkoztatási ponttól a TCP-ig. Ha az alábbi mátrixot megszorozzuk a TCP hosszát leíró vektorral, megkapjuk a

TCP pozícióját.

$${}^0\mathbf{T}_3 = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2 + q_3) & \sin(q_1 + q_2 - q_3) & l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_1 \cos(q_1) \\ \sin(q_1 + q_2 + q_3) & -\cos(q_1 + q_2 - q_3) & l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_1 \sin(q_1) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

1.4. Inverz kinematika

Az inverz kinematika esetében a TCP pozíciója ismert számunkra és abból próbáljuk visszafejteni a csukló koordinátákat. Nem redundáns rendszer esetén ez egy relatívén egyszerű feladat mivel egy legfeljebb kettő megoldás szokott lenni. Redundáns rendszereknél már megoldás halmazokról beszélünk amiből egy kívánt megoldást kell kiszednünk.

2. fejezet

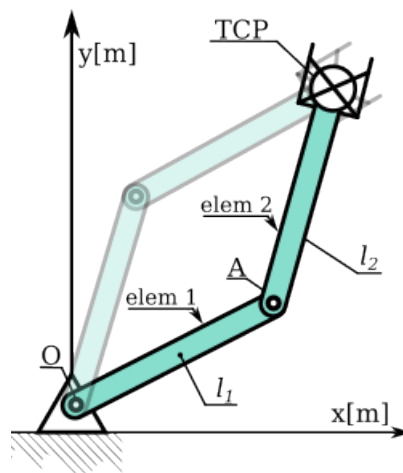
A megoldások halmazának meghatározása

2.1. Bevezetés

A redundáns manipulátorok inverz kinematikai problémája nem eredményez egyedi megoldást, mivel a kinematikai kényszerek által adott egyenleteket megoldva egy megoldás halmazt kapunk, nem pedig egyetlen egyedi megoldást. Ezért feladatunk, hogy megtaláljuk a legmegfelelőbb megoldást a megoldások halmazából. Van néhány kritérium a megfelelő megoldás kiválasztására, nevezetesen, hogy a kiválasztási módszer ne legyen túl számításigényes, mivel egy olyan módszer, amely órákig tart egy másodperces mozgás megtervezésére, nem különösen hasznos. Másodszor, a mozgás tervezésekor a A és B csuklók pályájának úgy kell alakulnia, hogy azok folyamatosak legyenek, és az gyorsulás, így a csuklóerők is ésszerű határok között maradjanak.

2.2. Kétcsuklós eset

Annak érdekében, hogy felépítsük a teljes háromcsuklós modell által meghatározott megoldáshalmazt, amit a következőkben tárgyalunk, először értsük meg a egyszerűbb kétcsuklós modell működését. Ez az egyszerűsített modell csak két szabadsági fokkal rendelkezik, ezért nem redundáns, azonban az inverz kinematika problémájának megoldása nem egyedi. Két megoldás létezik a kétcsuklós RR manipulátor esetén, ha csak nem valamelyik speciális esetről van szó, ahogy az a 2.1 ábrán látható. Mivel az emberi kart tanulmányozzuk, nincs dilemma abban, hogy a két megoldás közül melyiket tekintjük helyesnek. Az A csuklót könyökcuklónak tekintjük, amely az ábrán látható pozícióban csak lefelé hajolhat, ahogyan azt a nem átlátszó megoldás jelzi az ábrán.



2.1. ábra. A kétcsuklós eset lehetséges megoldásainak illusztrációja

Geometrikusan az 2.1 ábrán látható megoldások úgy nyerhetők, hogy kört rajzolunk az O pontból és a megadott TCP-ből, és a két metszéspont jelöli a lehetséges megoldásokat. Ezt koordináta geometriai képletek segítségével fogjuk levezetni.

Először levezetjük a képleteket a TCP és O pontokból felépített körökre. A nagy X és Y koordináták a TCP koordinátáit jelölik.

$$x_A^2 + y_A^2 = l_1^2 \quad (2.1) \quad (x_A - X)^2 + (y_A - Y)^2 = l_2^2 \quad (2.2)$$

Az A csukló y koordinátája, kifejezve az 2.1 egyenletből

$$y_A = \pm \sqrt{l_1^2 - x_A^2} \quad (2.3)$$

Az 2.2 egyenletet ezután behelyettesítjük a 2.3 egyenletbe.

$$(x_A - X)^2 + \left(\pm \sqrt{l_1^2 - x_A^2} - Y \right)^2 = l_2^2 \quad (2.4)$$

Ezután kifejtjük és egyszerűsítjük.

$$-2 \cdot x_A \cdot X + X^2 + l_1^2 \mp 2\sqrt{l_1^2 - x_A^2}Y + Y^2 = l_2^2 \quad (2.5)$$

Ezután átrendezzük, és mindkét oldalt négyzetre emeljük:

$$4x_A^2X^2 - 4x_AX(X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2) + (X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2)^2 = 4l_1^2Y^2 - 4x_A^2Y^2 \quad (2.6)$$

Ezután ismét átrendezzük.

$$x_A^2(4X^2 + 4Y^2) - x_A \cdot 4X(X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2) + (X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2)^2 - 4l_1^2Y^2 = 0 \quad (2.7)$$

A 2.7 egyenletből a következő együtthatókat nyerhetjük, amelyeket be kell helyettesíteni a másodfokú egyenlet képletébe:

$$a = (4X^2 + 4Y^2) \quad b = -4X(X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2) \quad c = (X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2)^2 - 4l_1^2Y^2$$

És végül megkapjuk azokat az egyenleteket, amelyek x_A -t X és Y függvényeként adják meg.

$$x_A(1, 2) = \frac{4X(X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2) \pm \sqrt{4X(X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2)^2 - 4(4X^2 + 4Y^2)((X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2)^2 - 4l_1^2Y^2)}}{2(4X^2 + 4Y^2)} \quad (2.8)$$

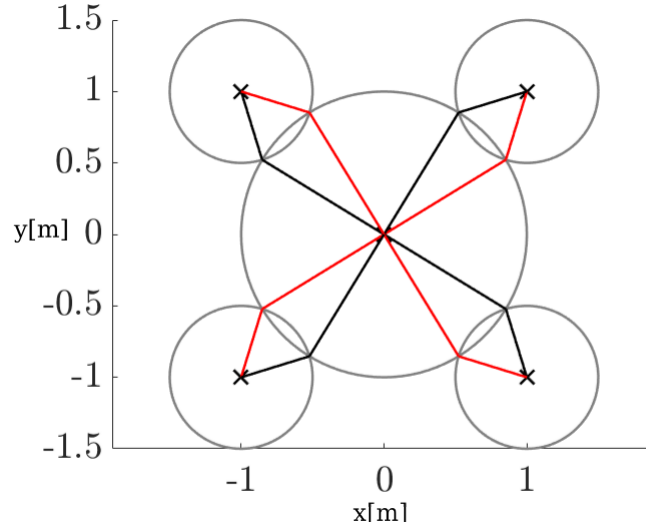
Most, ahogy az előző egyenletből láthatjuk, két lehetséges megoldásunk van x_A -ra, ami összhangban van azzal, amit vártunk. Szerencsére az emberi könyök tulajdonságait figyelembe véve tudjuk melyik a helyes megoldás számunkra, és meghatározhatjuk a determináns helyes előjelét annak függvényében, hogy a TCP épp melyik kvadránsban helyezkedik el. Ha megpróbálnánk kiszámítani y_A -t a 2.3 egyenlet alapján, nem lenne triviális módunk arra, hogy meghatározzuk, melyik y érték a valódi, ezért be kell helyettesítenünk és meg kell oldanunk a 2.2. egyenletet y_A -ra. Ezért a 2.2 egyenlet kifejtve:

$$y_A^2 - y_A \cdot 2Y + (x_A - X)^2 + Y^2 - l_2^2 = 0 \quad (2.9)$$

Megoldva y_A -re.

$$y_A(1, 2) = \frac{2Y \pm \sqrt{4Y^2 - 4 \cdot (x_A - X)^2 + Y^2 - l_2^2}}{2} \quad (2.10)$$

Itt a diszkrimináns előjelét kifejezhetjük azon kvadráns szerint melyben a TCP található. A 2.2 ábrát megvizsgálva láthatjuk, hogy a helyes pozíciókat piros színnel vannak jelölve.



2.2. ábra. A két csukló esete síkban – illusztráció

Az alábbi táblázat összegzi az eseteket:

2.1. táblázat. Az előjel a TCP függvényében

kvadráns	I	II	III	IV
A diszkrimináns gyökének előjele a 2.8 egyenletben	+	+	–	–
A diszkrimináns gyökének előjele a 2.10 egyenletben	–	+	+	–

Itt észrevehetjük, hogy az előjelek kifejezhetők az X vagy Y értékek előjeleinek függvényében, így innen az egyenletek a következők:

$$x_A = \frac{4X(X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2) + \text{sgn}(Y)\sqrt{4X(X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2)^2 - 4(4X^2 + 4Y^2)((X^2 + l_1^2 + Y^2 - l_2^2)^2 - 4l_1^2 Y^2)}}{2(4X^2 + 4Y^2)} \quad (2.11)$$

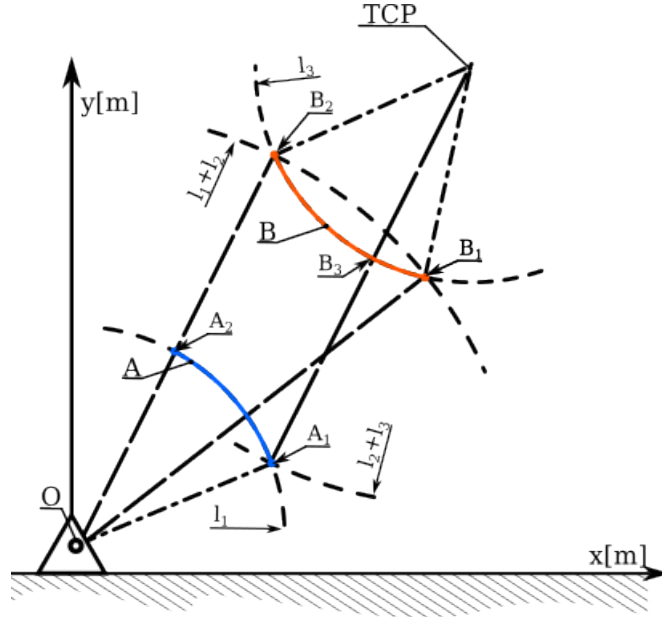
$$y_A = \frac{2Y - \text{sgn}(X)\sqrt{4Y^2 - 4 \cdot (x_A - X)^2 + Y^2 - l_2^2}}{2} \quad (2.12)$$

2.2.1. Singularitások

Ahogy korábban említettük, a két csuklós eset minden végrehajtó pozícióra két megoldást ad, kivéve különleges esetekben. A különleges esetek azok, amikor a TCP távolsága $l_1 + l_2$ az O ponttól, illetve amikor a TCP megegyezik az O ponttal. Az előbbi esetben nincs két, hanem csak egy megoldás, és az előzőleg tárgyalt képletek alkalmazhatóak. Az utóbbi csak abban a specifikus esetben történhet meg ha a l_1 és l_2 hosszak egyenlősége esetén, az utóbbi esetben az A csukló bárhol elhelyezkedhet egy körön, így a lehetséges megoldások száma végtelen, és a fent említett képletek nem alkalmazhatóak erre az esetre.

2.3. Három csuklós egyenlet

A három csuklós esetben redundáns manipulátorral van dolgunk, ami azt jelenti, hogy a lehetséges megoldások halmaza drasztikusan megnövekszik. Számunkra nagyon hasznos lenne, ha ezt a lehetséges megoldások halmazát egyetlen változó függvényének eredményeként tudnánk kifejezni egy adott tartományon. Mielőtt ezt matematikailag megpróbálnánk, először vizualizálnunk kellene a megoldások halmazát geometriailag.



2.3. ábra. A három csuklós eset megoldásainak halmazának illusztrációja

A 2.3 ábrát figyelve megérthetjük az inverz kinematikai probléma megoldásainak halmazát. A narancssárga és kék ívek azok a lehetséges helyek, ahol a B és A csuklók elhelyezkedhetnek. A narancssárga ívet úgy kapjuk, hogy egy l_3 sugárú kört szerkesztünk a TCP-ből, és egy $l_1 + l_2$ sugárú kört az O pontból, e két kör metszéspontjait B_1 és B_2 -ként jelöljük, így a B csukló lehetséges helyei a narancssárga íven találhatók, mivel az $l_1 + l_2$ ív adja meg a legnagyobb távolságot O ponttól, amelyet a B csukló elérhet. Ezért azt jelenti, hogy a B csukló közelebb lesz ennél a két pontnál. Az A_1 pontot hasonlóan szerkesztjük, mint a B szakasz határpontjait, azonban mivel az A csukló nem hajlítható "hátra", a felső határ a $\vec{OB}_2$ egyenes és az l_1 sugárú ív metszéspontja lesz.

Ha az előző szakaszban származtatott képleteket használjuk, viszonylag egyszerűen származtathatjuk a szükséges függvényt. Ha választunk egy pontot, és ezt jelöljük B pontnak, akkor az A csukló helyzete triviális, így szükségünk van egy változóra, amely végigvezet minket a lehetséges B csuklók helyein.

Ennek a levezetése következik. Először a B_1 és B_2 pontok meghatározása történik hasonlóan az 2.1 és 2.2 képletekhez.

$$x_B^2 + y_B^2 = (l_1 + l_2)^2 \quad (2.13)$$

$$(x_B - X)^2 + (y_B - Y)^2 = l_3^2 \quad (2.14)$$

Miután megkaptuk a pontjainkat $B_1 = (x_{B1}, y_{B1})$ és $B_2 = (x_{B2}, y_{B2})$, kiszámíthatjuk a szögeket.

$$\alpha = \text{atan2}\left(\frac{X - x_{B1}}{Y - y_{B1}}\right) \quad (2.15)$$

$$\beta = \text{atan2}\left(\frac{X - x_{B2}}{Y - y_{B2}}\right) \quad (2.16)$$

Innen bevezethetünk egy $\gamma \in (\alpha, \beta)$ szöget, amelyet minden egyes megoldás paraméterezésére használhatunk, így a B csukló koordinátái γ függvényében.

$$x_B = X - l_3 \sin(\gamma) \quad (2.17)$$

$$y_B = Y - l_3 \cos(\gamma) \quad (2.18)$$

Innen az A csukló koordinátái úgy találhatók meg, hogy a B csukló koordinátáit behelyettesítjük a 2.11 és 2.12 egyenletekbe, kicserélve a nagybetűs koordinátákat.

2.3.1. A megoldáshalmaz csökkentése

Bármilyen triviális csökkentés a megoldáshalmazban üdvözlendő, mivel bármilyen csökkentés az vizsgált tartományban csökkentheti annak esélyét, hogy rossz minimumot vagy csupán egy szélsőértéket találjunk. Itt a csukló mobilitásával foglalkozunk, a jobb vizualizáció érdekében szeretnénk megkérni az olvasót, hogy nyújtsa ki a kezét nyitott tenyérrel maga elé, tartva a tenyerét párhuzamosan a földdel, és mozgassa a tenyerét jobbra-balra. Észre fogja venni, hogy a tenyér egy körülbelül 90° tartományban mozgott, ahol ennek a tartománynak a középpontja a alkar középvonalának kiterjesztése, azonban a kutatás során végzett mérésekben a tenyér egy botot szorít, ami azt

jelenti, hogy a 90° tartomány középpontja 90 fokkal elfordult, így a csukló nagyon hasonlóná vált a könyökcuklóhoz. Két módszert fogunk tesztelni a csukló helyzetek korlátozására: egy könnyen kiszámítható, kevésbé pontosat és egy pontosabbat, amely több számítást igényel.

2.3.2. Durva becslés

Ebben az esetben feltételezzük, hogy a csukló ugyanolyan tulajdonságokkal rendelkezik, mint a könyök, figyelmen kívül hagyva a csukló kisebb mobilitását a könyökhöz képest. Gyakorlatban a megoldás halmazát úgy fogjuk csökkenteni, hogy nem tartalmazza azt a tartományt, ahol a csukló lefelé hajlik. Ezt úgy érjük el, hogy a csukló mozgási tartományát $B_1 - B_2$ -ről $B_1 - B_3$ -ra korlátozzuk, ahol B_3 az l_3 sugarú kör és az $\mathfrak{A}$ -domén alsó határát összekötő vonal metszéspontja.

A leegyszerűsítés hátránya, hogy ha a TCP a $l_3 + l_2 - l_1$ sugáron belül van, akkor B_3 pont nem számítható ki. Helyette ezekben az esetekben a TCP körüli kör és a $OTCP$ vonal metszéspontját használtam. Ezt a leegyszerűsítést alkalmaztam minden szimulációban, amely ebben a dolgozatban található, és úgy találtam, hogy jól működik.

2.3.3. Precíz model

A pontos modell a B csukló szögének tartományának pontos határainak használatát jelenti. Ez jelentősen több erőfeszítést és számítást igényelne, mint az előző modell, azonban hasznos lehet olyan modellekben, ahol az utolsó link határa nem esik egybe a használt csukló szöghatárral.

3. fejezet

Lehetséges paraméterek a megoldás kiválasztásához

Mivel az inverz kinematikai probléma megoldási halmazait minden egyes adott TCP pozícióhoz $g(\gamma)$ függvényként definiáltuk, használhatjuk ezt a függvényt különböző kifejezések szélsőértékeinek keresésére. Most ötletekre van szükségünk azzal kapcsolatban, hogy milyen kifejezések minimumát keressük, a legtöbb javaslat valamilyen hatékonyságra épül, az általános elképzelés pedig az, hogy törekedjünk arra, hogy valamilyen szempontból a lehető legkevesebbet tegyük. A következő szakaszokban áttekintünk néhány olyan kritériumot, amelyek alapján a megoldáshalmazt csupán egy megoldásra szűkíthetjük.

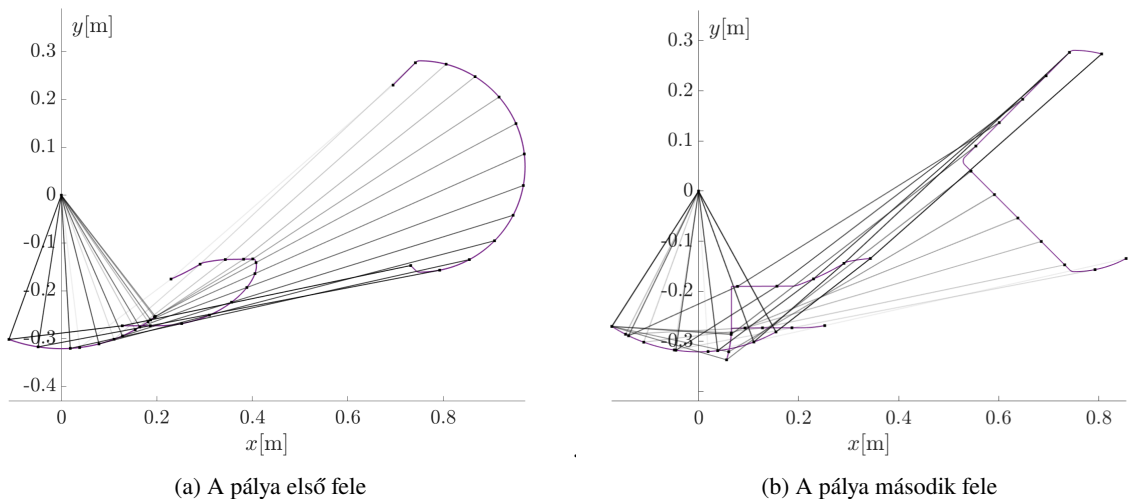
3.1. Minimális csuklómozgás összege

Kezdjük egy viszonylag egyszerű ötlettel: "mi lenne, ha a lehető legkevesebbet mozgatnánk a csuklóinkat." Ehhez csak az A és B csuklók mozgását vesszük figyelembe, mivel az O pontot rögzítettnek tekintettük, a TCP mozgása pedig adott, így ha be is vonnánk a számításba, csak egy állandót jelentene. Így viszonylag kevés adatot kell tárolnunk, csupán a két csukló előző koordinátáit.

