(19)



SUOMI - FINLAND
(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS
PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN
FINNISH PATENT AND REGISTRATION OFFICE

(10) **FI 891876 A7**

(12) **JULKISEKSI TULLUT PATENTTIHAKEMUS**
PATENTANSÖKAN SOM BLIVIT OFFENTLIG
PATENT APPLICATION MADE AVAILABLE TO THE PUBLIC

(21) Patenttihakemus - Patentansökan - Patent application 891876

(51) Kansainvälinen patenttiluokitus - Internationell patentklassifikation - International patent classification
B25J 9/00

(22) Tekemispäivä - Ingivningsdag - Filing date **19.04.1989**

(23) Saapumispäivä - Ankomstdag - Reception date **19.04.1989**

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig - Available to the public **21.10.1989**

(43) Julkaisupäivä - Publiceringsdag - Publication date **12.06.2019**

(32) (33) (31) Etuoikeus - Prioritet - Priority

20.04.1988 US 184107

(71) Hakija - Sökande - Applicant

1 •**University of British Columbia,** 2075 Wesbrook Mall Vancouver, B.C. V6T 1W5, Canada, KANADA, (CA)

(72) Keksijä - Uppfinnare - Inventor

1 •**Chan, Stephen Kwok Chung,** Canada, KANADA, (CA)
2 •**Lawrence, Peter Donald,** Canada, KANADA, (CA)

(74) Asiamies - Ombud - Agent

Berggren Oy Ab, Antinkatu 3 C, 00100 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning - Title of the invention
Robotin nivelvarren ohjaus
Styrning av robotledarm

Robotin nivelvarren ohjaus

Esillä oleva keksintö liittyy nivelvarren ohjaukseen. Täsmällisemmin esillä oleva keksintö liittyy ohjausjärjestelmään nivelvarren käyttämiseksi tai liikuttamiseksi pehmeämmin, joka perustuu muuttuvan vaimennuskertoimen soveltamiseen pseudokäänteiseen Jacobin ratkaisuun, joka määrää nivelkulmien muutoksen jokaiselle nivelvarren nivelelle, jolloin vaimennuskerrointa muutetaan valitun kohteen etäisyyteen perustuen.

Yleisesti, kun nivelvartta ohjataan käyttämällä käsiohjausta tai jonkin muun tyyppistä ohjausta, komento syötetään ohjaustietokoneelle, joka määrää, että vartta on siirrettävä tietyllä tavalla, ts. tietyn matkan tietyllä nopeudella tiettyyn suuntaan. Näiden komentojen on ilmeisesti saatettava varren valittu päätepiste siirtymään valittua kohdetta kohti. Ohjauksen syöttötietona on siten normaalisti varren päätepisteen siirtäminen määrätyn matkan (valittuna aikana) valittuun suuntaan. Näitä käskyjä on muunnettava varren liikkuessa asettelemalla kunkin nivelen kulmia ja nivelkulma on määrättävä kullekin nivelistä, joita on aseteltava liikkeen aikaansaamiseksi.

Termiä nivelavaruus käytetään tavallisesti kunkin nivelen kulma-asentojen alueen määrittelemiseksi ja työavaruus määrittelee varren valitun päätepisteen asentojen alueen avaruudessa.

Muunnos nivelavaruudesta työavaruuteen on yksinkertainen. Kinemaattisille eteenpäinmuunnoksille voidaan helposti johtaa joukko suljetussa muodossa esitettäviä yhtälöitä.

$$p = f(\theta) \qquad (1)$$

jossa p = työavaruusvektori
θ = nivelavaruusvektori

Yleinen menetelmä kinemaattisen eteenpäinmuunnoksen johtamiseksi on yleisesti tunnettu. Manipulaattorin tai nivelvarren ohjaamiseksi tarvitaan tarkka muunnos työavaruudesta nivelavaruuteen eli käänteinen kinemaattinen muunnos.

$$\theta = f^{-1}(p) \qquad (2)$$

Yksinkertaiset suljetussa muodossa esitetyt käänteiset kinemaattiset yhtälöt ovat mahdollisia vain rajoitetulle lukumäärälle varsikonstruktioita ja yhtälöt ovat tarkkoja vain erikoistapausten ulkopuolella, ts. työavaruuden suuren ohjattavuuden alueessa. Erikoistapaukset tai erikoispisteet ovat määrätyn kohdeaseman vaihtoehtoisten nivelratkaisujen välisiä raja-alueita ja erikoisalueen läheisyydessä on yleisesti useita lähekkäisiä ratkaisuja.

Käytännöllisesti katsoen kaikissa sovelluksissa muunnos työavaruudesta nivelavaruuteen on tehtävä tehokkaasti ohjatun varren tai manipulaattorin reaaliaikaisen toiminnan mahdollistamiseksi.

Eräs hyvin tunnettu menetelmä käänteisten kinemaattisten ongelmien ratkaisemiseksi on Jacobin matriisiin perustuvan iteratiivisen menetelmän käyttäminen. Iteraatiomenettelyä voidaan käyttää niiden nivelavaruusarvojen estimoimiseksi, jotka tarvitaan manipulaattorin asettamiseksi työavaruuden pisteeseen (kohteeseen). Tärkeitä muuttujia näissä ratkaisuissa ovat nivelavaruuden lähtöarvot ja nivelkorjausten suunta ja suuruus.

Jacobin matriisi on erilaisten nivelavaruuden muutosten ja erilaisten työavaruuden muutosten välinen lineaarinen riippuvuus

$$J(\theta)\delta\theta = \delta p \qquad (3)$$

jossa:

$$J(\theta) = \delta f(\theta)/\delta\theta \qquad (4)$$

Jacobin matriisin laskemiseksi mielivaltaiselle manipulaattorille tunnetaan yleisiä menetelmiä ja tämä Jacobin matriisi käännetään työavaruuden differentiaalisten muutosten muuntamiseksi nivelavaruuden muutoksiksi.

Yhtälöryhmä (3) voidaan myös ratkaista käyttämällä Gaussin eliminointimenetelmää nivelkorjausten saamiseksi.

Jacobin matriisi antaa tavallisesti hyvän estimaatin työavaruusvirheiden minimoimiseksi tarvittaville nivelkorjauksille, mutta ongelmia syntyy, kun manipulaattori on lähellä erikoispistettä tai kun Jacobin matriisi ei ole neliömäinen.

Jacobin matriisin kääntäminen ei ole mahdollista erikoispisteessä, koska Jacobin matriisin determinantti on nolla tässä pisteessä. Erikoispisteiden lähellä pienet muutokset työavaruudessa edellyttävät suuria nivelmuutoksia ja käänteisen Jacobin matriisin määräämät nivelkorjaukset tulevat erittäin suuriksi ja sisältävät suuria virheitä. Ts. Jacobin algoritmien käyttö erikoispisteiden lähellä aiheuttaa varren huomattavaa epästabiiliutta.

