



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Vass Gábor

TÁRGYMANIPULÁCIÓ TERVEZÉS ROBOTOK ÉS TÖBBUJJAS KEZEK ESETÉN

(Object Manipulation Planning for Dexterous Robot Systems)

PhD értekezés tézisei

Témavezetők:

Dr. Lantos Béla

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Irányítástechnika és Informatika Tanszék
Budapest

Dr. Shahram Payandeh

School of Engineering Science
Simon Fraser University
Burnaby, BC, Kanada

Budapest, 2005. Május

1. Bevezetés

Tárgymozgatás robotkézzel összetett feladat. Először az ujjak számára ütközés nélküli útvonalat kell biztosítani, majd meg kell határozni a kontaktuspontokban ébredő erőket. Végül az útvonalat a robot geometriáját és csuklóparamétereit figyelembe véve kell követni.

A tárgymanipuláció első szempontja a tárgy elhelyezése környezetében. A következő lépés a tárgy kezdeti megfogásának előállítása a manipulációs ágensekkel (kooperáló robotok és/vagy többujjas robotkéz). Stabil megfogás elérése után kezdetét veheti a tárgymanipulációs folyamat.

A manipulációs feladat (másnéven tárgy-rekonfigurációs probléma) a következőképpen adható meg: adott kezdeti megfogáshoz keressük az ágensek mozgástrajektóriáit, amelyek ahhoz szükségesek, hogy a tárgyat a kívánt helyzetbe mozgassuk. Általános esetben az ágensek számára ütközésmentes útvonalat kell előállítani a kontaktuspontok eléréséhez és a megfogáshoz (kezdeti megfogás konfiguráció), valamint a kontaktuspontokban erőt kell kifejteni. Először az erőket úgy kell meghatározni, hogy stabil megfogást eredményezzenek, majd a tárgyat a megkívánt módon mozdítsák el.

A tárgymanipuláció különböző mechanizmusait mutatja be [16] és [17], magába foglalva a kontaktus modellezés, kézműködés, erőkifejtés és sebességanalízis, merevség irányítás (stiffness) és érzékelés, megfogás és tolási operációk (pushing) témáját.

Egy többujjas robotkéz ujjai megfeleltethetők mozgás korlátozásokkal rendelkező manipulációs ágenseknek, így a kooperáló ágensekre kifejlesztett tárgymanipulációs algoritmusok alkalmazhatók többujjas robotkezekre is.

A közelmúltban több tárgymanipulációs algoritmust is kifejlesztettek (például [12]). A többujjas robotkezekkel vagy kooperáló ágensekkel végzett tárgymanipuláció területe felosztható az ágensek és a tárgy közötti relatív sebességek szerint. Példák az ágensek és a tárgy közötti relatív mozgásra: tolás, gördülés és csúszás. Ha a tárgy mozgása adott, akkor a robotkéz ujjhegyei és a tárgy közötti relatív mozgás meghatározza az egész rendszer mozgását.

A tárgymanipulációs feladatok fajtái a következő három kategóriába sorolhatók be:

- a *tárgymanipuláció* célja a tárgy kívánt helyzetbe mozgatása tekintet nélkül a kontaktus konfigurációra;

- a *megfogás beállítás* úgy éri el a kívánt kontaktus konfigurációt, hogy közben nincs tekintettel a tárgy konfigurációra;
- a *tárgymanipuláció megfogás beállításával (dextrous manipulation)* egyszerre hozza a kontaktus- és tárgy konfigurációt a megkívánt helyzetbe.

A Budapesi Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Irányítástechnikai és Informatikai Tanszéke (korábban Folyamatszabályozási Tanszék) 1995-ben elindított egy projektet egy új típusú többujjas megfogó kifejlesztésére és létrehozására. A robotkéz mechanikai felépítését, a kéz kinematikáját és dinamikáját Ludvig László dolgozta ki 1997-ben [13]. A TUB-PC kéz mechanikai interfésze meglehetősen univerzális, így a kéz PUMA és SCARA típusú robotokra is illeszthető. A kezdeti irányító programrendszert, beleértve a kalibrációs szoftvert, a pályatervező programot és a kéz PID szabályozóját az értekezés szerzője fejlesztette ki diplomamunkája keretében [18].

2. Kitűzött kutatási feladatok

A Ph.D. tézis tárgymanipulációs és trajektória tervező algoritmusokkal foglalkozik intelligens robot rendszerek esetére, mint például kooperáló ágensek és többujjas kezek. A tárgymanipuláció és a valós idejű trajektória tervezés témakörében három módszer lett kidolgozva.

Az értekezés célja egy tárgymanipuláció tervező keretrendszer kifejlesztése, amely figyelembe veszi a tárgy kezdeti és cél konfigurációja közötti akadályokat és korlátozásokat. Az értekezés megközelítésében az ujjhegyek megszüntethetők és egy tervezett új helyen újra felvehetik a kontaktust a tárggyal.

