

多関節構造を有する機械の軌道生成に関する考察*

宋 禄波** 神谷好承*** 関 啓明*** 疋津正利*** 張 勤***

A Study on Trajectory Generation for a Multi-Joint Robot

Lubo SONG, Yoshitsugu KAMIYA, Hiroaki SEKI, Masatoshi HIKIZU and Qin ZHANG

For a multi-joint robot, desired operations can be realized by dexterously controlling its link postures. Especially for a stance robot with multiple joints, it is possible to select a trajectory that consists of many link postures, each of which makes the load torque of all the joints as low as possible even with the limitation of no turnover. In this paper, based on the idea above, firstly the trajectories of a stance robot(3 axes) in the sit-to-stand and the squat-to-stand movements are generated with the only consideration of their static influences. Then their dynamic performances, which are obtained by adding an adjustable time interval in any two consecutive link postures are analyzed.

Key words: multi-joint robot, stance robot, trajectory generation, standing movement

1. はじめに

多関節構造を有する立脚型ロボットにおいては、そのリンク姿勢を巧みに操作することにより所望の動作が得られる。立脚型ロボットの場合、まずロボット本体が転倒してしまうことがないように、また全関節にかかる負荷トルクができるだけ小さくなるようにリンク姿勢を選択することが可能である。本研究では多関節構造を有する立脚型ロボットの立ち上がり動作^{①-⑦}を一例として取り上げ、ロボットが椅子から立ち上がる動作、あるいはしゃがんだ状態から立ち上がる動作の生成に伴う各関節の軌道生成に関する考察を試みる。立脚型ロボットの立ち上がり動作の生成においてはロボット本体の重心がどの位置に存在しているかが重要な要点であり、ロボット本体の重心位置が不適当であればロボットは転倒することになる。またロボット本体の重心位置の推移によってはロボットの各関節にかかる負荷トルクをかなり小さくすることも可能になる。これより本研究では図1に示すような立脚型ロボット(3自由度)のモデルを考察の対象とし、多関節構造を有する機械においてその姿勢を制御し、ロボットが転倒しなく、かつ全関節にかかる負荷トルクをできるだけ小さくする姿勢を逐次選択するといった評価に基づいた各関節の軌道生成を試みる。

2. 多関節構造を有する立脚型ロボットのモデル

本研究では図1に示すような立脚型ロボットを考察の対象とする。図1のロボットは3つの関節を持ち、リンク1とリンク2が人間の脚部に、リンク3が人間の上半部に対応している。図1に示す立脚型ロボットの起動を考察の対象とした場合、本来は各リンクの持つ慣性を考慮に入れた動力学に基づいた議論を行うべきであるが、ロボットの持つ動力学的性質を含めた議論は複雑になりすぎることと、実際の立

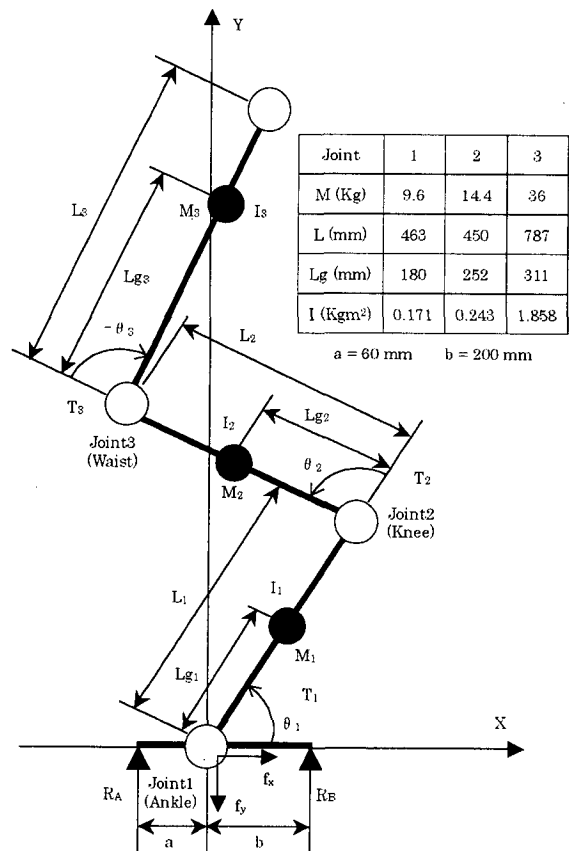


Fig.1 The model of a stance robot

脚型ロボットにおける各関節は減速機つきモータで駆動されることが多いため、本研究では十分にゆっくりとした立脚型ロボットの運動を扱うことを前提とする。このため、基本的には各リンクの持つ慣性力の影響を無視することとし、ロボットの持つ静力学的性質に基づいた議論から始めることとする。このとき、立脚型ロボットがその姿勢を維持するために各関節に作用する関節トルク(T_1 , T_2 , T_3)と足底部のつま先とかかとに作用する床反力(R_A , R_B)は次式のように与えられる。

