



(12)

BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2010 00052**

(22) Data de depozit: **21/01/2010**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **29/03/2019** BOPI nr. 3/2019

(41) Data publicării cererii:
28/01/2011 BOPI nr. 1/2011

(73) Titular:

• **INSTITUTUL DE MECANICA SOLIDELOR
AL ACADEMIEI ROMÂNE,**
STR. CONSTANTIN MILLE NR.15,
SECTOR 1, BUCUREȘTI, B, RO

(72) Inventatori:

• **VLĂDĂREANU LUIGE,** CALEA CRÂNGAȘI
NR.48, BL.7, AP.45, SECTOR 6,
BUCUREȘTI, B, RO;
• **VELEA LUCIAN MARIUS,**
CALEA VĂCĂREȘTI NR.201, BL.87, AP.48,
SECTOR 4, BUCUREȘTI, B, RO;
• **MUNTEANU RADU ADRIAN,**
STR. ALEXANDRU VLAHUȚĂ, BL. LAMA C,
AP.29, CLUJ NAPOCA, CJ, RO;
• **SIRITEANU TUDOR,**
BD. ALEXANDRU OBREGIA NR.24, BL.R2,
AP.81, SECTOR 4, BUCUREȘTI, B, RO;

• **MUNTEANU MIHAI STELIAN,**
STR.ALEXANDRU VLAHUȚĂ, BL. LAMA C,
AP.29, CLUJ-NAPOCA, CJ, RO;
• **TONT GABRIELA,** STR. MAGHERU
BL.M7, ET.2, AP.1, ORADEA, BH, RO;
• **VLĂDĂREANU VICTOR,**
CALEA CRÂNGAȘI NR.48, BL.7, AP.45,
SECTOR 6, BUCUREȘTI, B, RO;
• **BALAȘ CORNEL,** CALEA RAHOVEI
NR.325, BL.13, SC.B, AP.97, SECTOR 5,
BUCUREȘTI, B, RO;
• **TONT DAN GEORGE,** STR. MAGHERU,
BL.M7, ET.2, AP.1, ORADEA, BH, RO;
• **MELINTE DANIEL OCTAVIAN,**
STR. PIAȚA ALEXANDRU LAHOVARI
NR.1A, SC.G, ET.5, AP.23, SECTOR 1,
BUCUREȘTI, B, RO;
• **GAL IONEL ALEXANDRU,**
STR. VULTURILOR NR.51, SC.A, ET.3,
AP.13, SECTOR 3, BUCUREȘTI, B, RO

(56) Documente din stadiul tehnicii:

**KR 20070072316 (A); JP 2004009205 (A);
US 5040626 (A)**

(54) **METODĂ ȘI DISPOZITIV PENTRU CONTROLUL DINAMIC
AL UNUI ROBOT PĂȘITOR**



RO 125970 B1

1 Invenția se referă la o metodă și un dispozitiv de control dinamic al roboților pășitori,
destinat controlului hibrid, în timp real, al poziției traiectoriei de mișcare al vârfurilor și
3 articulațiilor picioarelor robotului, forțelor de reacțiune și al dinamicii mersului roboților
pășitori, în vederea creșterii stabilității deplasării acestora pe terenuri plane, cu obstacole sau
5 denivelate, la viteze de mers constante sau variabile și sarcini variabile, cu aplicații în trans-
portul de materiale nucleare, în activități agricole de însămânțare, prășire, aplicații militare
7 în detectarea minelor, experimente selenare și, în general, aplicații pe terenuri neregulate,
greu accesibile.

9 Pentru controlul dinamic al roboților pășitori sunt cunoscute mai multe metode și dis-
pozitive în care unele tratează numai controlul hibrid poziție-forță al roboților, iar altele con-
11 trolul dinamicii mersului roboților umanoizi. Referitor la controlul hibrid forță-poziție, este
cunoscută metoda numită „adaptarea poziției” propusă de Whitney. Este o metodă simplă
13 în care forța de contact este folosită pentru a modifica traiectoria poziției de referință a efec-
tuatorului final al robotului. Controlul hibrid poziție-forță, dezvoltată de Raibert, Craig și
15 Manson, asigură controlul în forță și poziție, atunci când robotul interacționează cu mediul
înconjurător, prin descompunerea în „sub-spațiu de poziție” și „sub-spațiu de forță”. Controlul
17 mișcării de rezistență la arcuire, care este în esență control de forță implicit bazat pe poziție,
a fost aplicat de Lawrence și Stoughton (1987) și Kazerooni, Waibel, și Kim (1990). Salisbury
19 (1980) a prezentat o metodă de control activ a rigidității aparente a efectuatorului final al
robotului în spațiu cartezian. Pentru aceasta, s-au dezvoltat controlere adaptive și neliniare
21 de forță și rezistență la arcuire ce posedă stabilitate superioară și performanță îmbunătățită,
în comparație cu controlerele convenționale liniare cu amplificare fixă. Controlerele adaptive
23 fac uz de abordarea controlului adaptiv având ca model de referință Lyapunov (MRAC), în
timp ce controlerele neliniare folosesc criteriul de stabilitate Popov, pentru a asigura stabili-
25 tate în circuit închis. Controlul impedanței, introdusă de Hogan și Karen, care stabilește o
relație dinamică dorită între poziția efectuatorului final al robotului și forța de contact, a fost
27 continuată de Pelletier și Daneshmend, respectiv Lacky și Hsia. Pelletier și Daneshmend
prezintă o schemă a unui dispozitiv de control adaptiv pentru a compensa variațiile rigidității
29 mediului în timpul mișcării, utilizând dispozitivul de control al atenuării. Lacky și Hsia descriu
un sistem al unui dispozitiv de control constând într-un dispozitiv de control convențional al
31 impedanței în bucla interioară și un dispozitiv de control de modificare a traiectoriei în bucla
exterioară pentru urmărirea forței. Chan dezvoltă o schemă a unui dispozitiv de control cu
33 structură variabilă pentru dispozitivul de control al impedanței rezistente în prezența incerti-
tudinilor parametrilor și a perturbărilor externe; însă această strategie necesită cunoașterea
35 exactă a locației și rigidității mediului pentru a defini controlul forței. Sunt cunoscute mai
multe metode/ strategia de control a dinamicii mersului roboților umanoizi, care se bazează
37 pe generarea modelului de mers luând în considerare traiectoria punctului stabil de moment
zero (PMZ) și asigură stabilitatea (echilibrul) robotului prin bucle de control în timp real.
39 Deoarece traiectoria reală ZMP este diferită de traiectoria ZMP dorită, datorită unor pertur-
bări, cum ar fi denivelările suprafeței, erorile senzoriale și modelul dinamic imperfect al robo-
41 tului umanoid, se cer mai multe sisteme de control bazate pe feedback-urile senzoriale.
Yamaguchi a studiat generarea online a modelului mersului care să asigure controlul stabili-
43 tății robotului folosind mișcarea părții superioare a robotului umanoid, bazată pe informații
PMZ. Kajita (**Proceedings of Conference on Robotics and Automation, Taipei, 2003, pp.**
45 **1620-1626**) a introdus o metodă a generării modelului mersului folosind sisteme de control
PMZ pentru generarea de noi referințe. Kagami (**Proceedings of IEEE Internațional**
47 **Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, 2002, pp. 2557-2562**) a folo-
sit o metodă de control compliantă a platformei robot pentru a urmări o traiectorie ZMP dată.

RO 125970 B1

Dezavantajele acestor soluții constau în faptul că nu fac o tratare completă a controlului roboților pășitori care să includă atât controlul hibrid poziție-forță, cât și controlul dinamicii mișcării acestora. Mai mult, metodele de control dinamic se limitează la roboții umanoizi.	1 3
Problema pe care o rezolvă invenția este că asigură un control complex al dinamicii roboților pășitori, respectiv controlul hibrid, în timp real, a poziției traiectoriei de mișcare al vârfurilor și articulațiilor picioarelor robotului, forțelor de reacțiune și controlul dinamicii mersului roboților pășitori în scopul creșterii stabilității deplasării și mobilității.	5 7
Metoda conform invenției înlătură dezavantajele menționate mai sus prin aceea că, pentru controlul hibrid, în timp real, al poziției traiectoriei de mișcare a vârfurilor și articulațiilor picioarelor unui robot pășitor, se calculează:	9
i) eroarea datorată componentei de poziție pe axele de libertate robot corespunzătoare articulațiilor picioarelor robotului, care se obține prin înmulțirea matricei erorii de poziție în spațiul de mișcare al robotului, datorate diferenței între traiectoria dorită și traiectoria reală, determinată prin măsurarea semnalelor de poziție primite de la articulațiile picioarelor robotului aplicate matricei rezultate din cinematica directă a structurii mecanice robot, cu valorile matricei cinematice inverse a structurii mecanice robot, valori matriciale obținute la rândul lor într-un proces simultan cu cel al determinării matricei erorii de poziție în spațiul robot prin procesarea matricei Jacobiene cu valorile reale primite de la articulațiile picioarelor robotului, triangularizarea matricei astfel determinate și realizarea substituției inverse;	11 13 15 17 19
ii) eroarea datorată componentelor de forță pe axele de libertate robot, corespunzătoare articulațiilor picioarelor robotului, care se obține prin înmulțirea între matricea erorii de poziție în spațiul de mișcare al robotului datorate forței, determinată ca diferența de mișcare între deviația poziției curente, măsurată de sistemul de comandă care generează deviația de poziție pentru axele controlate în forță și deviația în poziție datorată forței reziduale dorite, determinată ca înmulțire între rigiditatea fizică a fiecărui segment de picior corespunzător articulației și forței reziduale dorite pe fiecare axă de libertate a robotului, cu valorile matricei cinematice inverse a structurii mecanice robot, valori matriciale obținute la rândul lor într-un proces simultan, cu cel al determinării matricei erorii de poziție în spațiul robot datorate forței, prin procesarea matricei Jacobiene cu valorile reale primite de la articulațiile picioarelor robotului, triangularizarea matricei astfel determinate și realizarea substituției inverse, la care se adaugă erorile determinate prin aplicarea unor strategii de control ale unui mers dinamic stabil al robotului pășitor, cum ar fi:	21 23 25 27 29 31
iii) eroarea rezultată din strategia de control a amortizării la pășirea robotului în faza de suport unic, prin modelarea mișcării robotului cu ecuația unui pendul simplu inversat cu o articulație în fază cu un unic suport, care se opune forțelor de amortizare ale articulației piciorului;	33 35
iv) eroarea rezultată din strategia de control de compensare a punctului de moment zero, într-o singură fază, cea de suport unic, datorată mișcării platformei înainte și înapoi conform dinamicii punctului de moment zero, care constă în modelarea matematică a mișcării unui compensator a momentului de punct zero cu ecuația unui pendul simplu inversat;	37 39 41
v) eroarea rezultată din strategia de control al orientării la aterizare, obținut prin diferența între unghiul de referință al articulației piciorului și unghiul de referință compensat al articulației piciorului, calculat prin integrarea cuplului măsurat pe întreaga durată a pășirii cu o constantă de timp dată de coeficientul de amortizare la aterizare și rigiditatea pășirii;	43 45
vi) eroarea rezultată din strategia de control amplitudine balans platformă pentru a muta punctul de moment zero, corectat prin măsurarea punctului de moment zero în timpul fiecărui ciclu de mers, realizată prin modelarea amplitudinii balansului lateral al platformei	47

