tanulmányok 116/1981

MTA Számitástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet Budapest

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
SZÁMITÁSTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI KUTATÓ INTÉZET

EGY 6 SZABADSÁGFOKU ANTROPOMORF MANIPULÁTOR KINEMATIKÁJA ÉS SZÁMÍTÓGÉPES VEZÉRLÉSE

Irta:

SIEGLER ANDRÁS

Tanulmányok 116/1980.

A kiadásért felelős:

DR VÁMOS TIBOR

ISBN 963 311 113 7
ISSN 0324 - 2951

Készült a SZÁMOK nyomdájában
80/293

T A R T A L O M

BEVEZETÉS

A gépipari automatizálás jelen fejlődési szakaszában megfigyelhető a gépek, berendezések robotos kiszolgálásának fokozódó jelentősége. Az ipari robotok alkalmazásának kezdetén elsősorban az egyszerü felépitésü, kevés mozgásfajtával rendelkező, általában ütközőkkel és végálláskapcsolókkal pozicionált robotokkal találkozhattunk. Az ipari gyártástechnológia és a vezérlési-irányitási módszerek fejlődése lehetővé tette, hogy a gyártási folyamat egyetlen, jelenleg még emberi közreműködést igénylő láncszemét, a gépek és berendezések kiszolgálását is automatizáljuk. A változó gyártási körülmények, adott esetben a kis gyártmánysorozatok, a változó technológiai paraméterek nem teszik lehetővé az emberi munka felváltását "kemény" automatizálással, vagyis az adott technológiára épitett *kiszolgáló célberendezésekkel* vagy első generációju ipari robotokkal. Az ilyen megoldások ugyanis rendkivül tervezés- és költségigényesek. A fokozodó munkaerőhiány, a jelentős bérköltségek és az emberi munka humanizálása ugyanakkor sürgetik azoknak az olcsó, rugalmas gépkiszolgáló berendezéseknek a bevezetését, amelyeknek teljesitménye pótolja, sőt pontosságban, megbizhatóságban és tartósságban felül is mulja a betanitott munkaerőtől elvárható munkateljesitményt.

A fenti cél érdekében olyan kiszolgáló berendezésre van szükség, amely

- képes bejárni a gépek kiszolgálásához, a gépek közötti anyagmozgatáshoz szükséges bonyolult mozgáspályákat;
- ezen mozgáspályák változtatásához nem szükséges a berendezés cseréje vagy átszerelése, tehát a gyártó gépeket

kiszolgáló berendezés "programozható", mégpedig a számitógépekhez hasonlóan, szöveges formában;

- a végrehajtott mozgás nagy pontossággal követi az elméletileg kiszámitott pályát, adott korlátok között sebessége és gyorsulása bármely előirt értéket felvehet;
- képes érzékelők utján kapcsolatot tartani környezetével, a környezetből érkező hatásoknak megfelelően megválasztani pályáját illetve a mozgás paramétereit.

E követelmények együttesének kiván megfelelni az ipari robotoknak az az uj, második nemzedéke, amelynek ipari elterjedését a legfejlettebb ipari országokban figyelhetjük meg. Tevékenységük elsősorban a megmunkálandó anyagok, a félkész vagy kész *munkadarabok gépek közötti mozgatása* illetve egyes *technológiai müveletek* (pl. festés, csiszolás, ponthegesztés) önálló elvégzése. Az amerikai, japán, Nyugat-európai kutatólaboratóriumokban pedig kifejlesztették és kisérletileg használják már azokat a még fejlettebb, harmadik generációs robotokat, amelyek az embertől finomabb manuális tevékenységet is képesek átvenni, nevezetesen bizonyos *szerelési részmüveleteket* is elvégeznek, mégpedig olymódon, hogy a ma rendelkezésre álló legfejlettebb érzékelési, jelfeldolgozási, helyzetelemzési és döntési képességgel rendelkeznek, amit összefoglalóan gépi intelligenciának szokás nevezni.

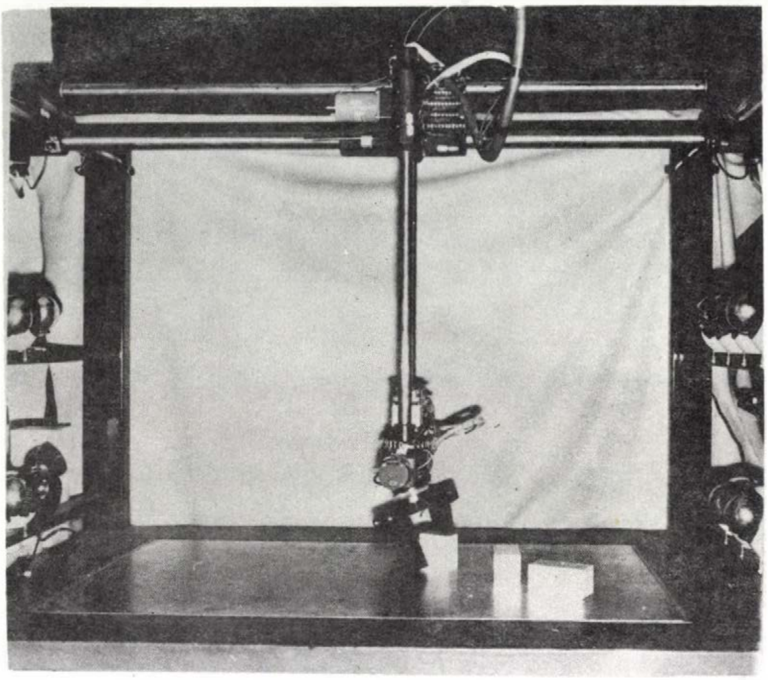
ELŐZMÉNYEK

A Magyar Tudományos Akadémia Számitástechnikai és Automatizálási Kutató Intézetében Vámos Tibor akadémikus vezetésével folyó kutató munka célja, hogy Magyarországon is megszülessen az embert felváltani képes, a mesterséges intelligencia nyujtotta képességekkel felvértezett és a legkorszerübb számitógépek nyujtotta előnyöket felhasználó uj robottechnika. E kutatási tevékenység keretében elkészült egy intelligens szem-kéz rendszer, azaz egy televiziós képfeldolgozó berendezést, korszerü képi ember-gép kapcsolatot és egy 6 tengely mentén vezérelhető kisérleti manipulátort egyesitő berendezés. [Vámos &al., 1979] A manipulátor irányitásában alkalmazott megoldásokat [Siegler, 1977]ismerteti, lényegük az hogy az ortogonális alapelrendezésü robot 3 tengely mentén egyenesvonalu, 3 tengely körül pedig forgó mozgásra képes, a tengelyeket léptetőmotorok hajtják, amelyeket egy MTC tipusu numerikus szerszámgépvezérlő berendezés vezérel. A pályaszámitás és kezelői kommunikáció feladatait egy R10 tipusu kisszámitógép végzi. A berendezés, amely a B.1.ábrán látható, az alábbi előnyökkel rendelkezik:

- a tengelyek hidszerü, viszonylag egyszerü geometriai elrendezése következtében egy adott kézhelyzet előállitásához csak igen egyszerü geometriai számitásokra van szükség: a csukló pozicióját egyértelmüen meghatározza a "felső", vagyis az egyenes vonal mentén mozgatható tengelyek állása (B.2.ábra);
- a robotvezérlő (RC) a tengelyek koordinált mozgását automatikusan biztositja;
  az RC-t egyszerüen lehet programozni egy tetszőleges irányu és hosszuságu pályaszakasz előirt sebességgel történő bejárására és a mozgás elinditása után minden vezérlési és figyelési funkciót maga az RC lát el: igy a mozgás ideje alatt a számitógép más feladatokkal (pl. trajektória tervezéssel) foglalkozhat;
- a vázolt elektromechanikai kialakitásnak köszönhetően a kar mozgása kielégitő pontossággal követi az előirt pályát, az ismétlési pontosság Ø.5 mm;

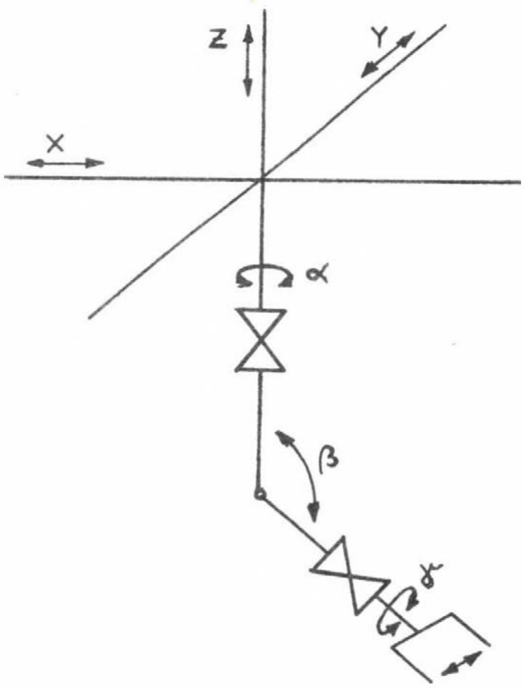
Ugyanakkor ez a robot bizonyos hátrányokkal is rendelkezik:

- a tengelymozgásokról nincs pozicióvisszacsatolás, és, bár a mozgás általában pontos, lépésvesztések (kihagyások) előfordulhatnak. Ez elsősorban ütközésekkor fordul elő, s ennek érzékelésére jelenleg nincs mód;



X - Y manipulátor

B. 1. ábra



Az X - Y manipulátor geometriája

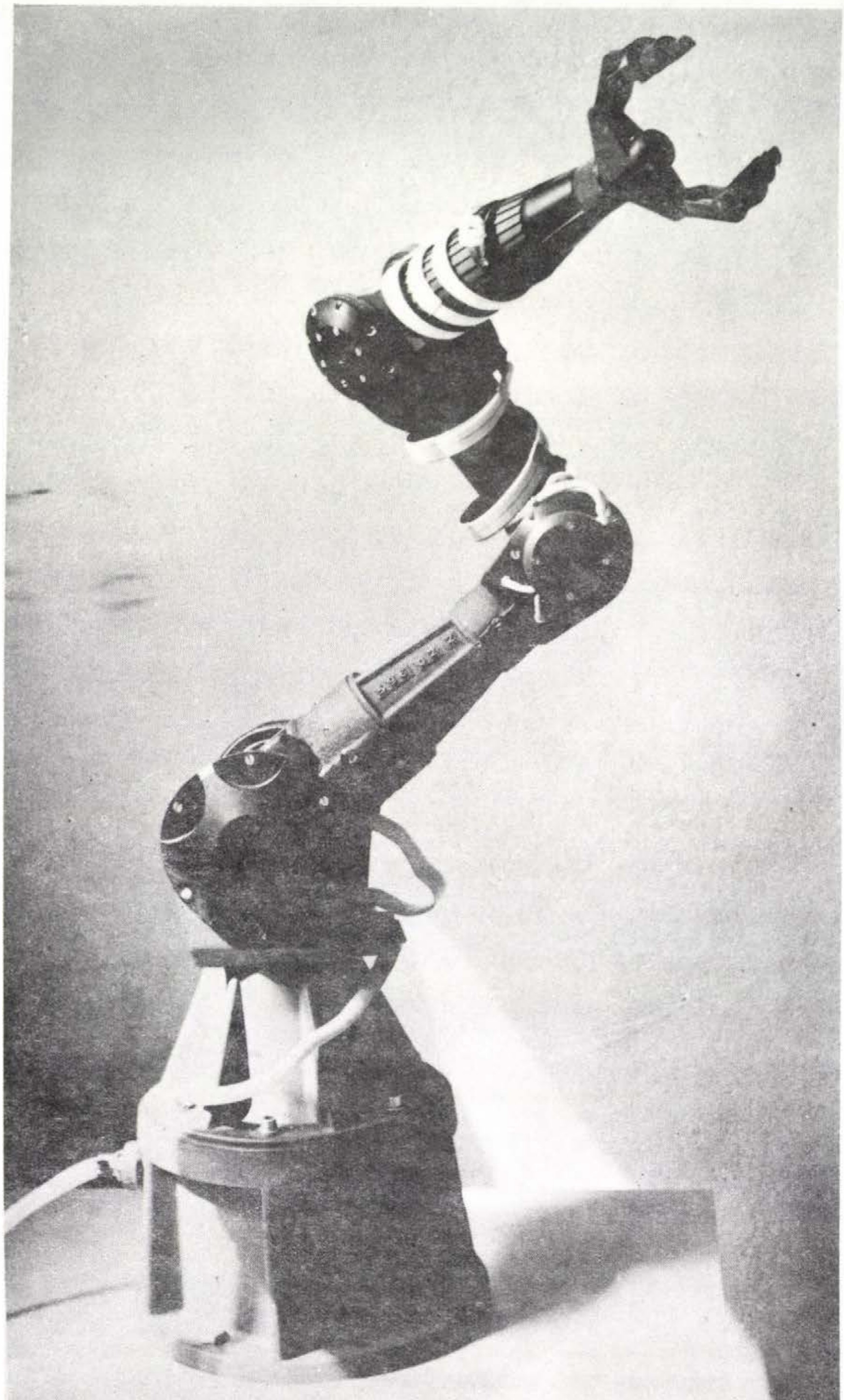
B. 2. ábra

a tengelypoziciók azonositására csak az egyes tengelyvégeken elhelyezett mikrokapcsolók szolgálnak: a berendezés bekapcsolása vagy fatális ütközések után a rendszert ujra inicializálni kell olymódon, hogy a tengelyeket az emlitett kapcsolókra vezérlik és onnan a lépésszámlálást ujra kell kezdeni - ez igen időigényes tevékenység;

- a manipulátor megfogóiba helyezett néhány taktilis érzékelőn kivül a robot tevékenységéről nincs visszajelzés; a vizuális bemeneti adatokra támaszkodó szintér elemzések az bizonyitják, hogy mig a látványra alapuló tárgyfelismerés sok minőségi információt szolgáltat, a robotos tevékenységhez megkivánt pontosság a szintérre vonatkozó mechanikai információ hiányában nem érhető el.

Az emlitett hátrányok kiiktathatók volnának ugy is, hogy a hidszerü mechanikai elrendezést megtartjuk. Ugyanakkor az a fő célkitüzés. hogy egy olyan robot-berendezést tervezzünk, amely magasan automatizált gyártóvonalakon is alkalmazható és ott az embert részben helyettesiteni tudja, indokolttá tette, hogy egy teljesen uj, csuklós szerkezetü robotkart épitsünk. Az uj, váll-könyök-csukló tipusu mechanizmus a B.3.ábrán látható.

Egy ilyen, teljesen automatizált berendezés felépitésének és alkalmazásának komplex jellegénél fogva a megoldandó vezérlési-irányitási-rendszertervezési problémák is igen szerteágazóak. Számos módszer létezik a manipulátor mechanikai leirására, a robot pályájának megtervezésére, az ember és a robot kapcsolatának megszervezésére mind ipari, mind orvosbiológiai alkalmazásokban.



A COROHAND manipulátor

B. 3. ábra

A DOLGOZAT TÁRGYA ÉS CÉLJAI

A dolgozat témájának megválasztását az emlitett általános megfontolásokon tul a jelenleg is fejlesztés alatt álló uj, hazai, kisérleti manipulátor-konstrukció (COROHAND) létrejötte indokolja. Egy korábbi értekezés e robotkar gépészeti-konstrukciós problémáival foglalkozott [Zilahi, 1979]. A jelen dolgozat célja a 6 csuklós manipulátor automatikus irányitásához szükséges *algoritmikus módszerek kidolgozása.*

A dolgozatban tárgyalt alapkérdés a következő: adott a robotkar megfogójának tér-és időbeli mozgását előiró *számitógépes program - milyen nyomatékokat* kell a robotkar csuklóiba épitett motoroknak kifejteniük ahhoz, hogy a megfogó a program által előirt pályán, előirt módon végighaladjon. E kérdés megválaszolásánál az alábbi problémákra kell figyelemmel lennünk:

1.- A robot által végrehajtandó feladatot az ember a saját maga és nem a robot számára "természetes" módon irja le: a feladatleirás egy szöveges, adott esetben *szimbólikus hivatkozásokat* is tartalmazó, a számitógépprogramokhoz hasonló "manipulátor program". A robotot használó ember számára az a kényelmes, ha a munkatér pontjaira számszerü koordináták helyett tetszőlegesen választott nevekkel hivatkozhat és e pontokat a 3 dimenziós *euklideszi térben* értelmezi. A robot természetes "világa" viszont az az *általánositott értelemben vett mozgástér,* amelynek koordinátái a manipulátor saját csuklószög-poziciói.

2.- A manipulátorprogram nemcsak a robot megfogója által bejárandó pálya térbeli elhelyezkedését irja elő, hanem a pályakövetés pontosságára és időbeli lefolyására (sebességére) is tartalmazhat követelményeket.

3.-A manipulátor, mint irányitott berendezés, erősen nemlineáris jellegü, időben változó paraméterekkel rendelkezik, irányitását külső zavaró tényezők is nehezitik. A leglényegesebb probléma, hogy a manipulátor mechanikai jellemzői a kar mindenkori térbeli állásától ("konfigurációjától") függenek.

A dolgozat az emlitett problémák megválaszolását tüzi ki célul. Ennek érdekében *áttekinti, rendszerezi és értékeli* a soktengelyes, "antropomorf" manipulátorok irányitásának elveit és módszereit; *kiválasztja* az adott irányitási feladat (COROHAND) megoldására alkalmas módszereket; a választott módszerekből kiindulva *felállitja* a manipulátor geometriai, kinematikai, dinamikai és szabályozástechnikai *modelljét;* a valós idejü számitógépes irányitás követelményeit szem előtt tartva *algoritmizálja* a modellek generálását és végül ismerteti a rendelkezésre álló hardware eszközök nyujtotta kereteken belül *számitógépen megvalósitott* manipulátor irányitási programokat.

A dolgozatban tárgyalt *sulyponti kérdés* az emlitett modellek létrehozása, mivel ezek mindegyike szükséges a manipulátor számitógépes szabályozásához. Szabályozástechnikai szempontból a dolgozat a lehetséges, és a rendelkezésre álló hardware-től függően választható megoldásokat ismerteti. A választható technikák, illetve algoritmusok ismertetésével a dolgozat *alapot* kiván nyujtani a robottal kapcsolatos hardware és software *fejlesztés irányának* megválasztásához. Ilyen döntési kérdés például a számitógépes vezérlés koncentrált vagy részben csuklónként elosztott megvalósitása, a csuklókat szabályozó berendezések és a visszacsatolást biztositó érzékelők megválasztása.

A dolgozat törekszik a tárgyalt problémák gyakorlati megközelitésére, a hangsulyt a számitógépen megvalósitható algoritmusok kidolgozására helyezi. Elméleti szempontból csak a leirt eljárások megértéséhez szükséges alapösszefüggéseket közli, amelyek magyarázata kézikönyvekben megtalálható.

Az ipari robotokkal kapcsolatos *magyar szakirodalom* elsősorban alkalmazástechnikai kérdésekre korlátozódik. Manipulátorok konstrukciója és vezérlése tekintetében az eddigi kutató-fejlesztő munka az egyszerübb, kevéssé flexibilis, elsősorban pneumatikus berendezésekhez kapcsolódott.[I. Ipari Robot Kollokvium, 1977]. A BME Gyártástechnológiai Tanszék és az MTA-SzTAKI együttmüködésében egy elektro-hidraulikus, 4 tengelyes ipari manipulátorhoz (IR-51) készült vezérlő hardware és software. Az MTA-SzTAKI 6 tengelyes elektromos kisérleti manipulátorához a szerszámgépekhez hasonló vezérlő berendezés és irányitó program készült. [Nemes, Siegler, 1978]
A manipulátorirányitással kapcsolatos *külföldi irodalom* meglehetősen szerteágazó, bár megfigyelhető, hogy a konkrét, hardware fejlesztéssel párosuló fejlesztő munka néhány, a magas technológiai szinvonalu országokban található laboratóriumban koncentrálódik. Elsősorban amerikai és japán kutatóhelyeken értek el konkrét, müködő berendezések formájában realizált eredményeket.

A dolgozatban kitüzött egyik cél az utóbbi évek során publikált nagyszámu eredmény *rendszerezése* és *értékelése* a valós idejü irányitásban való használhatóság szempontjából.

A különböző irodalmi forrásokon alapuló, illetve a szerző által a konkrét feladatra adaptált módszerek és algoritmusok tárgyalásánál lényeges szempont az *egységes tárgyalásmód és formalizmus* megvalósitása.

A számitógépes manipulátorirányitás problémaköre meglehetősen sokféle diszciplinához kapcsolódik (mechanika, irányitástechnika, számitástechnika, stb.), s egyenlőre - legalábbis a hazai irodalomban - nem alakult még ki a témakör egységes fogalomrendszere. A dolgozat hozzá kiván járulni a robotirányitás fogalmainak *egységes értelmezéséhez* is.

A DOLGOZAT FELÉPITÉSE

Az ismertetett kérdésekkel a dolgozat az alábbi szerkezetben foglalkozik:

1. Geometriai modellek
   - Egységes formalizmus kidolgozása a munkatér és a manipulátor geometriájának számitógépi reprezentációjához. (1.1.pont)
   - A feladat-orientált manipulátorprogram átalakitása a manipulátor megfogója által bejárandó térbeli poziciók és orientációk sorozatává (1.2....1.4.pont). Ebben a müveletben alapvető szerepet kap a *munkatér* homogén koordinátákkal leirt *modellje*.
   - A manipulátor geometriai modelljének kiválasztása a vezérlés lehetséges elveinek figyelembevételével (2.fejezet). A *robotkar geometriai leirása* (3.fejezet) az 1.1.pontban ismertetett reprezentációs formalizmussal történik. A dolgozat külön foglalkozik a manipulátor megfogó orientációjának értelmezésével (4.fejezet), mivel ez mind a manipulációs feladat leirása, mind pedig a további számitások hatékonysága szempontjából lényeges.

- A munkatérben leirt trajektória egyes pontjainak transzformálása a csuklószögek általánositott terébe: a manipulátor geometriai modelljének felhasználásával a dolgozat tárgyalja az u.n. "*inverz manipulátorprobléma*"megoldását az adott robotkarra. (5.fejezet)

2. Mozgáspályák leirása
   - A geometriai modell alapján kapott egyes trajektóriapontok között, illetve azokon áthaladva a manipulátornak *folyamatosan, koordinált* módon kell a pályát bejárnia. Ennek megoldását tárgyalja a 6.fejezet.
   - Az előirt és a megvalósitott mozgáspálya eltérését jellemző *hibák elemzése* szükséges ahhoz, hogy a mozgást "türésezni" lehessen. A dolgozat ismerteti a hibaszámitás összefüggéseit az adott manipulátorra. (7.fejezet)
   - A mozgáspályák bejárását végrehajtó számitógépes programok felépitésével a 8.fejezet foglalkozik. Ismerteti a *megvalósitott programokat,* bemutatja azok müködését és eredményeit, továbbá egy mozgásszimulációs programcsomag alkalmazását.
3. Mechanikai modellek
   - A korábbi fejezetek a manipulátorvezérlésnek azokkal a szintjeivel foglalkoztak, ahol nem volt szükség a robotkar mechanikai tulajdonságainak figyelembevételére. Valójában a korábban meghatározott mozgáspályapontok (akár a megfogó, akár a csuklók trajektóriáiról legyen szó), csak szabályozási *alapjeleknek* tekinthetők. A szabályozásához szükség van a manipulátor mechanikai leirására.
   - A mechanikai leirás első lépése a manipulátor *kinematikai modelljének* felállitása. (9.1, 9.2.pont)

- A kinematikai leirás felhasználásával lehetséges a *dinamikai modell* létrehozása. Ennek elveit és egy módszer algoritmizálását a COROHAND esetében a 9.3.pont ismerteti.

4. Szabályozás
   - A dolgozat ismerteti azokat az indokokat, amelyek miatt a manipulátort szabályozóval kell ellátni. A lehetséges szabályozási módszereket és a mechanikai modellek felhasználását a számitógépes szabályozásban a 1O.fejezet tárgyalja.

FOGALMAK ÉRTELMEZÉSE

A manipulátortechnika magyar nyelvü irodalmában nem alakult ki a témakör speciális fogalmainak egységes értelmezése és használata. Az alábbiakból kiderül, hogy a dolgozatban milyen értelemben használjuk az egyes technikai kifejezéseket. Ez egyben javaslat az idegennyelvü irodalom forditásának egységesitésére is: ahol indokolt, az adott kifejezés angol megfelelőjét is megadjuk.

Antropomorf manipulátor	- Az emberi kar mozgását utánzó, csupa R tipusu csuklóból álló *manipulátor*. Részei az ALAP, VÁLL, KÖNYÖK, CSUKLÓ és a KÉZ illetve végcsonk. CSUKLÓ-nak ("wrist") a KÉZ felöli utolsó billenő tipusu rotációs csuklót ("joint") nevezzük. (3.5. ábra)
Csukló ("Joint")	- A kinematikai lánc elemeinek kapcsolatát megvalósitó, erő- vagy nyomatékkifejtésre alkalmas szerkezet. A különböző csuklótipusokat részletesen ismerteti [Denavit &al, 1964], manipulátorokban transzlációs ("prismatic") és rotációs ("revolute") csuklókat szokás alkalmazni. Ezek szokásos jelölése P ill. R. Az R tipusu csukló lehet *billenő* vagy *csavaró* jellegü.
Csuklókoordináta	- A csuklómotorok által közvetlenül vezérelt változó, vagyis az egymást követő kar-tagok relativ helyzete. R tipusu csuklók esetén a *csuklószöggel* azonos.

Csuklószög ("Joint angle")	- Egymást követő két kar-tag által bezárt szög. (R tipusu *csuklóknál* értelmezhető.)
Feladat-szintü program ("Task-level program")	- A szerelési vagy egyéb manipulációs terv leirása számitógépes program formájában. A manipulátor által mozgatni kivánt tárgyakra vonatkozó szimbólikus hivatkozásokat is tartalmazhat.
Inverz manipulátor-probléma	- egy adott *kéz-állapothoz* tartozó *csuklókoordináták* meghatározása
Kéz-állapot ("Hand state")	- a *kézkoordináták* egy rögzitett halmaza: a kéz poziciójából és orientációjából tevődik össze.
Kéz-orientáció	- a kéz térbeli szöghelyzete egy referencia helyzethez képest. Az alábbi formákban definiálható: (ld. 4.fejezet) - 3 x 3-as orientációmátrix - Euler szögek - az utolsó *kar-tag* irányvektora és a *megfogó* szöghelyzete e vektor körül
Kéz-pozició	- a *TCP* helye a térben
Kar-tag ("Link")	- a *robotkar* két csuklóját összekötő merev idom.
Konfiguráció	- a *kar-tagoknak csuklókoordináták* egy adott érték-halmaza által meghatározott térbeli elrendezése.

Manipulátor	- Előirt mozgáspályák bejárására alkalmas, nyilt, soros kinematikai láncot képező, aktiv *csukló*kból és az azokat összekötő *tag*okból álló mechanizmus. A lánc első tagja általában a külvilághoz van rögzitve, az előirt pályát pedig a kinematikai lánc utolsó tagjának szabad vége járja be.
Manipulátorszintü program	- Olyan számitógépes mozgásleiró program, amelyben csak a *TCP* által érinteni kivánt munkatérbeli pontokra és *kéz-orientációkra* történik hivatkozás. (v.ö *Feladat-szintü* program)
Manipulátor-trajektória	- a *TCP* által bejárandó pálya
Megfogó ("Gripper")	- A *manipulátor* mozgatott végére szerelt, cserélhető, általában kéz-szerü szoritó szerkezet. 2 és több ujjas kivitelben is készülhet, gyakran mechanikai érzékelőket is hordoz. Amennyiben funkciója tárgyak egyszerü megfogása és elengedése, akkor kéznek is nevezik.
Ortogonális manipulátor	- 3P + 3R *manipulátor*
Pályaszámitás	- a *csuklókoordináták* sorozatának előállitása a *tartópontok* sorozatából
Pályatervezés	- a *manipulátor-trajektória tartópontjainak* előállitása a feladatorientált szerelési tervből, vagy magasabb szintü *robotprogramból.*

Pályavezérlés - a *csuklók* előirt mozgásának on-line irányitása.

Robot - Mozgásvégrehajtó mechanizmusból, vezérlő és jelfeldolgozó elektronikából, valamint érzékelőkből álló berendezés, amely előirt program szerinti mozgáspályák bejárására alkalmas. A mozgást végrehajtó mechanizmus általában egy *manipulátor*, de lehet járó mechanizmus, vagy jármü is. A programozott mozgást legtöbbször számitógép irányitja.

Robotkar - *Manipulátor*

Robotkéz - *Megfogó*

Robotprogram - A robot által végrehajtandó tevékenységet leiró számitógépes program. A ~ lehet *feladat-szintü* vagy *manipulátor-szintü*.

Szabadságfok - ~-ok száma megegyezik a függetlenül vezérelhető *kéz-koordináták* számával. Teljes *kéz-állapot* vezérléséhez legalább 6 ~-u manipulátorra van szükség.

Szerszám - szerelési, vagy egyéb technológiai jellegü részmüvelet elvégzésére alkalmas, a megfogóval felcserélhető szerkezet.

Tartópont - az előirt kéz-trajektóriának a *manipulátor-szintü program* által a térben rögzitett pontja.

TCP - "tool center point", vagyis szerszám középpont: az a pont, amelynek mozgását a *manipulátorprogram* vezérli. Megfogóknál az ujjak szimmetriapontját nevezik ~-nek.

Végcsonk - A manipulátor szabad végén elhelyezkedő csatlakozó elem, amelyre megfogók és szerszámok felszerelhetők. Egy adott manipulátor vezérlése elsősorban a ~ pályavezérlésére irányul, mivel a csatlakozó készülékek (kezek, szerszámok) változhatnak.

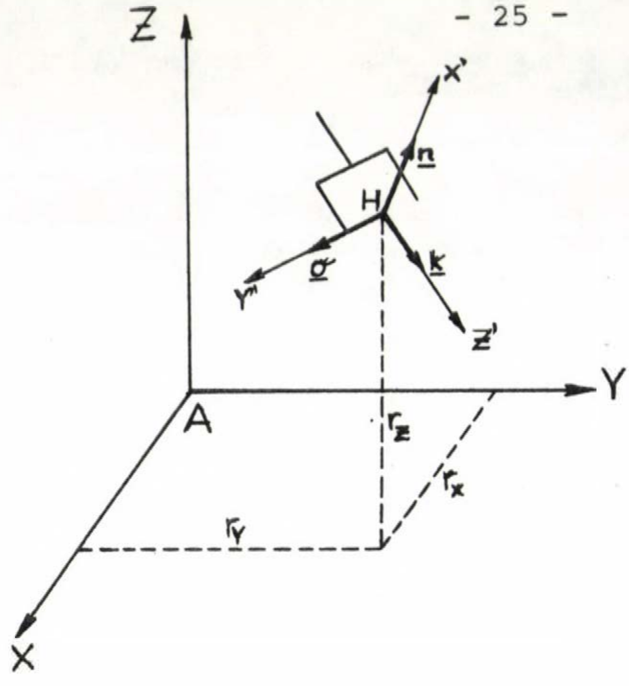
1. A MANIPULÁCIÓS FELADAT LEIRÁSA

A robot által elvégzendő feladat lényege merev testek manipulációja a munkatérben. A manipulációt térben irányitott poziciók sorozataként irjuk le: ebben a formában adható meg a manipulátor megfogójának, az alkatrészeknek vagy a kifejtendő erőhatásoknak a helye és térbeli orientációja.

1.1. HOMOGÉN KOORDINÁTÁK

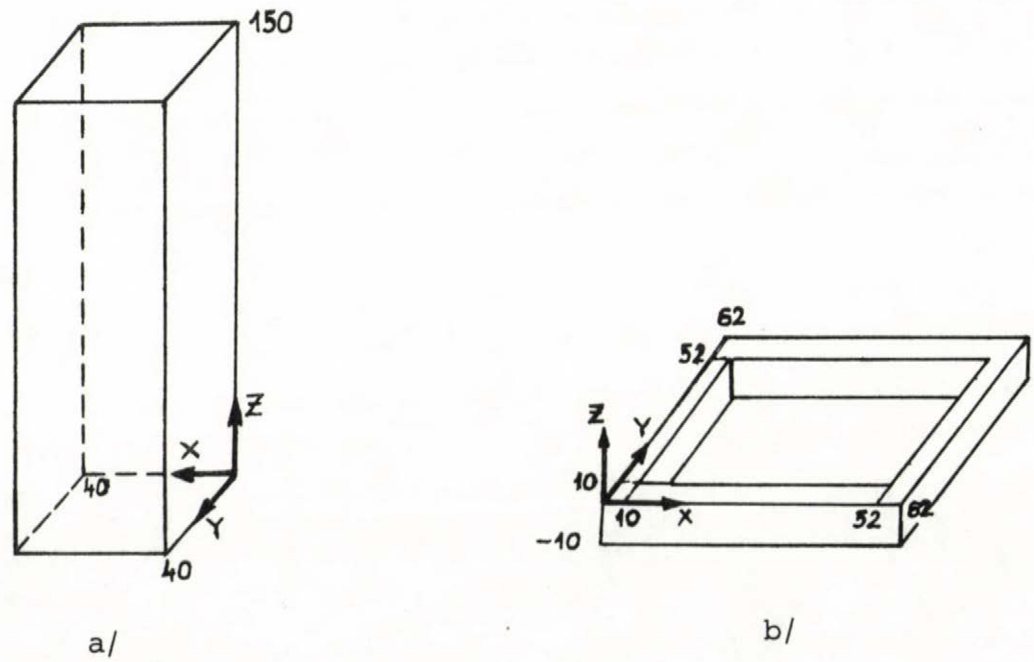
A manipulációs feladat megfogalmazása a felhasználó oldaláról nézve akkor egyszerü és hatékony, ha annak nem a manipulátor mozgását, hanem a mozgatni kivánt tárgyak hely- és helyzetváltozásait kell tartalmaznia: a manipuláció célja ugyanis a munkadarabok, és nem a megfogó mozgatása. Közvetlenül irányitani azonban csak magát a manipulátort tudjuk, ezért egzakt formában meg kell adjuk, hogy mi a kapcsolat egy manipulátor mozgásai és a környezetében levő tárgyak pozició-és orientációváltozásai között.

Merev testek helyét és helyzetét jellemezhetjük egy, az illető testhez mereven rögzitett koordinátarendszerrel. Amennyiben rendelkezésünkre áll a test számitógépes geometriai reprezentációja, akkor ezen koordinátarendszer poziciójának és orientációjának megadása elégséges lesz a test bármely helyen és helyzetben történő rekonstruálásához. Koordinátarendszerek egymáshoz viszonyitott helyzetének megadására előnyös a *homogén koordináták* használata.A 1.1.ábrán látható koordinátarendszerek viszonyát az (1.1.) egyenlet fejezi ki.



A homogén koordináták értelmezése

1.1. ábra



Munkadarabok

1.2. ábra

$$\begin{bmatrix} e_{Ax} \\ e_{Ay} \\ e_{Az} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \begin{array}{cc} \text{forgatás} & \text{eltolás} \\ \text{mátrixa} & \text{vektor} \end{array} \\ \begin{bmatrix} n_x & o_x & k_x & r_x \\ n_y & o_y & k_y & r_y \\ n_z & o_z & k_z & r_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} * \begin{bmatrix} e_{Hx} \\ e_{Hy} \\ e_{Hz} \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (1.1.)$$

ahol A jelöli az alap koordinátarendszerben értelmezett mennyiségeket, H pedig a $\underline{r}$-rel megadott pozicióju és ($\underline{n}$, $\underline{o}$, $\underline{k}$)orientációju koordinátarendszerben vett mennyiségeket. Az (1) egyenlet egy H beli vektort A-ba transzformál. Röviden:

$$\underline{e}_A = \underline{H} * \underline{e}_H \qquad (1.2.)$$

A $\underline{H}$ transzformációs mátrix első 3 oszlopa az $\underline{n}$, $\underline{o}$, $\underline{k}$ egységvektorok x, y, z irányu komponenseit, a 4. oszlop az $\underline{r}$ vektor komponenseit tartalmazza.

A manipulátorok pályaszámitásában használt 4 x 4-es mátrixok kétfélék lehetnek: koordinátarendszer-leiró mátrixok, amelyek egy adott koordinátarendszert a manipulátor alapkoordinátarendszeréhez képest irnak le és transzformációs mátrixok, amelyek két, az alaptól különböző koordinátarendszer viszonyát irják le.

1.2. MUNKADARABOK MOZGATÁSA

A homogén koordinátás transzformációk használata érdekében a siklapokkal határolt tárgyakat egy-egy 4 x N-es mátrix formájában irjuk le, ahol N a csucsok száma és minden csucsot egy $(x\ y\ z\ 1)^T$ alaku pozicióvektor jellemez.

Például az 1.2.a ábrán szereplő hasáb leirása:

HASÁB=

$$= \begin{bmatrix} o & o & o & o & 4o & 4o & 4o & 4o \\ o & o & 4o & 4o & o & o & 4o & 4o \\ o & 15o & o & 15o & o & 15o & o & 15o \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.3.)$$

Az 1.2.b ábra szerinti kereté pedig:

KERET=

$$= \begin{bmatrix} o & o & o & o & 62 & 62 & 62 & 62 & 1o & 1o & 1o & 1o & 52 & 52 & 52 & 52 \\ o & o & 62 & 62 & o & o & 62 & 62 & 1o & 1o & 52 & 52 & 1o & 1o & 52 & 52 \\ o & -1o & o & -1o & o & -1o & o & -1o & o & -1o & o & -1o & o & -1o & o & -1o \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.4.)$$

Ha egy manipulációs feladat során pl. a hasábot elforditjuk az 1.3.ábrán látható helyzetbe és áthelyezzük a H1 pozicióba, akkor ezen müvelet eredményét homogén transzformációkkal az (1.5.) egyenlet szerint irhatjuk le:

$$\begin{bmatrix} o & o & -1 & 5oo \\ -1 & o & o & 1oo \\ o & 1 & o & o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} o & o & o & o & 4o & 4o & 4o & 4o \\ o & o & 4o & 4o & o & o & 4o & 4o \\ o & 15o & o & 15o & o & 15o & o & 15o \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 5oo & 35o & 5oo & 35o & 5oo & 35o & 5oo & 35o \\ 1oo & 1oo & 1oo & 1oo & 6o & 6o & 6o & 6o \\ o & o & 4o & 4o & o & o & 4o & 4o \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.5.)$$

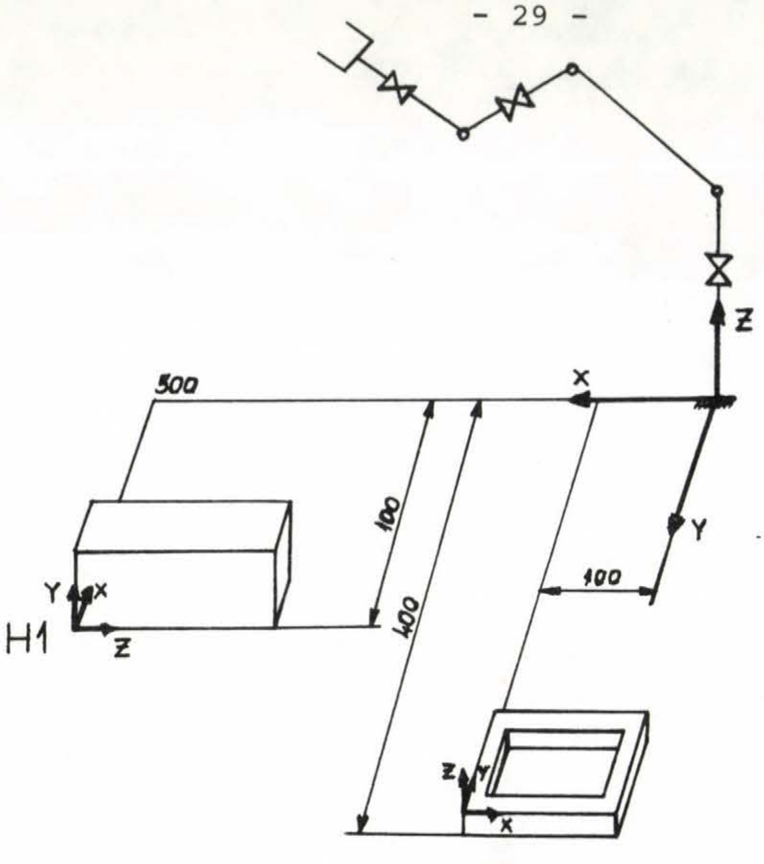
Mint látható, a transzformációs mátrix első 3 oszlopa az elforgatott koordinátarendszer tengelyeinek irányát, a 4. oszlop az origó uj helyét adja meg. Az (1.5) egyenlet jobb oldalán levő mátrix oszlopai pedig a csucsok uj koordinátáit adják meg. Helyezzük az (1.5) egyenletnek megfelelő helyzetü hasábot a keretbe. (1.3.ábra)
A hasáb cél-állapotát az (1.6) egyenlet irja le:

$$= \begin{bmatrix} 1 & o & o & 49 \\ o & 1 & o & 349 \\ o & o & 1 & o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} o & o & o & o & 4o & 4o & 4o & 4o \\ o & o & 4o & 4o & o & o & 4o & 4o \\ o & 15o & o & 15o & o & 15o & o & 15o \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 49 & 49 & 49 & 49 & 89 & 89 & 89 & 89 \\ 349 & 349 & 389 & 389 & 349 & 349 & 389 & 389 \\ o & 15o & o & 15o & o & 15o & o & 15o \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.6)$$

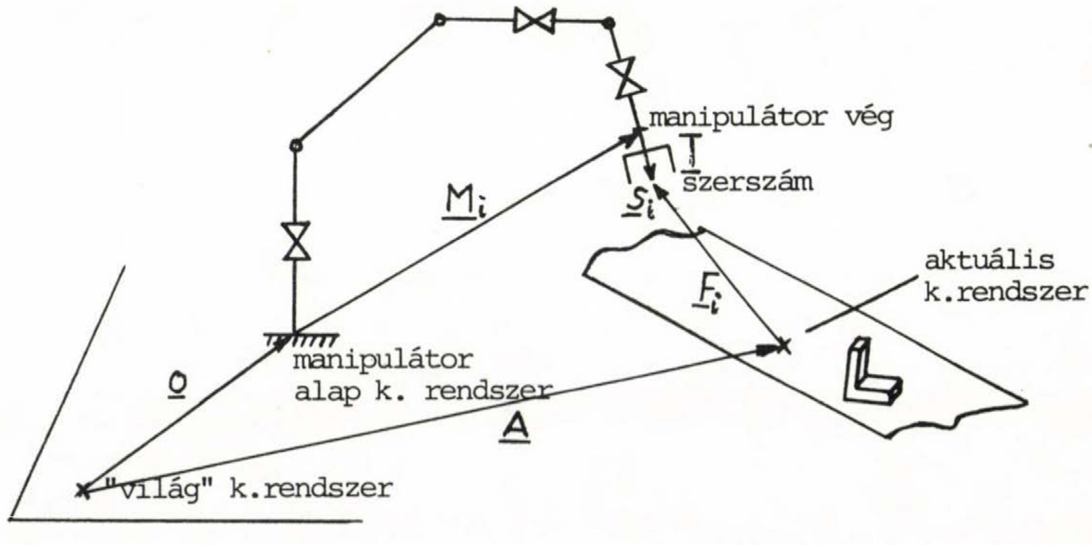
A szerelést ebben az interpretációban homogén transzformációk sorozatának tekintjük. Az érthetőség és a számitás ill. programozás megkönnyitése végett relativ transzformációkat alkalmazunk, amelyek jelölése:

$$\underline{\mathrm{MUNKADARAB}}_{\mathrm{VONATKOZTATÁSI\ KOORDINÁTARENDSZER}}$$



Egy manipulációs feladat

1.3. ábra



Koordinátarendszerek kapcsolata

1.4. ábra

A keret és a hasáb példájában a hasábot a kerethez képest pozicionáló transzformáció:

$$\underline{\text{HASÁB}}_{\text{KERET}} = \begin{bmatrix} o & 1 & o & -2o \\ -1 & o & o & 2o \\ o & o & 1 & -1o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.7)$$

Végezzünk ezután manipulációt a hasábot befoglaló kerettel, pl. forditsuk el 9O^{o}-kal a z tengely körül és pozicionáljuk az x = loo, y = 2oo, z = lo pontba az alap koordinátarendszerhez képest. Eszerint:

$$\underline{\text{KERET}}_{\text{ALAP}} = \begin{bmatrix} o & -1 & o & 1oo \\ 1 & o & o & 2oo \\ o & o & 1 & 1o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.8)$$

A kerettel együtt mozgó hasáb természetesen megtartotta eredeti helyzetét a kerethez képest. Igy a hasábnak az alap koordinátarendszerbeli állapota az (1.9) egyenlettel irható fel:

$$\underline{\text{HASÁB}}_{\text{ALAP}} = \underline{\text{KERET}}_{\text{ALAP}} * \underline{\text{HASÁB}}_{\text{KERET}} =$$

$$= \begin{bmatrix} o & -1 & o & 1oo \\ 1 & o & o & 2oo \\ o & o & 1 & 1o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} o & 1 & o & -2o \\ -1 & o & o & 2o \\ o & o & 1 & -1o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & o & o & 8o \\ o & 1 & o & 18o \\ o & o & 1 & o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.9)$$

1.3. RELATIV TRANSZFORMÁCIÓK A MUNKATÉRBEN

A manipulátor feladata az, hogy a megfogót (kezet, szerszámot) előre megadott térbeli poziciók és orientációk sorozatán át egy kezdő állapotból egy végállapotba vigye. (A továbbiakban a manipulátorkéz helyét és helyzetét együttesen a kéz (megfogó, szerszám) állapotának fogjuk nevezni.)Egy kéz-állapotot ($\underline{S}_i$) kétféleképpen fejezhetünk ki:

$$\underline{S}_i = \underline{O} * \underline{M}_i * \underline{T} \quad \text{és} \quad \underline{S}_i = \underline{A} * \underline{F}_i \qquad (1.1o)$$

ahol

$\underline{O}$ jelenti a manipulátor alapjának állapotát a referencia koordinátarendszerben, amit állandónak tekintünk egy adott feladat végrehajtása során; (az egyszerüség kedvéért $\underline{O}$ a továbbiakban az egységmátrix lesz, azaz referenciaként a manipulátor alapját választjuk.)

$\underline{M}_i$ a manipulátor végpontjának állapota megadott trajektória i-ik pontjában;

$\underline{T}$ a kéz, vagy szerszám középpont (TCP-tool center point) állapota a manipulátor végcsonkhoz képest. Ezt a transzformációt is változatlannak tekintjük egy trajektória bejárása során: különböző feladatokhoz a manipulátor szerszámot cserélhet, amikor $\underline{T}$ értéke megváltozhat.

$\underline{A}$ az aktuális koordinátarendszer mátrixa. Az aktuális koordinátarendszer kapcsolódhat egy munkahelyhez, egy ellenőrző padhoz, egy mozgó szállitószalaghoz, stb. Ha $\underline{A}$ megegyezik a manipulátor koordinátarendszerével, akkor egységmátrisszá válik.

$\underline{F}_i$ a fogás vagy szerelés transzformációs mátrixa, amely a manipulátor megfogó vagy szerszám kivánt helyzetét irja le a szerelés i-ik lépésében, az aktuális koordinátarendszerben.

Az (1.10) egyenletben szereplő koordinátarendszerek kapcsolatát az 1.4. ábra mutatja.

Bármilyen formában definiáljuk is a manipulátor számára a feladatot, annak végrehajtása előtt elő kell állitani azokat a kéz-állapotokat, amelyeken a kéznek a mozgás során át kell haladnia és ezen állapotok ismeretében meg kell határozni a megfelelő $\underline{M}_i$ trnaszformáció-sorozatot ($i = 1...n$ az érintett állapotokon futó index). E számitás menetét az alábbi példán keresztül mutatjuk be:

A feladat a H jelü hasáb beillesztése a K keretbe. (1.5. ábra) A végrehajtás során a TCP az $S_0...S_4$ állapotokon halad át. A feladat matematikai reprezentációjához az alábbi transzformációkat fogjuk használni: (az alsó index a viszonyitási koordinátarendszerre utal, az alsó index nélküli mennyiségek a ref. koordinátarendszerben vannak értelmezve.)

$\underline{H}(i)$ az i-ik hasáb állapota a referencia koordinátarendszerben;

$\underline{K}$ a keret állapota a referencia koordinátarendszerben;

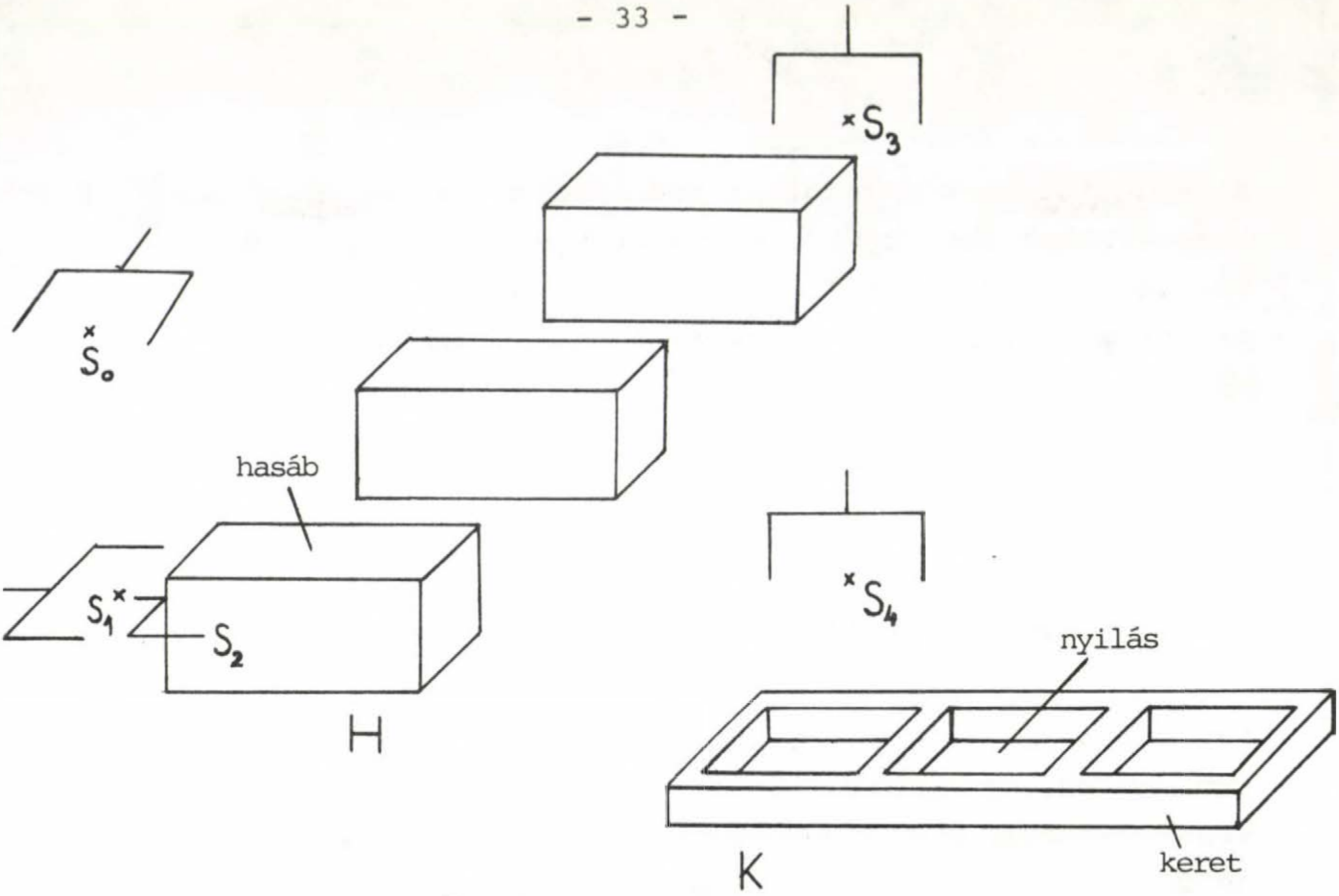
$\underline{N}_K(j)$ a j-ik nyilás helye a keret koordinátarendszerében;

$\underline{A}_H$ a megfogó állapota a hasábhoz való közelitéskor;

$\underline{G}_H$ a hasábot tartó megfogó állapota a hasábhoz képest;

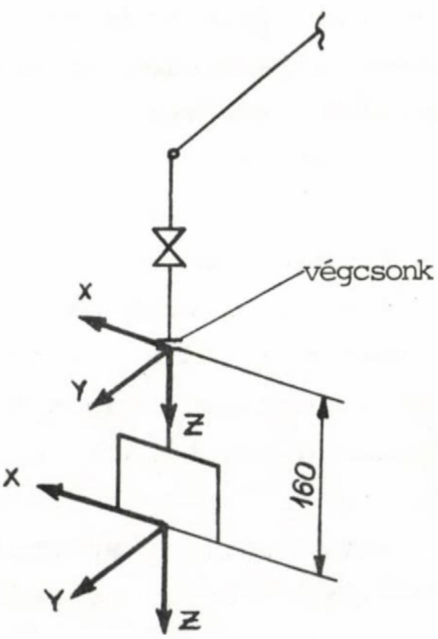
$\underline{HA}_N$ a hasáb állapota a kerethez való közelitéskor a nyiláshoz képest;

$\underline{HK}_N$ a hasáb állapota a keretbe helyezés után a nyiláshoz képest;



Megfogó-állapotok egy feladat végrehajtása során

1.5. ábra



Szerszám-transzformáció

1.6.ábra

A feladatot ezek után olyan transzformációs egyenletek sorozataként tekintjük, amelyeket $\underline{M}_i$-re kell egyenként megoldanunk igy előállitva a manipulátornak szóló parancsok sorozatát. Az egyenletek az adott példában az alábbiak:

$$
\begin{aligned}
&\underline{S1}: \quad \underline{M}_1 * \underline{T} = \underline{H}(i) * \underline{A}_H \\
&\underline{S2}: \quad \underline{M}_2 * \underline{T} = \underline{H}(i) * \underline{G}_H \\
&\underline{S3}: \quad \underline{M}_3 * \underline{T} = \underline{K} * \underline{N}_K(j) * \underline{HA}_N * \underline{G}_H \\
&\underline{S4}: \quad \underline{M}_4 * \underline{T} = \underline{K} * \underline{N}_K(j) * \underline{HK}_N * \underline{G}_H
\end{aligned}
\qquad (1.11)
$$

Egy valóságos feladat végrehajtása során ennél jóval több kitüntetett ponton halad át a robotkéz, a feladat strukturájának szemléltetésére azonban ez az egyszerüsitett példa is elegendő. A strukturált leirás nagy előnye az, hogy például egy ujabb hasábnak egy másik nyilásba való behelyezésekor csupán a $\underline{H}(i)$ és az $\underline{N}_K(j)$ transzformációk kapnak uj értéket, amelyekkel azután a feladat a korábbival azonos program szerint hajtható végre.