Az irányító rendszer által használt stratégiában a környezeti korlátozások (vagyis akadályok) felhasználhatók mint passzív kontaktus felületek, amelyek támogatják a tárgymanipulációt. A módszer alkalmazható kooperáló ágensek (pl. kooperáló robotok) tárgy-rekonfiguráció tervezésére. Az algoritmus a tárgy és az ujjhegyek között tisztán csúszó vagy tisztán gördülő mozgást, valamint ujjáthelyezést feltételez. A tervező ujjáthelyezés érdekében engedélyezi a kontaktus megszüntetését.

Az értekezésben a következő problémák vizsgálata szerepel:

- Kvázi-statikus, tárgy és robot közti relatív mozgás előállító módszer szimulált lehűtés algoritmus használatával.

- Ujjáthelyezés a tárgyon mozgás közben.
- A környezetben található objektumok felületének felhasználása a tárgy mozgásának segítésére.
- Egy közel optimális trajektória tervező algoritmus, amely számításba veszi minden egyes robotcsukló maximális sebességét, gyorsulását és gyorsulás deriváltját (jerk).

Az értekezésben tárgyalt modell-alapú mozgástervező algoritmus tárgy-rekonfigurációs feladatok megoldására alkalmas kooperáló ágensekkel. A mozgás folyamatát a relatív sebesség mátrix reprezentálja. Az ágensek tárgyhoz viszonyított relatív mozgása tisztán gördülés vagy tisztán csúszás lehet. A bemutatott módszer szimulált lehűtést használ a relatív sebességek előállítására. Az algoritmus alkalmazható többek között egy ismert alakú tárgy robotkézzel megadott pozícióba és orientációba mozgatására.

Az értekezés tárgyalja a tárgymanipulációs algoritmus két kiterjesztését. Az első egy kontaktus áthelyezési módszer, amely lehetővé teszi az ágensek számára a kontaktus megszüntetését és később egy új kontaktus létrehozását a megfogott tárgyon. A második módszer a manipuláció környezetében elhelyezkedő statikus akadályokat pszeudo-ágensként használja fel. A két kiterjesztés egyszerre is használható a tervezés rugalmasságának és robusztusságának növelésére.

A robot pályatervezés egymás után következő robotpozíciókat állít elő, amelyeket a mozgás közben a robot felvesz. Ezenkívül a pálya idő-paramétereit is generálni kell, ez a trajektória tervező feladata. A robot és tárgy megtervezett térbeli útvonalának követése közben a robot dinamikus jellemzőit is figyelembe kell venni. A robotcsuklók maximális sebessége, gyorsulása és gyorsulás deriváltja további korlátozásokat ad a mozgáshoz. A valós idejű trajektória-generátor úgy állít elő közel idő-optimális mozgást, hogy betartja ezen korlátozásokat.

A kívánt robot- és tárgypozíció sorozatok kiszámítása után a mozgás realizációjához szükséges az időparaméter útvonal mentén való elosztása. A mozgás folyamán a robot szabályozója ezeket a pozíciókat kapja meg. A szabályozó képes kell legyen a névleges útvonal követésére, ha az a korlátozások figyelembevételével készült.

Az értekezés egy olyan trajektória tervező algoritmust tárgyal, amely számításba veszi a gyorsulás deriváltjának (jerk) maximumára vonatkozó korlátozást. A cél a Spline-alapú redukált állapotterű idő-minimalizáló robot trajektória tervező módszer (Minimum-time Spline-based Reduced State space - MSRS) kiterjesztése. A bemutatott algoritmus az MSRS megközelítés által előállított mozgás trajektóriákat módosítja, a robot mozgásához szükséges idő csökkentése céljából. A térbeli trajektóriák megváltoztatása, vagy új részek hozzáadása mozgás közben, valós időben lehetséges. Az algoritmus gyorsasága miatt valós idejű alkalmazásokban is használható.

3. A kutatás módszerei és eszközei

Az értekezésben bemutatott tárgymanipulációs algoritmusok tesztelése szimulációval történt, MATLAB és C++ forráskódokkal implementálva. A grafikus szimuláció OpenGL alkalmazásával lett megvalósítva. A szimulációs környezet a PUMA 560 típusú manipulátor és a TUB-PC kéz modelljét használja.

Két érintkező tárgy relatív mozgását a Montana egyenletek [14] írják le. A kontaktuserők kiszámítását a MATLAB Optimization Toolbox-ban található lineáris programozás segédeszköz (LP) segítette.

A trajektória tervező algoritmus szimulációval és fizikai rendszeren is tesztelve lett. A tesztelésre használt derékszögű koordinátás manipulátor az ausztriai Wittmann robotgyártó cég terméke volt. A magasszintű irányítórendszer RTOS-32 operációs rendszer alatt, ipari PC-n futott.