A csuklómozgás ötlet első megvalósítása, amit megvizsgálunk, az, hogy a csuklóelmozdulások abszolút értékeit vesszük figyelembe, vagyis a pozíciókoordináták különbségeinek abszolút értékeit az aktuális és az előző időlépés között. Ebben az esetben az egyenletünk γ függvényében az alábbi formában látható:

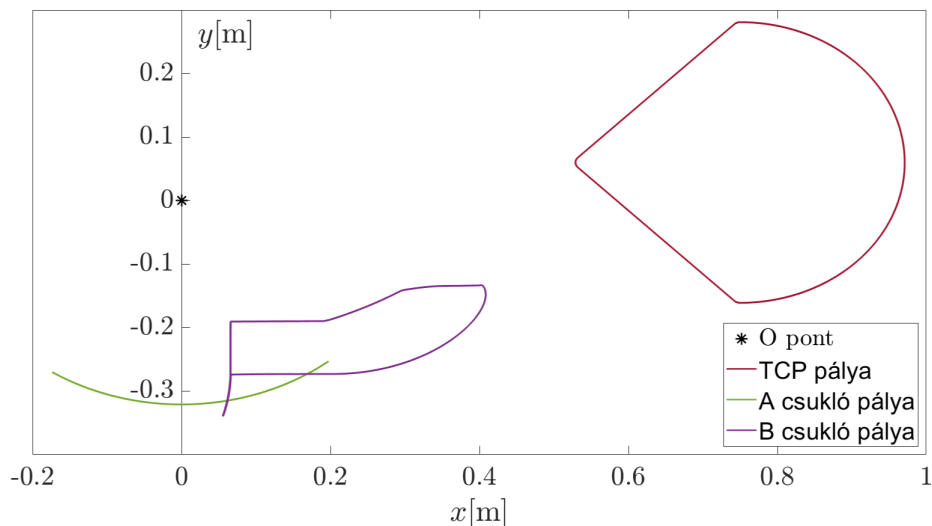
$$f(\gamma) = |A_x(\gamma) - A_{xt-1}| + |A_y(\gamma) - A_{yt-1}| + |B_x(\gamma) - B_{xt-1}| + |B_y(\gamma) - B_{yt-1}| \quad (3.1)$$

Ahol A_x , A_y , B_x és B_y a csuklók koordinátái, amelyeket az előző fejezetben tárgyalt módszerrel kaptunk meg és a $t - 1$ alsó index az előző időlépéshez tartozó adatokat jellemzi.



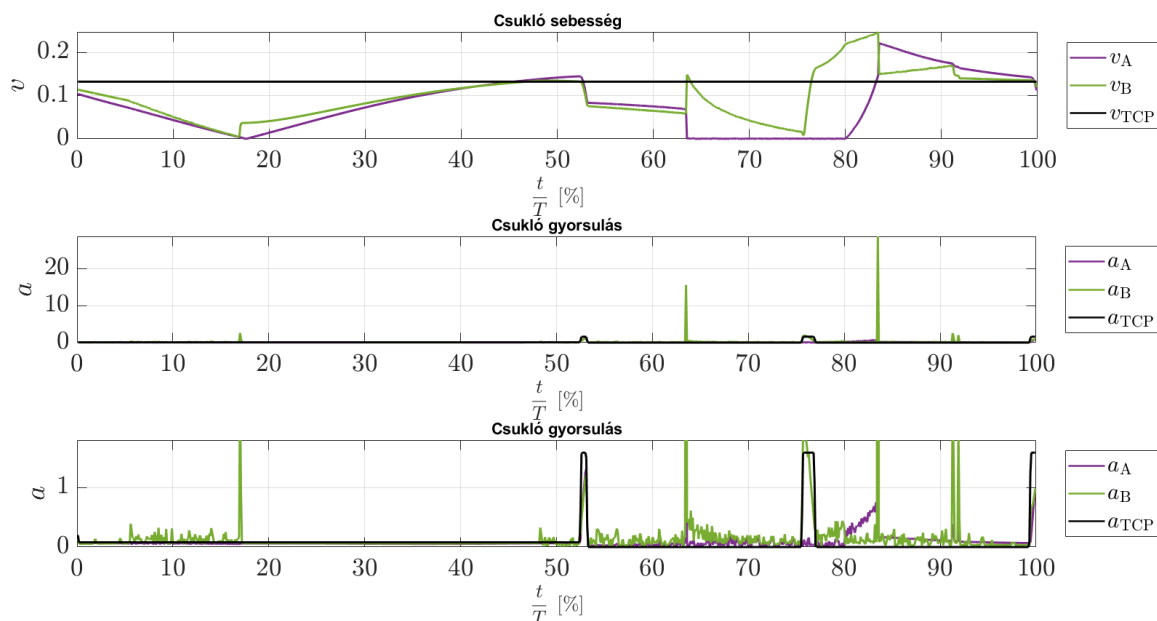
3.1. ábra. A szimulált manipulátor mozgása, több pillanatfelvétel átfedésével bemutatva.

Minden egyes módszerhez egy minta szimuláció lett végrehajtva a bemutató adatok megszerzésének érdekében. A szimuláció az ideális pályán történt, amelynek mérési beállításaihoz a l_1 , l_2 és l_3 paramétereket, valamint a váll és a pálya középpontja közötti távolságot a 2. számú résztvevő mérési adatai alapján lett kiválasztva. A szimuláció futtatása során kiderült, hogy a korábbi fejezetben bevezetett csökkentett tartománynak köszönhetően a csuklók mozgása egy periódikus pályára konvergál még mielőtt egy félkört megtett volna a meghatározott pályán. Ezért úgy döntöttem, hogy három kört futtatok, és az utolsó kör adatait használom. A 3.1 ábrán látható két alábra célja, hogy jobban bemutassa a módszer által előírt mozgást.



3.2. ábra. Az csukló mozgás által rajzolt pályák

Továbbá, a 3.2 ábrán ábrázoltam minden egyes csukló által kirajzolt pályát. Fontos megjegyezni, hogy ezek a pályák periódikusak maradnak, és a megjelenített szimuláció elegendően konvergált. Sajnos, ha megvizsgáljuk az ábrát, akkor látható, hogy valószínűleg ez a módszer nem illeszthető jól a mért adatokhoz, mivel a B ízület mozgása meglehetősen éles és szögletes. Valószínű, hogy az emberi agy inkább simább és folytonosabb mozgásokat keres.



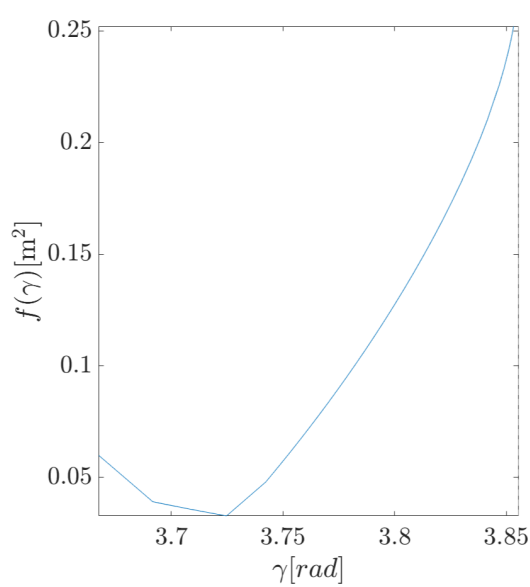
3.3. ábra. Telemetrikus adatok

Annak meghatározásához, hogy egy módszer megfelelő-e, nemcsak a pozíciós adatokat kell figyelembe venni, hanem a sebesség- és gyorsulási adatokat is. A 3.3 ábra az adatokat mutatja, a derivált adatokat pedig táblázatos formában láthatjuk alább. Mivel itt egy szimulált TCP pályát vizsgálunk, nem lenne értelme az időt másodpercekben kifejezni, ezért a T idő százalékaként van ábrázolva, ahol a T az egész pálya megkerüléséhez szükséges idő.

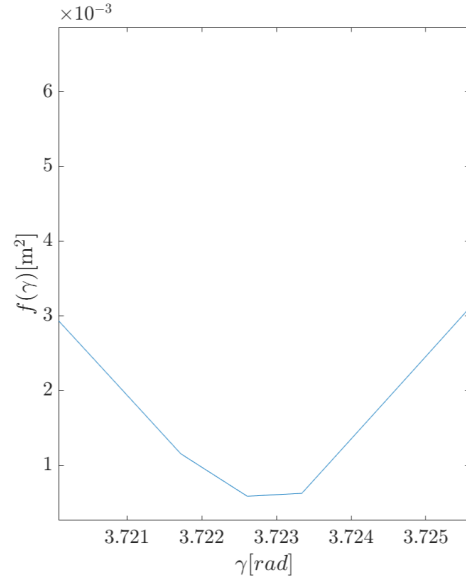
3.1. táblázat. Az abszolút pozíciókülönbség módszerének áttekintő adatai:

csukló	max v	átl. v	max a	átl. a	Doboz x	Doboz y	Doboz sz. x	Doboz m.y
A	0.2207	0.0791	7.4942	0.1004	0.3705	0.0680	0.0136	-0.2865
B	0.2472	0.0978	28.6854	0.1768	0.3528	0.2067	0.2329	-0.22013
TCP	0.1323	0.1323	1.5895	0.0822	0.4420	0.4420	0.7703	0.0598

Amint a fenti ábrán látható, ez a módszer nem elég sima ahhoz, hogy emberi mozgást modellezzen. Az alábbi ábrákon megtalálhatók a számítások néhány pontjának értékei, a korábban bevezetett határok között. Szerencsére csak egy minimum érték található, azonban látható, hogy az egy majdnem lineáris szakasz végén helyezkedik el. A probléma ott jelentkezik, amikor a szakasz közel vízszintes lesz, ami a legtöbb konvergált számítás esetében előfordul. A minimum keresésére használt függvény az "fminbnd", amely a Golden-section keresési algoritmust és a szukcesszív parabolikus interpolációs algoritmust alkalmazza. Sajnos egyik sem különösebben alkalmas minimumok keresésére hasonló függvényeken. A Golden-section módszer nehézségekkel küzd a hosszú lapos szakaszok és határok esetén, míg a parabolikus interpoláció próbál parabolákat illeszteni a görbére. A következő módszerben próbálunk jobb eredményeket elérni a távolságok négyzetösszegének használatával.



(a) Az első iteráció nagy lineáris szakasza



(b) A konvergált iterációk kis lapos lineáris szakasza

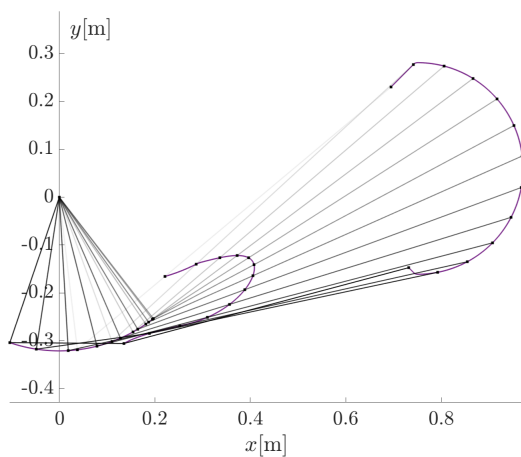
3.4. ábra. A függvény illusztrációja néhány iterációs pontnál

3.1.1. Minimum csukló mozgás négyzet összege

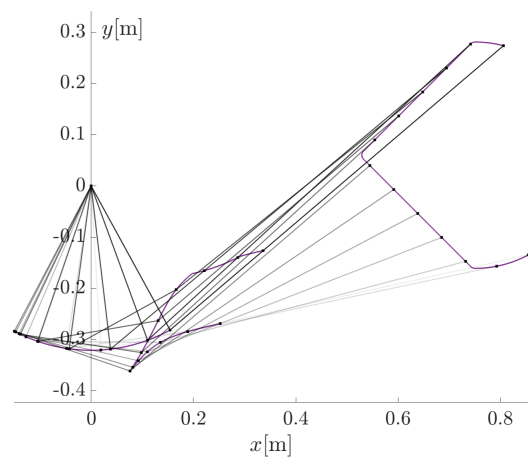
Ahogy azt az előző szakaszban láttuk, az abszolút értékek nem mindig adják a legjobb vagy a legmegbízhatóbb eredményeket, ezért az abszolút értékeket ritkán használják műszaki alkalmazásokban, innen logikus következő lépés lenne, hogy helyettesítsük őket négyzettel.

$$f(\gamma) = (A_x(\gamma) - A_{x_{t-1}})^2 + (A_y(\gamma) - A_{y_{t-1}})^2 + (B_x(\gamma) - B_{x_{t-1}})^2 + (B_y(\gamma) - B_{y_{t-1}})^2 \quad (3.2)$$

Ha megnézzük a mozgás ábráját alább, láthatjuk, hogy a mozgás már simábbnak tűnik, mint az előző, ami ezt az ötletet ígéretesnek tünteti.



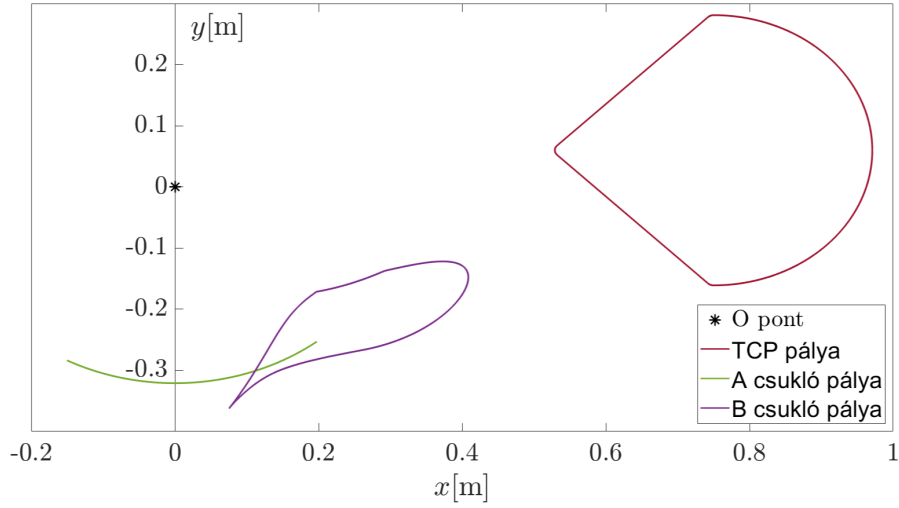
(a) A pálya első fele



(b) A pálya második fele

3.5. ábra. A szimulált manipulátor mozgása, több pillanatfelvétel átfedésével bemutatva

Az útvonalak tovább erősítik azt a gondolatot, hogy ennek a módszernek sokkal kevesebb éles irányváltása van, és hogy a változások természetüknél fogva sokkal simábbak, így ez egy határozott javulás az abszolút értéken alapuló függvényhez képest.

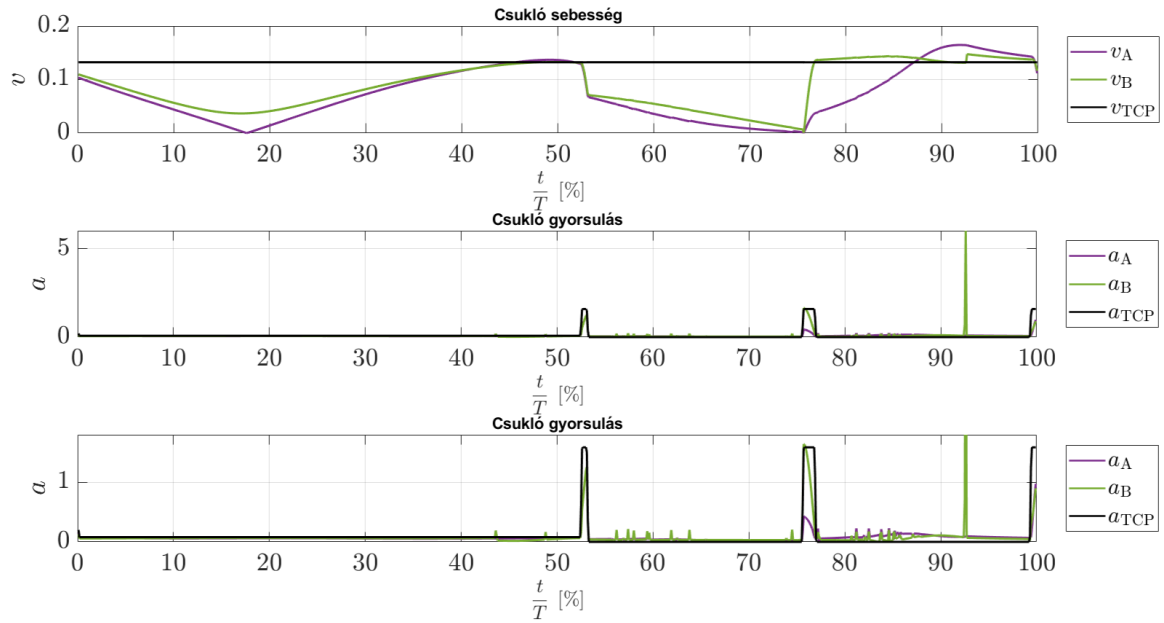


3.6. ábra. A csuklók által rajzolt pályák

Ahogy vártuk, a pályák vizsgálata után a telemetrikus adatok sokkal kevésbé rázkódó mozgást mutatnak, a nagy gyorsulási csúcsok eltűntek, és a kis gyorsulási csúcsok jelentősen csökkentek. Az összegző táblázatból látható, hogy a határoló dobozok még mindig nagyjából ugyanolyanok maradtak, azonban a középpontok alacsonyabbak lettek.

