

IV. Vajdasági Magyar Tudományos Diákköri Konferencia

HUMANOID ROBOTOK SZIMULÁCIÓJA ÉS VEZÉRLÉSE

Témavezető:

Dr Nagy László

Szerző:

Pálinkó Oszkár, dipl. ing.

Újvidék, 2005. októbere

TARTALOM

1. BEVEZETŐ	3
2. A SZAKTERÜLET RÖVID ÁTTEKINTÉSE	3
3. A HUMANOID ROBOTIKA ELMÉLETI ALAPJAI	5
3.1 A ROBOT KINEMATIKAI MODELLEZÉSE	5
3.2 A ROBOTOK DINAMIKÁJÁNAK ALAPEGYENLETE	6
3.3 A ZMP FOGLAMA	6
3.4 A DIREKT ÉS AZ INVERZ KINEMATIKAI FELADAT.....	7
4. A ROBOT MOZGÁSÁNAK SZIMULÁCIÓJA	9
4.1 A NOMINÁLIS MOZGÁSPÁLYA	10
4.2 A MOZGÁSPÁLYA POLINOMIZÁLÁSA	11
5. A ROBOT IRÁNYÍTÁSA	12
6. KÖVETKEZTETÉS	14
7. IRODALOM	15

1. Bevezető

A humanoid robotika a technológia egyik legelőrehaladottabb és legérdekesebb területe. Az antropomorf robotika sok különböző mérnöki szakból merített tudás összege: a mechanika, az automatika, az elektronika, a számítástechnika és a hírközlés mind hozzájárulnak a robotok fejlődéséhez.

Amit a közelmúltban csak filmvásznon láthattunk, az manapság valósággá vált. A mai antropomorf robotok lépkednek, lépcsőt másznak, lefekszenek, felkelnek, négylábon haladnak, ugrálnak, dobnak, stb. A közeljövőben valósággá válhat a humanoid robotok megjelenése a mindennapi környezetben is. Ezek még semmiképpen sem lesznek az emberek hú másai. Egyelőre az a cél, hogy zavartalanul közlekedhessenek az emberekre szabott környezetben.

A mi hazánkban is történik kutatás ezen a területen Miomir Vukobratović vezetése alatt. Vukobratović professzor a humanoid robotika elméleti alapjainak egyik legjelentősebb letételezője. A hazai project még főleg szimuláció szintjén létezik, de várhatóan nemsokára kísérletileg is továbbfejlődik. Ebben a dolgozatban e szimulációs eredmények egy része lesz bemutatva.

Konkrétan a dolgozatban a nominális mozgáspályák feldolgozásáról, valamint a robot irányításának szimulációjáról lesz szó.

2. A szakterület rövid áttekintése

A humanoid robotika a 20. évszázad utolsó évtizedeitől különösen nagy fejlődésnek indult. Több komoly robot-mechanizmust valósítottak meg, melyek egyre sikeresebben utánozzák az ember motorikus viselkedését, különös figyelemmel a kétlábú járásra. Ezek a rendszerek között legjelentősebbek a japán komerciális, valamint a nyugati egyetemi robotok. A japán mechanizmusokról nem lehet túl sokat tudni, mivel fejlesztésük nagyrészt üzleti titok.

Egyelőre csak néhány robotról mondható el, hogy jelentős mértékben hasonlítanak járásukban az emberre. Az antropomorfizmus (emberhasonlóság) szoros kapcsolatban áll a szabadságfokok számával. Általában minél több szabadságfokkal rendelkezik a robot, annál természetesebb lehet a mozgása.

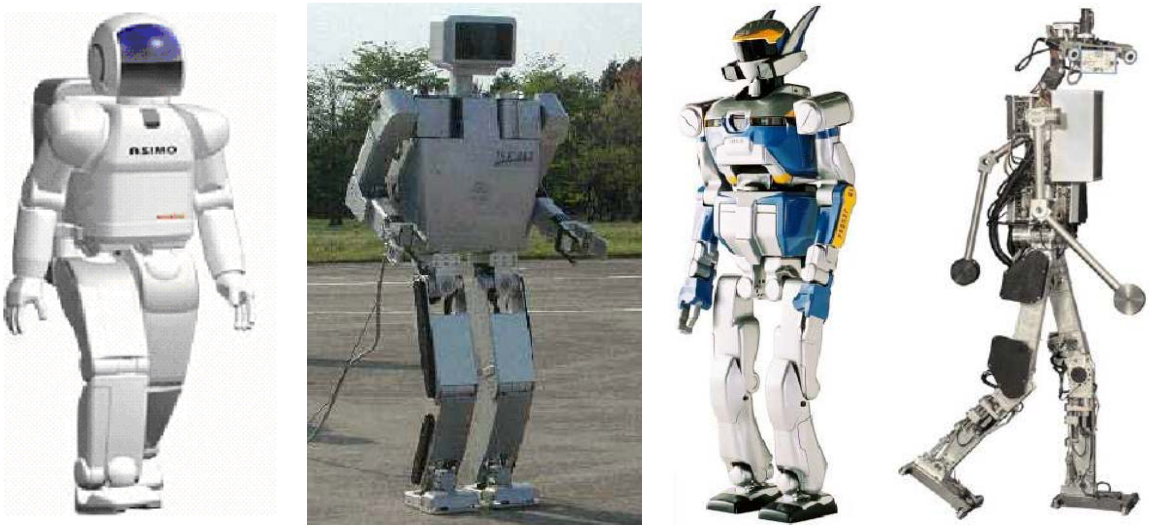
A japán Honda koncern **Asimo**-ja az egyik legismertebb kétlábbon járó robot. Szabadságfokainak száma 26. DC szervomotorok hajtják meg. Magassága 130cm, tömege 54kg. Felépítésileg jelentősen antropomorf kinézetű. Járása tipikusan japán koncepció. Ez azt jelenti, hogy a lábak a térdben állandóan hajlítottak, lépései rövidek, a lábak a felsőtesthez képest hátrafelé nem hajlanak. Megjénésének idejében a legfejlettebb humanoid volt. Tudni lehet róla, hogy vezérlésének megtervezésében a ZMP helyzetének megtartása játsza a kulcsszerepet [1].