4. Az új tudományos eredmények összefoglalása

1. téziscsoport

Kifejlesztettem egy új tárgymanipulációs algoritmust kooperáló ágensek számára, amely szimulált lehűtés és A^ kereső algoritmus alkalmazásával mesterséges intelligencia módszereken alapul.*

A téziscsoport-hoz tartozó publikációk: [1], [2], [3], [4], [8], [9], [11]

1.1. Bevezettem a V kvantált relatív sebesség mátrixot, amely a manipulációs ágensek mozgássorozatát reprezentálja a manipuláció tervező lokális szintjén.

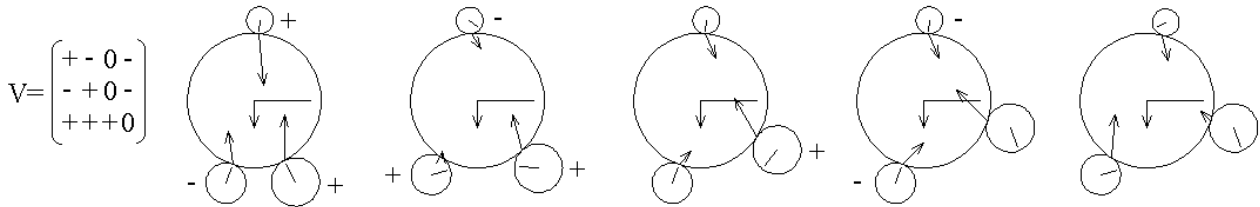
A felső szint, a globális tervező a tárgy mozgását állítja elő A* keresési algoritmus és heurisztikák segítségével. Az alsó szint, a lokális tervező koordinálja az ágensek relatív mozgását a tárgyhoz képest, valamint a kontaktuserők meghatározását. A relatív mozgást a tárgy felületén lévő kontaktuspontok mozgása, valamint a V mátrix írja le.

A manipulációs ágensek teljes mozgásfolyamatát a tárgyhoz képest $n * k$ paraméter határozza meg, ahol k az ágensek, n a mozgásfázisok számát jelöli. Így a teljes mozgásfolyamatot egy $n * k$ méretű mátrix írja le, melynek elemei a relatív sebességek: $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times k}$. Jelölje a v_{ij} változó az i -edik ágens relatív sebességét a j -edik időintervallumban. A keresési tér csökkentése érdekében a relatív sebességek tartománya kvantált:

$$v_{ij} \in \{0, v_{x_{max}}, -v_{x_{max}}, v_{y_{max}}, -v_{y_{max}}, \omega_{x_{max}}, -\omega_{x_{max}}, \omega_{y_{max}}, -\omega_{y_{max}}\}. \quad (1)$$

ahol $v_{x_{max}}, \omega_{y_{max}}$ jelöli az x irányú relatív lineáris sebességet és az y irányú relatív szögsebességet.

Az 1. ábra a tárgy és az ágensek relatív sebességekkel paraméterezett mozgását mutatja be. Az orientációt sugárirányú egyenesek, az erőket nyilak jelölik.



1. ábra. A tárgy és az ágensek relatív elmozdulása, gördülő mozgás az óramutató járásával megegyezően (+) és azzal ellentétesen (-)

1.2. A megfelelő mozgásfolyamat előállítására kifejlesztettem egy szimulált le-
hűtésen alapuló lokális tervezőt, amely kielégíti a mozgás-kényszereket és kvázi-optimális megoldást biztosít. A kontaktuspontokban kifejtendő erő meghatározása lineáris programozással (LP) történik, ahol a súrlódási kúpokat gúlkák közelítik.

Kifejlesztettem egy új tárgymanipulációs energiafüggvényt, amely a következő szempontokat veszi figyelembe:

- a) A tárgyra ható erők eredője nulla.
- b) Az ágensek közötti ütközések elkerülése.

c) A kontaktuserők abszolút értékeinek összege minden mozgásfázisban legyen kicsi.

d) Minél kevesebb relatív sebesség változás.

Az energiafüggvény (objektív függvény, költségfüggvény, performancia index) felírható a következő alakban:

$$E(\mathbf{V}) = K_c \sum_{j=1}^n c_j + K_e \sum_{j=1}^n e_j + K_f \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n |f_{ij}| + K_g \sum_{i=1}^k g_i \quad (2)$$

Az első összeg az ütközéseket szankcionálja (ütközések száma megszorozva egy K_c súlyozó konstanssal), a második azokat a mozgásfázisokat bünteti, ahol nincs erőegyensúly. A harmadik szumma a kontaktuserők abszolútértékének összege, a negyedik az ágensek relatív sebesség váltásainak száma. A függvényben szereplő változók és konstansok jelentése a következő:

- E az energiafüggvény, amit minimalizálunk.
- \mathbf{V} tartalmazza a relatív sebességeket.
- K_c, K_e, K_f, K_g pozitív súlyozó konstansok ütközésre, erőegyensúlyra, az erők mértékére valamint relatív sebesség váltásra.
- $c_j = 0$ ha nincs ütközés a j -edik mozgásfázisban, különben 1.
- $e_j = 0$ ha erőegyensúly van a j -edik mozgásfázisban, különben 1.
- f_{ij} az i -edik ágens által kifejtett erő nagysága a j -edik mozgásfázisban.
- g_i az i -edik ágens relatív sebesség váltásainak száma a mozgás során.