RO 125970 B1

1 printr-un pendul invers și obținută printr-un algoritm de compensare a poziției picioarelor care
au contact cu solul, astfel încât amplitudinea punctului de moment zero actual (măsurată)
3 să poată converge spre punctul de moment zero mediu de referință;

vii) eroarea rezultată din strategia de control de rotire/avans platformă care permite
5 ca poziția centrală a platformei să se mute în direcția opusă față de partea înclinată pe planul
transversal, astfel încât mișcările de legănare să poată fi bine balansate, cu obținerea
7 vectorului de poziție al platformei printr-o relație iterativă de integrare a vectorului erorilor
unghiulare ale platformei între fazele de suport unic, amplificat cu un coeficient de câștig
9 determinat experimental;

viii) eroarea rezultată din strategia de control al poziției de aterizare constă în gene-
11 rarea unor mișcări probabile ale robotului prin prelucrarea unor mișcări anterioare, cu rolul
de a evita mișcările anormale, ce are ca scop pășirea spre direcția de cădere, printr-o
13 mișcare de torsiune a platformei, obținută prin suprapunerea unei legi de mișcare deter-
minate experimental pe mișcarea normală în jurul axei z a piciorului robotului, în care
15 vectorul de poziție al piciorului în faza de aterizare se determină ca o relație iterativă prin
adăugarea la vectorul prescris a poziției de aterizare a unui vector de eroare, obținut prin
17 înmulțirea cu un factor de amplificare între vitezele unghiulare medii și vitezele unghiulare
stabile a mișcării de avans, respectiv de torsiune;

ix) eroarea rezultată din strategia de control al aplecării peste marginea de siguranță
19 a robotului, care constă în anticiparea mișcărilor robotului în baza unor informații experimen-
21 tale statistice, cu respectarea marginilor de stabilitate, prevenirea condițiilor anormale și pro-
cesarea unor mișcări adiționale, pentru evitarea acestor instabilități care pot conduce la răs-
23 turnarea robotului în cazul deplasării pe un teren denivelat sau existenței unor forțe externe,
și permite determinarea în timp real a depășirii marginilor de înclinare spre interior, respectiv
25 exterior, prin integrări iterative ale unghiului de rotire în mișcarea de torsiune a platformei pe
o durată x de la startul începerii fiecărei faze de mers, iar dacă are loc depășirea marginilor
27 de înclinare, unghiul de rotire al articulației piciorului este compensat printr-un algoritm pre-
definit în funcție de valoarea unghiului de rotire în mișcarea de torsiune a platformei, în care
29 unele semnale de eroare sunt controlate digital cu multiplexarea lor după două strategii de
control, astfel:

31 x) controlul la detecția unui pas de mișcare robot, în care, la detectarea atingerii
pământului de către piciorul robotului în fazele de dublu suport, pentru o atingere fără șocuri,
33 are loc multiplexarea semnalului de eroare rezultat din strategia de control a amortizării și
semnalul de eroare rezultat din strategia de control de compensare a punctului de moment
35 zero cu semnalul de eroare rezultat din strategia de control a orientării la aterizare, conform
etapelor din modulul programator de strategii;

37 xi) controlul repetabilității la aterizare, care evită instabilitățile mișcării robotului la ate-
rizare, prin generarea unui semnal de blocare a schemei de mers dacă piciorul nu ia contact
39 cu pământul la sfârșitul fazelor de suport unic, cu întreruperea semnalului de referință poziție
furnizat de generatorul de mers și oprirea comenzii de mișcare a piciorului până când acesta,
41 în virtutea inerției, ia contact cu pământul, la care se adaugă două programe:

xii) un programator de strategii al momentelor acționării fiecărei strategii de control
43 raportate la 4 etape ale unui pas complet al robotului pășitor, cu funcțiile: în etapa 1 se reali-
zează controlul amortizării, controlul compensării punctului de moment zero și controlul aple-
45 cării peste marginea de siguranță; în etapa 2, în faza de suport unic, are loc controlul amor-
tizării, controlul compensării punctului de moment zero și controlul poziției de aterizare; în
47 etapa 2, în faza de dublu suport, are loc controlul orientării la aterizare, controlul ajustării

RO 125970 B1

periodice a amplitudinii balansului lateral a platformei, controlul de rotire/avans platformă și controlul poziției de aterizare; etapa 3 care corespunde etapei 1 și etapa 4 care corespunde etapei 2, din punct de vedere al strategiilor de control active, cu menținerea continuă a semnalelor de eroare datorate componentei de poziție și componentei de forță;	1
xiii) un program de generare a schemei de mers a robotului pășitor generează un semnal de referință forță, f_{ref} , și un semnal a poziției de referință (dorită), X_D , conform strategiei de control de rotire/avans platformă și strategiei de control amplitudine balans platformă, precum și al unui portofoliu de programe cu scheme de mers predefinit, cum ar fi mersul tripod la un robot pășitor hexapod, mersul pas cu pas;	5
xiv) astfel că, în final, prin procesarea semnalelor de eroare utilizând fuziunea semnalelor rezultate din programatorul de strategii sau controlul fuzzy, se obține semnalul de eroare pentru comanda actuatorilor structurii robotului pășitor pe fiecare axă de mișcare.	7
Dispozitivul conform invenției înlătură dezavantajele menționate prin aceea că, pentru controlul hibrid, în timp real, al poziției traiectoriei de mișcare a vârfurilor și articulațiilor picioarelor unui robot pășitor, acesta este alcătuit dintr-un complex de module care au ca scop generarea, în timp real, a unui semnal de eroare pe axele robot e_n pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor RP , pentru controlul actuatorilor, care să țină cont de strategiile de control ale componentei de poziție, componentei de forță și componentelor controlului dinamic cu scopul creșterii stabilității roboților pășitori:	9
- un modul programator de strategii MPS primește câte un semnal pe fiecare grad de libertate al robotului pentru semnalele de eroare ale componentelor de poziție $\Delta\Theta_p$ de la modulul de substituție inversă a poziției MSIP și semnale de eroare ale componentei de forță $\Delta\Theta_f$ de la modulul de substituție inversă a forței MSIF , un semnal de control supra-aplecare SCSA de la modulul de control mișcare predictibilă CMP și un semnal control balans multiplexat 2SCBMx de la modulul cu control digital cu multiplexare MUX , transmite la ieșire un semnal de eroare de etapă SEE , și stabilește momentele acționării fiecărei strategii de control raportate la 4 etape ale unui pas complet de robot pășitor, conform funcțiilor din metoda de control din prezenta invenție;	11
- un modul de fuziune semnale sau fuzzy control MFSFC primește un semnal de eroare de etapă SEE de la modulul cu control digital cu multiplexare MUX și transmite un semnal de eroare pe axele robot e_n pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor RP prin procesarea acestuia prin metoda de fuziune a semnalelor sau prin metoda de control fuzzy;	13
- un modul de substituție inversă a poziției MSIP primește un semnal pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor RP corespunzător matricei triangularizate de poziție de la modulul de triangularizare matrice de poziție MTMP , care primește, la rândul său, semnalele corespunzătoare matricei de poziție Jacobiene de la modulul matricei de poziție Jacobiene MMPJ , și care realizează împreună calculul matricei inverse Jacobiene, în timp real, pe toate gradele de libertate ale robotului pășitor RP , un modul al matricei de poziție MMPJ , care, în funcție de etapa din pasul complet al robotului pășitor RP , generată de modulul programator de strategii MPS , primește valorile corespunzătoare poziției în spațiul de mișcare al robotului pășitor RP , pe fiecare grad de libertate, de la modulul calcul cinematică directă a poziției MCCDP și semnalul de control poziție aterizare SCPA de la modulul de control mișcare predictibilă CMP , calculează în timp real matricea de poziție Jacobiană și transmite aceste valori la modulul de triangularizare a matricei de poziție MTMP ;	15
- un modul sumator de poziție MSP primește valorile matricei de poziție în spațiul de mișcare robot X_p , pe fiecare grad de libertate, de la modulul calcul cinematică directă a poziției MCCDP și poziția de referință (dorită) X_D corespunzătoare semnalului ISCBMx de la modulul cu control digital cu multiplexare MUX , și calculează eroarea de poziție în spațiul	17
	19
	21
	23
	25
	27
	29
	31
	33
	35
	37
	39
	41
	43
	45
	47

RO 125970 B1

1 de mișcare al robotului pășitor **RP** ca diferență între cele două semnale de intrare, pe fiecare
axă de mișcare robot, pe care o transmite la modulul matricei de selecție poziție **MMSP**,
3 care, la rândul său, transmite aceste valori la modulul de substituție inversă a poziției **MSIP**
numai pe axele pe care urmează să se asigure controlul în poziție, stabilite de modulul
5 programator de strategii **MPS**;

- un modul de calcul al cinematicii directe de poziție **MCCDP** primește poziția pe
7 axele robot Θ_{Pni} de la traductoarele incrementale de poziție, pe fiecare axă n de mișcare a
robotului, calculează în timp real poziția în spațiul de mișcare robot X_p , pe fiecare grad de
9 libertate, pe care o transmite la un modul sumator de poziție **MSP**;