A tokiói egyetem **H7** jelzésű robotja 147cm magas, tömege 58kg és 30 szabadságfokkal rendelkezik. Vezérlése egy 1.1GHz Pentium 3-as PC platformon alapszik. Rádiófrekvenciás ethernet kártyával kapcsolódik a hálózatra. Szervómotokkal meghajtott. Járása hasonló Asimoéhoz. Különlegessége, hogy a lábfeje két részre van osztva egy szabadságfokkal. Ilyen felépítéssel egyelőre egyedülálló. Ez elősegíti

járásának antropomorfizmusát, amely különösen jelentős lépcsők megmászásában. Irányításának két fő eleme a dinamikus ZMP vezérlés, valamint a pozíciós szervók. [2]

A Kawada cég és a japán állami AIST tudományos intézet együttműködésének eredménye az impozáns kinézetű **HRP-2** Promet. 30 szabadságfokú, 154cm magas és 58kg tömegű. Járása „japán” típusú. Azonban ez a robot jelentős előrelépést képez a többi humanoiddal szemben, mivel felsőteste két szegmensből áll. Ennek köszönhetően a HRP-2 volt az első robot, amely le tudott feküdni a talajra, és föl is tudott kelni. Emellett „négy lábon” is tud haladni. Tervezői különös figyelmet szenteltek a robot kinézésének. Külsőjét egy ismert japán robot rajzfilm rajzolója alkotta meg. [3]

A müncheni műszaki egyetem által készített **Johnnie** küllemileg sok kívánnivalót hagy maga után, azonban járása kimondottan minőséges. Johnnie kiemelkedően magas, 180cm. Súlya kb. 40 kilogramm. Csupán 17 szabadságfoka van. Vezérlése két szintű. A magasabb szinten történik a trajektóriák létrehozása és változtatása valamint a robot felsőtest függőlegességének ellenőrzése, míg a közvetlen motor irányítást bővített PD vezérlők képezik. [4]



2.1. ábra: Balról-jobbra: Asimo, H7, HRP2, Johnnie

3. A humanoid robotika elméleti alapjai

Ebben a fejezetben a humanoid robot leírásához szükséges elméleti alapok lesznek röviden ismertetve.

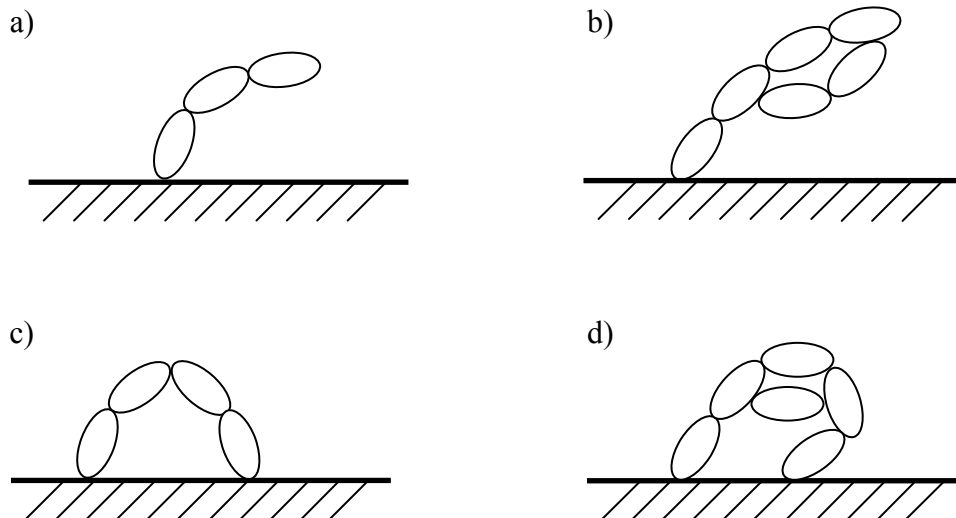
3.1 A robot kinematikai modellezése

A modellezés megértéséhez először a robot alap építőelemeit szükséges felsorolni.

A *szegmens*, mint a robot alapeleme, egy merev test [5]. Más lehetséges elnevezései: tag, kar [6]. Kinematikai és dinamikai paraméterekkel jellemezhető. A kinematikaiak közé tartoznak a szegmens hossza, geometriája, stb. Dinamikai paraméterek a szegmens tömege és tehetetlenségi nyomatéka.

A *kinematikai pár* két szegmensből és az őket összekötő csuklóból áll [5]. A csukló translációs vagy rotációs mozgást végezhet. A dolgozatban csak olyan csuklókról esik szó, amelyek egy szabadságfokot biztosítanak a robotnak, vagyis csak egy tengely mentén vagy körül végeznek mozgást, illetve elfordulást. A komplex mozgásokat több szegmens egymáshoz kapcsolásával kapjuk. Másrészt, a humanoid robotok modellezésében az összes csuklót rotációs csuklóként approximálhatjuk, mivel az emberi test is főleg ilyen szabadságfokokat tartalmaz.