3.2. táblázat. Összefoglaló adatok:

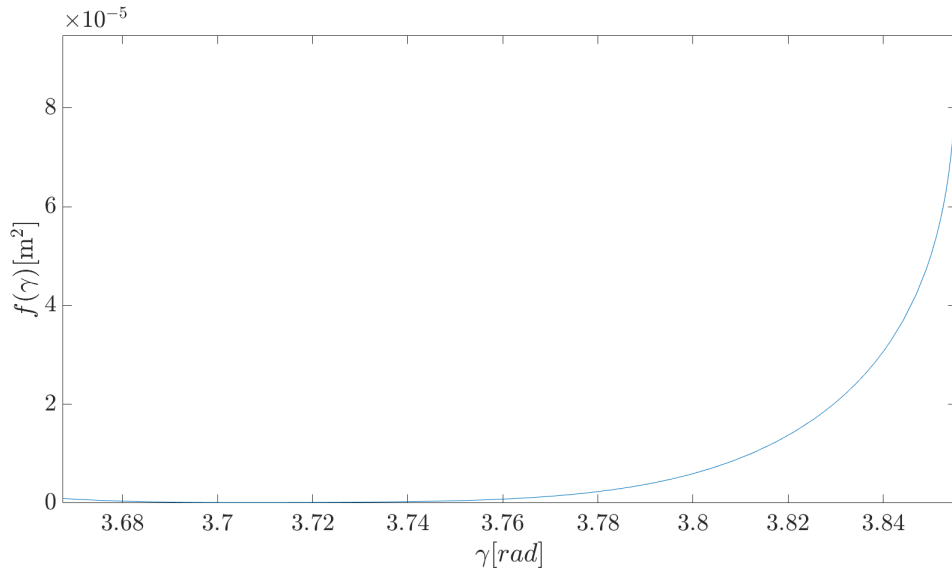
Csukló	max v	átl. v	max a	átl. a	Doboz x	Doboz y	Doboz sz. x	Doboz m. y
A	0.1646	0.0738	1.2325	0.0724	0.3478	0.0680	0.0223	0.2911
B	0.1474	0.0877	6.0092	0.0836	0.3332	0.2406	0.2405	0.2344
TCP	0.1323	0.1323	1.5895	0.0822	0.4420	0.4420	0.7703	0.0598



3.7. ábra. Telemetrikus adatok

Az alábbi 3.8 ábrán láthatjuk a minimizálandó függvényt γ függvényében ábrázoló grafikont, és világosan

látható, hogy sokkal jobban megfelel a numerikus minimum kereséséhez. Ez ismételten megerősíti, hogy egyértelműen javulás az előző módszerhez képest. A függvény úgy tűnik, folyamatosan differenciálható az egész hossza mentén, és úgy tűnik, hogy megfelelő eredményeket adna a parabolikus interpolációs algoritmus használatával.



3.8. ábra. Függvény egy iterációnál

3.2. Minimum csukló sebességkülönbség

Ebben a szakaszban nagyon röviden bemutatok két módszert, amelyek hasonlóak az előzőhöz, azonban nem a pozíciót, hanem a sebességkülönbséget, és ezzel összefüggésben az gyorsulást minimalizálják. A szimuláció jellegeből adódóan csak azokat az eseteket tudom ismertetni, ahol a módszerek 0 kezdeti sebességgel lettek inicializálva, mivel a sebesség megtippelése nehézkesnek bizonyult. Részletesebben a valós mérési adatokon alapuló szimuláció tárgyalásakor fogom kifejteni. Ilyen inicializálás esetén a négyzetre emelt és az abszolút sebességkülönbség ugyanúgy teljesítettek, ezért ugyanazokat a képeket fogom használni mindkét módszer bemutatásához.

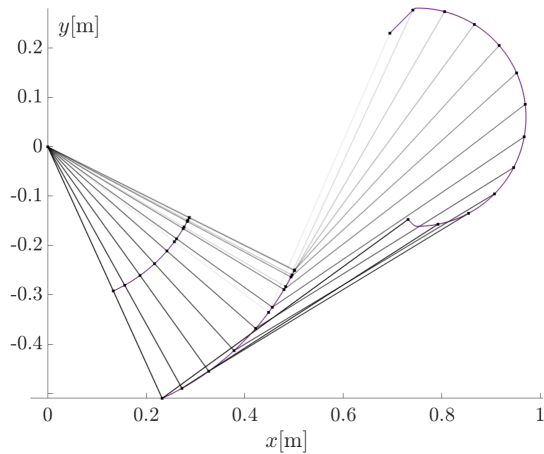
Mindkét esetben a derivált értékeket a hátra lépő Euler-módszerrel numerikus deriválással számítottjuk ki. Mivel ez egy differencia egyenletet eredményez, a módszernek két kezdeti időpont adataira van szüksége az inicializáláshoz. További részletekbe nem bonyolódok a sebességek meghatározásával kapcsolatban, mivel ez alapvetően triviálisnak tekinthető.

Az abszolút érték egyenlete γ függvényében kifejezve:

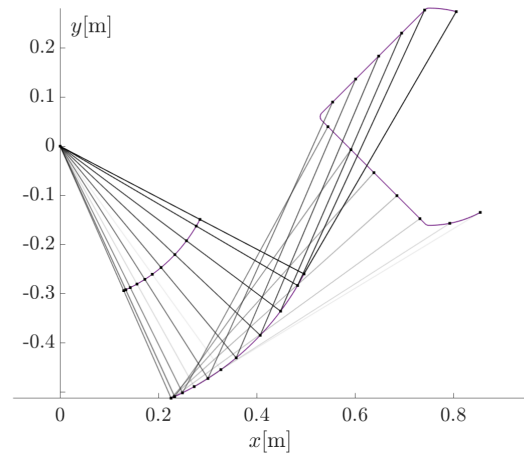
$$f(\gamma) = |v_{Ax}(\gamma) - v_{Ax,t-1}| + |v_{Ay}(\gamma) - v_{Ay,t-1}| + |v_{Bx}(\gamma) - v_{Ax,t-1}| + |v_{By}(\gamma) - v_{By,t-1}| \quad (3.3)$$

A négyzetre emelt érték egyenlete γ függvényében kifejezve:

$$f(\gamma) = (v_{Ax}(\gamma) - v_{Ax,t-1})^2 + (v_{Ay}(\gamma) - v_{Ay,t-1})^2 + (v_{Bx}(\gamma) - v_{Ax,t-1})^2 + (v_{By}(\gamma) - v_{By,t-1})^2 \quad (3.4)$$



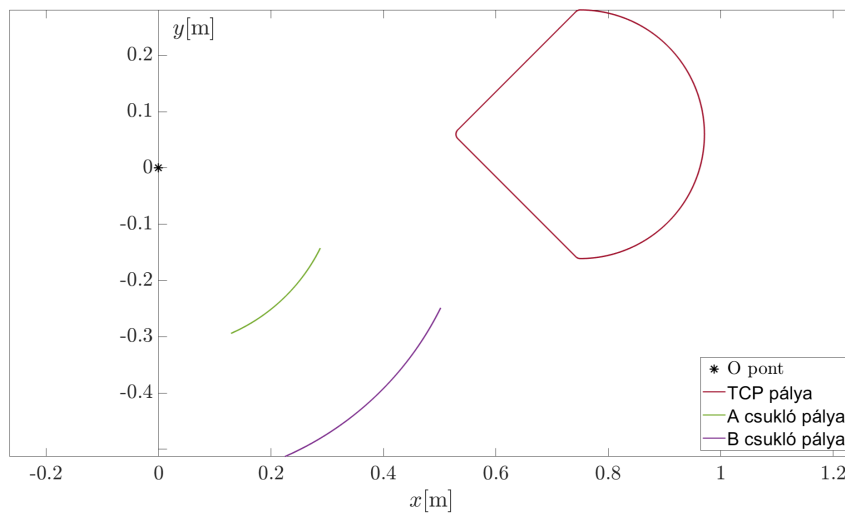
(a) A pálya első fele



(b) A pálya második fele

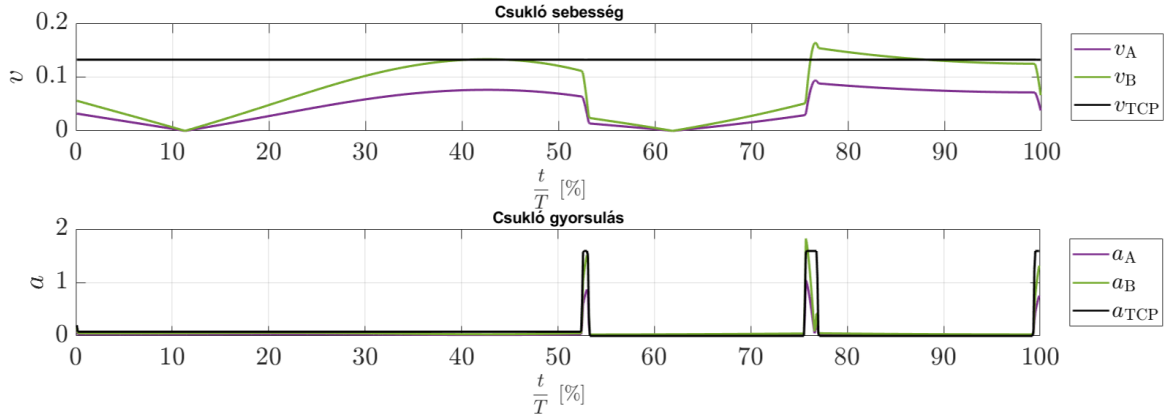
3.9. ábra. A szimulált manipulátor mozgása, több pillanatfelvétel átfedésével bemutatva

A fenti 3.9 ábrán látható a mozgás árnyéka, amelyet a négyzetes és az abszolút módszer egyaránt végrehajtott, sajnos a módszer egy meglehetősen természetellenes és nem kielégítő eredményt adott azáltal, hogy az A csuklót kinyújtotta, így a l_1 és l_2 egyenesbe kerültek. Ez a rendszert egy egyetlen csuklós, nem redundáns rendszerre egyszerűsíti.



3.10. ábra. A csuklók által rajzolt pályák

A 3.11 ábrán látható telemetrikus adatok alapján látható, hogy a mozgás nagyon sima, az egyetlen gyorsulási csúcsok azok, amelyek a TCP által követett pályát diktálják, míg a görbe többi része annyira sima, hogy elhagytam a nagyított csukló gyorsulás diagramot.



3.11. ábra. Telemetrikus adatok

Az alábbi táblázat jól összegzi, hogy mennyivel alacsonyabb a gyorsulás, mint a korábban tárgyalt módszerekben.

3.3. táblázat. Összegző táblázat:

csukló	max v	átl. v	max a	átl. a	Doboz x	Doboz y	Doboz sz. x	Doboz m. y
A	0.0940	0.0448	1.0451	0.0385	0.1588	0.1515	0.2146	0.2241
B	0.1640	0.0782	1.8232	0.0671	0.2770	0.2643	0.3743	0.3909
TCP	0.1323	0.1323	1.5895	0.0822	0.4420	0.4420	0.7703	0.0598

Ezen a ponton szeretném meghívni az olvasót, hogy ne veszítse el a reményt e két módszer iránt, annak ellenére, hogy az ebben a szakaszban bemutatott teljesítmény viszonylag csalódást keltő. A diskurzus folytatódni fog, amikor a mért adatokat összevetjük ezzel a módszerrel szimulált adatokhoz.

3.3. Energia különbség minimuma

A következő ötlet, amit meg fogunk vitatni, a minimális energia különbség, először csak a kinematikai, majd a kinematikai és potenciális energia összegére fogunk koncentrálni. Itt csak egy jó közelítést fogunk alkalmazni az energiára, mivel a résztvevők karjainak pontos tömegeit beszerezni kihívást jelentene. Az alkalmazott közelítés levezetése a szimulációhoz az alábbiak szerint történik:

Először megszerezjük a kinetikus energia képleteit az első két elem számára, az ő végpontjaik sebességei, v_P és v_Q függvényében, kezdve a sebesség redukciós képletével:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{\text{ref}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (3.5)$$

Ezt a két elemet homogén hengerekként közelítjük, tehát ha felírjuk a tömegközéppont sebességére, v_{CM} , vonatkozó képleteket, akkor a vektorok $\mathbf{r}$ egyenlők lesznek.

$$\mathbf{v}_{CM} = \mathbf{v}_P + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{v}_Q = \mathbf{v}_{CM} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (3.7)$$

Mivel itt egy elemet vizsgálunk, a szögsebesség $\boldsymbol{\omega}$ ugyanaz, ezért az egyenletek 3.6 és 3.7 lineáris kombinációjával megkaphatjuk a tömegközéppont sebességét.

$$2 \cdot \mathbf{v}_{CM} = \mathbf{v}_Q + \mathbf{v}_P \quad (3.8) \quad \mathbf{v}_{CM} = \frac{\mathbf{v}_Q + \mathbf{v}_P}{2} \quad (3.9)$$

Továbbá meg kell határoznunk az elem szögsebességét, először behelyettesítjük az 3.9 egyenletet az 3.6 egyenletbe.

$$\frac{\mathbf{v}_Q + \mathbf{v}_P}{2} = \mathbf{v}_P + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (3.10)$$

Itt, mivel síkbeli esetről van szó, az ω kifejezhető a saját hosszúságának értékeként, és $\mathbf{r}$ -t úgy írhatjuk, mint annak hosszának szorzataként egy egységvektorral, amely az ϕ szögtől függ. Innen, ha mindkét oldal négyzetét vesszük, skaláris értékeket kapunk mindkét oldalon. Ami ráadásul független a ϕ szögtől.

$$\frac{\mathbf{v}_Q + \mathbf{v}_P}{2} = \mathbf{v}_P + \omega \cdot \mathbf{r} \begin{bmatrix} \sin(\phi) \\ \cos(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\left\| \frac{\mathbf{v}_Q - \mathbf{v}_P}{2} \right\|^2 = \left\| \omega \cdot \mathbf{r} \begin{bmatrix} \sin(\phi) \\ \cos(\phi) \\ 0 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (3.12)$$

Innen az 3.12 egyenletet átírhatjuk úgy, hogy ω^2 -t kapjunk, és ahogy látható, ez független a $\mathbf{r}$ vektor pozíciójától, és csak annak hosszától függ. .

$$\omega^2 = \frac{(v_Q - v_P)^2}{4r^2} \quad (3.13)$$

Innen már csak néhány súlybecslésre van szükség, és megírhatjuk az egyenletet, amely a kinetikus energiát adja. A [10] forrásból azt kapjuk, hogy a felkar a testtömeg 3,075%-át, az alkar 1,72%-át és a kéz 0,575%-át teszi ki átlagosan. A PeopleSize [11] adatokat felhasználva láthatjuk, hogy $m_1 \approx l_1^3$, ahol m_1 és m_2 az első két link tömegei. Innen azt is mondhatjuk, hogy a kéz tömege m_h arányos a $(l_2)^3/3$ -mal. Az alkalmazott mérési bot súlya 97g, míg a bot végén lévő súly 160g; mivel ezt nem igazán tudjuk összekapcsolni az antropometriai adatokkal, nagyon durva becslést alkalmazunk, miszerint egy emberi kar súlya 400g, és ebből azt mondjuk, hogy a súly fele az, míg a bot súlya egynegyede. Ezt figyelembe véve az elemek relatív súlyai:

$$m_1 \approx l_1^3 \quad (3.14) \quad m_2 \approx l_2^3 \quad (3.15) \quad m_{3uw} \approx \frac{l_2^3}{3} \cdot \frac{5}{4} \quad (3.16) \quad m_{3w} \approx \frac{l_2^3}{3} \cdot \frac{7}{4} \quad (3.17)$$

Innen könnyen meghatározhatjuk az első két elem tehetetlenségi nyomatékait:

$$\Theta_1 \approx \frac{l_1^5}{12} \quad (3.18) \quad \Theta_2 \approx \frac{l_2^5}{12} \quad (3.19)$$

Feltéve, hogy a kéz a bot alján helyezkedik el, és hogy a tömeg 11cm-re van a TCP-től, az alábbi tehetetlenségi nyomatékokat kapjuk a súlyozott és súlyozatlan esetekre.

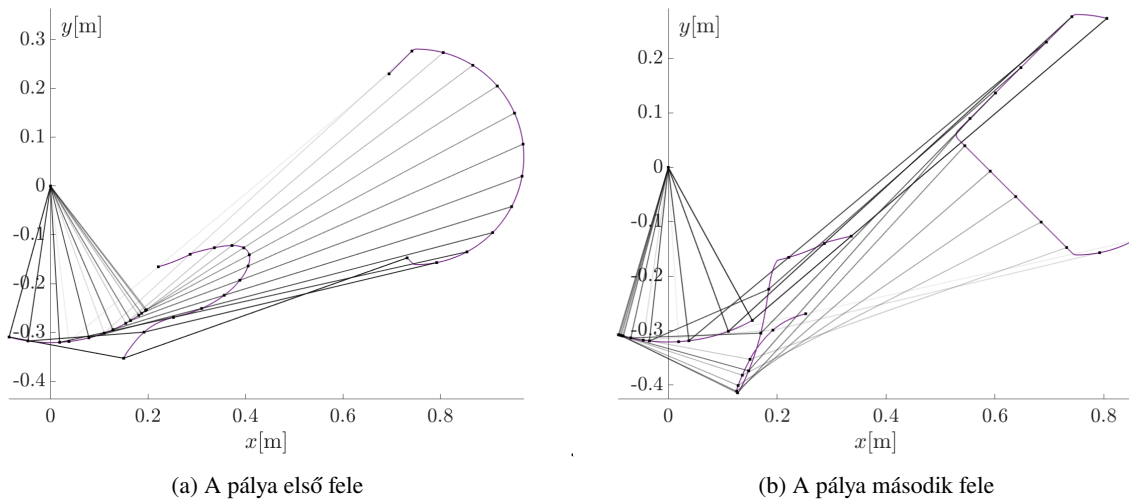
$$\Theta_{3uw} \approx \frac{l_2^3 \cdot l_3^2}{12} + \frac{l_2^3 \cdot l_3^2}{144} \quad (3.20) \quad \Theta_{3w} \approx \Theta_{3uw} + \frac{l_2^3}{2} (l_3 - 0.11)^2 \quad (3.21)$$

Itt érdemes megjegyezni, hogy a harmadik elem esetében a geometriai középpontot használtuk, amely nem esik egybe a tömegközépponttal.

$$E = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_{CM1}^2 + \frac{1}{2} \Theta_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot v_{CM2}^2 + \frac{1}{2} \Theta_2 \omega_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \cdot v_3^2 + \frac{1}{2} \Theta_3 \omega_3^2 \quad (3.22)$$

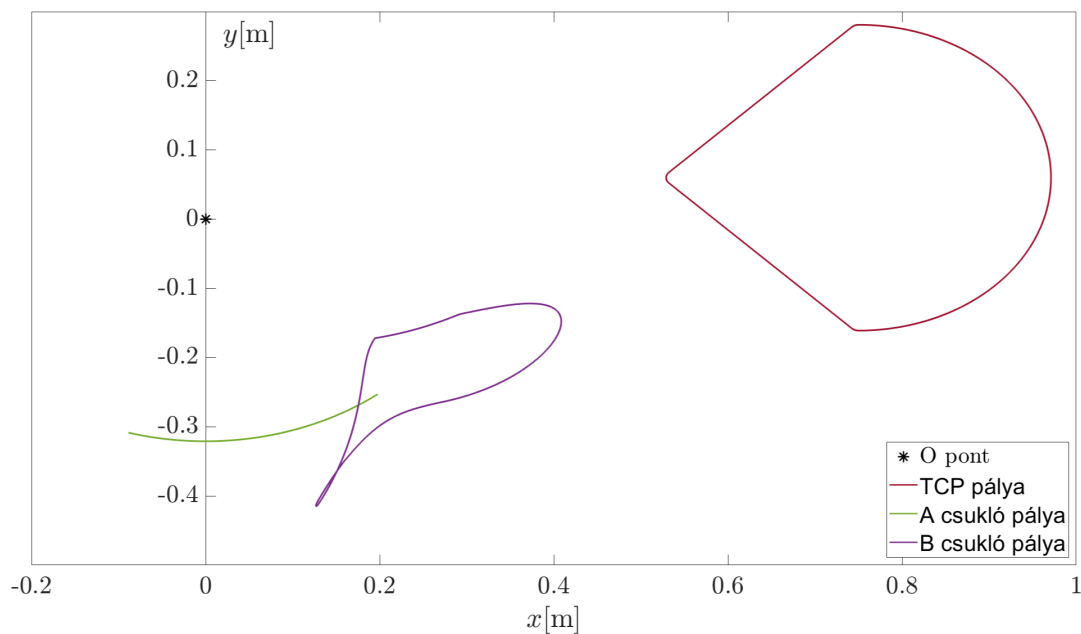
Innen az egyenlet:

$$E(\gamma) = E_1(\gamma) - E_{1t-1} + E_2(\gamma) - E_{2t-1} + E_3(\gamma) - E_{3t-1} \quad (3.23)$$