- un modul de substituție inversă a forței **MSIF** primește un semnal pe fiecare grad
11 de libertate al robotului pășitor **RP** corespunzător matricei triangularizate de forță de la
modulul de triangularizare matrice de forță **MTMF**, care, la rândul său, primește semnalele
13 corespunzătoare matricei de forță Jacobiene de la modulul matricei de forță Jacobiene
MMFJ, și care realizează împreună calculul matricei inverse Jacobiene, în timp real, pe toate
15 gradele de libertate ale robotului pășitor **RP**, un modul al matricei de forță **MMFJ**, care, în
funcție de etapa din pasul complet al robotului pășitor **RP**, generat de modulul programator
17 de strategii **MPS**, primește valorile corespunzătoare forței în spațiul de mișcare al robotului
pășitor **RP**, pe fiecare grad de libertate, de la modulul calcul cinematica directă a forței
19 **MCCDF** și semnalul de control **2SCBMx** de la modulul cu control digital cu multiplexare
MUX, calculează în timp real matricea de forță Jacobiană și transmite aceste valori la
21 modulul de triangularizare a matricei de forță **MTMF**;

- un modul sumator de forță **MSF** primește valorile matricei de poziție datorate forței
23 X_f în spațiul de mișcare al robotului pășitor **RP**, pe fiecare grad de libertate, de la modulul
calcul cinematica directă a forței **MCCDF** și forța de referință (dorită) X_{DF} de la modulul de
25 calcul al matricei de rigiditate **MCMR**, și calculează eroarea de poziție datorate forței în
spațiul de mișcare al robotului pășitor **RP** ca diferență între cele două semnale de intrare, pe
27 fiecare axă de mișcare robot, pe care o transmite la modulul matricei de selecție forță **MMSF**,
care, la rândul său, transmite aceste valori la modulul de substituție inversă a forței **MSIF**
29 numai pe axele pe care urmează să se asigure controlul în forță stabilite de modulul
programator de strategii **MPS**;

- un modul de calcul al cinematicii directe de poziție datorate forței **MCCDF** primește
31 forțele f_i din articulațiile robotului, pe fiecare axă n de mișcare a robotului, calculează în timp
real poziția datorată forței în spațiul de mișcare robot X_f , pe fiecare grad de libertate, pe care
33 o transmite la un modul sumator de forță **MSF**;

- un modul de calcul al matricei de rigiditate **MCMR** primește un semnal de referință
35 forța f_{ref} de la generatorul schemei de mers **GSM** și generează, în timp real, un semnal al
forței de referință (dorită) X_{DF} , determinată ca înmulțire între rigiditatea fizică a fiecărui seg-
37 ment de picior corespunzător articulației și forța reziduală dorită pe fiecare axă de libertate
a robotului, pe care îl transmite la un modul sumator de forță **MSF**;

- un modul de control balans în timp real, **CBTR**, primește un semnal al punctului de
41 moment zero (**PMZ**) de la robotul pășitor **RP** și de la momentele din articulațiile robotului **M**,
pe fiecare axă de mișcare a robotului, și, conform metodei de control din prezenta invenție,
43 generează un semnal de control al amortizării **SCA**, un semnal de control de compensare
a punctului de moment zero **SC-PMZ** și un semnal de control al orientării la aterizare **SCOA**
45 la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**;

- un modul de control al schemei de mers **CSM** primește un semnal de la traductorul
47 de inerție **TINL** care măsoară poziția unghiulară și viteza platformei, un semnal al punctului
de moment zero **PMZ** și conform metodei de control din prezenta invenție generează un
semnal de control de rotire/avans platformă **SCRA** și un semnal de control amplitudine
49 balans platformă **SCAB** la generatorul schemei de mers **GSM**;

RO 125970 B1

- un modul de control al mișcării predictibile **CMP** primește un semnal de la traductorul de inerție **TINL** și un semnal de la traductorul de înclinare **TINC** care măsoară înclinarea și accelerația piciorului față de terenul pe care pășește robotul, și, conform metodei de control din prezenta invenție, generează un semnal de control al poziției de aterizare **SCSA** la un modul sumator de poziție **MSP** și un semnal de control al aplecării **SCPA** peste marginea de siguranță a robotului pășitor **RP** la un modul al matricei de poziție **MMPJ**; 1 3 5
- un modul de generare a schemei de mers **GSM** primește un semnal de control de rotire/avans platforma **SCRA** și un semnal de control amplitudine balans platforma **SCAB** de la un modul de control al schemei de mers **CSM**, și, conform metodei de control din prezenta invenție, precum și al unui portofoliu de programe cu scheme de mers predefinit, cum ar fi mersul tripod la un robot pășitor hexapod, mersul pas cu pas, generează un semnal de un semnal de referință forța f_{ref} la un modul de calcul al matricei de rigiditate **MCMR** și un semnal al poziției de referință (dorită) X_D la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**; 7 9 11 13
- un modul de control repetabilitate la aterizare **CRA** primește semnalele de forță f_i de la robotul pășitor **RP**, pe fiecare axă de mișcare, și, conform metodei de control din prezenta invenție, generează la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX** un semnal de blocare a schemei de mers dacă piciorul nu ia contact cu pământul la sfârșitul fazelor de suport unic, cu întreruperea semnalului de referință de poziție furnizat de generatorul de mers și oprirea comenzii de mișcare a piciorului, până când acesta, în virtutea inerției, ia contact cu pământul; 15 17 19
- un modul de control la detecția unui pas de mișcare robot **DPR** primește semnalele de forță f_i de la robotul pășitor **RP**, pe fiecare axă de mișcare, și, conform metodei de control din prezenta invenție, generează la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX** un semnal la detectarea atingerii pământului de către piciorul robotului în fazele de dublu suport cu multiplexarea semnalului de eroare rezultat din strategia de control al amortizării și semnalul de eroare rezultat din strategia de control de compensare a punctului de moment zero cu semnalul de eroare rezultat din strategia de control a orientării la aterizare conform etapelor din modulul programator de strategii **MPS**; 21 23 25 27
- un modul de control digital cu multiplexare **MUX** primește trei semnale analogice, respectiv un semnal de control al amortizării **SCA**, un semnal de control de compensare a punctului de moment zero **SC-PMZ** și un semnal de control al orientării la aterizare **SCOA** de la un modul de control balans în timp real, **CBTR**, multiplexate de două semnale primite de la un modul de control repetabilitate la aterizare **CRA** și de la un modul de control la detecția unui pas de mișcare robot **DPR**, iar conform programatorului de strategii **MSP**, generează trei semnale de control balans multiplexat **ISCBMx-3SCBMx**. 29 31 33 35
- Invenția prezintă avantajele realizării unui control dinamic al roboților pășitori, prin control cvasi-simultan hibrid, în timp real, al poziției traiectoriei de mișcare a vârfurilor și articulațiilor picioarelor robotului, forțelor de reacțiune și al dinamicii mersului roboților pășitori, cu creșterea stabilității deplasării acestora pe terenuri plane, cu obstacole sau denivelate, la viteze de mers constante sau variabile și sarcini variabile, cu aplicații în transportul de materiale nucleare, în activități agricole de însămânțare, prășire, aplicații militare în detectarea minelor, experimente selenare și, în general, aplicații pe terenuri denivelate, greu accesibile. 37 39 41 43
- Se dă, în continuare, un exemplu de realizare a metodei și dispozitivului conform invenției, în legătură cu fig. 1, care prezintă o schemă de principiu a dispozitivului, și fig. 2, care prezintă etapele unui pas complet al robotului pășitor. 45

RO 125970 B1

1 Metoda și dispozitivul conform invenției sunt constituite din 14 strategii de control și
un complex de module care au ca scop generarea, în timp real, a unui semnal de eroare pe
3 axele robot e_n pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor **RP**, pentru controlul actua-
relor care țin cont de strategiile de control al componentei de poziție, ale componentei de
5 forță și ale componentelor controlului dinamic cu scopul creșterii stabilității roboților pășitori.

Un modul programator de strategii **MPS** primește câte un semnal pe fiecare grad de
7 libertate al robotului pentru semnalele de eroare ale componentelor de poziție $\Delta\Theta_p$ de la
modulul de substituție inversă a poziției **MSIP** și semnale de eroare ale componentei de forță
9 $\Delta\Theta_f$ de la modulul de substituție inversă a forței **MSIF**, un semnal de control supra-aplecare
SCSA de la modulul de control mișcare predictibilă **CMP**, un semnal control balans multi-
11 plexat **2SCBMx** de la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**, și transmite la ieșire
un semnal de eroare de etapă **SEE**, stabilind momentele acționării fiecărei strategii de con-
13 trol raportate la 4 etape ale unui pas complet de robot pășitor conform funcțiilor din metoda
de control prezentată în fig. 2.

15 Un modul de fuziune semnale sau fuzzy control **MFSFC** primește un semnal de
eroare de etapă **SEE** de la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX** și transmite un
17 semnal de eroare pe axele robot e_n pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor **RP** prin
procesarea acestuia prin metoda de fuziune a semnalelor sau prin metoda de control fuzzy.

19 Un exemplu al relațiilor care stau la baza controlului hibrid poziție-forță prin controlul
fuzzy este prezentat mai jos și pleacă de la considerentul de a asigura viteza pe fiecare axă
21 pentru abaterea dată în direcția corespunzătoare într-un mod euristic, în care un operator
uman ar putea efectua inserarea. Sarcina controlerului este de a asigna abaterea măsurată
23 a variabilelor fuzzy, cum ar fi „pozitiv mare” (PM), și de a evalua regulile de decizie prin
inferență, astfel încât, în final, să poată stabili valoarea variabilei de ieșire, de exemplu viteză
25 ca variabilă fuzzy, care urmărește cel mai bine parametrul controlat. Forma regulii de decizie
și a variabilelor fuzzy folosite în luarea deciziei depind de problema controlului specific. Se
27 consideră ca date de intrare abaterea în poziție a articulațiilor compliante e , rata abaterii în
poziție Δe și forța de contact Δf . Valorile abaterilor detectate prin senzori sunt cuantificate
29 într-un număr de puncte corespunzător elementelor universului de discurs, iar apoi valorile
sunt alocate drept grade de apartenență în câteva subseturi fuzzy.

31 Relația dintre intrări, de exemplu abaterile măsurate, sau ieșiri, ca, de exemplu vite-
zele, și gradul de apartenență poate fi definită în conformitate cu experiențele operatorului
33 și cerințele sarcinii. Se definesc în mod empiric funcțiile de apartenență pentru toate elemen-
tele de intrare și ieșire. S-au ales valorile fuzzy după cum urmează: N_M - negativ mare, N_M -
35 - negativ mediu, N_m - negativ mic, ZO - zero, P_m - pozitiv mic, P_M - pozitiv mediu, PM -
- pozitiv mare.