A *kinematikai lánc* n számú egymáshoz kapcsolódó kinematikai párból áll. A kapcsolat jellegétől függően a lánc lehet egyszerű vagy összetett, másik felosztás szerint pedig nyílt vagy zárt. Az egyszerű lánc olyan szerkezet amelyben minden szegmens legtöbb két kinematikus párhoz tartozik, míg az összetett láncban legalább egy szegmens több mint két pár része. Nyílt láncnak nevezzük az olyan mechanizmust amelyben legalább egy szegmens csak egy párhoz tartozik, míg zártnak az olyat amelyben minden tag két pár része. [5]



3.1 ábra: a) nyílt egyszerű b) nyílt összetett c) zárt egyszerű d) zárt összetett lánc

Az ebben a dolgozatban leírt robot szerkezete több párhuzamos nyílt láncsal van modellezve. Az ilyen szerkezet biztosítja a legegyszerűbb számítási eljárásokat.

Az eddig leírtaknak megfelelően, a robot pontos meghatározásához ismerni kell a szegmensek és csuklók esszenciális tulajdonságait. Így tudni kell a szegmensek geometriáját (hosszát, a csuklók helyzetét, stb.), tömegét és tehetetlenségi nyomatékát valamint a csuklók orientációját.

3.2 A robotok dinamikájának alapegyenlete

Az alapegyenlet a robot mechanizmus forgatónyomatékainak kiegyenlítésével kapható, amely mátrix alakja a következő:

$$P = H(q, \theta)\ddot{q} + h(q, \dot{q}, \theta),$$

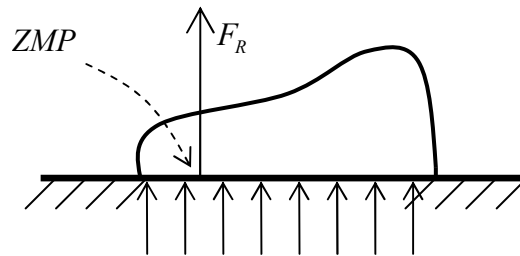
ahol $P = [P_1, \dots, P_n]$ a meghajtó momentumok mátrixa, H az inerciális nyomatékok mátrixa, míg h az összesített Coriolis, centrifugális és gravitációs erők mátrixa. Ha ismert a robot szerkezete (geometriai és dinamikai paraméterei) valamint minden szabadságfok szög pozíciója, sebessége és gyorsulása minden pillanatban (megadottak a mozgáspályák), akkor az adott egyenlet segítségével kiszámíthatók a meghajtó forgatónyomatékok. Ha ezeket a nyomatékokat a beavatkozó szervek biztosítják (pl. DC elektromotorok), akkor megvalósítható a robot kísérleti mozgása.

3.3 A ZMP foglalma

A ZMP az angol „zero moment point” kifejezés rövidítése. Magyarul null forgatónyomaték pontnak nevezhető. Ennek a meghatározása lesz megadva itt.

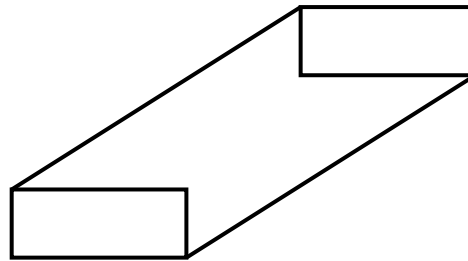
A két lábon történő járás több részre osztható. Először a robot össz súlya az egyik lábat terheli, pl. a jobbat. Ekkor a bal láb a levegőben mozog, azaz nincs kapcsolata a talajjal. Amikor ez a kapcsolat létrejön, kétlábú fázisról beszélünk. Ekkor mindkét láb a talajon van. Ezután a jobb láb emelkedik föl. Amikor újra talaj ér, a járás ismét kétlábú.

A kétlábú humanoid robot talpára, amikor az egy lábú mozgás fázisában van, kontinuuális terhelés hat, amely a robot súlyából, inerciális-, Coriolis- és centrifugális erőiből áll. Ez a terhelés egy eredő erő vektorral helyettesíthető, amely talaj reakciós erőnek nevezhető. Abban a pontban, amelyben ez a reakció áthatol a talaj síkján megkapjuk a ZMP pontot [7]. Ha ez a pont a támaszkodó talp alatt helyezkedik el, akkor a robot stabilan áll a talajon, azaz nem fordul fel. Abban az esetben ha a ZMP a talpon kívül van, a robotra olyan momentumok hatnak amelyek igyekeznek felborítani azt.



3.2. ábra: A ZMP és a talaj reakció eredő erője F_R

Azonban a ZMP pont a lépés folyamán igen kevés időt tölt a talpak alatt. A robot, mint az ember, úgy halad előre, hogy kimozdítja ZMP pontját a talpa alól maga elé. Ezáltal előre kezd bukni, majd a másik lábat alátéve, a bukást megállítja. Ilyen módon jelentős mértékben kihasználja a gravitációs vonzóerőt, hogy saját energia-befektetését minimalizálja. A két támaszlábú fázisban a robot akkor stabil, ha a ZMP a 3.2 ábrán látható konvex poligont nem hagyja el.