Tämän ongelman ratkaisuyritykset ovat perustuneet Jacobin matriisin pseudokäänteismatriisin käyttöön. Pseudokäänteismatriisi on erityisen käyttökelpoinen, kun Jacobin matriisi ei ole neliömäinen. Yleisen pseudokäänteismatriisin antaa kaava:

$$J^{+}(\theta) = (J^{T}(\theta)J(\theta))^{-1}J^{T}(\theta) \qquad (5)$$

Tapauksessa, jossa Jacobin matriisin asteluku on pienempi kuin tietyn manipuloidun varren pään toimielimen vapausasteiden lukumäärä, yhtälön (3) ratkaisu minimoi ratkaisun pienimmän neliösumman tarkoittamassa merkityksessä.

$$||J(\theta)\delta\theta - \delta p|| \qquad (6)$$

Pseudokäänteismatriisia ei tarvitse johtaa eksplisiittisesti. Yhtälöryhmä, jonka määrää:

$$(J^T(\theta)J(\theta))\delta\theta = J^T(\theta)\delta p \qquad (7)$$

voidaan ratkaista $\delta\theta$:n suhteen vähemmillä toimituksilla käyttämällä Gaussin eliminointimenetelmää.

Jos Jacobin matriisi on symmetrinen, laskettavien toimitusten lukumäärää voidaan vähentää, esim. Jacobin matriisin n x n tapauksessa $J^T(\theta)J(\theta)$ vaatii erästä (seuraavassa selitettyä Wamplerin) menetelmää käytettäessä $(n^3 - n^2)/2$ kertolaskua ja $(n^3 - n^2)/2$ yhteenlaskua. Asentovirheiden kertominen Jacobin matriisin muunnoksella vaatii n^2 kertolaskua ja $(n^2 - n)$ yhteenlaskua. Kuuden vapausasteen manipulaattorin tapauksessa yhtälön ratkaisemiseksi tarvitaan noin 162 kertolaskua ja 120 yhteenlaskua.

Redundanttien manipulaattorien tapauksessa on ehdotettu käytettäväksi vaihtoehtoista formulointia, jossa matriisin $J(\theta)$ pseudokäänteismatriisia $J^+(\theta)$ varten tarvitaan vähemmän laskentatoimituksia.

$$J^+(\theta) = J^T(\theta)(J(\theta)J^T(\theta))^{-1} \qquad (8)$$

Kuten edellä on mainittu, pseudokäänteismatriisi ei ole olemassa, jos matriisin $J(\theta)J^T(\theta)$ determinantti on nolla, mikä tekee järjestelmän toimimattomaksi erikoispisteissä.

Useita algoritmeja, jotka käyttävät pseudokäänteismatriisimenetelmää redundanteille ja ei-redundanteille manipulaattoreille, on testattu moninivelisten (noin 7 niveleen asti) manipulaattorien käänteiskinematiikan ratkaisemiseksi, mutta nämä ratkaisut eivät esitä, kuinka erikoispisteessä tai sen lähellä ilmenevät ongelmat olisi hoidettava.

On myös ehdotettu pseudokäänteismenetelmää käyttäen saadun nivelkorjauksen suuruuden muuttamista iteratiivisesti, jos nivelkorjaus ei siirrä manipulaattoria lähemmäksi kohdetta, sekä toisen iteraatiotason käyttämistä nivelkorjauksen oikean suuruuden ratkaisemiseksi. Nämä ratkaisut eivät kuitenkaan ole riittävän tehokkaita reaaliaikaista toteutusta varten ja lisäksi oletus, että suunta on oikea, saattaa olla virheellinen erikoispisteen tapauksessa, koska Jacobin matriisi muuttuu paljon nivelavaruuden pienillä muutoksilla.

Eräässä toisessa ratkaisussa, jonka C.W. Wampler II on esittänyt artikkelissa "Manipulator Inverse Kinematic Solutions Based on Vector Formulation and Damped Least Squares Method", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-16, No. 1, January/February 1986, s. 93-101, nivelavaruuslaskutoimitukset stabiloidaan vaimentamalla differentiaalisia nivelmuutoksia seuraavalla tavalla:

$$\begin{bmatrix} J(\theta) \\ KI \end{bmatrix} \delta\theta = \begin{bmatrix} \delta p \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (9)$$

jossa: I = yksikkömatriisi
K = vaimennuskertoimen k neliöjuuri

Tämän edellä määritellyn yhtälöryhmän pseudokäänteismatriisissa neliömäisen tulomatriisin lävistäjäelementteihin on lisätty vakiokerroin k.

$$J^{+}(\theta) = (J^{T}(\theta)J(\theta) + kI)^{-1}J^{T}(\theta) \qquad (10)$$

Tästä pseudokäänteismatriisin muunnoksesta on tuloksena yksikäsitteisesti määritelty matriisi, joka on varmasti käännettävissä.

Wampler on myös ehdottanut käytettäväksi kiinteää vaimennuskerrointa ja että tämä vaimennusvakio valittaisiin siten, että se varmistaa stabiiliuden erikoispisteissä tai niiden

lähellä sekä ulottumattomissa olevien kohteiden tapauksessa. Tämä vaimennus asettaa rajoituksia virheiden suuruudelle sekä ratkaisun koolle. Vaimennus vastaa seuraavan funktion minimointia.

$$||J(\theta)\delta\theta - \delta p||^2 + k||\delta\theta||^2 \qquad (11)$$

Vaimennuskertoimen vaikutuksesta pseudokäänteismatriisin arvo lähestyy erikoispisteiden lähellä nollaa äärettömän sijasta. Vaimennus pitää nivelkorjaukset äärellisissä arvoissa, mutta se merkitsee kompromissia stabiiliuden ja yhtälöiden (3) nivelkorjausten ratkaisun virheen välillä. Stabiiliuden saavuttamiseksi vaimennusarvo valitaan ajatellen manipulaattorin toimintaa erikoispisteen lähellä, mutta mentäessä etäisyyden päähän erikoispisteestä tämä vaimennuskerroin ei ole tehokas.

Wampler valitsi stabiiliuden aikaansaamiseksi suuren vaimennuskertoimen siten, että se ohjasi nivelkorjaukset nollaan ulottumattomissa olevien kohteiden tapauksessa. Kuitenkin suurella vaimennusvakiolla manipulaattori ei kykene saavuttamaan erikoispisteiden lähellä olevia paikkoja, nivelkorjaukset lähestyvät erikoispisteiden lähellä olevien kohdepaikkojen tapauksessa nollaa liian nopeasti, jotta manipulaattori voisi saavuttaa nämä kohteet. Kiinteä vaimennusvakio on myös tehoton erikoispisteiden lähellä olevien kohteiden tapauksessa, koska nivelkorjaukset ovat erittäin pieniä ja suppenevat ratkaisua kohti erittäin hitaasti.