37 Analizând baza de reguli se observă că bucla de reacție în forță este în funcție de
rezultatele inferenței din controlul fuzzy al componentei P. Cele două baze de reguli sunt pre-
39 zentate în fig. 3 și 4. Baza de reguli P este ușor modificată de la o bază de reguli tipică
liniară, permițând înlocuirea tuturor valorilor Zero (ZO) cu excepția centrului bazei de reguli.
41 În această manieră, baza de reguli P va trece pe valoarea ZO numai când sistemul s-a
stabilizat, ceea ce înseamnă că atât eroarea, cât și schimbările termenilor de eroare cores-
43 pund domeniului ZO. Pentru un anume set de intrări, de exemplu abaterea măsurată, eva-
luarea regulilor fuzzy produce un set fuzzy de grade de apartenență pentru acțiuni de control.
45 Pentru a lua o acțiune concretă trebuie aleasă una dintre aceste valori. În această aplicație,
a fost selectată valoarea de control cu cel mai mare grad de apartenență. Regulile sunt eva-
47 luate la intervale egale, în același fel ca un sistem de control convențional. Fig. 5...8 prezintă
setul funcțiilor de apartenență pentru intrări și ieșiri.

RO 125970 B1

Un modul de substituție inversă a poziției **MSIP** primește un semnal pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor **RP** corespunzător matricei triangularizate de poziție de la modulul de triangularizare matrice de poziție **MTMP**, care, la rândul său, primește semnalele corespunzătoare matricei de poziție Jacobiene de la modulul matricei de poziție Jacobiene **MMPJ**, și care realizează împreună calculul matricei inverse Jacobiene, în timp real, pe toate gradele de libertate ale robotului pășitor **RP**.

Un modul al matricei de poziție **MMPJ**, care, în funcție de etapa pasului complet al robotului pășitor **RP** generat de modulul programator de strategii **MPS**, primește valorile corespunzătoare poziției în spațiul de mișcare al robotului pășitor **RP**, pe fiecare grad de libertate, de la modulul de calcul al cinematicii directe a poziției **MCCDP** și semnalul de control poziție aterizare **SCPA**, de la modulul de control mișcare predictibilă **CMP**, calculează în timp real matricea de poziție Jacobiană și transmite aceste valori la modulul de triangularizare a matricei de poziție **MTMP**.

Pentru a exemplifica modul de calcul în timp real al matricei de poziție Jacobiene, matricea triangularizată, matricea de substituție inversă și matricea Jacobiană inversă, considerăm că unghiurile în coordonatele robot (θ_c) sunt transformate în coordonate Carteziene (X_c) prin transformata Denevit-Hartenberg cu matricele de transformare:

$${}^j P = {}^j A_{j+1} \cdot {}^{j+1} P \quad (1)$$

unde s-au notat: θ_j - unghiul în coordonate axiale, d_j - distanța reziduală (offset), a_j - lungimea axială, α_j - rotirea, ${}^j P$, iar ${}^{j+1} P$ reprezintă un punct în sistemul de coordonate ale axei j , respectiv al axei robot $j+1$.

Eroarea de poziție în coordonate Carteziene este obținută ca diferență între poziția de referință (dorită) și poziția curentă. Dificultatea în controlul traiectoriei robotului constă în aceea că pozițiile generate X_c și eroarea de poziție δX se dau în coordonate Carteziene, în timp ce măsurarea continuă a poziției robotului $\theta_{1,2,\dots,n}$ și eroarea unghiulară de comandă a actuatorului $\delta\theta_{1,2,\dots,n}$ trebuie date în coordonate robot. Relația între poziția și orientarea elementului efector al robotului, generată în coordonate Carteziene și unghiurile axelor în coordonate robot $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ este:

$$x_i = f_i \cdot (\theta) \quad (2)$$

unde θ este vectorul care reprezintă poziția unghiulară pe toate gradele de libertate, exprimat în coordonate robot. Prin diferențiere, se obține, pentru $n = 6$:

$$\delta^6 X_6 = J(\theta) \cdot \delta\theta_{1,2,\dots,6} \quad (3)$$

unde $\delta^6 X_6$ reprezintă aplicarea operatorului diferențial la schimbările liniare și unghiulare ale poziției curente X_c a elementului efector exprimat în coordonate Carteziene, iar $\delta\theta$ reprezintă aplicarea operatorului diferențial la setul de unghiuri exprimate în coordonate robot $J(\theta)$ este matricea Jacobiană în care elementele a_{ij} satisfac relația:

$$a_{ij} = \frac{\delta \cdot f_{i-1}}{\delta\theta_{j-1}} \quad (4)$$

unde i, j corespund vectorilor x , respectiv θ . Matricea Jacobiană inversă transformă poziția curentă din coordonate Carteziene $\delta^6 X_6$, respectiv δX , în eroare unghiulară corespunzătoare coordonatelor robot $\delta\theta$, conform relației:

$$\delta\theta_{1,2,\dots,n} = J^{-1}(\theta) \cdot \delta^6 X_6 \quad (5)$$

RO 125970 B1

1 Calculul Jacobianului constă în multiplicări consecutive ale matricei X_c corespunzătoare transformatei Denevit-Hartenberg a manipulatorului. Metoda eliminărilor Gaussiene asigură o implementare eficientă în calculul matricei inverse. Metoda constă în reducerea matricei $J(\theta)$ la o formă triangulară superioară și calcularea erorii $\delta\theta$ în coordonate robot, folosind substituția inversă. Vectorul erorii unghiulare $\delta\theta$ este folosit ca un semnal de control direct pentru acționarea actuatorilor robotului.

7 Un modul sumator de poziție **MSP** primește valorile matricei de poziție în spațiul de mișcare robot X_p , pe fiecare grad de libertate, de la modulul de calcul al cinematicii directe a poziției **MCCDP** și poziția de referință (dorită) X_D , corespunzător semnalului **ISCBMx** de la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**, și calculează eroarea de poziție în spațiul de mișcare al robotului pășitor **RP** ca diferență între cele două semnale de intrare, pe fiecare axă de mișcare robot, pe care o transmite la modulul matricei de selecție poziție **MMSP**, care, la rândul său, transmite aceste valori la modulul de substituție inversă a poziției **MSIP** numai pe axele pe care urmează să se asigure controlul în poziție stabilite de modulul programator de strategii **MPS**.

17 Un modul de calcul al cinematicii directe de poziție **MCCDP** primește poziția pe axele robot $\Theta_{P_{ni}}$ de la traductoarele incrementale de poziție, pe fiecare axă n de mișcare a robotului, calculează în timp real poziția în spațiul de mișcare robot X_p , pe fiecare grad de libertate, pe care o transmite la un modul sumator de poziție **MSP**.

21 Un modul de substituție inversă a forței **MSIF** primește un semnal pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor **RP**, corespunzător matricei triangularizate de forță de la modulul de triangularizare matrice de forță **MTMF**, care, la rândul său, primește semnalele corespunzătoare matricei de forță Jacobiene de la modulul matricei de forță Jacobiene **MMFJ**, și care realizează împreună calculul matricei inverse Jacobiene, în timp real, pe toate gradele de libertate ale robotului pășitor **RP**.

27 Un modul al matricei de forță **MMFJ**, care, în funcție de etapa pasului complet de robot pășitor **RP** generat de modulul programator de strategii **MPS**, primește valorile corespunzătoare forței în spațiul de mișcare al robotului pășitor **RP**, pe fiecare grad de libertate, de la modulul de calcul al cinematicii directe a forței **MCCDF** și semnalul de control **2SCBMx** de la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**, calculează în timp real matricea de forță Jacobiană și transmite aceste valori la modulul de triangularizare a matricei de forță **MTMF**.

33 Un modul sumator de forță **MSF** primește valorile matricei de poziție datorate forței X_F în spațiul de mișcare al robotului pășitor **RP, pe fiecare grad de libertate, de la modulul de calcul al cinematicii directe a forței **MCCDF** și forța de referință (dorită) X_{DF} de la modulul de calcul al matricei de rigiditate **MCMR**, și calculează eroarea de poziție datorată forței în spațiul de mișcare al robotului pășitor **RP** ca diferență între cele două semnale de intrare, pe fiecare axă de mișcare robot, pe care o transmite la modulul matricei de selecție forță **MMSF**, care, la rândul său, transmite aceste valori la modulul de substituție inversă a forței **MSIF** numai pe axele pe care urmează să se asigure controlul în forță, stabilite de modulul programator de strategii **MPS**.**

41 Un modul de calcul al cinematicii directe de poziție datorate forței **MCCDF** primește forțele f_i din articulațiile robotului, pe fiecare axă n de mișcare a robotului, și calculează în timp real poziția datorată forței în spațiul de mișcare robot X_F , pe fiecare grad de libertate, pe care o transmite la un modul sumator de forță **MSF**.

45 Un modul de calcul al matricei de rigiditate **MCMR** primește un semnal de referință forța f_{ref} de la generatorul schemei de mers **GSM** și generează, în timp real, un semnal al forței de referință (dorită) X_{DF} , determinată ca înmulțire între rigiditatea fizică a fiecărui segment de picior corespunzător articulației și forța reziduală dorită pe fiecare axă de libertate a robotului, pe care îl transmite la un modul sumator de forță **MSF**.