3.3. ábra: A talpak lenyomata (téglalapok) és a ZMP poligon

Pontosítani kell, hogy a null pontban az x és y tengelyek körüli momentumok egyenlőek nullával a robot dinamikája miatt, míg a z tengely körüli nyomaték azért semleges, mert feltételezzük, hogy a talaj és a talp között nincs elfordulás a surlódás miatt.

3.4 A direkt és az inverz kinematikai feladat

A feladatok megértéséhez két új fogalmat szükséges bevezetni. *Belső koordinátáknak* nevezzük azokat a skalár értékeket amelyek a szegmensek egymás közötti relatív helyzetét írják le [8]. A rotációs csuklóknál ezek a nagyságok az elfordulás szögei. *Külső koordinátáknak* nevezzük a mechanizmus utolsó szegmensének Descartes-i koordinátáit valamint e szegmens orientációját leíró három szöveget.

A robot-mechanizmusban minden szabadságfokot egy aktuátor hajt meg. A robotok helyzetét az beavatkozó szervek pozicionálása határozza meg. Ez a belső koordináták megadásának felel meg, azaz az aktuátorok a belső koordinátákat tudják megvalósítani. Általában a robotok feladatukat a végső szegmensek pozicionálásával végezhetik el. Például amikor egy fogó kar áthelyez egy adott tárgyat az egyik helyről egy másikra. A feladat elvégzéséhez a robotoknak a végső szegmens külső koordinátáit

kell megadni. Azonban, amint említve lett, a külső koordinátákat csak a belső koordináták megadásával lehet megvalósítani.

Direkt feladatnak nevezzük azt a szituációt, amikor a robot mozgása a belső koordináták egymás utáni megadásával valósul meg. Ebben az esetben a végső szegmens helyzete (külső) a belső koordináták megadásával érhető el. Ez egy leképezésként is értelmezhető:

$$s = f(q),$$

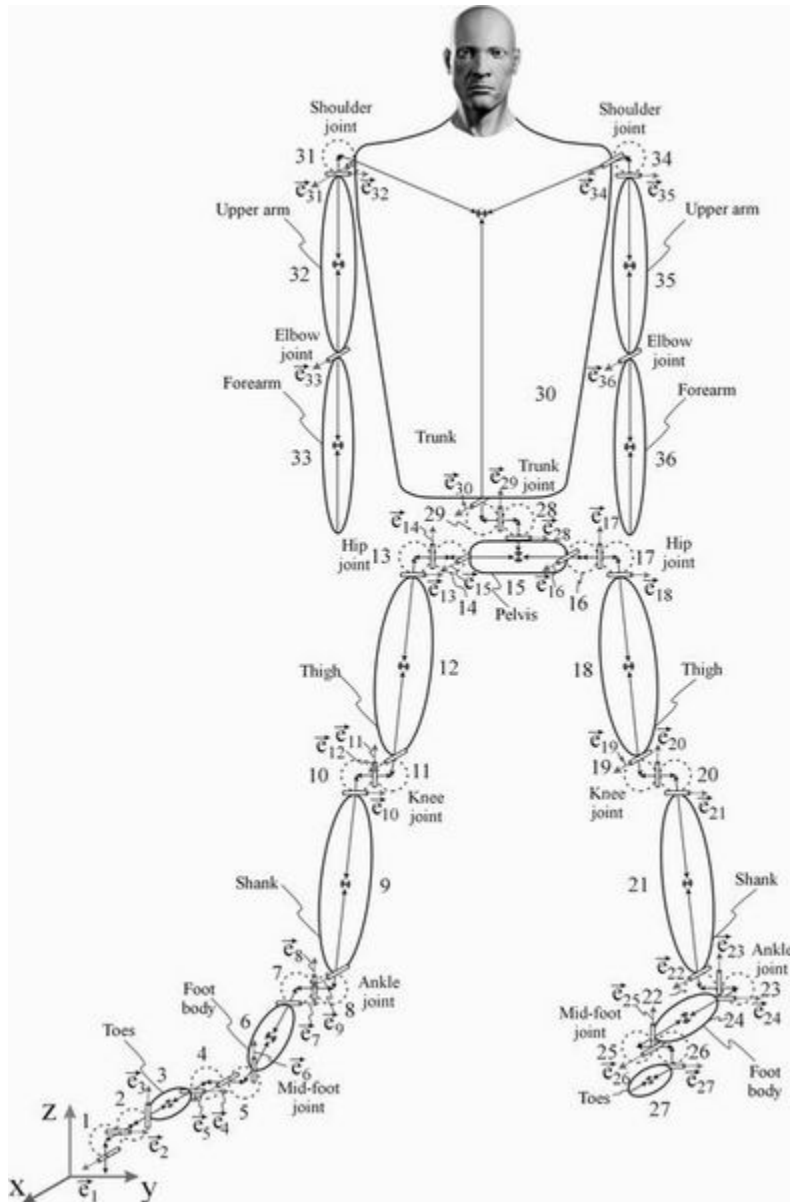
ahol s a külső- míg q a belső koordinátákat jelenti. Ez a leképezés minden esetben megvalósítható. A leképezés egyértelmű, mivel minden q -nak megfelel egy s . A feladat mindig megoldható analitikus módon. Azonban gyakran van szükség arra, hogy a robot helyzetét csak a végső szegmens Descartes-i pozícióival lehessen megadni. Ekkor vissza kell számítani a belső koordinátákat. Ezt nevezzük inverz feladatnak:

$$q = f^{-1}(s).$$

Az f^{-1} leképezés meghatározása a külső koordináták ismeretében sokkal összetettebb mint a direkt feladat megoldása. A több mint 6 szabadságfokkal rendelkező robotok esetében ez a leképezés nem egyértelmű, mivel egyes s kombinációknak több q koordináta felelhet meg. [8]