Az (1.11) egyenletrendszer jobb oldalán előforduló, vagyis a kivánt manipulátor-állapotokat előállitó transzformációk többféle forrásból ismertek:

- az $\underline{N}_K(j)$értékeket például a munakdarabok müszaki rajzából vagy számitógépes leirásából nyerhetjük;
- az $\underline{A}_H$, $\underline{G}_H$, stb transzformációkat ugy szokás előállitani, hogy a manipulátort pontról pontra vezérlik, leolvassák $\underline{M}_i$-t és a transzformációs egyenletet megoldják a keresett transzformációra nézve. Ezt nevezik "mutatva tanitásnak" a robot irodalomban. Ugyanezen transzformációk megoldhatók azonban egy szerelési terv, vagyis a szerelés menetét rögzitő magasabb szintü program keretében is.

A továbbiakban felirjuk a specifikációs fázis eredményeit, vagyis az (1.11) egyenletrendszerben szereplő transzformációkat. A referencia koordinátarendszer origója egybeesik a manipulátor alapjával, igy az (1.10) egyenletben $\underline{O} = \underline{I}$, az egységtranszformáció.

A megfogó állapotát a manipulátor végcsonkjához képest kell definiálnunk. (1.6.ábra)

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} 1 & o & o & o \\ o & 1 & o & o \\ o & o & 1 & 16o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.12)$$

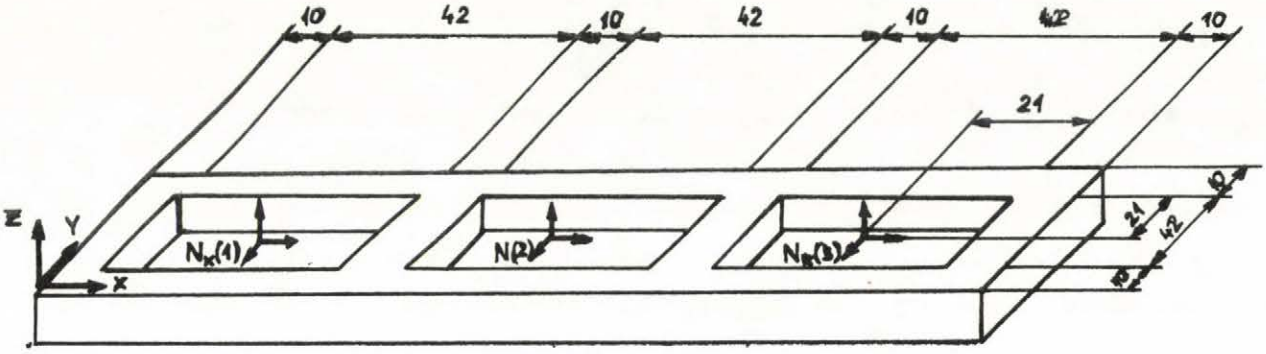
Egy hasáb méretei az 1.2.ábrán láthatók.
A négyzetes nyilásokat tartalmazó keret (K) paraméterei a 1.7.ábrán láthatók.

Ezek szerint az $\underline{N}_K(j)$ transzformációk:

$$\underline{N}_K(1) = \begin{bmatrix} 1 & o & o & 31 \\ o & 1 & o & 31 \\ o & o & 1 & o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{N}_K(2) = \begin{bmatrix} 1 & o & o & 83 \\ o & 1 & o & 31 \\ o & o & 1 & o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{N}_K(3) = \begin{bmatrix} 1 & o & o & 135 \\ o & o & o & 31 \\ o & o & 1 & o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix}$$

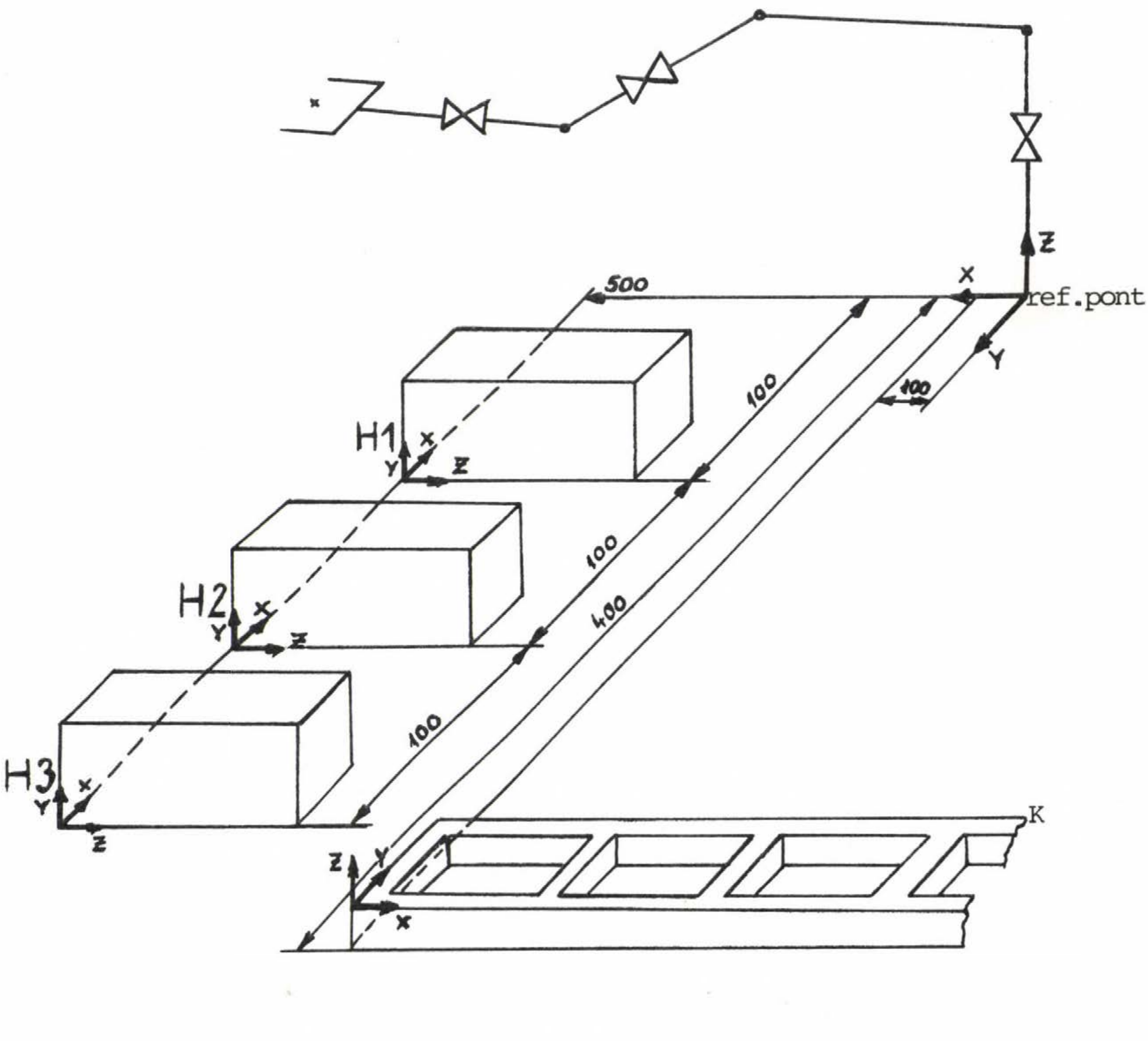
(1.13)

A munkatér elrendezése kiindulási állapotban a 1.8.ábrán látható.



A keret geometriája

1.7. ábra



A munkatér elrendezése

1.8. ábra

A kerethez vezető transzformáció:

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & -1 & 0 & 400 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1.14}$$

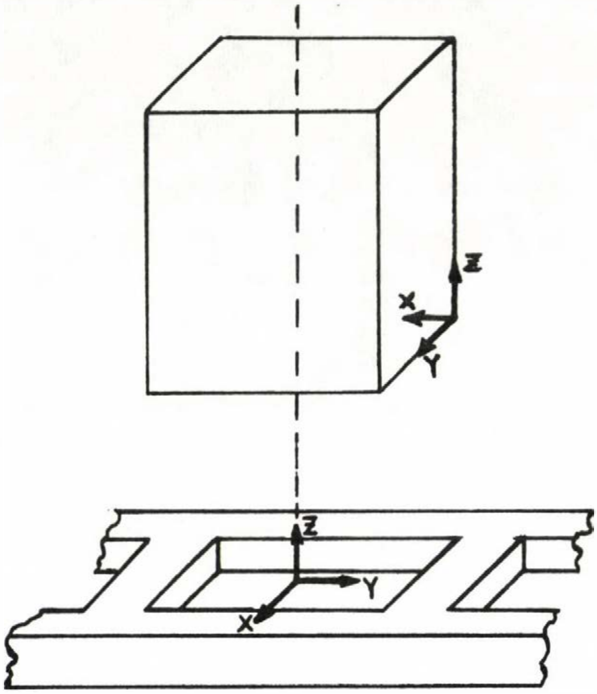
$$\underline{H}(1)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 500 \\ -1 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{H}(2)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 500 \\ -1 & 0 & 0 & 200 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{H}(3)=\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 500 \\ -1 & 0 & 0 & 300 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1.15}$$

A szerelés tervező rendszerben a $\underline{H}(i)$transzformációk az (1.15) szerinti explicit megadáson kivül egyéb forrásból is származhatnak. Érkezhetnek a munkadarabok pl. egy futószalagon, amelynek megadott pontjáról emeli le a manipulátor a darabot. Lehetséges az is, hogy a munkadarabok pontos helye és helyzete nem ismert és ezeket televiziós kamera segitségével keressük meg, amint az az intelligens szem-kéz rendszerekben történik. [Nevins, Whitney, 1978]

A (1.11) egyenletrendszerben szereplő további transzformációk:

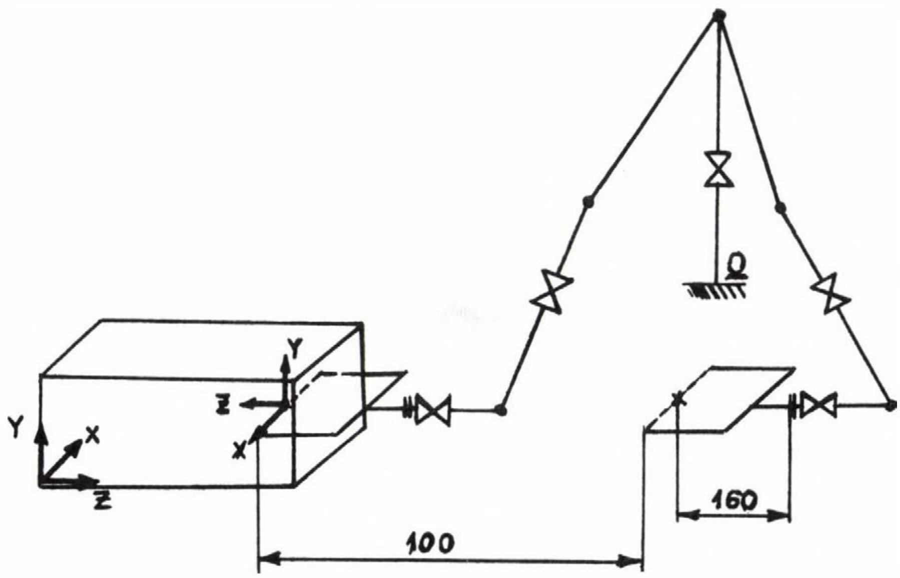
- a kerethez közeledő ill. abba helyezett hasáb helyzetének leirása (1.9.ábra)

Az 1.2. és 1.6. ábrán megadott méreteket, továbbá a szimmetriatengelyek egybeesését figyelembe véve:



Hasáb behelyezése a keretbe

1.9. ábra



Egy hasáb és a megfogó kapcsolata

1.lo ábra

$$\underline{HA}_N = \begin{bmatrix} o & 1 & o & 2o \\ -1 & o & o & 2o \\ o & o & 1 & 1oo \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad \underline{HK}_N = \begin{bmatrix} o & 1 & o & 2o \\ -1 & o & o & 2o \\ o & o & 1 & -1o \\ o & o & o & o \end{bmatrix}$$

(1.16) (1.17)

- a hasáb és a megfogó közötti transzformációk: (1.10.ábra)

$$\underline{G}_H = \begin{bmatrix} -1 & o & o & 2o \\ o & 1 & o & 2o \\ o & o & -1 & 15o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad \underline{A}_H = \begin{bmatrix} -1 & o & o & 2o \\ o & 1 & o & 2o \\ o & o & -1 & 25o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix}$$

(1.18) (1.19)

Az (1.12) - (1.19) transzformációkat az (1.11) egyenletbe helyettesitve megkapjuk az S1...S4 állapotokat, amelyeken a feladat végrehajtása során a manipulátornak át kell haladnia. Ezek a pontok mintegy "kifeszitik" a kivánt trajektóriát. Példaként számitsuk ki a manipulátor végcsonk koordinátáit az S1 állapotban, amikor a H1 hasábhoz közeledik:

$$\underline{M}_1 = \underline{H}(1) * \underline{A}_H * \underline{T}^{-1} =$$

$$= \begin{bmatrix} o & o & -1 & 5oo \\ -1 & o & o & 1oo \\ o & 1 & o & o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1 & o & o & 2o \\ o & 1 & o & 2o \\ o & o & -1 & 25o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & o & o & o \\ o & 1 & o & o \\ o & o & 1 & -16o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} o & o & 1 & 9o \\ 1 & o & o & 8o \\ o & 1 & o & 2o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.2o)$$

Tehát a manipulátor végét a (9o, 8o, 2o) pontba kell vinni a hasáb megközelitése előtt, mégpedig ugy, hogy a referencia irányhoz képest a kéz tengelye (z) az x, a normálvektora (y) pedig a z irányába mutasson. Az (1.2o) számitáshoz hasonlóan kell meghatározni a kivánt kéztrajektória minden pontját. Igy a kar az alábbi állapotokon fog keresztülhaladni:

$$\underline{M}_1 = \begin{bmatrix} o & o & 1 & 9o \\ 1 & o & o & 8o \\ o & 1 & o & 2o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{M}_2 = \begin{bmatrix} o & o & 1 & 24o \\ 1 & o & o & 8o \\ o & 1 & o & 2o \\ o & o & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{M}_3 = \begin{bmatrix} -1 & o & o & 69 \\ o & 1 & o & 2o9 \\ o & o & -1 & 43o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{M}_4 = \begin{bmatrix} -1 & o & o & 69 \\ o & 1 & o & 2o9 \\ o & o & -1 & 31o \\ o & o & o & 1 \end{bmatrix} \qquad (1.21)$$

Egy valóságos feladatban természetesen lényegesen több trajektória-tartópontot kell átadnunk a manipulátor pályavezérlő programjának,amelynek feladata a számitott pontok közötti ut generálása.

Az (1.10) egyenletet természetesen nemcsak az $\underline{M}_i$ értékek meghatározására használhatjuk fel. A robot kézi vezérlésével például beállithatunk egy $\underline{S}_i$ állapotot, amelyben a robot érintkezésbe kerül valamilyen munkadarabbal vagy más tárggyal. A két objektum (t.i. a robot-megfogó és a munkadarab) érintkezése által keletkezett kényszert figyelembe véve meg tudjuk állapitani a megfogott darab térbeli helyzetét és igy pontos ismereteket szerezhetünk a robot környezetéről.

Amennyiben a manipulációs feladat a példában leirthoz hasonló jellegü, a szereplő munkadarabokat rögzitő homogén transzformációk, ill. a transzformációs mátrixokban szereplő adatok egy része vizuális képfeldolgozás utján, azaz egy televiziós kamera segitségével is megszerezhető. Ebben az esetben az

$$\underline{S} = \underline{C} * \underline{PIC} \qquad (1.22)$$

egyenlet teremt kapcsolatot egy tárgy referenciarendszerbeli állapota ($\underline{S}$), a kamera referenciarendszerben értelmezett állapota ($\underline{C}$) és a tárgynak a kamera koordinátarendszerében értelmezett poziciója és orientációja ($\underline{PIC}$) között. Ez utóbbi a kamera által adott képből számitható ki, mivel a kamera fix helyen és helyzetben van. $\underline{C}$ értékét egy ismert állapotban lévő tárgy segitségével rögzithetjük a (1.23) egyenlet szerint:

$$\underline{C} = \underline{S} * \underline{PIC}^{-1} \qquad (1.23)$$

1.4. A MANIPULÁCIÓS PROGRAM

Vezessük be az alábbi transzformációs kifejezéseket:

$\underline{MAN} = WP^{-1} * \underline{M}$ (a manipulátor végcsonk állapota a WP munkadarabokhoz képest)

$\underline{TCP} = \underline{T}$ (szerszám középpont)

ahol $\underline{WP}$ a munkadarab állapota a referencia koordinátarendszerben, $\underline{M}$ a manipulátor végcsonk állapota a referencia rendszerben, $\underline{T}$ a megfogó által behozott transzformáció.

Az S1 állapotnak megfelelően a mozgás első lépése

$\underline{MAN} = \underline{H}(1)^{-1} * \underline{M}$ a manipulátort az 1. hasábhoz képest definiáljuk

$\underline{TCP} = \underline{T}$

MOVE $\underline{A}_H(1)$

Az S2 állapot szerint:

$\underline{MAN}$ változatlan

A hasáb megfogása után a szerszám uj definiciója

$\underline{TCP} = \underline{T} * \underline{G}_H^{-1}$ azaz a TCP-t a megfogott hasáb végpontjába helyezzük át.

A 3 hasáb behelyezésére szolgáló teljes program:

$\underline{TCP} = \underline{T}$	*szerszám rögzités
$I = 1$	
(WHILE	
$\underline{MAN} = \underline{H}(1)^{-1} * M$	*manipulátor definiálás a hasábhoz képest
MOVE $\underline{A}_H$	*menj az $\underline{A}_H$ pontba
MOVE $\underline{G}_H$	*menj a $\underline{G}_H$ pontba
GRIP	*zárd össze a megfogót
$\underline{TCP} = \underline{T} * \underline{G}_H^{-1}$	*a TCP a hasáb végén
$\underline{N} = \underline{K} * \underline{N}_K(I)$	*a nyilás abszolut poziciója
$\underline{MAN} = \underline{N}^{-1} * \underline{M}$	*manipulátor definiálás a nyiláshoz képest
MOVE $\underline{HA}_N$	*közelit a nyiláshoz
MOVE $\underline{HK}_N$	*behelyezi a hasábot
$\underline{K} = \underline{N} * \underline{N}_K(I)^{-1}$	*a keret helyzetének pontositása
DROP	*elengedi a hasábot
$\underline{MAN} = \underline{HK}_N^{-1} * \underline{N}^{-1} * \underline{M}$	*manipulátor definició ismét a hasábhoz képest
$\underline{TCP} = \underline{T}$	*TCP ismét a megfogó középpontban
MOVE $\underline{A}_H$	*eltávolódik a hasábtól
$I = I + 1$	*térj át a következő darabra
WHILE) $I < = 3$	

.

.

.

A példaprogramból néhány következtetést vonhatunk le:

- a koordinátarendszerek alkalmas megválasztásával minimálisra csökkenthetjük azoknak a változóknak a számát, amelyeknek az értékét minden egyes munkadarab felvételéhez meg kell ujitani: az adott esetben a $\underline{H}(I)$ és $\underline{N}_K(I)$ transzformációs változók kapnak uj értéket, mig az $\underline{A}_H$, $\underline{G}_H$, $\underline{HA}_N$, $\underline{HK}_N$ értékek nem változnak.
- lehetőség van a kamera által szolgáltatott információ beépitésére az(1.22) összefüggés felhasználásával:

  READ ($\underline{PIC}$) *beolvassa a hasáb helyzetét a kamerákhoz képest

  $\underline{H} = \underline{C} * \underline{PIC}$ *a hasáb abszolut helyzete
- a szerszám középpont (TCP) ujradefiniálásával a robotkart és az általa tartott munkadarabot egyetlen egységként kezelhetjük és a mozgatási utasitások argumentumaként magát a mozgatott munkadarabot adhatjuk meg.
- a manipulátor helyzetét a pillanatnyi mozgás célpontjához viszonyitva definiáljuk, mivel a végcélhoz vezető trajektória mentén megadott trajektória pontok (pl. $\underline{A}_H$) is a célhoz ($\underline{H}$) képest vannak definiálva.

Ebben a fejezetben áttekintettük, hogy egy szerelési feladatleirást miképpen transzformálhatunk át a manipulátor számára előirt mozgáspályává, azaz olyan térbeli poziciók és orientációk sorozatává, amelyen a manipulátort a feladat végrehajtása során végig kell vezetni.

A továbbiakban a kéz mozgásának vizsgálatáról áttérünk a robot csuklóinak ("izületeinek") mozgáselemzésére. A manipulátor kéz ill. megfogó előirt pályán történő mozgását az egyes csuklók koordinált mozgása hozza létre: a vezérlési parancsokat az egyes csuklóknak szóló parancsokká kell lebontanunk és a végrehajtás fizikai korlátai is a csuklókat mozgató hajtómüvektől függnek.

2. MANIPULÁTOROK VEZÉRLÉSI ELVEI

Ebben a fejezetben áttekintjük azokat a módszereket, amelyekkel a robotkézre vonatkozó mozgási utasitásokat a manipulátor csuklóit szabályozó rendszer alapeljeleivé, vagyis a csuklókra vonatkozó mozgási utasitásokká bonthatjuk le. Ez utóbbiak végrehajtását a szabályozó algoritmusok biztositják, amelyekkel a 8.-11. fejezetekben foglalkozunk.

A manipulátor-kéz illetve a csuklók mozgását jellemző változók tipusától függően az irodalomban két alapvető manipulátor-vezérlési módot találunk. Az egyik a sebességvezérlés, ahol a karmozgás iránya és sebessége, azaz sebességvektora adott a kivánt kéz-trajektória meghatározott pontjaiban és ebből kell meghatározni az egyes csuklók forgási sebességének időfüggvényeit. A másik mód a pozicióvezérlés, ahol a manipulátor kéz poziciójából a mozgató tengelyek szöghelyzet-idő függvényeit határozzuk meg. Mindkét módszernek vannak olyan sajátosságai, amelyek egy-egy alkalmazásban mellette vagy ellene szólnak. Orvosi-prosztetikai alkalmazásokban például gyakori a közvetlen sebességvezérlés, mivel a kis dinamikai igénybevétel lényeges szempont. [Moe, 1972] Ipari célu manipulátorokra inkább a pozicióvezérlés jellemző, mivel evvel nagyobb sebesség érhető el és a vezérlő számitógéppel kapcsolatos minőségi követelmények is alacsonyabbak - tehát gazdaságosabb.

Mielőtt a kétféle megközelitést részletesebben is elemeznénk, meg kell emliteni, hogy sok rendszerben az alkalmazott vezérlési módot eltakarja a jelek belső feldolgozása. Például a bemenő sebességparancsok integrálásával a manipulátor-kéz poziciójára nyerünk adatokat. Másrészt pozició-orientáció jellegü adatok differenciálásával egy-egy csukló mozgási sebességét leiró jelsorozatot kaphatunk. Ez utóbbi módszert követjük a COROHAND irányitásánál is. E választás megindoklása érdekében azonban áttekintjük mindkét mozgásvezérlő módszer fő vonásait.

2.1. SEBESSÉGVEZÉRLÉS

2.1.1. Whitney módszere ("Resolved rate control")

E módszer részletes leirását [Whitney, 1972]-ben találjuk. Mivel a módszer meglehetősen elterjedt manipulátor-jellegü mechanizmusok vezérlésében, az alábbiakban ismertetjük lényeges elemeit.

Jelöljük $\underline{s}$ -szel a parancs változók egy halmazát egy tetszőleges koordinátarendszerben. Legyen $\underline{q}$ a csuklószögek egy halmaza. A két halmazt az

$$s_i = f_i(\underline{q}) \qquad i = 1...n \qquad (2.1.)$$

összefüggések kapcsolják össze, ahol n a vezérelni kivánt változók száma, $\underline{q}$ reprezentálja a manipulátor "szabadságfokait". $\underline{s}$-t időben differenciálva:

$$d\underline{s}/dt = \dot{\underline{s}} = \underline{J}(\underline{q}) * \dot{\underline{q}} \qquad (2.2.)$$

ahol a $\underline{J}$ mátrix elemei eleget tesznek a

$$j_{ij} = \partial s_i / \partial q_j = \partial f_i(\underline{q}) / \partial q_j \quad , \quad \emptyset < i < n, \quad \emptyset < j < m \qquad (2.3.)$$

összefüggéseknek, ahol n az $\underline{s}$, m a $\underline{q}$ dimenzióinak száma. A sebességvezérlés egyik előnye, hogy a (2.2.)egyenlet

$\underline{\dot{q}}$-ra nézve lineáris és igy a manipulátor csukló-sebességét megkaphatjuk a

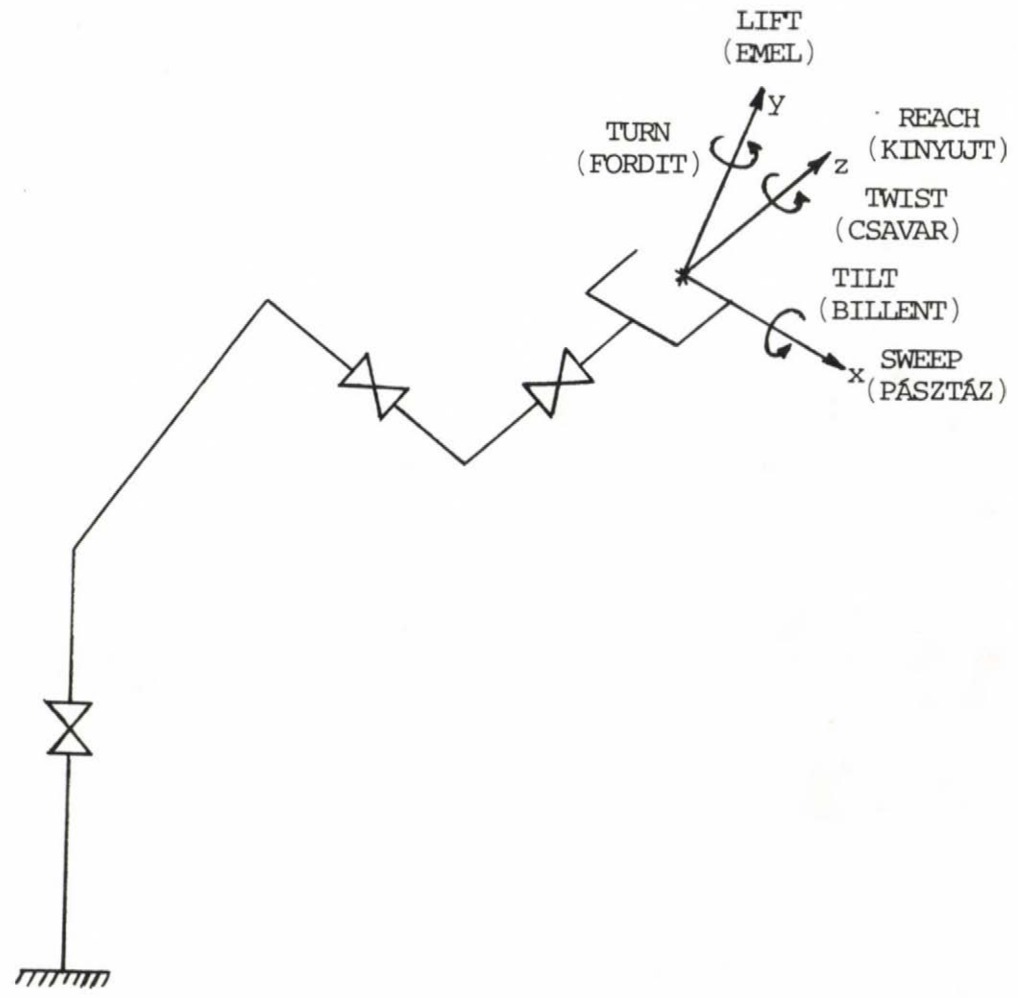
$$\underline{\dot{q}} = \underline{J}^{-1}(\underline{q}) * \underline{\dot{s}} \qquad (2.4.)$$

egyenletből, feltéve, hogy a $\underline{J}$ mátrixnak van inverze.

Rögzitsünk egy koordinátarendszert egy 6 csuklós manipulátor megfogójához. Az egyes tagok szögsebességét ugy kell megválasztanunk, hogy azok a megfogóhoz rögzitett tengelyek mentén vagy azok körül az előre meghatározott sebességeket illetve szögsebességeket eredményezzék. A manipulátor-kézhez rögzitett tengelyek szokásos elnevezése a 2.1. ábrán látható.

A kézre vonatkozó parancsok végrehajtása érdekében meg kell határoznunk a tagok szögsebességeit , mint a csuklószögek függvényeit és ezen értékeket a csuklószögek változásával egyidejüleg fel kell frissitenünk. A sebességvezérlés számitási problémájának lényege, hogy a csuklósebességet a csuklószögek, a manipulátor-geometria és az előirt kéz-mozgás ismeretében kell kiszámitanunk. E számitott csuklósebességek pontos megvalósitásához pedig sebességszabályozásra van szükség minden egyes csuklónál. Az eredményezett manipulátormozgás minősége szempontjából meghatározó jelentőségü a számitási idő.

A továbbiakban megmutatjuk, miként számitható ki a (2.2.) egyenletben szereplő $\underline{J}$ mátrix egy 6 csuklós manipulátor esetében. A mozgási sebesség parancsot az $\underline{\dot{s}} = [\underline{v}, \underline{\omega}]^T$



Feladat-orientált kézkoordináták

2.1. ábra

alakban irjuk fel, ahol $\underline{v}$ a kéz TCP pontjának sebességvektora, $\underline{\omega}$ a kéz szögsebességvektora. A kézhez rögzitett koordinátarendszernek az alaphoz viszonyitott pozicióját és orientációját 6 transzformációs mátrix szorzataként irhatjuk fel, amelyek mindegyike egy-egy csuklóforgást fejez ki:

$$^{o}\underline{A}_6 = {}^{o}\underline{A}_1 * {}^{1}A_2 * \ldots * {}^{5}A_6 \qquad (2.5.)$$

ahol a O. koordinátarendszer az alaphoz, a 6. a kézhez van rögzitve. $^{j}\underline{A}_{j+1}$ egy 4 x 4-es mátrix, amelynek bal felső 3 x 3-as particiója a j+l-ik koordinátarendszer elfordulását fejezi ki a j-ikhez képest, mig a jobb felső 3 x 1 particiója a j+l -ik rendszer origójának helyét adja meg a j-ikéhez képest. Az $^{o}\underline{A}_6$ mátrix ebben az értelemben az alap és a kéz viszonyát rögziti.

Legyen $\underline{k}_j$ a $\underline{\dot{q}}_j$ vektor irányába mutató egységvektor. Legyen továbbá $\underline{b}_{j6}$ az O_j origótól O_6-ba, azaz a kéz koordinátarendszer origójába mutató vektor. Ekkor a TCP-re

$$\underline{v}_j^{6} = \underline{k}_{j+1} \times \underline{b}_{j6} * \dot{q}_{j+1} \qquad (2.6)$$

$$\underline{w}_j^{6} = \underline{k}_{j+1} * \dot{q}_{j+1}, \quad j = 0,\ldots,5 \qquad (2.7.)$$

ahol minden vektor az alap (1) koordinátarendszerben van értelmezve. A j-ik csukló forgásából származó kéz-sebességkomponenst jelöljük $\underline{v}_j^{6}$-tal, kéz-szögsebességkomponenst pedig $\underline{\omega}_j^{6}$-tal. A 2.1.ábra értelmében a 6. koordinátarendszer tengelyei mentén, ill. azok körül kivánjuk a kart mozgatni, ezért $\underline{v}_j^{6}$-ot ill. $\underline{\omega}_j^{6}$-ot a kéz-koordinátákkal kell kifejeznünk. Ehhez képeznünk kell az ${}^{o}\underline{A}_6$ mátrix 3 x 3-as bal felső particiójának transzponáltját, amit ${}^{6}\underline{C}_o$-nak nevezünk. Igy

$$\begin{bmatrix} {}^{6}\underline{v}_j \\ \\ {}^{6}\underline{\omega}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{6}\underline{C}_o & \underline{\emptyset} \\ \\ \emptyset & {}^{6}\underline{C}_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{v}_j{}^{1} \\ \\ \underline{\omega}_j{}^{1} \end{bmatrix}, \quad j = 0,\ldots 5$$

(2.8)

kifejezi $\underline{v}_j$-t és $\underline{\omega}_j$-t kéz koordinátákkal. E vektor komponensei megegyeznek a PÁSZTÁZ,EMEL,KINYUJT,BILLENT, FORDIT,CSAVAR parancsokkal. A (2.2) egyenletet figyelembe véve, ha (2.8) -t elosztjuk $\dot{q}_j$-vel, megkapjuk a $\underline{J}$ mátrix j-ik oszlopát.

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} {}^{6}\underline{C}_o & \emptyset \\ \\ \emptyset & {}^{6}\underline{C}_o \end{bmatrix} * \left[\begin{array}{c|c|c|c} \underline{k}_1 \times \underline{b}_{o6} & \underline{k}_2 \times \underline{b}_{16} & \cdots & \underline{k}_6 \times \underline{b}_{56} \\ \\ \underline{k}_1 & \underline{k}_2 & & \underline{k}_6 \end{array}\right]$$

(2.9)

Mint látható, már a $\underline{J}$ mátrix elemeinek előállitása is meglehetősen számitásigényes, a módszer fő hátránya azonban az, hogy $\underline{J}$-t a (2.4) összefüggés szerint még invertálnunk is kell. Mivel $\underline{J}$ egy 6 x 6-os mátrix, ez a müvelet még nagyteljesitményü számitógépeken is jelentős időt vesz igénybe. Egy LSI-11 mikroszámitógépen például a mátrixinverzió legalább 0.1-0.5 másodpercig tartana az invertáló algoritmustól függően. Igy a csuklószögek mintavételezése csak alacsony frekvencián történhet és a manipulátor-kéz jelentősen eltávolodhat a kivánt pályától. A számitás felgyorsitható, ha numerikus interpolációt és look-up táblákat használunk $\underline{J}$ előre kiszámitott értékeivel. Ez a módszer viszont rendkivül sok memóriát igényel.

2.1.2. A csuklók függetlenitett vezérlése

Könnyebben kiértékelhető egyenletek felállitására vezet Hewitt módszere [Hewitt, 1978], aki redundáns számu csuklóval rendelkező manipulátorok vezérlésére javasolt megoldást.(A csuklók száma több, mint a vezérelni kivánt változóké.) Megfontolásai arra irányulnak, hogy linearizálja és függetlenitse a mozgást leiró egyenletrendszer elemeit. A rendszerben mutatkozó redundancia lehetővé teszi egy pótlólagos irányitandó változó bevezetését. A megoldáshoz vezető lépések az alábbiak:

1. bevezetünk egy bővitett pozicióvektort, amely tartalmazza az uj irányitandó változót is. Jelöljük a bővitett pozicióvektort $\underline{s}$-sel, a csuklóváltozókat $\underline{q}$-val.
2. Felállitjuk a kar geometriáját leiró $\underline{s} = \underline{f}(q)$ egyenletet.
3. Képezzük a $\underline{J}(q)$ mátrixot. (Lásd a 2.2.1. pontot.) A $\underline{J}(\underline{q})$ mátrix utolsó sora $\{\partial z/\partial q_i\}$, $1<i<n$, ahol z az ujonnan bevezetett változó és n a csuklók száma. Legyen a vezérelt pont kivánt pozicióvektora $\hat{\underline{s}}$.
Képezzük az $\underline{e} = \underline{s} - \hat{\underline{s}}$ vektort, vagyis a tényleges és a kivánt poziciók különbségét. E különbségvektor és a tagok szögsebességeinek kapcsolatát fejezi ki a

$$\dot{\underline{q}} = \underline{K} * \underline{e} \qquad (2.1o)$$

összefüggés. A $\underline{K}$ mátrix $k_{i,j}$, $1<i,j<n$ elemeit kell ugy

megválasztanunk, hogy megkapjuk a kivánt rendszerjellemzőket. A módszer alapgondolata, hogy diagonalizáljuk az $\underline{s}$ válaszvektor és $\hat{\underline{s}}$ kivánt vektor kapcsolatát kifejező mátrixot. Ebben az esetben ugyanis az $\underline{s}$ elemeire vonatkozó kifejezések függetlenek lesznek egymástól. Tehát (2.2) és (2.lo) figyelembevételével:

$$\underline{J}(\underline{q}) * \underline{K} = \underline{D} \qquad (2.11)$$

ahol $\underline{D} = \langle d_{i,j} \rangle$, $1 \leq i \leq n$ diagonális. Ezzel a $\underline{K}$ mátrix:

$$\underline{K} = \underline{J}(\underline{q})^{-1} * \underline{D} \qquad (2.12)$$

Ha a $\underline{D}$ elemeit konstansnak választjuk, a teljes rendszer n darab lineáris, elsőrendü, független egyenletre esik szét. A pótlólagos vezérelt változó, illetve a megfelelő $\underline{K}$ mátrix segitségével eleget tehetünk speciális alkalmazási igényeknek, mint például energiaminimalizálás vagy akadálykikerülés.

Az ismertetett módszer azonban, minden előnye mellett, szintén igényli a $\underline{J}(\underline{q})$ mátrix invertálását, és az általunk vizsgált mechanizmusra azért sem alkalmazható, mivel ott a csuklók és az irányitandó paraméterek száma egyezik, vagyis a rendszer nem redundáns. Hewitt egy 3 csuklós problémát vizsgált, Moe egy sebességvezérlő algoritmust ismertet olyan esetre, amikor 4 csukló mellett és 3 sebesség-jellegü irányitandó változó adott. [Moe, 1972]

Az 2.1.1. és 2.1.2. pontban ismertetett megoldások számitásigényessége miatt a következőkben olyan módszert keresünk a manipulátor vezérlésére, ahol jóval korlátozottabb mennyiségü müveletet kell két mintavételezés között elvégezni, igy uj csuklópoziciók beolvasása nagyobb frekvenciával, pl. lo-2o ms-ként történhet. Ez a cél elérhető a továbbiakban ismertetendő *pozició-vezérléssel*. A "pozició" módszer hátránya a durva kézmozgásban mutatkozhat meg. Ezt a problémát azonban a 6. fejezetben ismertetendő gyors interpolációs technika alkalmazásával fogjuk megoldani.

2.2. POZICIÓVEZÉRLÉS

2.2.1. A manipulátor inverz problémájának megoldása általános szerelési algoritmusokkal

Mielőtt részletesen elemeznénk a csuklószögek számitásának általunk javasolt módszerét, röviden összefoglaljuk az Edinburgh-i Egyetemen, jelenleg, hasonló céllal folyó, számitógéppel vezérelt mechanikai szerelésre irányuló projekt (RAPT) lényegét. [Popplestone &al, 1978] Az általuk használt módszer a robot világában megjelenő tárgyak térbeli kapcsolatát irja le, s eközben nem tesz különbséget a manipulátor egyes tagjai és a manipulátor által mozgatott tárgyak között. A rendszer egyszerübb testekből összeépitett komplex szerelvényekkel is foglalkozik és képes annak meghatározására, hogy az összeépitéshez milyen akciók szükségesek. A rendszerben speciális helye van a részszerelvény ("subassembly") fogalmának: részszerelvényt alkotnak azok a testek, amelyek között egy szerelési müvelet vagy müveletsorozat során meghatározott, állandó térbeli kapcsolat áll fenn. A manipulátort szintén egy tagokból, csuklókból és megfogókból álló részszerelvénynek tekintik. A manipulátor-geometria leirása ebben a rendszerben tehát azt jelenti, hogy megadják az emlitett manipulátor-komponensek geometriai összetevői (felületek, élek, sarkok) között fennálló térbeli kapcsolatokat. A manipulátort - miközben a meg nem kötött szabadságfokoknak megfelelő mozgásokra képes - minden szituációban az emlitett kényszerkapcsolatok jellemzik.

A RAPT rendszerben a testeket geometriai összetevőikkel, a szituációkat pedig az összetevők között fennálló *fits, against, coplanar* térbeli kapcsolatokkal jellemzik. A rendszer a kapcsolatokból kikövetkezteti a szituációban résztvevő minden egyes test térbeli helyét és helyzetét. Az algoritmus első lépésében a megadott térbeli kapcsolatok leirására homogén koordinátás mátrixegyenleteket állitanak fel. A második lépésben - bizonyos korlátozó feltételek mellett - a program önállóan megoldja az egyenletrendszert. A korlátozó feltételek egyike jelenleg például az, hogy egy szituációban egyszerre ne forduljon elő több, mint három forgatás nem párhuzamos tengelyek körül. A bevezetőben emlitett X-Y robot, de sok más robot is, teljesiti ezt a feltételt. Az általunk vizsgálandó COROHAND manipulátor azonban több, mint 3 nem-párhuzamos forgástengelyt tartalmaz. Mivel a robottal szerelhető szituációk ritkán bonyolultak annyira, mint maga a manipulátor, a RAPT rendszer ezen vonatkozásával szemben jogosnak látszik az a megjegyzés, hogy még egy ilyen általános célu rendszerben is célszerü a manipulátor-problémát külön, speciális módon kezelni. A 6 csuklós manipulátor és egy elképzelt Descartes koordinátás kar (ami a kéz-poziciót és orientációt reprezentálja) viszonyát leiró egyenletek megoldását ésszerübb explicit formulákban megadni és ilyen módon a szerelőrendszerbe integrálni. A továbbiakban ebből a megközelitésből indulunk ki.

2.2.2. A javasolt pozicióvezérlés elve

A következőkben ismertetendő manipulátorvezérlési módszer alapgondolata az, hogy a csukló-szögsebességeket a trajektória egy adott pontjában megkapjuk, ha a 6 csuklószög-inkrementumot elosztjuk egy alkalmasan választott időtartammal. A csuklószögek számitását az 5. fejezet, az időtartam-hányados meghatározását a 6. fejezet tartalmazza. A javasolt "különbségi módszert" - a direkt sebességvezérlésnél alkalmazott idő szerinti differenciálás helyett - az teszi lehetővé, hogy elegendő kicsiny Δt időintervallumokra az

$$\underline{x}(t) = f[\underline{q}(t)] \qquad (2.13)$$

összefüggés jó közelitéssel lineárisnak tekinthető. Módszerünk tehát az, hogy az előirt trajektória elegendően sok pontjára megoldjuk a

$$\underline{q}_i = f^{-1}(\underline{x}_i) \quad \text{(i a trajektóriapontokon futó index)} \qquad (2.14)$$

inverz összefüggést és az [i, i+1] szakaszon linearizáljuk. A mozgás sebességét a csukló-hajtások fizikai korlátaiból számoljuk, az $\underline{x}_i$ pontok számát pedig a megengedett pályakövetési hibákból határozzuk meg. Mivel a (2.14) összefüggés kiértékelése és a további csuklószög-koordináció elvégzése időt vesz igénybe, s e számitásokat a nagy memóriaigény elkerülése végett célszerü "menet közben" végezni, az eredő mozgás sebessége és pontossága egymással forditott arányban fog állni. Ez indokolja azt az egyébként is szokásos manipulátorvezérlési stratégiát, hogy a nagyobb utszakaszokat gyorsan, de kevésbé pontosan, a kisebbeket, amelyek általában illesztési feladatokkal kapcsolatosak, lassan, de pontos pályakövetéssel teszi meg a robotkar. Az alkalmazott rezolució felső határát az szabja meg, hogy a mechanizmus milyen pontossággal képes követni a kiadott parancsot.

A fentiek alapján a TCP által bejárt pálya számitása az alábbi lépésekből fog állni.

1. A manipulátor geometriai leirása transzformációs mátrixok felállitásával. Ezek homogén koordinátákkal kifejezett, 4 x 4-es mátrixok, amelyek a manipulátor egyes elemeihez koordinátarendszerek relativ pozicióját és orientációját rendelik hozzá. Ilyen kitüntetett elem a manipulátor alapja, az egyes csuklók (például a "VÁLL" vagy a "KÖNYÖK"), továbbá a szerszám ill. megfogó. (3.fejezet)

2. Általános formában, a transzformációs mátrixok felhasználásával, a 6 csuklószögre megoldjuk a (2.14) egyenletet, vagyis megkeressük a kar inverz problémájának megoldását. Alkalmas interpretációt keresünk a kéz-állapot leirására, majd pedig kiszámitjuk azokat a csuklószögeket, amelyek a manipulátor végpontját egy tetszőleges állapotba viszik. (4.és 5.fejezet)

3. A robotkezet végigvisszük egy trajektóriaszegmensen, vagyis a trajektória i-ik és(i+1)-ik pontja között. Meghatározzuk a (2.14) összefüggés linearizálásából származó pályakövetési hibát és a fizikai környezet (motorok) által behozott korlátozások miatt elvileg elérhető sebességet.

Az igy meghatározott értékeket alapul véve koordináljuk a 6 csukló mozgását. A csuklószög-interpolációs módszer lényege, hogy a 2. szerint kiszámolt csuklópoziciók közé, a korlátozásokat figyelembe vevő kvadratikus interpoláció eredményeként, további csuklópoziciókat helyezünk, amelyeken áthaladva a manipulátor zökkenésmentesen fog mozogni. A szegmenshatárokon való áthaladást hasonló módon simitjuk. (6.fejezet)

3. A MANIPULÁTOR GEOMETRIAI MODELLJE

3.1. A MANIPULÁTOR SZERKEZETI FELÉPITÉSE

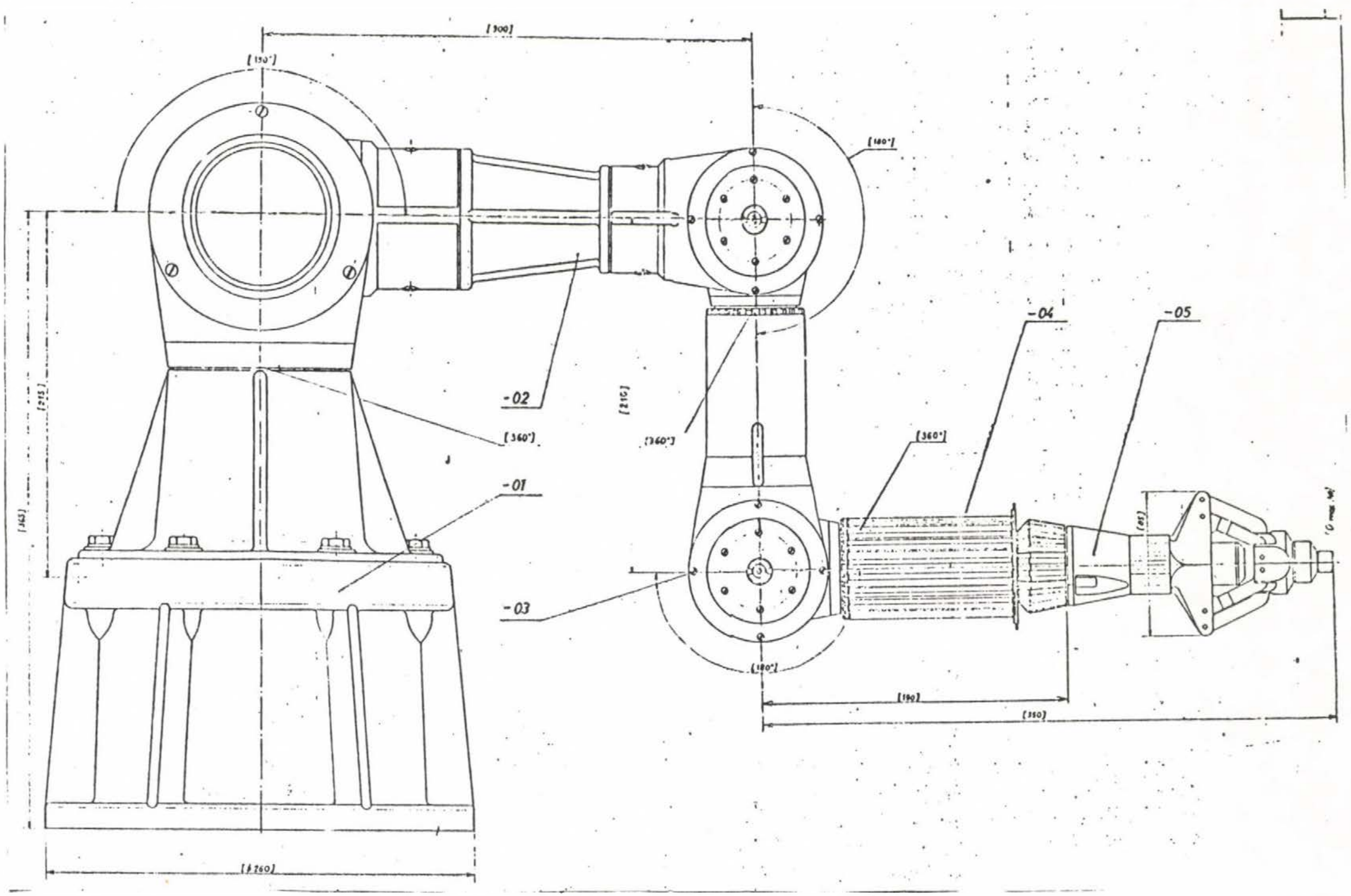
A jelen dolgozatban tárgyalt COROHAND robotkar egy 6 R tipusu csuklóval rendelkező, elektromos meghajtásu csuklós mechanizmus. A csuklókat egyenáramu szervómotorok hajtják, a csuklópoziciókat szöghelyzetérzékelők mérik. A kar méretei: (3.1. ábra)

ALAP - VÁLL távolság (A): 365 mm
VÁLL - KÖNYÖK távolság (B): 3oo mm
KÖNYÖK - CSUKLÓ távolság (C): 21o mm
CSUKLÓ - MEGFOGÓ TŐ távolság (D): 19 mm
} KAR

MEGFOGÓ HOSSZ: 16o mm
MEGFOGÓ NYILÁS: max. 18o mm
} KÉZ

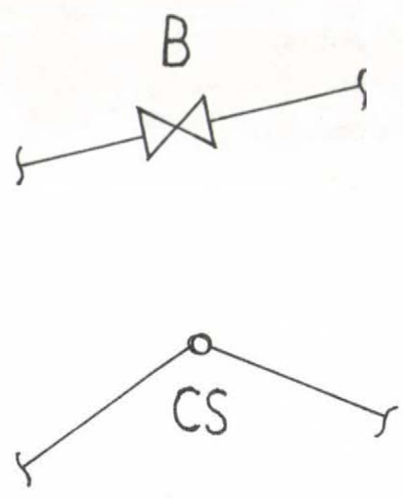
Mivel több, különböző méretü megfogó is készült, a kinematikai számitásoknál a kéz állapotát a megfogó tövéhez transzformáljuk és a csuklószögeket a megfogó csatlakozófelület poziciójából és orientációjából fogjuk számitani. A jobb szemléltetés kedvéért a további rajzokon alkalmazni fogjuk a megfogó ill. szerszám szimbolikus jelét ( ), de ennek (H)-val jelölt szimmetriapontja a manipulátor végcsonkjának pozicióját fogja jelenteni. A továbbiakban a végcsonkot és a kezet a szövegben sem fogjuk megkülönböztetni, és általában a manipulátor megfogójára fogunk hivatkozni.