Tämä ongelma on ehdotettu ratkaistavaksi käyttämällä muuttuvan vaimennuksen menetelmää, joka antaa kompromissin yhtälön (6) virheen suuruuden ja käyttökelpoisten nivelkorjausten saavuttamisen välillä (ks. Y. Nakamura, "Kinematic Studies on the Trajectory Control of Robotic Manipulators", Ph.D Thesis, Automation Research Laboratory, Kyoto University, kesäkuu 1986). Tätä muunnettua pseudokäänteismatriisia kutsutaan alalla SR-(singular robust)-käänteismatriisiksi. Kaukana erikoispisteissä olevissa paikoissa ei tarvita

vaimennusta ja kun manipulaattori lähestyy erikoispistettä, vaimennusta lisätään. Manipulaattorin ohjattavuus lasketaan määräämällä sen läheisyys erikoispisteeseen. Laskennan määrä, joka tarvitaan erikoispisteen läheisyyden määräämiseksi, voi olla erittäin suuri. Ohjattavuuden arviointia käyttävä menetelmä vaatii kertaluokkaa n^3 olevan määrän toimituksia, jolloin n on manipulaattorin vapausasteiden lukumäärä.

Samoin kuin kiinteää vaimennusta käyttävässä menetelmässä, SR-käänteismenetelmässä vaimennusarvot ovat verrattain suuria erikoispisteiden lähellä, joten liike erikoispisteiden lähellä on rajoitettua.

Virhe SR-tekniikassa on edelleen erittäin suuri erikoispisteiden lähellä. Muuttuvaa vaimennusta käyttävässä ratkaisussa stabiilius saavuttamattomien paikkojen tapauksessa, joka on mahdollista kiinteään vaimennukseen perustuvaa menetelmää käytettäessä, menetetään, jos käytetään pientä vaimennusarvoa, kuten normaalisti on asianlaita suurella ohjattavuusalueella. Muuttuvan vaimennuskertoimen tarkoituksena on varmistaa, että pseudokäänteismatriisi on käännettävissä kuitenkaan estämättä toimintaa erikoispisteiden ympäristössä. Tarkkuuden saavuttaminen erikoispisteiden lähellä olevissa asemissa ei ole mahdollista.

Esillä olevan keksinnön tarkoitus on saada aikaan sellainen ohjausjärjestelmä nivelvartta varten, joka on tehokas sekä erikoispisteiden lähellä että suuren ohjattavuuden alueella.

Pääpiirteissään esillä oleva keksintö kohdistuu menetelmään nivelvarren liikkeen ohjaamiseksi, johon sisältyy komennon antaminen ohjaustietokoneelle kohteen määrittelemiseksi varren päätepisteelle, iteratiivisen pseudokäänteisen Jacobin matriisin käyttäminen, jolla on vaimennuskerroin, muutoksen määrän määräämiseksi mainitun varren kullekin nivelelle, vaimennuskertoimen suuruuden asetteleminen kullekin iteraatiolle päätepisteen ja kohteen välisen etäisyyden

mukaan, mainitun varren mainittujen nivelten kulmien asettele-minen määrättyjen kulmien mukaan käyttämällä iteraatioiden lukumäärää, joka on alueella 1-20.

Nivelkulmat asetellaan edullisimmin jokaisen iteraation jälkeen.

Vaimennuskerroin asetellaan edullisimmin yhtälön

$$k_3 = k||\delta p||^x \qquad (12)$$

mukaan, jossa:
k_3 = aseteltu vaimennuskerroin
k = valittu vakio, joka on alueella (0,001 - 1) kertaa nivelvarren kokonaispituus metreissä,
$||\delta p||$ = päätepisteen ja kohteen välinen etäisyys kunkin iteraation jälkeen
x = ennalta valittu luku välillä 1-3.

Täsmällisemmin esitettynä esillä oleva keksintö kohdistuu menetelmään nivelvarren toiminnan ohjaamiseksi varren toimin-nan parantamiseksi erikoispisteiden lähellä tai suuren ohjattavuuden alueilla, johon menetelmään sisältyy komennon antaminen tietokoneohjaukselle mainitun nivelvarren päätepisteen siirtämiseksi valitun etäisyyden valittuun suuntaan määrätyssä ajassa kohteeseen siirtymiseksi ja jossa varressa on aseteltavat nivelkulmat, joita on muutettava halutun liikkeen saavuttamiseksi, nivelkulmien määrääminen mainituille nivelille mainitun päätepisteen siirtämiseksi mainittua kohdetta kohti käyttämällä iteratiivista ratkaisua, joka perustuu pseudokäänteiseen Jacobin matriisiin kaavan

$$J^+(\theta) = (J^T(\theta)J(\theta) + k_3 I)^{-1}J^T(\theta) \qquad (13)$$

mukaan, jossa
I = yksikkömatriisi
k_3 = muuttuva vaimennuskerroin, jonka määrää yhtälö

$$k_3 = k||\delta p||^x \qquad (12)$$

jossa:
k = ennalta valittu luku, joka on valittu alueelta 0,001-1 kertaa varren kokonaispituus metreissä
$||\delta p||$ = päätepisteen ja kohteen välinen etäisyys kunkin iteraation jälkeen,
x = luku, joka on valittu väliltä 1-3,

arvon k_3 asetteleminen kutakin iteraatiota varten ja nivelkulmien asetteleminen varren siirtämiseksi kohdetta kohti alueella 1-20 olevan iteraatioiden lukumäärän jälkeen.

Nivelkulmia asetellaan edullisimmin varren siirtämiseksi kohdetta kohti jokaisen iteraation jälkeen ja edullisimmin x = 2.

Muut piirteet, tavoitteet ja edut ilmenevät seuraavasta esillä olevan keksinnön edullisten suoritusmuotojen yksityiskohtaisesta selityksestä tarkasteltuna oheisten piirustusten yhteydessä, joissa

kuvio 1 on kaaviollinen esitys nivelvarresta, jota voidaan ohjata esillä olevalla keksinnöllä,
kuvio 2 esittää monimutkaisempaa järjestelyä, johon sisältyy useampia vapausasteita ja jota voidaan ohjata käyttämällä keksintöä,
kuviot 3, 4, 5 ja 6 ovat kaavioita esillä olevan keksinnön toiminnan vertaamiseksi muihin vaimennuskertoimia käyttäviin pseudokäänteisiin Jacobin menetelmiin.

Manipulaattoria, kuten nivelvartta, käytettäessä ohjataan yleensä ohjaussauvaa tai vastaavaa, kuten kuviossa 1 viitenumerolla 10 esitettyä ohjaussauvaa, ohjaussignaalin antamiseksi tietokoneelle 12, joka ohjaa varren nivelten kulmasiirtymiä. Esitetyssä järjestelyssä tietokone 12 ohjaa toimielimiä 14 ja 16, jotka asettavat kulmat A ja vastaavasti B. Kulma A on varren ensimmäisen osan 18 ja vertailusuo-

ran 20 välinen kulma ja kulma B on varren osan 18 pituusakselin jatkeen ja varren osan 22 pituusakselin välinen kulma.

Ohjaussauvan 10 siirtymä määrää kohteen, johon varren osan 22 vapaassa päässä oleva päätepiste 24 on siirrettävä.

On luonnollisesti myös mahdollista, että työavaruuden asennonohjaussignaalit on kehitetty tietokoneella käyttäen robotin tiensuunnittelujärjestelmää ohjaussauvalla kehitettyjen sijasta.