4. A robot mozgásának szimulációja

A szimulációs robot-mechanizmus a következő felépítésű:



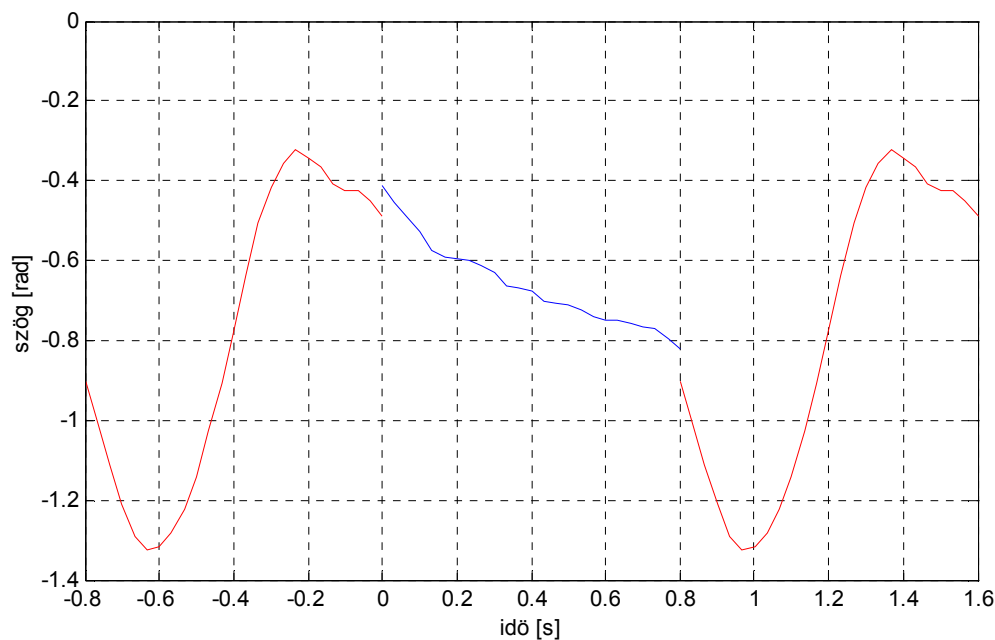
4.1. ábra: A robot-mechanizmus

Az ábrán látható, hogy a lábak csuklóiban három szabadságfok van, amelyek sokasága lehetővé teszi, hogy a robot mozgása minél jobban hasonlítson az emberéhez.

Ebben a fejezetben a mozgáspályák polinomizáció általi javításán lesz a hangsúly. Először azonban néhány alapfogalom kerül meghatározásra.

4.1 A nominális mozgáspálya

A nominális trajektória előírja minden csukló szabadságfokának a mozgását az időben. Az időtartam egy fél-lépésnek felel meg és 0.8 másodpercig tart.



4.2. ábra: A nominális mozgáspálya a 10. szabadságfokban

A fenti ábrán a fél-lépésen kívül be van mutatva az azt követő és megelőző szabadságfok trajektóriája is.

Az egész lépés az a járási folyamat, amely végén az emberi test ugyanabban a helyzetben található mint az kiindulás időpontjában. A kezdő és végső időpont lehet például az a pillanat, amikor a lépkedő entitás (ember vagy robot) felemeli a talajról a jobb lábát. A fél-lépés pedig e mozdulat fele. Specifikusan, a kezdő időpont lehet az, amikor a lépkedő felemeli a jobb lábát, míg a végső időpont a bal láb felemelése.

Észrevehető, hogy a jobb és a bal féllépés tengely-szimmetrikus. Ez azt jelenti, hogy pl. a bal fél-lépést megkaphatjuk, ha a jobb fél-lépésben bizonyos szabadságfokok nominális trajektóriáját invertáljuk, bizonyosakat pedig megtartunk. Ezek szerint a z és x tengelyek körüli mozgásokat invertálni kell, míg az y tengely körülieket meg kell hagyni eredeti alakjukban.