Mint a 3.1. ábrán látható, a COROHAND a tagok kétféle kapcsolatát tartalmazza: csavaró (CS) kapcsolatot és billenő (B) kapcsolatot. Ezek szimbolikus jelölése a 3.2. ábrán látható.



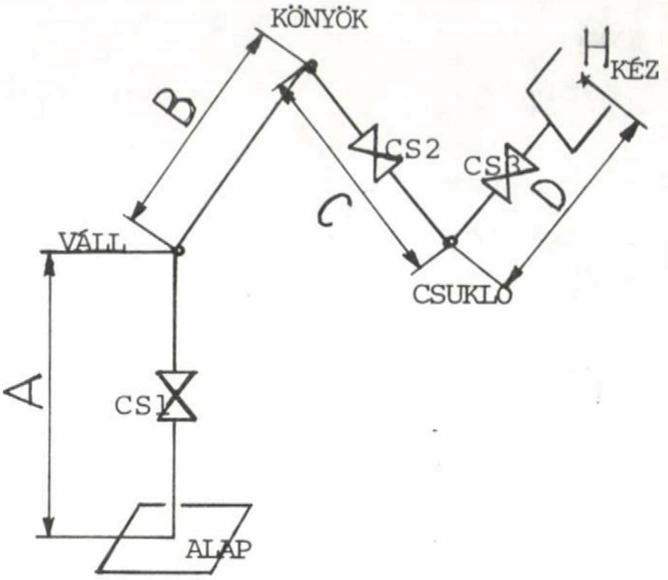
A COROHAND mechanikai felépitése

3.1. ábra



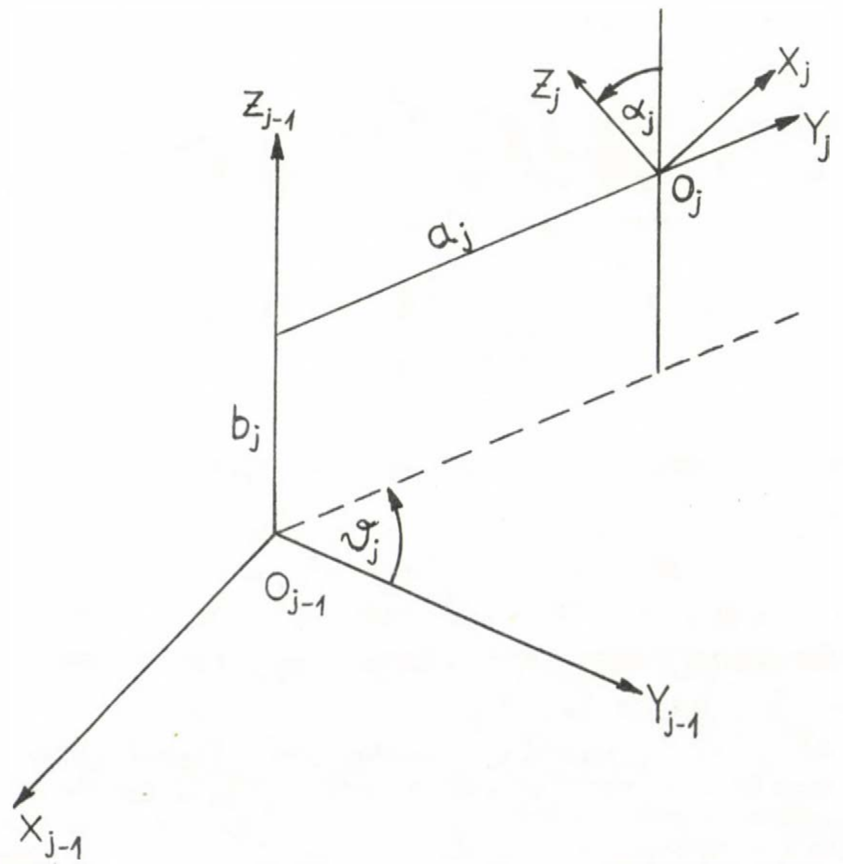
Csuklótipusok

3.2. ábra



Kinematikai elrendezés

3.3. ábra



Csukló-koordinátarendszerek kapcsolata

3.4. ábra

A kétféle kinematikai kapcsolat között a mechanizmusok elmélete nem tesz különbséget, mindkettő a forgó R ("revolute") csuklók osztályába tartozik, és mivel az általuk megengedett mozgás egyetlen változóval (csuklószöggel) leirható, 1 szabadságfoku kapcsolatnak nevezhetjük őket. [Denavit, Hartenberg, 1964]. Az általunk vizsgált robotkar 6 ilyen csuklókapcsolatot tartalmaz, amelyek együttesen egy *6 szabadságfoku manipulátort* alkotnak.

A COROHAND kinematikai vázlatában (3.3.ábra) a B és CS jelöléseket alkalmaztuk. A három billenő tengely alkotja a VÁLL, KÖNYÖK, CSUKLÓ izületeket. A kar moduláris kiképzésü, a KÖNYÖK és CS2 izületek az őket követő kartagokkal együtt eltávolithatók. A B tipusu izületek 18o^{o}-os, a CS tipusunak 36o^{o}-os szögtartományban mozognak.[Zilahi, 1979]

A manipulátor végcsonk és a megfogó közé egy erő-nyomaték érzékelőt lehet illeszteni, ami a szereléshez szükséges környezeti visszacsatolást biztositja.[Fock& al, 198o]

3.2. KOORDINÁTARENDSZEREK ÉS JELÖLÉSEK

A manipulátor komponenseinek pozicióját és orientációját a csuklós mechanizmusoknál alkalmazott Denavit-Hartenberg reprezentációban adjuk meg. [Denavit, Hartenberg, 1964] A vonatkozó irodalomban ennek a reprezentációnak a használata a leggyakoribb, példa erre [Moe, 1972],[Whitney, 1972],[Paul, 1972], stb. A 3.4.ábra az egymást követő komponensekhez kapcsolt (j-1)-ik illetve j-ik koordinátarendszer kapcsolatának leirásához használt jelöléseket mutatja. A csuklószögek az óra járásával ellentétes irányban pozitivak.

- ϑ_j a Z_{j-1} körüli elforgatás szöge, vagyis az Y_{j-1}, Y_j tengelyek által bezárt szög;
- α_j a Z_{j-1} és Z_j tengelyek által bezárt szög, amit a két tengely közös normálisa körül értelmezünk;
- a_j a Z_{j-1} és Z_j közötti közös normális hossza, iránya Y_j irányába pozitiv;
- b_j a Z_{j-1} nek az az értéke, ahol a Z_{j-1} és Z_j közös normálisa Z_{j-1}-t elmetszi;
- O_{j-1} a (j-1)-ik koordinátarendszer origója.

Legyen egy p pont j-1-ik koordinátarendszerbeli reprezentációja

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{j-1} = \underline{p}_{j-1} \qquad (3.1)$$

és ugyanezen pont j -ik koordinátarendszerbeli reprezentációja

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{j} = \underline{p}_{j} \qquad (3.2)$$

A két reprezentáció kapcsolata:

$$\underline{p}_{j-1} = \underline{A}_{j-1,j} * \underline{p}_j \qquad (3.3)$$

ahol $\underline{A}_{j-1,j}$ egy 4 x 4-es mátrix:

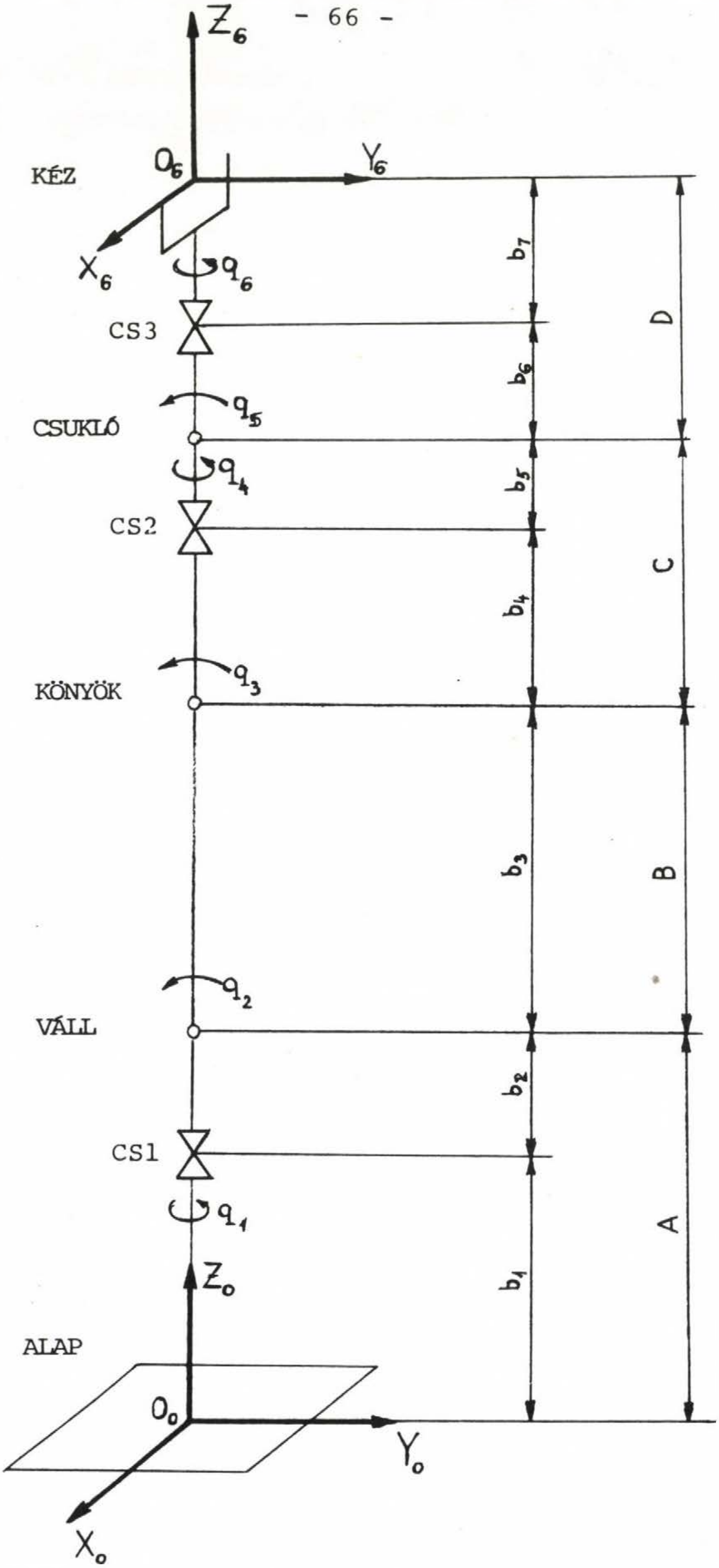
$$\underline{A}_{j-1,j} = \begin{bmatrix} c\vartheta_j & -s\vartheta_j & 0 & 0 \\ s\vartheta_j & c\vartheta_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c\alpha_j & \emptyset & s\alpha_j & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & a_j \\ -s\alpha_j & 1 & c\alpha_j & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c\vartheta_j\, c\alpha_j & -s\vartheta_j & c\vartheta_j\, s\alpha_j & -a_j\, s\vartheta_j \\ s\vartheta_j\, c\alpha_j & c\vartheta_j & s\vartheta_j\, s\alpha_j & a_j\, c\vartheta_j \\ -\, s\alpha_j & \emptyset & c\alpha_j & b_j \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.4)$$

A (3.4) kifejezésben az "s" és "c" betük a sinus illetve cosinus függvényeket jelölik. A bal felső 3 x 3-as partició a j-ik koordinátarendszer orientációját a (j-1)-ikhez képest, a jobb felső 3 x 1-es oszlopvektor a j-ik koordinátarendszer origójának pozicióját jelöli ki O_{j-1}-hez képest.

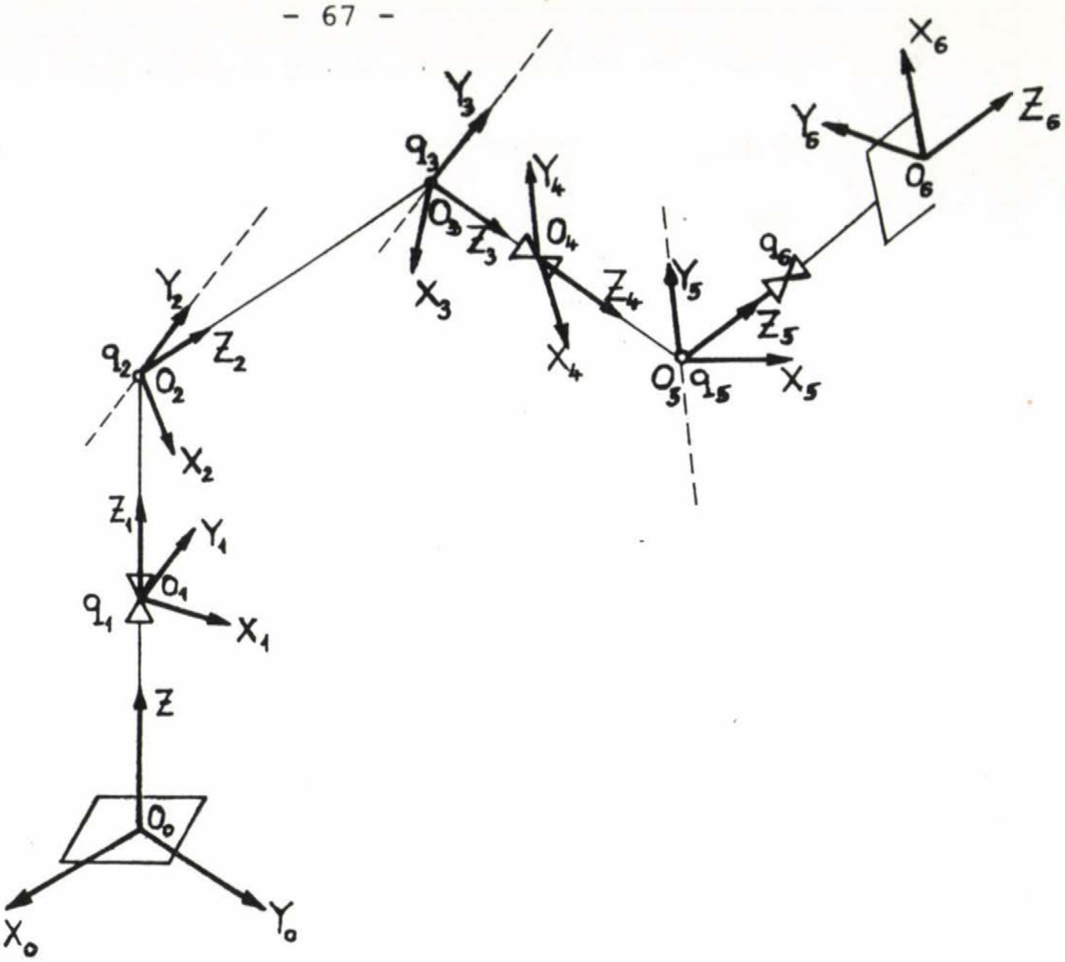
3.3. MANIPULÁTOR GEOMETRIA

Alkalmazzuk a 3.2. pontban bevezetett jelöléseket a 3.3. ábrán feltüntetett manipulátor geometriai leirására. Referenciaállapotként válasszuk a karnak az alapra merőlegesen, felfelé kinyujtott helyzetét.Igy a 3.3. ábrán H-val jelölt megfogó referencia poziciója [$\emptyset$, $\emptyset$, (A+B+C+D)] , mig a referencia orientáció [$\emptyset$, $\emptyset$, $\emptyset$]. Tehát a 2.1. ábrán SWEEP-pel jelölt mozgás az alap koordinátarendszer X tengelyének, a REACH mozgás a Z tengelyének irányába történik. (3.5.ábra) Mint a 3.6.ábrán az egyes csuklókhoz rendelt koordinátarendszerek irányitásából megállapitható, a (3.4) mátrixkifejezésben az a_j mennyiség minden j-re $\emptyset$, mivel a rud-irányokhoz mindig a z tengelyt rendeltük. A manipulátorgeometriának ez a szimmetriatulajdonsága a további számitások során nagyon előnyös lesz, mivel a (3.4) mátrix jobb felső két oszlopeleme eltünik. Az is látható, hogy minden egyes csuklómozgás egyetlen skalár változóval (q_j) j = 1...6 leirható, vagyis minden csukló a robot egy mozgási szabadságfokát reprezentálja. A 3.5.ábra jelölései szerint a q_1, q_4, q_6 pozitiv forgatások a kart a Z_o tengely körül, a q_2, q_3, q_5 pozitiv forgatások pedig az Y_o tengely körül forgatják az óra járásával ellentétes irányba. A q_1, q_4, q_6 forgatások csavaró (longitudinális), a q_2, q_3, q_5 forgatások pedig billenő (tranzverzális) tipusu csuklómozgást valósitanak meg (v.ö. 3.7.ábra), mivel az előbbieknél a forgástengely a kapcsolódó rudakkal egybeesik, az utóbbiaknál pedig merőleges azokra.[Konstantinov, 1977] Látható továbbá, hogy b_1+b_2 = A, b_3 = B, b_4+b_5 = C, b_6+b_7 = D. Ezt az egyszerüsitést az indokolja, hogy az eredő transzformációs mátrix elemeit tekintve közömbös, hogy egy longitudinális forgás két tranzverzális forgás között hol helyezkedik el. Az egyes csuklómozgásokat a (3.4.) mátrixkifejezésbe helyettesitve az alábbi transzformációkat kapjuk:



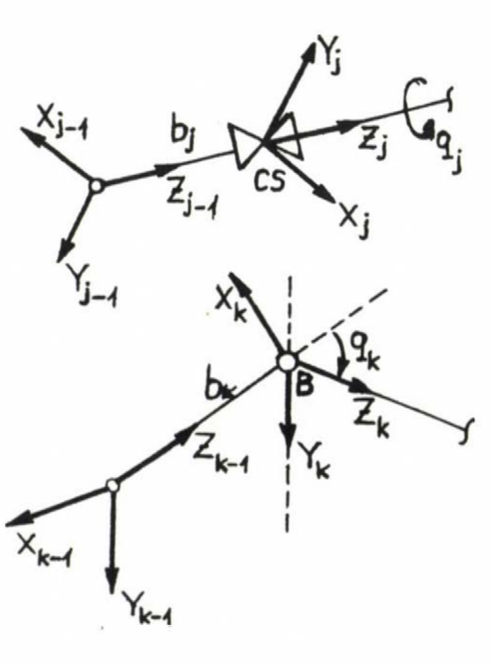
A manipulátor referencia állapota

3.5. ábra



A COROHAND csukló-koordinátarendszerei

3.6. ábra



$$\underline{A}_{j-1,j} = \begin{bmatrix} cq_j & -sq_j & \emptyset & \emptyset \\ sq_j & cq_j & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 & b_j \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{A}_{k-1,k} = \begin{bmatrix} cq_k & \emptyset & sq_k & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ -sq_k & \emptyset & cq_k & b_k \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix}$$

A két csuklótipus transzformációs mátrixai

3.7. ábra

$$\underline{A}_{o,1} = \begin{bmatrix} cq_1 & -sq_1 & \emptyset & \emptyset \\ sq_1 & cq_1 & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 & b_1 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.5)$$

$$\underline{A}_{1,2} = \begin{bmatrix} cq_2 & \emptyset & sq_2 & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ -sq_2 & \emptyset & cq_2 & b_2 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.6)$$

$$\underline{A}_{2,3} = \begin{bmatrix} cq_3 & \emptyset & sq_3 & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ -sq_3 & \emptyset & cq_3 & b_3 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.7)$$

$$\underline{A}_{3,4} = \begin{bmatrix} cq_4 & -sq_4 & \emptyset & \emptyset \\ sq_4 & cq_4 & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 & b_4 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.8)$$

$$\underline{A}_{4,5} = \begin{bmatrix} cq_5 & \emptyset & sq_5 & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ -sq_5 & \emptyset & cq_5 & b_5 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.9)$$

$$\underline{A}_{5,6} = \begin{bmatrix} cq_6 & -sq_6 & \emptyset & \emptyset \\ sq_6 & cq_6 & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 & b_6+b_7 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.1o)$$

Látható, hogy a(3.lo)mátrix közvetlenül az 5. koordinátarendszer és a megfogó közötti trnaszformációt fejezi ki.

Ha tehát a megfogó felöl az alap felé haladunk, az alábbi transzformációkat kell elvégeznünk:

- eltolás Z irányban és forgatás Z körül: D, q_6
- forgatás Y körül: q_5
- eltolás Z irányban és forgatás Z körül: C, q_4
- forgatás Y körül: q_3
- eltolás Z irányban: B
- forgatás Y körül: q_2
- eltolás Z irányban és forgatás Z körül: A, q_1

Az eltolások rögzitettek, a forgatásokat vezéreljük.(U.n. "prizmatikus csuklók" esetén az eltolást lehet változtatni - pl. Stanford robot.)

3.4. AZ EREDŐ TRANSZFORMÁCIÓ MEGHATÁROZÁSA

3.4.1 Transzformáció O_o (ALAP) és O_3 (KÖNYÖK) között

Szorozzuk össze az alaptól elindulva az első három transzformációs mátrixot. $\cos q_1$-t cl-gyel, $\sin q_1$-t sl-gyel jelölve:

$$\begin{bmatrix} c1 & -s1 & \emptyset & \emptyset \\ s1 & c1 & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 & b_1 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c2 & \emptyset & s2 & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ -s2 & \emptyset & c_2 & b_2 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c3 & \emptyset & s3 & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ -s3 & \emptyset & c3 & b_3 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} c1c23 & -s1 & c1s23 & Bc1s2 \\ s1c23 & c1 & s1s23 & Bs1s2 \\ -s23 & \emptyset & c23 & A+Bc2 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} = \underline{A}_{o,3} \qquad (3.11)$$

ahol $c23 = \cos(q_2 + q_3) = c2c3 - s2s3$

$s23 = \sin(q_2 + q_3) = s2c3 + c2s3$

A 3.11 mátrixot 12 szorzási müvelettel lehet előállitani.

3.4.2. Transzformáció O_3 (KÖNYÖK) és O_6 (KÉZ) között

Most tekintsük a másik transzformációt az alaptól távolodva:

$$\begin{bmatrix} c4 & -s4 & \emptyset & \emptyset \\ s4 & c4 & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 & b_4 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c5 & \emptyset & s5 & \emptyset \\ \emptyset & 1 & \emptyset & \emptyset \\ -s5 & \emptyset & c5 & b_5 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c6 & -s6 & \emptyset & \emptyset \\ s6 & c6 & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 & b_6+b_7 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c4c5c6 - s4s6 & -c4c5s6 - s4c6 & c4s5 & Dc4s5 \\ s4c5c6 + c4s6 & -s4c5s6 + c4c6 & s4s5 & Ds4s5 \\ -s5c6 & s5s6 & c5 & C+Dc5 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} = \underline{A}_{3,6}$$

(3.12)

A(3.12) transzformációban az eltolás vektora (4.oszlop) egyszerüen számolható a 3. oszlopból felhasználva a rögzitett $C = b_4 + b_5$ és $D = b_6 + b_7$ rudhosszakat. E mátrix felállitásához 15 szorzást kell végezni.

A pozicióvezérlést végző program először a(3.12)mátrix bal felső 3 x 3-as particióját számitja ki 12 szorzással, majd az utolsó oszlopot számolja a 3. oszlopból és a rudhosszakból.

3.4.3 Számitási megfontolások

Amint azt a 2. fejezetben emlitettük, igen lényeges a manipulátor-transzformációk számitási idejének minimalizálása. Ennek egyik módja a szükséges aritmetikai müveletek, elsősorban a szorzások-osztások számának lehető legkisebbre való csökkentése.

Megtehetnénk, hogy az elemi transzformációkat leiró (3.5)...(3.1o) mátrixokat egyszerüen összeszorozzuk, s igy előállitjuk az eredő manipulátor-transzformációt, amelynek jelölése $\underline{A}_{o,6} = [a_{i,j}]$, i,j = 1,2,3,4. A végcsonk orientációját az alaphoz képest a bal felső 3 x 3-as partició adja, azaz $(a_{i,j})$, i,j = 1,2,3,pozicióját pedig az $(a_{14}\ a_{24}\ a_{34})^T$ vektor. Az $\underline{A}_{o,6}$ mátrix elemeit a 6 csuklószög sinusának és cosinusának polinomjai alkotják. Egy ilyen polinom minden tagja legalább egy csuklószög sinusát vagy cosinusát tartalmazza. Az eredő pozicióvektorban az eltolási konstansok (A, B, C, D) és a csuklószögek sinusának ill. cosinusának szorzatai jelennek meg.

Az alábbiakban az optimális számitási eljárás megtalálása érdekében megvizsgáljuk, hogyan lehet a kar transzformációs mátrixát kiszámitani.

a) A hat 4 x 4-es mátrix összeállitása és összeszorzása

$[4 \times 4 \times 4](6 - 1) = 32o$ szorzást igényel.

b) Mivel az utolsó sor minden mátrixban ($\emptyset$ $\emptyset$ $\emptyset$ 1), ezt egyszerüen átvihetjük az eredménymátrixba. Ekkor

$[4 \times 3 \times 3](6 - 1) = 18o$ szorzásra van szükség.

c) Tudjuk, hogy minden mátrix csak egyetlen koordinátatengely körüli forgatást ir elő, amely egyidejüleg csak két koordinátát változtat (X-t és Y-t vagy X-t és Z-t) és még egy eltolást tartalmaz a Z tengely irányában. Ebből következik, hogy az általános mátrixszorzást forgatási és eltolási operátorokkal helyettesithetjük. Ellenőrizhető, hogy egy ilyen müvelet

$[4 \times 2 \times 2](6 - 1) = 8o$ szorzást igényel.

d) Tekintve, hogy az $\underline{A}_{3,6}$ (KÖNYÖK-KÉZ) mátrixot 15 szorzással tudjuk kiszámitani (3.4.2. pont), a c)-ben leirt megfontolásokkal kombinálva:

$15 + [4 \times 2 \times 2](4 - 1) = 63$ szorzást kell végeznünk.

e) Ha először az $\underline{A}_{o,3}$ mátrixot számoljuk ki 12 szorzást felhasználva, majd egyenként folytatjuk a szorzást a továbbiakban mátrixokkal,

$12 + [(2 \times 2 + 1] \times 3](4 - 1) = 57$ szorzásra van szükség.

f) S végül, ha $\underline{A}_{o,3}$-t és $\underline{A}_{3,6}$-t külön-külön számoljuk ki (3.4.1 és 3.4.2 pont), majd összeszorozzuk őket,

$12 + 15 + [3 \times 4 \times 3] = 63$ szorzást kell végeznünk.

Noha az e) szerinti módszer a leggyorsabb, a programban mégis külön-külön számoljuk $\underline{A}_{o,3}$-t és $\underline{A}_{3,6}$-t és összeszorozzuk őket az f) pont szerint. E választásnak két oka van:

- az e) módszer a választottnál lényegesen több számitógépmemóriát igényel;
- a kéz orientációt alkalmas módon definiálva (4.fejezet) az $\underline{A}_{3,6}$ mátrix bal felső 3 x 3-as particiója ugyanazt a formát ölti, mint a kéz orientációt leiró mátrix és igy mindkettő számitásához ugyanaz a program használható.

$\underline{A}_{o,3}$ és $\underline{A}_{3,6}$ összeszorzásához a program egy mátrixszorzó rutint használ, amely két 3 x 3-as mátrixot szoroz össze, és az utolsó oszlopot külön számolja. Mint az 5.6. pontban látni fogjuk, az eredő kézorientáció azonos módon számolható, mint a q_4, q_5, q_6 szögek.

4. A ROBOTKÉZ ORIENTÁCIÓJA

4.1. PARAMÉTERVÁLASZTÁS

Az aritmetikai müveletek mennyiségének csökkentése érdekében meg kell vizsgálnunk a megfogók állapotára vonatkozó parancsok alkalmas formában történő megadásának kérdését. Olyan parancs-interpretációt vezetünk be, amely illeszkedik az adott manipulátor geometriához.

Miközben a megfogó poziciójára vonatkozó parancs jelentése nyilvánvaló, t.i. az alap koordinátarendszerben megadjuk a manipulátor-kéz kivánt térbeli helyét, addig a megfogó térbeli helyzetét (orientációját) több módon is megadhatjuk. Az irodalomban leginkább elterjedt megadási módot a 2.1. ábrán láttuk, amely lényegében az éppen aktuális kéz-állapothoz van rögzitve és minden kéztengelyre megadja a soron következő transzlációt és rotációt. [Whitney, 1972]

Esetünkben előnyösebb egy olyan definiciót választani, amely
- egy külső referencia-koordinátarendszerhez van rögzitve és igy egyszerüvé teszi a trajektóriaprogramozást;
- megfelel az adott csuklórendezésnek.

A fenti követelményeknek az orientáció Euler szögekkel történő megadása felel meg [Vukobratovic, 1978], s a továbbiakban ezt fogjuk alkalmazni. A 2.1. ábrán feltüntetett "kéz koordinátákból" (TWIST, TILT, TURN) az Euler szögeket egy 3 ismeretlenes egyenletrendszer megoldásával kaphatjuk meg. Mivel ezek az egyenletek az ismeretlen Euler szögek 6 sinusát ill. cosinusát tartalmazzák, ez a feladat is meglehetősen számitásigényes.

A dolgozatban vizsgált probléma azonban ipari indittatásu (és nem orvosbiológiai), és feltételezi egy magasabb szintü robot-pályatervező rendszer meglétét, miáltal a manipulátorra vonatkozó parancsok egyszerü értelmezhetőségének ezen a szinten nincs tul nagy jelentősége.

4.2. DEFINICIÓS FORMALIZMUS

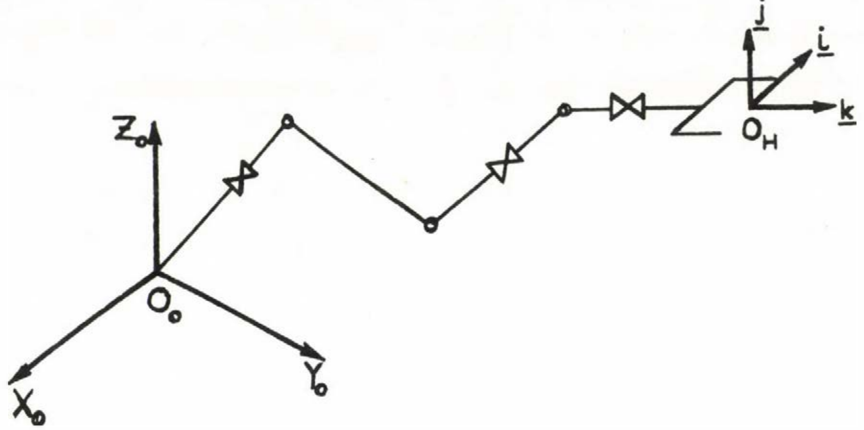
Legyenek $\{X_H, Y_H, Z_H\}$ az $\{\underline{i}, \underline{j}, \underline{k}\}$ vektorhármas O_H origójának derékszögü koordinátái az $\{X_o, Y_o, Z_o\}$ alap-koordinátarendszer O_o origójához képest.

Ekkor az

$$\underline{s}_H = \{X_H, Y_H, Z_H, \alpha, \beta, \gamma\} \qquad (4.1)$$

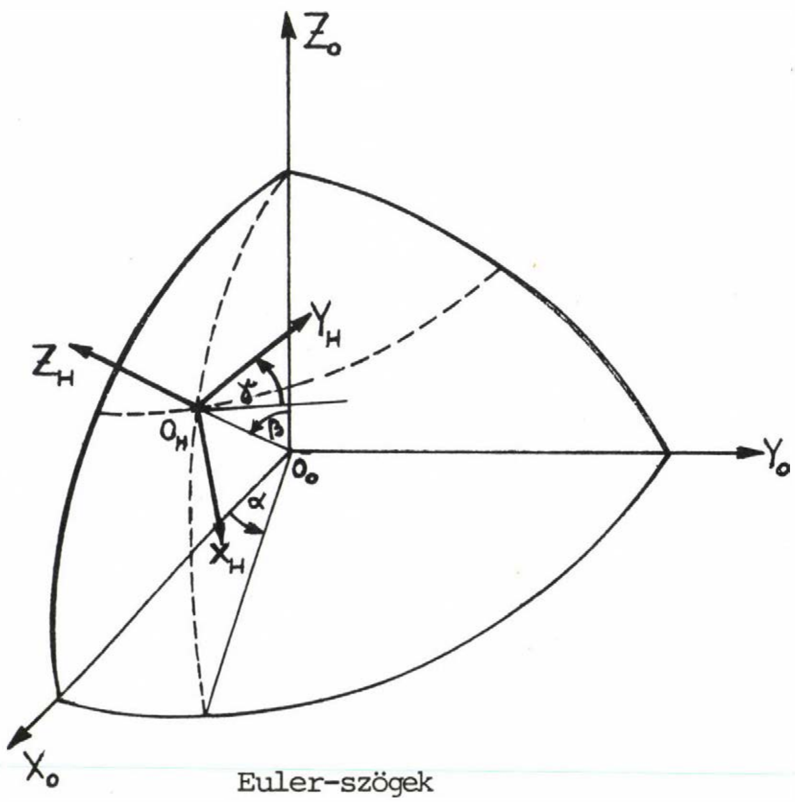
hatos olyan független mennyiségeket tartalmaz, amelyek teljesen meghatározzák $\{\underline{i}, \underline{j}, \underline{k},\}$pozicióját és orientációját az $\{X_o, Y_o, Z_o\}$ koordinátarendszerben. (4.1.ábra) A(4.1.) kifejezésben szereplő α, β, γ mennyiségek a kéz orientációját fejezik ki és jelentésük az alábbi: (4.2.ábra)

Általános esetben az orientáció parancs egy α forgatást jelent a Z_o tengely, egy β forgatást az Y_o tengely és egy γ forgatást a már elforgatott Z_H tengely körül. Lényeges, hogy a forgatások sorrendje általános, térbeli esetben nem felcserélhető. Az orientációnak ezen értelmezése és a vizsgált manipulátor csuklóelrendezése között közvetlen összefüggés van: a KÖNYÖK pontba rögzitett koordinátarendszerben az α,β,γ szögek megfelelnek a q_4, q_5, q_6 csuklószögeknek. Ez az a tulajdonság, amely a paraméterválasztást determinálta, s szorosan kapcsolódik az adott kar-konfigurációhoz: kihasználja azt a tényt, hogy *az utolsó három forgástengely egyetlen pontban*, a CSUKLÓban *metsződik*. A továbbiakban az Euler szögeket a 3.5. ábrán



Parancs-definició

4.1. ábra



Euler-szögek

4.2. ábra

feltüntetett referenciahelyzethez képest fogjuk megadni. A kéz-orientáció értelmezése a 4.3.ábrán látható. A γ szöget ugy tekinthetjük,mint az X_H tengelynek az X_o-Y_o alapsikkal párhuzamos S_o-S_1 egyenessel bezárt szögét. A β szög a Z_H tengelynek az alapsikra merőleges Z_o iránynyal bezárt szöge.Az α szög az X_H' és X_o tengelyek szöge, ahol X_H'-vel jelöltük a manipulátor megfogó X tengelyét a $-\gamma$, $-\beta$ forgatások után. Ez az értelmezés azt is láthatóvá teszi, miért nem kommutativak a forgatások.

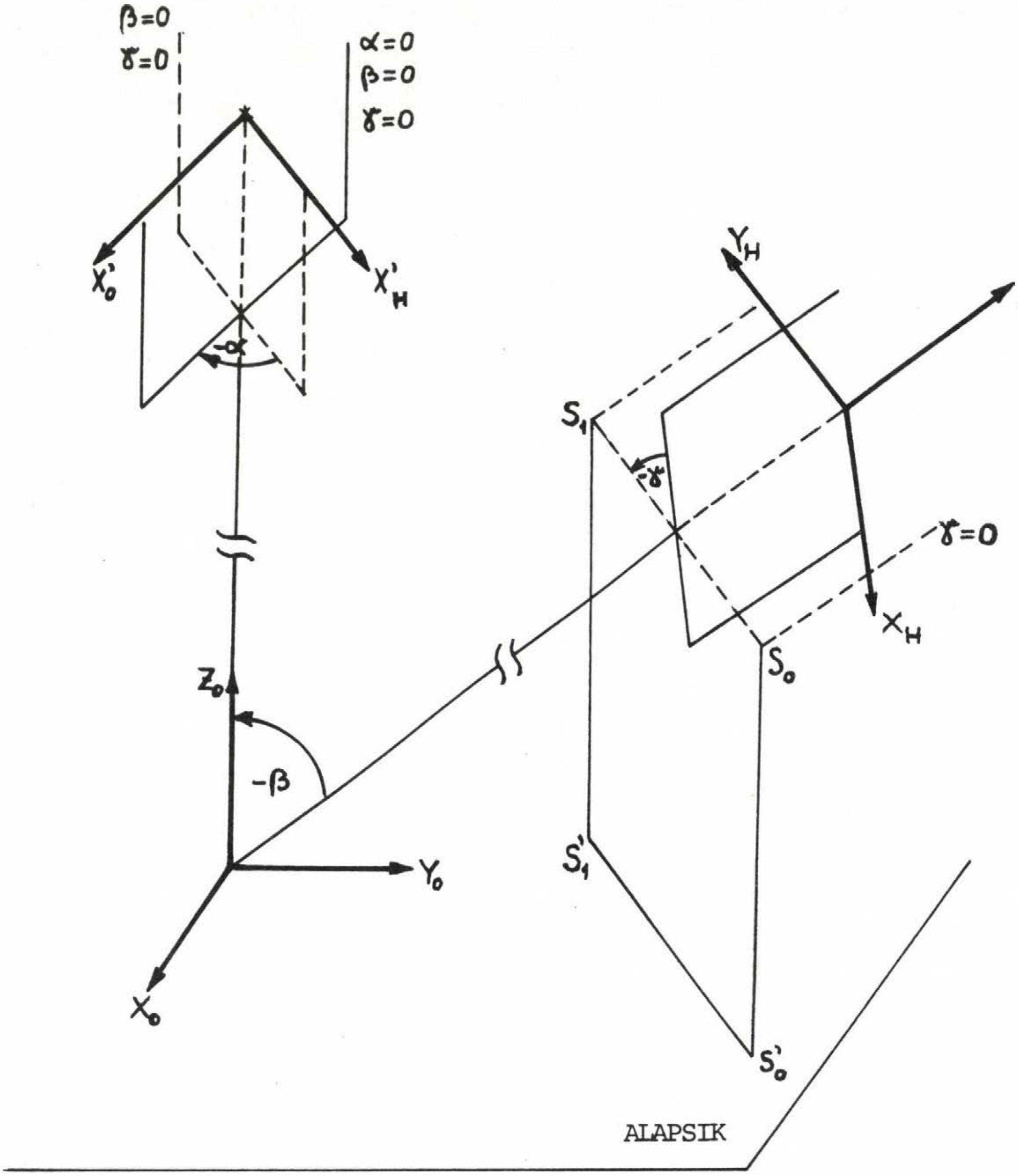
4.3. AZ ORIENTÁCIÓ MÁTRIXA

A megfogó térbeli orientációját leiró mátrixot az α,β,γ elemi forgatásokat leiró forgatómátrixok szorzataként képezzük:

$$\begin{bmatrix} C\alpha & -S\alpha & \emptyset \\ S\alpha & C\alpha & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C\beta & \emptyset & S\beta \\ \emptyset & 1 & \emptyset \\ -S\beta & \emptyset & C\beta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C\gamma & -S\gamma & \emptyset \\ S\gamma & C\gamma & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} C\alpha\, C\beta\, C\gamma - S\alpha\, S\gamma & -C\alpha\, C\beta\, S\gamma - S\alpha\, C\gamma & C\alpha\, S\beta \\ S\alpha\, C\beta\, C\gamma + C\alpha\, S\gamma & -S\alpha\, C\beta\, S\gamma + C\alpha\, C\gamma & S\alpha\, S\beta \\ -S\beta\, C\gamma & S\beta\, S\gamma & C\beta \end{bmatrix} = \underline{R}_E \qquad (4.2)$$

Ezt a mátrixot 12 szorzási müvelettel állithatjuk össze, s ehhez ugyanazt a programrutint használhatjuk, mint a 3.4.2 fejezetben a KÖNYÖK és a KÉZ közötti transzformáció forgatási particiójának kiszámitásához.



A manipulátor orientáció értelmezése

4.3. ábra

Ha $\beta = 0$ vagy $\beta = \P$, akkor a kezdeti és végállapotban a Z tengelyek egybeesnek és az α illetve γ forgatások azonos tengelyek körül hajtódnak végre. Tehát $\beta = 0$ esetén:

$$\begin{bmatrix} c\,(\alpha + \gamma) & -s\,(\alpha + \gamma) & 0 \\ s\,(\alpha + \gamma) & c\,(\alpha + \gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \underline{R}_E' \qquad (4.3)$$

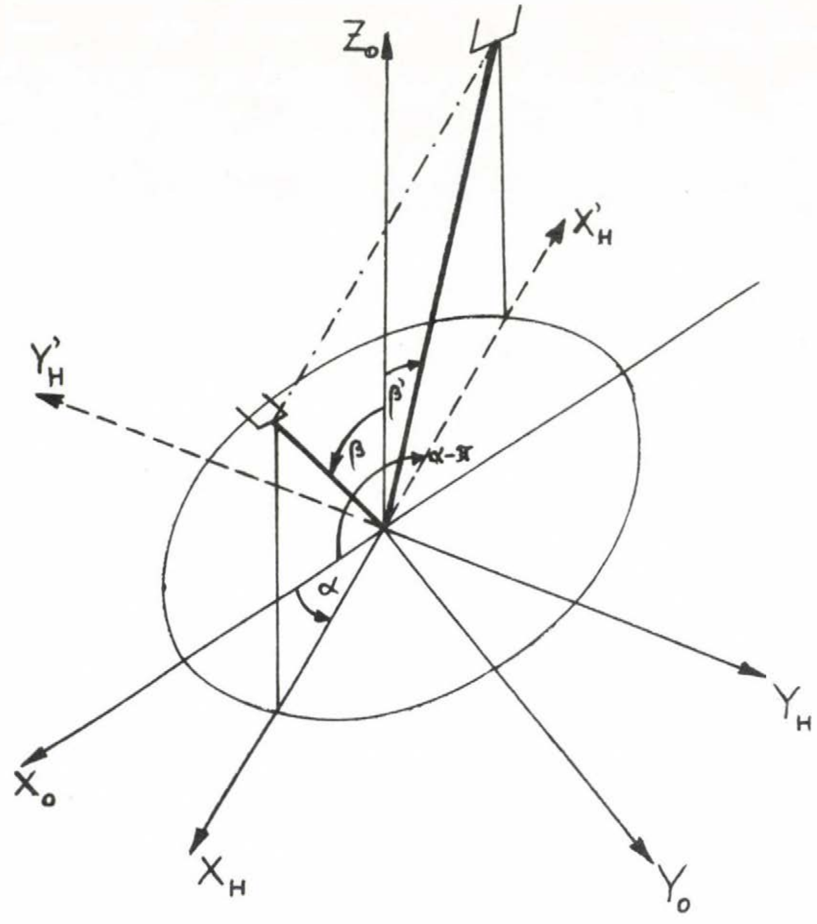
és $\beta = \P$ esetén:

$$\begin{bmatrix} -c\,(\alpha - \gamma) & s\,(\alpha - \gamma) & 0 \\ -s\,(\alpha - \gamma) & c\,(\alpha - \gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \underline{R}_E'' \qquad (4.4)$$

Azért, hogy a manipulátor orientáció értelmezésében elkerüljük a többértelmüséget, β értelmezési tartományát a $[0, \P]$ intervallumra korlátozzuk. Amint a 4.4. ábrán látható, az $[\alpha, \beta, \gamma]$ és $[\alpha-\P, -\beta, \gamma-\P]$ szög-hármasok ugyanahhoz az orientációhoz vezetnek.

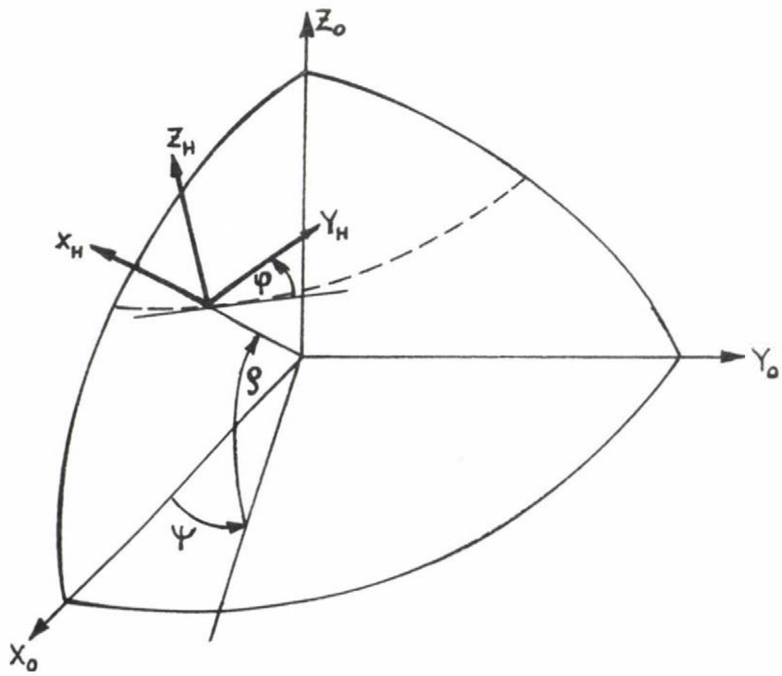
4.4. EULER SZÖGEK SZÁMITÁSA AZ ORIENTÁCIÓ MÁTRIXÁBÓL

A robotkéz állapotának *ellenőrzésekor* a vezérlő program a csukló-szögpozició érzékelők segitségével leolvasott csuklószög értékekből a 3.fejezetben leirt módon összeállitja a kar teljes transzformációs mátrixát. A kéz tényleges orientációját e mátrix bal felső 3 x 3 particiójából, vagyis az orientáció mátrixból számitja ki, amely az



Alternativ Euler-szögharmasok

4.4. ábra



"ROLL-PITCH-YAW" geometria

4.5. ábra

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \underline{R} \qquad (4.5)$$

formában adott. Ha a (4.5) mátrixot összehasonlitjuk az Euler szögekből képzett (4.2) mátrixszal, egyenleteket állithatunk fel α,β,γ-ra. A többszörös megoldások elkerülése végett a 4.3 pontnak megfelelően β-t $[\emptyset,\pi]$közé korlátozzuk. A megoldáshoz vezető egyik lehetséges ut az alábbi:

$$r_{33} = \cos\beta \quad \text{igy} \quad \beta = \arccos r_{33} \qquad (4.6)$$

Megjegyzés: a programban szereplő ARCCOS szubrutin β-ra éppen az előirt szögtartományt produkálja.

$$r_{11} + r_{22} = (c\alpha c\gamma - s\alpha s\gamma)(c\beta + 1) = c(\alpha+\gamma)(c\beta + 1) \qquad (4.7)$$

$$r_{21} - r_{12} = (s\alpha c\gamma + c\alpha s\gamma)(c\beta + 1) = s(\alpha+\gamma)(c\beta + 1) \qquad (4.8)$$

$$r_{11} - r_{22} = (c\alpha c\gamma + s\alpha s\gamma)(c\beta - 1) = c(\alpha-\gamma)(c\beta - 1) \qquad (4.9)$$

$$r_{21} + r_{12} = (s\alpha c\gamma - c\alpha s\gamma)(c\beta - 1) = s(\alpha-\gamma)(c\beta - 1) \qquad (4.1o)$$

Három esetet kell megvizsgálnunk:

1. $-1<r_{33}<1$ azaz $\beta \neq \emptyset$ és $\beta \neq \pi$ (4.11)

   ekkor (4.7) -ből és (4.8) -ból:

   $$\alpha=\gamma = \text{arc tan}\{(r_{21} - r_{12})/(r_{11} + r_{22})\} \qquad (4.12)$$

   és (4.9) -ből és (4.1o) -ből:

   $$\alpha=\gamma = \text{arc tan}\{(r_{21} + r_{12})/(r_{11} - r_{22})\} \qquad (4.13)$$

   és végül (4.12) -ből és (4.13) -ból megkapjuk α-t és γ-t.

2. $r_{33} = 1$ azaz $\beta = \emptyset$ (4.14)

Ebben az esetben $c\beta - 1 = \emptyset$ és igy (4.9) -t nem oszthatjuk el (4.1o)-zel. (4.12)-ből viszont meg-megkapjuk($\alpha + \gamma$)-t és az Euler szögeket a következőképpen választhatjuk meg:

$$\alpha' = \alpha+\gamma \quad , \quad \beta' = \beta = \emptyset \quad , \quad \gamma' = \emptyset \qquad (4.15)$$

3. $r_{33} = -1$, azaz $\beta = \P$ (4.16)

Hasonlóképpen, most (4.12)-t nem használhatjuk, de (4.13) -ból megkapjuk ($\alpha - \gamma$)-t és az uj Euler szögek:

$$\alpha'' = \alpha - \gamma, \quad \beta'' = \beta = \P \quad , \quad \gamma'' = \emptyset \qquad (4.17)$$

A manipulátor orientáció értelmezéséhez kiegészitésül érdemes megjegyezni, hogy a 4.2. pontban leirt Euler szögármas választás nem az egyetlen lehetséges konvenció. Például az ugynevezett "ROLL-PITCH-YAW" geometriához [Horn, Inoue, 1974] tartozó Euler szög megválasztás a 4.5 ábrán látható. Ilyen geometriával rendelkezik például a CINCINNATI MILACRON cég T^3 elnevezésü ipari manipulátora.

5. A MANIPULÁTOR-GEOMETRIA INVERZ PROBLÉMÁJA

5.1. A MEGOLDÁS ELVE

Miután matematikai formában leirtuk a robotkar geometriáját (3.fejezet) és alkalmas interpretációt találtunk a megfogó állapotának jellemzésére (4.fejezet), a következő feladat az *inverz probléma* megoldása, vagyis azoknak a csuklószögeknek a kiszámitása, amelyek egy adott robotkéz poziciót és orientációt előállitanak.

Figyelembe véve a vizsgált manipulátornak azt a tulajdonságát, hogy a kéz felé eső három forgástengely egyetlen pontban, a CSUKLÓ-ban metszi egymást, lehetséges a *6 ismeretlenes feladatot két* egyszerübb, *3 ismeretlenes problémára bontani*. Az előnyös geometriai elrendezés következtében először azt tudjuk meghatározni, hogy a CSUKLÓ *hol* helyezkedik el a TCP-hez képest, majd a CSUKLÓ immár ismert térbeli poziciójából egyértelmüen meghatározhatjuk az első három (q_1, q_2, q_3) csuklószöget: csak ez a három változó befolyásolja a CSUKLÓ pozicióját. Miután *független módon kisszámitottuk* q_1, q_2, q_3*-t*, fel tudjuk használni azokat a másik három csuklószög (q_4, q_5, q_6) kiszámitásához.

Megjegyzendő, hogy a feladat direkt megoldása anélkül, hogy a fenti előnyös geometriai tulajdonságot kihasználnánk, nagy nehézségbe ütközne, mivel a csuklószögeknek a teljes transzformációs mátrixban szereplő 6 sinusára és cosinusára összesen 12 polinomiális egyenletből álló egyenletrendszert kellene megoldanunk: az ismeretleneknek az egyenletek kombinálásával történő szukcessziv eliminációja egyetlen, igen magas fokszámu egyenlethez vezetne.

Ezért interpolációs technikát kellene alkalmaznunk, ahol a manipulátor konfigurációk egy véges, de igen nagyszámu halmazát kellene tárolnunk és a megoldást gradiens módszerrel és iterációval kombinálnunk: a megoldást ugy kapnánk meg, hogy a csuklószögek szukcessziv becsléseivel sorozatosan kiértékelnénk a manipulátor transzformációs mátrixát. Látható, hogy ez a módszer esetünkben nem használható, mivel igen lassu és különösen sok számitógép memóriát igényel. A szukcessziv approximációs megközelitésre mutat be példát [Albus, 1975].