Haluttaessa esillä olevan keksinnön sisältävään varteen voidaan saada lisää vapausasteita lisäämällä muita niveliä ja työlaite- tai varsiosia, kuten nivel 26 ja varsiosa 28 ja nivel 30 ja varsiosa 32 kuviossa 2 esitetyllä tavalla. Tässä järjestelyssä nivelvarren päätepiste on esitetty viitenumerolla 34 ja se sijaitsee pidennysvarsiosan 32 vapaassa päässä. Tässä tapauksessa myös lisäkulmia C ja D ohjataan varsiosien 22 ja 28 välisen kulman ja varsiosan 32 nivelen 30 akselin 36 ympäri tapahtuvan rotaation asettelemiseksi. Toimielimiä näiden kulmien asettelemiseksi ei ole esitetty kuviossa 2, mutta mitä tahansa sopivaa toimielintä voidaan käyttää.

Esillä olevan keksinnön havainnollistamiseksi ja selittämiseksi käytetään esimerkkinä kuviossa 1 esitettyä yksinkertaisempaa järjestelyä.

Alkuasennon ja ohjaussauvan 10 asettaman kohdeasennon välinen virhe voidaan määritellä joko nivelavaruudessa tai työavaruudessa. Ohjaussauva asettaa virheen työavaruudessa ja se vastaa karkeasti virhettä nivelavaruudessa. Virhe on tällöin määrä, jonka varren on siirryttävä tai nivelkulman on muututtava ohjaussauvan asettaman kohteen saavuttamiseksi.

Esillä olevassa keksinnössä käytetään pseudokäänteismatriisia nivelkulman θ määräämiseksi kullekin nivelkulmalle seuraavan kaavan mukaan

$$J^{+}(\theta) = (J^{T}(\theta)J(\theta) + k_3 I)^{-1}J^{T}(\theta) \qquad (13)$$
$$\delta\theta = J^{+}(\theta)\delta p$$

Esillä olevassa keksinnössä vaimennuskerrointa muutetaan päätepisteen ja kohdeaseman välisen työavaruusvirheen suuruuden mukaisesti pseudokäänteismatriisin kullakin iteraatiolla. Virhe vaimennetun pseudokäänteismatriisin (EDP) vaimennuskerroin vaihtelee siten seuraavan kaavan mukaan

$$k_3 = k||\delta p||^{x} \qquad (12)$$

jossa:
k_3= muutettava vaimennuskerroin
k = valittu vakio, joka on alueella (0,001-1) kertaa nivelvarren kokonaispituus metreissä
$||\delta p||$ = päätepisteen ja kohteen välinen etäisyys kunkin iteraation jälkeen,
x = ennalta valittu luku välillä 1-3.

Yleisesti arvot k ja x määrätään suorittamalla näytelaskennat mielivaltaiselle valitulle varrelle edullisimman lähdön saamiseksi. Yksinkertaiselle kaksiosaiselle varrelle arvot k = 1 ja x = 2 ovat osoittautuneet erittäin tyydyttäviksi 2 metrin pituiselle varrelle. Yleisesti arvo k on sitä pienempi mitä suurempi varren monimutkaisuus on. Pieni x:n arvo esim. 1 on käyttökelpoinen 2 tai 3 varsiosan varsien tapauksessa, mutta normaalisti x on suurempi erikoisesti monimutkaisemmilla varsilla. Suuri x:n arvo voi joissakin tapauksissa aiheuttaa varren ylityksiä tai värähtelyä ja siten edullisimpana pidetään x:n arvoa noin 2.

Kuten edellä on selitetty, Jacobin matriisi antaa tavallisesti erittäin hyvän estimaatin vaaditulle korjaukselle, kun nivelmuutokset ovat pieniä, ja se on riittävä jopa erikoispisteiden lähellä hyvin pienille nivelmuutoksille. Kuitenkin kun vaaditut nivelmuutokset ovat suuria, nivelkorjausten on oltava konservatiivisia ylityksien ja värähtelyjen vält-

tämiseksi kohdepistettä tavoiteltaessa. Siten kun nivelmuutokset ovat erittäin pieniä, tavanomainen Jacobin matriisi näyttää toimivan tyydyttävästi, mutta monissa tapauksissa ohjaussauvaa käsitellään siten, että tuloksena on suhteellisen suuria työavaruuden muutoksia, jotka vuorostaan edellyttävät useimmissa tapauksissa suuria nivelavaruuden muutoksia. Siten, kuten edellä on esitetty, kun nivelmuutoksen on oltava suuri, nivelmuutoksen suhteen on oltava konservatiivisempi ylityksen ja värähtelyjen välttämiseksi, joita esiintyisi käytettäessä pelkästään käänteistä Jacobin menetelmää. Tämä on vielä tärkeämpää erikoispisteiden lähellä, missä jopa pienet nivel- tai työavaruusmuutokset voivat aiheuttaa suuria nivelkorjauksia pelkkää käänteistä Jacobin menetelmää käytettäessä. Vaimennuksen käyttäminen lieventää tätä ongelmaa.

Edellä esitetyn ohjeen seuraaminen ja vaimennuskertoimen muuttaminen päätepisteen sijainnin ja kohteen sijainnin välisen etäisyyden tai niiden välisen tarvittavan korjauksen mukaan tai funktiona aiheuttaa vaimennuskertoimen vaihtelemisen työavaruusvirheeseen perustuen, ts. vaimennuskerroin vaihtelee suoraan työavaruusvirheen mukana ja on suurempi suuremman työavaruusvirheen tapauksessa riippumatta siitä onko kohteen sijainti suuren ohjattavuuden alueella vai lähellä erikoispistettä.

Vaimennusarvon muuttaminen erikoispisteen lähellä päätepisteen ja kohteen välisen etäisyyden mukaan pienentää vaimennusarvoa työavaruusvirheen pienentyessä, mikä suurentaa suppenemisnopeutta ja varmistaa, että päätepiste saavuttaa kohteen mahdollisimman pienillä värähtelyillä samalla säilyttäen minimivaimennusarvon erikoispisteessä käännettävyyden varmistamiseksi.

Suuren ohjattavuuden alueella pseudokäänteismatriisi antaa hyvän estimaatin vaadittaville nivelmuutoksille, jos kuten edellä on todettu, nivelmuutokset ovat pieniä. Suurilla nivelmuutoksilla tai työavaruusmuutoksilla pseudokäänteis-

matriisi antaa erittäin suuria nivelkorjauksia, jotka johtavat kohteen ylitykseen ja manipulaattorin värähtelyyn. Esillä olevassa keksinnössä ylitys pienenee ja useimmissa tapauksissa poistuu suurilla työavaruusmuutoksilla suuren ohjattavuuden alueella siten, että vaimennusarvoa muutetaan vaaditun työavaruusmuutoksen, ts. päätepisteen ja ohjaussauvan määräämän kohteen välisen etäisyyden mukaan.