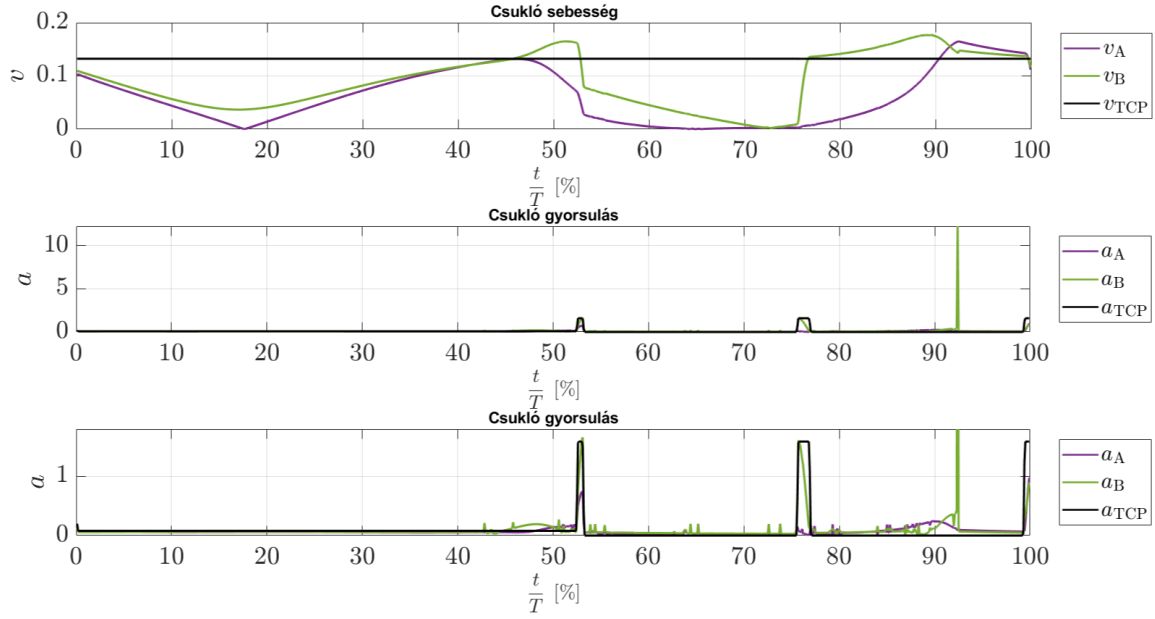
3.12. ábra. A szimulált manipulátor mozgása, több pillanatfelvétel átfedésével bemutatva

Ahogy az 3.13 és 3.12 ábrákon láthatjuk, ennek a módszernek egy új, figyelemre méltó sajátossága jelentkezik, mégpedig a pálya alsó részein létrejövő kis hurkok. A pálya többi része viszonylag hasonlóan mutatkozik ahhoz, amelyet a pozíciótávolság négyzetösszegének minimalizálásával generált módszer adott.



3.13. ábra. A csuklók által rajzolt pályák

A 3.14 ábrán látható telemetriai adatokat vizsgálva sajnos azt tapasztaljuk, hogy az ugrások és kisebb tüskék visszatértek, ami ebben a tekintetben a módszert a négyzetes pozíciómódszerhez teszi hasonlóvá. Emellett sajnálatos módon a nagy gyorsulási csúcsot is megismétli a TCP pályájának felső részén.



3.14. ábra. A kinetikus energia módszer telemetrikus adatai

A jellemző adatokat tekintve a módszer teljesítménye szintén közel áll a négyzetes pozíciómódszeréhez, a maximális értékek kissé magasabbak, míg az átlagos sebességértékek valamivel alacsonyabbak.

3.4. táblázat. Karakterisztikus adatok:

csukló	max v	átl. v	max a	átl. a	Doboz x	Doboz y	Doboz sz. x	Doboz m. y
A	0.1631	0.0611	0.9757	0.0689	0.2893	0.0680	0.0387	-0.2970
B	0.1717	0.0901	10.3775	0.1030	0.2829	0.2928	0.2546	-0.2545
TCP	0.1323	0.1323	1.5895	0.0822	0.4420	0.4420	0.7703	0.0598

3.3.1. Teljes energia különbség

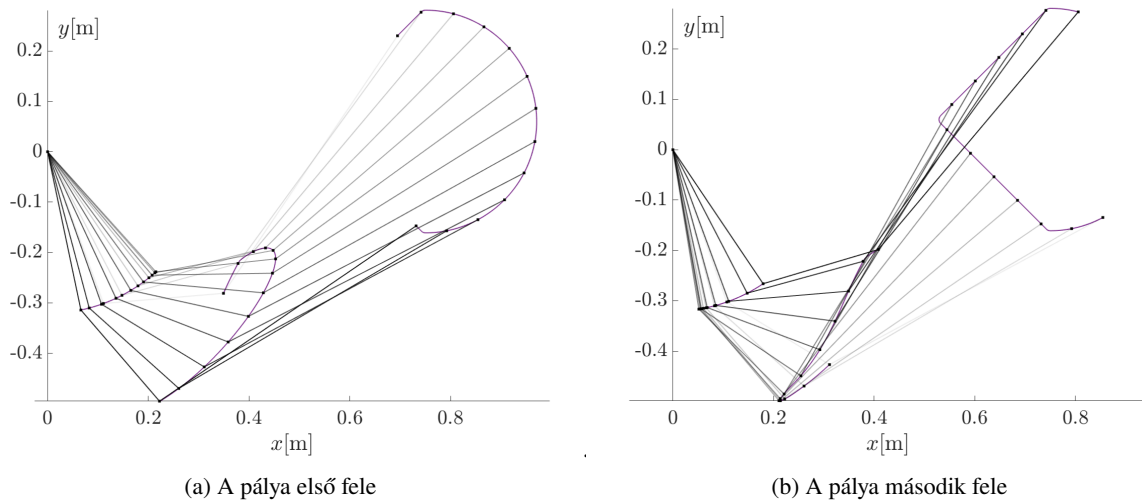
Itt figyelembe vesszük a gravitáció hatását az energiakülönbségekben a potenciális energia által. A potenciális energia a következőképpen számítható ki:

$$E_p(\gamma) = g(m_1 \cdot A_y(\gamma)/2 + m_2 \cdot (A_y(\gamma) + B_y(\gamma))/2 + m_3 \cdot (2 \cdot y(\gamma) + TCP_y(\gamma))/3) \quad (3.24)$$

Innentől a minimalizálandó egyenlet:

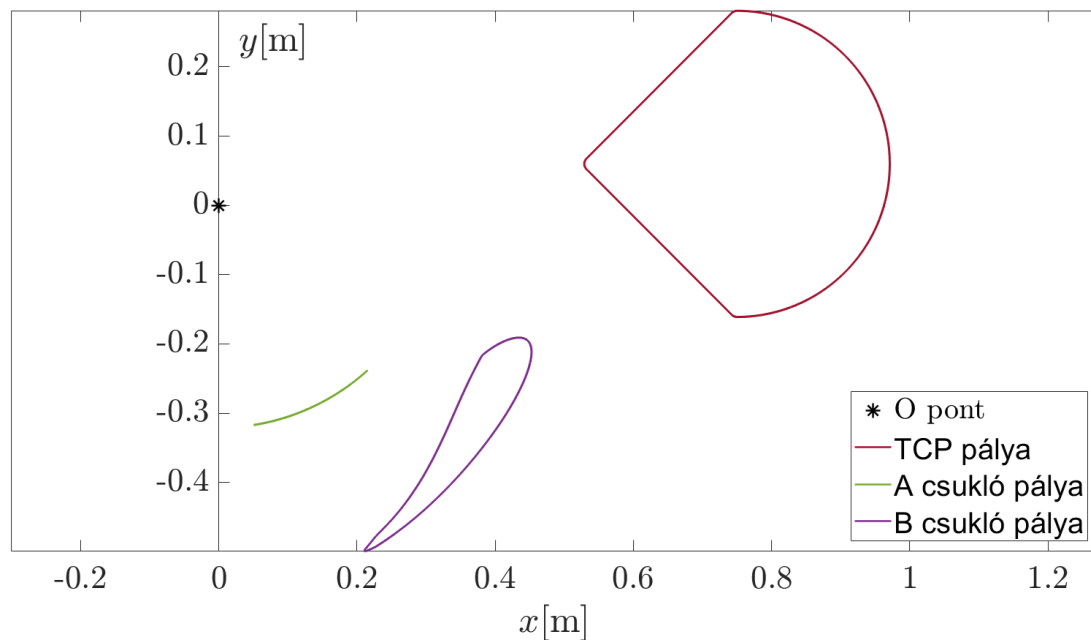
$$f(\gamma) = E_p(\gamma) - E_{pt-1} + E_k(\gamma) - E_{kt-1} \quad (3.25)$$

Ahol E_k a kinetikai energia, amit az előző szakaszban számoltunk ki.



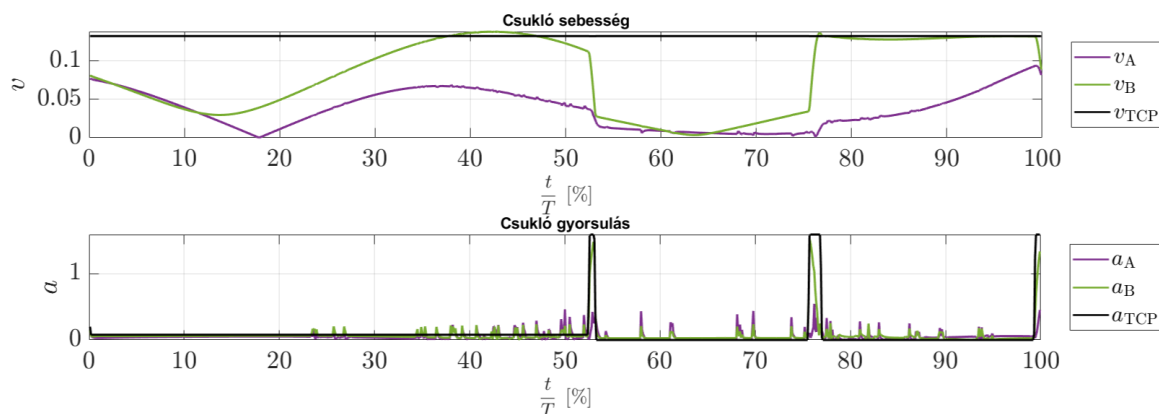
3.15. ábra. A szimulált manipulátor mozgása, több pillanatképfelvétel átfedésével bemutatva

Ahogy a pálya- és árnyékdiagramokon látható a 3.15 és 3.16 ábrákon, a hurok, amely a kinetikai energiás módszerre volt jellemző, eltűnt, és a B csukló pályája sokkal lejjebb helyezkedett el. A mozgás is elvesztette a púposágát, és már nem hasonlít a minimális négyzetes pozíciós módszerhez.



3.16. ábra. A csuklók által leírt pálya

A telemetrikus adatokból látható, hogy a nagy gyorsulási tüskék szerencsére eltűntek, a telemetrikus adatok jelenleg nagyon hasonlóak a sebességalapú módszerhez, kivéve a kis gyorsulási kiugrásokat.



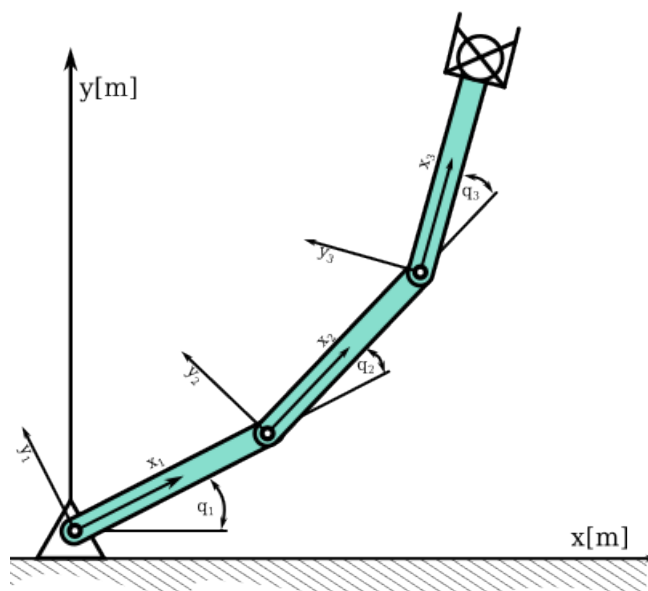
3.17. ábra. A teljes energia módszer telemetrikus függvényei

3.5. táblázat. Karakterisztikus adatok:

csukló	max v	átl. v	max a	átl. a	Doboz x	Doboz y	Doboz sz. x	Doboz m. y
A	0.0938	0.0371	0.5456	0.0507	0.1649	0.0790	0.1227	-0.2891
B	0.1382	0.0811	1.5219	0.0754	0.2418	0.3084	0.3310	-0.3544
TCP	0.1323	0.1323	1.5895	0.0822	0.4420	0.4420	0.7703	0.0598

3.3.2. Teljes energia különbség virtuális rugóval

A virtuális rugó módszer esetében egy-egy torziós rugót képzelünk el mindegyik csuklóhoz csatolva. Ezek a rugók arra szolgálnak, hogy gátolják a manipulátort az ellen, hogy túlságosan is kitérjen az egyes csuklók tartományának középvonalától. A 3.18 ábrán láthatjuk a manipulátor csukló szögeit, amelyeket a virtuális rugókban tárolt potenciális energia kiszámításához használatosak.



3.18. ábra. A csukló szögek illusztrációja

Innen bemutatom, hogyan nyerhetjük ki ezeket az csukló szögeket a használt csukló koordinátákból, valamint azt a referencia csukló koordinátát, ahol a rugó nem tárol energiát.

$$q_1 = \text{atan2}\left(\frac{A_x}{A_y}\right) \quad (3.26)$$

$$q_2 = q_1 + \text{atan2}\left(\frac{A_x - B_x}{A_y - B_y}\right) \quad (3.27)$$

$$q_3 = q_1 + q_2 + \text{atan2}\left(\frac{TCP_x - B_x}{TCP_y - B_y}\right) \quad (3.28)$$

$$q_{\text{reff}.1} = -\frac{\pi}{2} \quad (3.29)$$

$$q_{\text{reff}.2} = \frac{\pi}{2} \quad (3.30)$$

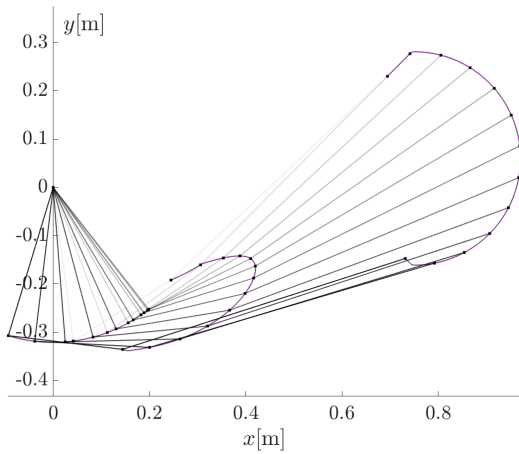
$$q_{\text{reff}.3} = \frac{\pi}{4} \quad (3.31)$$

A referencia csukló szögek intuíció alapján kerültek megválasztásra, figyelembe véve az emberi kar pihenő helyzetét. Innen a potenciális energia, amelyet ezek a virtuális rugók tárolnak, a következőképpen alakul:

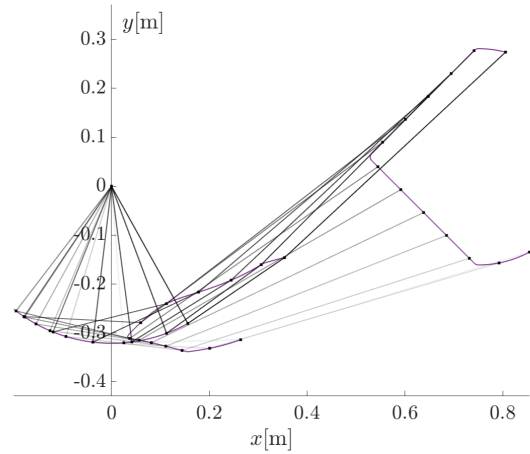
$$E_{PS}(\gamma) = \frac{1}{2}k(q_1(\gamma) - q_{\text{reff}.1})^2 + \frac{1}{2}k(q_2(\gamma) - q_{\text{reff}.2})^2 + \frac{1}{2}k(q_3(\gamma) - q_{\text{reff}.3})^2 \quad (3.32)$$

$$f(\gamma) = E_p(\gamma) - E_{p_{t-1}} + E_k(\gamma) - E_{k_{t-1}} + E_{PS}(\gamma) - E_{PS_{t-1}} \quad (3.33)$$

Ahogy látható, a képlet hasonlít az előző esetre, csak virtuális rugókkal kiegészítve. Az egyszerűség kedvéért a torziós rugóállandó k azonos minden rugóra, és 0,2 értékre választottam, mivel kedvező eredményeket adott. Azonban ajánlott további vizsgálatokat végezni a paraméter és annak hatására a mozgásra.