5.2. A CSUKLÓ POZICIÓJÁNAK KISZÁMITÁSA

Az 5.1. ábrán látható, hogy a megfogó (α,β,γ)-val definiált orientációja és (X_H, Y_H, Z_H)- val megadott poziciója közvetlenül meghatározzák, *hol* kell a CSUKLÓ-nak a térben elhelyezkednie. Az (5.1.) ábrán alkalmazott jelöléseket használva a csukló poziciója:

$$X_{CS} = X_H - D \cos\alpha \sin\beta \qquad (5.1)$$

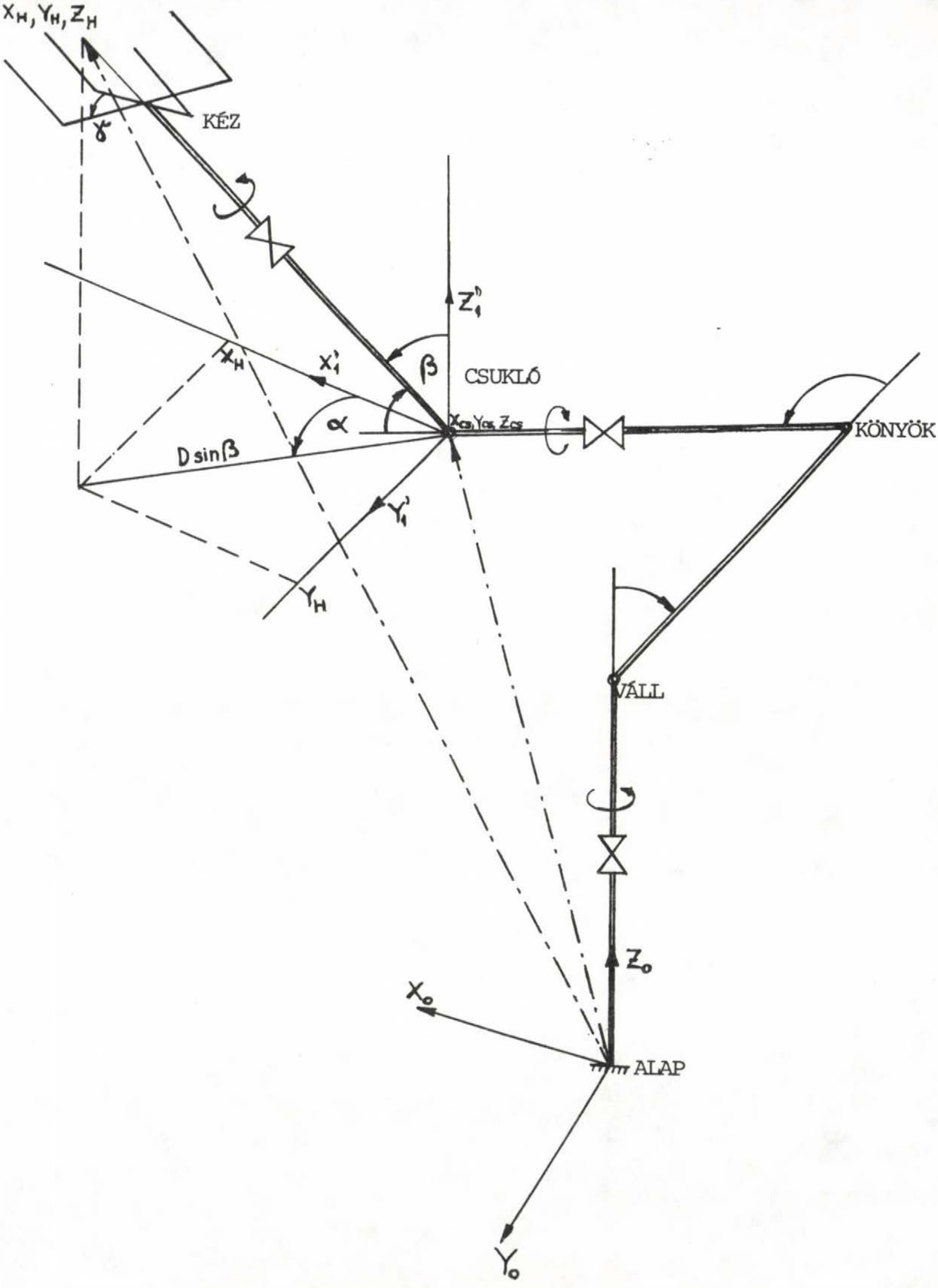
$$Y_{CS} = Y_H - D \sin\alpha \sin\beta \qquad (5.2)$$

$$Z_{CS} = Z_H - D \cos\beta \qquad (5.3)$$

ahol D a CSUKLÓ és a KÉZ közötti tag hossza. A CSUKLÓ pozició kiszámitása 4 szorzást igényel.

5.3. A q_1, q_2, q_3 CSUKLÓSZÖGEK KISZÁMITÁSA

A CSUKLÓ poziciót kifejezzük, mint a 3.4.1. pontban részletezett koordinátatranszformációk eredményét, vagyis megadjuk, hogy a q_1, q_2, q_3 tengelyforgások miként viszik a



A CSUKLÓ pozició számitása

5.1. ábra

CSUKLÓ-t az (X_{CS}, Y_{CS}, Z_{CS}) pozicióba. A 3.11 mátrix megadta az ALAP-tól a KÖNYÖK-be mutató koordinátatranszformációt. A CSUKLÓ-nak a KÖNYÖK-höz rögzitett koordinátarendszerben vett poziciója (∅, ∅, C), ahol C a KÖNYÖK és CSUKLÓ közötti tag hossza. Ezt a pontot homogén koordináták felhasználásával az ALAP koordinátarendszerébe transzformáljuk:

$$\begin{bmatrix} X_{CS} \\ Y_{CS} \\ Z_{CS} \\ 1 \end{bmatrix} = \underline{A}_{o,3} * \begin{bmatrix} \emptyset \\ \emptyset \\ C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

ahol $\underline{A}_{o,3}$ (3.11)-gyel adott. (5.4)-ből:

$$X_{CS} = Cc1s23 + Bc1s2 = c1 \cdot s23 + Bs2 \quad (5.5)$$

$$Y_{CS} = Cs1s23 + Bs1s2 = s1 \cdot s23 + Bs2 \quad (5.6)$$

$$Z_{CS} = Cc23 + Bc2 + A \quad (5.7)$$

ahol A, B, C a tag-hosszak, s23 = s2c3 + c2s3,

c23 = c2c3 - s2s3.

Legyen

$$K = Cs23 + Bs2 \quad (5.8)$$

(5.5)-ből és (5.6)-ból:

$$X_{CS} = c1 * K$$

$$Y_{CS} = s1 * K \quad (5.9)$$

s innen

$$\tan q_1 = Y_{CS}/X_{CS}$$

$$q_1 = \arctan(Y_{CS}/X_{CS}) \quad (5.11)$$

(5.9)-ből és (5.1o)-ből:

$$K^2 = X_{CS}^2 + Y_{CS}^2 \qquad (5.12)$$

$$K = \pm\sqrt{X_{CS}^2 + Y_{CS}^2} \qquad (5.13)$$

Legyen

$$L = Cc23 + Bc2 \qquad (5.14)$$

igy (5.7)-ből:

$$L = Z_{CS} - A \qquad (5.15)$$

K és L tehát ismert mennyiségek. (5.8)-ból és (5.14)-ből:

$$K^2 = C^2 s23^2 + B^2 s2^2 + 2BCs23s2 \qquad (5.16)$$

$$L^2 = C^2 c23^2 + B^2 c2^2 + 2BCc23c2 \qquad (5.17)$$

(5.16) és (5.17) összeadásával:

$$K^2 + L^2 = B^2 + C^2 + 2BC\,(c23c2 + s23s2) \qquad (5.18)$$

ahol

$$c23c2 + s23s2 = \cos[(q_2 + q_3) - q_2] = \cos q_3$$

és igy (5.18) -ból:

$$q_3 = \text{arc cos}\,[(K^2 + L^2 - B^2 - C^2)/2BC] \qquad (5.19)$$

q_2 kiszámitásához tekintsük ismét (5.8)-t és (5.14)-t:

$$K = Cs2c3 + Cc2s3 + Bs2 \qquad (5.2o)$$

$$L = Cc2c3 - Cs2s3 + Bc2 \qquad (5.21)$$

Legyen

$$M = C \cdot \cos q_3 \qquad (5.22)$$

$$N = C \cdot \sin q_3 \qquad (5.23)$$

ahol M és N már ismert mennyiségek. Ekkor (5.2o)-ból és (5.21)-ből:

$$K = (M + B)\ s2 + Nc2 \tag{5.24}$$

$$L = (M + B)\ c2 - Ns2 \tag{5.25}$$

és innen

$$K - (M + B)\ s2 = Nc2 \tag{5.26}$$

$$L + Ns2 = (M + B)\ c2 \tag{5.27}$$

(5.26)-ból és (5.27)-ből:

$$q_2 = \text{arc sin}\ \{[K(M + B) - LN] / [(M + B)^2 + N^2]\} \tag{5.28}$$

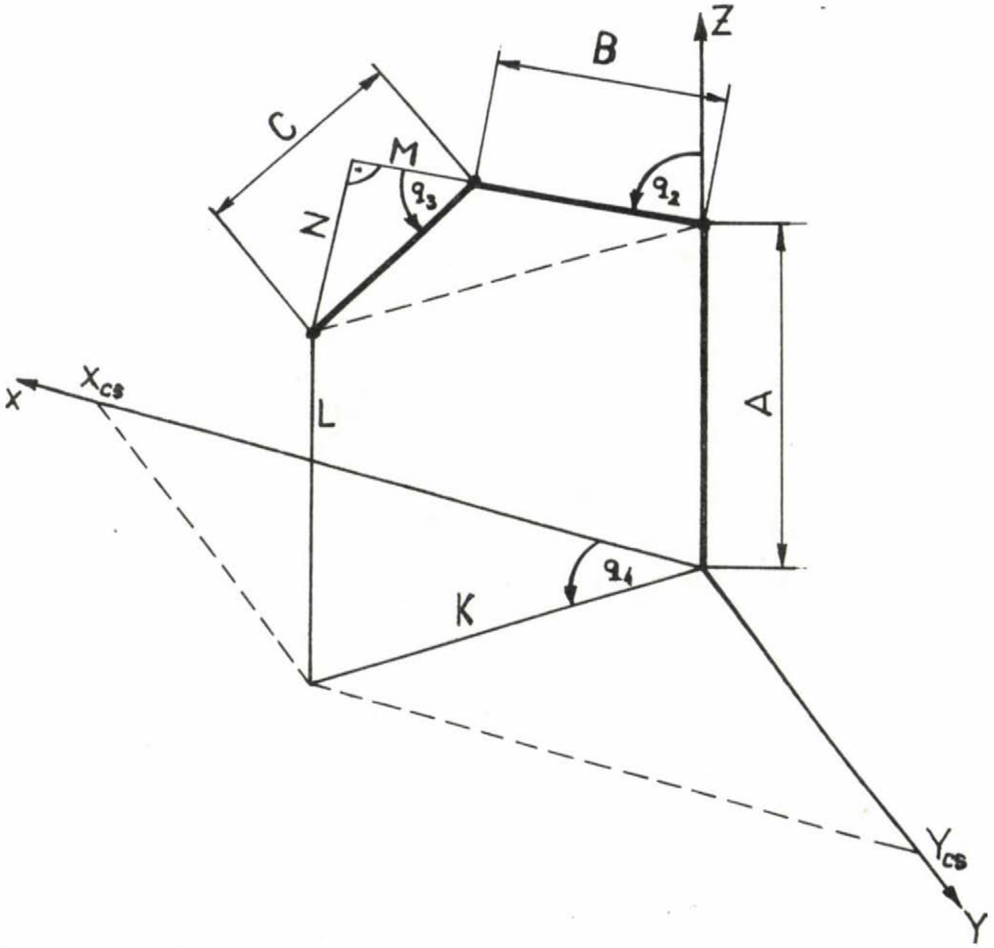
A q_1, q_2, q_3 szögek számitása során bevezetett mennyiségek geometriai jelentése az 5.2. ábrán látható.

Nyilvánvaló, hogy a manipulátor munkatere korlátozott kiterjedésü, és az 5.2. pontban kiszámitott bármilyen CSUKLÓ pozicióhoz nem tartozhat q_1, q_2, q_3 megoldás. A másik megvizsgálandó probléma pedig az, hogy a q_1, q_2 q_3 számitásához felhasznált inverz trigonometriai függvényeknek többszörös megoldásai vannak és ezek közül választanunk kell. E két probléma megoldásához vizsgáljuk meg a manipulátor munkaterét.

5.4. A MANIPULÁTOR MUNKATERE

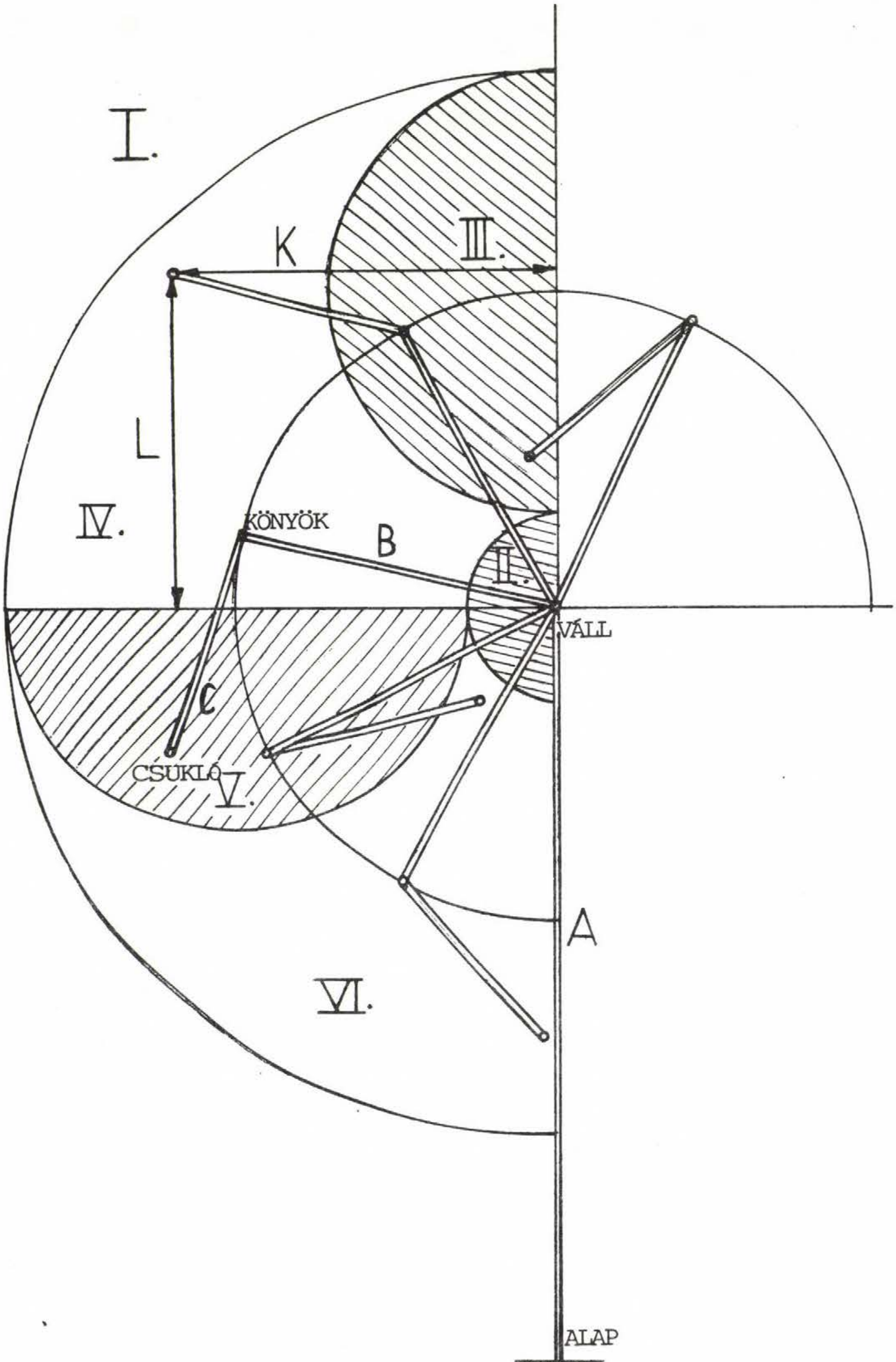
5.4.1. A megoldás létezése

Ismervén a kivánt X_{CS}, Y_{CS}, Z_{CS}-t ellenőrizhetjük, vajon a CSUKLÓ valóban elvihető-e ebbe a pozicióba. Az 5.3. ábra az első három tag (A, B, C) által kifeszitett sikot



q_1, q_2, q_3 számitása

5.2. ábra



A manipulátor munkatere

5.3. ábra

mutatja. (Mivel a B tag mentén nincs longitudinális forgatás, a 3 tag egy sikban van.) A rajzból megállapitható, hogy a CSUKLÓ az alábbi térrészeket nem érheti el: (a jelölések ugyanazok, mint az 5.3 pontban)

a) Azokat a pontokat, amelyek a VÁLL-tól tul messze vannak, vagyis ahol

$$K^2 + L^2 > B + C \qquad (5.29)$$

(Ezt a térrészt I.-gyel jelöljük.)

b) Azokat a pontokat, amelyek a vállhoz tul közel vannak:

$$K^2 + L^2 < B - C \qquad (5.3o)$$

(II. tartomány)

Ez utóbbi feltételnek akkor lenne jelentősége, ha ideális izületeink lennének, vagyis a VÁLL és KÖNYÖK izület mozgástartománya is $\pm$ 18o^o lenne. Ilyen esetben célszerü lenne a B és C rudakat egyenlő hosszuságura tervezni, mivel ekkor a II. tartomány eltünne. Esetünkben azonban az emlitett izületek mozgástartománya csak $\pm$ 9o^o, ezért az utóbbi megfontolásnak csak elvi jelentősége van. A számitógépes program a kivánt CSUKLÓ pozició meghatározása után ellenőrzi a fenti feltételeket.

5.4.2. q_1 értéktartománya

q_1 kiszámitásához az arctan függvényt használtuk. Az (5.11) kifejezésben $Y_{CS} > \emptyset$ esetén az arctan szubrutin által szolgáltatott $\emptyset < q_1 < \pi$ érték a helyes megoldás. Ha viszont $Y_{CS} < \emptyset$, akkor a program a

$$q_1 = \text{arc tan}\,(Y_{CS}/X_{CS}) - \pi \qquad (5.31)$$

értéket adja át megoldásként. Igy q_1-re megkapjuk a teljes, $[-\pi, \pi]$ értéktartományt.

5.4.3. q_3 értéktartománya

Az (5.19) kifejezés q_3-ra egy pozitiv és egy negativ értéket szolgáltat eredményként. Ez azt jelenti, hogy ugyanazt a CSUKLÓ poziciót különböző tag-elrendezésekkel lehet előállitani. Olyan esetekben, amikor egyéb szempontot (optimális mozgáspálya, ütközés elkerülése, stb.) nem kell figyelembe venni, a $q_3>0$ esetet fogjuk választani. A programcsomaghoz tartozó arc cos szubrutin ezt az értéktartományt szolgáltatja. A választott megszoritás azt a gyakorlatban is szokásos konfiguráció beállitást fejezi ki, hogy a KÖNYÖK lehetőleg a VÁLL-CSUKLÓ vonal felett helyezkedjen el, amint az az 5.3. ábrán látható. Tehát

$$q_3 = \text{arc cos}\{(K^2 + L^2 - B^2 - C^2)/2BC\},$$
$$0<q_3<\pi \qquad (5.32)$$

A legtöbb KÉZ orientáció és pozició 8 féle csuklószögkiosztás mellett érhető el. Ez megfelel háromszori kétutas választásnak, amelyek közül az első a q_3-ra tett fenti megszoritás volt.

5.4.4. A K mennyiség értékei

Minthogy a (q_1, q_2, q_3) és $(\pi + q_1, -q_2, -q_3)$ szögek ugyanazt a CSUKLÓ poziciót állitják elő, lerögzithetjük, hogy

$$K = \sqrt{X_{CS}^{2} + Y_{CS}^{2}} \geq \emptyset \qquad (5.33)$$

vagyis a VÁLL-hoz rögzitett koordinátarendszernek csak a bal felét ($X_{CS}^{VÁLL} \geq \emptyset$) fogjuk figyelembe venni. Az (5.33) feltétel a 8 válaszut között a második választást jelenti. Ha a váll koordinátarendszerében a CSUKLÓ poziciók csak az emlitett térrészben fordulnak elő, akkor

$$q_2 + q_3 > \emptyset \qquad (5.34)$$

mindig fenn fog állni, amint az egy ideális manipulátorra vonatkozóan az 5.4. ábrán látható.

5.4.5. q_2 értéktartománya

A q_2 kiszámitását kifejező (5.28) kifejezésben tehát $K \geq \emptyset$, továbbá

$$L \geq \emptyset \text{ ha } Z_{CS} \geq A\,, \quad L < \emptyset \text{ ha } Z_{CS} < A$$

Az arc sin szubrutin a $-\pi/2 < q_2 < \pi/2$ értéktartományt adja megoldásként. A másik megoldás $q_2' = \pi - q_2$ lenne. Az 5.5. ábra figyelembevételével az alábbiakban eldöntjük, hogy a két megoldás közül milyen esetben melyiket válasszuk:

a) Ha $L > \emptyset$ és $T < C$ akkor $q_2 < \emptyset$ (5.35)

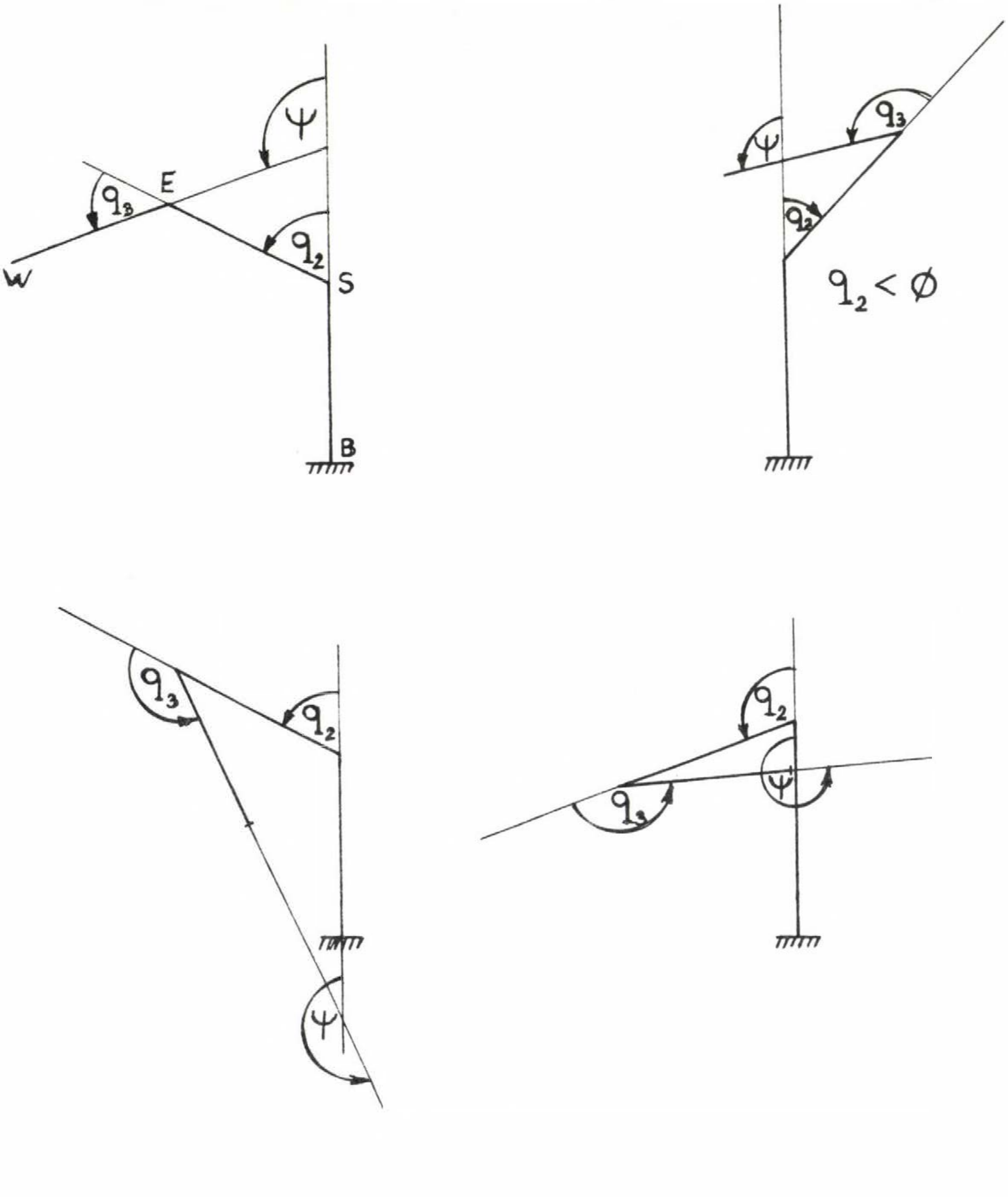
ahol

$$T = \sqrt{(B - L)^{2} + K^{2}} \qquad (5.36)$$

(lásd az 5.5. a) ábrát is)

vagyis az 5.3 ábra szerinti III. tartományba eső előirt CSUKLÓ poziciók csak akkor érhetők el, ha a KÖNYÖK az ALAP-VÁLL vonaltól balra esik.(Feltéve, hogy a q_3-ra tett (5.32) feltétel fennáll.) Mivel $q_2 > -\pi/2$ az előző feltételek miatt mindig igaz, valójában nincs szükség az (5.35) feltétel ellenőrzésére: az arc sin szubrutin q_2-re éppen a megfelelő értéket fogja adni.

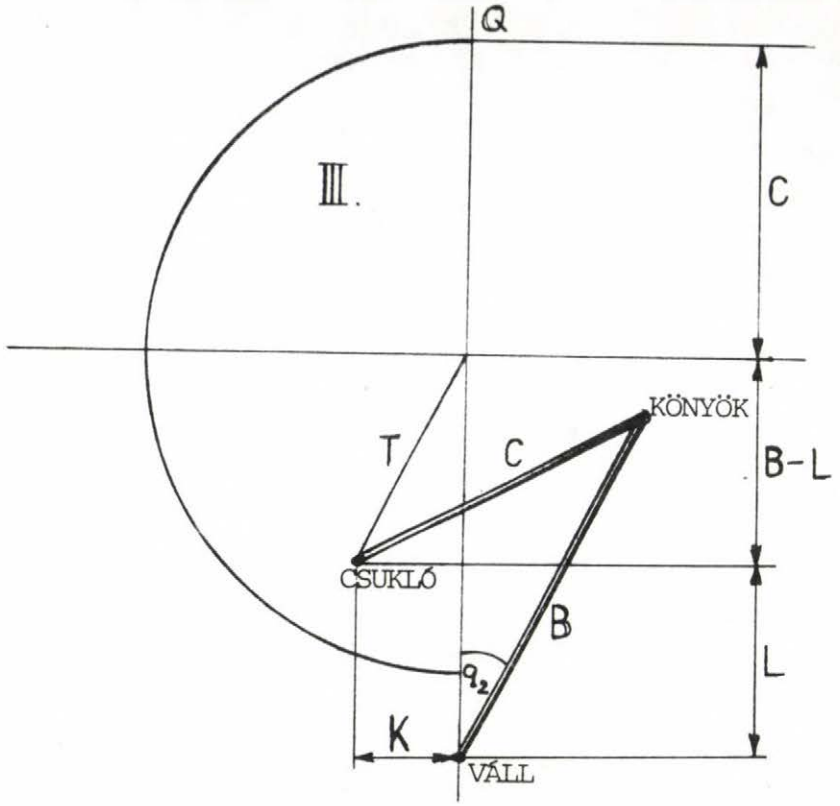
$$\boxed{\Psi = q_2 + q_3} \quad , \quad q_2 + q_3 > 0$$



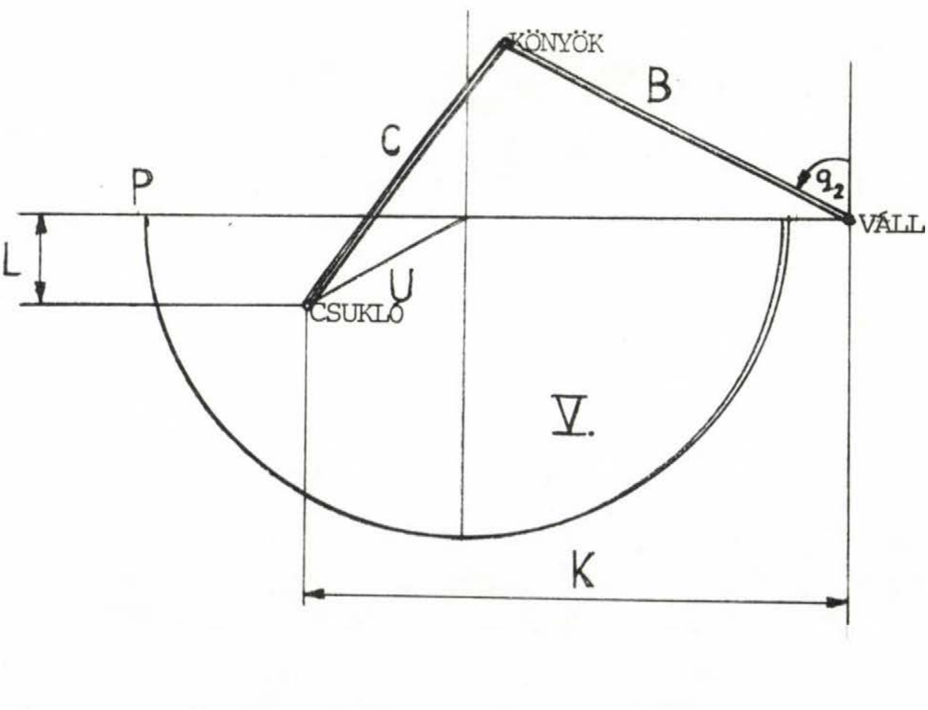
$(q_2 + q_3)$ értéktartománya

5.4. ábra

a/



b/



q_2 értéktartománya

5.5. ábra

b) Az 5.3. ábra IV. tartományában az arc sin rutin által szolgáltatott q_2 érték szintén minden további vizsgálat nélkül elfogadható, mivel itt

$$\emptyset < q_2 < \pi/2$$

és

$$L > \emptyset \quad , \quad T > C \quad , \quad U > C \qquad \text{(lásd c) alatt)} \qquad (5.37)$$

c) Ha a CSUKLÓ az V. tartományba esik, ekkor a KÖNYÖK -CSUKLÓ vonal metszi a P-VÁLL vonalat (5.5.b. ábra) Ebben a tartományban ismét

$\emptyset < q_2 < \pi/2$, vagyis az (5.28) kiértékelésekor az arc sin szubrutin által adott érték.

Itt

$$L < \emptyset \quad , \quad U < C \qquad (5.38)$$

ahol

$$U = \sqrt{(K - B)^2 + L^2} \qquad (5.39)$$

d) És végül a VI. tartományban

$\pi/2 < q_2 < \pi$, vagyis

$$q_2 = \pi - \text{arc sin} \{[K(M + B) - LN]/[(M + B)^2 + N^2]\} \qquad (5.4o)$$

lesz a helyes megoldás. (5.4o) -t kell választani (5.28) helyett, ha

$$L < \emptyset \quad , \quad U > C \qquad (5.41)$$

Tehát q_2 kiszámitásakor a program az (5.41) feltételeket ellenőrizni.

5.5. MANIPULÁTOR TERVEZÉSI MEGFONTOLÁSOK

a) Mint az 5.4.1. pontban emlitettük, nagy szögátfogású tranzverzális csuklók esetében nem célszerü $B \neq C$-t tervezni, mivel igy a VÁLL körül egy B - C sugaru gömb belsejét a CSUKLÓ nem éri el.

b) Mivel a tranzverzális csuklók átfogása általában kisebb az ideális $\pm$ 18o^{o}-nál (a COROHAND-nél $\pm$ 9o^{o}), ezért az a) feltételt nem feltétlenül szükséges betartani, a C>B esetet azonban mindenképpen kizárhatjuk: a KÖNYÖK-CSUKLÓ tag ne legyen hosszabb, mint a VÁLL-KÖNYÖK távolság. Ez ugyanis nem csupán a CSUKLÓ által szintén elérhetetlen gömbtartományhoz vezetne, hanem az egész berendezés mechanikai labilitása és igénybevétele is nőne a C<B esettel szemben.

c) Ha a csuklónak az alapsik egy ρ sugaru körén belül az ALAP körül kell elérnie pontokat, akkor a manipulátort ugy kell megtervezni, hogy

$$B + C = \sqrt{\rho^2 + A^2}$$

legyen. (5.6.ábra)

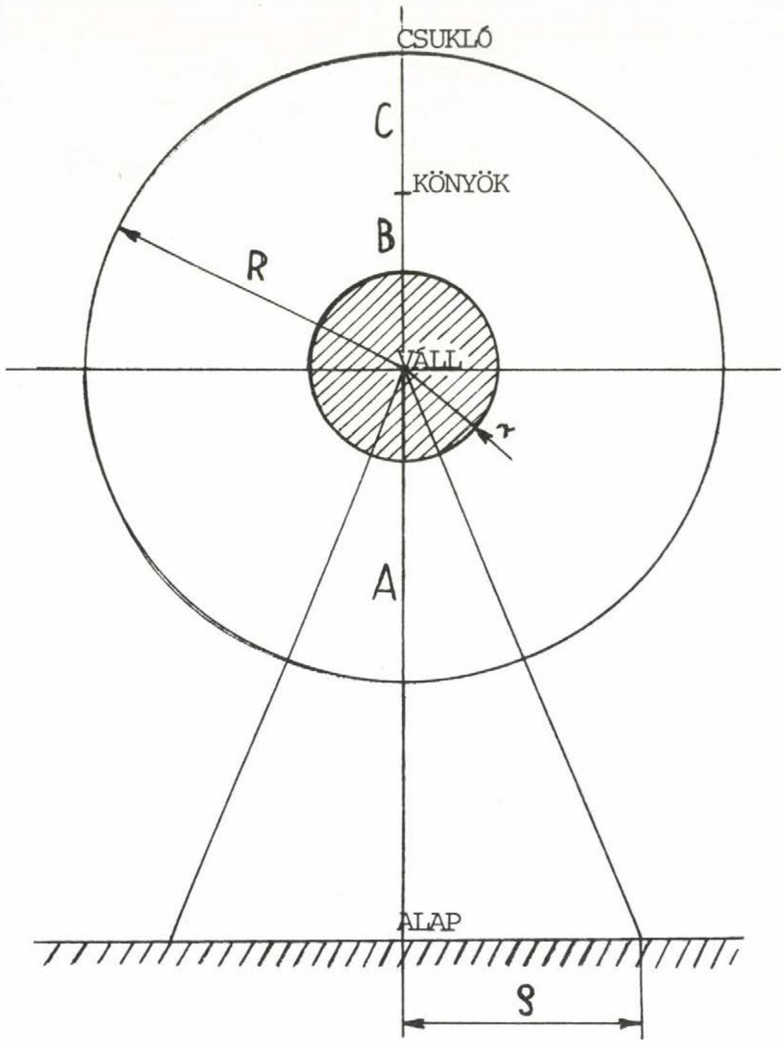
d) Az ALAP-VÁLL távolság (A) a teljes munkatér előirt méreteitől függ.

e) Az 5.4. pontban vizsgált és megengedettnek tekintett munkatér-tartománynak sem érhető el minden pontja, ha figyelembe vesszük, hogy a COROHAND tranzverzális csuklóinak átfogási tartománya csak $\pm$ 9o^{o}. Az 5.3 ábra szerint végül is csak a III.,IV. és V. jelü térrésznek a VÁLL körüli B sugaru körön kivül eső pontjait tudja a CSUKLÓ elérni, vagyis ezen térrészeken belül a megfogó *pozicióját és orientációját egyaránt vezérelni tudjuk.*

5.6. q_4, q_5, q_6 KISZÁMITÁSA

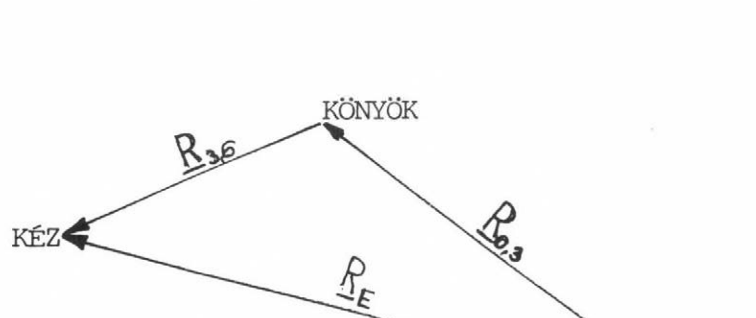
a) q_1, q_2, q_3 ismeretében kiszámithatjuk a KÖNYÖK-CSUKLÓ koordinátarendszer orientációmátrixát:

$$\begin{bmatrix} c1c23 & -s1 & c1s23 \\ s1c23 & c1 & s1s23 \\ -s23 & \emptyset & c23 \end{bmatrix} = \underline{R}_{o,3} \qquad (5.42)$$



A kar-tagok hosszának megválasztása

5.6. ábra



Orientációmátrixok kapcsolata

5.7. ábra

Ez a mátrix megegyezik a 3.5.1. pontban kiszámitott $\underline{A}_{o,3}$ transzformációs mátrix bal felső 3 x 3-as particiójával. Miután a program (5.42) -t kiszámitotta, eltárolja azt a teljes transzformáció mátrix vagyis $\underline{A}_{o,6}$ kiszámitásáig.

b) A KÉZ kivánt orientációja az ALAP koordinátarendszerében a Euler szögekből összeállitott (4.2) orientációmátrix formájában van megadva, ezt a mátrixot R_E-vel jelöltük.

c) Az ALAP-KÉZ orientációmátrix felirható, mint

$$\underline{R}_E = \underline{R}_{o,3} * \underline{R}_{3,6} \qquad (5.43)$$

(lásd az 5.7.ábrát) és igy

$$\underline{R}_{3,6} = \underline{R}_{o,3}^{-1} * \underline{R}_E \qquad (5.44)$$

Minthogy ortogonális transzformációkat használunk,

$$\underline{R}_{o,3}^{-1} = \underline{R}_{o,3}^{T}$$

vagyis $\underline{R}_{o,3}$ transzponáltja. Igy végül is

$$\underline{R}_{3,6} = \underline{R}_{o,3}^{T} * \underline{R}_E \qquad (5.45)$$

d) Másfelöl a 3.4.2. pontban kifejezett $\underline{A}_{3,6}$ transzformációs mátrix forgatási particiója nem más, mint $\underline{R}_{3,6} = [r_{i,j}]$, i,j = 1,2,3,

vagyis

$$\underline{R}_{3,6} = \begin{bmatrix} c4c5c6 - s4s6 & -c4c5s6 - s4s6 & c4s5 \\ s4c5c6 + c4s6 & -s4c5s6 + c4c6 & s4s5 \\ - s5c6 & s5c6 & c5 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \qquad (5.46)$$

Minthogy formailag a q_4, q_5, q_6 szögek megfelelnek sorrendben az α, β, γ szögeknek (az (5.46)mátrix alakja megegyezik a (4.2)-ével), ezért kiszámitásukhoz ugyanazt a programot használjuk, mint az Euler szögeknek az orientáció mátrixból való előállitásához a 4.4.fejezetben. Igy a $\emptyset<q_5<\pi$ megszoritást is beiktatjuk, ami a három szög-értéktartomány választás közül az utolsó, s ami által egyértelmüvé válik a manipulátor konfigurációja egy adott kéz-állapotban.

5.7. TOVÁBBI SZEMPONTOK A CSUKLÓSZÖG-ÉRTÉKEK MEGVÁLASZTÁSÁHOZ

a) az 5.4.3, 5.4.4 és 5.6 pontokban lerögzitett értéktartományokat akkor használhatjuk, ha a manipulátort egyik állapotból (pl. parkoló helyzetből) egy másik állapotba (pl. egy trajektória kiindulópontjára) oly módon kell vinni, hogy a közben felvett csuklóhelyzetekkel nem törödünk. Egy trajektória pontos és lehetőleg gyors bejárása során viszont elsődleges szempont az, hogy a csuklószögek *folytonosan* változzanak, vagyis egy-egy trajektória szegmens két végpontja között ne történjenek hirtelen csuklószög-változások.

b) Elképzelhető, hogy a csuklószög-megválasztásra tett kezdeti feltételek nem felelnek meg a valóságos szituációnak, például azért, mert a KÖNYÖK vagy a CSUKLÓ összeütközne a környezettel. Sok esetben az ilyen ütközéseket - a KÉZ állapotának változatlanul hagyása mellett - a többi izület átforditásával elkerülhetjük.

c) A fentiekből következően a csuklószög értéktartományok megválasztása az alábbi módon kell történjen:

- ha a felsőbb szintü robotvezérlő program konkrétan előirja az izületek beállitását valamely trajektória mentén, akkor a program a trajektória kezdőpontjába való pozicionálás során az ennek megfelelő szöghelyzeteket állitja be;

- ha semmilyen konkrét előirás nincs, akkor a trajektória kezdőállapotának beállitása az 5.4.3, 5.4.4. és 5.6 pontokban ismertetett módon történik;
- a trajektória folyamatos bejárása során a csuklószögeket mindig olyan módon választja meg a program, hogy hirtelen változás ne történjék, vagyis a már beállitott csuklószög-tartományokat igyekszik tartani;
- ha egy trajektória végrehajtása során kell konfigurációt változtatni, akkor ez csak a trajektória feldarabolásával történhet, mivel folyamatos karmozgás során nincs lehetőség hirtelen csuklószög-változásokra.

5.8. A SZÁMITÁSOK ÖSSZEGZÉSE

Minthogy az aritmetikai alapmüveletek közül a szorzás és osztás elvégzéséhez szükséges idő lényegesen több, mint a többi müveleté, a szorzások-osztások szükséges mennyiségének összegzésével jó becslést kaphatunk a manipulátor inverz problémája megoldásához szükséges időre:

	müveletek száma
CSUKLÓ pozició előállitása	4
q_1 kiszámitása	1
K kiszámitása	1 gyökvonás
q_3 kiszámitása	3
q_2 kiszámitása	7
K^2 kiszámitása (q_2 ellenőrzése)	6
$\underline{R}_{o,3}$ mátrix összeállitása	8
$\underline{R}_E$ mátrix összeállitása	12
$\underline{R}_{3,6}$ mátrix összeállitása	27
q_4, q_5, q_6 kiszámitása $\underline{R}_{3,6}$-ból	4

A B^2, C^2, 2BC értékek előre kiszámithatók és a memóriában tárolhatók. A programban alkalmazott négyzetgyökvonó rutin lo osztási müvelettel végez el egy gyökvonást. Mindezt figyelembe véve körülbelül 8o szorzásosztással kapjuk meg a 6 csuklószöget.

A trigonometrikus függvények kiértékelése elhanyagolható időt vesz igénybe, mivel ez look-up táblázatokkal történik.

A program többek között egy M68oo-as mikroszámitógépen is implementálásra került [Siegler, 1979], ahol egy megoldási ciklus kb.lo ms-ot vett igénybe.

A program az $\underline{A}_{o,6}$ teljes transzformáció mátrixot is kiszámolja, és egy "lépés" után megadja az uj KÉZ poziciót és orientációt, amihez kb.7o szorzás szükséges. Ezt is figyelembe véve a mozgás ciklusideje még mindig 2o ms alatt marad.

6. PÁLYAVEZÉRLÉS

Egy pályavezérlő program feladata, hogy a manipulátort zökkenőmentesen végigvezesse egy előre definiált pályán. Minthogy a legtipikusabb trajektória egy egyenes vonalszakasz, és görbevonalu pályák is egyenes szegmensekkel közelithetők, a továbbiakban egyenesvonalu pályaszegmensek előállitását vizsgáljuk meg.

A pozicióvezérelt manipulátort két KÉZ állapotot összekötő egyenes pályaszakasz mentén vezetjük végig oly módon, hogy a két végállapotnak megfelelő csuklószögértékek között a csuklószögeket interpolációval változtatjuk. Egyenesvonalu mozgáson manipulátorok esetében nemcsak azt értjük, hogy *a KÉZ egyenesvonalu térbeli pályán halad,* hanem azt is, hogy eközben a megfogó *orientációja is egyenletesen változik.*

Az irodalomban lényegében kétféle mozgásinterpolációs módszert találunk: *kéz állapot* és *csuklószög interpolációt.* Az előbbit az angol nyelvü irodalomban "Cartesian" interpolációnak nevezik. [Paul, 1979]

6.1. KÉZ-ÁLLAPOT INTERPOLÁCIÓ

Ez a tipusu pályavezérlés a robotkéz derékszögü koordinátákban kifejezett poziciójának mozgására irányul és a kezet vagy szerszámot egyenesvonalu pályán igyekszik mozgatni. Tegyük fel, hogy adott a T_S idő-érték, vagyis az az időintervallum, amely alatt a kezet egy egyenes trajektóriaszakasz mentén végig akarjuk vezetni. A "Cartesian" interpolátor a T_S időt kisebb T intervallumokra bontja és minden egyes intervallum kezdetére és végére kiszámolja a megfelelő csuklószögeket. A T időt a lehető legkisebbre kell választani, de még elegendően hosszu kell legyen ahhoz, hogy az inverz manipulátorprobléma megoldásához elegendő idő álljon rendelkezésre. Minél rövidebb T, annál zökkenőmentesebb és pontosabb mozgást kaphatunk.

Az 5. fejezetben ismertetett geometriai számitások ellenőrzésére és eredményének demonstrálására az M68oo-as mikroszámitógépen egy durva *pályaszegmentáló program* került implementálásra. Ez a program a robotkéz pályáját egyenes szakaszokra bontja és egy-egy szakasz mentén elvégzi a $q_i(t)$, $0<t<T$, $i = 1, \dots, 6$ függvények szakaszonként lineáris approximációját. A trajektória további simitásával ez a program azonban nem foglalkozik. Az igy keletkező mozgáspálya a 6.1.ábrán látható. Az ábrázolt példában a KÉZ pozició egyenletesen változik és az orientáció az ábrázolt trajektória szakasz mentén állandó marad.

A kéz-állapot interpolációs program a következő lépésekből áll:

1. - Megadjuk a kezdeti és végső KÉZ állapotokat.
2. - Beállitjuk a trajektória felbontás finomságát: ettől függ a pályakövetés "simasága".
3. - Ellenőrizzük az előirt trajektória bejárhatóságát, vagyis azt, hogy a szóbanforgó pályaszakasz teljes terjedelmében a manipulátor környezetének elérhető részében helyezkedik-e el. Ennek feltételei az alábbiak:
   a) A pályaszakasz kezdő és végpontjának elérhetőnek kell lennie, vagyis

$$\sqrt{K_S^2 + L_S^2} > B + C \qquad (6.1)$$

$$\sqrt{K_f^2 + L_f^2} > B + C \qquad (6.2)$$

ahol K és L jelentését az 5.2. ábra szemlélteti, az s index a startpontra, az f index az egyenes pályaszakasz végpontjára vonatkozik. Ha a (6.1) és (6.2) feltételek teljesülnek, akkor a CSUKLÓ szintén egyenes pályája teljes egészében a VÁLL körüli B +- C sugaru körön belül fog elhelyezkedni a B és C tagok által kifeszitett sikon. (5.12)-nek és (5. 15)-nek megfelelően:

$$K_S^2 = X_{CS_S}^2 + Y_{CS_S}^2$$

$$K_f^2 = X_{CS_f}^2 + Y_{CS_f}^2$$

$$L_S^2 = (Z_{CS_S} - A)^2$$

$$L_f^2 = (Z_{CS_f} - A)^2$$

b) Mivel a program ideális $\pm 18o^o$ szögátfogásu tranzverzális csuklókkal rendelkező manipulátorra készült, azt is megvizsgáljuk, hogy a CSUKLÓ pályája a VÁLL körüli (B - C) sugaru kört nem metszi-e. Az 5.3.ábrán látható K - L koordinátasikban a CSUKLÓ pályájának egyenlete:

$$L = m * K + b \qquad (6.3)$$

ahol

$$m = (L_f - L_S)/)K_f - K_S) \qquad (6.4)$$

$$b = (L_f * K_S - L_S * K_f)/(K_S + K_f) \qquad (6.5)$$

és a (B - C) sugaru kör egyenlete:

$$L^2 + K^2 = (B - C)^2 \qquad (6.6.)$$

(6.3)-t (6.6)-tal kombinálva a CSUKLÓ pályára az alábbi feltételeknek kell teljesülnie:

$$B - C < \mathrm{abs}\,(b/\sqrt{1 + m^2}) \qquad (6.7)$$

c) A COROHAND manipulátor esetében, ahol a tranzverzális csuklók átfogása $\pm 9o^{o}$, a teljes CSUKLÓ pályának a VÁLL körüli B sugaru körön kivül kell elhelyezkednie:

$$B < \mathrm{abs}(b/\sqrt{1 + m^2}) \qquad (6.8)$$

továbbá bele kell esnie az 5.3 ábrán III., IV. ill V.-tel jelölt tartományba. (5.4.pont)

4. Kiszámitjuk a KÉZ állapot inkremenst, vagyis a

$$DX = (X_f - X_S)/d, \ldots, \qquad D\gamma = (\gamma_f - \gamma_S)/d \qquad (6.9)$$

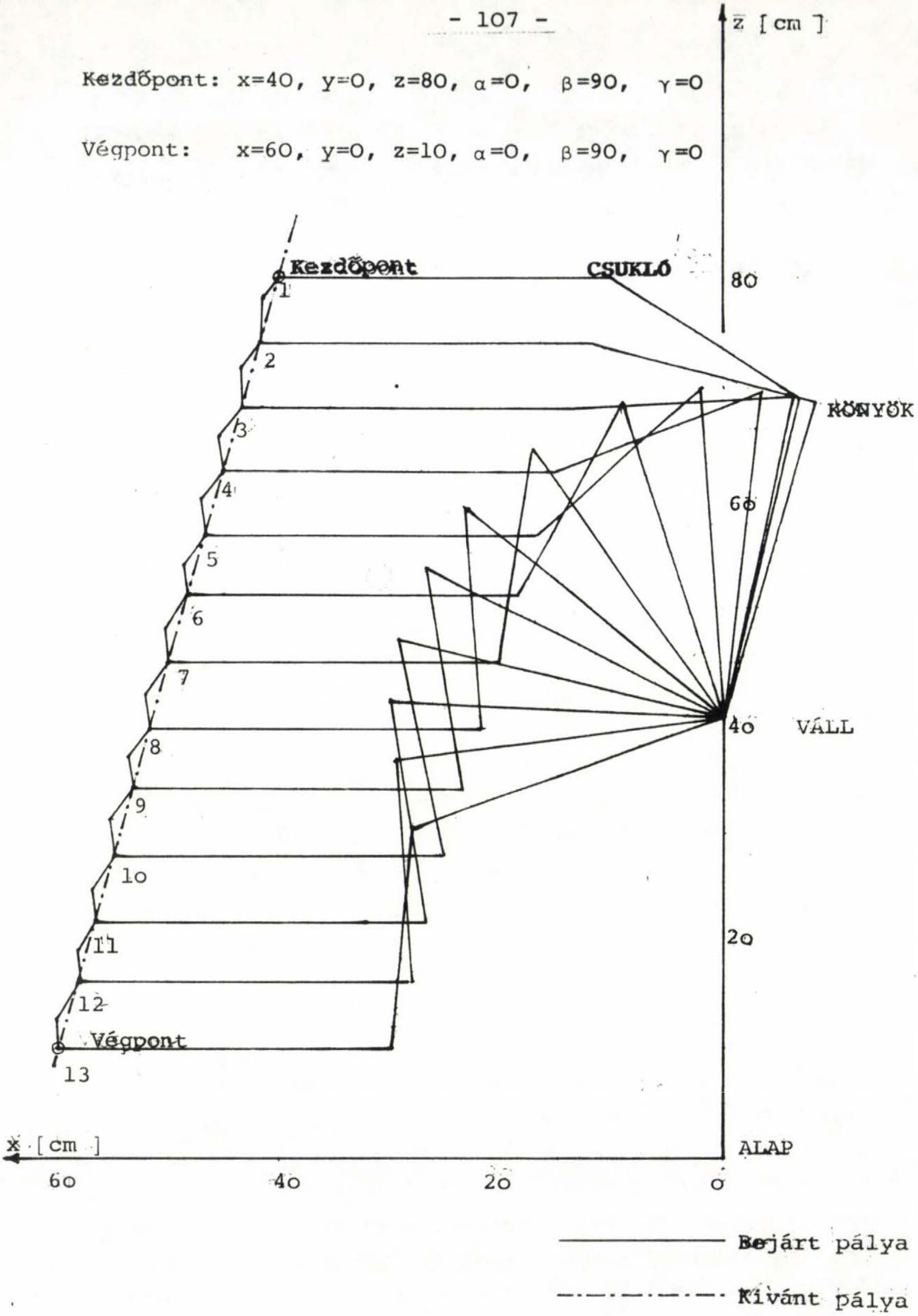
mennyiségeket,
ahol d az 1. pontban definiált felbontás.