RO 125970 B1

Un exemplu de modelare pentru controlul hibrid forță-poziție este prezentat în continuare. Astfel, un sistem de comandă hibrid poziție-forță realizează în mod normal controlul simultan al poziției și al forței. Pentru a determina relațiile de control în această situație, împărțim ΔX_p , deviația măsurată de sistemul de comandă în coordonate Carteziene, în două seturi: ΔX^F - corespunzătoare componentei controlate prin forță; ΔX^P - corespunzătoare controlului în poziție cu acționare pe axe, conform matricelor de selecție S_f și S_x . Dacă se consideră numai controlul de poziție pe direcțiile stabilite de matricea de selecție S_x , se pot determina atât mișcările diferențiale dorite ale elementului final de execuție corespunzătoare controlului în poziție din relația:

$$\Delta X_p = K_p \Delta X^P, \quad (6)$$

unde K_p este matricea câștigului, cât și unghiurile mișcării dorite pe axele controlate în poziție:

$$\delta\theta_p = J^{-1}(\theta) * \Delta X_p \quad (7)$$

În continuare, luând în considerare și controlul forței pe celelalte direcții rămase, relația între mișcarea unghiulară dorită a end-efectorului și eroarea de forță ΔX_f este dată de relația:

$$\delta\theta_f = J^{-1}(\theta) * \Delta X_f, \quad (8)$$

unde eroarea de poziție datorată forței ΔX_f este diferența de mișcare între ΔX^F - deviația poziției curente măsurată de sistemul de comandă care generează deviația de poziție pentru axele controlate în forță și ΔX_D - deviația în poziție datorată forței reziduale dorite. Notând F_D - forța reziduală dorită, și K_w - rigiditatea fizică, se obține relația:

$$\Delta X_D = K_w^{-1} * F_D \quad (9)$$

Astfel, ΔX_f se poate calcula din relația:

$$\Delta X_f = K_f (\Delta X^F - \Delta X_D) \quad (10)$$

unde K_f este relația dimensională a matricii de rigiditate. În final, rezultă variația de mișcare pe axele robot raportate la variația mișcării la elementul de execuție după relația:

$$\Delta\theta = J^{-1}(\theta) \Delta X_f + J^{-1}(\theta) \Delta X_p, \quad (11)$$

Un modul de control balans în timp real **CBTR** primește un semnal al punctului de moment zero (**PMZ**) de la robotul pășitor **RP** și de la momentele din articulațiile robotului **M**, pe fiecare axă de mișcare a robotului și conform metodei de control din prezenta invenție generează un semnal de control al amortizării **SCA**, un semnal de control de compensare a punctului de moment zero **SC-PMZ** și un semnal de control al orientării la aterizare **SCOA** la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**.

Un exemplu de strategie de control al amortizării la pășirea robotului pășitor în faza de suport unic, prin modelarea mișcării robotului cu ecuația unui pendul simplu inversat cu o articulație în faza cu un suport unic, care se opune forțelor de amortizare ale articulației piciorului, este prezentat în fig. 9, care conduce la relațiile:

RO 125970 B1

$$1 \quad T = mgl\theta - ml^2\ddot{\theta} = K(\theta - u) \quad (12)$$

$$3 \quad \text{respectiv} \quad u_c = u - k_d \hat{\theta} \quad (13)$$

5 unde $\alpha = K/ml^2$ -- g/l , $\beta = K/ml^2$, k_d , este amplificarea de control a amortizării, u_c este un
7 unghi al articulației compensate, l este distanța de la pământ la centrul masei, m este masa
9 echivalentă, u este unghiul articulației de referință, θ este valoarea actuală a unghiului arti-
culației datorate complianței, K este rigiditatea piciorului, T este cuplul măsurat și g este
accelerația datorată gravitației. Prin modelare, se obține schema de control din fig. 10.

11 Un exemplu al strategiei de control de compensare a punctului de moment zero,
13 într-o singură fază, cea de suport unic, datorată mișcării platformei înainte și înapoi conform
dinamicii punctului de moment zero, care constă în modelarea matematică a mișcării unui
15 compensator a momentului de punct zero cu ecuația unui pendul simplu inversat, conduce
la relația:

$$17 \quad Y_{ZPM} = Y_{platforma} - \frac{l}{g} \ddot{Y}_{platforma} \quad (14)$$

19 unde $Y_{platforma}$ este deplasarea laterală a platformei, l este distanța de la pământ la centru, g
este accelerația datorată gravitației și Y_{ZMP} este Z_{MP} lateral.

21 Diagrama bloc a controlului ZMP în bucla de reacție este prezentată în fig. 11 în care
23 ZMP_{ref} este referința ZMP, $C(s)$ este compensatorul și $G(s)$ este funcția de transfer, $u_{platforma}$
și u_{comp} reprezintă deplasarea prescrisă și, respectiv, deplasarea compensatorie a platformei
pe planul transvers.

25 Strategia de control al orientării la aterizare se obține prin diferența între unghiul de
referință al articulației piciorului și unghiul de referință compensat al articulației piciorului
27 calculat prin integrarea cuplului măsurat pe întreaga durată a pășirii cu o constantă de timp
dată de coeficientul de amortizare la aterizare și rigiditatea pășirii, conform relației:

$$29 \quad u_c = u + \frac{T(s)}{C_L s + K_L} \quad (15)$$

31 unde T este cuplul măsurat, C_L este coeficientul de amortizare, K_L este rigiditatea, u este
33 unghiul de referință al articulației piciorului și u_c este unghiul de referință compensat al
articulației piciorului.

35 Un modul de control al schemei de mers **CSM** primește un semnal de la traductorul
de inerție **TINL** care măsoară poziția unghiulară și viteza platformei, un semnal al punctului
37 de moment zero **PMZ** și, conform metodei de control din prezenta invenție, generează un
semnal de control de rotire/avans platformă **SCRA** și un semnal de control amplitudine
39 balans platformă **SCAB** la generatorul schemei de mers **GSM**.

41 Strategia de control de rotire/avans platformă permite ca poziția centrală a platformei
să se mute în direcția opusă față de partea înclinată pe planul transversal, astfel încât
43 mișcările de legănare să poată fi bine balansate, cu obținerea vectorului de poziție al
platformei printr-o relație iterativă de integrare a vectorului erorilor unghiulare ale platformei
între fazele de suport unic, amplificat cu un coeficient de câștig determinat experimental.

45 Strategia de control amplitudine balans platformă pentru a muta punctul de moment
zero, corectat prin măsurarea punctului de moment zero în timpul fiecărui ciclu de mers, se
47 realizează prin modelarea amplitudinii balansului lateral al platformei printr-un pendul invers

și obținută printr-un algoritm de compensare a poziției picioarelor care au contact cu solul, astfel încât amplitudinea punctului de moment zero actual (măsurată) să poată converge spre punctul de moment zero mediu de referință. Modelarea mișcării robotului pășitor în această situație se poate realiza cu relația:

$$Y_{ZMP} = Y_{platforma} - \frac{l}{g} \ddot{Y}_{platforma} \quad (16)$$

cu aceleași notații ca în relația (14), cu diferența că se referă la deplasarea laterală a platformei robotului pășitor.

Un modul de control al mișcării predictibile **CMP** primește un semnal de la traductorul de inerție **TINL** și un semnal de la traductorul de înclinare **TINC** care măsoară înclinarea și accelerația piciorului față de terenul pe care pășește robotul și, conform metodei de control din prezenta invenție, generează un semnal de control al poziției de aterizare **SCSA** la un modul sumator de poziție **MSP** și un semnal de control al aplecării **SCPA** peste marginea de siguranță a robotului pășitor **RP** la un modul al matricei de poziție **MMPJ**.

Strategia de control al poziției de aterizare constă în generarea unor mișcări probabile ale robotului prin prelucrarea unor mișcări anterioare cu rolul de a evita mișcărilor anormale, are ca scop pășirea spre direcția de cădere, printr-o mișcare de torsiune a platformei, obținută prin suprapunerea unei legi de mișcare determinate experimental pe mișcarea normală în jurul axei z a piciorului robotului, în care vectorul de poziție al piciorului în faza de aterizare se determină ca o relație iterativă prin adăugarea la vectorul prescris a poziției de aterizare a unui vector de eroare, obținut prin înmulțirea cu un factor de amplificare între vitezele unghiulare medii și vitezele unghiulare stabile a mișcării de avans, respectiv de torsiune.

Strategia de control al aplecării peste marginea de siguranță a robotului, care constă în anticiparea mișcărilor robotului în baza unor informații experimentale statistice, cu respectarea marginilor de stabilitate, prevenirea condițiilor anormale și procesarea unor mișcări adiționale, pentru evitarea acestor instabilități care pot conduce la răsturnarea robotului în cazul deplasării pe un teren denivelat sau a unor forțe externe, și permite determinarea în timp real a depășirii marginilor de înclinare spre interior, respectiv exterior, prin integrarea iterativă a unghiului de rotire în mișcarea de torsiune a platformei pe o durată τ de la startul începerii fiecărei faze de mers, iar dacă are loc depășirea marginilor de înclinare, unghiul de rotire al articulației piciorului este compensat printr-un algoritm predefinit în funcție de valoarea unghiului de rotire în mișcarea de torsiune a platformei. Legea controlului aplecării pentru piciorul drept cu unghiul de rotire prescris al articulației piciorului se determină după relațiile:

$$\begin{aligned} \text{Dacă: } \int_{Faza1,s}^{Faza1,\tau} \theta_r^{tors} dt > V_{inclinare,ext} & \quad , \text{ la înclinarea spre exterior și} \\ \int_{Faza1,s}^{Faza1,\tau} \theta_r^{tors} dt < V_{inclinare,int} & \quad , \text{ la înclinarea spre interior, atunci:} \\ \theta_{m,r}^{R-ungghi}(t) = \theta_r^{R-ungghi}(t) A_R(M_R) \sin\left(2\pi \frac{t_c}{\tau}\right) (grade) & \quad \left(0 \leq t_c \leq \frac{\tau}{2}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

unde:

$$M_R = \int_{Faza1,s}^{Faza1,\tau} \theta_r^{torso} dt (grade), V_{inclinare,ext} = 20, V_{inclinare,int} = 0, V_{inclinare,ext} \text{ si } V_{inclinare,int}$$

RO 125970 B1

1 sunt valorile în care apar salturi ale valorilor înclinărilor spre exterior și, respectiv, spre inte-
rior, τ' este durata controlului aplecării, θ_r^{torso} este unghiul de rotire în mișcarea de torsiune,
3 A_R este amplitudinea compensării sinusoidale și $\theta_{m,r}^{R-unghi}$ este unghiul de rotire prescris al
articulației piciorului.

5 Un modul de generare a schemei de mers **GSM** primește un semnal de control de
rotire/avans platformă **SCRA** și un semnal de control amplitudine balans platformă **SCAB**
7 de la un modul de control al schemei de mers **CSM** și, conform metodei de control din
prezenta invenție, precum și al unui portofoliu de programe cu scheme de mers predefinit,
9 cum ar fi mersul tripod la un robot pășitor hexapod, mersul pas cu pas, generează un semnal
de referință forță f_{ref} la un modul de calcul al matricei de rigiditate **MCMR** și un semnal al
11 poziției de referință (dorită) X_D la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**.