Jelölje T a szimulált lehűtés hőmérséklet-paraméterét, a kívánt végső hőmérséklet T_{end} . A lokális tervező pszeudo-kódja a 2. ábrán látható.

1.3. Megmutattam, hogy a tárgymanipulációs algoritmus alkalmazható kooperáló robot manipulátorokra mint mobilis ágensekre, valamint egy robotkar és többujjas kéz együttesére is. A módszert először három kooperáló, egyenként hat szabadságfokú (6-DOF) robotkarra alkalmaztam három dimenzióban (3D-ben). A robotkarok végberendezéseinek mozgása a tárgyhoz képest tisztán csúszo vagy tisztán gördülő mozgások sorozata. A 3. ábra a három kooperáló robot és a tárgy mozgását illusztrálja.

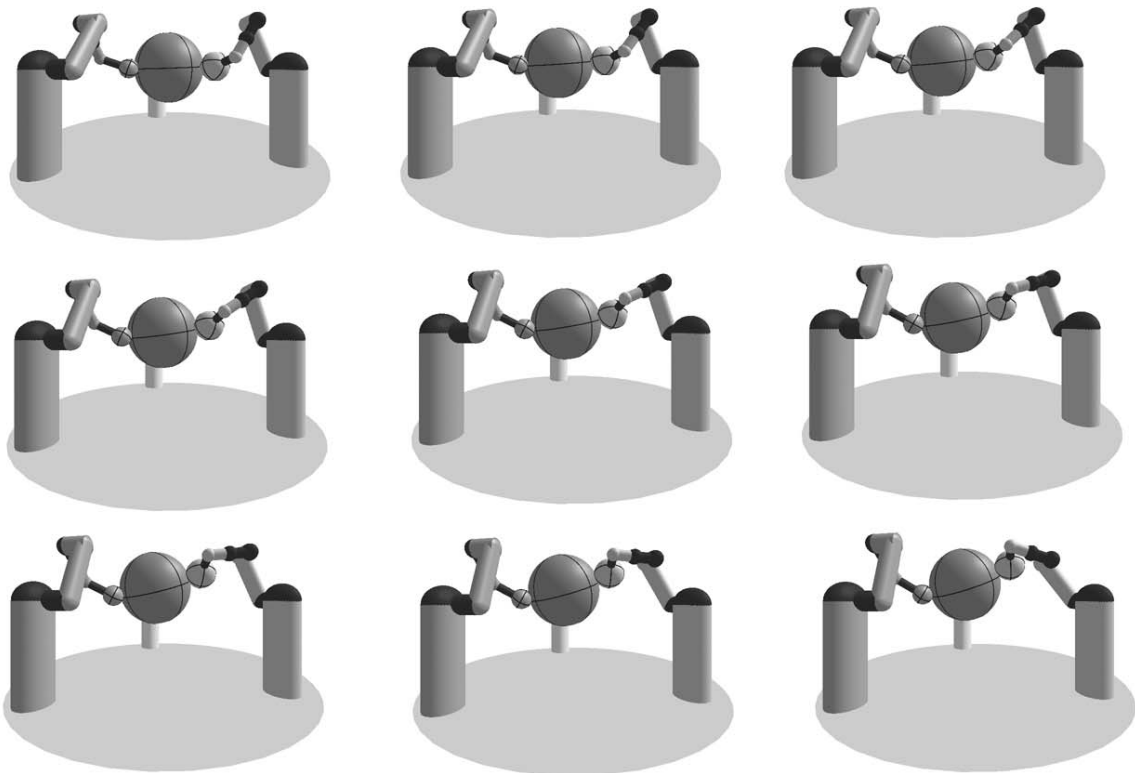
A módszer második alkalmazása a hat szabadságfokú PUMA 560 robot és a háromujjú, ujjanként három szabadságfokú TUB-PC kéz együtteséből álló tárgymanipulációs rendszer.

```

1  Get 2 subgoals (start,goal)
2  Generate random relative velocities(V)
3   $E_{old} = \text{Compute\_energy}(V)$ 
4  WHILE ( $T > T_{end}$ ) DO
5    Select ( $i, j$ ) randomly
6    Generate a random velocity ( $v_{rnd}$ )
7     $E_{new} = \text{Compute\_energy}(V, v_{ij} = v_{rnd})$ 
8     $\Delta E = E_{new} - E_{old}$ 
9    IF  $E_{new} < E_{old}$  THEN
10     LET  $v_{ij} = v_{rnd}, E_{old} = E_{new}$ 
11   ELSE IF  $e^{-\Delta E/T} > \text{Random}(1)$  THEN
12     LET  $v_{ij} := v_{rnd}$ 
13   END IF
14   Decrease(T)
15 END WHILE

```

2. ábra. A lokális tervező pszeudo-kódja



3. ábra. Három kooperáló robotkar mozgássorozata. Sorrend: első sor, balról jobbra.