Erikoispisteiden lähellä olevien kohdepisteiden osalta voidaan toistaa, että tällaiset kohteet voidaan saavuttaa määritellyllä tarkkuudella, nivelkorjaukset eivät mene nollaan liian nopeasti erikoispistekohteiden lähellä, koska vaimennuskerroin pienenee manipulaattorin siirtyessä lähemmäksi kohdetta. Joissakin tapauksissa kun tullaan erittäin lähelle erikoispistettä, voi esiintyä vaikeuksia, kun tietyn kohderatkaisun vaihtoehtoisten nivelratkaisujen väliset rajat ovat lähekkäin ja useita ratkaisuja voi olla lähekkäin erikoispisteiden lähellä ja manipulaattori voi pyrkiä siirtymään ratkaisusta toiseen.

Toiminnan parantamiseksi erikoispisteen lähellä saattaa olla toivottavaa siirtää aloitusasemaa tai nivelavaruuden arvojen aloitusestimaattia keinotekoisesti etäisyyden päähän erikoispisteestä siten, että nykyinen ratkaisu on nivelavaruudessa lähempänä kuin vaihtoehtoinen ratkaisu.

Eräänä toisena menetelmänä voi yksinkertaisesti olla tehdä tietyt nivelrajansa saavuttaneet nivelet liikkumattomiksi. Liikkumattomaksi tehdyn nivelen nivelkorjaukset tulevat nolliksi, jos Jacobin matriisin tätä niveltä vastaava sarake asetetaan nollaksi. Tämän kyseisen nivelen osuus asentovirheen poistamisessa tulee tällöin nollaksi.

Joka tapauksessa esillä olevan virhevaimennettuun pseudokäänteismatriisiin perustuvan keksinnön käyttäminen johtaa varren haluttuun kohteeseen nopeammin ja vähemmillä värähtelyillä.

Myös ulottumattomissa olevalla alueella, ts. varren ulottuvuuden ulkopuolella, jossa manipulaattori asettuu yksinkertaisesti siten, että se minimoi asentovirheen, esillä olevan keksinnön virhevaimennetun pseudokäänteisratkaisun käyttäminen parantaa huomattavasti toimintaa, koska varsi osoittaa saavuttamattomaan asentoon.

Varren asennon tosiasiallinen korjaus, ts. toimielinten 14 ja 16 aktivointi, tapahtuu esillä olevaa keksintöä käytettäessä edullisimmin välittömästi kunkin iteraation jälkeen. Tämä on käytännöllistä esillä olevan keksinnön tapauksessa, koska muunnettu vaimennuskerroin rajoittaa jopa suurten korjausten tapauksessa virheen ja johtaa varren suoremmin kohteeseen. On myös ilmeistä, että haluttaessa voidaan kerätä useiden iterointien, esim. jopa 20 iteraation tulokset, ennen kuin toimielinten liike liipaistaan.

Seuraavat esimerkit havainnollistavat esillä olevan keksinnön toimintaa vertailemalla pseudokäänteisratkaisuja, jotka sisältävät joko kiinteän vaimennuskertoimen, kuten käyrät k_1 (Wampler) esittävät, tai muuttuvan vaimennuskertoimen, kuten käyrät k_2 (Nakamura) esittävät, tai esillä olevan keksinnön, kuten k_3 esittää. Kaikissa kaavioissa k_1 on esitetty yhtenäisellä viivalla, k_2 on esitetty katkoviivalla ja k_3 on esitetty pisteviivalla.

Kiinteäksi vaimennusarvoksi asetettiin 0,2. Käytetty varsi oli kaksinivelinen kummankin osan ollessa 1 metrin pituinen. Muuttuvan vaimennuskertoimen tapauksessa vaimennusluvuksi asetettiin 0,01 ja vaimennuskerroin k määrättiin manipulaattorin tietyn paikan ohjattavuuden perusteella määrättynä seuraavan kaavan mukaan

$$m = \sqrt{[\det(J^T(\theta)J(\theta)]} \qquad (13)$$

ja k_2 laskettiin seuraavan kaavan perusteella

$$k_2 = k_4(1-m/m_o)^2 \qquad (14)$$

jossa k_4 = vakiovaimennuskerroin, jolloin vaimennusta käytetään vain, kun ohjattavuus on pienempi kuin 1.

Esillä olevaa keksintöä käytettäessä vaimennuskertoimeksi k asetettiin esimerkeissä 1.

Kuvioissa 3-6 kirjainmerkinnät tarkoittavat:

"A" esittää etäisyysvirhettä,
"B" esittää korjauksia ensimmäiselle nivelelle,
"C" esittää korjauksia toiselle nivelelle.

Kuviot 3 ja 6 ovat esimerkkejä suurista ja vastaavasti pienistä nivelmuutoksista erikoispisteen ympärillä manipulaattorin tukipisteessä.

Kuvio 4 esittää suurta nivelmuutosta suuren ohjattavuuden alueella ja kuvio 5 esittää suuria nivelmuutoksia ojennetun kyynärerikoispisteen lähellä.

Kuviosta 3 ilmenee, että suuren nivelmuutoksen tapauksessa etäisyysvirhe pienenee nopeammin esillä olevaa keksintöä seurattaessa, kuitenkin muut järjestelmät toimivat melko hyvin. Toisaalta (esillä olevaa keksintöä seurattaessa) asentovirhe pienenee itse asiassa kaikissa esitetyissä tapauksissa pienimpään arvoon. Samoin esillä olevaa keksintöä käytettäessä iteraatioiden lukumäärä jokaiselle kulmalle on kaikissa esimerkeissä pienin riippumatta asennosta ja nivelmuutoksen suuruudesta.

Esillä olevan keksinnön uskotaan muodostavan keinon, jolla manipulaattorin päätepiste suppenee erikoispisteiden lähellä oleviin kohteisiin ja aikaansaavan menetelmän, jossa tarvitaan erittäin vähän lisälaskentaa yksinkertaisen pseudokäänteisratkaisun vaatiman lisäksi. Yleisesti esillä oleva keksintö aikaansaa suppenemisen kaikissa paikoissa, ts.

erikoispisteiden lähellä tai suuren ohjattavuuden alueella yhtä monella tai vähemmillä iteraatiolla kuin tunnetut menetelmät. Kuten edellä on esitetty, koska virhevaimennettu pseudokäänteisratkaisu voi mennä erittäin lähelle erikoispisteitä, manipulaattori voi siirtyä vaihtoehtoisiin ratkaisuihin ja tämän tyyppisissä manipulaattoreissa olisi ryhdyttävä sopiviin toimenpiteisiin pseudokäänteisratkaisun ohjaamiseksi ennakolta yhteen ratkaisuun.

On ilmeistä, että esillä oleva keksintö antaa yleensä hyvän approksimaation ensimmäisellä iteraatiolla, ja sen vuoksi, että virhevaimennettu pseudokäänteisratkaisu rajoittaa muutokset vaimennustekijää muuttamalla, toimielimet on sopivaa aktivoida jokaisen iteraation jälkeen esillä olevaa keksintöä käytettäessä.

Edellä selitettyyn keksintöön voidaan tehdä muutoksia oheisissa patenttivaatimuksissa määritellyn keksinnön ajatuksesta poikkeamatta.