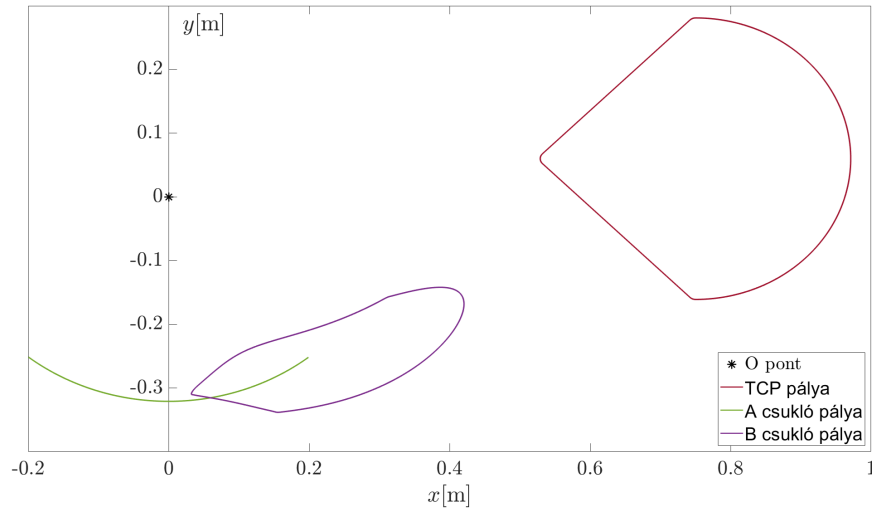
(a) A pálya első fele



(b) A pálya második fele

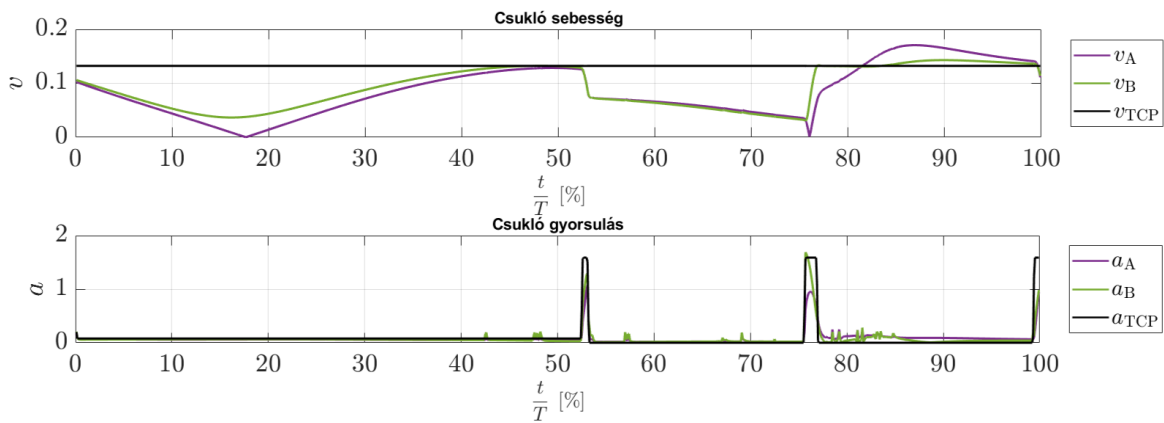
3.19. ábra. A szimulált manipulátor mozgása, több pillanatfelvétel átfedésével bemutatva

Az előző ábrából látható, hogy a beállított rugóállandóval rendelkező rugók úgy tűnik, hogy leküzdik a gravitációt, és egy hasonló alakot vesznek fel, mint a korábban látott módszerek. A kinematikai energia hurokformája nem tért vissza, de a négyzetes pozíció minimumának "púpja" jelen van. A módszer meglehetősen simának és használhatónak tűnik.



3.20. ábra. A virtuális rugókkal kiegészített módszer által rajzolt pályák

A telemetrikus adatok alapján látható, hogy ez a módszer még simább lett, mint a teljes energia alapú módszer, és a második legsimább módszer a sebesség alapú módszerek után. Nincsenek nagy gyorsulási csúcsok, és a módszer ebből a szempontból is hasznosnak tűnik.



3.21. ábra. A virtuális rugó módszer telemetrikus adatai

3.6. táblázat. Karakterisztikus adatok:

csukló	max v	átl. v	max a	átl. a	Doboz x	Doboz y	Doboz sz. x	Doboz m. y
A	0.1707	0.0860	1.0740	0.0766	0.3986	0.0696	0.0179	-0.2867
B	0.1430	0.0911	1.6903	0.0759	0.3881	0.1963	0.2434	-0.2446
TCP	0.1323	0.1323	1.5895	0.0822	0.4420	0.4420	0.7703	0.0598

4. fejezet

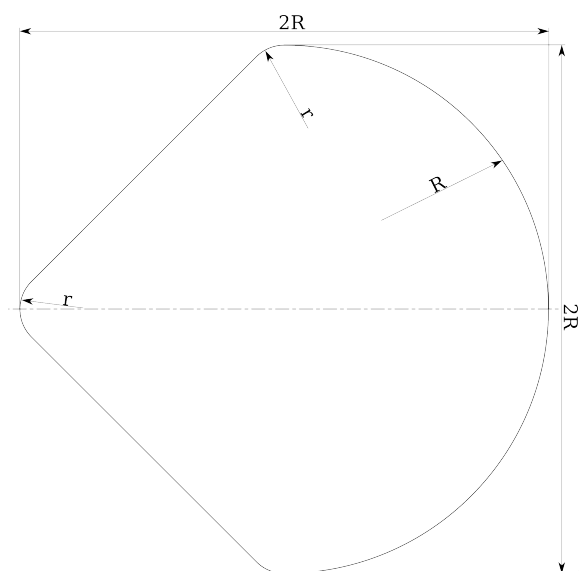
A mérés és annak felállításának leírása

Először is fel kell állítanunk bizonyos követelményeket a kísérlet során gyűjtött adatok minőségére. Az irányelvek a következők:

- Pozícióadatok gyűjtése az O, A, B és TCP pontokon, amelyek két dimenziós adatokra alakíthatók.
- Egy olyan kísérleti eszköz felállítása, amely meghatároz egy pályát, amely mentén a vizsgált résztvevőnek mozgatnia kell a TCP-t; a pályát úgy kell megválasztani, hogy egyenes és ívelt szakaszokat is tartalmazzon, lehetővé téve különböző mozgások értékelését.
- A kísérleti eszköznek képesnek kell lennie a TCP sebességét is valamilyen szinten kényszeríteni.
- A kísérleti eszközt úgy kell kialakítani, hogy lehetővé tegye a pálya követését lazán, fizikai korlátok nélkül, lehetővé téve kisebb eltéréseket a pálya mentén, valamint szükség szerint szigorú követést előíró korlátozással, amely arra kényszeríti az alanyt, hogy pontosan kövesse a pályát, és lehetőséget ad az ebből adódó erő mérésére.

4.1. Pályatervezés

Az első feladat a pálya megtervezése; ennek elég változatosnak kell lennie ahhoz, hogy ne legyen monoton, ugyanakkor egyszerűnek is kell lennie. A kiválasztott pályát a 4.1 ábra mutatja.

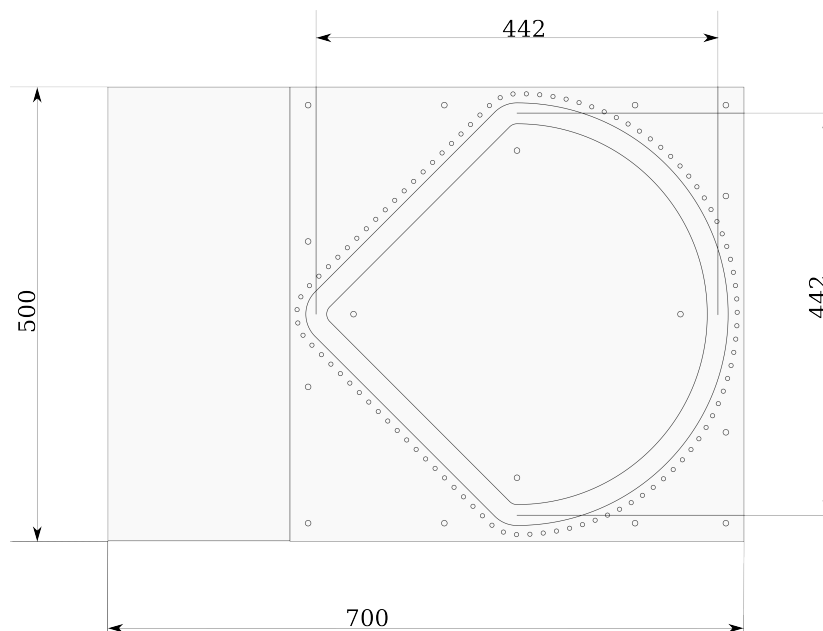


4.1. ábra. A kísérleti pálya parametrikus méretezése

A pálya a következőképpen van megszerkesztve: egy R átmérőjű kört félbevágunk az y tengely mentén. Egy, r sugarú negyedkört helyezünk el a vízszintes szimmetriatengelyen úgy, hogy annak bal oldali pontja az eredeti kör legbaloldali pontjának helyére kerüljön. Továbbá a félkör alsó és felső végpontjához egy-egy r

sugarú kör $\frac{1}{8}$ -nyi részét helyezzük el, a maradék végpontokat pedig egyenesekkel kötjük össze. Az R mérete a rendelkezésre álló anyagok és gyártási lehetőségek alapján került meghatározásra, ennek megfelelően 221 mm-es sugarat választottunk. Az r sugarat 33,5 mm-re választottuk, amelyet a következő szakaszban tárgyalunk tovább.

4.2. Konstrukció



4.2. ábra. A készülék felépítésének vázlatos ábrája néhány mérettel

A mérés összeállítás két lézerrel kivágott plexilemezből áll, amelyeket M6-os csavarokkal vannak rögzítve egymáshoz. A csatorna szélessége $r + 1\text{mm}$, ahol r értéke 22[mm] , ez lehetővé teszi, hogy egy szabványos gördeszka csapágy könnyedén csússzon a csatornában. Ha megnézzük az ábrát 4.2, láthatjuk, hogy a csatorna külső peremén egy 5[mm] átmérőjű lyuksor helyezkedik el, amely piros LED diódák elhelyezésére szolgál. Ezek segítségével befolyásolhatjuk a résztvevőt, hogy a LED-ek közötti fényváltásnak megfelelő sebességgel kövesse a pályát. A LED-ek vezetékezését és programozását a következő szakaszban tárgyaljuk.



(a) megtekintő oldal

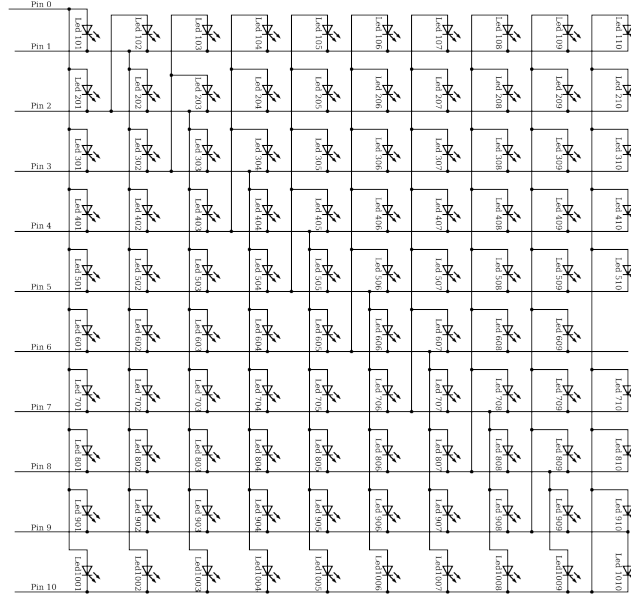
(b) mozgás oldal

4.3. ábra. A mérési beállításról készült fényképek

Ahogy az 4.3 ábrán látható, az LED-ek a "megtekintő oldalról" láthatók, míg a mozgás oldala tartalmazza a csatorna hornyot. Ahogy az bevezetésben említve lett, a vállon áthaladó síkba van pozicionálva a mérőberendezés. A résztvevő a megtekintő oldal felől ül és a karjával a mozgató oldalon követi az LED-eket.

4.3. LED-ek és elektronika

Az LED-ek és az elektronika célja a mérési beállításban a korábban említett sebességkényszer biztosítása. Ebben a szakaszban röviden bemutatom a rendszer vezetékezését és a kód mögötti ötletet. Az eszköz 99 LED-et, 15 m vezetékét és egy Arduino Nano-t tartalmaz. Az LED-eket kézzel helyeztem el a megtekintő oldali plexilapba vágott részekbe, majd a mozgás oldali plexilap rögzítette őket. Az LED-ek úgy vannak kialakítva, hogy világítanak, és irányítják a résztvevőt, hogy a TCP-t egy adott helyre helyezze. Ennek érdekében kompromisszumot kellett kötni, és csak egy LED világít egyszerre, így az LED-ek egy egyszerűsített mátrixba lettek bekötve, lehetővé téve, hogy csak 9 lábat használjunk a mikrokontrolleren. A vezetékezési diagram a 4.4 ábrán látható.



4.4. ábra. A LED mátrix diagramja

Mivel az LED-ek sorban, egyenként történő bekapcsolása nagyon "szaggatott" benyomást keltene, az ötlet az, hogy egy folyamatosan mozgó piros fény pont illúzióját hozzuk létre. Először definiáljunk három változót, L_0 , L_1 és L_2 , amelyek értékei azok az LED-ek, amelyek adott pillanatban világíthatnak. Ezek az értékek minden T idő elteltével inkrementálódni fognak. Az L_1 kiszámításának képlete az eltelt idő, t függvényében az alábbi 4.1 egyenletben van leírva.

$$L_1 = \text{int} \left(\frac{99 \cdot T}{t} \right) - \text{int} \left(\frac{t}{99 \cdot T} \right) \cdot 99 \quad (4.1)$$

Itt az L_0 és L_2 LED-ek az 4.2 és 4.3 egyenletek segítségével kerülnek meghatározásra.

$$L_0 = \begin{cases} L_1 - 1 & L_1 \in \{2, 99\} \\ 99 & L_1 = 0 \end{cases} \quad (4.2) \quad L_2 = \begin{cases} L_1 + 1 & L_1 \in \{1, 98\} \\ 0 & L_1 = 99 \end{cases} \quad (4.3)$$

Most már, hogy meghatároztuk a 3 LED-et, jöhet a folyamatosan mozgó fény illúziójának megteremtése. Ehhez úgy kell eljárunk, hogy a középső LED mindig maximális fényerővel világít, miközben a fényerő fokozatosan vándorol az L_0 LED-ről az L_2 LED-re. Ezt úgy valósíthatjuk meg, hogy az LED-ek egy bizonyos ideig világítanak a mikrokontroller ciklusában. Az időlépést, amely a fényerő eltolódását szabályozza L_0 és L_2 között, τ -nak nevezzük, amelyet a mikrokontroller időzítője ad meg. Fontos, hogy ez az idő lényegesen hosszabb legyen, mint az idő, ameddig az LED-ek világítanak egy ciklusban, különben a fényerő változásai kimaradnak. Az LED fényerősségének "bekapcsolási idejét" kifejező egyenletek az 4.4-4.6 képletekben találhatóak.

$$OT(L_1) = \tau \cdot n = 0.01s \quad (4.4)$$

$$OT(L_2) = \text{int} \left(\frac{t - \text{int} \left(\frac{t}{99T} \right) \cdot 99T - L_1 T}{\tau} \right) \quad (4.5)$$

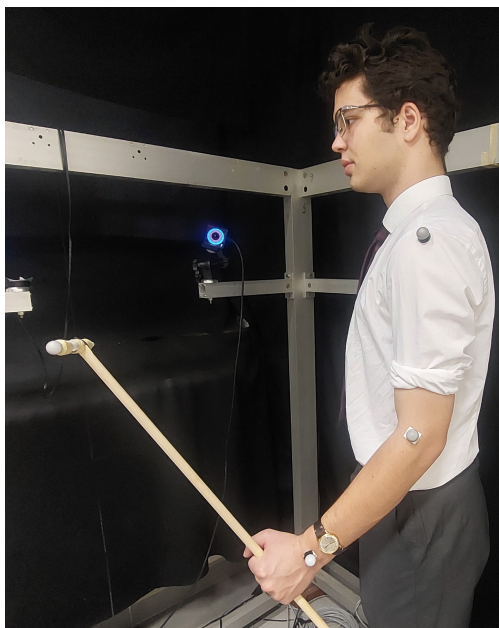
$$OT(L_3) = OT(L_1) - OT(L_2) \quad (4.6)$$

4.4. A mérési berendezés egyéb részei

A mérőberendezés teteje körülbelül 142 cm magasságban, a vállmagasságnál let rögzítve. Ehhez egy már meglévő egyensúlyozást segítő keret lett átalakítva, amelyhez egy fa keret let rögzítve. Egy székhöz rögzített botot is alkalmazva lett, hogy a résztvevők kezének mozgását segítsen síkban korlátozni.

4.5. Mérés

A mérés során a résztvevők meg lettek kérve, hogy végezzék el a mozgást a pályán három különböző sebességgel és két különböző súlyú botot használva. Maga a mérés, valamint az előkészületek körülbelül 25 percet vettek igénybe személyenként.



4.5. ábra. Markerek a résztvevő kezén

4.5.1. Mérés előtti előkészületek

A mérés egy mozgásrögzítő rendszer (OptiTrack) segítségével történik, passzív markerekkel, ezért minden mérés előtt három markert kell elhelyezni a résztvevőkön: egyet a vállon, egyet a könyökön és egyet a csuklón. Az elhelyezési ajánlások a következő listában találhatók:

- A válljelzőt a váll tetejére (váll felső részére) kell elhelyezni, enyhén a póló vagy trikó varrása alatt, az alapja körülbelül 45°-os szögben legyen.
- A könyökjelzőt a kar kinyújtott helyzetében, az izmok közül a legjobban kiemelkedő helyre kell rögzíteni (brachio-radialis izomra).
- A csuklójelzőt a csukló lapos részére kell rögzíteni, amely a legkevésbé mozdul el, amikor jobbra balra mozgatjuk a kézfejet.

Egy példát a rögzített markerekre az 4.5 ábrán láthatunk.

4.5.2. Mérés menete

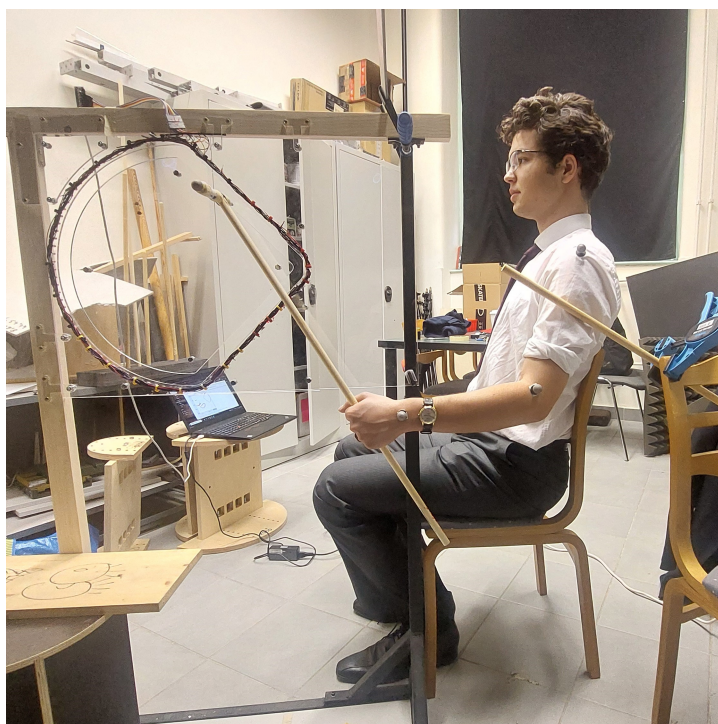
A résztvevőt arra kérjük, hogy foglaljon helyet a mérőeszközhöz közeli széken, és kezébe adjuk a soron lévő botot, amelyet a bal kezében kell tartania, a mozgás oldalán, ahogyan azt az 4.6 ábra is mutatja. Két dologra kell figyelni ahhoz, hogy az adatok hasznosak legyenek. Először is, a vállnak lehetőleg a legkevésbé kell mozognia, ezért javasoljuk, hogy a résztvevő üljön egyenesen, a szék háttámlájához szorítva a hátát. Másodszor, a mérés egy síkbeli mérés, ami azt jelenti, hogy kulcsfontosságú, hogy a csuklók csak egy síkban mozogjanak, és ne térjenek el a térben. Ez ebben az esetben azt jelenti, hogy a könyököknek nem szabad kifelé mozdulnia a mérés során. A felvétel

előtt a résztvevőktől kérjük, hogy tegyenek néhány kört a pályán, hogy megismerkedjenek vele. Ezt követően a méréseket az alábbi módon hajtjuk végre: először a három leglassabbat, majd a három közepes sebességűt, végül pedig a leggyorsabbakat, ahol minden sebességmérés két különböző tömegű bottal történik. Ahogyan azt az alábbi táblázat is mutatja. A sebességet a mérőeszköz nézőoldalán elhelyezett LED lámpák szabályozzák, a résztvevőt arra kéri, hogy a bot TCP-jével kövesse őket.