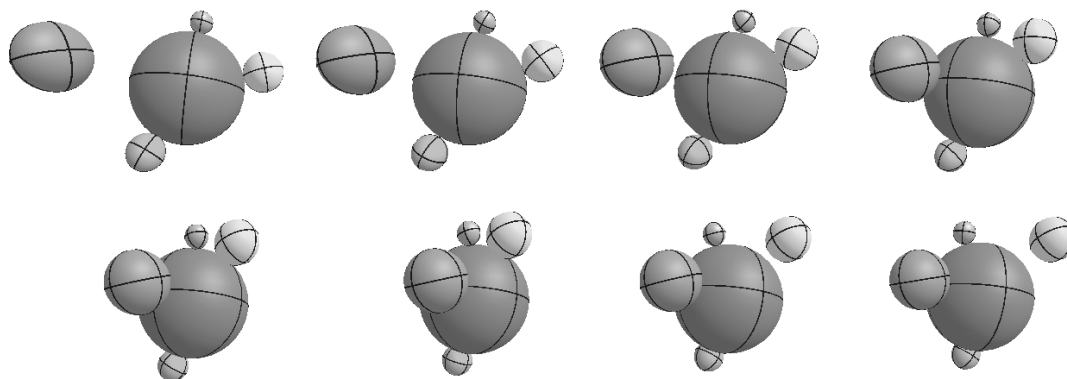
2. téziscsoport

A manipuláció tervezéshez további kiegészítéseket dolgoztam ki, úgymint pszeudo-ágensek alkalmazása és egy új kontaktuspont relokációs módszer kooperáló

ágensek számára a megfogás átkonfigurálásához.

A téziscsoporthoz tartozó publikációk: [7], [5], [6]

2.1. A szimulált lehűtésen alapuló tárgymanipulációs algoritmus kiterjesztéseként kidolgoztam egy kontaktuspont relokációs módszert kooperáló ágensek részére a megfogás átkonfigurálására. Az eljárás stabilabb megfogást eredményez és az ágensek számára nagyobb flexibilitást biztosít. A 4. ábra 3-D ágensekkel végzett kontaktuspont relokációt illusztrál.



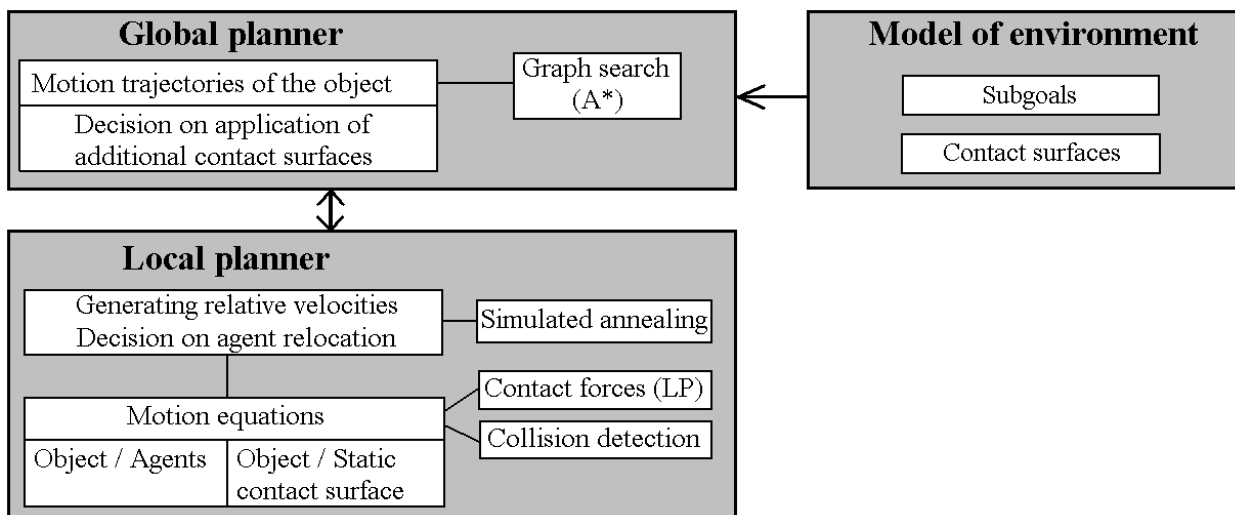
4. ábra. Kontaktuspont áthelyezés 3-D ágensekkel

2.2. A tárgymanipulációs algoritmushoz kapcsolódóan új kontaktuspont biztosítása érdekében statikus kontaktus felületek alkalmazását vezettem be. Néhány esetben (például nehéz tárgy esetén) szükség lehet új, időleges kontaktuspont biztosítására a tárgy felületén a környezetben található statikus objektumok (akadályok) kihasználásával. Ezen pseudo-ágensek segítségével a manipulációs ágensek átkonfigurálhatják kontaktusaikat a jobb megfogási konfiguráció érdekében. Az 5. ábra a pseudo-ágens kezelésére kifejlesztett rendszer folyamatábráját mutatja be.