5. Inkrementáljuk az aktuális KÉZ állapotot és az uj állapotra az 5. fejezetben leirt módon meghatározzuk a csuklószögeket. Ilyen módon végighaladunk az egész trajektóriaszakaszon.

A kéz-állapot interpolációs program pályakövetési hibáját is szemlélteti a 6.1 ábra, amely nemcsak minden egyes szegmensdarab végén mutatja a KÉZ állapotát, hanem a közbülső állapotokban is. (folytonos vonal). Ez ugy történik, hogy a program két szomszédos KÉZ állapothoz tartozó csuklószögek meghatározása után veszi az egymást követő csuklószögértékek középarányosát, s ezen szögekkel visszaszámolja

Kezdőpont: x=40, y=0, z=80, α=0, β=90, γ=0

Végpont: x=60, y=0, z=10, α=0, β=90, γ=0



Egy pályaszakasz

6.1.ábra

a KÉZ állapotát. A valóságban ez az ellenőrzés a csuklószögeknek a csukló potenciométerekről való beolvasásával történhet.

6.2. CSUKLÓKOORDINÁTÁK VEZÉRLÉSE

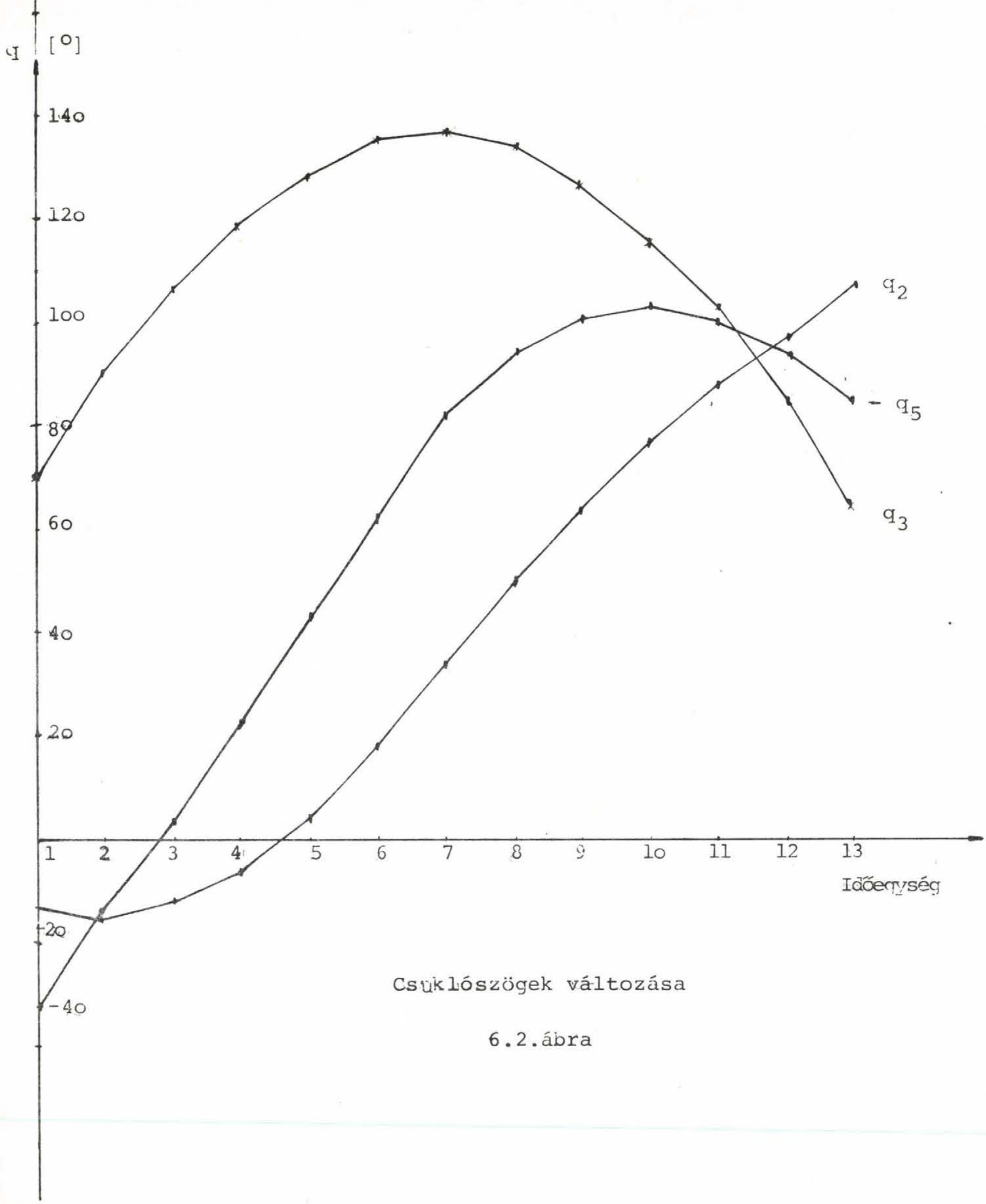
6.2.1. A pályabejárás pontossága

A 2.-5. fejezetekben megvizsgáltuk, miként számithatók ki a manipulátor trajektória egymást követő, diszkrét pontjaihoz tartozó csuklószögek. Azokban a pontokban, ahol az 5. fejezetben leirt módszerrel elvégezzük a manipulátor inverz problémájának megoldását, vagyis a $\underline{q}(\underline{s}_H)$ transzformációt ($\underline{q}$ a csuklószögek vektora, $\underline{s}_H$ a 4.2. pontban ismertetett KÉZ állapotvektor), a manipulátor a számitási algoritmustól függő pontossággal (gyakorlatilag tökéletesen) a kivánt mozgáspályán fog elhelyezkedni.

Tekintsünk például egy u.n. "induló mozgást", amikor a manipulátor egy munkadarabot emel ki egy üreges nyilásból. Elvben lehetséges lenne igen nagy pontosságu egyenesvonalu mozgást létrehozni és a munkadarabot az összes kéz-állapot koordináta összehangolt változtatásával egyenes pályán kiemelni. Ezt a megoldást azonban el kell vetnünk, mivel ehhez a csuklómotorok digitális szabályozásának mintavételezési ütemében kellene a kéz pozicióját és sebességét csuklókoordinátákká transzformálni, ami másodpercenként több száz transzformációs ciklust is jelenthet. Egy másik lehetőség az lenne, hogy a 2.1.1. pontban emlitett sebességvezérlési módszert alkalmazva az "induló mozgás" kezdetén és végén (amikor a munkadarab a nyilásból kiemelkedett) kiértékeljük a (2.9) $\underline{J}(\underline{q})$ mátrix inverzét és az egész "induló mozgást" differenciális állapotváltozásnak tekintve meghatározzuk a csuklószögek változását. [Whitney, 1972] Legtöbb esetben azonban a szerelési feladatok során végrehajtott elemi mozgások, mint az előbbi "induló mozgás" , nem tekinthetők differenciális méretü mozgásnak és végrehajtásuk során - különösen, ha a manipulátor éppen valamelyik elfajuló helyzetének közelében van (teljesen kinyujtott vagy behajlitott csuklók) - a megfelelő csuklószögváltozások extrém nagyok is lehetnek. A továbbiakban javasolt, harmadik megközelitésben szintén elvégezzük a kéz-állapotok csuklószögekké történő transzformációját az elemi mozgásszakaszok végállapotaiban vagyis a trajektória tartópontjaiban, majd a két állapot között a *csuklószögeket koordinált módon változtatjuk.*

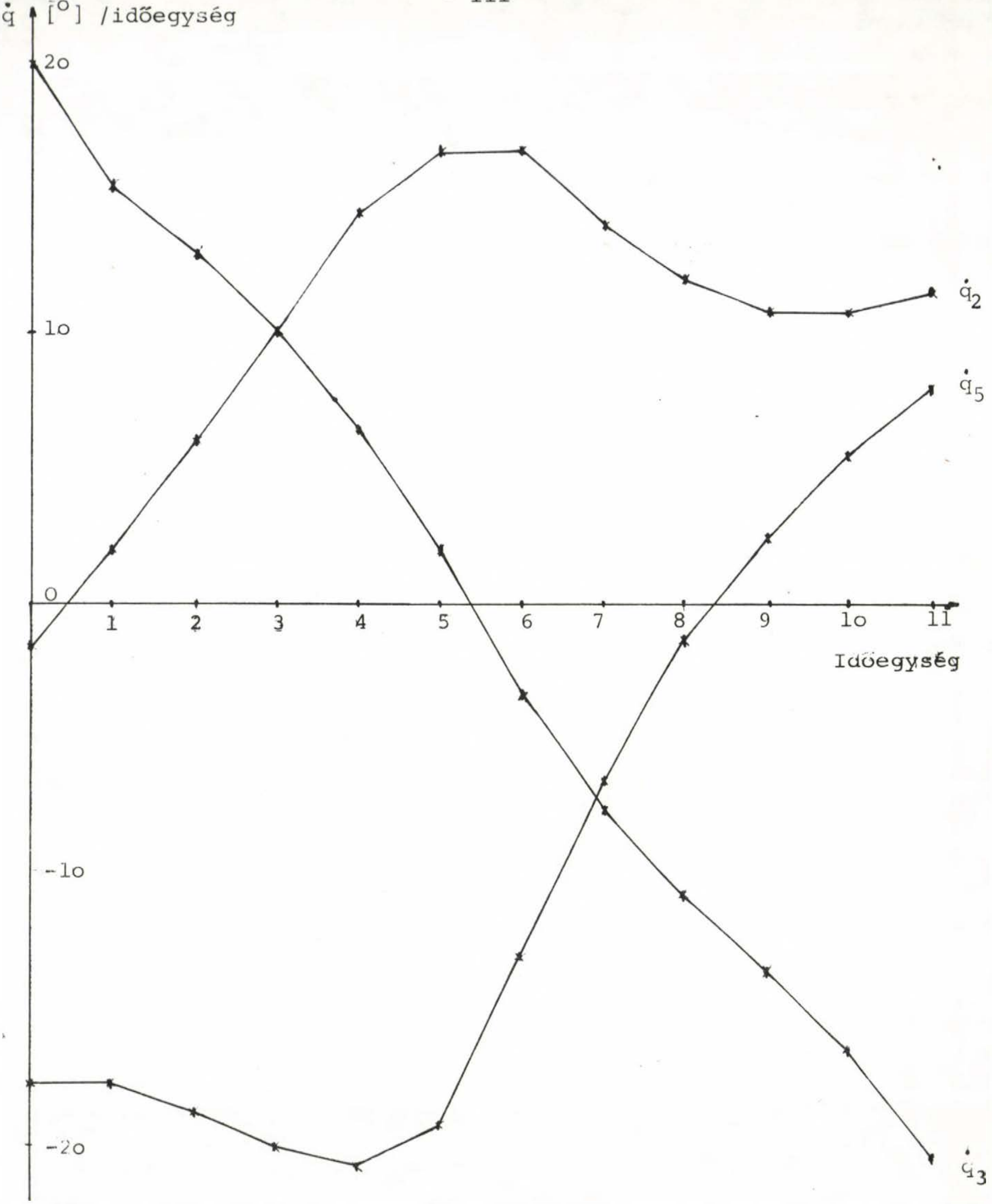
Az emlitett "tartópontok" között, vagyis azokon a trajektóriaszakaszokon, ahol a $\underline{q}(\underline{s}_H)$ transzformációt nem végezzük el, a KÉZ általános esetben egy bonyolult geometriáju mozgáspályát fog követni, amely a kivánt pályától eltérhet.

A tartópontokon tökéletes pontossággal történő "áthaladás" is csak akkor lehetséges, ha a manipulátort minden egyes tartóponton megállitjuk. A 6.1. pontban a manipulátor egy egyenes trajektória mentén történő mozgását vizsgáltuk. (A csuklószögeket az M68oo-as mikroszámitógépen futó programmal számoltuk.) A 6.2. ábra néhány csukló szöghelyzetének, a 6.3. és 6.4. ábra ugyanezen csuklók szögsebességének illetve szöggyorsulásának időbeli változását mutatja. Mint látható, a szögsebességek időfüggvényei kisebb-nagyobb *töréseket* mutatnak, vagyis egyes trajektóriapontokban a csuklókat hajtó motoroknak igen nagy gyorsulásokat kellene kifejteniük. Minthogy a motorok által kifej-



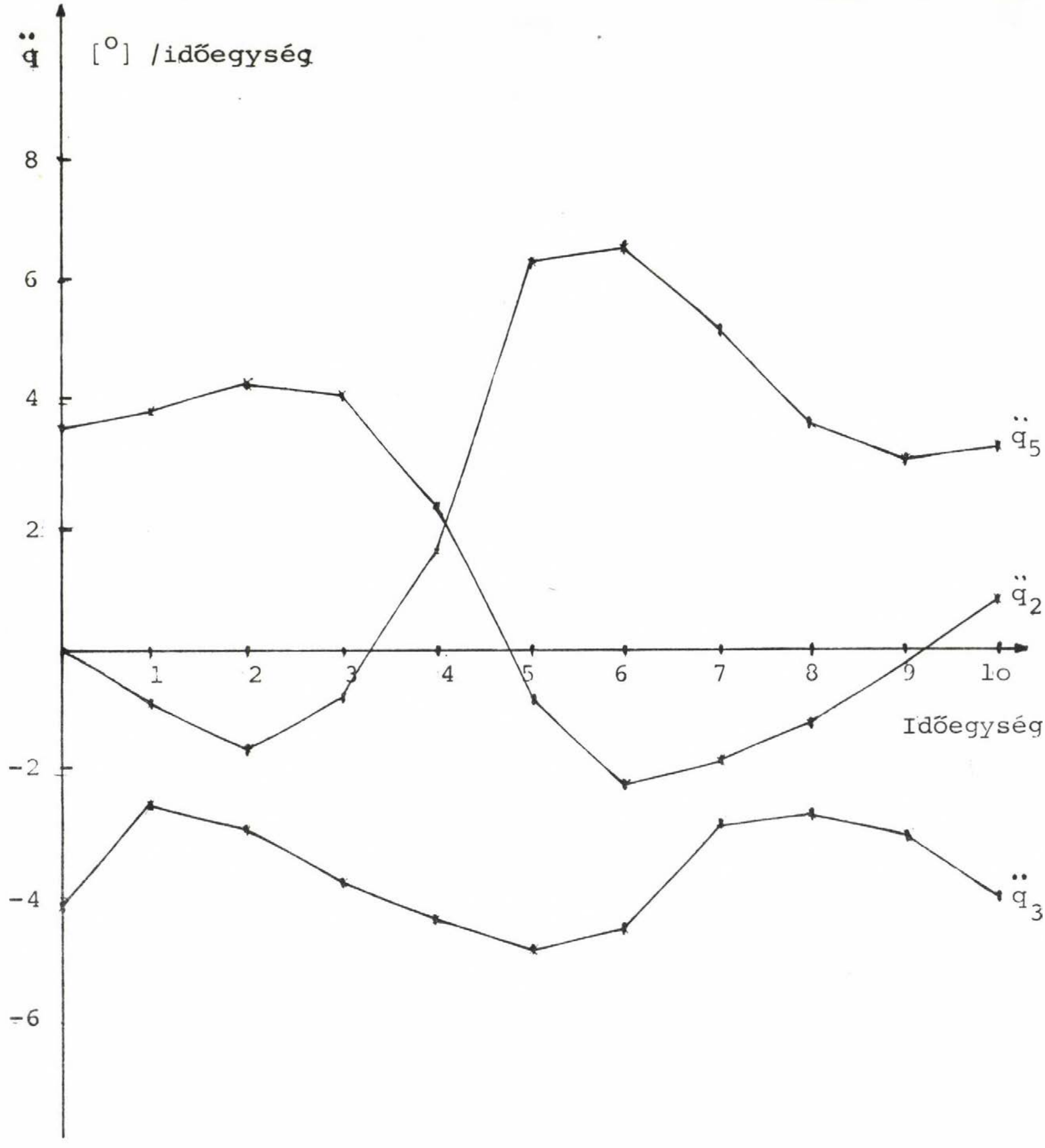
Csuklószögek változása

6.2.ábra



Csukló-szögsebességek

6.3.ábra



Csukló-szöggyorsulások

6.4.ábra

tett gyorsitó-lassitó nyomatékok csak véges határok között mozognak, a pontos pályakövetéshez az ilyen kritikus pontokon erősen le kellene lassitanunk a manipulátor mozgását.

Az ipari alkalmazásokat tekintve megfigyelhetjük, hogy a manipulátorok bevezetésével szemben felállitott elsőrendü követelmény azok *gazdaságos müködtetése*, ami szorosan összefügg az általuk kifejtett *munkavégzés sebességével*. Ugyanakkor elmondható, hogy az esetek tulnyomó többségében nincs szükség "abszolut pontos", vagyis a vezérlő számitógépek számitási pontosságával egy nagyságrendbe eső pontosságu mozgásra, sőt ezt a végrehajtó mechanizmus legtöbb esetben amugy sem tenné lehetővé. A gyakorlat azt mutatja, hogy a robotos szerelést - az alkatrészek megmunkálásához hasonlóan - bizonyos *türéssel* kell végrehajtani. E türési tartományok természetesen jóval tágabbak a megmunkálási feladatoknál szokásosaknál.

A türésezett manipulátormozgás lehetőségét figyelembe véve fogjuk az alábbiakban vezérelni a megfogó mozgását a "tartópontok" között és elemezni a "zökkenőmentes", vagyis hirtelen gyorsulásoktól-lassulásoktól mentes, folyamatos manipulátormozgás biztositása révén keletkező *pályakövetési hibákat*.

6.2.2. Feltételek a csuklók mozgására

A trajektória végállapotai közötti folyamatos, lökésmentes manipulátormozgást az alábbi feltételek figyelembevételével kell létrehoznunk:

a) A megfogónak a megengedett türésnek megfelelő pontossággal a trajektória tartópontok közelében kell haladnia;
b) Biztositani kell, hogy a végpontokon a manipulátor nyugalomba kerüljön (minden csuklósebesség és gyorsulás $\emptyset$);
c) Mind a csuklósebességek, mind a a csuklógyorsulások folytonos függvény szerint változzanak.
d) A csuklósebességek és gyorsulások nem haladhatják meg az illető hajtómüre vonatkozó maximális értékeket, amelyeket a maximális tengelynyomatékokból illetve motor fordulatszámokból ismerünk, s amely értékek az adott manipulátor konstrukciós jellegzetességei.

Az a/ - d/ feltételeket táblázatos formában a 6.5. ábra foglalja össze. A j index a csukló sorszámára utal ($j = 1...6$), az i index pedig arra, hogy a start és végállapot között hányadik trajektóriapontról van szó. q_j^* az adott állapothoz a 5. fejezet szerint számitott csuklószöget, q_{ji} az interpolációval számitottat jelöli. ε_j a csuklószögre megengedett követési hiba.

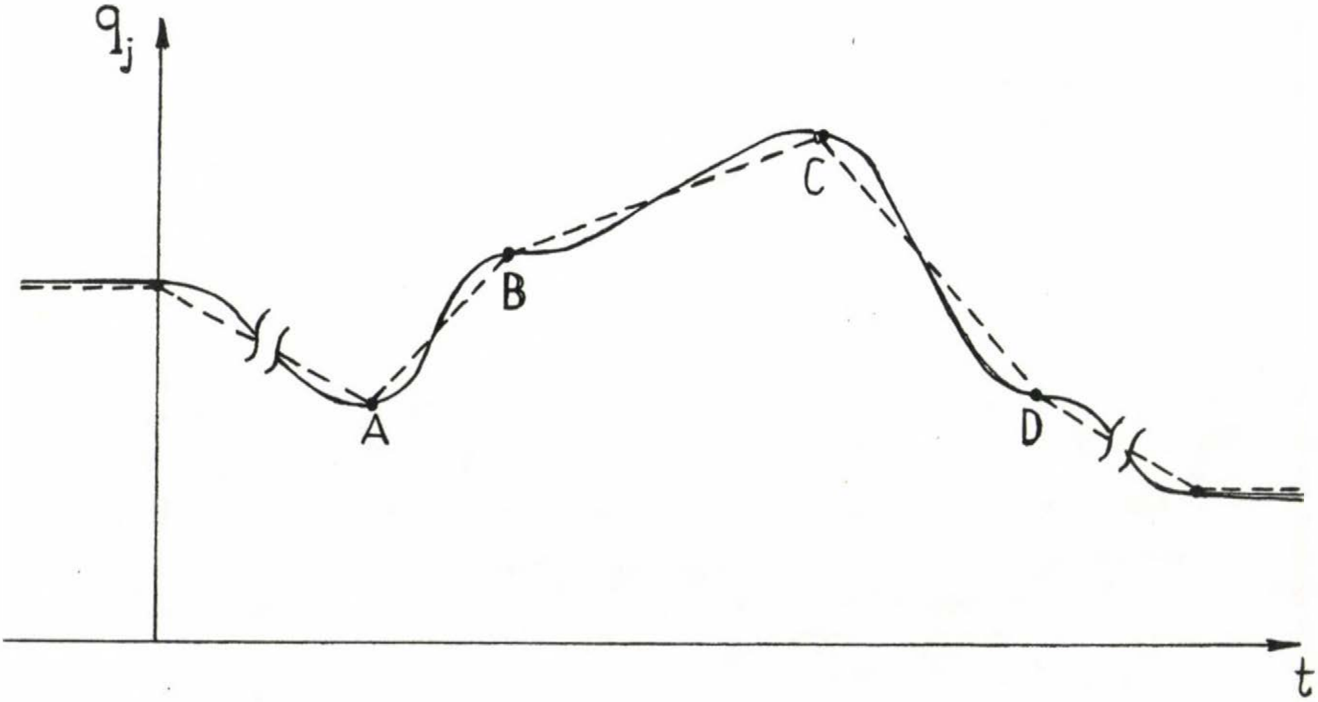
6.2.3. Egy csuklószög időbeli változása

Tekintsük a j-ik csuklószög időbeli változását a manipulátor trajektória egy szakaszán. Jelölje A, B, C, D az egymást követő tartópontokhoz tartozó q_j értékeket, amelyeket a manipulátor-transzformáció révén meghatározhatunk, A 6.6. ábra azt az esetet mutatja, amikor a manipulátort ugy vezetjük állapotról állapotra, hogy minden egyes tartóponton megállitjuk. (folytonos vonal) Ilymódon eleget tehetünk a 6.5. táblázat feltételeinek és a csuklók mozgását ugy koordináljuk, hogy minden egyes szakaszon megnézzük, hogy melyik csukló mennyi idő alatt képes az adott

	Csuklószög		
	Pozició	Sebesség	Gyorsulás
$\underline{x}_s$ (start pont)	$-q_{jmax} \leq q_{ji} \leq q_{jmax}$	ϕ	ϕ
$\underline{x}_i$ (közbülső pont)		$\dot{q}_{ji-} = \dot{q}_{ji+}$ $\lvert\dot{q}_{ji}\rvert < \dot{q}_{jmax}$	$\ddot{q}_{ji-} = \ddot{q}_{ji+}$ $\lvert\ddot{q}_{ji}\rvert < \ddot{q}_{jmax}$
$\underline{x}_f$ (végpont)	$\lvert q_{ji} - q_j^*\rvert \leq \varepsilon_j$	ϕ	ϕ

A csuklók mozgásának korlátozó feltételei

6.5. ábra



A csuklómozgás szakaszosan lineáris közelitése

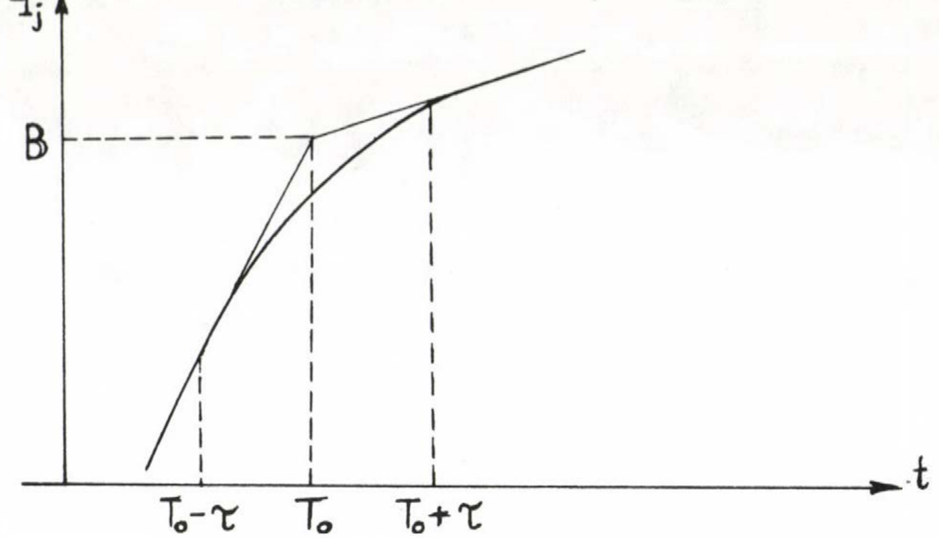
6.6. ábra

utat bejárni, és a teljes mozgást ezen idők maximuma alatt hajtjuk végre. Az állandó gyorsitás-lassitás miatt a mozgás igen lassu lesz és az A, B, C, D pontokban való megállitásra egyébként nem lenne szükség. Ezért először egyenes darabokkal kötjük össze az emlitett pontokat (6.6.ábra, szaggatott vonal), ami $q_j(t)$ szakaszosan lineáris approximációját jelenti. Mint látható, a 6.5. táblázatban feltüntetett feltételek nem teljesülnek, mivel $q_i(t)$ ebben a formában a tartópontokban törést szenved.

A lineáris megközelités szerint minden tartópontban két, állandó sebességü csuklómozgás találkozik. A rendelkezésre álló maximális csuklógyorsulások figyelembevételével meghatározzuk azt a 2τ *átmeneti időt*, amely alatt a mozgás az egyik sebességről a másikra felgyorsul, illetve lelassul. A csuklómozgások koordinációját ugy biztositjuk, hogy az összes csuklóra meghatározott átmeneti idők közül a megnagyobbat (τ_{max}) fogjuk alkalmazni minden egyes átmenetre.

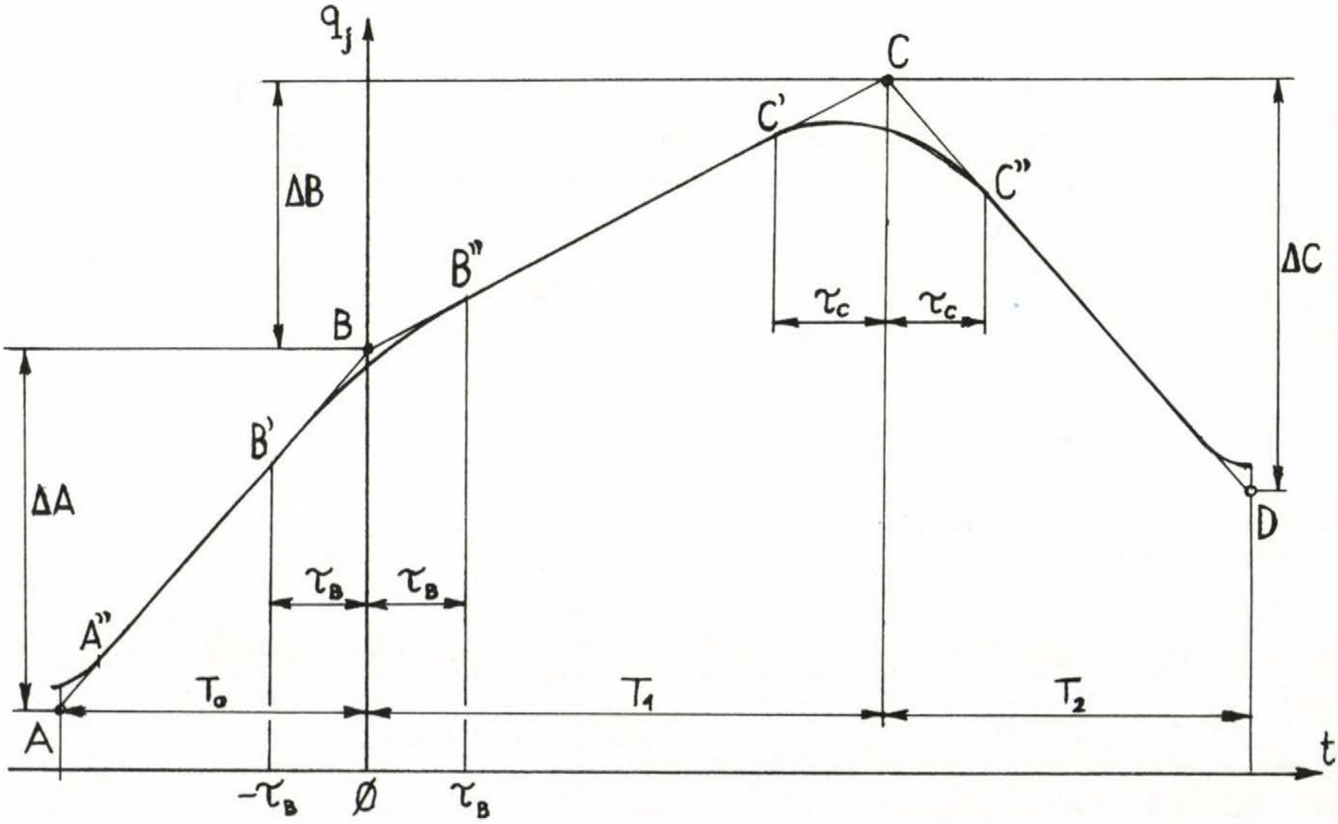
A sebességváltozás minden egyes csuklónál a következő tartópont elérését megelőző τ idővel kezdődik és az uj mozgásszakaszba való belépést követően τ ideig tart. (6.7.ábra)

Szimmetrikus gyorsulásfüggvény bevezetésével (6.2.4.pont) nemcsak a szükséges sebességváltozást hozzuk létre a 2τ időtartam során, hanem azt is biztositjuk, hogy az eredő pozicióváltozás ($T_o + \tau$ időpont után) azonos lesz azzal, amit akkor kapnánk, ha a sebességváltozást a T_o időpontban impulzusszerüen alkalmaztunk volna.



A csuklómozgás közelitése egy tartópont környezetében

6.7. ábra



Egy csuklószög időbeli változásának approximációja

6.8. ábra

6.2.4. A csuklószög-idő függvény approcimációja

Az átmenet során a manipulátor csuklók poziciója és sebessége folytonos kell legyen a kar rezgésének csökkentése, illetve a zökkenőmentes mozgás érdekében. Az átmeneti időbeli gyorsulásra két, egymásnak ellentmondó követelményünk van:

(1) Korlátozott ampilitudó mellett ugrásszerü gyorsulás-függvény, ami az átmeneti idő minimalizálását tenné lehetővé. A maximális gyorsulást q_{jmax}-mal jelölve $2\tau = \Delta q_j / q_{jmax}$.

(2) A kar rezgés minimalizálása érdekében a gyorsulás értéke $-\tau$ és τ időpontokban nulla kell legyen.

A fentieknek, illetve a 6.5. táblázatban rögzitett feltételeknek jó közelitéssel eleget tudunk tenni, ha a csuklógyorsulások időbeli változását négyzetes időfüggvénnyel approximáljuk. A közelitő függvény paramétereit a 6.5 ábra szerinti feltételek figyelembevételével számitjuk ki.

Jelölések:

A, B, C, D trajektória tartópontok

$$\dot{q}_j = \frac{dq_j(t)}{dt}, \qquad \ddot{q}_j = \frac{d^2 q_j(t)}{dt}$$

$$\Delta A = q_{jB} - q_{jA}, \qquad \Delta B = q_{jC} - q_{jB}$$

$$V_o = \Delta A / T_o, \qquad V_1 = \Delta B / T_1, \qquad V_2 = \Delta C / T_2$$

τ_B, τ_C a B, C trajektóriapontokhoz tartozó tranziens idők

T_1, T_2 a lineáris approximációból nyert mozgásidők a B - C illetve C- D szakaszon.

A csuklómozgást leiró egyenletek:

$$\ddot{q}_j = kt^2 + lt + m \quad (6.9)$$

$$\dot{q}_j = \frac{k}{3} t^3 + \frac{l}{2} t^2 + mt + n \quad (6.1o)$$

$$q_j = \frac{k}{12} t^4 + \frac{l}{6} t^3 + \frac{m}{2} t^2 + mt + o \quad (6.11)$$

A feladat a k, l, m, n, o együtthatók meghatározása.

A 6.5. táblázat és a 6.8. ábra szerint

$t = -\tau_B$ időpontban

$$\ddot{q}_j = \emptyset \quad (6.12)$$

$$\dot{q}_j = V_o \quad (6.13)$$

$$q_j = B - V_o \cdot \tau_B \quad (6.14)$$

$t = \tau_B$ időpontban

$$\ddot{q}_j = \emptyset \quad (6.15)$$

$$\dot{q}_j = V_1 \quad (6.16)$$

$$q_j = B + V_o \cdot \tau_B \quad (6.17)$$

(6.12)-et és (6.15)-et (6.9)-be helyettesitve:

$$\emptyset = k\ \tau_B^2 - l\ \tau_B + m \quad (6.18)$$

$$\emptyset = k\ \tau_B^2 + l\ \tau_B + m \quad (6.19)$$

tehát

$$\underline{l = \emptyset} \quad (6.2o)$$

(6.14)-t , (6.17)-t és (6.2o)-t (6.11)-be helyettesitve:

$$B - V_o\tau_B = \frac{k}{12}\tau_B^4 + \frac{m}{2}\tau_B^2 - n\tau_B + o \qquad (6.21)$$

$$B + V_1\tau_B = \frac{k}{12}\tau_B^4 + \frac{m}{2}\tau_B^2 + n\tau_B + o \qquad (6.22)$$

(6.22) és (6.21) különbséget képezve:

$$(V_o + V_1)\tau_B = 2n\tau_B$$

$$\underline{n = (V_o + V_1)/2} \qquad (6.23)$$

(6.13)-t és (6.16)-t, valamint l és n értékét (6.1o)-be helyettesitve:

$$V_o = - \frac{k}{3}\tau_B^3 - m\tau_B + (V_o + V_1)/2 \qquad (6.24)$$

$$V_1 = \frac{k}{3}\tau_B^3 + m\tau_B + (V_o + V_1)/2 \qquad (6.25)$$

(6.23) és (6.22) különbségéből:

$$V_1 - V_o = \frac{2k}{3}\tau_B^3 + 2m\tau_B \qquad (6.26)$$

Másrészt (6.19)-ből:

$$m = - k\tau_B^2 \qquad (6.27)$$

(6.27)-t (6.26)-ba helyettesitve:

$$V_1 - V_o = \frac{2k}{3}\tau_B^3 - 2k\tau_B^3$$

tehát

$$\underline{k = - \frac{3}{4}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B^3}} \qquad (6.28)$$

és

$$m = \frac{3}{4}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B} = -\tau_B{}^2 k \tag{6.29}$$

Végül a k, l, m, n együtthatókat (6.22)-be helyettesitve:

$$B + V_1\tau_B = -\frac{3}{48}(V_1 - V_o)\tau_B + \frac{3}{8}(V_1 - V_o)\tau_B + \frac{V_o + V_1}{2}\tau_B + o \tag{6.3o}$$

ahonnan

$$o = B + \frac{3}{16}(V_1 - V_o)\tau_B \tag{6.31}$$

Tehát a csuklómozgást leiró egyenletek:

$-\tau_B < t \leqslant \tau_B$ esetén:

$$q_j(t) = -\frac{1}{16}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B{}^3}\,t^4 + \frac{3}{8}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B}\,t^2 + \frac{V_1 + V_o}{2}t + \frac{3}{16}(V_1 - V_o)\tau_B + B \tag{6.32}$$

$$\dot{q}_j(t) = -\frac{1}{4}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B{}^3}\,t^3 + \frac{3}{4}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B}\,t + \frac{V_1 + V_o}{2} \tag{6.33}$$

$$\ddot{q}_j(t) = -\frac{3}{4}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B{}^3}\,t^2 + \frac{3}{4}\,\frac{V_1 - V_o}{\tau_B} \tag{6.34}$$

és $\tau_B < T \leqslant T_1 - \tau_C$ esetén

$$q_j(t) = V_1 t \tag{6.35}$$

$$\dot{q}_j(t) = V_1 \tag{6.36}$$

$$\ddot{q}_j(t) = \emptyset \tag{6.37}$$

A $t = T_1 - \tau_C$ időpontban az alábbi helyettesitéseket kell elvégezni: (6.8.ábra)

$$\tau_B = \tau_C$$

$$t = -\tau_B$$

$$T_o = T_1$$

$$T_1 = T_2$$

$$V_o = V_1$$

$$V_1 = \Delta C/T_2$$

és az igy nyert uj értékeket a (6.32)... (6.37) egyenletekbe ismét behelyettesitve kapjuk a soron következő pályaszakasz csuklószög-idő függvényét.

6.2.5. A tranziens idő meghatározása

A τ_C tranziens időt az adott csuklóra megengedett maximális gyorsulásból számitjuk ki. A gyorsulás akkor éri el maximumát, amikor

$$\ddot{q}(t) = 2kt + l = \emptyset \qquad \text{teljesül.}$$

Mivel $l = \emptyset$, a gyorsulás a $t = \emptyset$ időpontban a legnagyobb. (6.34)-ból:

$$\ddot{q}(\emptyset) = \frac{3}{4} \frac{V_2 - V_1}{\tau_C}$$

Ismervén $\ddot{q}_{jmax}$-t, a megengedett gyorsulás maximumot, megkapjuk a j-ik csukló minimális tranziens idejét:

$$\tau_{Cj} = \frac{3}{4} \frac{V_{2j}-V_{1j}}{\ddot{q}_{jmax}} \qquad (6.38)$$

A (6.38) kifejezést az összes csuklóra kiértékelve (a j indexszel jelöltük, hogy V_1, V_2 csuklónként változó mennyiségek) megkapjuk az *összes csuklóra közös tranziens időt:*

$$\tau_c = \max_j \left\{ \frac{3}{4} \frac{V_{2j} - V_{1j}}{\ddot{q}_{jmax}} \right\} \qquad (6.39)$$

Mint látható, a tranziens időt egy periódussal előre kell kiszámitani, mivel az éppen bejárandó szakasz végpontját csak ennek ismeretében tudjuk kijelölni. A 6.8 ábra jelöléseivel az A" pontba (az A körüli tranziens szakasz vége) érkezés pillanatában már ismerni kell τ_B-t, hogy meg lehessen határozni az A" és B" pontok közötti haladás idejét. B' elérésekor pedig ismerni kell a (6.11) egyenlet együtthatóit, hogy a B' és B" pontok közötti szakasz bejárása során a csuklószögpoziciókat folyamatosan ki lehessen értékelni. Mire a manipulátor a B" állapotot veszi fel, addigra pedig τ_C-nek kell ismertnek lenni. (Feltételezzük továbbá, hogy a T_o, T_1, T_2, V_o, V_1, V_2, stb. értékek szintén rendelkezésre állnak egy táblázat formájában.

A javasolt kvadratikus pályaapproximációs módszer előnye az, hogy a pálya bejárása során felvett csuklószög-értékek a mozgás során folyamatosan, kevés aritmetikával számolhatók. Amennyiben a manipulátor mozgása külön processzor felügyelete alatt történik, a *mozgással egyidejüleg számolhatók a pályaparaméterek* és - miközben a mozgás nem veszit folyamatosságából - jelentős mennyiségü memóriát takarithatunk meg.

6.2.6. Inditás és megállás

A "sima" mozgást nemcsak a pálya bejárására során érintett pontokban, hanem az indulás és a megállás pillanatában is megköveteljük.

Az *inditási* szituációt a 6.9 ábra mutatja:(a manipulátor az A állapotban nyugalmi helyzetben van)

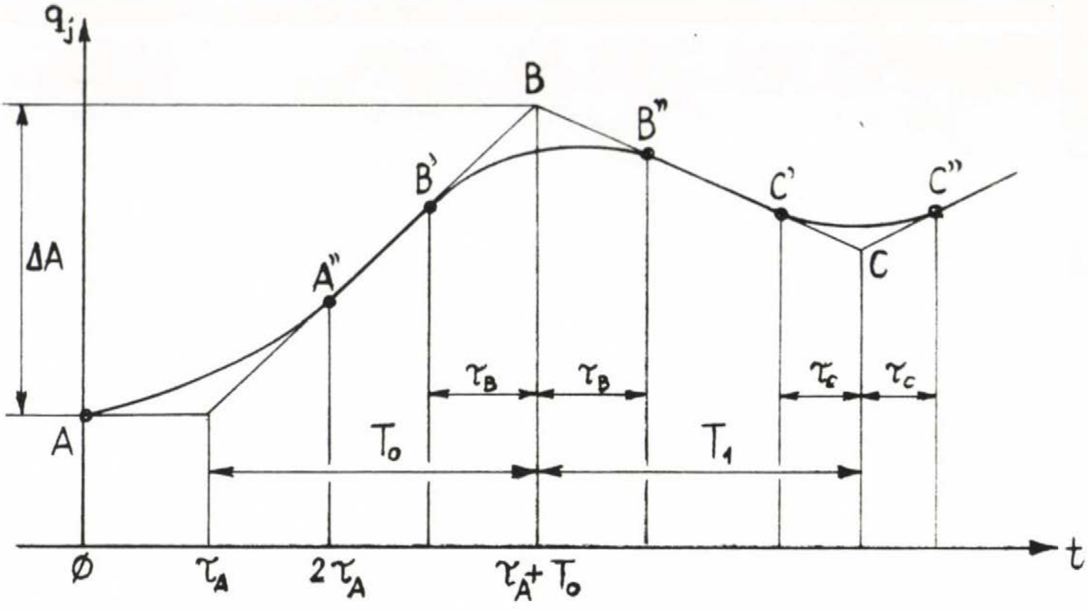
Az inditás pillanatában $V_o = \emptyset$ és $V_1 = \Delta A/T_o$. Ezek ismeretében határozzuk meg a τ_A tranziens időt (6.39)-hez hasonlóan, továbbá a 6.11 egyenletben szereplő együtthatókat a 6.2.4. pontban ismertetett módon. Minthogy most a tranziens mozgás a $t = \emptyset$ időpontban kezdődik, az A és B állapotok közti szakasz megtételének ideje $T_o + \tau_A$ lesz. τ_B számitása az A- A" tranziens megtétele alatt történhet.

A *megállás* esete a 6.lo ábrán látható.

A megállitáshoz elegendő, ha a stop állapotot (C) megismételjük (D), vagyis ilyenkor $V_1 = \emptyset$ lesz és a mozgás a $T_1 + \tau_C$ időpontban nyugalomba kerül. Ezt az eljárást kell alkalmaznunk akkor, ha valamelyik csuklót pozicióhiba nélkül akarjuk átvezetni egy adott ponton: ilyenkor a τ_C tranziens eltelte után ujraindithatjuk a mozgást.

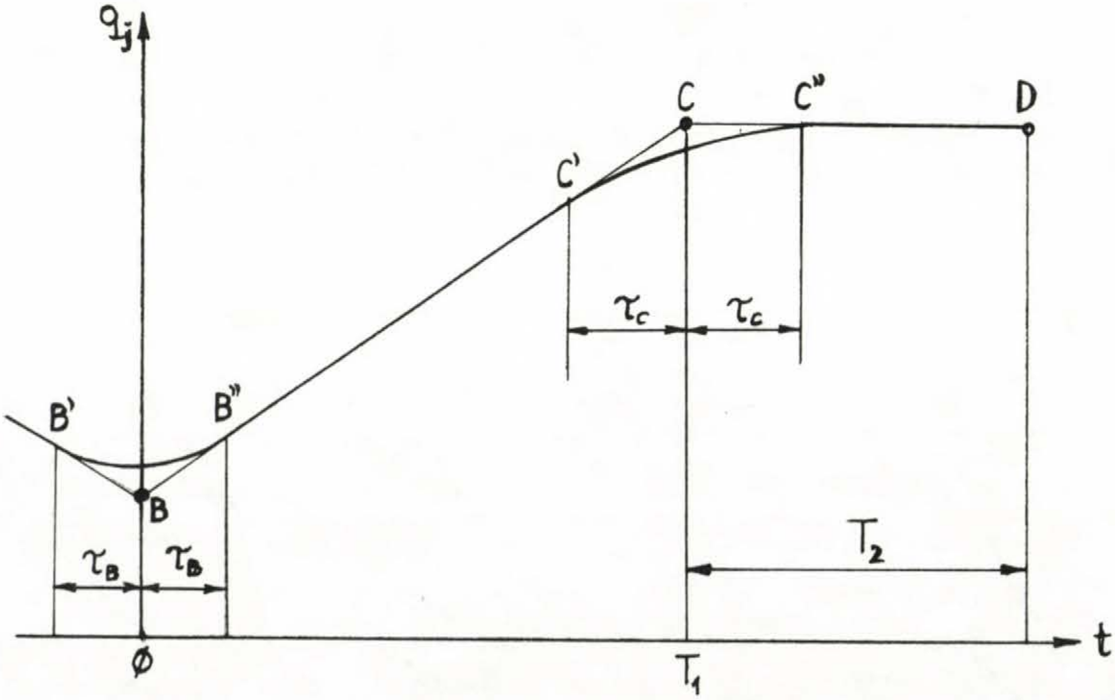
6.2.7. A csuklómozgás simitása következtében fellépő csuklópozició-hiba

A 6.8 ábrán látható, hogy pozicióhiba a tranziens szakaszon lép fel. Ennek értéke a B állapoton való keresztülhaladáskor:



Csuklómozgás inditása

6.9. ábra



Csuklómozgás megállitása

6.lo. ábra

$$h_{jB} = B - q_j(\emptyset)$$

tehát (6.24)-ből

$$h_{jB} = \frac{3}{16}(V_o - V_1)\tau_B \qquad (6.4o)$$

vagyis a pozicióhiba az adott pontban megkivánt csukló-sebességváltozással arányos.

7. HIBAELEMZÉS

A 6.2.1. pontban emlitettük, hogy a robotos szerelési feladatok specifikációjához az előirt mozgások türésezése is hozzátartozik. A robotmozgásra előirt türésekkel kapcsolatban két szempontot kell megvizsgálnunk:

a) A csuklók pozicionálásában - elsősorban mechanikai okokból (pl. az áttételrendszer kotyogása) - mindenképp jelenlévő bizonytalanság miképp szabja meg a robotkéz poziciójának és orientációjának bizonytalanságát;

b) A robotkézre előirt türés milyen pozicionálási pontosságot kiván meg az egyes csuklóknál.

Az a) kérdés megválaszolásával meg tudjuk mondani, hogy az adott manipulátorral egy bizonyos szerelési feladat elvileg elvégezhető-e, legalábbis oly módon, hogy a manipulátort minden egyes trajektória tartópontban megállitjuk. (6.2.6. pont.)

A b) kérdést akkor kell megvizsgálnunk, ha az a) feladatra pozitiv választ kaptunk, vagyis a robotkézre előirt mozgás a csuklók mozgásának a minimálisnál nagyobb játékát engedi meg: ilyenkor lesz arra lehetőségünk, hogy a robotkezet a trajektória közbenső pontjain folyamatos mozgással vezessük át, ahogyan azt a 6.2. pontban láttuk. Az egyes csuklókra megengedett poziciónálási hibákat a (6.4o) kifejezésbe helyettesitve meghatározhatjuk az adott pontban megengedett sebességváltozást.

7.1. A CSUKLÓPOZICIONÁLÁS BIZONYTALANSÁGÁNAK HATÁSA A ROBOTKÉZ ÁLLAPOTÁRA

A robotkéz-állapot hibájának meghatározását az alábbi sorrendben végezzük:

1. Az $\underline{A}_{o,3}$ (3.11) és $\underline{A}_{3,6}$ (3.17) mátrixok összeszorzásával meghatározzuk a robotkéz pozicióját($\underline{A}_{o,6}$ utolsó oszlopa) és orientáció mátrixát ($\underline{A}_{o,6}$ bal felső 3 x 3-as particiója)
2. A 6 csuklószög szerinti parciális deriváltak képzésével kiszámitjuk az egyes mátrixelemekben fellépő eredő hibát.

7.1.1. A robotkéz állapota

Az alábbiakban a 3.4. fejezetben alkalmazott jelöléseket fogjuk használni. Eszerint a robotkéz *poziciója* (3.11) és (3.12) szorzatából:

$$a_{14}=x= Bc1s2 + Cc1s23 + D(c1c23c4s5 -s1s4s5 + c1s23c5) \quad (7.1)$$

$$a_{24}=y= Bs1s2 + Cs1s23 + D(s1c23c4s5 + c1s4s5 + s1s23c5) \quad (7.2)$$

$$a_{34}=z= A + Bc2 + Cc23 + D(c23c5 - s23c4s5) \quad (7.3)$$

Az *orientációmátrix* elemei

$$a_{11}= c1c23c4c5c6 - c1c23s4s6 - s1s4c5c6 - s1c4s6 - c1s23s5c6 \quad (7.4)$$

$$a_{12}=-c1c23c4c5s6 -c1c23s4c6 + s1s4c5s6 -s1c4c6 + c1s23s5s6 \quad (7.5)$$

$$a_{13}= c1c23c4s5 - s1s4s5 + c1s23c5 \quad (7.6)$$

$$a_{21}= s1c23c4c5c6 - s1c23s4s6 + c1s4c5c6 + c1c4s6 - s1s23s5c6 \quad (7.7)$$

$$a_{22}= -s1c23c4c5s6 - s1c23s4c6 - c1s4c5s6 + c1c4c6 + s1s23s5s6 \quad (7.8)$$

$$a_{23}= s1c23c4s5 + c1s4s5 + s1s23c5 \quad (7.9)$$

$a_{31} = -s23c4c5c6 + s23s4s6 - c23s5c6$ (7.1o)

$a_{32} = s23c4c5s6 + s23s4c6 + c23s5s6$ (7.11)

$a_{33} = -s23c4s5 + c23c5$ (7.12)

$a_{41} = a_{42} = a_{43} = \emptyset$

$a_{44} = 1$

7.1.2. A kéz-állapot hibája

A kéz-állapotot leiró mátrix egyes elemeibe a 6 csuklószög beállási pontatlanságaiból származó hibákat az alábbi alakban kapjuk meg:

$$\Delta \underline{A}_{o,6} = [\Delta a_{k,l}] = \sum_{j=1}^{6} \frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_j} \Delta q_j = \left[\sum_{j=1}^{6} \frac{\partial a_{k,l}}{\partial q_j} \Delta q_j \right],$$

$$k,l = 1, 2, 3, 4 \qquad (7.13)$$

E hiba-mátrix első három oszlopa a kéz-orientáció, a negyedik oszlop a kéz pozició hibáját adja meg. Az eredő hibamátrixot összetevő 6 parciális hibamátrixot a (7.1)...(7.12) egyenletből nyerjük. A meglehetősen hosszadalmas számitás eredményeként a (7.14)...(7.19) összetevő mátrixokat kapjuk.

A kéz-állapot hibájának meghatározásakor eltekintünk attól, hogy explicit módon megadjuk az Euler szögekben (α, β, γ) fellépő, az egyes csuklószögek beállási pontatlanságából származó hibákat, mivel az Euler szögek a csuklószögeknek az orientációmátrix elemein keresztül képzett, összetett függvényei. (4. fejezet)

A pozició és orientációhibák meghatározására elsősorban a robotos szerelési feladat pályatervezési fázisában, a tényleges mozgás végrehajtását megelőzően van szükség. Minthogy ezt a számitást illesztési feladatoknál nagyszámu trajektóriapontra el kell végezni, a $\partial \underline{A}_{o,6} / \partial q_j$ parciálisok kiszámitásánál figyelembe kellett venni a szükséges számitási idő és memória minimalizálását. Ezért az alábbi mátrixkifejezésekben, ahol lehetett, a *manipulátortranszformációs számitások* (3.fejezet) részeredményei kerültek alkalmazásra. Ilymódon szerepelnek az $\underline{A}_{o,6}$ mátrix elemei (7.1...7.12), amelyeket $a_{k,l}$, az $\underline{A}_{o,3}$ mátrix elemei (3.11), amelyeket $e_{k,l}$ és az $\underline{A}_{3,6}$ mátrix elemei (3.11) ,amelyeket $h_{k,l}$ (k,l = 1, 2, 3, 4) jelöl.