Un modul de control repetabilitate la aterizare **CRA** primește semnalele de forță f_i de
13 la robotul pășitor **RP**, pe fiecare axă de mișcare, și, conform metodei de control din prezenta
invenție, generează la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX** un semnal de blocare
15 a schemei de mers, dacă piciorul nu ia contact cu pământul la sfârșitul fazelor de suport unic,
cu întreruperea semnalului de referință de poziție furnizat de generatorul de mers și oprirea
17 comenzii de mișcare a piciorului până acesta, în virtutea inerției, ia contact cu pământul.

Un modul de control la detecția unui pas de mișcare robot **DPR** primește semnalele
19 de forță f_i de la robotul pășitor **RP**, pe fiecare axă de mișcare, și, conform metodei de control
din prezenta invenție, generează, la modulul cu control digital cu multiplexare **MUX**, un
21 semnal la detectarea atingerii pământului de către piciorul robotului în fazele de dublu suport
cu multiplexarea semnalului de eroare rezultat din strategia de control al amortizării și
23 semnalul de eroare rezultat din strategia de control de compensare a punctului de moment
zero cu semnalul de eroare rezultat din strategia de control al orientării la aterizare, conform
25 etapelor din modulul programator de strategii **MPS**.

Un modul cu control digital cu multiplexare **MUX** primește trei semnale analogice,
27 respectiv un semnal de control al amortizării **SCA**, un semnal de control de compensare a
punctului de moment zero **SC-PMZ** și un semnal de control al orientării la aterizare **SCOA**
29 de la un modul de control balans în timp real **CBTR**, multiplexare de două semnale primite
de la un modul de control repetabilitate la aterizare **CRA** și de la un modul de controlul la
31 detecția unui pas de mișcare robot **DPR**, și, conform programatorului de strategii **MSP**,
generează trei semnale de control balans multiplexat **ISCBMx-3SCBMx**.

1. Metoda pentru controlul dinamic al unui robot pășitor, **caracterizată prin aceea** 3
că, pentru controlul hibrid, în timp real, a poziției traiectoriei de mișcare a vârfurilor și articu- 5
 lațiilor picioarelor unui robot pășitor, conține 14 etape, prin care se calculează:
- i) eroarea datorată componentei de poziție $\Delta\Theta_p$ pe axele de libertate robot corespun- 7
 zătoare articulațiilor picioarelor robotului pășitor (**RP**) care se obține prin înmulțirea matricei 9
 erorii de poziție (X_p) în spațiul de mișcare al robotului, datorate diferenței între traiectoria 11
 dorită și traiectoria reală, determinată prin măsurarea semnalelor de poziție primite de la arti- 13
 culațiile picioarelor robotului pășitor (**RP**), aplicate matricei rezultate din cinematica directă 15
 a structurii mecanice robot, cu valorile matricei cinematice inverse a structurii mecanice 17
 robot, valori matriciale obținute la rândul lor într-un proces simultan cu cel al determinării 19
 matricei erorii de poziție în spațiul robot, prin procesarea matricei Jacobiene cu valorile reale 21
 primite de la articulațiile picioarelor robotului, triangularizarea matricei astfel determinate și 23
 realizarea substituției inverse;
- ii) eroarea datorată componentelor de forță $\Delta\Theta_f$ pe axele de libertate robot corespun- 17
 zătoare articulațiilor picioarelor robotului (**RP**), care se obține prin înmulțirea între matricea 19
 erorii de poziție în spațiul de mișcare al robotului datorate forței, determinată ca diferența de 21
 mișcare între deviația poziției curente, măsurată de sistemul de comandă, care generează 23
 deviația de poziție pentru axele controlate în forță și deviația în poziție datorată forței 25
 reziduale dorite, determinată ca înmulțire între rigiditatea fizică a fiecărui segment de picior, 27
 corespunzător articulației și forței reziduale dorite pe fiecare axă de libertate a robotului, cu 29
 valorile matricei cinematice inverse a structurii mecanice robot, valori matriciale obținute, la 31
 rândul lor, într-un proces simultan cu cel al determinării matricei erorii de poziție în spațiul 33
 robot datorate forței, prin procesarea matricei Jacobiene cu valorile reale primite de la articu- 35
 lațiile picioarelor robotului, triangularizarea matricei astfel determinate și realizarea substi- 37
 tuției inverse, la care se adaugă erorile determinate prin aplicarea unor strategii de control 39
 ale unui mers dinamic stabil al robotului pășitor (**RP**), cum ar fi:
- iii) eroarea rezultată din strategia de control al amortizării (**SCA**), la pășirea robotului 29
 pășitor (**RP**) în faza de suport unic, prin modelarea mișcării robotului cu ecuația unui pendul 31
 simplu inversat, cu o articulație în faza cu suport unic, care se opune forțelor de amortizare 33
 ale articulației piciorului;
- iv) eroarea rezultată din strategia de control de compensare a punctului de moment 33
 zero (**SC-PMZ**), într-o singură fază, cea de suport unic, datorată mișcării platformei înainte 35
 și înapoi conform dinamicii punctului de moment zero, care constă în modelarea matematică 37
 a mișcării unui compensator a momentului de punct zero cu ecuația unui pendul simplu 39
 inversat;
- v) eroarea rezultată din strategia de control al orientării la aterizare (**SCOA**), obținut 39
 prin diferența între unghiul de referință al articulației piciorului și unghiul de referință compen- 41
 sat al articulației piciorului, calculat prin integrarea cuplului măsurat pe întreaga durată a 43
 pășirii cu o constantă de timp dată de coeficientul de amortizare la aterizare și rigiditatea 45
 pășirii;
- vi) eroarea rezultată din strategia de control amplitudine balans platformă (**SCAB**) 43
 pentru a muta punctul de moment zero, corectat prin măsurarea punctului de moment zero 45
 în timpul fiecărui ciclu de mers, realizată prin modelarea amplitudinii balansului lateral al plat- 47
 formei printr-un pendul invers și obținută printr-un algoritm de compensare a poziției picioa-
 relor care au contact cu solul, astfel încât amplitudinea punctului de moment zero actual
 (măsurată) să poată converge spre punctul de moment zero mediu de referință;

RO 125970 B1

1 vii) eroarea rezultată din strategia de control de rotire/avans platformă (**SCRA**) care
2 permite ca poziția centrală a platformei să se mute în direcția opusă față de partea înclinată
3 pe planul transversal, astfel încât mișcările de legănare să poată fi bine balansate, cu obține-
4 rea vectorului de poziție al platformei, printr-o relație iterativă de integrare a vectorului erorilor
5 unghiulare ale platformei, între fazele de suport unic, amplificat cu un coeficient de câștig
6 determinat experimental;

7 viii) eroarea rezultată din strategia de control al poziției de aterizare (**SCPA**), constă
8 în generarea unor mișcări probabile ale robotului pășitor (**RP**) prin prelucrarea unor mișcări
9 anterioare cu rolul de a evita mișcările anormale, are ca scop pășirea spre direcția de
10 cădere, printr-o mișcare de torsiune a platformei, obținută prin suprapunerea unei legi de
11 mișcare determinate experimental, pe mișcarea normală în jurul axei z a piciorului robotului,
12 în care vectorul de poziție al piciorului, în faza de aterizare, se determină ca o relație itera-
13 tivă, prin adăugarea la vectorul prescris a poziției de aterizare a unui vector de eroare,
14 obținut prin înmulțirea cu un factor de amplificare între vitezele unghiulare medii și vitezele
15 unghiulare stabile a mișcării de avans, respectiv de torsiune;

16 ix) eroarea rezultată din strategia de control a aplecării peste marginea de siguranță
17 a robotului (**SCSA**), care constă în anticiparea mișcărilor robotului pășitor (**RP**), în baza unor
18 informații experimentale statistice, cu respectarea marginilor de stabilitate, prevenirea condi-
19 țiilor anormale și procesarea unor mișcări adiționale, pentru evitarea acestor instabilități care
20 pot conduce la răsturnarea robotului, în cazul deplasării pe un teren denivelat sau a unor
21 forțe externe, și permite determinarea în timp real a depășirii marginilor de înclinare spre
22 interior, respectiv exterior, prin integrări iterative ale unghiului de rotire în mișcarea de
23 torsiune a platformei pe o durată τ de la startul începerii fiecărei faze de mers, iar dacă are
24 loc depășirea marginilor de înclinare, unghiul de rotire a articulației piciorului este compensat
25 printr-un algoritm predefinit în funcție de valoarea unghiului de rotire în mișcarea de torsiune
26 a platformei, în care unele semnale de eroare sunt controlate digital cu multiplexarea lor
27 după două strategii de control, astfel:

28 x) controlul la detecția unui pas de mișcare robot (**DPR**), în care la detectarea atin-
29 gerii pământului de către piciorul robotului pășitor (**RP**), în fazele de dublu suport, pentru o
30 atingere fără șocuri, are loc multiplexarea semnalului de eroare rezultat din strategia de
31 control al amortizării și semnalul de eroare rezultat din strategia de control de compensare
32 a punctului de moment zero, cu semnalul de eroare rezultat din strategia de control a orien-
33 tării la aterizare, conform etapelor din modulul programator de strategii;

34 xi) controlul repetabilității la aterizare (**CRA**), care evită instabilitățile mișcării robotului
35 pășitor (**RP**) la aterizare, prin generarea unui semnal de blocare a schemei de mers, dacă
36 piciorul nu ia contact cu pământul la sfârșitul fazelor de suport unic, cu întreruperea
37 semnalului de referință poziție furnizat de generatorul de mers și oprirea comenzii de mișcare
38 a piciorului până când acesta, în virtutea inerției, ia contact cu pământul;

39 la care se adaugă două programe:

40 xii) un programator de strategii (**MPS**) al momentelor acționării fiecărei strategii de
41 control raportate la 4 etape ale unui pas complet de robot pășitor (**RP**), cu funcțiile: în etapa
42 1 se realizează controlul amortizării, controlul compensării punctului de moment zero și con-
43 trolul aplecării peste marginea de siguranță, în etapa 2, în faza de suport unic, are loc contro-
44 lul amortizării, controlul compensării punctului de moment zero și controlul poziției de ateriz-
45 zare, în etapa 2, în faza de dublu suport, are loc controlul orientării la aterizare, controlul
46 ajustării periodice a amplitudinii balansului lateral al platformei, controlul de rotire/avans plat-
47 forma și controlul poziției de aterizare, etapa 3 care corespunde etapei 1, și etapa 4 care
48 corespunde etapei 2, cu menținerea continuă a semnalelor de eroare datorate componentei
49 de poziție și componentei de forță;