3. téziscsoport

Továbbfejlesztettem az MSRS trajektória tervező algoritmust, amely egy valós idejű, gyorsulás deriváltat (jerk) is figyelembe vevő mozgástervező módszer. Az új algoritmus egy vagy egyszerre több robot mozgás-trajektóriáit optimalizálja az idő szerint. A mozgás megvalósításához szükséges idő lecsökkenése jelentős határfok javulást eredményez 24-órás robot alkalmazásoknál és gyártórendszerekben.

A téziscsoporthoz tartozó publikáció: [10]



5. ábra. *Pszedo-ágenst kezelő manipulációs rendszer folyamatábrája*

3.1. Kidolgoztam egy továbbfejlesztett algoritmust, amely új spline típusok bevezetésével és a spline lista optimalizálásával általánosítja az eredeti MSRS módszert.

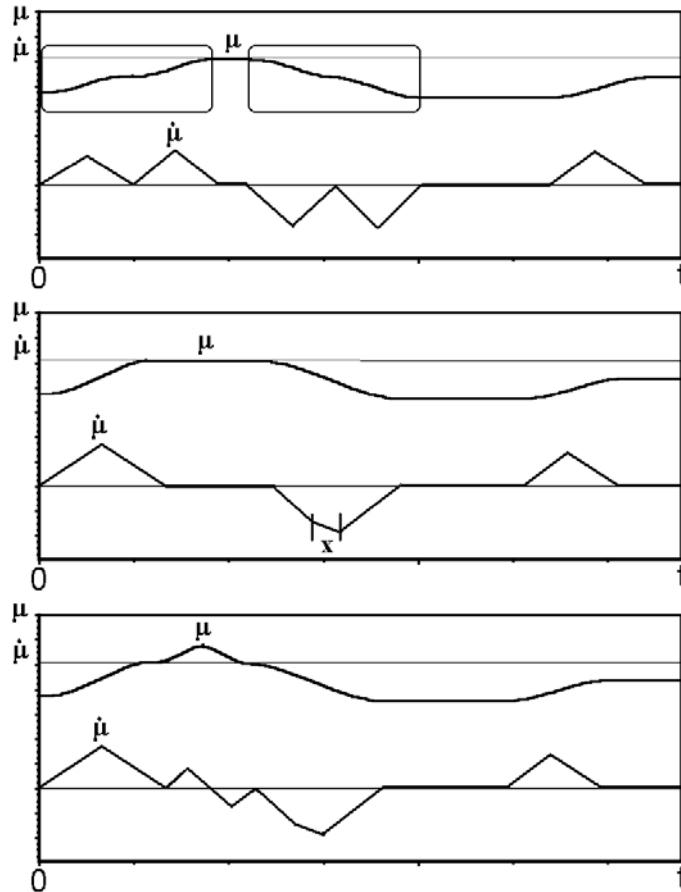
Az MSRS algoritmus a robot megadott geometriai útvonalához időbeli referencia trajektóriát állít elő a robot időfüggő korlátozásait figyelembe véve. A módszer a mozgás trajektóriáit spline-okkal reprezentálja.

Az eredeti MSRS megközelítés hátránya, hogy a spline-ok kezdeti és végpontjainál nulla gyorsulást követel meg. Ez a hátrány abban az esetben jelentkezik, ha a pályamenti sebesség több egymást követő spline-on keresztül nő.

A kifejlesztett javított algoritmus tovább optimalizálja az eredeti MSRS algoritmus által előállított spline listát. A módszer megpróbálkozik a gyorsulás módosításával minden spline elején és végén. A javított algoritmus több spline típust alkalmaz, mint az eredeti MSRS. A spline-ok kezdetén és végén a gyorsulás nemnulla értéket is felvehet, így a sebesség ezeken a pontokon nem konstans. Ennek eredményeként a pályamenti sebesség nagyobb lépésekkel növelhető.

Az általános térbeli robotokra alkalmazható algoritmus a következő elvekre épül:

1. Az eredeti MSRS algoritmus végrehajtása.
2. Azon spline szekvenciák megkeresése, ahol a sebesség több spline-on keresztül monoton nő, vagy monoton csökken.