A (7.13) kifejezést összetevő mátrixok az alábbiak:(mindegyik mátrix egy-egy csuklószög hibájának a robotkéz állapotára gyakorolt hatását mutatja)

$$\frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_1} \Delta q_1 = \begin{bmatrix} -a_{21} & -a_{22} & -a_{23} & -a_{24} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} * q_1 \qquad (7.14)$$

$$\frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_2} \Delta q_{12} = \begin{bmatrix} e_{11} & \emptyset & -e_{13} & Bclc2 \\ e_{21} & \emptyset & -e_{23} & Bslc2 \\ e_{31} & \emptyset & -e_{33} & -Bs2 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_{31} & h_{32} & h_{33} & C+D\,h_{33} \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ h_{11} & h_{12} & h_{13} & D\,h_{13} \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & 1 \end{bmatrix} * \Delta q_2$$

$$
= \begin{bmatrix} a_{31}cl & a_{32}cl & a_{33}cl & Bclc2+Ce11+D(e_{11}h_{33}-e_{13}h_{13}) \\ a_{31}sl & a_{32}sl & a_{33}sl & Bslc2+Ce21+D(e_{21}h_{33}-e_{23}h_{12}) \\ e_{31}h_{31}-e_{33}h_{11} & e_{31}h_{32}-e_{33}h_{12} & e_{31}h_{33}-e_{33}h_{13} & -Bs2+Ce31+D(e_{31}h_{33}-e_{33}h_{13}) \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} * \Delta q_2
$$

(7.15)

$$
\frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_3} \Delta q_3 =
$$

$$
= \left\{ \frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_2} \begin{bmatrix} \emptyset & \emptyset & \emptyset & -Bclc2 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & -Bslc2 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & Bs2 \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} \right\} * \Delta q_3 \qquad (7.16)
$$

$$
\frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_4} \Delta q_4 =
$$

$$
= \begin{bmatrix} -e_{11} & e_{12} & \emptyset & \emptyset \\ -e_{21} & e_{22} & \emptyset & \emptyset \\ -e_{31} & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_{21} & h_{22} & h_{23} & D\,h_{23} \\ h_{11} & h_{12} & h_{13} & D\,h_{13} \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} * \Delta q_4
$$

(7.17)

$$\frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_5} \Delta q_5 =$$

$$= \begin{bmatrix} -a_{13}c6 & a_{13}s6 & e_{11}\,c4c5+e_{12}s4c5-e_{13}s5 & D\,\dfrac{\partial a_{13}}{\partial q_5} \\ -a_{23}c6 & a_{23}s6 & e_{21}\,c4c5+e_{22}s4c5-e_{23}s5 & D\,\dfrac{\partial a_{23}}{\partial q_5} \\ -a_{33}c6 & a_{33}s6 & e_{31}\,c4c5-e_{33}s5 & D\,\dfrac{\partial a_{33}}{\partial q_5} \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} * \Delta q_5 \qquad (7.18)$$

$$\frac{\partial \underline{A}_{o,6}}{\partial q_6} \Delta q_6 = \begin{bmatrix} a_{12} & -a_{11} & \emptyset & \emptyset \\ a_{22} & -a_{21} & \emptyset & \emptyset \\ a_{32} & -a_{31} & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{bmatrix} * \Delta q_6 \qquad (7.19)$$

Megjegyzés: A (7.14)... (7.19) mátrixokból néhány - könnyen ellenőrizhető geometriai következtetés vonható le:

- (7.14)-ből látszik, hogy Δq_1 a kéz z koordinátáját nem befolyásolja
- (7.19)-ből látható, hogy Δq_6-nak nincs befolyása a kéz poziciójára és z irányu egységvektorára. (Az utolsó tag u.i. éppen a kéz z irányába mutat.)

7.2. A CSUKLÓSZÖGEKRE MEGENGEDETT BEÁLLITÁSI PONTATLANSÁG SZÁRMAZTATÁSA A SZERELÉSI "TÜRÉSEKBŐL"

A csuklószög-trajektóriáknak a 6.2.pontban vázolt módon való összeállitása érdekében ki kell számitanunk, hogy - ismerve a robotkéz trajektória kijelölt pontjaiban megengedett kézpozició és orientáció hibát (a szerelési "türéseket") - milyen eltéréseket engedhetünk meg az egyes csuklószögeknek az egyes trajektóriapontokban történő beállitásában. E szög-hibákat meghatározva tudjuk kiszámitani a simitott csuklószög-idő függvényeket, illetve a csuklómozgások sebsségét. A csuklószög-hibákat az alábbi alakban irhatjuk fel:

$$\Delta q_i = \sum_{j=1}^{6} \frac{\partial q_i}{\partial s_j} \Delta s_j \qquad i = 1,\dots,6 \qquad (7.2o)$$

ahol Δq_i az i-ik csuklószög hibája, Δs_j pedig a j-ik kézállapot koordináta hibája.($\Delta s_1 = \Delta X$, $\Delta s_2 = \Delta y,\dots,\Delta s_6 = \Delta\gamma$)

A $\partial q_i/\partial s_j$ parciális deriváltak explicit kifejezése igen bonyolult, mivel ehhez meg kell határoznunk a $q_i(s_j)$ kapcsolatokat is. Az 5. fejezetben ismertetett megoldásban ezt elkerültük: ott a q_1, q_2, q_3 szögeket a többi csuklószögtől függetlenül meghatároztuk, a q_4, q_5, q_6 szögeket pedig már ezek függvényében számitottuk ki, e három csuklószögnek a kéz-állapotkoordinátáktól való függése *explicit kiszámitására* nem volt szükség.

A q_1, q_2, q_3 csuklószögek hibáinak a 6 kéz-koordináta hibájával való kapcsolatát - meglehetősen összetett kifejezések formájában - a Függelék ismerteti. Mivel Δq_4, Δq_5, Δq_6-ra olyan bonyolult kifejezéseket kapnánk, amelyek explicit kiértékelése a számitási pontatlanság miatt sem volna eredményes, a Δq_i hibákat célszerü az adott trajektóriapontban történő lineáris interpolációval becsülni. Ennek lényege az, hogy a 7.1.2. pontban kiszámitott Δs_j $j = 1,\ldots,6$ kéz-állapotkoordináta hibákat az adott trajektóriapontban - szerelési türések formájában - megadott kéz-állapotkoordináta hibákkal összehasonlitjuk és a megfelelő Δq_i, $i = 4, 5, 6$ csuklószöghibákat ugyanabban az arányban növeljük.

8. SZÁMITÓGÉPES IMPLEMENTÁCIÓ

A manipulátorirányitó software kialakitásában lényeges szempont azoknak a programrészeknek a világos szétválasztása, amelyek *függetlenek* egy adott manipulátor kinematikai elrendezésétől (*pályatervező* programok) illetve amelyek egy adott *manipulátor kialakitással összefüggő*, a trajektória bejárásával kapcsolatos számitásokat végzik (*pályaszámitó* és *manipulátorvezérlő* programok).

Ez a fejezet egy ilyen alapon felépülő szerelési rendszer számitógépes megvalósitásával foglalkozik.

A pályatervezési rendszer egyes komponensei az MTA-SzTAKI Mesterséges Intelligencia Laboratóriumában készültek el, a pályaszámitó programok egy részét pedig a szerző Cambridge University Control & Management Science Tanszékén implementálta. (6.1 pont.)[Siegler, 1979]

A manipulátorvezérlés programozása a COROHAND robotkézre jelenleg folyik az MTA-SzTAKI-ban.

8.1. A PÁLYATERVEZÉS INFORMÁCIÓFORRÁSAI

A pályatervező rendszer információforrásai az alábbiak:
- a robot környezetének modellje (szituációleirás)
- a manipulálandó munkadarabok modelljei (munkadarableirás)
- az elvárt cselekvés megfogalmazása (müveletleirás)

A *szituációleirás* jelenti a gyártósejt geometriai reprezentációját, ebből tudjuk előállitani a manipulátor munkaterének pontos geometriai leirását: a mozgás során bejárható és tiltott zónákat. A szituációleirásból állapitható meg a manipulátor által kiszolgált berendezések: szerszámgépek, tárolók, szerelő- és szállitószalagok pontos térbeli helyzete. Tágabb értelemben a szituációleirás nemcsak "térbeli", hanem a munkafázisokra vonatkozó "időbeli" információkat is ad: ez utóbbi teszi lehetővé a müveleti sorrend tervezését, a gyártó és kiszolgáló berendezések illetve a robot optimális kihasználását. A szituáció-leirás geometriai vonatkozásai az *ütközésmentes* manipulátorpályák tervezése szempontjából elsődlegesek. [Udupa, 1976]

A *munkadarabok leirása* az alábbi összetevőket tartalmazza:

- munkadarabok térbeli elhelyezkedése: abszolut térbeli helyzetük, illetve egymáshoz, vagy más geometriailag ismert tárgyakhoz képesti elhelyezkedésük:
- a munkadarabok geometriai leirása: méreteik, egyéb alakjellemzőik;
- a szerelési technológiával kapcsolatos további információk (megfogási pontok, bázisfelületek, stb.)

A munkadarableirásból származó információk jelentősége annál nagyobb, minél automatizáltabban akarjuk a szerelést tervezni. A robotkézzel történő megfogáshoz szükséges mozdulatsorozat automatikus összeállitásához szükség van a munkadarab geometriájának pontos ismeretére. [Wingham, 1977] A munkadarabok relativ elhelyezkedésének ismeretében elvileg a szerelés sorrendje és teljes mozgáskészlete is kikövetkeztethető. [Ambler, 1975], amint arra a 2.2.1. pontban utaltunk.

A *müveletleirás* explicite tartalmazza a szerelési tervet, hiszen annak automatikus létrehozása ma még csak egészen speciális esetekben megoldott. A müveletleirás keretén belül tudunk alkalmazkodni a rendelkezésünkre álló szerelésirányitó rendszer automatizáltsági szintjéhez: minél részletesebben irjuk le a robottól megkivánt cselekvéseket - általában egy programozási nyelv formájában -, annál kevesebb logikai-geometriai következtetést kell a számitógépnek a szituáció- és munkadarableirásból automatikusan elvégeznie.

A pályatervező rendszer feladata, hogy a szituáció-, munkadarab- és müveletleirás ismeretében megtervezze a szerelés végrehajtásához szükséges robot-mozgássorozatot és a robotmozgás során elvégzendő egyéb müveleteket (pl.szerszámok, megfogók, befogókészülékek müködtetése). A pályatervezés folyamata a magas szintü számitógépes nyelvek forditásához hasonlitható, amennyiben egy, az emberi nyelvhez hasonló, szimbólikus adathivatkozásokat tartalmazó programtervből a manipulátor fizikai sajátosságainak megfelelő, annak funkcionális elemeire hivatkozó célprogram keletkezik. Az eredményül kapott, interpretativ üzemmódban "lejátszható" robot program kód a számitógépek gépi kódjához hasonlitható. A jelenleg müködő legátfogóbb pályatervező rendszer az AL [Taylor, 1976], amely "feladat-szintü" müveletleirásból egy számitógéppel vezérelt robot által közvetlenül végrehajtható interpreter kódot generál.

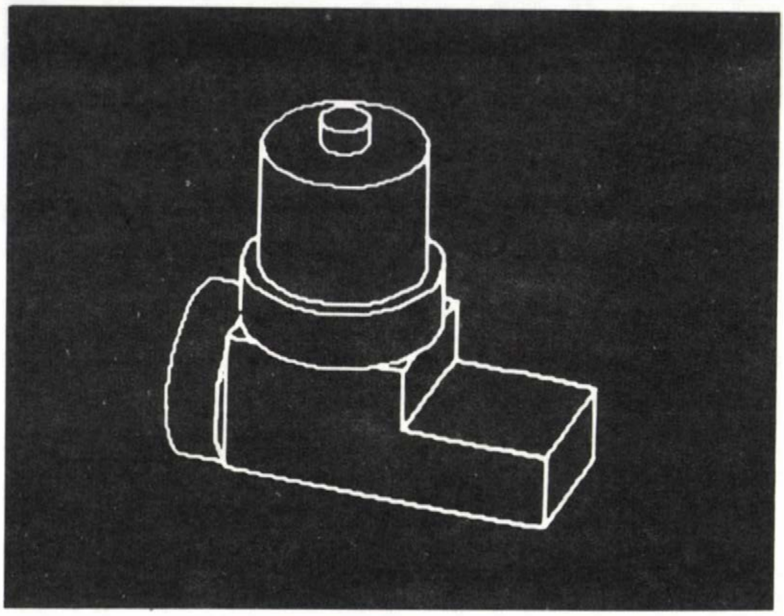
E dolgozat témája a robotirányitás második fázisa, az automatikusan vagy ember által megtervezett és specifikált pályák végrehajtása, vagyis a *pályaszámitás*. Ami az első fázis, vagyis a *pályatervezés* számitógépes megvalósitását illeti, ennek *munkadarab-* és *szituáció specifikációs része* készült el. A munkadarabok és a robot környezet leirása számitógépes, grafikus interakción alapul.[Báthor, Siegler, 1979] A 8.1.ábra egy munkadarab, a 8.2.ábra egy egyszerüsitett szerszámgép-robot együttes grafikus display-n való megjelenitését mutatja. A munka következő szakaszában a müveletleirásnak és magának a pályatervezésnek a számitógépes eszközei fognak elkészülni.

A továbbiakban a manipulátortervező és pályaszámitó SW megszervezését és a már implementált modulokat tekintjük át. Ezt a programrendszert ugy valósitjuk meg, hogy az önmagában alkalmas legyen ember által előirt robot tárgyprogramok fogadására és végrehajtására, ugyanakkor képes legyen fogadni a később elkészülő pályatervező rendszer parancsait is.

8.2. A MANIPULÁTORVEZÉRLŐ ÉS PÁLYASZÁMITÓ SOFTWARE

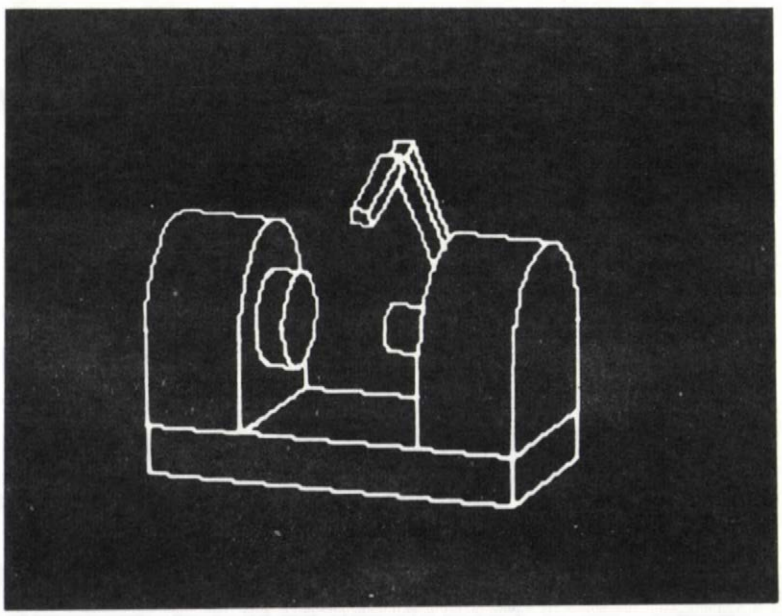
8.2.1 Ember-gép kapcsolat

A robot programozója és a vezérlő számitógép kapcsolatának megszervezésére kétféle lehetőség kinálkozik:
a/ - *Manipulátorvezérlő nyelv* (parancsspecifikációs formalizmus). Ebben a megoldásban lehetőség van a manipulátor off-line programozására, a számitógépek assembly szintü programozásához hasonlóan. Hátránya e módszernek az, hogy a program forditón kivül szükség van szövegszerkesztő (editor) és hibaellenőrző programokra is. Manipulátor nyelvekre példa a Unimation cég VAL programozási nyelve, a Stanford-i WAVE rendszer, [Paul, 1977] és PAL nyelv.



Munkadarab megjelenitése számitógépi reprezentáció alapján

8.1.ábra

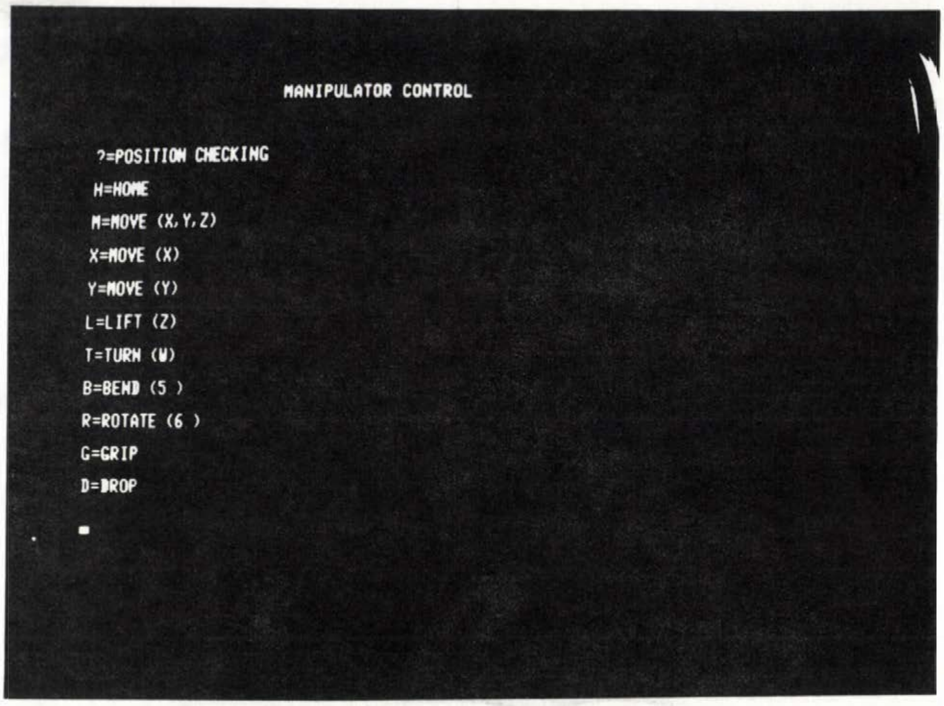


Egy munkatér egyszerüsitett számitógépes ábrázolása

8.2.ábra

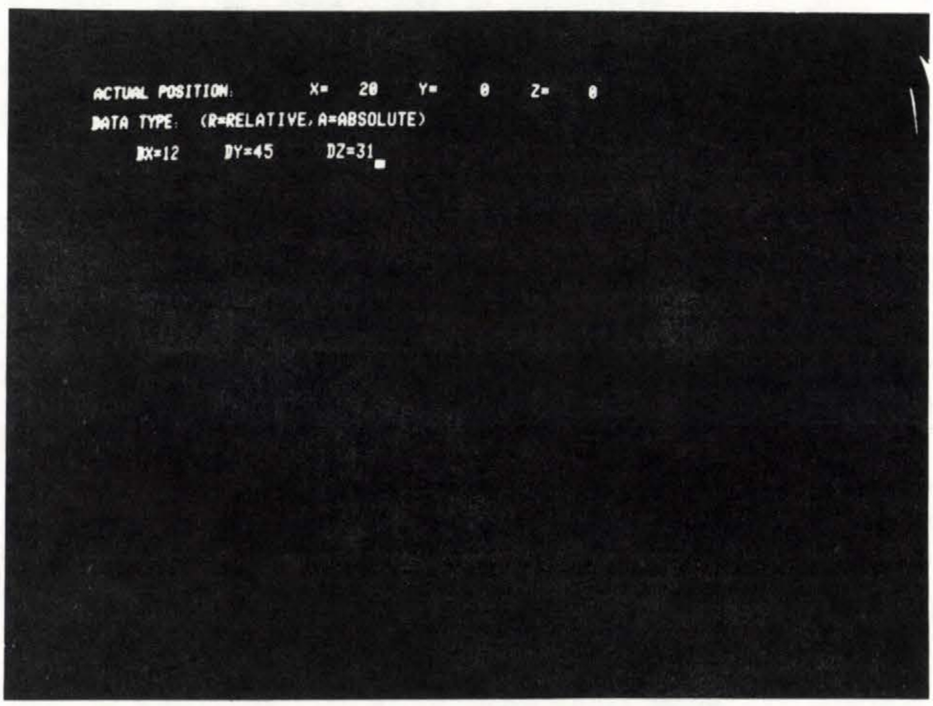
b/ - *Interaktiv parancsspecifikáció.* A robot programozása on-line, a számitógéppel folytatott "párbeszéd" formájában történik. A robotnak szóló parancsok és argumentumaik megadása - ahol ez megoldható - mindig egy lista (u.n. "menü") elemei közül való választással történik, a listában mindig az adott helyzetben értelmezhető parancsok jelennek meg. A parancsok argumentumainak egy része számszerü adat. Ezek a megadást követőleg azonnal ellenőrzésre kerülnek, és csak valóban végrehajtható utasitások kerülnek elfogadásra. A programozás ebben a párbeszédes formában is történhet anélkül, hogy a manipulátort fizikailag vezérelnénk, ilyenkor a robotkar számitógépes modelljét "mozgatjuk". A kiadott parancsok hatását szükség esetén grafikus szimulátoron követhetjük nyomon. Ezzel a robotprogramozásban szokásos "teach-in", vagyis a pályán való végigvezetéssel való betanitásnak olcsó, kevésbé fáradságos módját valósitjuk meg. Természetesen lehetséges a vegyes programozás is, amikor bizonyos nehezen leirható ill. szimulálható müveleteket magának a manipulátornak a mozgatásával és a mozgás során bejárt pálya automatikus feljegyzésével programozunk.

Egy interaktiv, "programozva" és "vezetve" is betanitható manipulátorvezérlő rendszert fejlesztettük ki a bevezetőben emlitett X - Y manipulátorhoz.[Siegler, 1977] A 8.3. ábrán az alap-parancskészlet, a 8.4. ábrán egy mozgási parancs paraméterezése látható. A 8.5. a, b, c ábrák a robotkéz szimulált mozgását mutatják be. A 8.6. ábra a pályán való végigvezetésre szolgáló vezérlőkészüléket mutatja. A grafikus szimulátort és további alkalmazását a 8.3. pont ismerteti.



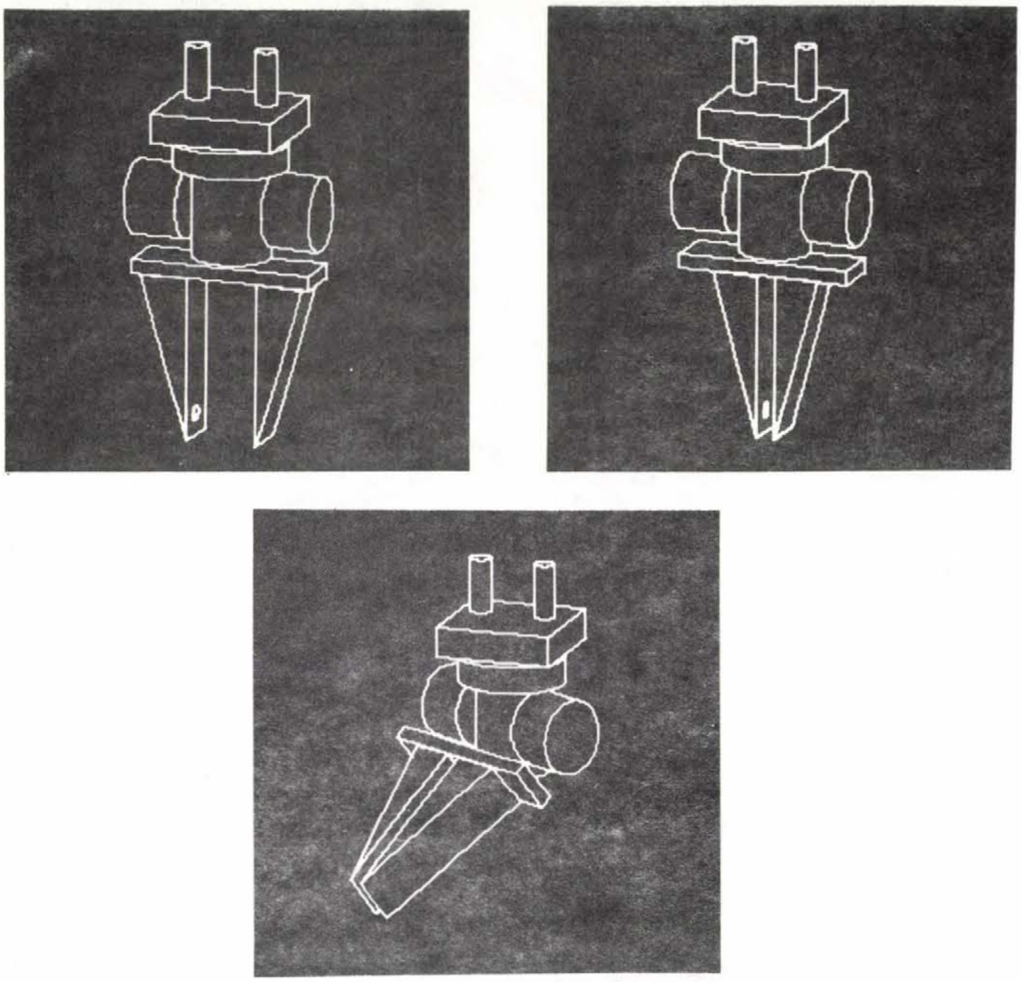
Interaktiv parancsmegadás

8.3.ábra



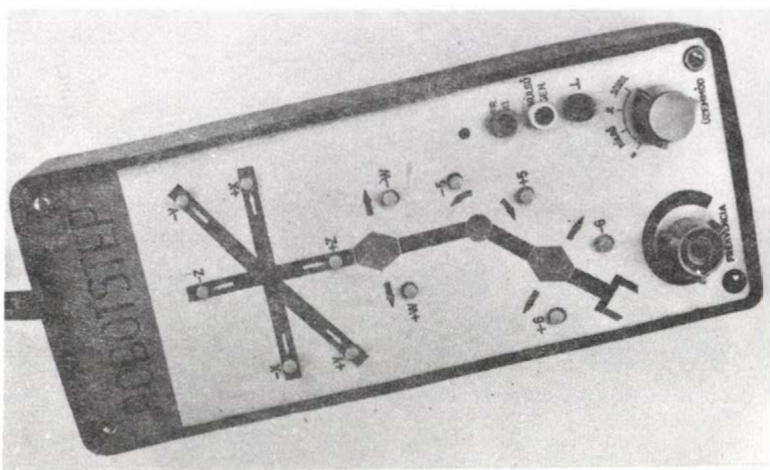
Egy mozgási parancs paraméterezése

8.4.ábra



Robotkéz szimulált mozgása

8.5.ábra



A manipulátor kézi vezérlőkészüléke

8.6.ábra

Az a/ (nyelvi) és b/ (párbeszédes) robotprogramozást összehasonlitva az alábbiakat állapithatjuk meg:

a/ - A célnyelv alkalmazásának *előnye*, hogy teljes mértékben biztositja a függetlenséget valamely adott manipulátor konfigurációtól, miután a robotkéz térbeli mozgására, illetve az ennek kapcsán elvégzendő müveletekre tartalmaz előirásokat.

- További előnye, hogy a létrehozott robotprogram jól dokumentálható, teljes egészében tükrözi a programozó szándékát, a várt robot-tevékenység részleteit. Programok szerkesztéséhez rendelkezésre állnak a szokásos számitógépes software eszközök.

- A nyelvi módszer *hátránya*, hogy a robotmozgások "fejben" sokszor nehezen tervezhetők meg előre, pl. az ütközési problémákat nehéz előre figyelembe venni.

- Ugyancsak hátrány, hogy a tartalmilag hibás program javitása nehézkes, illetve maguk a programhibák csak a végrehajtás során fedezhetők fel. Várhatóan a hibátlan robotprogramokat csak többszöri próba, majd javitási ciklus után lehet előállitani. Még nem tesztelt programok roboton való kipróbálása nagy óvatosságot igényel.

b/ - A párbeszédes módszer nagy *előnye* a programozás lehetséges eszközeinek sokféleségében rejlik: mindig a feladat jellegzetességeinek legjobban megfelelő programozási eszközt használhatjuk. (display-parancsok, grafikus szimulátor, kézi vezérlőegység, stb.) A programozó szándékának átadása egyszerübb, mint az a/ esetben.

- Előnye az is, hogy a tartalmi hibák nagy része a folyamatos ellenőrzés eredményeként már a programozás során kiszürődik.

- A robot programozáshoz az interaktiv keretben csupán kevés számitógépes ismeret kell.

- A párbeszédes módszer *hátránya*, hogy a programozó tevékenysége nehezebben dokumentálható, mint az a/ esetben: a különféle programozási eszközök használatáról egységes dokumentációt késziteni viszonylag nehézkes.

- Az interaktiv eszközök alkalmazása esetén hátrányos lehet az is, hogy ezek az eszközök jobban kötődnek egy adott robot-konfigurációhoz: különféle manipulátorok különböző grafikus szimulátort ill. kézi vezérlőberendezést igényelnek.

Mindezek alapján a robotprogramozást célszerü olyan módon megszervezni, hogy a két módszer előnyei kihasználhatók legyenek. Ezt ugy érhetjük el, ha biztositunk egy, az egész robotprogramozást összefogó nyelvi keretet, amely egyfelől magába foglalja a manipulátorszintü programnyelv adat, mozgás és müveletdeklarációit, másfelől az interaktiv programozási eszközöktől érkező, a manipulátormozgásra vonatkozó információk lekérdezését, ill. fogadását. Az interaktiv eszközök használata igy szervesen beépül a robotprogramozásba. A végrehajtásra kerülő, paraméterezett, elemi mozgások sorozatából álló programkód több lépcsőben készül el:

1. A számitógép beolvassa a programozó által készitett keretprogramot és megkezdi annak interpreter kóddá forditását.
2. Ha a szimulált végrehajtás során interaktiv programozást előiró utasitás következik a programban, akkor a rendszer a kezelőhöz fordul és élesiti a megfelelő "tanitó" eszközt.
3. Az interaktiv tanitó-programozó eszközökkel végrehajtott "mozgások" visszaolvasódnak a keretprogram

vezérlő rendszerébe és szintén az interpreter táblába kerülnek.

4. Az interaktiv programozás minden fázisának befejeztével a vezérlés visszakerül a keretprogramot értelmező rendszerbe.
5. Ellenőrzés céljából a már elkészült interpreter kód lépésenként ujra végrehajtható és a programozó által módositható.

A "vegyes" módszerre példa a Unimation VAL rendszere, ahol a hagyományos számitógépes robotprogramba beépithető egy u.n. joystickkel való betanitás is.

8.2.2. Adatbázis

A 8.2.1. pontban emlitést tettünk a robotmozgások végrehajtásához szükséges számszerü adatok - TCP hely- és helyzetkoordináták, készülékmüködtetési paraméterek, várakozási idők, stb. - deklarációjáról. A manipulátorszintü programban szimbólikus névvel, a "mutatva tanitásnál" pedig rámutatással történő azonositással hivatkozunk a manipulátor mozgástér pontjaira illetve a robotkéz állapotaira. Lényeges, hogy a munkatér és a munkadarabok geometriáját leképező manipulációs adatbázis *független* legyen magától a robotprogramtól. Ennek indokai az alábbiak:

- kivánatos, hogy a munkatér vagy a munkadarabok geometriájának részleges megváltozása ne vonja maga után a teljes programozási procedura megismétlésének szükségességét: a szükséges adatmódositások után a programot változatlan formában ujra végre lehessen hajtani. A szimbolikus adathivatkozások ezt nagymértékben megkönnyitik;
- a robotprogram legyen független egy konkrét munkahelytől, a programot változatlan formában át lehessen vin-

ni egy uj munkahelyre. Ebben az esetben egy betanitásra szolgáló roboton, illetve a szimulátoron elvégezve a programozást a program egyidejüleg több roboton, több munkahelyen is felhasználható - természetesen a megfelelő adatbázis hozzárendelések elvégzése után;

- az adatbázis, vagy annak egy része más forrásból is származhat, mint maga a robotprogram: a szükséges térbeli koordináták például egy magasabb szintü gyártástervező rendszerből is származtathatók;
- a létrehozott adatbázis a manipulátor vezérlőprogram elkészitésén kivül egyéb célra is felhasználható: pl. különböző NC gépek és megmunkáló robotok vezérléséhez.

A fenti okok figyelembevételével a 8.2.1. pont szerint történő programozás során az explicite vagy rámutatással (tanitással) deklarált adatok szimbólikus nevükkel együtt egy külön adattároló modulba kerülnek. A végrehajtó robotprogram szerkesztése során a szükséges adatok a szimbólikus hivatkozások révén visszakereshetők és az interpreter táblába beirhatók. A független adatbázis alkalmazásával a programozónak lehetősége van az adatmodul utólagos szerkesztésére, grafikus megjelenités alapján történő ellenőrzésére. Az adatok automatikus - magasabb szintü tervezőrendszer által történő - generálása esetén a tervezőprogram kimenő formátuma meg kell egyezzen a manipulátor program adatmodul formátumával.

8.2.3. Pályaszámitás

A robotprogramok a parancsspecifikációk és a mozgási és müveleti adatbázis felhasználásával összeállitott programkód formájában jelennek meg. Ebben a programban csak a robotkéz, megfogó vagy szerszám pályájára és müködtetésére vonatkozó, a 3 dimenziós munkatérben értelmezett mennyiségek fordulnak elő, vagyis ezen a szinten az irányitás még független valamely adott kinematikai elrendezéstől. A végrehajtható formátumu robotprogram lényegében a kivánt *robotkéz* (szerszám) *állapotok sorozata*. A manipulátor munkaterében megjelenő állapotkoordináták az 1. fejezetben leirtaknak megfelelően különböző referencia koordinátarendszerekben lehetnek értelmezve. Az állapot-sorozat minden eleméhez tartozhat egy *müveleti parancslista*, amit akkor kell végrehajtani, ha a manipulátor az adott állapotot elérte. Ilyen müvelet lehet a kéz nyitása-zárása, a szerszám vagy valamely külső készülék müködtetése, szerszám cseréje.

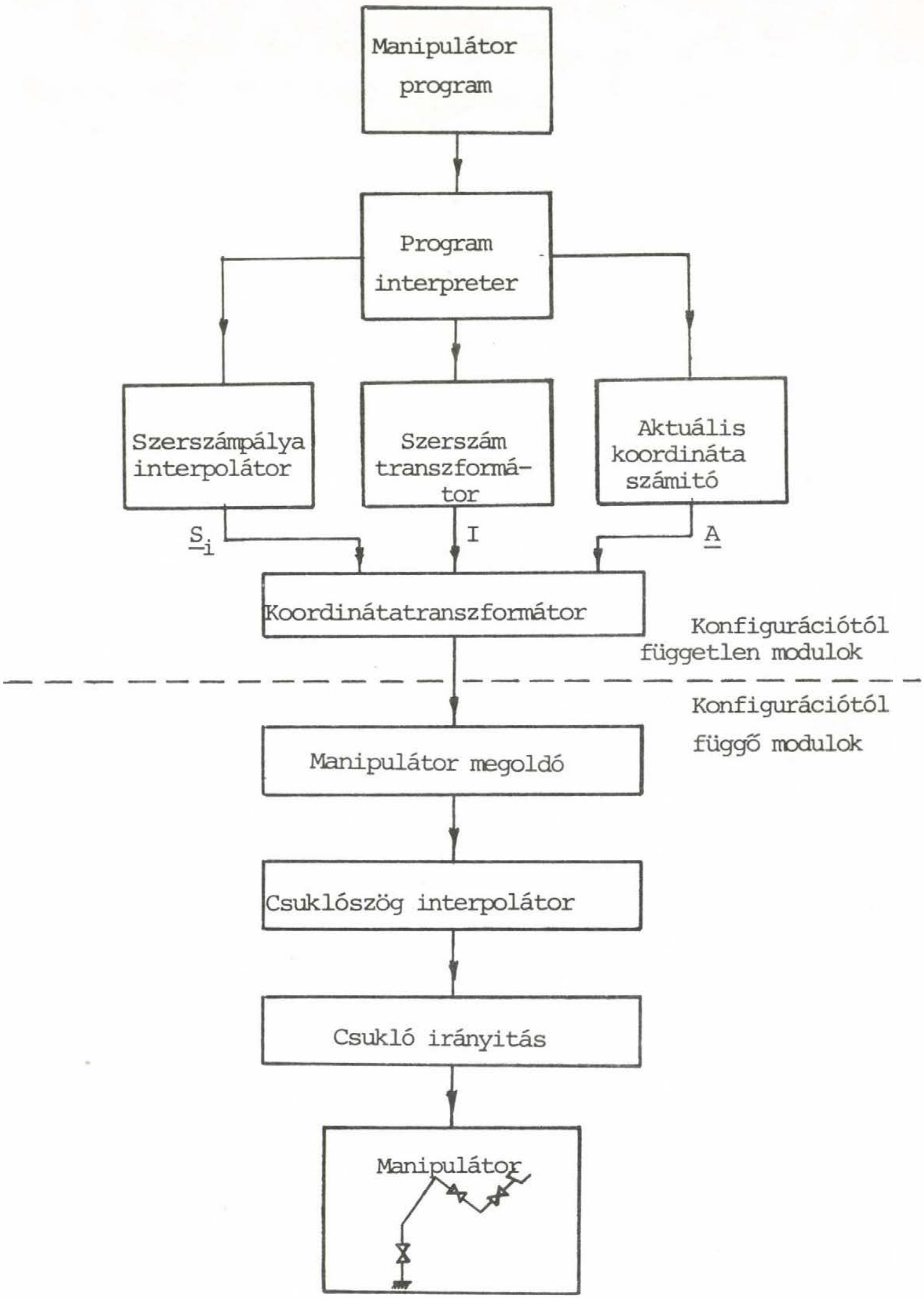
A pályaszámitó SW a robotprogram leirást csukló-szögpozició mintavételi pontok sorozatává transzformálja és átadja a manipulátor csuklók irányitó egységének, a kéznek, szerszámnak vagy más készülékeknek szóló parancsokkal együtt. A pályaszámitó software moduljai az alábbiak: (8.7.ábra)

Program interpreter

A manipulátor program minden lépéséből generál egy manipulátor állapotmátrixot($\underline{S}$), ami a szerszámnak az adott trajektória tartópontban felvett állapotát fejezi ki. A szerszámcsere vagy a munkahely változására vonatkozó adatokat továbbitja a megfelelő transzformációs moduloknak.

Szerszám transzformátor

Szerszámcsere esetén kiszámitja a manipulátor végcsonk és a TCP relativ helyzetét leiró uj transzformációs mátrixot ($\underline{T}$) és a régi szerszám mátrix helyébe beirja.(1.3.pont)



A pályaszámitó software felépitése

8.7. ábra

Aktuális koordinátaszámitó

A munkahely megváltozása vagy mozgó munkahely esetén kiszámitja az aktuális vonatkoztatási koordinátákat. ($\underline{A}$) (1.3.pont)

Szerszámpálya interpolátor

A kivánt pályakövetési pontosságtól függő T időközönként a szerszámpálya interpolátor az aktuális koordinátarendszerhez képest (1.4. ábra) kiszámit egy uj szerszám-állapot mátrixot ($\underline{F}_i$). Az egymást követő $\underline{F}_i$ mátrixok kismértékben változnak a trajektória támasztópontok közti egyenes szakaszok illetve a sarokpontokat megkerülő görbevonalu átmenetek mentén. A szerszámpálya "lekerekitése" a csukló trajektóriák "simitásához" hasonló módon történik. (6.2.pont.)

Koordinátatranszformátor

A koordinátatranszformátor a manipulátor csatlakozópont állapotát kifejező $\underline{M}_i$ koordinátamátrixot számolja ki T időközönként. A számitás alapja (1.lo)-ből származtatva az

$$\underline{M}_i = \underline{A} * \underline{F}_i * \underline{T}^{-1}$$

egyenlet.

Manipulátor-megoldó

A manipulátor-megoldó modul az 5. fejezetben leirtaknak megfelelően kiszámitja a q_{ji}, j = 1,...,6 csuklószögeket, amelyek a manipulátort az $\underline{M}_i$ állapotba viszik. Ez és a további modulok már a konkrét manipulátor konfigurációhoz kapcsolódnak.

Csuklószög interpolátor

Három egymást követő csuklószög-pozicióból a 6.2. pontban leirtaknak megfelelően a csuklószög interpolátor $t \ll T$ időközönként számit egy-egy ujabb, interpolált q_j, $\dot{q}_j$, ill. $\ddot{q}_j$, $j = 1,\ldots,6$ csuklószög-pozició, csuklószög sebesség ill. gyorsulás értéket. Az interpolációhoz felhasználandó kezdeti értékek váltakozva két puffer-tárolóba kerülnek. Mig az egyik puffert a számitógép ujabb csuklószög-adatokkal feltölti, azalatt a másik puffert a csukló interpolátor kiolvassa és a manipulátorvezérlő berendezés logikai interface-e által meghatározott frekvenciával ujabb és ujabb, négyzetes időfüggvény szerint interpolált csuklószög értékeket küld a vezérlőegységnek.

Csukló irányitás

A szerszámgépekben is használatos elektronikus vezérlőberendezésekhez hasonlóan tengelyenként szabályozza a csuklóhajtómüvek müködését. (9. és lo. fejezet)

8.3. SZÁMITÓGÉPES MOZGÁSSZIMULÁCIÓ

8.3.1. A grafikus mozgássszimulátor

A 6 szabadságfoku, csuklós robot müködésbe helyezését megelőzően, a vezérlési programok előkészitése érdekében elkészült egy olyan programrendszer, amely tetszőleges 3 dimenziós geometriai strukturák egymáshoz viszonyitott mozgásának leirását és megjelenitését, ezen belül a COROHAND manipulátor mozgásszimulációját és képi megjelenitését végzi el.[Báthor, Siegler, 1979]

Az R10 tipusu számitógépen futó mozgásszimulációs program egy 3 dimenziós modellépitő [Báthor, 1978] segitségével létrehozott alkatrészkönyvtáron végez térbeli geometriai transzformációs müveleteket. A térbeli transzformációk mozgássorozattá rendeződnek, amelynek kiválasztott fázisai a grafikus display-n egymás után megjelennek. Az egyes mozgási fázisokat egy virtuális "kamera" képezi le a képsikban, ahol azok a takart vonalak elhagyása után jelennek meg. Az alkatelemeket mozgató utasitások tehát kiegészülnek a kameraparamétereket és a mozgásokat definiáló utasitásokkal.

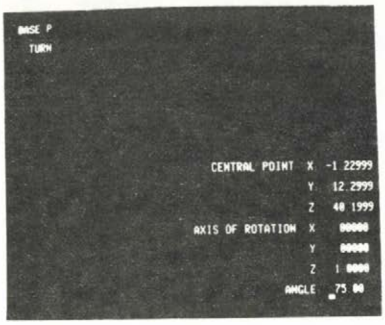
A 8.2.1. pontban ismertetett elveknek megfelelően a mozgásszimulációs programok vezérlése többféle módon történik:

a/ - az alkatrész- és kameramozgatási parancsok definiálása menüs kezelői interakcióban. (8.8. ábra)

b/ - az a/ pont szerint definiált parancsszekvencia a szimulátorprogrammal megtanitható. Ennek során a program egy u.n. "vezérlő file-t" hoz létre. Az igy nyert, összefüggő mozgásprogram szerkeszthető, a grafikus display-n visszajátszható, majd a robotvezérlésnek átadható.

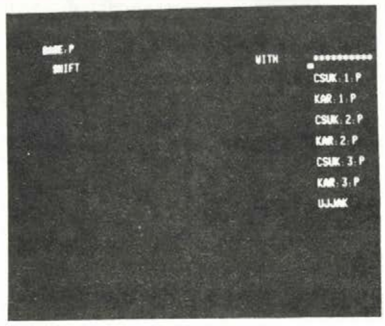
c/ - elkészült egy mozgásleiró nyelv, amit mind a szimulátor, mind a robotvezérlés interpretál.

A mozgásszimulációs program nyilvántartja az egymáshoz képest mozgatható alkatrészek térbeli elhelyezkedését leiró transzformációs paramétereket. Lehetőség van a könyvtárban külön tételként szereplő, de időlegesen vagy állandóan együtt mozgatni kivánt alkatrészek összerendelésére. A 8.9. ábrán a COROHAND épitőelemeinek összerendelése látható. Ennek az az előnye, hogy elegendő csupán az összerendelt testek egyikének mozgását leirni, a többiek automatikusan követik azt:



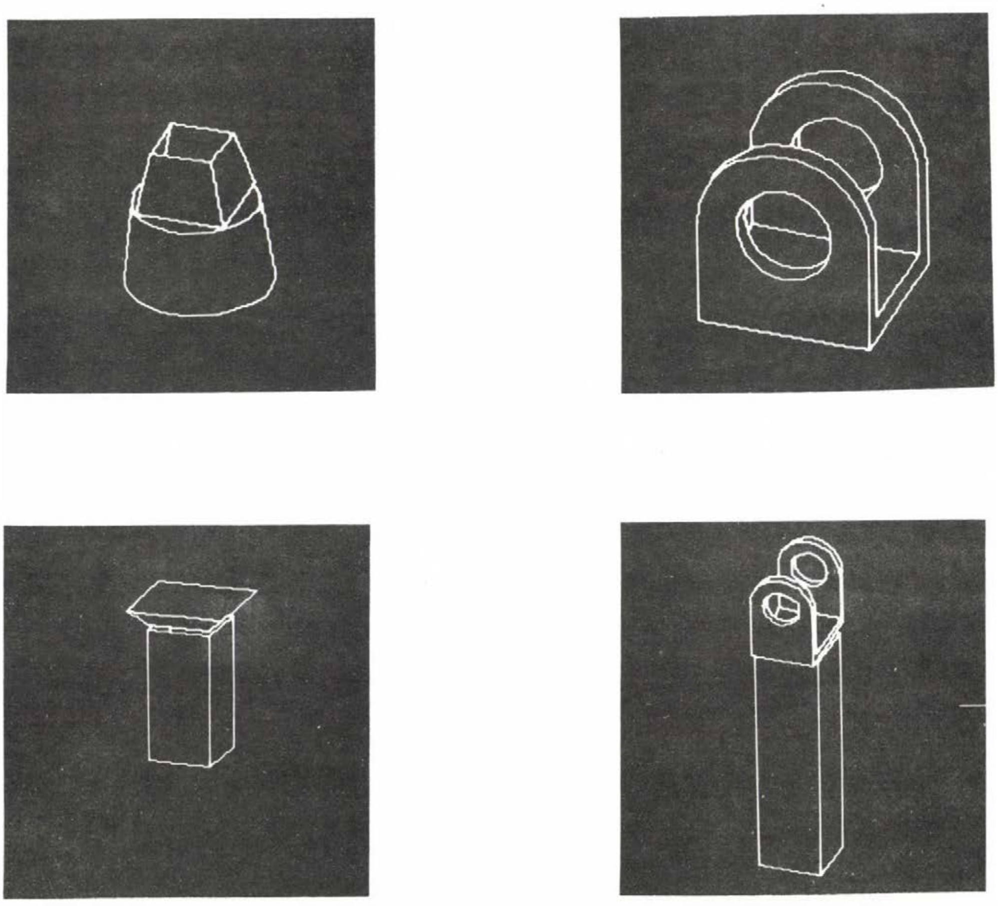
Mozgási parancsok megadása
a szimulátoron

8.8.ábra



A COROHAND alkatrészeinek
összerendelése

8.9.ábra



A COROHAND részeinek megjelenitése a szimulátoron

8.lo.ábra

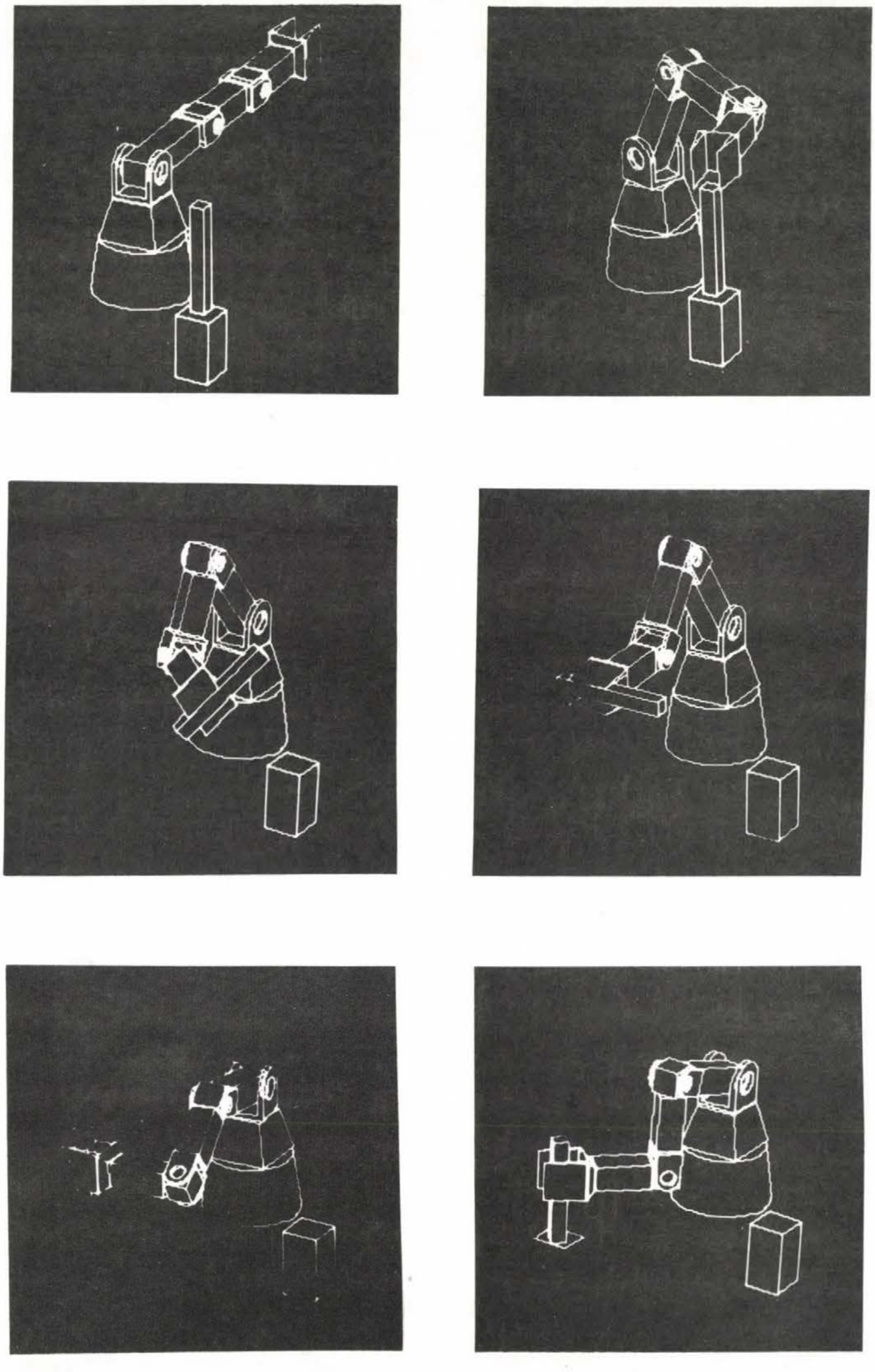
a számitógép a megfelelő térbeli transzformációkat automatikusan végzi el. A 8.lo. ábrán a COROHAND épitőelemei láthatók, amelyeket a 3 dimenziós modellépitővel generáltunk. A 8.11.ábra az összeépitett robot mozgását mutatja. Látható, hogy a 8.lo.ábra szerinti elemek állandóan össze vannak rendelve, a "munkadarab" (a felemelt hasáb) azonban csak ideiglenesen kapcsolódik a robotkézhez.

8.3.2. Manipulátor megoldó program

Az 5.8.pontban emlitett mikroszámitógépes implementációt követőleg az R10 kisszámitógépen is elkészült a COROHAND pályavezérléséhez szükséges koordinátatranszformációs program, amely az 5. fejezetben leirtak szerint oldja meg a manipulátor inverz problémáját. A manipulátor megoldó program bemenete a robotkéz számára előirt trajektória. Ebből kiszámitódik a 6 csuklószög időfüggvénye, amelyek felhasználásával a csuklók koordináltan mozognak. A program a valós rendszer fizikai korlátaiból adódó megkötéseket is figyelembe veszi. A kiszámitott csuklómozgások a 8.3.1. pontban emlitett mozgásszimulátor vezérlő file-ba iródnak be és a kiszámitott manipulátormozgás a grafikus display-n kirajzolt modellen szemlélhető.