4.1. táblázat. Mérés menete

Nem nehezített bot			Nehezített bot		
Lassú sebesség	Közepes sebesség	Gyors sebesség	Lassú sebesség	Közepes sebesség	Gyors sebesség

A résztvevőt ezután arra kéri, hogy helyezze a bot TCP-jét a pálya legalacsonyabb pontjára, az operátor ezután elindítja a felvételt, a tesztalany pedig az első alkalommal, amikor a piros fények áthaladnak a beállítás legalacsonyabb pontján, elkezd követni őket. Négy fordulat után a mérés véget ér.



4.6. ábra. Mérési összeállítás egy résztvevővel

5. fejezet

A mérési adatok kiértékelése

5.1. Kiértékelő eszközök

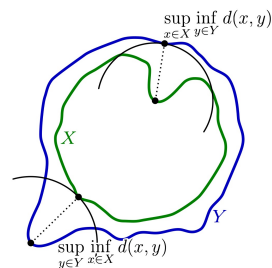
A feldolgozás során szükségem volt olyan eszközökre, amelyek lehetővé teszik a csuklók által bejárt útvonalak hasonlóságának mérését. Ebben a részben röviden bemutatam a három eszközt, amelyet a halmazok közötti hasonlóság kiszámításához használtam.

5.1.1. Euklideszi távolság

A három eszköz közül a legegyszerűbb az euklideszi távolság. Én úgy valósítottam meg, hogy egyszerűen az átlagos euklideszi távolságot számítottam ki az összepárosított adatpontok között a mért adatokban. Ennek az eszköznek az előnye a egyszerűsége és a viszonylag gyors számítási sebessége. Hátránya, hogy csak olyan két adatállomány között alkalmazható, amelyek pontosan ugyanakkora méretűek, ezért nem alkalmas különböző mért adatállományok összehasonlítására. Azonban hasznos eszköz, amikor egy adatállományt hasonlítunk össze annak szimulált változataival.

5.1.2. Hausdorff távolság

Az első módszer, amelyet itt tárgyalunk, és amely képes kezelni a különböző méretű adatállományokat, a Hausdorff-távolság. Az, hogy képes kezelni a különböző méretű adatállományokat, hasznos, mivel így egy gyorsabb vagy nagyobb felbontású mozgás összehasonlítható egy lassabb vagy alacsonyabb felbontású mozgással. A Hausdorff-metrika azt méri, hogy két részhalmaz mennyire van egymástól egy metrikus térben. A Hausdorff-távolság az a legnagyobb távolság, amelyet valakinek meg kell tennie az egyik útról a másikra való eljutáshoz. A módszer előnye, hogy nem igényel sokkal több számítási teljesítményt, mint az egyszerű euklideszi távolságmérés, azonban az adatok nem olyan részletesek, mint amilyeneket a Frechet-távolságtól kaphatunk.

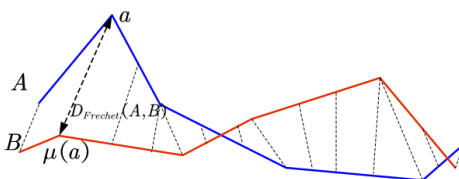


$$d_h(X, Y) = \max \left\{ \sup_{x \in X} d(x, Y), \sup_{y \in Y} d(X, y) \right\} \quad (5.1)$$

5.1. ábra. A Hausdorff távolság illusztrációja [8]

5.1.3. Fréchet távolság

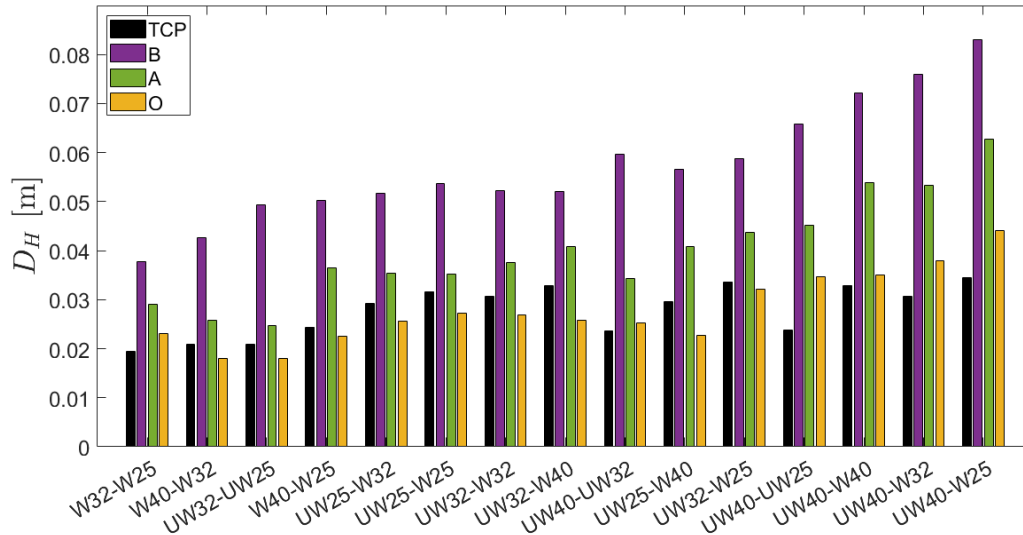
A Fréchet távolságot úgy kell elképzelni, mint a minimum póráz hosszát, amely szükséges ahhoz, hogy egy kutyát sétáltassunk, ha mindketten, te és a kutyád, egy-egy útvonalat választotok, és szigorúan követitek azt. Előnye a Hausdorff-metrikával szemben, hogy folyamatosan halad előre, vagyis végigjárja az adatállományokat, szemben azzal, hogy csupán egy távolságot határoz meg.



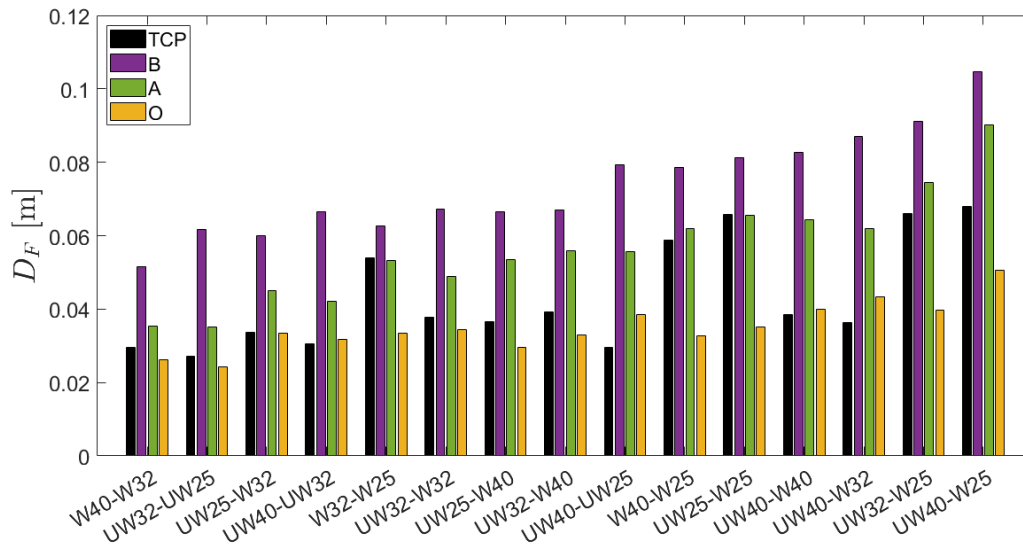
5.2. ábra. Fréchet távolság illusztrációja [9]

5.2. Az emberi kéz mozgásainak összehasonlítása önmagával

Ahogy korábban említésre került, minden egyes résztvevő segítségével hat mérés történt. Az alfanumerikus kódot használunk a mérések megkülönböztetésére, az első szakaszban "UW" szerepel a súlyozatlan, vagy "W" a súlyozott kifejezésként, utalva a kar súlyára. A második szakaszban "40", "30" vagy "25" található, amelyek lassú, közepes és gyors sebességet jelölnek. Ebben a szakaszban röviden megvizsgáljuk, hogy van-e bármilyen jelentős korreláció a mozgások között, vagy pedig az emberi mozgástervezés nem veszi figyelembe a mozgás sebességét és az elemek súlyát. Az alábbi két oszlopdiagram a Hausdorff és Fréchet távolságokat ábrázolja a kar 4 pontja számára a mozgás során. A klaszterek az A és B távolságok összegének növekvő sorrendje szerint vannak rendezve.



5.3. ábra. A mérések közötti átlagos Hausdorff távolság



5.4. ábra. A mérések közötti átlagos Fréchet távolság

A különbségek nem különösebben erősek, felfedezhető néhány szabályszerűség. Az "UW40" mérés az utolsó helyet foglalja el a hasonlóság szempontjából, amikor összehasonlítjuk a súlyozott mozgásokkal. Úgy vélem, hogy ennek oka a lassú mozgás, amely nagyon erősen függ a bot súlyától, ezt további telemetrikus ábrák is alátámasztják majd. Ugyanannak a súlynak a mérései, kis sebességkülönbségekkel, úgy tűnik, az élményben szerepelnek, még hasonlóbbak, mint ugyanazon sebességű mérések különböző súlyokkal.

5.3. Madárkák és banánok

Ahogy korábban említettem, abban a síkban, amelyet vizsgálunk, az emberi kar valójában egy 5 DOF manipulátor, mivel az O pont is képes mozgásra. Ennek mérséklésére a többi három mért pont és az O pont közötti különbséget fogjuk figyelembe venni. A jövőben az itt tárgyalt adatállományokat a következő módon képezzük:

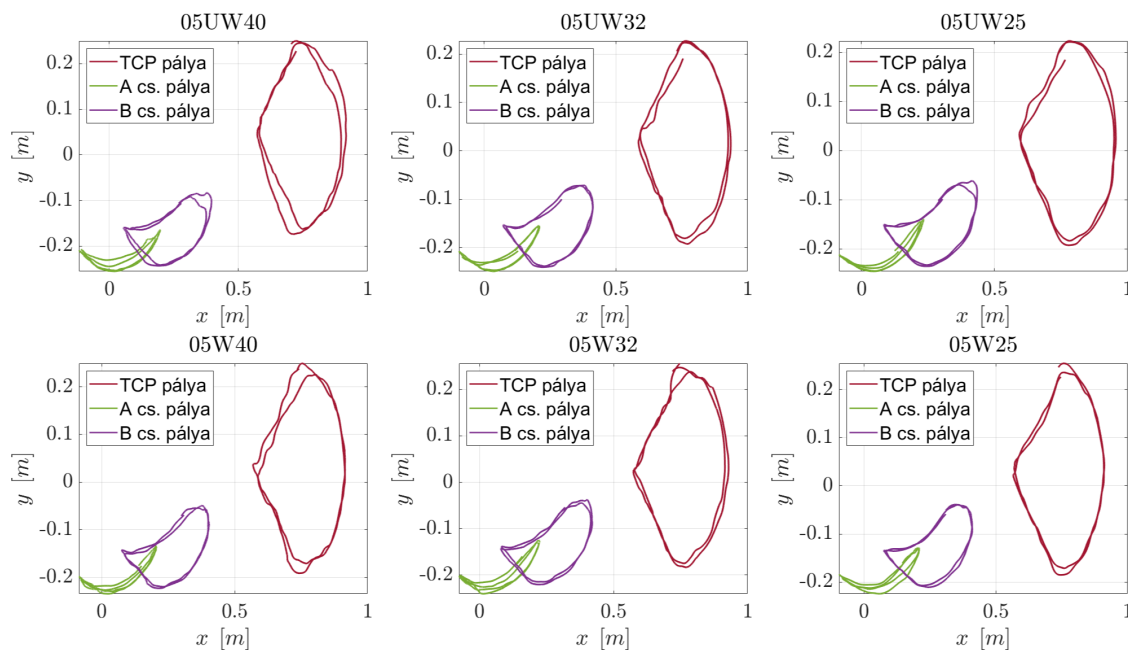
$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_m - \mathbf{O}_m \quad (5.2)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_m - \mathbf{O}_m \quad (5.3)$$

$$\mathbf{TCP} = \mathbf{TCP}_m - \mathbf{O}_m \quad (5.4)$$

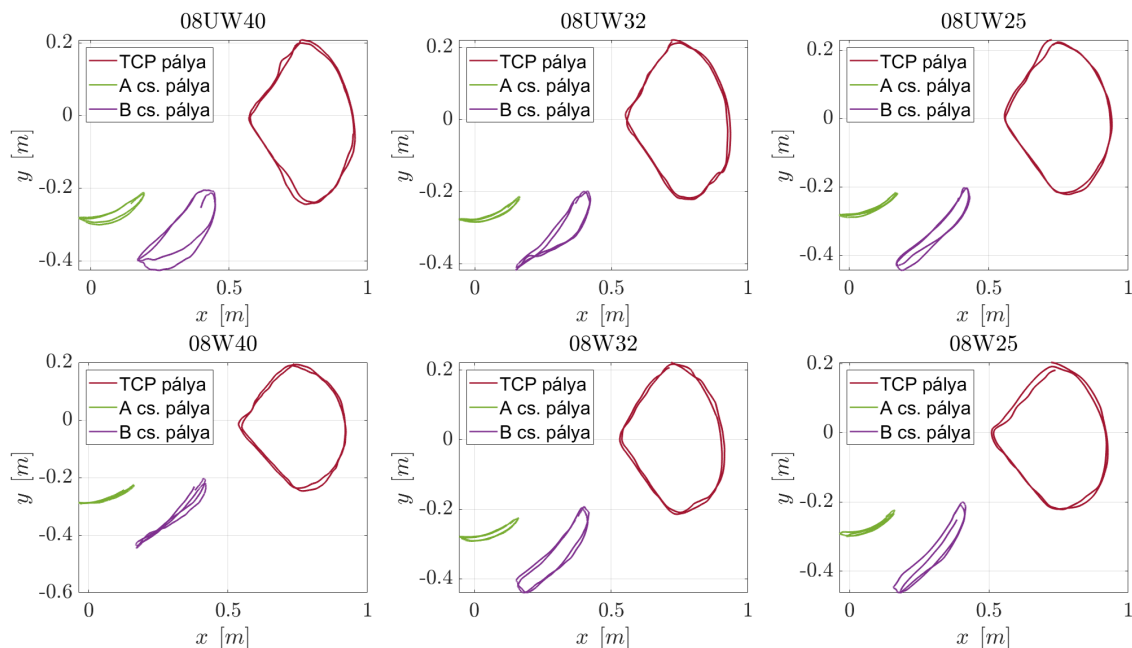
A 12 résztvevő által bejárt pályák vizsgálata során két csoportot különíthetünk el: a "madárka" és a "banán" típusú mozgásokat. Ezt a besorolást a B csukló által megtett pálya során létrehozott alak alapján végeztük el. Ez a besorolás meglehetősen szubjektív, főként az alak vizuális megfigyelése alapján, de vannak irányelvek is.

Madár alakú mozgásnak tekintjük azt, ha a résztvevő által húzott pálya hasonlít egy madárra, azaz a B csukló legjobbra eső pontja egy kicsit magasabban van, mint a hátsó része, és jelentős ívvel van lekerekítve. A bal oldali rész mérsékelten éles szögben csatlakozik, körülbelül 30-45 fokos szöget alkotva, enyhén felfelé. A madár alját a hasa határozza meg, egy konvex ív, amely összeköti az elülső és a farok részt, míg a teteje is konvex ívből áll. Jó példája a madárka alakú mozgásnak az 5. számú résztvevő, ahogyan az a 5.5 ábrán látható.



5.5. ábra. A 5. számú résztvevő által rajzolt B csukló pályák, amelyek jól illusztrálják a madárka alakú mozgást.

A "banán alakú" mozgás ezzel szemben sokkal keskenyebb, mint a madár alakú mozgás, és viszonylag szimmetrikus. Az ilyen esetekben a B csukló mozgásának tömegközéppontja jelentősen alacsonyabban helyezkedik el, mint az A csuklóé, és a két csukló által rajzolt pályák között viszonylag nagy távolság van. Jó példa erre a mozgás, amely a következő ábrán látható. 5.6.



5.6. ábra. A 8. számú résztvevő által rajzolt B csukló pályák, amelyek jól illusztrálják a banán alakú mozgást.

Az alábbi táblázatban összegzem a résztvevők végtaghosszait, valamint a harmadik és az első két elem összegének arányát, továbbá azt is, hogy a résztvevők mozgása inkább madár alakú (birdie) vagy banán alakú (banana). A résztvevők három kategóriába lettek sorolva: M (vegyes), ami nem sorolható egyértelműen sem a madár, sem a banán kategóriába; Ba (banán); és Bi (madár). A vegyes eseteket jellemzi az a mérési hiba, hogy az l_3 hossz nem igazán volt konstans.