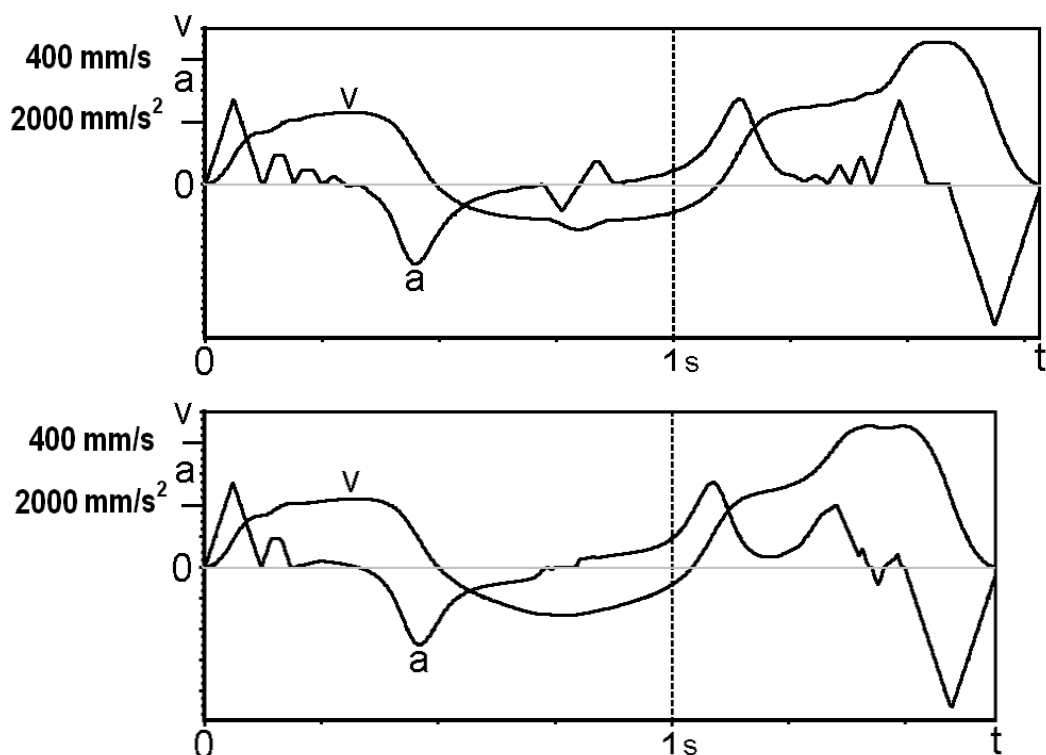
6. ábra. Az optimalizáció lépései

3. Minden ilyen szekvenciára a spline-ok megváltoztatása, fokozatosan módosítva a gyorsulás profilokat a pályamenti sebesség növelésének érdekében.
4. További finomítás igénye esetén végrehajtás újra az 1. ponttól.

A 6. ábra az optimalizáció folyamatát mutatja be (μ és $\dot{\mu}$ jelöli a sebesség és gyorsulás paramétereket).

3.2. A kifejlesztett módszer egy, vagy egyszerre több robotot tartalmazó rendszer trajektóriáinak idő szerinti optimalizálására alkalmazható. Az algoritmus lehetővé teszi a sarokpontok módosítását, valamint új sarokpontok hozzáadását valós időben.

Az algoritmus mozgás közben az összes csuklót egy közös λ paraméter függvényeként szinkronizálja. A módszer a $\lambda(t)$ karakterisztikát idő szerint optimalizálja spline-ok felhasználásával, amelyek a λ paraméter idő függvényeit reprezentálják.



7. ábra. A robot sebesség és gyorsulás függvényei optimalizáció előtt és után

A 7. ábra egy derékszögű koordinátás robot (Cartesian arm) végberendezésének sebesség (v) és gyorsulás (a) függvényét illusztrálja optimalizáció előtt és után. Az optimalizáció 6% gyorsulást eredményezett az eredeti állapothoz képest.

5. Az eredmények alkalmazása

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Irányítástechnika és Informatika Tanszék és a kanadai Simon Fraser University, School of Engineering Science kutatási programjai keretében, lehetőséget kaptam elméleti eredményeim gyakorlati kipróbálására Magyarország és Kanada nemzeti kutatási projektjeiben.

A bemutatott algoritmusokon alapuló tárgymanipulációs szoftverrendszer

fejlesztettem ki, amely nagyszámú robotikai alkalmazásban használható mozgás- és kontaktuserő tervezésre, beleértve a többujjas manipuláció és a kooperáló robotok területét. A rendszer csuklópozíció- és erő-alapjeleket biztosít a robot szabályozók számára. A szoftver melléktermékeként létrehoztam egy grafikus felhasználói interfészt, amely támogatja az eredmények magasszintű implementációját. A módszerek alkalmazhatóságát 2-D és 3-D szimulációkon keresztül mutattam be.