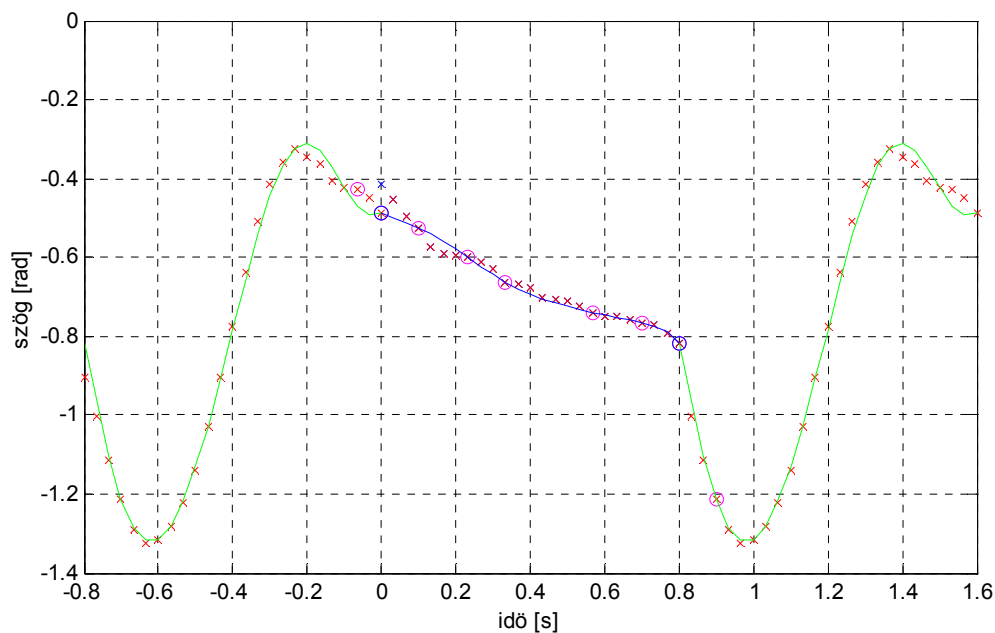
Ezt az ötletet követve, e dolgozatban meg lett valósítva a robot olyan folytonos járása, amely csak egy fél-lépés a fent leírt módú ismétléséből áll. Ebben az eljárásban azonban komoly problémák jelentkeznek abból adódóan, hogy az ember valójában soha sem ismétli meg ugyanazt a fél-lépést egymás után. Mindig vannak apró eltérések. Emiatt, a dolgozatban felhasznált, az emberről kísérleti uton felvett mozgás utólagos feldolgozásra kényszerül.

A fő probléma az ilyen eljárásnál az, hogy ugrás jelentkezik abban a két fél-lépés trajektóriában amelyeknek egymást kell követniük. Ez a helyzet látható a 4.2. ábrán a 0

és a 0.8 időpontban. Ilyen ugrásokkal a járás szimulációja nem kontinuális, ezért reális meghajtó szervekkel (pl. elektromotorokkal) nehezen vagy abszolút nem megvalósítható.

4.2 A mozgáspálya polinomizálása

A fent leírt probléma megoldása érdekében lett bevezetve a polinomizáció. Ez annyit jelent, hogy a diszkrét pillanatokban kísérleti úton rögzített emberi járás adatait bizonyos fokú polinómmal helyettesítjük. A polinómok legfőbb előnye az, hogy könnyen lehet őket módosítani (az együtthatóikon keresztül) azzal a céllal, hogy a fél-lépések polinómaikat egymáshoz illesztve kontinuális járást kapjunk. A polinómok másik előnye abban rejlik, hogy sokkal kevesebb adattal lehet leírni a mozgáspályákat: diszkrét időpillanatokban vett jelminták (több száz adat) helyett polinóm koefficienssekkel (tíznél kevesebb). Az új módszer harmadik előnye az, hogy a polinómok kontinuális görbék, ennek köszönhetően az első és második deriváltjuk (szög sebesség és gyorsulás) is ilyen lesz, a mintavételezett jelekkel szemben, ahol ha két egymást követő jel között nagy az ugrás, akkor az első deriválnak kiugróan magas értéke lesz az adott pillanatban. Az ilyen szélsőértékeket, azaz a megfelelő nagy gyorsulásokat, a végrehajtó szervek nehezen tudják megvalósítani.

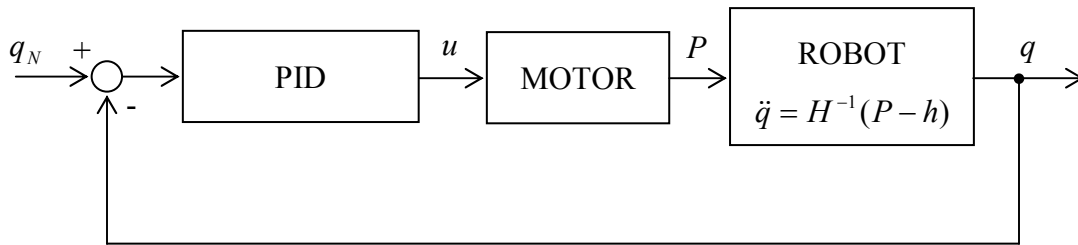


4.3. ábra: Polinomizált mozgáspálya a 10. szabadságfokban

A fenti ábrán 'x' jelzésekkel az eredeti, 4.1 ábrán látható, mintavételezett adatok vannak feltüntetve, míg teli vonallal a polinomiális értékei a 10. szabadságfok trajektóriájának. A polinóm nyolcad fokú. Ilyen módon sikerült megvalósítani a mozgáspályák folytonosságát, ami kontinuális robot-mozgást biztosít.

5. A robot irányítása

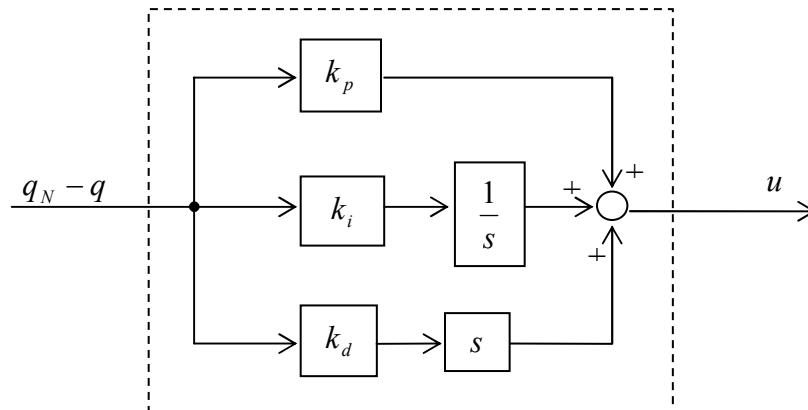
A robot irányításának alapfoka decentralizált PID rendszerekkel lett megoldva. Ez zárt irányítási kört értelmaz. A visszacsatolás pozíció szerinti.