5.1. táblázat. Mért végtaghosszakat összefoglaló táblázat:

Résztvevő No. [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
l_1	0.25	0.31	0.28	0.27	0.24	0.21	0.25	0.28	0.25	0.23	0.23	0.24
l_2	0.20	0.24	0.24	0.25	0.19	0.20	0.25	0.25	0.24	0.21	0.24	0.22
l_3	0.64	0.62	0.49	0.64	0.54	0.49	0.49	0.56	0.50	0.52	0.47	0.56
$\frac{l_1+l_2}{l_3}$	0.69	0.89	1.07	0.81	0.81	0.83	1.02	0.95	0.98	0.84	1.01	0.82
Kategória	M	Ba	Ba	Ba	Bi	Bi	Bi	Ba	M	Bi	Bi	Bi

5.4. Mérési hibák

A mérési rendszer sajnos viszonylag érzékeny volt a mérési hibákra. A hibák két típusra oszthatók: mozgáskövetési és résztvevői hibákra. A mozgáskövetési hibák elhanyagolhatók a más típusú hibákhoz és a mérés eredményeihez képest. A kalibrálásokat úgy végeztük, hogy az abszolút pozíciós hiba körülbelül 0,2 mm legyen, és a markerek jól elhelyezkedtek a résztvevőkön, így ezekből nem származtak valódi hibák. A résztvevői hibák sokkal nagyobb problémát jelentenek, mivel a résztvevők nem tudták kellőképpen síkban tartani a kézmozgásaikat, így a mozgás hajlamos kilépni a síkból. Az ebben a kutatásban használt modell nem képes 3D bemenetet használni, ezért a mozgásokat 2D-ben vetítettük a síkra, és sajnos, ha a résztvevő kimozdítja az ízületét a síkból, akkor a mért adatok azt mutatják, hogy a végtagjaik összenyomódtak, ami nem kívánt eredményeket ad. Az alábbi táblázat összegzi a Z irányú hibát résztvevőnként az A és B csuklók esetében:

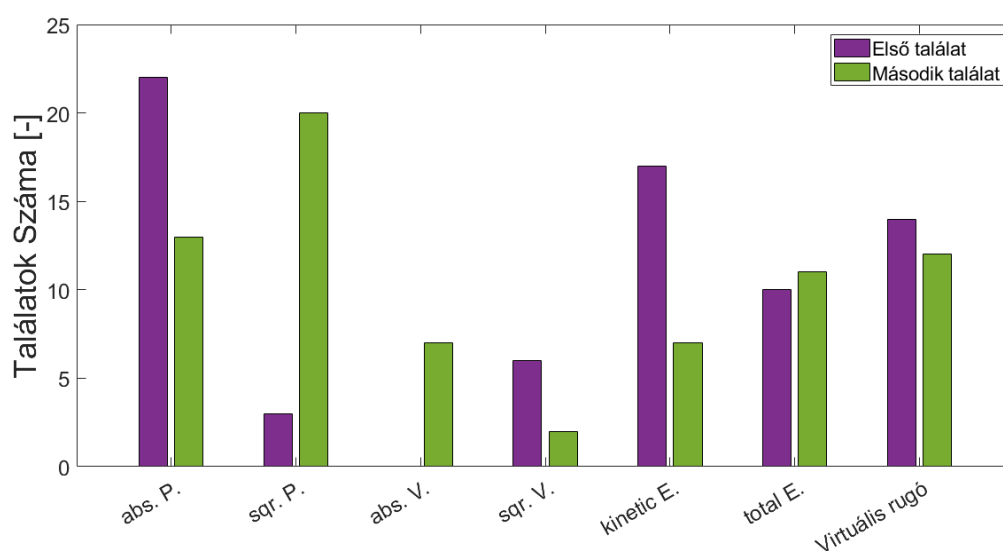
5.2. táblázat. Z irányú hibák összegzése:

Résztevő No. [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A [m]	0.09	0.02	0.03	0.05	0.04	0.05	0.05	0.03	0.06	0.08	0.06	0.11
B [m]	0.07	0.04	0.06	0.06	0.04	0.08	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.07

Ahogy látható, néhány résztvevő nagyon jól teljesített, a kombinált hiba kevesebb, mint 10 cm, míg mások rosszul teljesítettek, több mint 15 cm kombinált hibával. Azonban a résztvevők többsége az elfogadható tartományon belül van, ami 10-15 cm közötti kombinált hibát jelent. Jelenlegi konfigurációval nincs egyszerű módja a résztvevői hibák csökkentésének. Ha pontosabban szeretnénk vizsgálni az emberi mozgást, akkor a legjobb, ha olyan mérési módszert alkalmazunk, amely nem veszi a 3D mozgást hibának és a kart 3D ként modellezi.

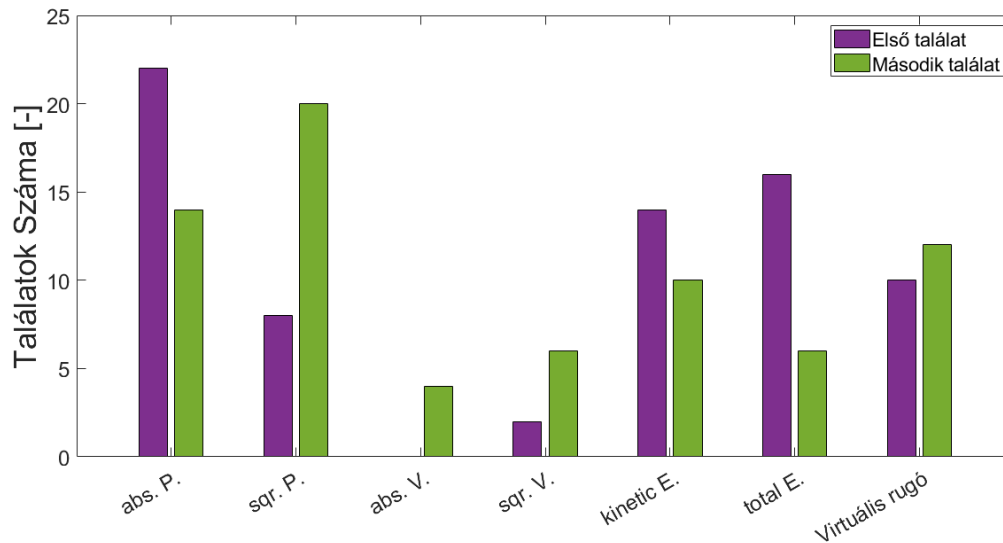
5.5. Szimulált metódusok összehasonlítása

Most válaszoljunk a kutatás fő kérdésére: melyik javasolt módszer utánozza a legjobban az emberi kar mozgását? Először három oszlopdiagramot készítettem, amelyek az egyes módszerek legjobb és második legjobb találatait ábrázolják az összegyűjtött 71 mérés alapján. A hasonlóság úgy lett meghatározva hogy a fejezet elején tárgyalt metrikák ki lettek számolva egyes csuklókra, majd a kapott értékek össze lettek adva. Először azokat az egyezéseket vizsgáljuk, amelyek a mozgások hasonlóságának elemzése alapján a Hausdorff módszerrel készültek. A 5.7 ábrát nézve megállapítható, hogy ez a módszer erősen előnyben részesíti a pozícióalapú módszereket, amelyek a legtöbb első helyezett találattal rendelkeznek. A kinetikus energia módszer is magas helyezést ért el ezzel a metrikával.



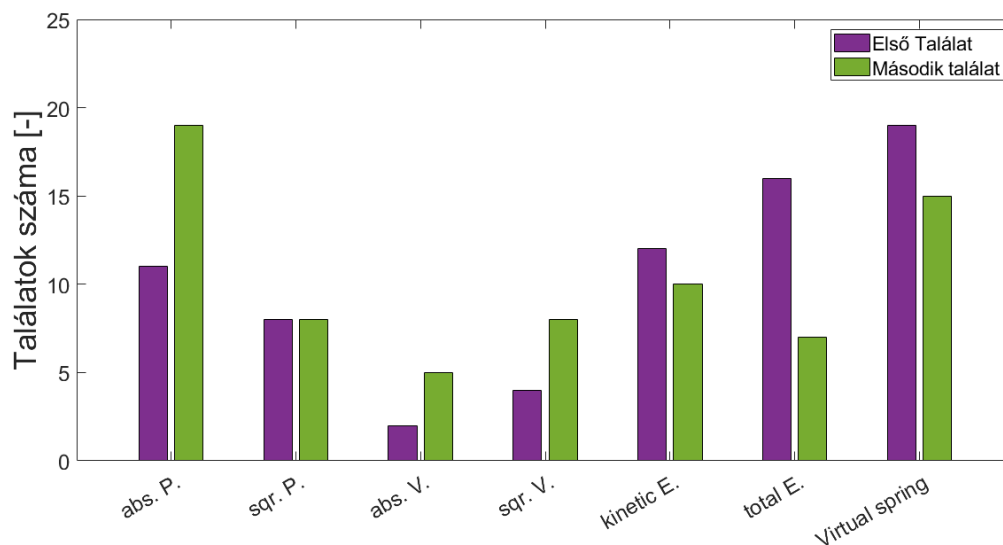
5.7. ábra. Hausdorff oszlopdiagram

A Fréchet módszer oszlopdiagramja nagyon hasonló, azzal a különbséggel, hogy a teljes energia módszer magasabbra került az első találatok mennyiségének szempontjából, mint a kinetikus energia módszer.



5.8. ábra. Frechet oszlopdiagram

Végül láthatjuk az oszlopdiagramot, amelyet az euklideszi távolság átlagos értékével történő legjobb illeszkedés alapján készült. Jelentős eltérések vannak az előző két módszerhez képest, mivel ez a módszer, ellentétben a másik kettővel, inkább azt veszi figyelembe, hogy valóban mennyire jó az illeszkedés, nem pedig csupán a két útvonal közötti legnagyobb hibákat. Ennek következtében a továbbiakban ezt a metrikát fogjuk használni az utak hasonlóságának értékelésére, mivel már nincs szükség az előző két módszer előnyeire, amelyek képesek kezelni az egyenlőtlen méretű adatokat.

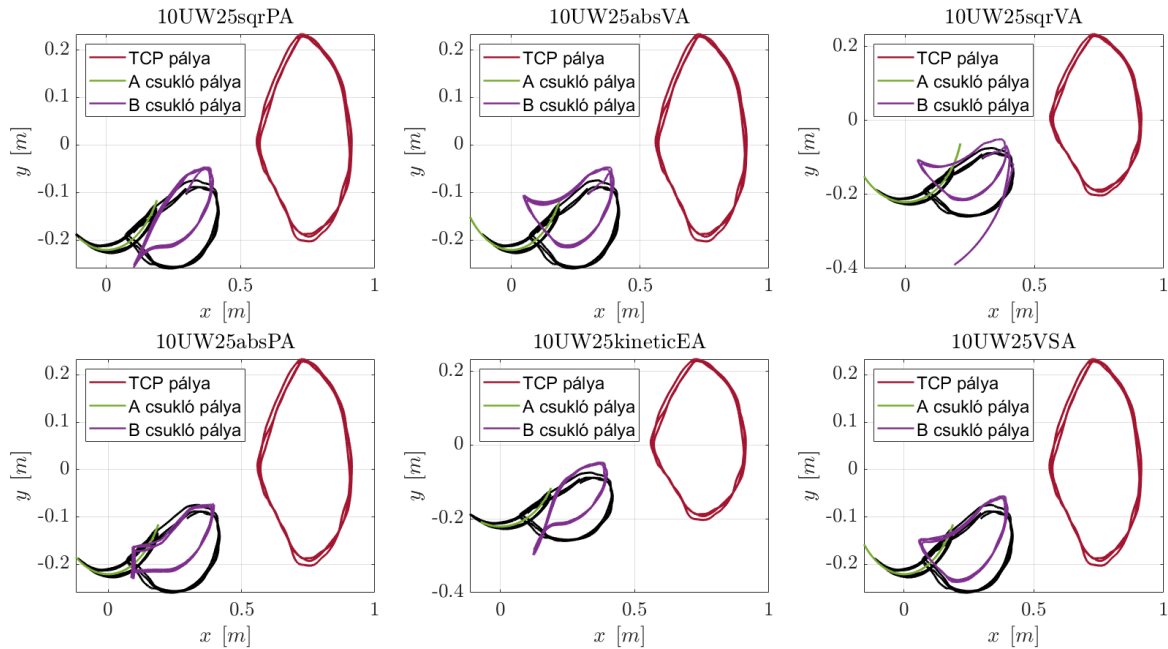


5.9. ábra. Euklideszi távolság oszlopdiagram

5.6. A módszerek valós használhatósága

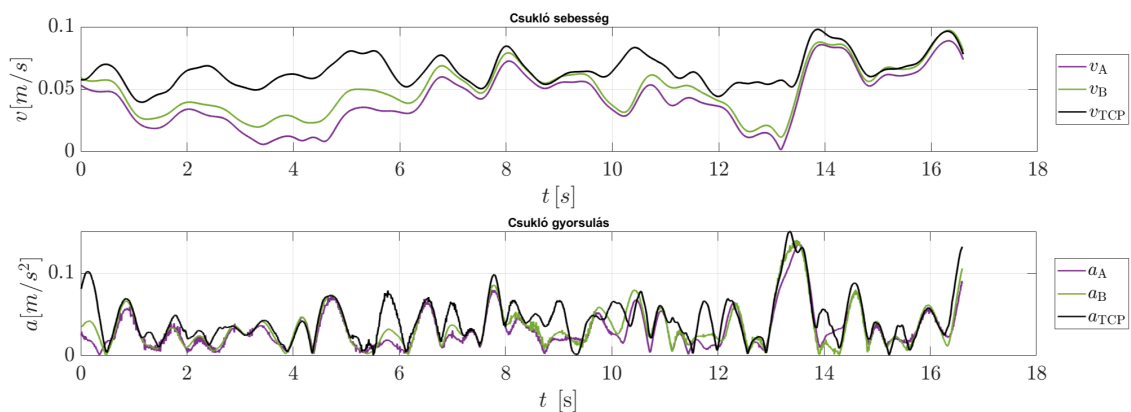
A korábbi szakaszban láthattuk, hogy hogyan értékelték a különböző útvonal-hasonlósági metrikák a módszerek sikerességét, és hogyan különböznek a különböző metrikák a siker meghatározásában. Azonban még nem láthattuk, hogyan néznek ki a szimulált utak egy-egy mért adat útvonala esetében. A 5.14 ábrán a tizedik számú résztvevő mozgása látható az előzőleg bemutatott módszerekhez viszonyítva, kivéve a teljes energia módszert. A tizedik résztvevő madárka típusú mozgást végez, és láthatjuk, hogy az abszolút sebesség, a négyzetes sebesség és a virtuális rugó módszerek megfelelnek a mozgás jellemzőinek, a különbségek csupán az utak eltolódásából, valamint a résztvevő hibájából adódnak. Ezzel szemben a pozíció alapú mozgások, valamint a kinetikus energia

nem passzolnak, mivel csak a hagyományos metrikák szerint tűnnek jóknak, mivel közel vannak a pályáik tömegközéppontjai. Valójában csupán két hasonló méretű útvonal van egymásra fektetve, amit a telemetrikus adatok is megerősítenek.



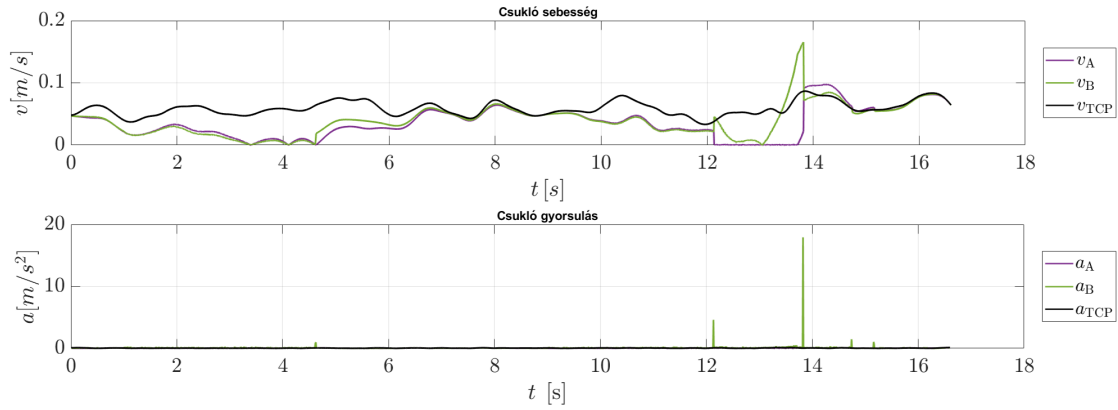
5.10. ábra. A tizedik számú résztvevő mért adatainak összehasonlítása a mozgásuk alapján szimulált adatokkal

A 5.11 ábra a mért mozgás telemetria adatát mutatja. A mért pozícióadatokat egy 100 egység szélességű Gauss-szűrőn lettek áteresztve, mivel a mozgásrögzítő szoftverből származó kis bizonytalansági hibák hatalmas gyorsuláscsúcsokat eredményeztek volna. Ennek ellenére még mindig láthatók kisebb gyorsuláscsúcsok.



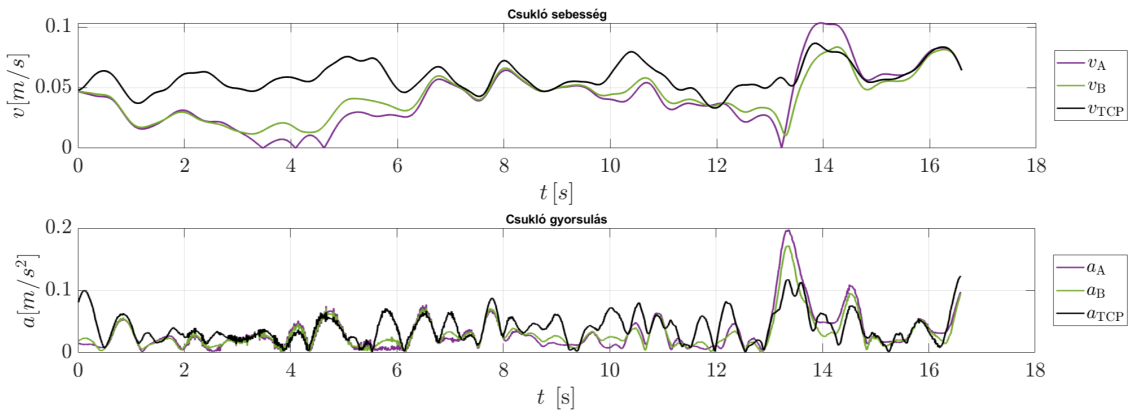
5.11. ábra. Telemetrikus adatok a mért mozgásból

Az 5.12 ábrán láthatjuk az abszolút távolság módszeréből származó gyorsulási és sebességi grafikonokat. Érdemes megjegyezni, hogy ezek egyáltalán nem hasonlítanak az eredetire, sőt, a gyorsulásuk akár 200-szor nagyobb, mint az eredeti.



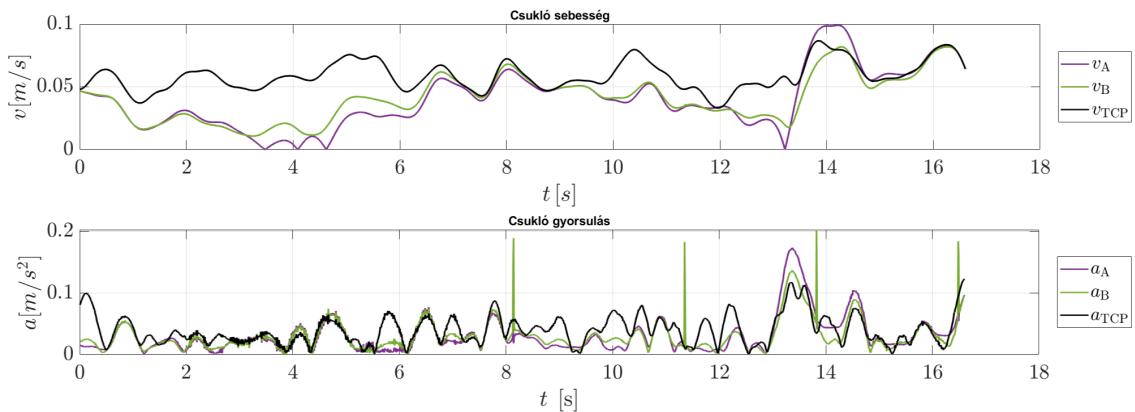
5.12. ábra. Telemetrikus adatok az abszolút távolság szimulációból

Másrészt a sebesség alapú szimuláció a 5.13 ábrán szinte tökéletesen egyezik a mért adatokkal. A gyorsulási adatokban nincsenek jelentős ugrások, és csak egy csúcson nagyobb, ami valószínűleg annak eredménye, hogy nem követte el azt a síkból kilépési hibát, amit a résztvevő.