Patenttivaatimukset

1. Menetelmä nivelvarren liikkeen ohjaamiseksi, t u n n e t t u siitä, että siihen sisältyy komennon antaminen ohjaustietokoneelle kohdeaseman määrittelemiseksi mainitun nivelvarren päätepisteelle, iteratiivisen pseudokäänteisen Jacobin matriisin käyttäminen, jolla on vaimennuskerroin, kunkin nivelkulman muutoksen määrän määräämiseksi kullekin mainitun varren aktivoitavalle nivelelle, vaimennuskertoimen suuruuden asetteleminen kullekin iteraatiolle päätepisteen ja kohteen välisen lasketun työavaruusetäisyyden mukaan, mainitun varren mainittujen nivelten kulmien asetteleminen määrättyjen kulmien mukaan käyttämällä iteraatioiden lukumäärää, joka on alueella 1-20.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että mainitut nivelkulmat asetellaan jokaisen iteraation jälkeen.

3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että mainittu vaimennuskerroin asetellaan yhtälön

$$k_s = k\|\delta p\|^x \qquad (12)$$

jossa k_s = aseteltu vaimennuskerroin
k = valittu vakio, joka on alueella 0,001-1 kertaa nivelvarren kokonaispituus metreissä,
$\|\delta p\|$ = päätepisteen ja kohteen välinen etäisyys kunkin iteraation jälkeen,
x = ennalta valittu luku välillä 1-3.

4. Patenttivaatimuksen 3 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että x on 2.

5. Menetelmä nivelvarren toiminnan ohjaamiseksi varren toiminnan parantamiseksi erikoispisteiden lähellä ja suuren ohjattavuuden alueilla, jossa varressa on varsiosia, jotka on yhdistetty toisiinsa kääntyvästi nivelillä, jotka muodos-

tavat aseteltavat nivelkulmat varsiosien välille, ja toimilaitteet mainittujen nivelkulmien muuttamiseksi mainitun varren siirtämiseksi, t u n n e t t u siitä, että menetelmään sisältyy komennon antaminen tietokoneohjaukselle kohdeasennon määrittelemiseksi mainitun varren päätepisteelle, mainitun tietokoneen määrätessä mainituille nivelille nivelkulmat, jotka vaaditaan mainitun päätepisteen siirtämiseksi mainittua kohdeasentoa kohti käyttämällä iteratiivista ratkaisua, joka perustuu pseudokäänteiseen Jacobin matriisiin kaavan

$$J^{+}(\theta) = (J^{T}(\theta) + k_3 I)^{-1} J^{T}(\theta) \qquad (13)$$

mukaan, jossa I = yksikkömatriisi

k_3 = muuttuva vaimennuskerroin, jonka määrää

yhtälö $k_3 = k\|\delta p\|^{x}$ (12)

jossa k = ennalta valittu luku, joka on alueella 0,001-1 kertaa varren kokonaispituus metreissä,

$\|\delta p\|$ = päätepisteen ja kohteen välinen etäisyys kunkin iteraation jälkeen,

x = luku, joka on valittu väliltä 1-3, ja

arvon k_3 asetteleminen kutakin iteraatiota varten perustuen päätepisteen laskettuun asemaan kohdeaseman suhteen mainitun tietokoneen aktivoidessa mainitut toimilaitteet nivelkulmien asettelemiseksi mainitun varren mainitun päätepisteen siirtämiseksi mainittua kohdeasemaa kohti alueella 1-20 olevan iteraatioiden lukumäärän jälkeen.

6. Patenttivaatimuksen 5 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että x on 2.

7. Patenttivaatimuksen 5 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että mainittu tietokone aktivoi mainitut toimilaitteet mainittujen nivelkulmien asettelemiseksi

mainitun varren päätepisteen siirtämiseksi mainittua kohdeasemaa kohti kunkin iteraation jälkeen.

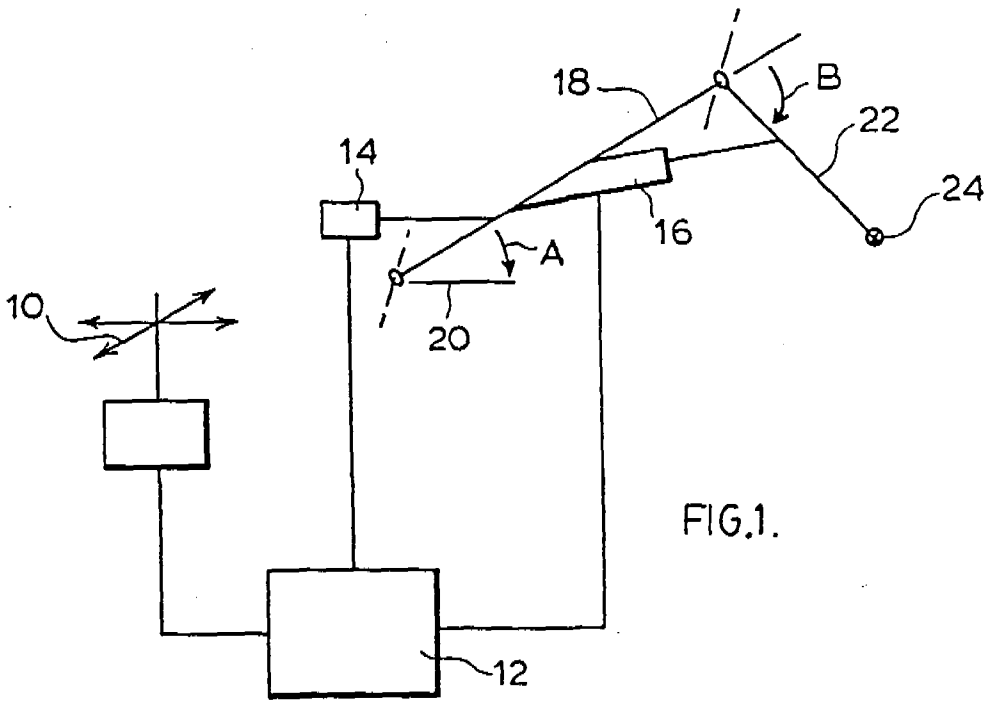

FIG.1.

FIG.2.

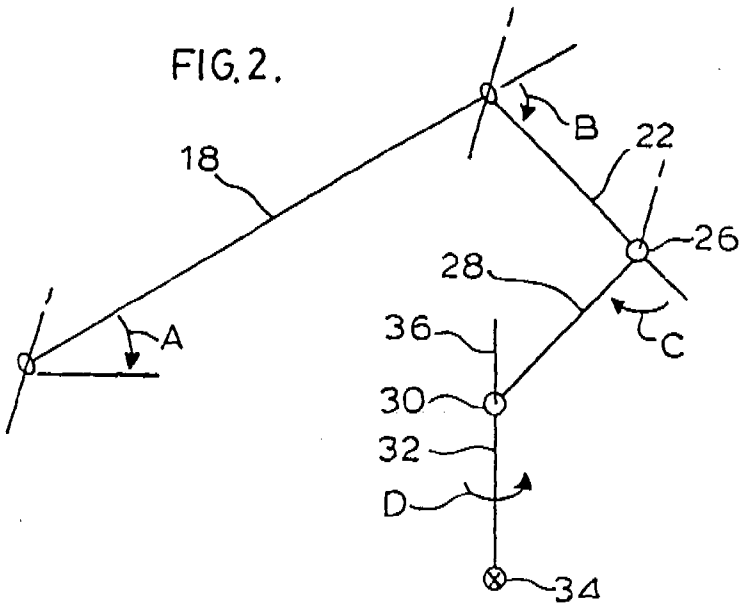

FIG.3A.