5.1. ábra: Az irányítási kör

A kört a PID szabályzó, a motorok, a robot-mechanizmus, valamint a nominál q_N és a visszacsatolt pozíció q különbsége képezik. A robot szerkezete kimondottan nemlineáris, a motoré pedig egyszerű lineáris tagként írható le. [6] Emiatt értelme van a PID szabályzóval csupán a beavatkozó szervet irányítani, míg a többi hatást zajként kezelni.

A PID a proporcionális, integrális és differenciális hatás kombinációja. A következő ábrával magyarázható:



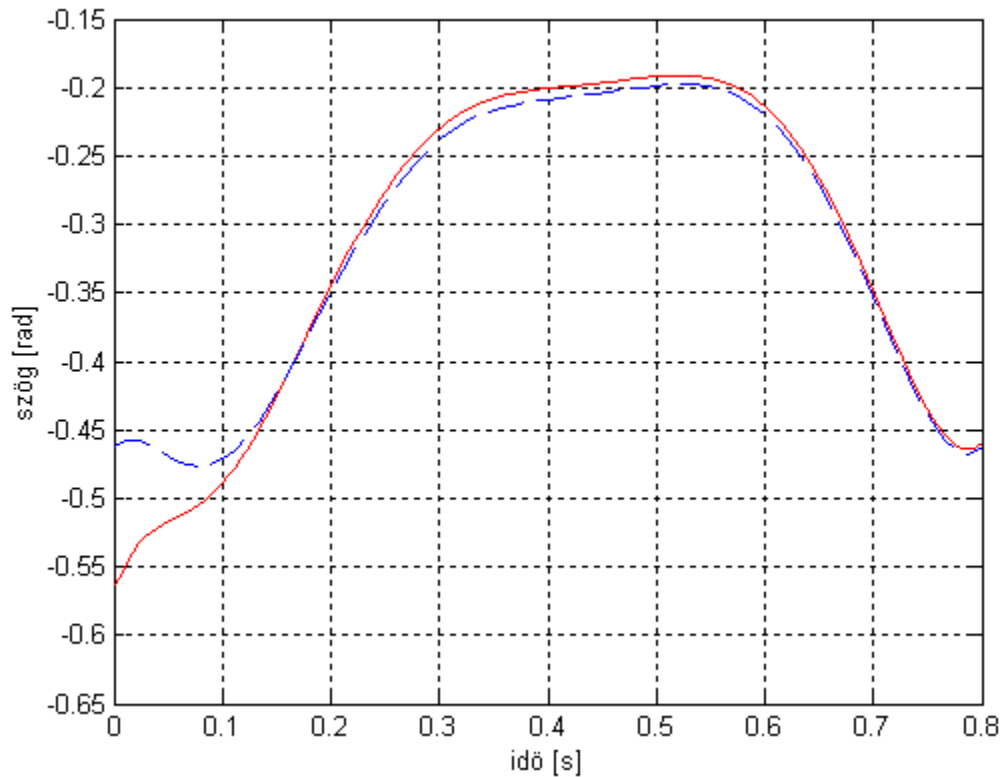
5.2 ábra: Az analóg PID felépítése

A digitális PID az analóg mintavételezett megfelelője:

$$u(k) = \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\},$$

ahol $u(k)$ - a PID kimenete a k -adik mintavételezett pillanatban, $e(k)$ - a hibajel, T - a mintavételezés ideje, K - az erősítés koeficiense, T_I - az integrális hatás együtthatója, T_D pedig a differenciális hatás együtthatója.

Az ilyen decentralizált irányítóval végrehajtott szimuláció eredményeit a következő ábra mutatja be.