RO 125970 B1

xiii) un program de generare a schemei de mers (GSM) a robotului pășitor (RP), generează un semnal de referință forță (f_{ref}) și un semnal al poziției de referință (X_D), conform strategiei de control de rotire/avans platformă și strategiei de control amplitudine balans platformă, precum și al unui portofoliu de programe cu scheme de mers predefinit, cum ar fi mersul tripod la un robot pășitor hexapod, mersul pas cu pas;	1 3 5
xiv) astfel că în final, prin procesarea semnalelor de eroare utilizând fuziunea semnalelor rezultate din programatorul de strategii se obține semnalul de eroare pentru comanda actuatorilor structurii robotului pășitor (RP) pe fiecare axă de mișcare.	7
2. Dispozitiv pentru controlul dinamic al unui robot pășitor, caracterizat prin aceea că are în alcătuire:	9
i) un modul programator de strategii (MPS) care primește câte un semnal pe fiecare grad de libertate al robotului pentru semnalele de eroare ale componentelor de poziție $\Delta\Theta_p$ de la un modul de substituție inversă a poziției (MSIP) și semnale de eroare ale componentei de forță $\Delta\Theta_f$ de la un modul de substituție inversă a forței (MSIF), un semnal de control supra-aplecare (SCSA) de la un modul de control mișcare predictibilă (CMP) și un semnal control balans multiplexat (2SCBMx) de la un modul cu control digital cu multiplexare (MUX), transmite la ieșire un semnal de eroare de etapă (SEE) și stabilește momentele acționării fiecărei strategii de control raportate la 4 etape ale unui pas complet de robot pășitor (RP), conform funcțiilor din metoda de control din prezenta invenție;	11 13 15 17 19
ii) un modul de fuziune semnale sau fuzzy control (MFSFC) care primește un semnal de eroare de etapă (SEE) de la un modul cu control digital cu multiplexare (MUX) și transmite un semnal de eroare pe axele robot ϵ_n pe fiecare grad de libertate al unui robot pășitor (RP) prin procesarea acestuia prin metoda de fuziune a semnalelor sau prin metoda de control fuzzy;	21 23
iii) un modul de substituție inversă a poziției (MSIP) care primește un semnal pe fiecare grad de libertate al robotului pășitor (RP) corespunzător unei matrici triangularizate de poziție de la modulul de triangularizare matrice de poziție (MTMP), care, la rândul său, primește niște semnale corespunzătoare matricii de poziție Jacobiene de la un modul matrice de poziție Jacobiene (MMPJ), și care realizează împreună calculul matricii inverse Jacobiene, în timp real, pe toate gradele de libertate ale robotului pășitor (RP);	25 27 29
iv) un modul al matricii de poziție (MMPJ), care, în funcție de etapa din pasul complet al robotului pășitor (RP), generat de un modul programator de strategii (MPS), primește valorile corespunzătoare poziției în spațiul de mișcare al robotului pășitor (RP), pe fiecare grad de libertate, de la un modul de calcul cinematică directă a poziției (MCCDP) și un semnal de control a poziției aterizare (SCPA) de la un modul de control mișcare predictibilă (CMP), calculează în timp real matricea de poziție Jacobiană și transmite aceste valori la un modul de triangularizare a matricii de poziție (MTMP);	31 33 35 37
v) un modul sumator de poziție (MSP) care primește valorile matricii de poziție într-un spațiul de mișcare robot (X_p), pe fiecare grad de libertate, de la un modul de calcul cinematică directă a poziției (MCCDP) și o poziție de referință (dorită) (X_D) corespunzătoare unui semnal (ISCBMx) de la un modul cu control digital cu multiplexare (MUX), și calculează o eroare de poziție în spațiul de mișcare al robotului pășitor (RP) ca diferență între cele două semnale de intrare, pe fiecare axă de mișcare robot, pe care o transmite la un modul matrici de selecție poziție (MMSP), care, la rândul său, transmite aceste valori la un modul de substituție inversă a poziției (MSIP) numai pe axele pe care urmează să se asigure controlul în poziție stabilite de un modul programator de strategii (MPS),	39 41 43 45

RO 125970 B1

1 vi) un modul de calcul al cinematicii directe de poziție (**MCCDP**) care primește poziția
pe axele robot $\Theta_{P_{ni}}$ de la niște traductoare incrementale de poziție, pe fiecare axă n de
3 mișcare a robotului, și calculează în timp real poziția în spațiul de mișcare robot (X_P), pe fie-
care grad de libertate, pe care o transmite la un modul sumator de poziție (**MSP**);

5 vii) un modul de substituție inversă a forței (**MSIF**) care primește un semnal pe fiecare
grad de libertate al robotului pășitor (**RP**) corespunzător matricei triangularizate de forță de
7 la un modul de triangularizare matrice de forță (**MTMF**), care, la rândul său, primește
semnalele corespunzătoare matricei de forță Jacobiene de la un modul matrice de forță
9 Jacobiene (**MMFJ**), și care realizează împreună calculul matricei inverse Jacobiene, în timp
real, pe toate gradele de libertate ale robotului pășitor (**RP**);

11 viii) un modul al matricei de forță (**MMF8J**), care, în funcție de etapa din pasul com-
plet al robotului pășitor (**RP**) generat de un modul programator de strategii (**MPS**), primește
13 valorile corespunzătoare forței în spațiul de mișcare al robotului pășitor (**RP**), pe fiecare grad
de libertate, de la un modul calcul cinematică directă a forței (**MCCDF**) și un semnal de con-
15 trol (**2SCBMx**) de la un modul cu control digital cu multiplexare (**MUX**), calculează în timp
real matricea de forță Jacobiană și transmite aceste valori la un modul de triangularizare a
17 matricei de forță (**MTMF**);

ix) un modul sumator de forță (**MSF**) care primește valorile matricei de poziție dato-
19 rate forței (X_F) în spațiul de mișcare al robotului pășitor (**RP**), pe fiecare grad de libertate, de
la un modul calcul cinematică directă a forței (**MCCDF**) și o forță de referință (dorită) (X_{DF})
21 de la un modul de calcul al matricei de rigiditate (**MCMR**), și calculează eroarea de poziție
datorată forței în spațiul de mișcare al robotului pășitor (**RP**) ca diferența între cele două
23 semnale de intrare, pe fiecare axă de mișcare robot, pe care o transmite la un modul matricei
de selecție forța (**MMSF**), care, la rândul său, transmite aceste valori la un modul de
25 substituție inversă a forței (**MSD7**) numai pe axele pe care urmează să se asigure controlul
în forță stabilite de un modul programator de strategii (**MPS**);

27 x) un modul de calcul al cinematicii directe de poziție datorate forței (**MCCDF**) care
primește forțele (f_i) din articulațiile robotului, pe fiecare axă (n) de mișcare a robotului,
29 calculează în timp real poziția datorată forței în spațiul de mișcare robot (X_F), pe fiecare grad
de libertate, pe care o transmite la un modul sumator de forță (**MSF**);

31 xi) un modul de calcul al matricei de rigiditate (**MCMR**) care primește un semnal de
referință forța (f_{ref}) de la un generator al schemei de mers (**GSM**) și generează, în timp real,
33 un semnal al forței de referință (dorită) (X_{DF}) determinată ca înmulțirea între rigiditatea fizică
a fiecărui segment de picior corespunzător articulației și forța reziduală dorită pe fiecare axă
35 de libertate a robotului pe care îl o transmite la un modul sumator de forță (**MSF**);

xii) un modul de control balans în timp real (**CBTR**) care primește un semnal al punc-
37 tului de moment zero (**PMZ**) de la robotul pășitor (**RP**) și de la niște momente din articulațiile
robotului (M_i) pe fiecare axă de mișcare a robotului și, conform metodei de control din pre-
39 zenta invenție, generează un semnal de control al amortizării (**SCA**), un semnal de control
de compensare a punctului de moment zero (**SC-PMZ**) și un semnal de control al orientării
41 la aterizare (**SCOA**) la un modul cu control digital cu multiplexare (**MUX**);

xiii) un modul de control al schemei de mers (**CSM**) care primește un semnal de la
43 un traductor de inerție (**TINL**) care măsoară poziția unghiulară și viteza platformei, un semnal
al punctului de moment zero (**PMZ**), și, conform metodei de control din prezenta invenție,
45 generează un semnal de control de rotire/avans platformă (**SCRA**) și un semnal de control
amplitudine balans platformă (**SCAB**) la un generator al schemei de mers (**GSM**);

RO 125970 B1

xiv) un modul de control al mișcării predictibile (CMP) care primește un semnal de la traductorul de inerție (TINL) și un semnal de la un traductor de înclinare (TINC) care măsoară înclinarea și accelerația piciorului față de terenul pe care pășește robotul și, conform metodei de control din prezenta invenție, generează un semnal de control al poziției de aterizare (SCSA) la un modul sumator de poziție (MSP) și un semnal de control a aplecării (SCPA) peste marginea de siguranță a robotului pășitor (RP) la un modul al matricei de poziție (MMPJ);	1 3 5 7
xv) un modul de generare a schemei de mers (GSM) care primește un semnal de control de rotire/avans platformă (SCRA) și un semnal de control amplitudine balans platformă (SCAB) de la un modul de control al schemei de mers (CSM) și, conform metodei de control din prezenta invenție, precum și al unui portofoliu de programe cu scheme de mers predefinit, cum ar fi mersul tripod la un robot pășitor hexapod, mersul pas cu pas, generează un semnal de referință forța (f_{ref}) la un modul de calcul al matricei de rigiditate (MCMR) și un semnal al poziției de referință (dorită) (X_D) la modulul cu control digital cu multiplexare (MUX);	9 11 13 15
xvi) un modul de control repetabilitate la aterizare (CRA) care primește niște semnale de forță (f_i) de la robotul pășitor (RP), pe fiecare axă de mișcare, și, conform metodei de control din prezenta invenție, generează la modulul cu control digital cu multiplexare (MUX) un semnal de blocare a schemei de mers, dacă piciorul nu ia contact cu pământul la sfârșitul fazelor de suport unic, cu întreruperea semnalului de referință de poziție furnizat de generatorul de mers și oprirea comenzii de mișcare a piciorului până acesta, în virtutea inerției, ia contact cu pământul;	17 19 21
xvii) un modul de controlul la detecția unui pas de mișcare robot (DPR) care primește niște semnale de forță (f_i) de la robotul pășitor (RP), pe fiecare axă de mișcare, și conform metodei de control din prezenta invenție generează la modulul cu control digital cu multiplexare (MUX) un semnal la detecție a atingerii pământului de către piciorul robotului în fazele de dublu suport cu multiplexarea semnalului de eroare rezultat din strategia de control a amortizării și un semnal de eroare rezultat din strategia de control de compensare a punctului de moment zero, cu semnalul de eroare rezultat din strategia de control al orientării la aterizare conform etapelor dintr-un modul programator de strategii (MPS);	23 25 27 29
xviii) un modul de control digital cu multiplexare (MUX) care primește trei semnale analogice, respectiv un semnal de control al amortizării (SCA), un semnal de control de compensare a punctului de moment zero (SC-PMZ) și un semnal de control al orientării la aterizare (SCOA), de la un modul de control balans în timp real (CBTR), multiplexare de două semnale primite de la un modul de control repetabilitate la aterizare (CRA) și de la un modul de controlul, la detecția unui pas de mișcare robot (DPR), și, conform programatorului de strategii (MSP), generează trei semnale de control balans multiplexat (ISCBMx-3SCBMx).	31 33 35 37

(51) Int.Cl.