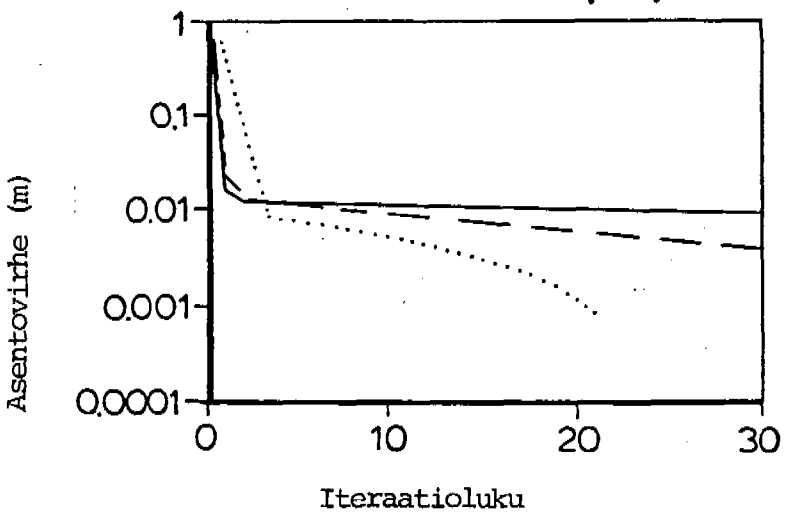

FIG.3B.

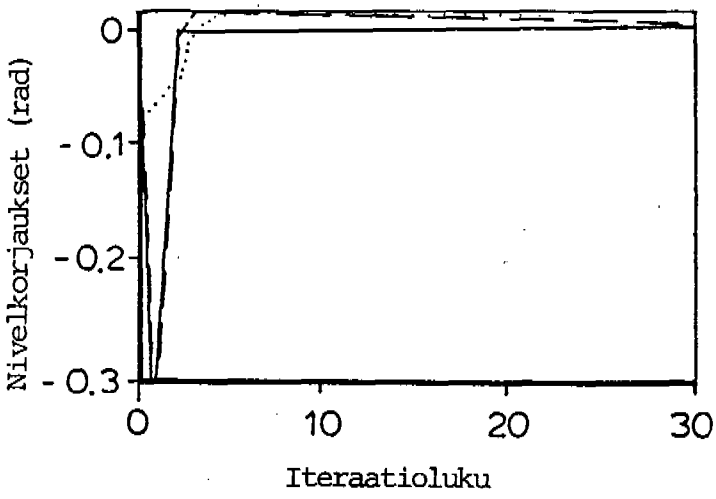

FIG.3C.

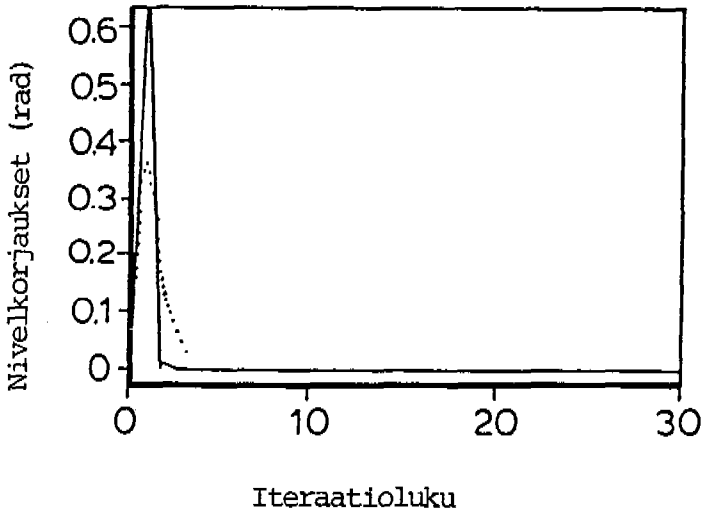

FIG.4A.

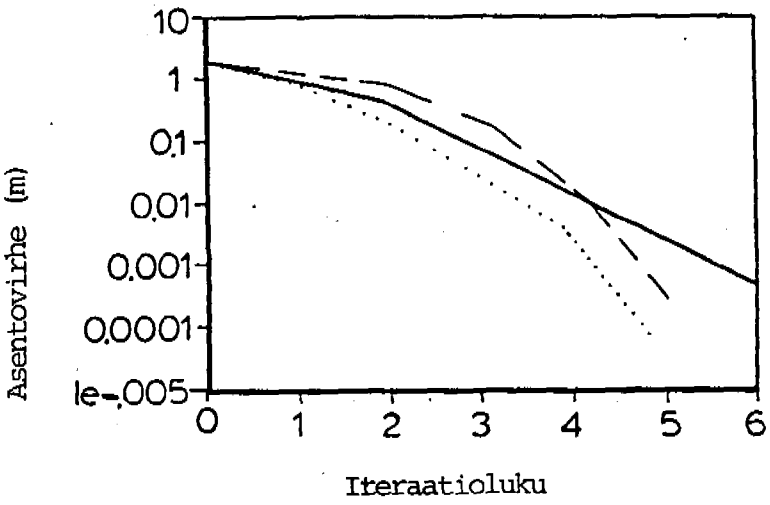

FIG.4B.

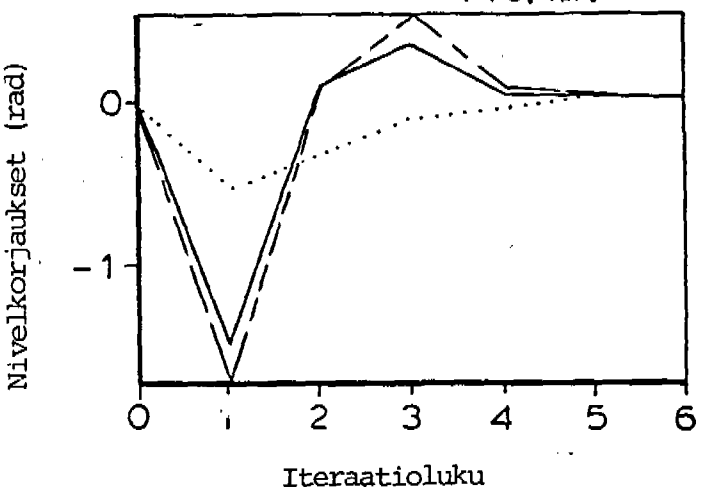

FIG.4C.