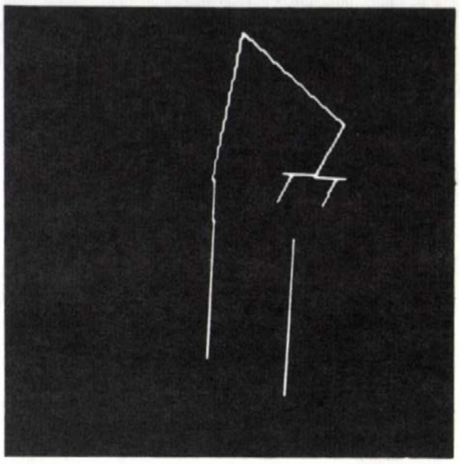
Manipulátor mozgáspályák vizsgálatához a manipulátor egyszerüsitett váz-modelljét használjuk. (8.12.ábra)

A 8.13. a,b,c ábrákon az egymásra másolt mozgási fázisok láthatók egy-egy trajektóriaszakasz mentén. Ezek az ábrák szemléltetik, hogy a TCP egy egyenes pálya mentén mozog. A mozgási fázisok összemásolását a grafikus szimulátor végzi el a kezelő kivánságára. A mozgásábrák nemcsak grafikus display-n, hanem rajzgépen is megjelenithetők.



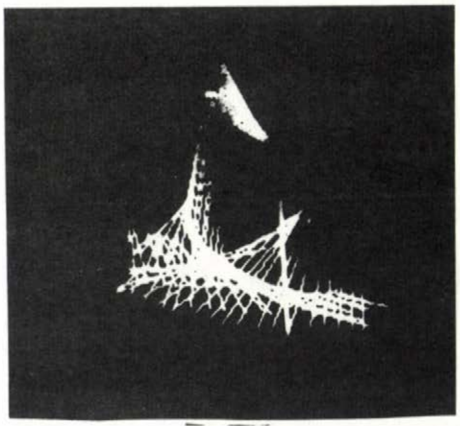
A COROHAND mozgásszimulációja

8.11.ábra

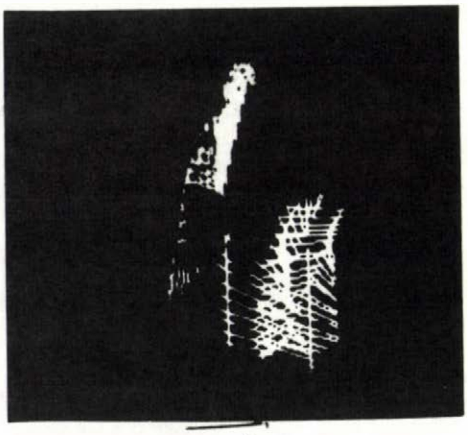


A COROHAND váz-modellje

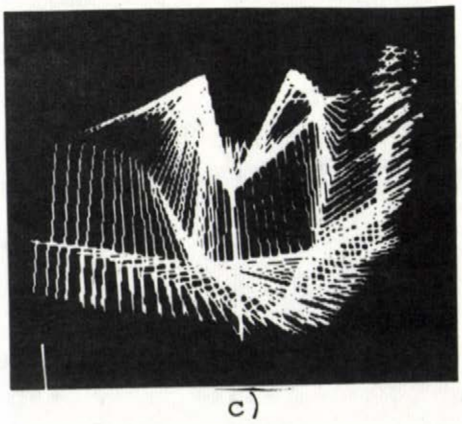
8.12.ábra



a)



b)



c)

Trajektóriák bejárását megjelenitő fázisképek

8.13.ábra

A mozgási fázisok grafikus megjelenitése megkönnyiti a pályaleirások helyességének ellenőrzését, lehetővé teszi, hogy a programozó ne csak a robotkéz, hanem az egyes csuklók mozgáspályáját is ellenőrizni tudja.

9. CSUKLÓNYOMATÉKOK SZÁMITÁSA

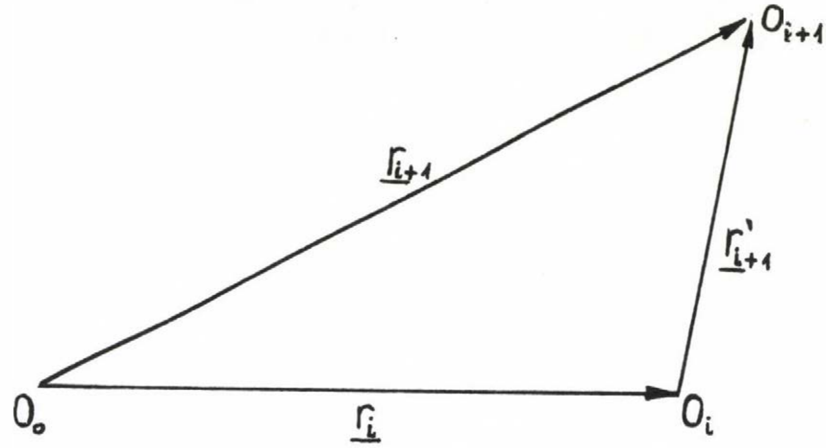
Az 1.-8. fejezetekben megtárgyaltuk a manipulátor geometriai megfontolásokon alapuló *vezérlésének* problémáit: előállitottuk a 6 csukló pozicióinak sorozatát, amelyeket felvéve a csuklók zökkenőmentesen, a fizikai korlátok által megszabott módon fognak mozogni, miközben a robotkéz végighalad a kivánt pályán.

A továbbiakban azt kell megvizsgálnunk, hogy az előirt mozgás végrehajtása érdekében milyen nyomatékokat kell a csuklókba épitett hajtómüveknek kifejteniük. Ehhez szükség van a manipulátor mozgásegyenleteinek ismeretére. A mozgásegyenletek számitásra alkalmas formában történő felirását egy számitási szempontból előnyös, rekurziv kinematikai modell felállitásával oldjuk meg. (9.1. pont) Ennek alapján állitjuk fel a kar dinamikai modelljét és számitjuk ki az egyes csuklókban szükséges hajtómünyomatékokat. (9.3.pont) dinamikai modell ismeretére a manipulátormozgás *szabályozásánál* lesz szükség (10.fejezet).

9.1. MANIPULÁTOR KINEMATIKA

A feladat a csukló poziciók, sebességek, gyorsulások ismeretében az i-ik csuklóhoz rögzitett koordinátarendszer poziciójának ($\underline{r}_i$), szögsebességnek(ω_i), szöggyorsulásnak ($\dot{\omega}_i$), sebességnek ($\underline{v}_i$) és gyorsulásnak ($\dot{\underline{v}}_i$) kiszámitása. A zárójelekben 3 dimenziós vektorok szerepelnek.
A számitás során a kinematika mozgó vonatkoztatási rendszerekre vonatkozó összefüggéseit használjuk fel. [Budó, 1965]

A manipulátor csuklókhoz rendelt koordinátarendszerek kapcsolatát a 9.1 ábra mutatja. O_o rögzitett, O_i és O_{i+1} mozgó rendszer. (3.6. ábra) (A vesszővel jelölt mennyiségek a továbbiakban a tagok relativ mozgásaira vonatkoznak.)



9.1.ábra

O_i és O_{i+1} egymást követő két csukló koordinátarendszerének origói, O_o az alap origója. Az (i+1)-ik tag az O_i-hez rögzitett $\underline{k}_i$ tengely körül végez $\underline{\omega}'_{i+1}$ szögsebességü forgó mozgást, ahol a (3.6.) ábra jelöléseit alkalmazva $\underline{k}_i = \underline{z}_i$, ha a csukló csavaró tipusu és $\underline{k}_i = \underline{y}_i$, ha a csukló billenő tipusu. Ezért

$$\underline{\omega}'_{i+1} = \underline{k}_i\, \dot{q}_{i+1} \qquad (9.1)$$

Legyen továbbá az O_i origóju rendszer sebessége O_o-hoz képest $\underline{v}_i$, szögsebessége $\underline{\omega}_i$, az O_{i+1} origóju rendszeré $\underline{v}_{i+1}$ és $\underline{\omega}_{i+1}$.

Az (i+1)-ik kar-tag szögsebessége:

$$\underline{\omega}_{i+1} = \underline{\omega}_i + \underline{\omega}'_{i+1} \qquad (9.2)$$

(9.1) -et behelyettesitve

$$\underline{\omega}_{i+1} = \underline{\omega}_i + \underline{k}_i \dot{q}_{i+1} \tag{9.3}$$

Az (i+1)-ik kar-tag szöggyorsulása:

$$\underline{\dot{\omega}}_{i+1} = \underline{\dot{\omega}}_i + \underline{\dot{\omega}}'_{i+1} \tag{9.4}$$

Tudjuk, hogy bármely $\underline{p}$ vektornak egy O rendszerből és az O-hoz képest ω szögsebességgel forgó O' rendszerből tekintett időszerinti deriváltjai között a

$$d\underline{p}/dt = d'\underline{p}/dt + \underline{\omega} \times \underline{p} \tag{9.5}$$

összefüggés áll fenn. Ahol d'/dt az O' rendszerben értelmezett időszerinti derivált. $\underline{p}$ helyett $\underline{\omega}'_{i+1}$-t véve:

$$\underline{\dot{\omega}}'_{i+1} = d'\underline{\omega}'_{i+1}/dt + \underline{\omega}_i \times \underline{\omega}'_{i+1} \tag{9.6}$$

Másrészt (9.1)-ből

$$d'\,\underline{\omega}'_{i+1}/dt = \underline{k}_i \ddot{q}_{i+1} \tag{9.7}$$

(9.1)-t, (9.6)-t és (9.7)-t (9.4)-be helyettesitve:

$$\underline{\dot{\omega}}_{i+1} = \underline{\dot{\omega}}_i + \underline{k}_i \ddot{q}_{i+1} + \underline{\omega}_i \times \underline{k}_i \dot{q}_{i+1} \tag{9.8}$$

Az (i+1)-ik koordinátarendszer sebessége:

$$\underline{v}_{i+1} = \underline{v}_i + d\,\underline{r}'_{i+1}/dt \tag{9.9}$$

A (9.5) tétel alkalmazásával

$$\underline{v}_{i+1} = \underline{v}_i + d'\,\underline{r}'_{i+1}/dt + \underline{\omega}_i \times \underline{r}'_{i+1} \qquad (9.1o)$$

A tisztán forgó csuklómozgás miatt

$$d'\,\underline{r}'_{i+1}/dt = \underline{\omega}'_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1} \qquad (9.11)$$

és (9.6) alkalmazásával

$$d'^2\underline{r}'_{i+1}/dt^2 = (d'\underline{\omega}'_{i+1}/dt \times \underline{r}'_{i+1}) + \underline{\omega}'_{i+1} \times (\underline{\omega}'_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1}) =$$

$$= \dot{\underline{\omega}}'_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1} - (\underline{\omega}'_i \times \underline{\omega}'_{i+1}) \times \underline{r}'_{i+1} +$$

$$+ \underline{\omega}'_{i+1} \times (\underline{\omega}'_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1}) \qquad (9.12)$$

(9.2) és (9.11) figyelembevételével

$$\underline{\underline{v}_{i+1} = \underline{v}_i + \underline{\omega}_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1}} \qquad (9.13)$$

Az (i+1)-ik tag lineáris gyorsulása:

$$\dot{\underline{v}}_{i+1} = \dot{\underline{v}}_i + \dot{\underline{\omega}}_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1} + \underline{\omega}_{i+1} \times \dot{\underline{r}}'_{i+1}$$

A (9.5) tétel ismételt alkalmazásával a jobb oldal 3. tagja:

$$\underline{\omega}_{i+1} \times \dot{\underline{r}}'_{i+1} = \underline{\omega}_{i+1} \times (d'\underline{r}'_{i+1}/dt + \underline{\omega}_i \times \underline{r}'_{i+1}) =$$

(9.11) szerint

$$= \underline{\omega}_{i+1} \times [(\underline{\omega}'_{i+1} \times \underline{r}_{i+1}' + \underline{\omega}_i \times \underline{r}'_{i+1})] =$$

(9.2)-t behelyettesitve

$$= \underline{\omega}_{i+1} \times (\underline{\omega}_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1})$$

Tehát

$$\dot{\underline{v}}_{i+1} = \dot{\underline{v}}_i + \dot{\underline{\omega}}_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1} + \underline{\omega}_{i+1} \times (\underline{\omega}_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1}) \qquad (9.14)$$

A (9.3), (9.8), (9.13) és (9.14) egyenletek a csukló változók poziciójának, sebességének és gyorsulásának függvényében leirják a csak forgó csuklókból álló manipulátor kinematikáját. A 9.3. pontban ezeket az egyenleteket a csuklókban ébredő erők és nyomatékok kiszámitására fogjuk felhasználni.

9.2. A ROBOTKÉZ KINEMATIKÁJA

A 9.1 pontban az (i+1)-ik kar-tag kinematikai egyenleteit határoztuk meg az i-ik kar-tag kinematikájának ismeretében. Ahhoz, hogy a manipulátort a kéz poziciójának és orientációjának függvényében irányithassuk, szükségünk van a kéz kinematikai egyenleteire a csukló változók (q_i, $\dot{q}_i$ és $\ddot{q}_i$, $i = 1,\ldots,6$) függyvényében. A számitás során a manipulátor alapját rögzitettnek tekintjük.

A(9.3) egyenlet sorozatos alkalmazásával

$$\omega_{i+1} = \sum_{j=1}^{i+1} \underline{k}_j \, \dot{q}_{j+1} \qquad (9.15)$$

Tehát

$$\omega_6 = \sum_{j=1}^{6} \underline{k}_{j-1} \, \dot{q}_j \qquad (9.16)$$

A (9.13) egyenletből:

$$\underline{v}_6 = \sum_{i=0}^{5} \underline{\omega}_{i+1} \times \underline{r}'_{i+1} \qquad (9.17)$$

(9.15)-t (9.17)-be helyettesitve

$$\underline{v}_6 = \sum_{i=0}^{5} \left[\sum_{j=1}^{i+1} \underline{k}_{j-1} \dot{q}_j \right] \times \underline{r}'_{i+1} = \sum_{j=1}^{6} \sum_{i=j-1}^{5} (\underline{k}_{j-1} \dot{q}_j \times \underline{r}'_{i+1}) =$$

$$= \sum_{j=1}^{6} \underline{k}_{j-1} \dot{q}_j \times \left[\sum_{i=j-1}^{5} \underline{r}'_{i+1} \right]$$

Tehát

$$\underline{v}_6 = \sum_{j=1}^{6} \underline{k}_{j-1} \times (\underline{r}_6 - \underline{r}_{j-1}) \dot{q}_j \qquad (9.18)$$

$\underline{v}_6$-ot és $\underline{\omega}_6$-ot egyetlen, 6 x 1-es vektorba foglalva:

$$[\underline{v}_6 \quad \omega_6]^T = \underline{J} \cdot \dot{\underline{q}} \qquad (9.19)$$

ahol $[\dot{\underline{q}}]_i = \dot{q}_i$, $i = 1, \ldots 6$ és

$$\underline{J} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \underline{k}_1 \times (\underline{r}_6 - \underline{r}_o) & \underline{k}_2 \times (\underline{r}_6 - \underline{r}_1) & \ldots & \underline{k}_6 \times (\underline{r}_6 - \underline{r}_5) \\ & & & \\ \underline{k}_1 & \underline{k}_2 & & \underline{k}_6 \end{array} \right]$$

(9.2o)

Ez az eredmény megegyezik a (2.9) kifejezéssel, amit [Whitney, 1972] módszerével kaptunk. A továbbiakban a csuklószögek és a robotkéz gyorsulásának kapcsolatát vizsgáljuk. A kéz gyorsulását $\underline{\dot{v}}_6$-tal, szöggyorsulását $\underline{\dot{\omega}}_6$-tal jelöljük.
(9.19) idő szerinti deriválásával:

$$[\underline{\dot{v}}_6 \; \underline{\dot{\omega}}_6]^T = \underline{J}\,\underline{\ddot{q}} + (d\,\underline{J}/dt)\,\underline{\dot{q}} \qquad (9.21)$$

A 9.21 egyenletben $\underline{J}$-t (9.2o)-ból, (d $\underline{J}$/dt)-t pedig a (9.8) és (9.14) egyenletekből, $\ddot{q}_i$ -t tartalmazó tagok elhagyásával nyerjük.

9.3. MANIPULÁTOR-DINAMIKA

A manipulátor dinamikai vizsgálatánál a vonatkozó irodalomban kétféle megközelitést találunk. A probléma elméletileg előnyösen irható le, ha a Lagrange féle egyenletekből indulunk ki. Ezt a megközelitést a 9.3.1. pontban foglaljuk össze [Horn, 1977],[Paul, 1972] és [Takase, 1975] alapján. Mint látni fogjuk, ha a mozgásegyenleteket az impulzustételnek és az impulzusmomentum tételének a manipulátorra való alkalmazásával irjuk fel, számitástechnikailag előnyösebb megoldáshoz juthatunk, amit [Paul &al, 1978] alapján és a 9.1, 9.2 pont eredményeit felhasználva részletesen kidolgozunk. A manipulátor-dinamika átfogó elméleti tárgyalását adja [Bejczy, 1974], [Uicker, 1967], [Vukobratovic, 1977], ezek számitógépes implementációja azonban a valós idejü müködést egyenlőre nem teszi lehetővé. [Takase, 1979]

9.3.1. A dimanikai feladat tárgyalása a Lagrange egyenletek alapján

A módszer lényege, hogy a gravitációs térben elhelyezkedő robotkarra felállitjuk a Lagrange-féle függvényt és ebből kiindulva meghatározzuk a gyorsulások és csuklónyomatékok kapcsolatát, ami a gravitáció legyőzéséhez szükséges nyomatékokat is magába foglalja.

A Lagrange-féle függvény definiciója:

$$L = T - V \tag{9.22}$$

vagyis a kinetikai és potenciális energia különbsége. T-t és V-t a q_i, $i = 1,\dots,6$ csukló-változókkal fogjuk kifejezni. A Lagrange-féle függvény segitségével a rendszer dinamikáját a Lagrange féle egyenletekkel irjuk le:

$$Q_i = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}, \qquad i = 1,\dots,6 \tag{9.23}$$

ahol a q_i általánositott koordinátákként esetünkben a csuklószöget választjuk, igy a Q_i általánositott erők a csuklómotorok nyomatékai lesznek. Megállapithatjuk továbbá, hogy a V potenciális energia csak a csuklószögektől függ, ezért a gravitációs erők legyőzésében szükséges μ_{gi} csuklónyomatékok számitását a

$$\mu_{gi} = -\frac{\partial P}{\partial q_i} \tag{9.24}$$

összefüggés alapján végezhetjük, és ettől elkülönitve számithatjuk a μ_i nyomatékokat, amelyek a manipulátor mozgását akkor biztositanák, ha a gravitációs tér nem volna jelen. Ez esetben

$$\mu_i = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} \qquad (9.25)$$

μ_i kiszámitását megkönnyiti az a tény, hogy a manipulátor teljes kinetikai energiája egyenlő az egyes tagok kinetikai energiáinak összegével, igy μ_i-t kar-tagonkénti komponensekre bontva számithatjuk ki:

$$\mu_{ij} = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_j}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T_j}{\partial q_i} \qquad i,j = 1,\ldots,6 \qquad (9.26)$$

ahol μ_{ij} az i-ik csuklómotor nyomatékának a j-ik tag mozgatásában hatásos része, továbbá $\mu_i = \sum_{j=1}^{6} \mu_{ij}$. E módszert [Horn, 1977] egy három csuklós, három tagból álló karmechanizmuson mutatja be.

[Paul,1972] a teljes, 6 csuklós manipulátor kinetikai és potenciális energiájára állit fel egyenleteket, majd szintén képezi a Lagrange függvényt és a (9.2) összefüggésbe helyettesitve kapja a csuklónyomatékokat. Mivel a módszer annyira számitásigényes, hogy a csukló-nyomatékok valós időben történő kiszámitására nincs lehetőség, itt csupán a végeredményt érdemes megemliteni a későbbi összehasonlitás végett. Ugyanehhez az eredményhez vezet [Takase, 1975] módszere is, aki az impulzusmomentum törvényéből indul ki és a dinamikai modellt egyetlen vektoregyenlet formájában adja meg:

$$\underline{\mu} = \underline{\theta \ddot{q}} + \underline{\dot{q}}^T \underline{C}\, \underline{\dot{q}} + \underline{\tau}_g + \underline{\tau}_f + \underline{\tau}_\tau \qquad (9.27)$$

ahol $\underline{\mu}$ a csuklómotor-nyomatékok, $\underline{q}$ a csuklószög-poziciók vektora.

$\underline{\theta} = [\theta_{i,k}]$, $i,k = 1,\dots,6$, $\underline{C} = [c_{j,k}]$,

$j,k = 1,\dots,6$ mátrixok.

A $\underline{\mu}$ vektor egy eleme [Paul, 1972]-vel és [Horn, 1977]-tel megegyezően:

$$\mu_i = \sum_{k=1}^{6} \theta_{ik}\ddot{q}_k + \sum_{k=1}^{6}\sum_{j=1}^{6} c_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k + \tau_{gi} + \tau_{fi} + \tau_{\tau i} ,$$

$$i = 1\dots6 \tag{9.28}$$

ahol θ_{ik}, c_{ijk} a kar-tagok tehetetlenségi nyomatékait tartalmazó, a csuklószögektől is függő polinomok. A $\underline{\mu}$ -t összetevő tagok értelmezése:

- az első, $\ddot{\underline{q}}$-t tartalmazó tag a rendszer tehetetlenségéből származó nyomaték: látható, hogy $\underline{\mu}$ és $\ddot{\underline{q}}$ között lineáris összefüggés van ;
- a második tag a Coriolis és centrifugális erők hatását fejezi ki, amelyek csupán nagy sebességeknél nem elhanyagolhatók ;
- τ_{gi} az i-ik kar-tagra ható gravitációból származó nyomaték ;
- τ_{fi} az i-ik kar-tagra a szomszédos tagok által gyakorolt erőkből származik ;
- $\tau_{\tau i}$ az i-ik kar-tagra ható külső nyomaték a szomszédos tagokból eredően.

A (9.28) egyenletben szereplő együttható-polinomok bonyolultsága miatt, számitástechnikai megfontolásokból az alábbi megfontolásokat szokás tenni:

1. A manipulátort a

$$\underline{\mu} = \underline{\theta}\,\ddot{\underline{q}} + \underline{\tau}_c$$

modellel közelitik [Horn, 1977]

2. Az együttható-polinomok számitására előre elkészitett táblázatokba ("look-up" táblák) képezik le a manipulátor munkaterét. A táblázatban nem szereplő pontokra interpolációval számolják az együtthatókat. [Albus, 1975] Ez a módszer azonban rendkivül sok számitógép-memóriát igényel.

9.3.2. A dinamikai modell származtatása az impulzus és impulzusmomemtum tételből

A manipulátor-dinamika vizsgálatánál most a merev testek mozgására vonatkozó klasszikus egyenletekből indulunk ki. Ezek segitségével meghatározzuk az egymást követő kartagokra ható erők és nyomatékok kapcsolatát.

A merev test impulzusa:

$$\underline{i} = m\,\underline{v} \qquad (9.29)$$

A merev test impulzusmomentuma:

$$\underline{n} = \underline{\theta}\,\underline{\omega} \qquad (9.3o)$$

ahol m a merev test teljes tömege, $\underline{v}$ a merev test sulypontjának sebessége, $\underline{\theta}$ és $\underline{\omega}$ a test tömegközéppontjára számitott tehetetlenségi tenzor illetve szögsebesség. A merev test legáltalánosabb, 6 szabadsági foknak megfelelő mozgását a sulypont és impulzusmomentum tételek határozzák meg:

$$\underline{f} = d\ \underline{i}/dt \tag{9.31}$$

$$\underline{\tau} = d\ \underline{n}/dt \tag{9.32}$$

ahol $\underline{f}$ a merev testre ható összes külső erők eredője és $\underline{\tau}$ a test sulypontjára számitott forgatónyomatékok eredője.

(9.29)-t (9.31)-be és (9.3o)-t (9.32)-be behelyettesitve:

$$\underline{f} = m\ \dot{\underline{v}} \tag{9.33}$$

$$\underline{\tau} = \underline{\theta}\ \dot{\underline{\omega}} + \underline{\omega} \times (\underline{\theta}\ \underline{\omega}) \tag{9.34}$$

9.34 -t a testhez kötött rendszerben irtuk fel, mivel Θ csak ebben a rendszerben állandó.

A (9.34) egyenlet a merev testhez rögzitett koordinátarendszerre vonatkozik, ezt a rendszert az illető kar-tag sulypontjához (O_i) tartozó tehetetlenségi ellipszoid főtengelyrendszerével egybeesőnek célszerü választanunk. Ebben az esetben a tehetetlenségi tenzornak csupán a főátlójában lesznek nullától különböző elemek és a (9.34) egyenlet igy egyszerüsödik:

$$\tau_x = \theta_{xx}\ \dot{\omega}_x - (\theta_{yy} - \theta_{zz})\ \omega_z\ \omega_y$$

$$\tau_y = \theta_{yy}\,\dot{\omega}_y - (\theta_{zz} - \theta_{xx})\,\omega_x\,\omega_z \qquad (9.35)$$

$$\tau_z = \theta_{zz}\,\dot{\omega}_z - (\theta_{xx} - \theta_{yy})\,\omega_x\,\omega_y$$

ahol $\underline{\tau}=[\tau_x\ \tau_y\ \tau_z]^T$, $\underline{\omega}=[\omega_x\ \omega_y\ \omega_z]^T$, θ_{xx}, θ_{yy} és θ_{zz} a fő tehetetlenségi nyomatékok.

A (9.33) és (9.34) egyenleteket közvetlenül alkalmazhatjuk a tagokra:

$$\underline{f}_{i+1} = m_{i+1}\underline{\dot{v}}^s_{i+1} \qquad (9.36)$$

$$\underline{\tau}_{i+1} = \underline{\theta}_{i+1}\underline{\dot{\omega}}_{i+1} + \underline{\omega}_{i+1} x (\underline{\theta}_{i+1}\underline{\omega}_{i+1}) \qquad (9.37)$$

ahol

m_{i+1} az i+1-ik kardarab tömege

$\underline{\dot{v}}^s_{i+1}$ az i+1-ik kardarab sulypontjának lineáris gyorsulása, amit a (9.14) egyenletből kapunk meg

$\underline{f}_{i+1}$ az i+1-ik kardarabra ható összes külső erő

$\underline{\theta}_{i+1}$ az i+1-ik kardarab sulypontjára vett tehetetlenségi tenzor

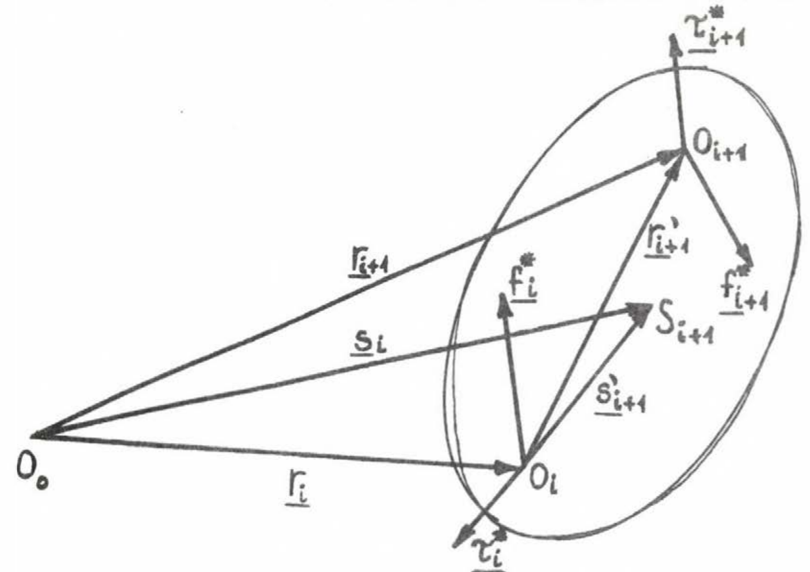
$\underline{\dot{\omega}}_{i+1}$ az i+1-ik kardarab szöggyorsulása, amit a (9.12) egyenlet ad meg

$\underline{\omega}_{i+1}$ i+1-ik kardarab szögsebessége, amit a (9.1) egyenlet ad meg

$\underline{\tau}_{i+1}$ az i+1-ik kardarabra ható összes külső nyomaték

Azi+l-ik kardarab lineáris gyorsulásának ($\dot{\underline{v}}_{i+1}$) kiszámitásakor a (9.14) egyenletbe $\underline{r}'_{i+1}$ helyébe $\underline{s}'_{i+1}$-t kell helyettesitenünk. $\underline{s}'_{i+1}$ azi+l-ik kardarab sulypontjába mutató vektor. (9.2.ábra)Tehát

$$\dot{\underline{v}}^{s}_{i+1} = \dot{\underline{v}}_i + \dot{\underline{\omega}}_i \times \underline{s}'_{i+1} + \underline{\omega}_i \times (\underline{\omega}_i \times \underline{s}'_{i+1}) \qquad (9.38)$$



9.2.ábra

Az $\underline{f}_{i+1}$ eredő erő és $\underline{\tau}_{i+1}$ eredő nyomaték az i-ik és (i+1)-ik kardarabtól és a gravitációból származó erők és nyomatékok eredője. A (9.2) ábra jelöléseinek magyarázata:

$\underline{f}^*_i$ az i-ik kar-tag által azi+l-ik tagra gyakorolt erő

τ^*_i az i-ik kar-tag által azi+l-ik tagra gyakorolt nyomaték

Először hagyjuk figyelmen kivül a gravitáció hatását. Ekkor

$$\underline{f}_{i+1} = \underline{f}_i^* - \underline{f}^*_{i+1} \qquad (9.39)$$

és $\underline{\tau}_{i+1} = \underline{\tau}_i^* - \underline{\tau}_{i+1}^* + (\underline{r}_i - \underline{s}_{i+1}) \times \underline{f}_i^* - (\underline{r}_{i+1} - \underline{s}_{i+1}) \times \underline{f}_{i+1}^*$

azaz

$$\underline{\tau}_{i+1} = \underline{\tau}_i^* - \underline{\tau}_{i+1}^* - \underline{s}'_{i+1} \times \underline{f}_{i+1} - \underline{r}'_{i+1} \times \underline{f}_{i+1}^*$$

(9.4o)

Az i-ik csukló által kifejtett erő és nyomaték:

$$\underline{f}_i^* = \underline{f}_{i+1} + f_{i+1}^* \qquad (9.41)$$

$$\underline{\tau}_i^* = \underline{\tau}_{i+1} + \underline{s}'_{i+1} \times \underline{f}_{i+1} + \underline{\tau}_{i+1}^* + \underline{r}'_{i+1} \times \underline{f}_{i+1}^* \qquad (9.42)$$

ahol $\underline{f}_{i+1}$ és $\underline{\tau}_{i+1}$ a (9.36) és (9.37) egyenletek által adott.

i = 7 esetén a manipulátor-kéz által egy *külső tárgyra* gyakorolt $\underline{f}_7^*$ erőt és $\underline{\tau}_7^*$ nyomatékot kapjuk meg.

Mivel mindegyik csukló forgatást vált ki, a csuklómotorok által kifejtendő μ_{i+1} nyomaték nagysága megegyezik $\underline{\tau}_{i+1}$-nek az i-ik koordinátarendszer $\underline{k}_i$ tengelyére ($\underline{k} = \underline{y}$, ha a csukló billenő és $\underline{k} = \underline{z}$, ha a csukló csavaró tipusu) vett vetületével:

$$\mu_{i+1} = \underline{k}_i \quad \underline{\tau}_{i+1} \qquad (9.43)$$

A manipulátor i+1-ik tagjának mozgásegyenlet-rendszere tehát:

$$\underline{f}_{i+1} = m_{i+1} \dot{\underline{v}}_{i+1}^{s} \qquad (9.44)$$

$$\underline{\tau}_{i+1} = \underline{\theta}_{i+1} \dot{\underline{\omega}}_{i+1} + \underline{\omega}_{i+1} \times (\underline{\theta}_{i+1} \underline{\omega}_{i+1}) \qquad (9.45)$$

$$\underline{f}_i^* = \underline{f}_{i+1} + \underline{f}_{i+1}^* \qquad (9.46)$$

$$\underline{\tau}_i^* = \underline{\tau}_{i+1} + \underline{s}'_{i+1} \times \underline{f}_{i+1} + \underline{\tau}_{i+1}^* + \underline{r}'_{i+1} \times \underline{f}_{i+1}^* \qquad (9.47)$$

$$\mu_{i+1} = \underline{k}_i \quad \tau_{i+1} \qquad (9.48\ )$$

ahol $\underline{v}_{i+1}^{s}$-t a (9.38), $\underline{\omega}_{i+1}$-t a (9.3), $\dot{\underline{\omega}}_{i+1}$-t a (9.8), $\dot{\underline{v}}_{i+1}$-t a (9.14) egyenlet szerint kapjuk meg, $i = 1,\ldots,6$. $\underline{s}'_{i+1}$ és $\underline{r}'_{i+1}$ a manipulátor geometria által rögzitett mennyiségek.

A (9.43)... (9.48) egyenletekhez két kiegészitést kell tennünk:

1. A (9.39) és (9.4o) egyenletekben a gravitáció hatását nem vettük figyelembe. Ezen ugy segithetünk, ha

$$\dot{\underline{v}}_o = \underline{g} \qquad (9.49)$$

értékkel vesszük figyelembe a gravitációs gyorsulást. A (9.14) és (9.38) egyenletekből látható, hogy a gravitáció hatása minden egyes kar-tag gyorsulásához hozzáadódik és igy a (9.36) egyenleteknek megfelelően minden egyes $\underline{f}_i$ erőben jelentkezik.

2. A (9.43) ... (9.48) egyenletek segitségével kiszámithatjuk a szükséges csuklónyomatékokat bármely q_i, $\dot{q}_i$, $\ddot{q}_i$, $i = 1,\ldots,6$ esetében. Probléma azonban, hogy a (9.45) egyenletben a $\underline{\theta}_{i+1}$ inercia-tenzor azi+1-ik kar-tag térbeli helyzetének függvénye, vagyis a kar mozgása során változik. Ezt ugy oldjuk meg,hogy minden egyes tag

dinamikáját a saját koordinátarendszerében fejezzük ki. Az eljárás a következő:

A 3.-5. fejezetekben alkalmazott jelöléseknek megfelelően legyen $\underline{R}_{o,i}$ az alap és az i-ik csukló közötti transzformáció bal felső 3 x 3-as particiója, vagyis a forgatómátrix. Hasonlóan az (i-1)-ik és i-ik csukló közötti forgatás mátrixa $\underline{R}_{i-1,i}$. Eszerint

$$\underline{R}_{o,i} = \underline{R}_{o,1}\, \underline{R}_{1,2} \cdots \underline{R}_{i-1,i} \qquad (9.5o)$$

és

$$\underline{R}^T_{o,i} = \underline{R}^T_{i-1,i} \cdots \underline{R}^T_{1,2}\, \underline{R}^T_{o,1} \qquad (9.51)$$

a forgatómátrix transzponáltja.

A továbbiakban az $\underline{f}_i$, $\underline{\tau}_i$, $\underline{f}^*_i$, $\underline{\tau}^*_i$ -ra vonatkozó (9.44)..., (9.48)egyenleteket, továbbá a $\underline{\dot v}_i^{\,s}$ (9.38), $\underline{\dot\omega}_i$ (9.3), $\underline{\omega}_i$ (9.8) és $\underline{\dot v}_i$ (9.14)-re vonatkozó egyenletekre az $\underline{R}^T_{o,1}$ transzformációt alkalmazzuk és az igy transzformált mennyiségeket számitjuk ki:

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{f}_i = m_i\, \underline{R}^T_{o,i}\, \underline{\dot v}^{\,s}_i \qquad (9.52)$$

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\tau}_{i+1} = (\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\Theta}_{i+1}\underline{R}_{o,i+1})\, \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\dot\omega}_{i+1} + \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\omega}_{i+1} \times \left[(\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\Theta}_{i+1}\underline{R}_{o,i+1})\, \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\omega}_{i+1} \right]$$

$$(9.53)$$

$$\underline{R}^T_{o,i}\, \underline{f}^*_i = \underline{R}_{i,i+1}\, (\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{f}_{i+1} + \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{f}^*_{i+1}) \qquad (9.54)$$

$$\underline{R}^T_{o,i}\, \underline{\tau}^*_i = \underline{R}_{i,i+1}\Big[\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\tau}_{i+1} + \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{s}'_{i+1} \times \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{f}_{i+1} +$$

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\, \underline{\tau}^*_{i+1} + \underline{R}^T_{o,i+1}\, \underline{r}'_{i+1} \times \underline{R}^T_{o,i+1}\, \underline{f}^*_{i+1}\Big]$$

$$(9.55)$$

továbbá (9.38)-ból

$$\underline{R}^T_{o,i}\ \dot{\underline{v}}^s_{i+1} = \underline{R}_{i,i+1}\Big[\underline{R}^T_{o,i}\ \underline{v}_i + \underline{R}^T_{o,i}\ \underline{\omega}_i \times \underline{R}^T_{o,i}\ \underline{s}'_{i+1} +$$

$$+ \underline{R}^T_{o,i}\underline{\omega}_i \times (\underline{R}^T_{o,i}\ \underline{\omega}_i \times \underline{R}^T_{o,i}\ \underline{s}'_{i+1})\Big] \qquad (9.56)$$

(9.3)-ból

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\ \dot{\underline{\omega}}_{i+1} = \underline{R}_{i,i+1}\ (\underline{R}^T_{o,i}\dot{\underline{\omega}}_i + \underline{R}^T_{o,i}\ \underline{k}_i\ \dot{\underline{q}}_{i+1}) =$$

$$= \underline{R}_{i,i+1}(\ \underline{R}^T_{o,i}\underline{\omega}_i + \underline{k}_o\ \dot{q}_{i+1}) \qquad (9.57)$$

(9.8)-ból hasonló módon

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\ \dot{\underline{\omega}}_{i+1} = \underline{R}_{i,i+1}(\ \underline{R}^T_{o,i}\dot{\underline{\omega}}_i + \underline{k}_o\ \ddot{q}_{i+1} + \underline{R}^T_{o,i}\ {}_i \times \underline{k}_o \dot{q}_{i+1})$$

$$(9.58)$$

és (9.14)-ből

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\ \dot{\underline{v}}_{i+1} = \underline{R}_{i,i+1}(\underline{R}^T_{o,i}\ \dot{\underline{v}}_i) + \underline{R}^T_{o,i+1}\dot{\underline{\omega}}_{i+1} \times \underline{R}^T_{o,i+1}\ \underline{r}'_{i+1} +$$

$$+ \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\omega}_{i+1} \times (\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\omega}_{i+1} \times \underline{R}^T_{o,i+1}\ \underline{r}'_{i+1})$$

$$(9.59)$$

végül

$$\mu_{i+1} = (\ \underline{R}^T_{o,i+1}\underline{k}_i\ )\ (\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\tau}_{i+1}) \qquad (9.6o)$$

A (9.52), ... (9.6o) egyenletekben

$\underline{R}_{o,i+1}\underline{s}'_{i+1}$ az i+l-ik kar-tag sulypontjának helyvektora a saját koordinátarendszerében

$\underline{R}^T_{o,i+1}\underline{\theta}_{i+1}\underline{R}_{o,i+1}$ az i+l-ik kar-tag tehetetlenségi tenzora az illető tag *saját koordinátarendszerében*

$$\underline{k}_o = \underline{z}_o = [o\ o\ 1]^T \tag{9.61}$$

és a manipulátor geometriai paraméterei (3.7 ábra):

billenő tipusu csukló esetén:

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\,\underline{r}'_{i+1} = \begin{vmatrix} \sin q_{i+1}\ b_{i+1} \\ \cos q_{i+1}\ b_{i+1} \\ o \end{vmatrix} \tag{9.62}$$

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\,\underline{y}_i = \begin{vmatrix} \sin q_{i+1} \\ \cos q_{i+1} \\ o \end{vmatrix} \tag{9.63}$$

csavaró tipusu csuklónál:

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\,\underline{r}'_{i+1} = \begin{bmatrix} \sin q_{i+1}\ b_{i+1} \\ o \\ \cos q_{i+1}\ b_{i+1} \end{bmatrix} \tag{9.64}$$

$$\underline{R}^T_{o,i+1}\,\underline{z}_i = \begin{bmatrix} \sin q_{i+1} \\ o \\ \cos q_{i+1} \end{bmatrix} \tag{9.65}$$

Az i-ik csuklóban megkivánt μ_i nyomaték számitásának menete tehát:

Bemenő adatok: i, q_i, $\dot{q}_i$, $\ddot{q}_i$ és az (i-1)-ik csuklóra kiszámitott $\underline{\underline{R}}^T_{o,i-1}$ $\underline{\omega}_{i-1}$, stb. értékek.

1.lépés: $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\underline{\omega}_i$, $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\dot{\underline{\omega}}_i$, $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\dot{\underline{v}}_i$ kiszámitása (9.57), (9.58)és (9.52) szerint

2. lépés: $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\dot{\underline{v}}^s_i$ kiszámitása (9.56) szerint

3. lépés: $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\underline{f}_i$, $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\underline{\tau}_i$ kiszámitása (9.52), (9.53) szerint

4. lépés: $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\underline{f}^*_i$, $\underline{\underline{R}}^T_{o,i}\underline{\tau}^*_i$ kiszámitása (9.54),(9.55) szerint

5. lépés: az μ_i csuklónyomaték kiszámitása (9.6o) szerint.

10. SZABÁLYOZÁS

lo.1. A SZABÁLYOZÁS CÉLJA ÉS MÓDSZERE

A robot alkalmazás gazdaságosságának egyik döntő meghatározója az egységnyi idő alatt végzett müveletek száma, amit a manipulátor ciklusidejének is szokás nevezni. A ciklusidő csökkenését a manipulátor pálya:sebességének növelésével érhetjük el. A jelenlegi manipulátorok sebességét általában az alkalmazott szabályozók korlátozzák: a ma használatos ipari manipulátorokban minden egyes csuklót különkülön, rögzitett paraméterü, analóg szabályozóval látnak el. Az ilyen szabályozók független, állandó tehetetlenségü és csillapitásu, másodrendü rendszerek szabályozására alkalmasak, esetünkben azonban erősen nemlineáris, időben változó paraméterekkel jellemezhető a szabályozandó berendezés. Igy az emlitett egyszerü szabályozókkal csak akkor érhetünk el megfelelő eredményt, ha a csuklókat müködtető motorok erősen tulméretezettek és a szabályozandó berendezés paraméterei a geometriai konfiguráció változása (a kar mozgása) során nem változnak tul hirtelen. Ez utóbbi feltétel csak a mozgástér bizonyos részein, az u.n. szinguláris helyzetektől távol tartható és csupán kis pályasebességeknél. Nagyobb sebességeknél azonban az alábbi problémák lépnek fel:

1. - változik a hatásos tehetetlenségi nyomaték;
2. - az egyes kar-tagok tehetetlenségi nyomatékai kölcsönhatásba kerülnek;
3. - a Coriolis féle erők hatása nem lesz elhanyagolható.

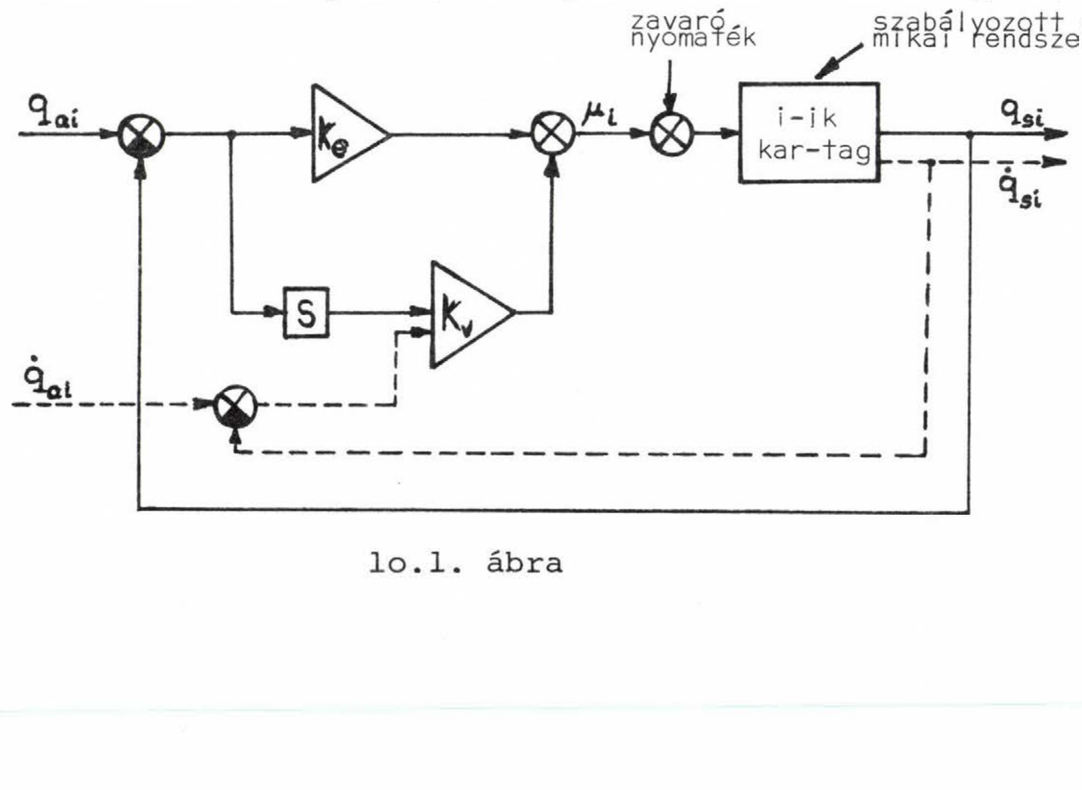
Ezeken kivül számos más, a sebességet befolyásoló tényező is van, mint a manipulátor szilárdsága, a motorok teljesitménye , ezek azonban a fentiekhez képest nem korlátozó jellegüek.

Az 1., 2., 3. sebességkorlátozó tényezők hatásának csökkentése érdekében a továbbiakban olyan, a számitógépes (digitális)szabályozás adta lehetőségeket kihasználó szabályozó algoritmust ismertetünk, amely figyelembe veszi a szabályozott mechanikai rendszer időben változó tulajdonságait, ugyanakkor a ma rendelkezésre álló számitási eszközök lehetőségeit is.

A manipulátor-szabályozó feladata, hogy a kivánt kéz-poziciók és a pillanatnyi csukló-poziciók és sebességek ismeretében létrehozza a pozicióhiba megszüntetéséhez szükséges csuklómotor-nyomatékokat.

A szabályozási kör kialakitására többféle lehetőségünk adódik, amelyeket az alábbiakban diagramok formájában foglalunk össze.

1. Tengelyenként független, visszacsatolt, fix paraméterü szabályozási kör, amely egy állandó, másodrendü mechanikai rendszert szabályoz: (s a Laplace transzformáció jele)



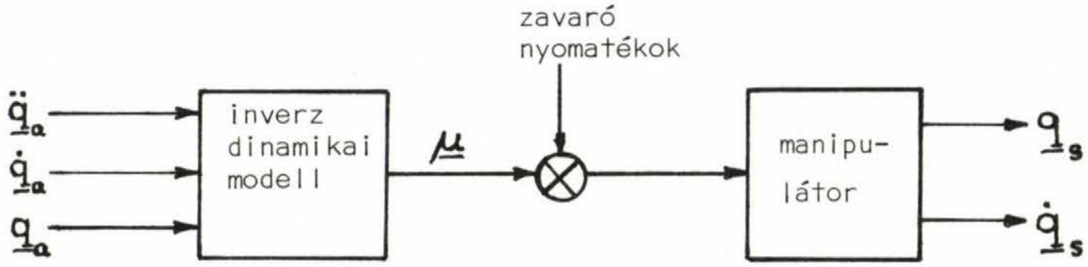
lo.1. ábra

alapjel: q_{ai} előirt csuklószög-pozició
szabályozott
jellemző: q_{si} tényleges csuklószög-pozició

visszacsatolás: q_{si} , esetleg $\dot{q}_{si}$ is, (szaggatott hurok) a rendelkezésre álló érzékelőktől függően

alkalmazás: analóg szabályozású ipari robotok

2. Nyilt-hurku vezérlés a manipulátor előre (off-line) kiszámitott modelljével. A modellt inverz rendszernek is szokás nevezni [Horn, 1977].



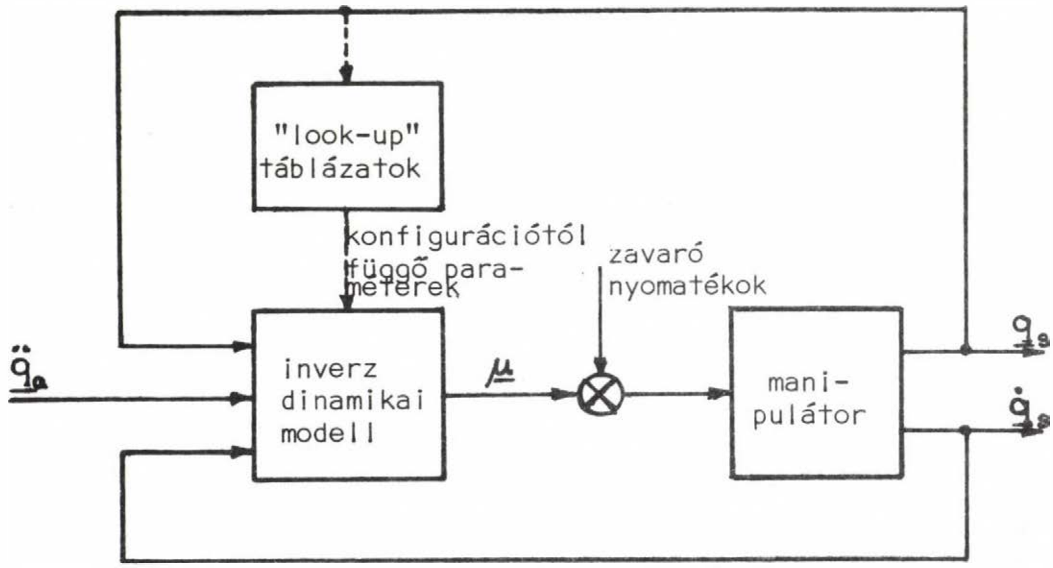
lo.2. ábra

alapjel: $\underline{q}_a$, $\dot{\underline{q}}_a$, $\ddot{\underline{q}}_a$

vezérelt
jellemző: $\underline{q}_s$, $\dot{\underline{q}}_s$

alkalmazás: ahol on-line modellszámitás nem lehetséges a modell bonyolultsága és/vagy a számitógép kis kapacitása miatt.