B25J 9/16 (2006.01);

G05B 19/18 (2006.01);

G06F 17/10 (2006.01)

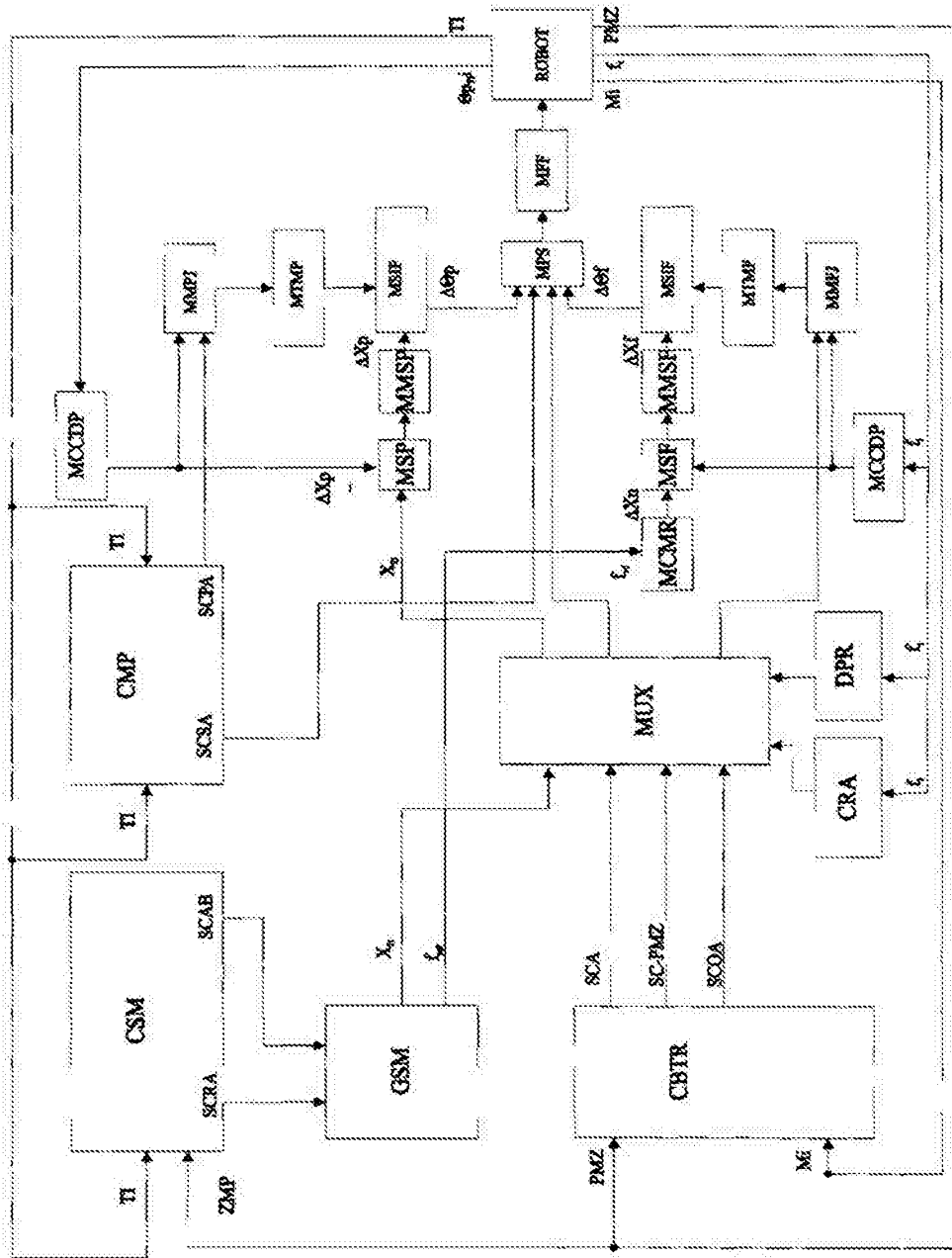


Fig. 1

(51) Int.Cl.

B25J 9/16 (2006.01);

G05B 19/18 (2006.01);

G06F 17/10 (2006.01)

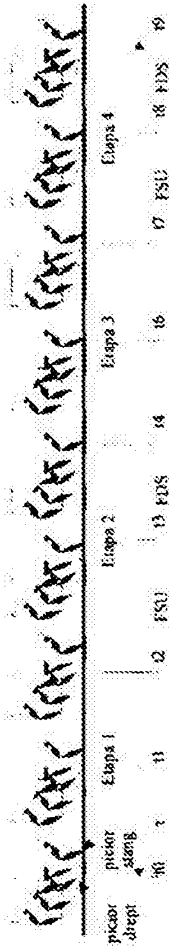


Fig. 2

Valoarea fuzzy P

	NM	NM	Nm	ZO	Pm	PM
NM	NM	NM	Nm	NM	Pm	PM
NM	NM	Nm	Nm	Nm	Pm	PM
NM	NM	Nm	Nm	Nm	Pm	PM
ZO	NM	Nm	Nm	ZO	Pm	PM
Pm	NM	Nm	Nm	Pm	Pm	PM
Pm	NM	Nm	Nm	Pm	Pm	PM
PM	NM	Nm	Nm	PM	Pm	PM

Δe

	NM	Nm	ZO	Pm	PM
NM	NM	NM	Nm	Pm	PM
NM	NM	Nm	Nm	Pm	PM
NM	NM	Nm	Nm	Pm	PM
ZO	NM	Nm	ZO	Pm	PM
Pm	NM	Nm	Pm	PM	PM
Pm	NM	Nm	Pm	PM	PM
PM	NM	Nm	PM	PM	PM

Fig. 4

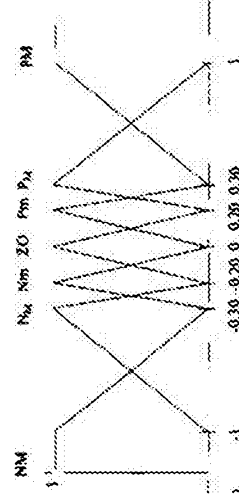


Fig. 6

Fig. 3

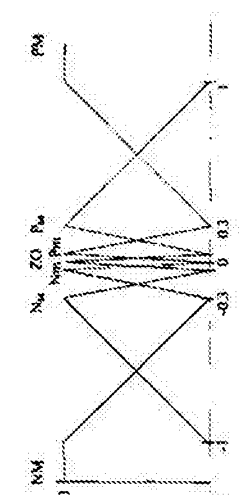


Fig. 5

(51) Int.Cl.

B25J 9/16 (2006.01);

G05B 19/18 (2006.01);

G06F 17/10 (2006.01)

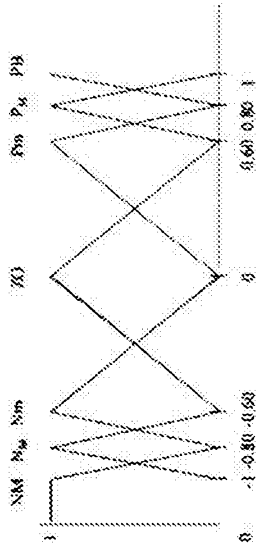


Fig. 8

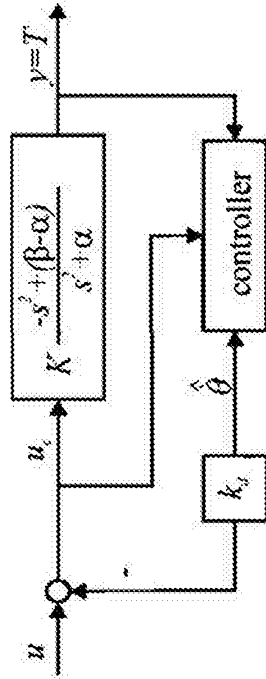


Fig. 10

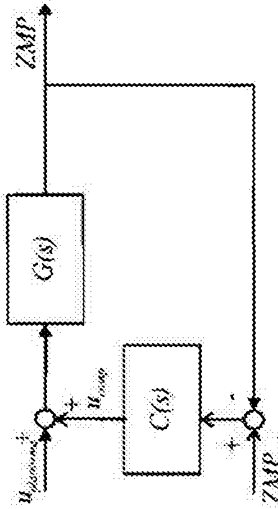


Fig. 11

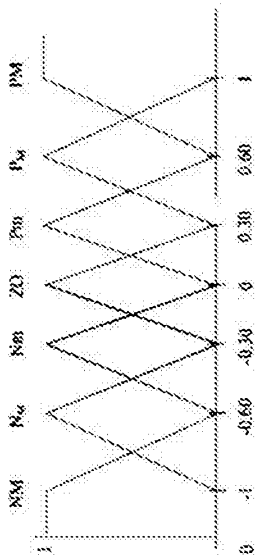


Fig. 7

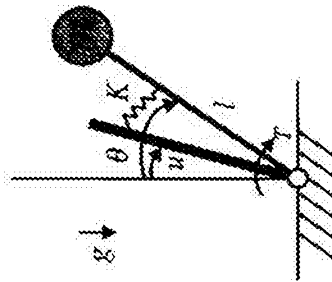


Fig. 9