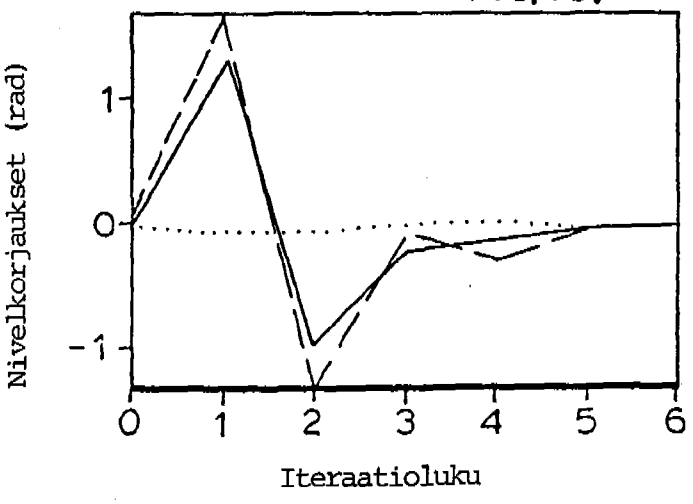

FIG.5A.

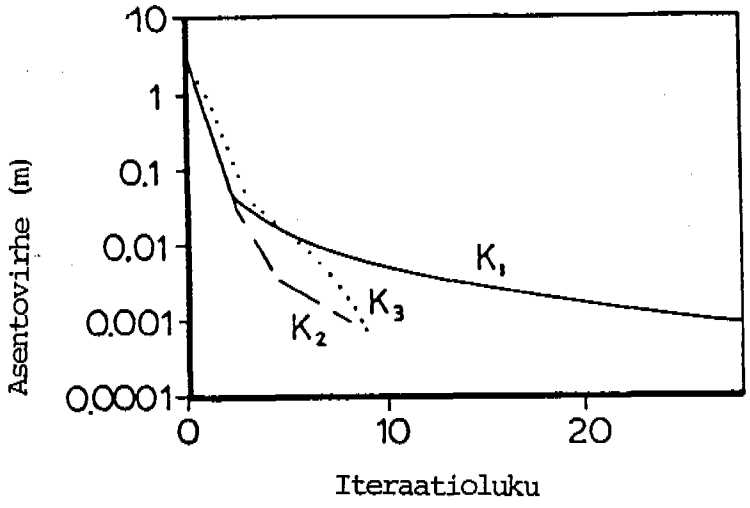

FIG.5B.

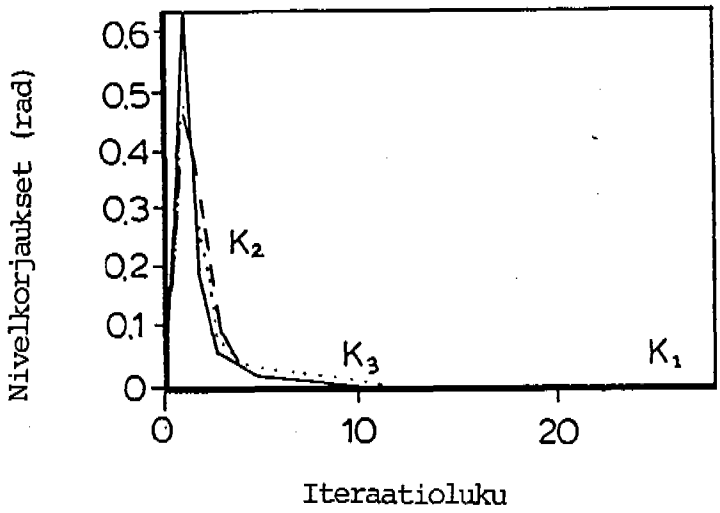

FIG.5C.

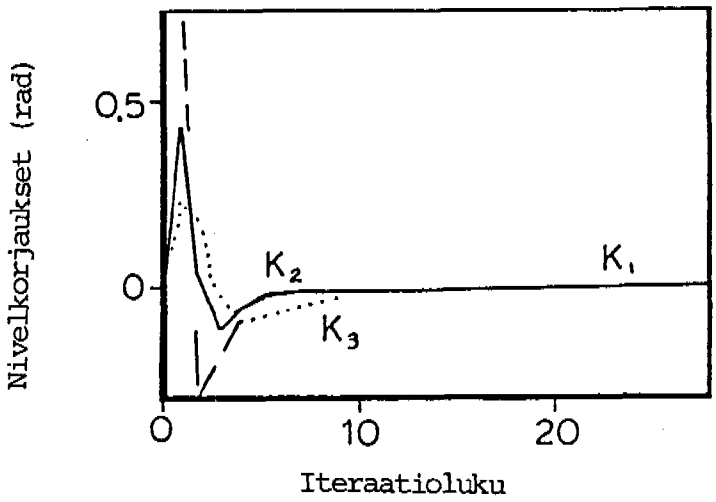

FIG.6A.

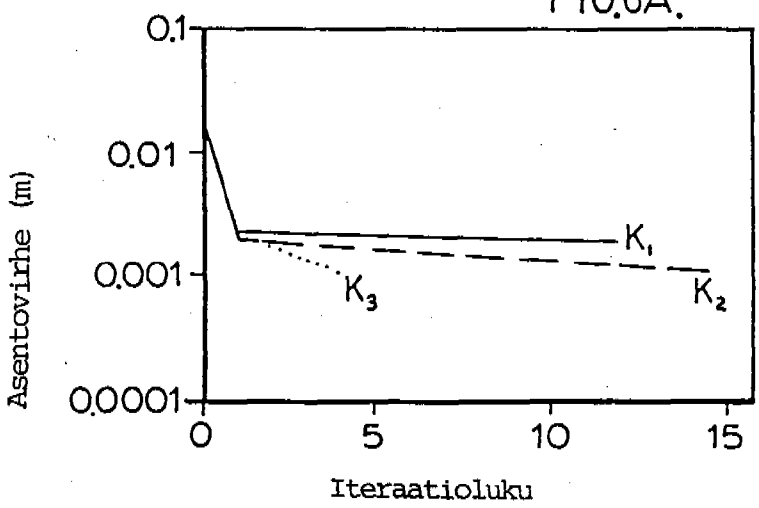

FIG.6B.

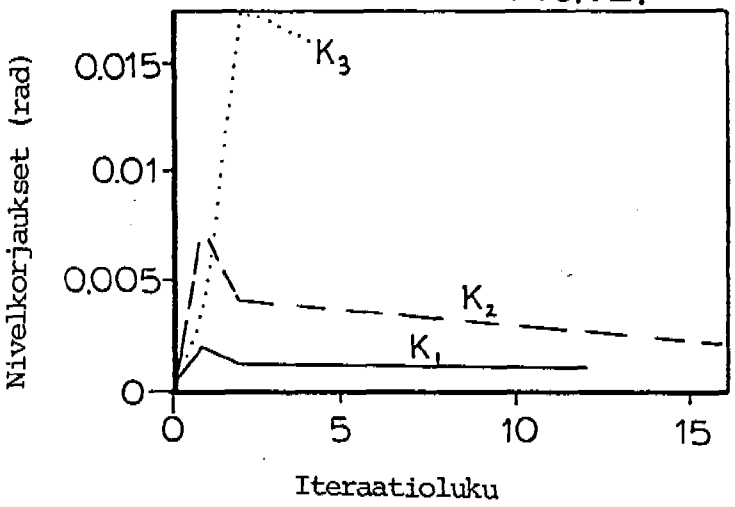

FIG.6C.