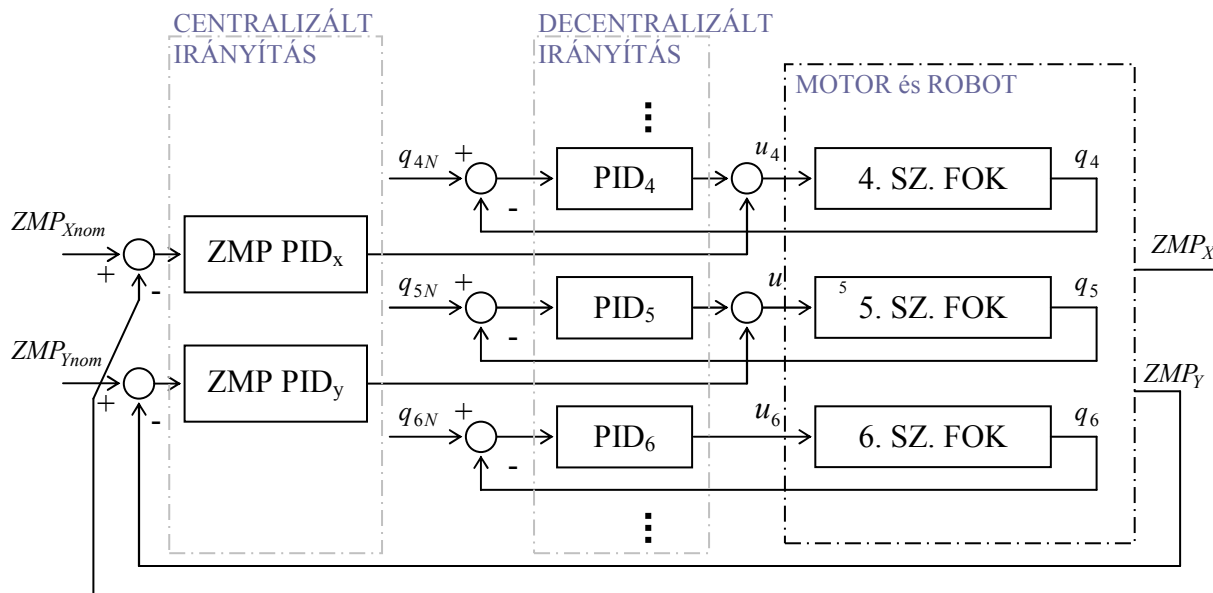


5.3. ábra: A 28. szabadságfok irányítása

A fenti ábrán kék szaggatott vonallal a 28. nominális mozgáspálya (a felsőtest előre-hátra mozgása) van bejelölve, míg piros vonallal a vezérelt rendszer trajektóriája. Az első pillanatban a rendszerben (mesterségesen előidézett) hiba jelentkezik a szög pozícióban: a robot 28. szabadságfokának szöge -0.1 radiánnal eltér az előírt értéktől. Ezután a PID hatásaként idővel a két trajektória különbsége egyre csökken. Az ábra jól szemlélteti az irányítás hibakiküszöbölő tulajdonságát.

A decentralizált PID szabályzók minden egyes szabadságfokot külön irányítanak. Minden alegység a saját részlegével foglalkozik. Azonban, ha bármely PID nem képes teljesíteni a feladatát, a robot felborulhat. Ilyen helyzetek kiküszöbölhetők, ha a decentralizált rendszer fölé bevezetünk egy magasabb, centrális, irányítási fokot. A felbukás megakadályozása érdekében a legtöbb értelme annak lehet, hogy a ZMP pontot a nominális helyen lehessen tartani. Ezt egy adalékos modifikált PID rendszerrel lehet például elérni. Az irányítást azokban a szabadságfokokban kell bevezetni, amelyeknek a legnagyobb a kihatásuk a ZMP-re. Ezek a támaszkodó láb boka-, térd- és medencecsont

csuklóit, valamint a felsőtest csuklóit. A zavaró jel természetétől függően a hatást a megfelelő szabadságfokokra lehet szétosztani.



5.4. ábra: A centralizált és decentralizált irányítás

Az 5.4-es ábrán látható, hogy a decentralizált szervek mindegyike a saját szabadságfokára hat, míg a centralizált irányítás az adott esetben a boka csuklójában fejt ki hatását. Könnyen lehet a rendszert továbbfejleszteni, azaz a központi hatást más csuklókra is tovább osztani.

A centralizált irányítás hasznosságát példázó helyzet az, amikor a ZMP bármi okból mondjuk jobbra szökik a támaszkodó láb alól (pl. zaj, akadályba ütközés, stb). Ekkor, a boka csuklójában az adalékos forgatónyomaték olyan irányban fog hatni, hogy minél kisebb mértékre csökkentse a nominális és reális ZMP különbségét.

6. Következtetés

A dolgozat röviden ismertette a humanoid robotika jelenlegi kiemelkedő kísérleti eredményeit.

A nominális mozgáspálya polinomizálása több szempontból is kimondottan hasznos eljárásnak bizonyult: csökkentette a felhasznált adatok számát, csökkentette a meghajtó szervekre háruló forgatónyomatékok nagyságát, és folytonossá tette a mozgás trajektóriáit.

A robotok irányításában bevált eljárásnak számít a többszintű tervezés. Eszerint, az alapszintet a decentralizált pozíciós servók képezik. Erre épül egy vagy több magasabb, komplexebb szint. A dolgozatban a ZMP irányítás egy módszere lett megadva mint e fázis egy lehetséges megoldása. Az ilyen vezérlés sokoldalú, könnyen fejleszthető. Egy ilyen irányú továbbfejlesztés lesz az adott projekt következő lépése is.

7. Irodalom

- [1] K. Hirai és tsai, *The Development of Honda Humanoid Robot*, Proceedings of the IEEE, ICRA, Leuven, 1998.
- [2] S. Kagami és tsai, *Design and Implementation of Software Research Platform for Humanoid Robotics*, Proceedings of the IEEE, ICRA, Seoul, 2001.
- [3] K. Kaneko és tsai, *Humanoid Robot HRP-2*, Proceedings of the IEEE, ICRA, 2004.
- [4] S. Lohmeier és tsai, *Computer System and Control of Biped Johnnie*, Proceedings of the IEEE, ICRA, 2004.
- [5] M. Vukobratović, *Uvod u robotiku*, Institut «Mihajlo Pupin», Beograd, 1986.
- [6] B. Lantos, *Robotok irányítása*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
- [7] B. Borovac, *Prilog matematičkom modeliranju dinamike i sintezi algoritama upravljanja prostornim aktivnim mehanizmima*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1985.
- [8] M. Vukobratović, *Upravljanje manipulacionim robotima*, Tehnička knjiga, Beograd, 1990.