3. Nyilt hurku vezérlés, amely az aktuális csuklószög-poziciókból és sebességekből on-line számolja az inverz modellt. A dinamikai modell konfigurációtól függő paramétereinek meghatározását táblázatos módszerrel lehet gyorsitani:



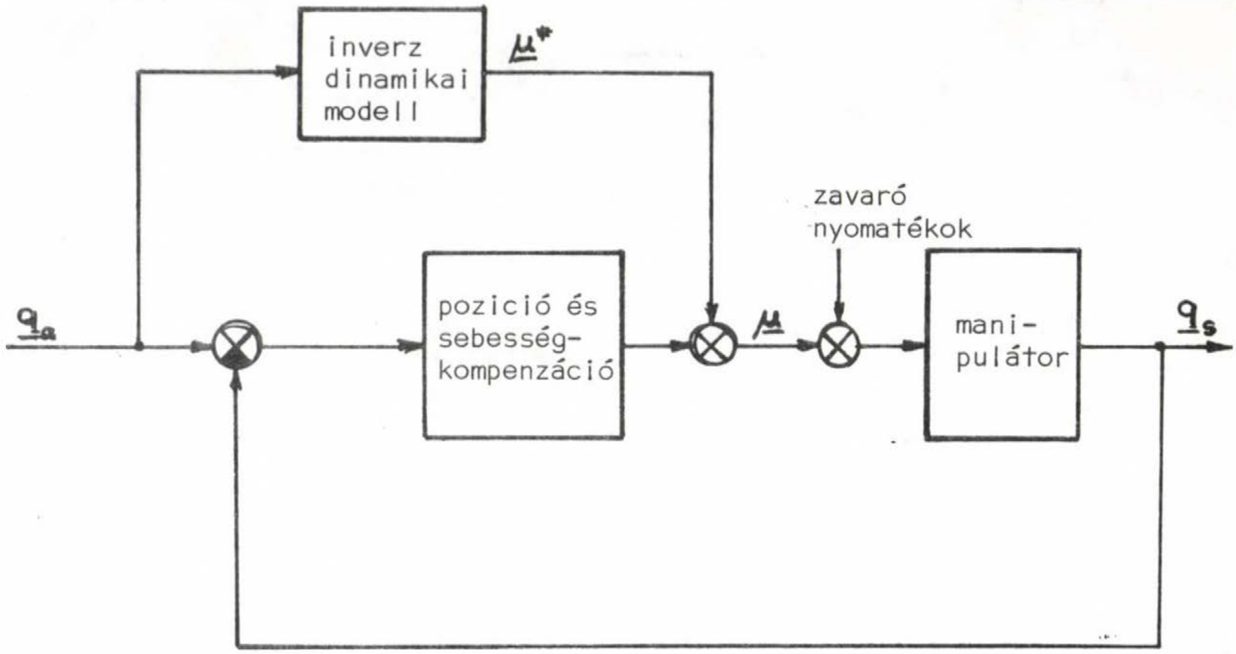
lo.3. ábra

alapjel: $\ddot{q}_a$

vezérelt jellemző: q_s, $\dot{q}_s$

alkalmazás: [Albus, 1975](táblázatos módszer)

4. Csuklószög-poziciók és sebességek on-line, visszacsatolt szabályozása. A csuklószög-poziciókban és sebességekben mutatkozó hibát kompenzáló visszacsatolással lehet csökkenteni.



lo.4. ábra

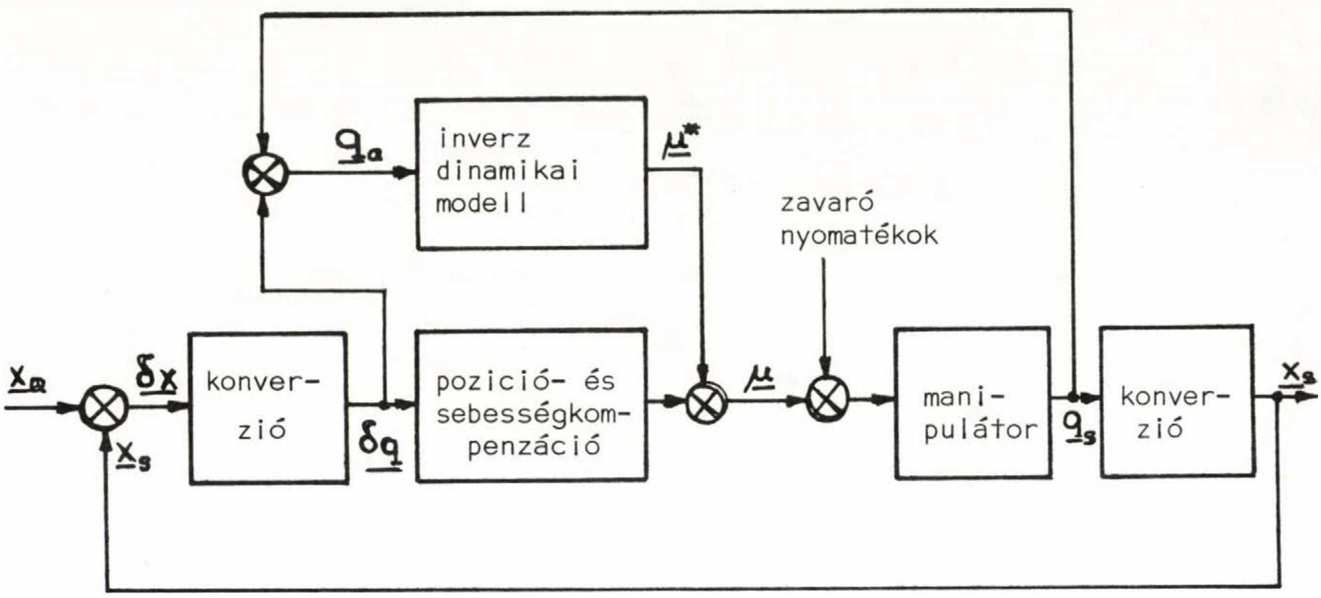
alapjel: $\underline{q}_a$

szabályozott jellemző: $\underline{q}_s$

visszacsatolás: $\underline{q}_s$

alkalmazás: [Horn, 1977](a modellszámitás részben táblázatos)

5. A kéz-koordináták ($\underline{x}$) on-line, visszacsatolt szabályozása. Az $\underline{x} \to \underline{q}$ konverziót, a dinamikai modell számitását és a $\underline{q} \to \underline{x}$ konverziót on-line, valós időben kell elvégezni. A szabályozás közvetlenül a kéz-koordinátákra irányul, ami a manipulációs feladat végrehajtása szempontjából előnyös.



lo.5. ábra

alapjel: $\underline{x}_a$

szabályozott jellemző: $\underline{x}_s$

visszacsatolás: $\underline{x}_s$, $\underline{q}_s$

alkalmazás: [Takase, 1977], [Paul&al, 1979],
[Renaud, 1975]

lo.2. CSUKLÓSZÖGEK SZABÁLYOZÁSA

A szabályozó algoritmusok egyik csoportjában a szabályozott jellemzők a q_i, $i=1, \ldots, 6$ csuklószögek, illetve a $\dot{q}_i$ csukló-szögsebességek. Ilyen például a 2.1.1. pontban ismertetett módszer [Whitney, 1972], az un. "resolved rate control", ahol a kézre előirt poziciókat és sebességeket előbb csuklópoziciókká és sebességekké számitják át és ez utóbbiakat szabályozzák. Csuklónkénti pozicioszabályozást ismertet [Paul, 1972]: a megoldás egy ma már hagyományosnak tekinthető számitógépes, mintavételes szabályozás, ahol azonban a hurokerősitést, a gravitációtól függő paramétereket és a csuklókra ható nyomatékokat a kar konfigurációtól függően változtatják az alábbi módon:

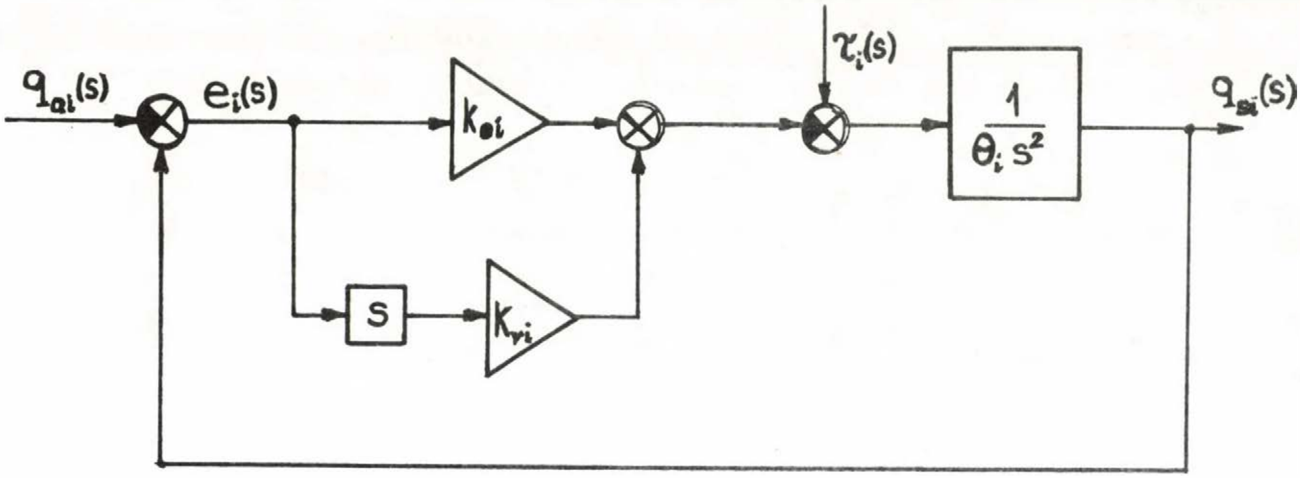
A leolvasott q_{si} és a pályaszámitó programtól érkező q_{ai} szögpoziciók különbsége adja a pozicióhibát, amit pozicióvisszacsatolással lehet csökkenteni. A sebességvisszacsatolással pedig megfelelő csillapitást lehet elérni. Az adott kar-tagot $1/(\theta_i s^2)$-tel jellemezhetjük, ahol s a Laplace transzformáció jele, θ_i az adott kar-tag effektiv tehetetlenségi nyomatéka. $\tau_i(s)$ a külső (zavaró) nyomaték. A pozicióhiba $e_i(s) = q_{si} - q_{ai}$, a sebességhiba pedig $s \cdot e_{si}$.
A poziciónak és sebességnek megfelelően k_e és k_v a két visszacsatolási tényező.
A hurokegyenlet:

$$e_i(s) = \frac{-s^2 \theta_i}{s^2 \theta_i + sk_v + k_e} q_a(s) + \frac{1}{s^2 \theta_i + sk_v + k_e} \tau_i(s) \qquad (10.1)$$

és a kritikus csillapitás:

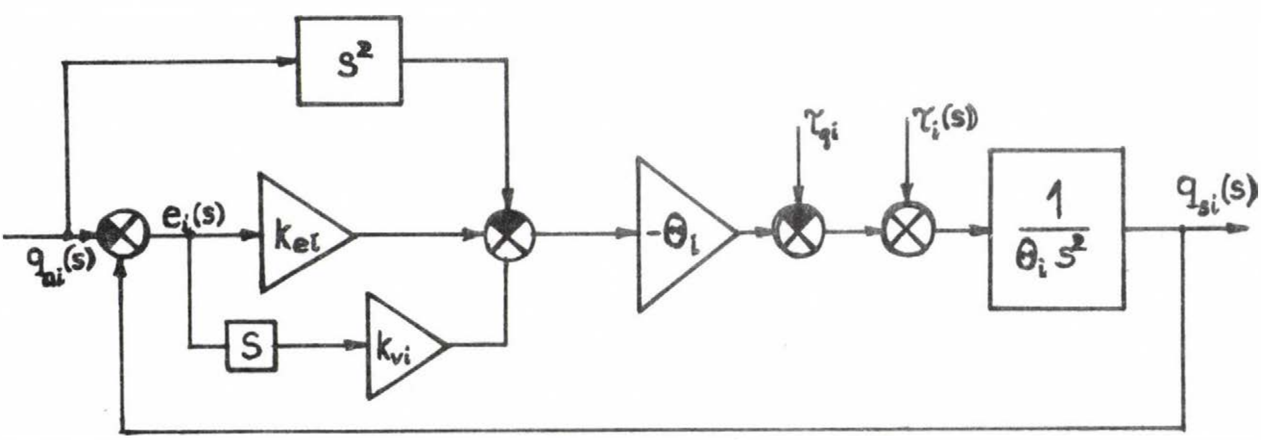
$$k_{vi} = 2\,(\theta_i \cdot k_{ei})^{1/2} \qquad (10.2)$$

A (lo.1)-nek megfelelő szabályozási kör a lo.6. ábrán látható.



lo.6. ábra

A lo.1 szerinti szabályozásban a nehézséget az okozza, hogy a rendszer válasza függ a kar-tag θ_i tehetetlenségi nyomatékától, a külső zavaró nyomatékoktól és a kar-tag gyorsulásától. E hatások kompenzálására alkalmas szabályozási kört mutat a lo.7. ábra. A kompenzált rendszer hurokegyenlete (lo.3).



lo.7. ábra

$$e_i(s) = \frac{1}{s^2 + sk_{vi} + k_{ei}} \cdot \frac{\tau_i - \tau_{gi}}{\theta_i} \qquad (lo.3)$$

A lo.2. ábrából látható, hogy a változó tehetetlenségi nyomaték hatását egy $(-\theta_i)$erősités bevezetésével kompenzáltuk, miáltal a kritikus csillapitás

$$k_v = 2 \cdot (k_e)^{1/2} \qquad (lo.4)$$

az időben változó paraméterektől függetlenné válik.
A zavaró külső nyomatékok közül a legfontosabb a gravitációból származó nyomaték, amit a $-\tau_g$ nyomaték hozzáadásával kompenzáltunk.
A gyorsulás hatását az $s^2 q_a(s)$ tag hozzáadásával kompenzáltuk. A kompenzált szabályozási kör megvalósitásához szükségünk van a θ_i és τ_{gi} paraméterekre. Ehhez a manipulátort a Coriolis-erők és a gravitációs nyomatékokon kivül fellépő egyéb zavaró nyomatékok hatását elhanyagolva, a

$$\mu_i = \theta_i \ddot{q}_i + \tau_{gi} \qquad (lo.5)$$

modellel jellemezzük. [Paul, 1972] az alábbi összefüggéseket adja a keresett paraméterekre:

$$\theta_i = \sum_{j=1}^{6} Tr\,(\underline{U}_{ji} \cdot \underline{H}_j \cdot \underline{U}^T_{ji}) \qquad (lo.6)$$

$$\tau_{gi} = -\sum_{j=1}^{6} m_j\, \underline{g}^T \cdot \underline{U}_{ji} \cdot \underline{s}'_j \qquad (lo.7)$$

ahol $\underline{H}_j$ a j-ik kar-tag u.n. pszeudo tehetetlenségi mátrixa,

$$\underline{U}_{ji} = \underline{A}_{o,1} \cdot \underline{A}_{1,2} \cdots \underline{A}_{i-2,i-1} \cdot \underline{Q} \cdot \underline{A}_{i-1,i} \cdots \underline{A}_{j-1,j}$$

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} o & -1 & o & o \\ o & o & o & o \\ o & o & o & o \\ o & o & o & o \end{bmatrix}$$

$\underline{A}_{i-1,i}$ = (3.4) kifejezés

$$\underline{g}^T = [o \quad o \quad g \quad o]$$

m_j a j-ik tag tömege

$\underline{s}'_j$ a j-ik tag sulypontjának pozicióvektora a j-ik tag saját koordinátarendszerében (9.2.ábra)

Látható, hogy θ_i és τ_{gi} kiszámitása még igy is meglehetősen összetett feladat, ugyanakkor a sebességfüggő komponensek és a csuklók dinamikus kölcsönhatásának elhanyagolása sem feltétlenül jogos. Ezért a lo.3 pontban egy olyan szabályozási algoritmust tekintünk át, amely a 9.3.2. pontban felállitott, a fenti elhanyagolásoktól mentes dinamikai modellre támaszkodik.

lo.3. A KÉZ POZICIÓJÁNAK ÉS ORIENTÁCIÓJÁNAK DIREKT SZABÁLYOZÁSA

A manipulátorvezérlés elsődleges célja, hogy a robotkéz a kijelölt pályát kövesse. Ennek megfelelően célszerü, ha a lo.2. pontban ismertetett "hagyományos"módszerrel szemben nem a csuklószögeket, hanem közvetlenül a robotkéz pozicióját és orientációját szabályozzuk. [Renaud, 1979], [Takase, 1979], [Paul&al, 1979]

A szabályozási kör összeállitásának érdekében mind a kéz pozició, mind pedig a kéz orientáció hibáját definiálnunk kell. Elsőként a kéz pozicióhibáját definiáljuk.

Mivel a manipulátor előre megtervezett pályát követ, a trajektória minden pontjában rendelkezésünkre áll a kéz kivánt poziciója ($\underline{r}_a$), sebessége ($\underline{v}_a$) és gyorsulása ($\dot{\underline{v}}_a$), amelyeket szabályozástechnikailag alapjeleknek tekintünk. A szabályozott kéz-gyorsulást ($\dot{\underline{v}}_6$) a következőképp irhatjuk fel:

$$\dot{\underline{v}}_6 = \dot{\underline{v}}_a + k_1 (\underline{v}_a - \underline{v}_6) + k_2 (\underline{r}_a - \underline{r}_6) \qquad (lo.8)$$

Igy a kéz pozicióhibájára ($\underline{r}_a$ - $\underline{r}_6$) vonatkozó egyenlet:

$$d^2 (\underline{r}_a - \underline{r}_6)/dt^2 + k_1[d(\underline{r}_a - \underline{r}_6)/dt] + k_2(\underline{r}_a - \underline{r}_6) = 0$$

(lo.9)

Ha k_1-t és k_2-t ugy választjuk meg, hogy a (lo.9) egyenlet karakterisztikus gyökei a komplex sik bal felére essenek, akkor a pozicióhiba aszimptotikusan nullához fog közeliteni.

A kéz orientációhibájának egy lehetséges definiciója:

$$\Delta\underline{n} = \underline{n} \quad \sin\vartheta \qquad (lo.lo)$$

ahol $\underline{n}$ az az egységvektor, amely körül a kéz koordinátarendszerét ϑ szöggel elforgatva az egybe fog esni az előirt kéz-koordinátairányokkal. Ha egy $\underline{x}_1$ vektort $\underline{n}$ körül ϑ szöggel az $\underline{x}_2$ pozicióba forgatunk, akkor Euler tétele szerint:

$$\underline{x}_2 = \underline{x}_1 \underline{N} \qquad (10.11)$$

ahol $\underline{N} = \exp(\underline{K}_n \vartheta)$ (10.12)

$$\underline{K}_n = \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{bmatrix} \qquad (10.13)$$

n_x, n_y, n_z az $\underline{n}$ vektor komponensei, továbbá

$$\exp(\underline{K}_n \vartheta) = \underline{I} \cos\vartheta + \underline{n}\, \underline{n}^T (1-\cos\vartheta) + \underline{K}_n \sin\vartheta \qquad (10.14)$$

$\underline{I}$ az egységmátrix

$\underline{n}^T$ az $\underline{n}$ vektor transzponáltja

Legyenek az $\underline{N}$ mátrix komponensei $[n_{i,j}]$, $i,j = 1, 2, 3$, ekkor (10.12)-ből és (10.14)-ből következik, hogy

$$\cos\vartheta = 1/2\,(n_{11} + n_{22} + n_{33} - 1) \qquad (10.15)$$

és

$$2\,\underline{n}\,\sin\vartheta = \begin{bmatrix} n_{32} - n_{23} \\ n_{13} - n_{31} \\ n_{21} - n_{12} \end{bmatrix} = \underline{x}_1 \times \underline{x}_2 + \underline{y}_1 \times \underline{y}_2 + \underline{z}_1 \times \underline{z}_2 \qquad (\text{lo.16})$$

A kéz előirt pozicióját az (1.1)-nek megfelelően egyetlen, homogén koordinátás transzformációs mátrixba tudjuk foglalni:

$$\underline{H} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \underline{n} & \underline{o} & \underline{k} & \underline{r} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \qquad (\text{lo.17})$$

Az $\underline{n}$, $\underline{o}$, $\underline{k}$ orientációvektorok a 3. fejezetben ismertetett α, β, γ Euler szögek által vannak definiálva. (4.2)-t kibővitve kapjuk:

$\underline{H}$ =

$$\left[\begin{array}{ccc|c} & & & x \\ & I & & y \\ & & & z \\ \hline o & o & o & 1 \end{array}\right] \left[\begin{array}{ccc|c} c\alpha & -s\alpha & o & o \\ s\alpha & c\alpha & o & o \\ o & o & 1 & o \\ \hline o & o & o & 1 \end{array}\right] \left[\begin{array}{ccc|c} c\beta & o & s\beta & o \\ o & 1 & o & o \\ -s\beta & o & c\beta & o \\ \hline o & o & o & 1 \end{array}\right] \left[\begin{array}{ccc|c} c\gamma & -s\gamma & o & o \\ s\gamma & c\gamma & o & o \\ o & o & 1 & o \\ \hline o & o & o & 1 \end{array}\right]$$

(lo.18)

tehát x, y, z, α, β, γ ismeretében $\underline{H}$-t elő tudjuk állitani. A $\Delta\underline{n}$ orientáció hibát ugy számithatjuk ki, hogy a $\underline{H}$ mátrix $\underline{n}$, $\underline{o}$, $\underline{k}$ vektorait megfeleltetjük az előirt $\underline{x}_a$, $\underline{y}_a$, $\underline{z}_a$ orientáció-vektoroknak és felhasználva (lo.lo)-t és (lo.16)-t:

$$\Delta \underline{n} = (\underline{x}_6 \times \underline{x}_a + \underline{y}_6 \times \underline{y}_a + \underline{z}_6 \times \underline{z}_a) / 2 \qquad (1o.19)$$

Az orientációhiba kiküszöböléséhez a (1o.19) által definiált $\Delta\underline{n}$ vektor körül kell ϑ szöggel elforditanunk a kezet. Ehhez a kéz $\underline{\omega}_6$ szögsebességvektorának $\Delta\underline{n}$ -nel egyező irányba kell mutatnia, ezért az $\underline{\dot{\omega}}_6$ kéz-szöggyorsulás célszerü megválasztása:

$$\underline{\dot{\omega}}_6 = \underline{\dot{\omega}}_a + k_1 (\underline{\omega}_a - \underline{\omega}_6) + k_2 \Delta\underline{n} \qquad (1o.2o)$$

A kéz gyorsulást és szöggyorsulást egyetlen $\dot{w}_s = [\dot{v}_6, \dot{\omega}_6]^T$ vektorba, a szabályozott jellemzők vektorába foglalva:

$$\underline{\dot{w}}_s =$$

$$= \begin{bmatrix} \underline{\dot{v}}_a + k_1 (\underline{v}_a - \underline{v}_6) + k_2 (\underline{r}_a - \underline{r}_6) \\ \underline{\dot{\omega}}_a + k_1 (\underline{\omega}_a - \underline{\omega}_6) + \underline{k}_2 \Delta\underline{n} \end{bmatrix} = \underline{\dot{w}}_a + k_1 (\underline{w}_a - \underline{w}_s) + k_2 \underline{e}$$

$$(1o.21)$$

ahol

$$\underline{e} = \begin{bmatrix} \underline{r}_a - \underline{r}_6 \\ \Delta\underline{n} \end{bmatrix} \qquad (1o.22)$$

Másrészt (9.21) szerint:

$$\underline{w}_s = \underline{J}\, \underline{\ddot{q}} + (d\underline{J}/dt)\, \underline{\dot{q}} \qquad (1o.23)$$

(1o.21)-t (1o.23)-mal összevetve és (9.19)-t behelyettesitve kapjuk:

$$\underline{\ddot{q}} = -k_1\underline{\dot{q}} + \underline{J}^{-1} \left[\underline{\dot{w}}_a + k_1\underline{w}_a + k_2\underline{e} - (d\underline{J}/dt)\, \underline{\dot{q}}\right] \qquad (1o.24)$$

$\ddot{\underline{q}} = [\ddot{q}_1, \ldots, \ddot{q}_6]^T$-at az előirt kéz-poziciókból, sebességekből és gyorsulásokból (lo.24) szerint kiszámitva és $\underline{q}$-t illetve $\dot{\underline{q}}$-ot a csuklókba épitett szögpozició- és szögsebességérzékelőkkel (potenciométerek vagy optikai kódadók illetve tachométerek) megmérve a 9.3.2 pontban leirtak szerint számitjuk ki az egyes csuklókra adandó pillanatnyi nyomatékokat. Az algoritmus elvi vázlata a lo.8 ábrán látható.

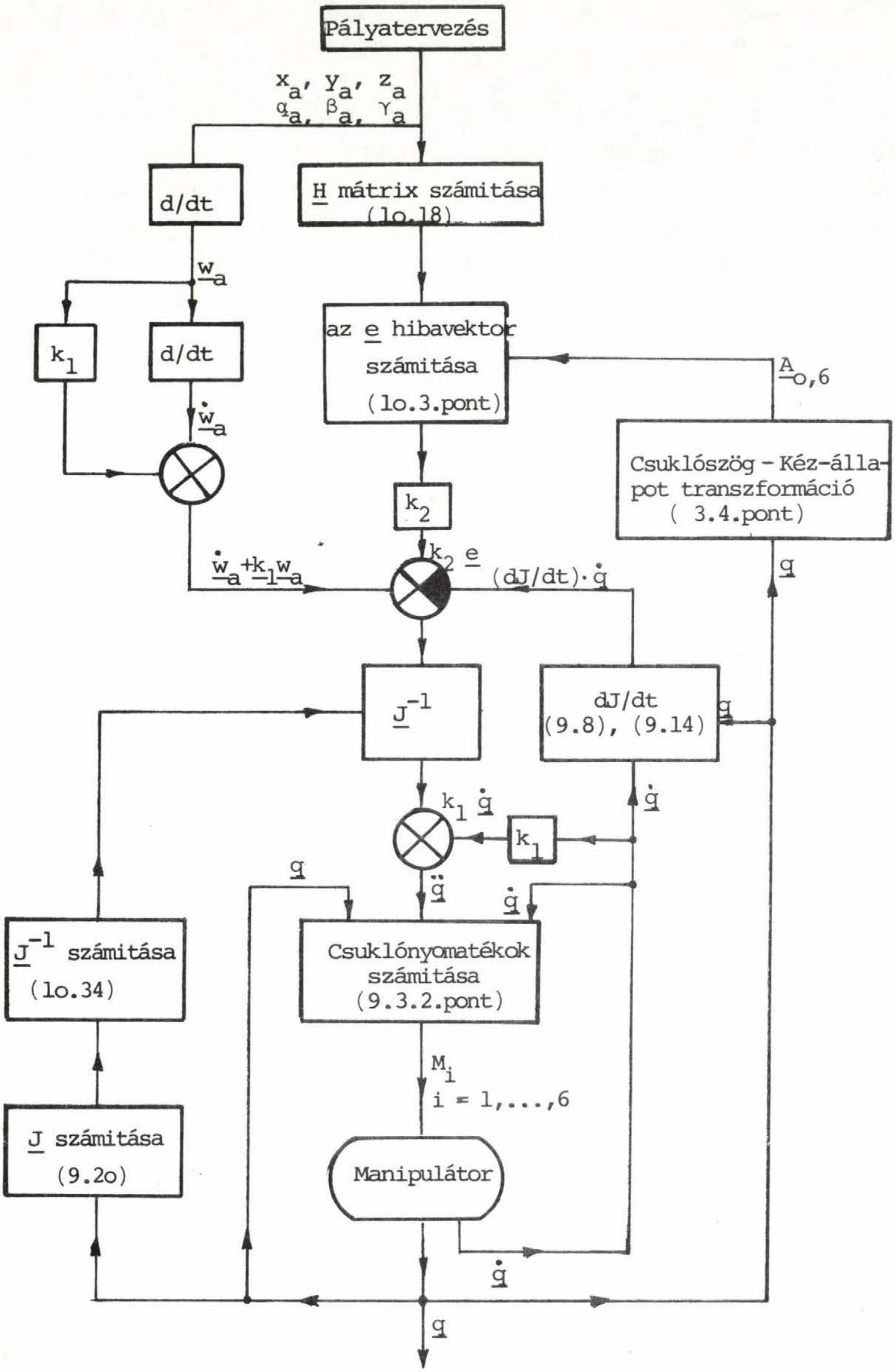
A (lo.24) összefüggésben a $\underline{J}$ mátrixot (9.2o) szerint, a ($d\underline{J}/dt$) mátrixot pedig a (9.8) és (9.14) egyenletektől, a $\ddot{q}_i$-t tartalmazó tagok elhagyásával tudjuk kiszámitani.

A $\underline{J}$ mátrix direkt invertálása nagy technikai nehézségekbe ütközik, mivel $\underline{J}$ elemei a csuklószögektől igen összetett módon függenek. [Paul al,&1979] alapján az alábbi megoldás gyorsan célhoz vezet. $\underline{J}$-t felirjuk a következő alakban:

$$\underline{J} = \left[\begin{array}{c|c} \underline{R}_{o,3} & \underline{O} \\ \hline O & \underline{R}_{o,3} \end{array}\right] * \left[\begin{array}{c|c} \underline{I} & -\underline{K}_n \\ \hline \underline{O} & \underline{I} \end{array}\right] * \left[\begin{array}{c|c} \underline{O} & \underline{A} \\ \hline \underline{B} & \underline{C} \end{array}\right] \qquad (lo.25)$$

ahol $\underline{O}$ a 3 x 3-as nullmátrix, $\underline{I}$ a 3 x 3-as egységmátrix, $\underline{K}_n$ ugyanaz, mint a (lo.13)-ban,

$$\underline{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \underline{R}^T{}_{o,3}\,(\underline{r}_6 - \underline{r}_3) \qquad (lo.26)$$



A kéz állapotát szabályozó algoritmus

1o.8. ábra

és

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} -b_3s_2 & 0 & 0 \\ -b_2c_2 & b_3 & 0 \\ -b_2s_2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1o.27)$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} 0 & -s4 & c4s5 \\ 0 & c4 & s4s5 \\ 1 & 0 & c5 \end{bmatrix} \qquad (1o.28)$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -s2 & 0 & 0 \\ c2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (1o.29)$$

és

$$\underline{N} = \left[\begin{array}{c|c} \underline{O} & \underline{A} \\ \hline \underline{B} & \underline{C} \end{array}\right] \qquad (1o.3o)$$

ahol $sj = \sin q_j$, $cj = \cos q_j$, b_j -t lásd a 3.7 ábrán.

(9.81)-ből

$$\underline{N}^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} -\underline{B}^{-1}\ \underline{C}\ \underline{A}^{-1} & B^{-1} \\ \hline \underline{A}^{-1} & \underline{O} \end{array}\right] \qquad (1o.31)$$

ahol

$$\underline{A}^{-1} = -\frac{1}{s2b_3^{\,2}}\begin{bmatrix} b_3 & 0 & 0 \\ b_2c2 & -b_3s2 & 0 \\ b_2b_3s2 & 0 & -s2b_3^{\,2}\end{bmatrix} \tag{lo.32}$$

$$\underline{B}^{-1} = \frac{1}{s5}\begin{bmatrix} -c4c5 & -s4c5 & s5 \\ -s4s5 & c4s5 & 0 \\ c4 & s4 & 0\end{bmatrix} \tag{lo.33}$$

és a $\underline{J}$ mátrix inverze (9.62)-bõl:

$$\underline{J}^{-1} = \left[\begin{array}{c|c} -\underline{B}^{-1}\,\underline{C}\,\underline{A}^{-1} & \underline{B}^{-1} \\ \hline \underline{A}^{-1} & \underline{O}\end{array}\right] * \left[\begin{array}{c|c} \underline{I} & \underline{K}_n \\ \hline \underline{O} & \underline{I}\end{array}\right] * \left[\begin{array}{c|c} \underline{R}^T{}_{o,3} & \underline{O} \\ \hline \underline{O} & \underline{R}^T{}_{o,3}\end{array}\right] \tag{lo.34}$$

11. ÖSSZEFOGLALÁS

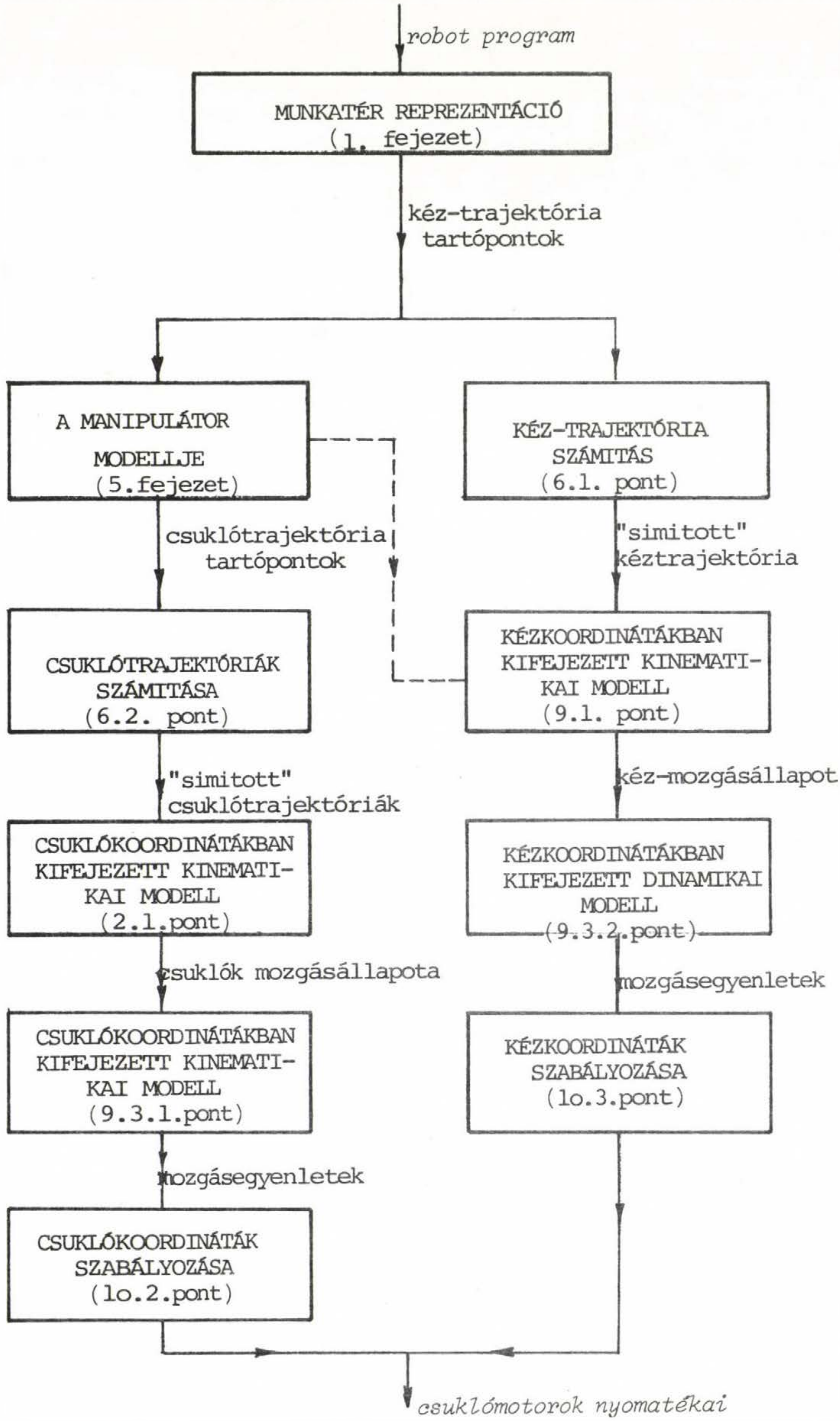
11.1. A TÁRGYALT MÓDSZEREK KAPCSOLATA

A dolgozatban tárgyalt számitási eljárások logikai kapcsolatát az 11.1. ábra szemlélteti. Látható, hogy a csuklónyomatékok meghatározásához kétféle uton juthatunk el, amelyeket a folyamatábra két ága szemléltet.

A csuklómotor nyomatékok meghatározásának egyik lehetséges módja az, amikor a kéz-koordinátákban definiált manipulátor-mozgáspályát először csuklókoordinátákban (q_i) kifejezett trajektóriákká transzformáljuk (5.fejezet), majd a 6.2. pontban ismertetett módon, a csuklótrajektóriákat polinomokkal közelitve meghatározzuk a kivánt csuklószögsebességeket és szöggyorsulásokat. A pozicioszabályozást a rendelkezésre álló real-time számitási kapacitástól és szabályozó elektronikától függően a lo.1...lo.4. ábrán látható módszerek valamelyikével valósithatjuk meg. A lo.2 pont ennek egy lehetséges megoldását mutatta be.

A lo.3. pontban egy olyan szabályozó algoritmust ismertettünk, amelynek segitségével a csukló-gyorsulásokat, s ezen keresztül a csuklómotoroktól megkivánt nyomatékokat közvetlenül a robotkéz kivánt poziciójából és orientációjából lehet meghatározni egyetlen transzformációs müveletsorozattal, amit a (lo.24) egyenlet fejez ki. A pozicioszabályozás a lo.5 ábrán bemutatott elven történik.

A csuklókoordinátákban végzett szabályozás előnye az, hogy jobban alkalmazkodhat a rendelkezésre álló szabályozó elektronikához, illetve a valós idejü számitások szempontjából ke-


robot program
MUNKATÉR REPREZENTÁCIÓ (1. fejezet)
kéz-trajektória tartópontok
A MANIPULÁTOR MODELLJE (5.fejezet)
KÉZ-TRAJEKTÓRIA SZÁMITÁS (6.1. pont)
csuklótrajektória tartópontok
"simitott" kéztrajektória
CSUKLÓTRAJEKTÓRIÁK SZÁMITÁSA (6.2. pont)
KÉZKOORDINÁTÁKBAN KIFEJEZETT KINEMATIKAI MODELL (9.1. pont)
"simitott" csuklótrajektóriák
kéz-mozgásállapot
CSUKLÓKOORDINÁTÁKBAN KIFEJEZETT KINEMATIKAI MODELL (2.1.pont)
KÉZKOORDINÁTÁKBAN KIFEJEZETT DINAMIKAI MODELL (9.3.2.pont)
csuklók mozgásállapota
mozgásegyenletek
CSUKLÓKOORDINÁTÁKBAN KIFEJEZETT KINEMATIKAI MODELL (9.3.1.pont)
KÉZKOORDINÁTÁK SZABÁLYOZÁSA (lo.3.pont)
mozgásegyenletek
CSUKLÓKOORDINÁTÁK SZABÁLYOZÁSA (lo.2.pont)
csuklómotorok nyomatékai

11.1.ábra

véssé hatékony számitási eszközökhöz is, főképpen pedig lehetővé teszi a csuklószögek elosztott, csuklónként dedikált eszközökkel történő szabályozását. Ez a módszer ugyanakkor igen sok közelitést feltételez (táblázatos modellszámitás, külső erők, nyomatékok, Coriolis erők elhanyagolása, stb.), továbbá a kéz pozicióját és orientációját csak közvetve szabályozza. A kéz-koordináták közvetlen szabályozására ("feladat-orientált szabályozás") javasolt algoritmus mentes a fenti közelitések okozta hibáktól és gyors számitási eszközök használata esetén jó minőségü, gyors manipulátormozgást biztosit.

11.2. A DOLGOZAT EREDMÉNYEI

1. A dolgozat *összefoglalja* és *rendszerezi* az automatizált manipulátor-irányitásban alkalmazható *számitási módszereket*. Ismerteti és logikai kapcsolatba hozza az irányitás egyes részfeladatait megoldó módszereket. *Két, alternativ koncepció* algoritmusait tárgyalja a robot programozásától a csuklómotor-nyomatékok számitásáig. Az irodalmi forrásokat e két koncepció ("feladat-orientált", illetve "manipulátor-orientált" irányitás) szempontjából értékeli, s ezzel a témakör ujszerü megközelitését adja.

2. A dolgozat *egységes tárgyalásmódot* és formalizmust alkalmaz az egymásra épülő algoritmusok ismertetésében. Ez lényeges szempont, tekintve hogy a témakör irodalmában meglehetősen sokféle megközelitéssel találkozhatunk. A tárgyalásmódban lényeges szerepet kap a *Denavit-Hartenberg mátrixok*, illetve a homogén koordinátás leirások alkalmazása.

3. A dolgozat a tárgyalt manipulátorirányitó módszereket egy 6 csuklós manipulátorra (COROHAND) *adaptálja* és ismerteti a részben irodalmi forrásokon alapuló, részben a szerző által kifejlesztett konkrét, egymásra épülő és egységes manipulátorirányitó rendszert alkotó algoritmusokat, amelyek összességükben alapot adnak a számitógépes irányitó software elkészitéséhez.

4. A szerző *eljárást* dolgozott ki a kéz-koordináták csuklószögekké történő transzformálására (5.fejezet) a COROHAND esetében. Ezt az algoritmust *számitógépen* (R10) és *mikroszámitógépen* is (M6800) *implementálta*.

   Az eredmény egy mozgásszimulációs programcsomag segitségével vizsgálható. (8.fejezet)

5. A dolgozat összefüggéseket ismertet a *csuklószögek időbeli változásának approximációjára*, ami lehetővé teszi a csukló-hajtómotorok okozta fizikai korlátozások figyelembevételét. (6.fejezet)

6. A dolgozat uj problémaként veti fel a kéz-pozicionálással kapcsolatos *hibaszámitást*. A szerző által kidolgozott összefüggések leirják a csuklópozicionálás bizonytalanságának hatását a robotkéz állapotára, valamint a kéz pályájára előirt pontosság által előirt korlátokat a csuklók pozicionálási hibáira. (7.fejezet)

7. A dolgozat egységes keretbe foglalja a manipulátor *kinematika, dinamika* és *szabályozás* kérdését. Rendszerezi az irodalomban található különféle szabályozási módszereket és bemutatja a korábban felállitott modellek alkalmazását az egyes szabályozási megoldásokban. (lo fejezet)

Hangsulyos szerepet kap a *csuklókra* illetve a *kézre orientált* modellek és szabályozás szétválasztása, mivel ezek a problémakör megközelitésének két, alternativ lehetőségét képezik.(lo.fejezet)

I R O D A L O M

Albus,J.S.: A New Approach to Manipulator Control: The Cerebellar Model Articulation Controller /CMAC/, Trans. ASME, Sept. 1975

Ambler,A.P; R.J.Popplestone: Inferring the Positions of Bodies from Specified Spatial Relationships, Artifical Intelligence 6 /1975/

Báthor M.: MODBUIL - Kezelési utmutató, MTA-SzTAKI, 1978

Báthor M., Siegler A.: Grafikus modellező és mozgásszimulációs rendszer gépipari alkalmazásokhoz, COMPCONTROL, Sopron, 1979

Budó Á.: Mechanika, Tankönyvkiadó, 1965

Denavit,J., R.S.Hartenberg: Kinematic Synthesis of Linkages, Chapt.12, McGraw-Hill, 1964

Fock,K., Laczházi G., Antos G., Zilahi F.: Multicomponent force measurement for computer-aided control of intelligent robots, Proc. of the Int. Conf. on Artifical Intelligence and Information Control Systems of Robots, Smolenice, 198o

Hewitt, J.R.: Decoupled Feedback Control of Robot and Manipulator Arms, 3rd CISM-IFTOMN International Symp. on the Theory and Practice of Robots and Manipulators, Udine, Sept. 1978

Horn,B.K.P., H.Inoue: Kinematics of the MIT-AI-VICARM Manipulator, Working Paper 69, MIT-AI Laboratory, 1974

Horn,B.K.P., M.H.Raibert: Configuration Space Control, MIT-AI Memo No. 458, Dec. 1977

Konstantinov,M.S.: Inertia Forces of Robots and Manipulators, Mechanism and Machine Theory, 1977, pp.387-4o1

McCallion,H., P.D.Truong: On measuring errors in a placement task, The Industrial Robot, June 1977

Moe,M.L., J.T.Schwarz: Control of the Rancho Electric Arm - Proc. of the International Symp. on External Control of Human Extremities, Dubrovnik, Aug.1972

Nemes L., Siegler A.: Számitógéppel vezérelt kisérleti szerelőrobot, Automatizálás, 1978/2

Nevins,J.L., D.E.Whitney: Computer Controlled Assembly, Scientific American, Feb. 1978

Paul,R.: Modelling, trajectory calculation and servoing of a computer controlled arm, Stanford University Ph.D., 1972

Paul,R.: WAVE - A model based language for manipulator control, The Industrial Robot, March, 1977

Paul,R.: Cartesian Coordinate Control of Robots in Joint Coordinates, 3rd CISM-IFTOMM Int.Symp. on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Udine, 1978

Paul,R.: Manipulator Cartesian Path Control, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol.SMC-9, No.11, Nov.1979

Paul,R., J.Luh &al.: Advanced Industrial Robot Control Systems, First Report, Purdue University, TR-EE 78-25, May, 1978

Paul,R., J.Luh &al.:Advanced Industrial Robot Control Systems, Second Report, Purdue University, TR-EE 79-35, July 1979

Popplestone,R.J., A.P.Ambler, I.Bellos: RAPT - A Language for Describing Assemblies, The Industrial Robot, Sept. 1978

Renaud,M.: Automatic Equation Generation of Articulated Mechanisms, I.Yugoslav Symposium on Industrial Robots, Belgrad, 1977

Renaud,M., J.Zabala: Robot Manipulator Control, 9.ISIR,1979

Siegler,A.: Computer Controlled Object Manipulation, Proc. of the 2nd Hungarian Computer Science Conference, Budapest, 1977, pp. 724-737. /a/

Siegler A.: Manipulátor vezérlése R10 számitógéppel, I. Ipari Robot Kollokvium Előadásai, Kecskemét, 1977 /b/

Siegler,A.: Kinematics and microcomputer control of a 6 degree-of-freedom manipulator, Research Report, Cambridge University Engineering Department CUED-CMS 185/1979

Takase,K.: Task-oriented Variable Control of Manipulator and its Software Servoing System, Proc. of Conf. on Information Control Problems in Manufacturing Technology, Tokyo, 1977

Takase,K.: Skill of Intelligent Robot, IJCAI-79, Tokyo, 1979

Taylor,R.H.: The Synthesis of Manipulator Control Programs from Task-Level Specifications, Stanford University Ph.D. thesis, 1976

Udupa,S.M.: Collision Detection and Avoidance in Computer Controlled Manipulators, Ph.D.thesis, California Institute of Technology, Sept. 1976

Vámos,T., M.Báthor, L.Mérő: A Knowledge Based Robot Vision System, Proc. of the 6th IJCAI, Tokyo, 1979, pp. 92o-922

Vukobratovic,M.: Dynamics of Active Articulated Mechanisms and Synthesis of Artificial Motion, Mechanism and Machine Theory, 1978, pp. 1-18

Wingham,M.P.: Planning How to Grasp Objects in a Cluttered Environment, M.Sci. thesis, Edinburgh University, 1977

Whitney,D.E.: The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Dec. 1972

Zilahi F.: Egy intelligens robot szem-kar rendszer végrehajtó elemeinek mechanikai vizsgálata, Egyetemi doktori értekezés, BME, 1979

I.Ipari Robot Kollokvium Előadásai, Kecskemét, 1977

F Ü G G E L É K

A q_1, q_2, q_3 csuklószögek megengedett hibáinak számitása a kéz-állapot koordinátákra megadott türésekből

A kéz-állapot koordinátái: $\underline{s} = \{x_H, y_H, z_H, \alpha, \beta, \gamma\}$

A CSUKLÓ poziciója:

$$x_{cs} = x_H - D\cos\alpha \sin\beta$$

$$y_{cs} = y_H - D\sin\alpha \sin\beta$$

$$z_{cs} = z_H - D\cos\beta \qquad \text{(ld.5.2.pont)}$$

A továbbiakban kihasználjuk, hogy valamely u szögfüggvényre:

$$\frac{d \arctan u}{du} = \frac{1}{1+u^2}, \quad \frac{d \arccos u}{du} = \frac{1}{1-u^2}, \quad \frac{d \arcsin u}{du} = \frac{1}{1-u^2}$$

1. *A q_1 szög hibáinak összetevői*

(5.11.) felhasználásával:

$$\frac{\partial q_1}{\partial x_H} = - \frac{y_H - D\sin\alpha \sin\beta}{(x_H - D\cos\alpha \sin\beta)^2 + (y_H - D\sin\alpha \sin\beta)^2} = - \frac{y_{cs}}{x_{cs}^2 + y_{cs}^2}$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial y_H} = \frac{x_H - D\cos\alpha \sin\beta}{(x_H - D\cos\alpha \sin\beta)^2 + (y_H - D\sin\alpha \sin\beta)^2} = \frac{x_{cs}}{x_{cs}^2 + y_{cs}^2}$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial z_H} = \emptyset$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial \alpha} = - \frac{x_{cs} \cos\alpha + y_{cs} \sin\alpha}{x_{cs}^2 + y_{cs}^2} D \sin\beta$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial \beta} = \frac{y_{cs} \cos\alpha - x_{cs} \sin\alpha}{x_{cs}^2 + y_{cs}^2}$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial \gamma} = \emptyset$$

2. *A q_3 szög hibáinak összetevői:*

Először q_3 hibáját számoljuk, mivel q_2 hibájának kiszámitásához a kapott parciálisokat felhasználjuk.
(5.19)-ből indulunk ki, az 5.3. pontban bevezetett jelöléseket használjuk.

$$\frac{\partial q_3}{\partial x_H} = - \frac{1}{BC} \frac{x_H - D\cos\alpha \sin\beta}{\sin q_3} = \frac{1}{BC} \frac{x_{cs}}{\sin q_3}$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial y_H} = - \frac{1}{BC} \frac{y_H - D\sin\alpha \sin\beta}{\sin q_3} = \frac{1}{BC} \frac{y_{cs}}{\sin q_3}$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial z_H} = - \frac{1}{BC} \frac{z_H - A - D\cos\beta}{\sin q_3} = - \frac{1}{BC} \frac{z_{cs}}{\sin q_3}$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial \alpha} = - \frac{D\sin}{BC \sin q_3} (x_H \sin\alpha - y_H \cos\alpha)$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial \beta} = \frac{D}{BC \sin q_3} [(x_H \cos\alpha + y_H \sin\alpha) \cos\beta - (z_H - A) \sin\beta]$$

$$\frac{\partial q_3}{\partial \gamma} = \emptyset$$

3. *A q_2 szög hibáinak összetevői:*

(5.28)-ból indulunk ki és először q_2-nek egy tetszőleges $\underline{s}$ kéz-állapot koordinátáival vett parciálisát határozzuk meg. A számitás eredménye:

$$\frac{\partial q_2}{\partial s_i} = k_1\left\{ k_2 \frac{\partial K}{\partial s_i} + k_3 \frac{\partial q_3}{\partial s_i} + k_4 \frac{\partial L}{\partial s_i} \right\} \qquad i = 1,\ldots,6$$

ahol

$$k_1 = \frac{1}{\cos q_2(B^2 + C^2 + 2BC \cos q_3)}$$

$$k_2 = B + C \cos q_3$$

$$k_3 = (CK \sin q_3 - 2BC \sin q_2 \sin q_3 + CL \cos q_3)$$

$$k_4 = - C \sin q_3$$

ezek felhasználásával:

$$\frac{\partial q_2}{\partial x_H} = k_1\left\{ k_2\left(\frac{1}{K} + k_3 \frac{x_{cs}}{BC \sin q_3}\right)\right\}$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial y_H} = k_1\left\{ k_2\left(\frac{1}{K} + k_3 \frac{y_{cs}}{BC \sin q_3}\right)\right\}$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial z_H} = k_1\left\{ k_3 \frac{z_{cs}}{BC \sin q_3} + k_4\right\}$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial \alpha} = k_1 \left\{ k_2 \frac{D\sin\beta}{K} (\sin\alpha - \cos\alpha) + k_3 \frac{D}{BC \sin q_3} (x_H \sin\alpha - y_H \cos\alpha)\sin\beta \right\}$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial \beta} = k_1 \left\{ -k_2 \frac{D\cos\beta}{K} (\sin\alpha + \cos\alpha) - k_3 \frac{}{BC \sin q_3} [(x_H \cos\alpha + y_H \sin\alpha)\cos\beta - \right.$$

$$\left. -(z_H - A) \sin\beta] + k_4 C \sin\beta \right\}$$

$$\frac{\partial q_2}{\partial \gamma} = \emptyset$$

A TANULMÁNYOK sorozatban 1979-ben megjelentek:

88/1979 Renner G. - Gaál B. - Hermann Gy. - Horváth L. - Várady T.: Szoborszerü felületek tervezése és megmunkálása

89/1979 Ruda Mihály: A SIS77 statisztikai információs rendszer /a felhasznált számitástechnikai eszközök, a rendszer szerkezete és programjai/

90/1979 Bányász Cs. - Keviczky L.: Optimum Insensitivity of the Linear-continuous Transformation

91/1979 Téli iskola /Szentendre/

92/1979 Bolla M. - Csáki P. - Fischer J. - Herodek S. - Hoffman Gy. - Kutas T. - Telegdi L. - Wittmann I.: A balatoni ökoszisztéma modellezése

93/1979 Andor László: Kisgépes adatbázis kezelő rendszer

94/1979 Gertler János: Egy statisztikus szürési eljárás számitógépes folyamatirányitásához

95/1979 Báthory M. - Galló V. - Kovács E. - Mérő L. - Siegler A. - Vajta L.: Festőrobot vezérlésére alkalmas alafelsimerési berendezés

96/1979 Mérő László: Konturkeresés zajos digitalizát képekben

97/1979 Pásztorné - Matavovszky T.: Boole-függvény kezelőrendszer

98/1979 Kecskés Zsuzsa: Három dimenziós tárgyak drótvázának ábrázolása vonalrajzoló grafikus berendezésekkel

99/1979 Ivics József: KGST Riga

100/1979 Téli iskola

<u>1980-ban jelentek meg:</u>

101/1980 Gerencsér László - Hangos Katalin: Diszkrét lineáris sztochasztikus rendszerek önhangoló szabályozása

102/1980 Pásztorné Varga Katalin: Rekurziv eljárás

103/1980 Gerencsér Piroska - Szép Endre - Zilahy Ferenc Marton Zsolt: Robotmegfogók adaptivitása I.

104/1980 Knuth Előd - Radó Péter - Tóth Árpád: Az SDLA előzetes ismertetése

105/1980 E. Knuth - P. Radó - Á. Tóth: Preliminary description of SDLA

106/1980 Prékopa András: Sztochasztikus programozási modellek és alkalmazásuk

107/1980 Kelle Péter: Megbizhatósági készletmodellek és alkalmazásuk

108/1980 Almásy Gedeon: Mérlegegyenletek és mérési hibák

109/1980 Békéssy A. - Demetrovics J. - Gyepesi Gy.: Relációs adatbázis logikai szintü vizsgálata funkcionális függőségek szepontjából

110/1980 Gaál A. - Soltész J. - Ruda M. - Ratkó I.: Tanulmányok a statisztikai adatfeldolgzásról

111/1980 Benedikt Szvetlána: Nem ismételhető döntéshozatal analizise kockázattal járó esetekben

112/1980 Verebély Pál: Többprocesszoros, osztott intelligenciáju grafikus rendszerek tervezési és megvalósitási kérdései