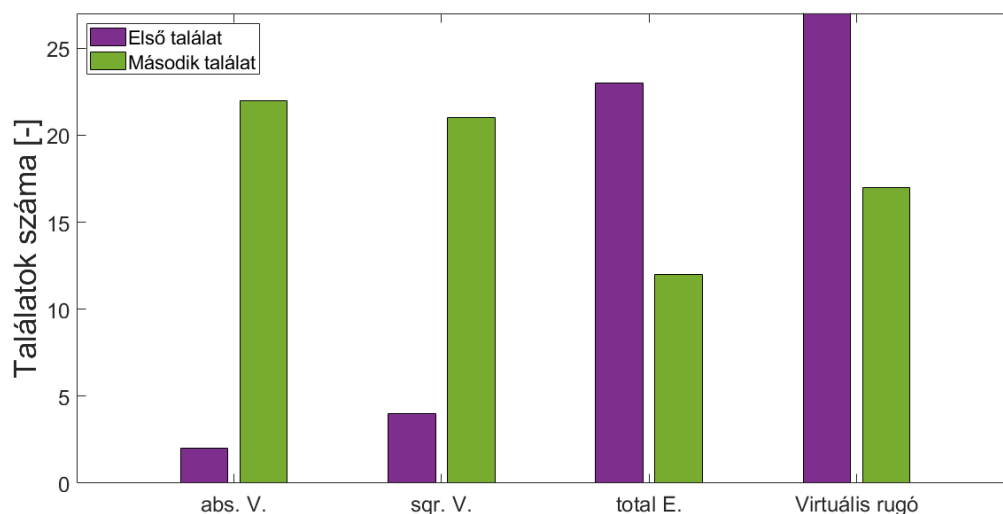
5.13. ábra. Telemetrikus adatok az abszolút sebesség szimulációból

Végül nézzük meg a virtuális rugó módszert, amely elég hasonló eredményeket ad a sebesség alapú módszerhez, kivéve azt a tényt, hogy van néhány közepes méretű gyorsulási csúcs. Ezek a csúcsok úgy tűnnek, hogy elfogadható tartományban vannak, mivel a résztvevőnk által kifejtett maximális mozgás meghaladja az értéküket.



5.14. ábra. Telemetrikus adatok a virtuális sebesség módszerből

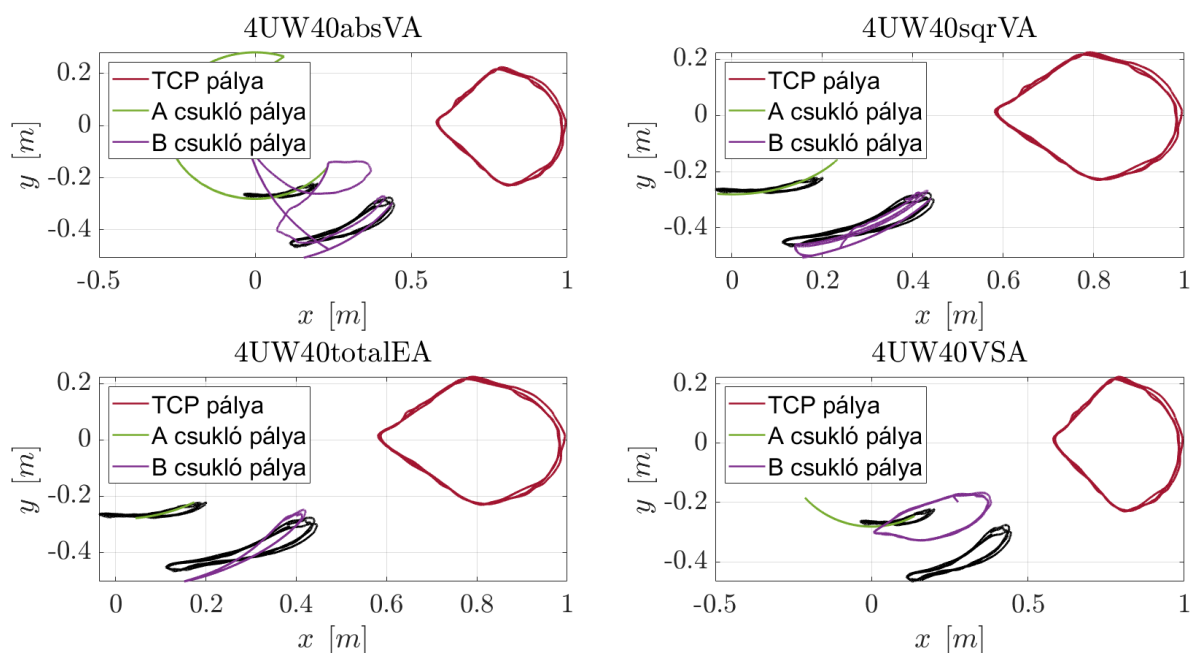
Innen kezdve biztonságosan kizárhatjuk a pozícióalapú módszereket, és koncentrálhatunk a sebesség, a teljes energia és a virtuális rugó alapú módszerekre. Ezt figyelembe véve az alábbi oszlopdiagram ábrázolja a maradék négy módszer közötti illeszkedések eloszlását.



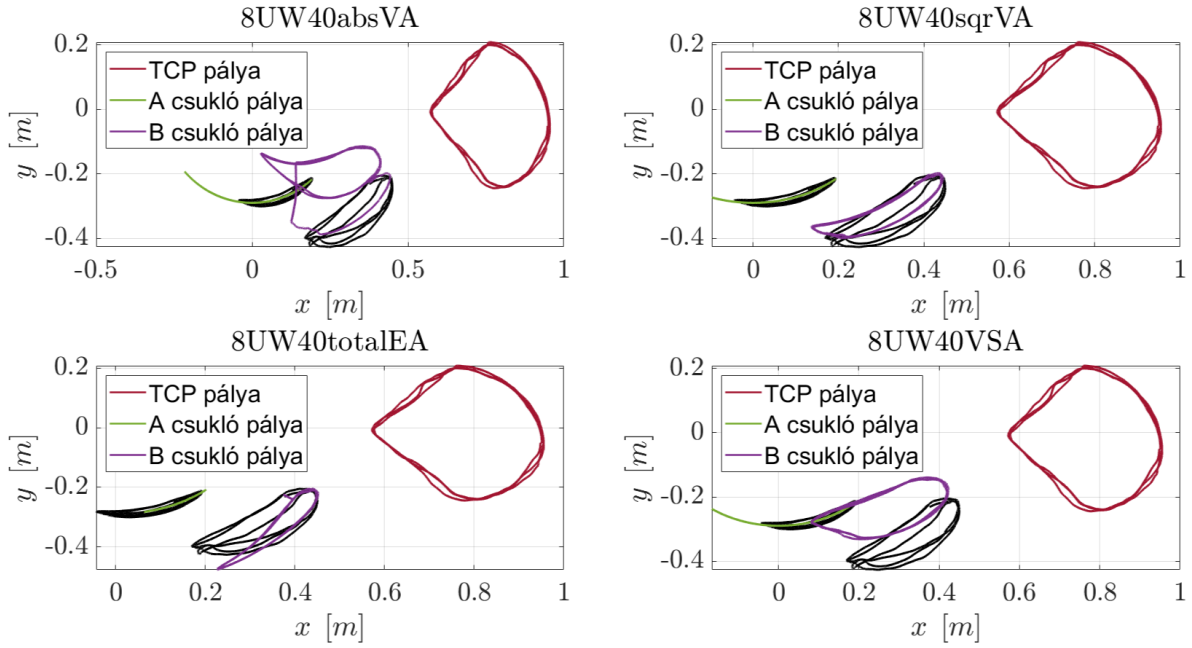
5.15. ábra. Redukált oszlopdiagram

5.7. A többi módszerek alkalmazásának vizsgálata

Ahogy az 5.15 ábrán látható, körülbelül a módszerek fele a virtuális rugó módszerhez illeszkedik, míg a másik fele a teljes energia módszerhez. Ebből viszonylag világosan látható, hogy ez összefüggésben áll a banán és a madárka jellegű mozgások közötti megoszlással. Az előző szakaszban láttuk a madárka mozgás telemetrikus adatainak és a virtuális rugó módszerének kapcsolatát, itt pedig két banánformájú mozgást láthatunk az 5.16 és 5.19 ábrákon.

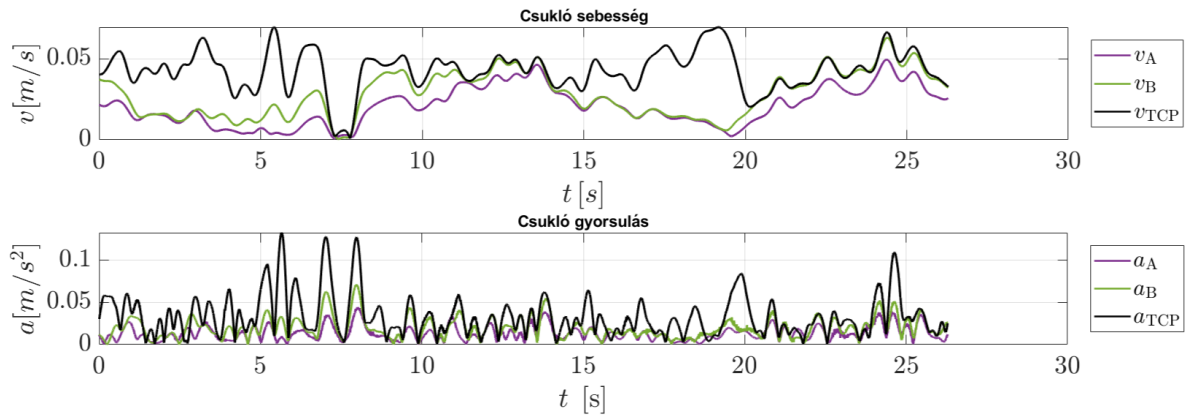


5.16. ábra. Négyes számú résztvevő mozgása összehasonlítva a kiemelt módszerekkel



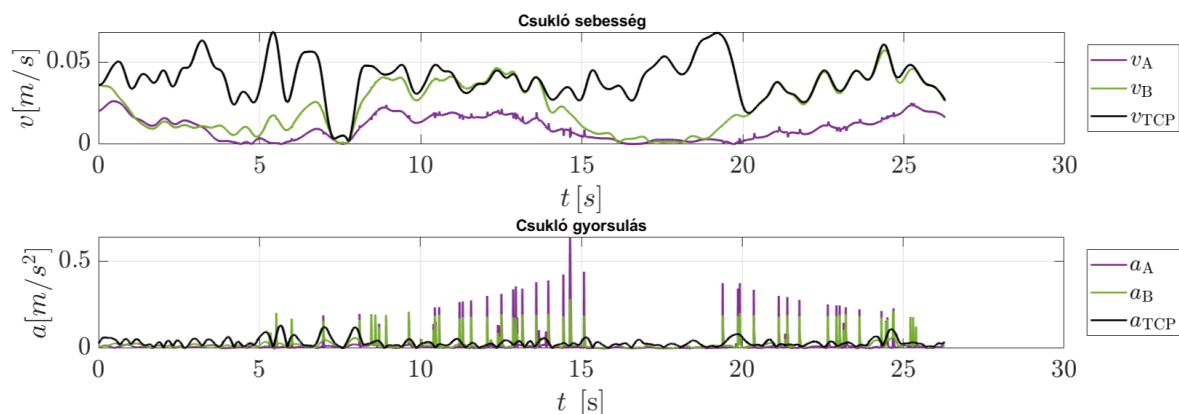
5.17. ábra. Nyolcas számú résztvevő mozgása összehasonlítva a kiemelt módszerekkel

Az alábbi ábra a nyolcas számú résztvevő lassú tömegmentes eredeti mozgásához tartozó telemetrikus adatokat mutatja.



5.18. ábra. A mért mozgás adatai

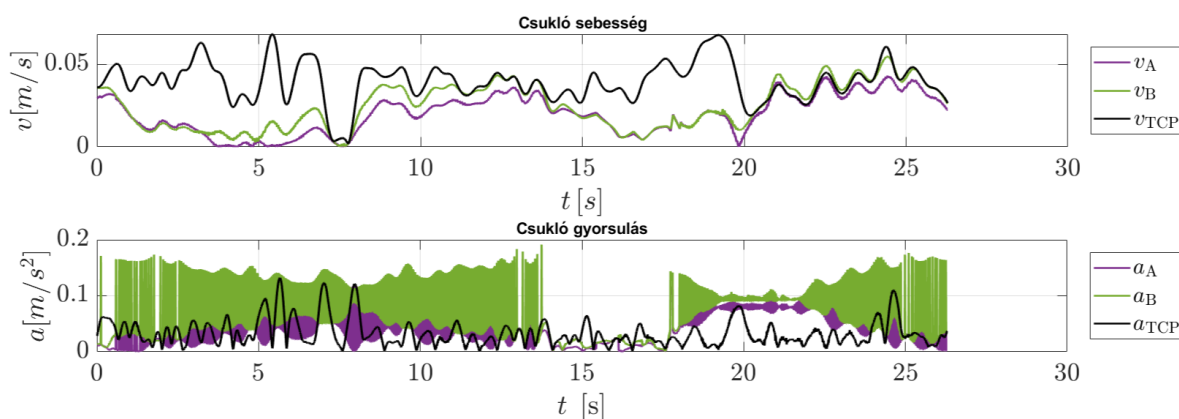
Az alábbi ábra a teljes energia szimulációval kapott adatokat mutatja. A sebesség tekintetében elég hasonló a mért adatokhoz, azonban még a sebesség grafikonok is meglehetősen ingadozóak, ráadásul az gyorsuláscsúcsok több mint ötszöröse az eredeti mozgás gyorsulásának. Ez a módszer lényegesen rosszabb közelítést ad, mint a virtuális rugó módszer.



5.19. ábra. A teljes energia módszer telemetrikus adatai

5.7.1. Sebesség alapú módszerek

A sebesség alapú módszerek a legjobb illeszkedések kis részét alkotják az adatállományban, és eredetileg eléggé elhanyagolhatónak tűntek, tehát miért nem zártuk ki őket? A sebesség alapú módszerek a legtöbb esetben nem működnek, mivel egy egysuklós mechanizmusra konvergálnak, és így irreális mozgást végeznek. Azonban a megfelelő paraméterekkel néha egy periodikus pályára konvergálnak, ilyen esetben azok a legjobb illeszkedések, illetve általában nagyon kevés gyorsulás eltérésük van, sőt sebesség alapú módszerek az egyetlen olyan módszer típus amely mind a madárka mind a banán pályát le tudja generálni ahogy az alábbi ábra is mutatja.



5.20. ábra. A sebesség módszer szimulált adatai

Az 5.20 ábrán elég sok gyorsulási csúcsot látunk, amelyek túl sok adatpont és más paraméterek hatására keletkeznek, és amelyek miatt a szimuláció eredménye rezonálni kezd. Ez a hiba nem kizárólag a sebesség alapú módszerekre jellemző.

6. fejezet

Konkluzió

A redundáns antropomorf manipulátorok mozgástervezése jelentős problémát jelent, mivel a kinematikai kényszerek nem határoznak meg önmagukban egyértelmű megoldást, csupán egy megoldás halmazra. Ebben a dolgozatra arra keressük a választ, hogy mi alapján történik az emberi mozgástervezés, annak reményében, hogy a redundáns emberi kéz mozgása mögötti elv alapján megoldás található manipulátor mozgásszintézis problémákhoz.

Ebben a dolgozatban betekintést nyerhettünk az emberi kéz mozgástervezésének alapjaiba, az alap modellalkotásba, megoldáshalmaz szerkesztésébe, geometriailag is, mint analitikusan, valamint az emberi kéz mozgásfelvételéhez való méréstervezésbe. Továbbá kutatjuk az emberi kar planáris mozgását a szagitális síkon, és hét különböző módszert javasunk az inverz kinematikai probléma megoldására. Vizsgálunk pozíció, sebesség és energián alapuló módszereket.

Az emberi kar mozgásának tanulmányozásához szerkesztett kísérletünk eredményeként többek közt azt fedezhettük fel, hogy a választott pályán a résztvevők csuklója két külön elkülöníthető karakterisztikus egyikét vette fel. A két pályát madárka és banán pályának nevezzük, a mozgás során rajzolt útvonaluk után.

A vizsgált módszerekből négy tűnik figyelemreméltónak az emberi mozgás hasonlósága szempontjából: abszolút sebességkülönbségen, négyzetes sebességkülönbségen, teljes energiaösszegezen valamint a virtuális rugókon alapuló módszerek. Ezekből az utóbbi kettő alkalmazásához tudnunk kell, hogy milyen karakterisztikájú pályát szeretnénk reprodukálni, madárkát vagy banánt. Madárka esetében a virtuális rugó módszer nyújt jobb megoldást a kettő közül, ez esetben egy fokkal jobb, mivel a gyorsuláscsúcsok kevésbé jellegzetesek ennél a módszerénél, illetve a rugóparaméterek illetve referenciaszög változtatásával finomhangolhatjuk konkrét felhasználásra. Banán pálya esetén a teljes energián alapuló módszer nyújtja a biztos megoldást, sajnos a rugómódszerhez képest ez jobban eltér a kívánt alaktól illetve a gyorsulásiugrásai is nagyobbak. A sebességmódszerek a legtöbb esetben nem adnak megfelelő megoldást, viszont ha igen, akkor minkét esetben alkalmazhatóak és a telemetrikus karakterisztikájuk messze jobb, mint az előző kettő módszeré.

Jövőbeli kutatások alanyának javasolnám a sebesség alapú módszerek konvergenciájának javítását. Egy lehetséges ötlet erre pszeudo inverzen alapuló sebesség szintű módszerek alkalmazása az itt tárgyalt eredmények elérésére. További vizsgálatot érdemel a virtuális rugó módszer paraméterfüggősége, valamint ezen paraméterek vizsgálata három dimenziós modellel és méréssel.

Irodalomjegyzék

- [1] Miomir Vukobratović, Manja Kirčanski (1985) "Kinematics and Trajectory Synthesis of Manipulator Robots", Springer-Verlag .
- [2] dr. Sályi Béla, dr. Michelberger Pál, dr. Sályi István (1991) Kinematika és kinetika, Tankönyvkiadó, Budapest, ISBN 963 18 3041 1
- [3] Norton, Robert L., (2004) Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines -3rd ed., McGraw-Hill series in mechanical engineering, ISBN 007-247046-1
- [4] Nakamura, Yoshihiko (1991) "Advanced robotics redundancy and optimization", Addison-Wesley.
- [5] Robotics Society of Japan, ROBOGAKU , <<https://robogaku.jp/en/history/manipulation/M-1974-1.html>> , accessed 2024 November 06
- [6] TORRES-DEL CARMEN et al. (2020) "Comparison of numerical methods in code as solvers for simulation of robotic systems", Journal Applied Computing
- [7] EPSON, <<https://epson.com/scara-robots-product-family>>, accessed 2024 November 06
- [8] Hausdorff distance, < https://en.wikipedia.org/wiki/Hausdorff_distance > , accessed 2024 November 07
- [9] Ning Guo et al., 2017 , "An Efficient Query Algorithm for Trajectory Similarity Based on Fréchet Distance Threshold", ISPRS International Journal of Geo-Information
- [10] Stanley Plagenhoef, F. Gaynor Evans & Thomas Abdelnour, 1982, "Anatomical Data for Analyzing Human Motion"
- [11] PepoleSize Software , 1998, Open Ergonomics Ltd. Loughborough Technology Centre