A továbbfejlesztett MSRS algoritmus analitikusan megadható inverz geometriával rendelkező általános robotokra lett kidolgozva és implementálva RTOS-32 valós idejű operációs rendszer alatt 2001/2002-ben. A következő adatok egy derékszögű koordinátás robot valós idejű trajektória tervezésének eredményeit mutatják. A rendszer mintavételi ideje 3 ms volt. A felhasználói parancsokra (például Vészleállítás) vonatkozó válaszidőnek olyan rövidnek kell lennie, hogy a felhasználó ne érzékeljen jelentős késleltetést. Ebből az okból kifolyólag a tervezést 100 ms-en belül kellett végrehajtani. Tekintetbe véve, hogy egyszerre több taszk is fut ugyanazon a processzoron az RTOS-32 valós idejű operációs rendszer alatt, a tervező modul rendelkezésére álló időintervallum a 100 ms töredéke kell legyen. Az algoritmus futási ideje a pályahossztól függően 10 és 40 ms között volt egy Intel Celeron 500 Mhz-es processzoron. Általánosságban, az optimalizáció átlagosan 2-10% javulást eredményezett időben, ami jelentős határfok növekedés a 24 órás robotalkalmazások és gyártórendszerek esetében.

A kutatási eredmények folyóiratcikkekben és nemzetközi konferenciákon váltak ismertté, valamint részben a Natural Sciences and Engineering Research Council of CANADA (NSERC) No. 611205, a Felsőoktatási Kutatási és Fejlesztési Programok FKFP 0417/1997, az INTCOM TEMPUS JEP 12555-97, az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok OTKA T 029072 és OTKA T 042634 programok részét képezték.

Az értekezés témaköréből készült publikációk

- [1] G. Vass. Motion design for multi-fingered robotic hands. In *Proceedings of Conference on the Latest Results in Information Technology, Budapest, Hungary*, pp. 117–120, 1998.

- [2] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. On controlled manipulation of objects within multiple dexterous agents. In *Proceedings of the Tenth world congress on the theory of machines and mechanisms, IFToMM, Banff, Canada*, Volume 3, pp. 1103–1108, 1999.
- [3] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. Application of simulated annealing for object manipulation with multiple agents. In *Proceedings of the Second IASTED International Conference, Control and Applications, Oulu, Finland*, pp. 566–571, 1999.
- [4] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. Toward application of simulated annealing for object manipulation with multiple dexterous agents. In *Proceedings of Tempus, INTCOM '99, Symposium on Intelligent Systems in Control and Measurement, Budapest, Hungary*, pp. 91–96, 1999.
- [5] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. Object reconfiguration with multiple agents using static obstacles. In *Proceedings of Intelligent Autonomous Systems 6, IAS-6, Venice, Italy*, pp. 180–187, 1999.
- [6] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. Object manipulation with dextrous robotic hand using simulated annealing. *Periodica Polytechnica, Serial Electrical Engineering* 43(3), 199–206, 1999.
- [7] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. Object reconfiguration with multiple robotic arms using an additional static contact surface. In *Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Robot Control, SYROCO'00, Vienna, Austria*, Volume 2, pp. 669–674, 2000.
- [8] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. A planning system for object reconfiguration with robotic hand and the real time realization of the motion. In *Proceedings of AIRTC, IFAC Symposium on Artificial Intelligence in Real Time Control 2000, Budapest, Hungary*, pp. 295–300, 2000.
- [9] G. Vass and E. Tóth. Optimal contact point placement and reconfiguration for dextrous manipulation. In *Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED'01, Dubrovnik, Croatia*, pp. 180–187, 2001.

- [10] G. Vass, S. Payandeh and B. Lantos. Real-time optimized robot trajectory planning with jerk. In *Proceedings of the 7th Symposium on Robot Control, SYROCO'03, Wroclaw - Poland*, Volume 1, pp. 295–300, 2003.
- [11] B. Kiss and G. Vass. Tárgymanipuláció robotkézzel - object manipulation with robotic hand. In *Proceedings of the International Scientific Conference MICROCAD'01, Miskolc, Hungary*, 2001, Vol. J, pp.105-110, ISBN 963 661 457 1.

A tézisfüzetben hivatkozott egyéb publikációk

- [12] M. Cherif and K. K. Gupta. Planning quasi-static motions for re-configuring objects with a multi-fingered robotic hand. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Volume 4, pp. 986–991, 1997.
- [13] L. Ludvig. Construction, modeling and intelligent control of robotic hands (in Hungarian). *CSc Thesis, Hungarian Academy of Sciences*, 1997.
- [14] D. Montana. The kinematics of contact and grasp. *International Journal of Robotics Research*, Volume 7, pp. 17–31, 1988.
- [15] T. Rieswijk. Robot trajectory planning - a model based geometrically constrained approach. Ph.D Thesis. Technise Universiteit Delft, 1992
- [16] J. K. Salisbury and M. T. Mason. Robot Hands and the Mechanics of Manipulation. *MIT Press*, 1985.
- [17] R. M. Murray, Z. Li and S. S. Sastry. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. *CRC Press*, 1994
- [18] G. Vass Control system for a dextrous robotic hand (In Hungarian). *M.Sc. Thesis. Process Control Department, Technical University of Budapest*, 1997.