* 原稿受付 平成 13 年 4 月 17 日
 ** 学生会員 金沢大学大学院(金沢市小立野 2-40-20)
 *** 正 会 員 金沢大学工学部

$$\left. \begin{aligned} T_3 &= M_3 L_{e3} g \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ T_2 &= (M_2 L_{e2} + M_3 L_2) g \cos(\theta_1 + \theta_2) + T_3 \\ T_1 &= [M_1 L_{e1} + (M_2 + M_3) L_1] g \cos \theta_1 + T_2 \\ R_A &= \frac{T_1 + b(M_1 + M_2 + M_3)g}{a + b} \\ R_B &= \frac{-T_1 + a(M_1 + M_2 + M_3)g}{a + b} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで立脚型ロボットが転倒しないためには、 $R_A > 0$ 、かつ $R_B > 0$ であることが必要である。これよりロボットが転倒しないためには足首部の関節に発生させ得るトルク T_1 にはその限界が存在することになる。

$$-b(M_1 + M_2 + M_3)g \leq T_1 \leq a(M_1 + M_2 + M_3)g \quad (2)$$

関節トルク T_2 と T_3 については任意に発生トルクの限界値を設定することができる。本研究では以下のような発生トルクの範囲を設けた場合を一つの基準として扱うこととする。

$$\left. \begin{aligned} |T_2| &\leq 200 \text{ Nm} \\ |T_3| &\leq 250 \text{ Nm} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これより、本研究では、まず最初に上式(1)に基づいた立脚型ロボットにおける各関節の軌道生成を試み、次に各リンクの持つ慣性力を考慮に入れた立ち上がり動作について考察することとする。

3. 繰返し順変換による立ち上がり動作の生成アルゴリズム

ロボットにおける各関節の軌道生成手法として遺伝的アルゴリズムを用いた研究^{9)~10)}がこれまでも数多くなされているが、遺伝的アルゴリズムでは軌道生成の評価に用いる適合度関数の与え方に多様性があり、適合度関数中の重み係数は計算結果を見ながら与えることが多い。本研究では各関節軌道の生成に用いる評価内容が力学的により直接的に与えられるように繰返し順変換¹¹⁾の手法を用いて解析することとする。これはロボットにおける順運動学を繰返し解き、そのとき用いる評価内容に最も適した解としての各関節の曲げ角を逐次選択していく手法であり、非常に容易に最終的なロボット姿勢に収束させられるごく単純なアルゴリズムである。

以下に繰返し順変換を用いたアルゴリズムの概略を示す。

- ① 発生可能な各関節でのトルク範囲 $T_{\max}(i=1-3)$ を設定する。
- ② 3つの関節それぞれについて $(-\Delta\theta_i, 0, +\Delta\theta_i)(i=1-3)$ だけの微小増分を加えることにより、その姿勢近傍に3³通りのロボット姿勢を得る。
- ③ ロボットが転倒しない条件である $R_A > 0$ かつ $R_B > 0$ であるロボット姿勢の中からロボットの上部部が前より上昇する姿勢を選択する。
- ④ ③で得られたそれぞれの姿勢において、各関節の負荷トルク T_i を求め、次に T_{\max} に対する割合 $H_i (=T_i/T_{\max})(i=1-3)$ を求め、その中の最大値 H_{\max} を求めておく。それぞれの姿勢における前述の H_{\max} を比較し、その中で最も H_{\max} が小さいロボット姿勢、すなわちもっとも負担の大きい関節がその持つトルク範囲の中で最も余裕のある姿勢を選択して②へ戻る。
- ⑤ すべてのロボット姿勢において転倒する条件である $R_A < 0$ あるいは $R_B < 0$ である場合にはロボット上部部であるリンク3の移動 θ_3 により負値である R_A あるいは R_B

を最も大きくする姿勢を選択して②へ戻る。この場合にはリンク1と2の運動には微小増分を加えないこととする。

上述のアルゴリズムは、基本的には、あるロボット姿勢における3つの関節の中で最もつらい関節に対して最も余裕を持たせようとする考え方である。

4. 立ち上がり動作のシミュレーション事例

4.1 椅子からの立ち上がり動作^{11), 13)}

前章で示したアルゴリズムを用いて得た軌道生成の一例として、椅子に座った状態からロボットが立ち上がる動作の事例を図2(a)に示す。図2(a)中には立ち上がり動作時の各関節の曲げ角とそのときの各関節のトルク変化の様子も示している。実際には椅子があるため転倒することはないが、A点以前はロボットが転倒してしまう条件内であるため、座った状態を保って上部部を前傾させている。 $R_A > 0$ となったA点では足首部の関節がその許容発生トルクの限界(100%)になっている。その後ロボットは立ち上がり動作に移っている。膝および腰部における許容発生トルク範囲を式(3)のように与えた場合には足首部の関節のもつ許容発生トルク(式(2))が立ち上がり動作の可否を決定していることになる。

4.2 膝関節における許容発生トルクが小さい場合の立ち上がり動作^{12), 14)}

人間の場合において膝に障害がある場合に対応する事例であり、膝関節に大きなトルクが発生できない場合における立ち上がり動作の生成事例を図2(b)に示す。この場合には膝関節の許容発生トルクが小さいためロボットが転倒しない条件に入っても前傾姿勢をとり続け、膝関節のトルクが許容発生トルク内に入る(B点)までロボットの上部部を前傾させている。

4.3 椅子から立ち上がることができない場合

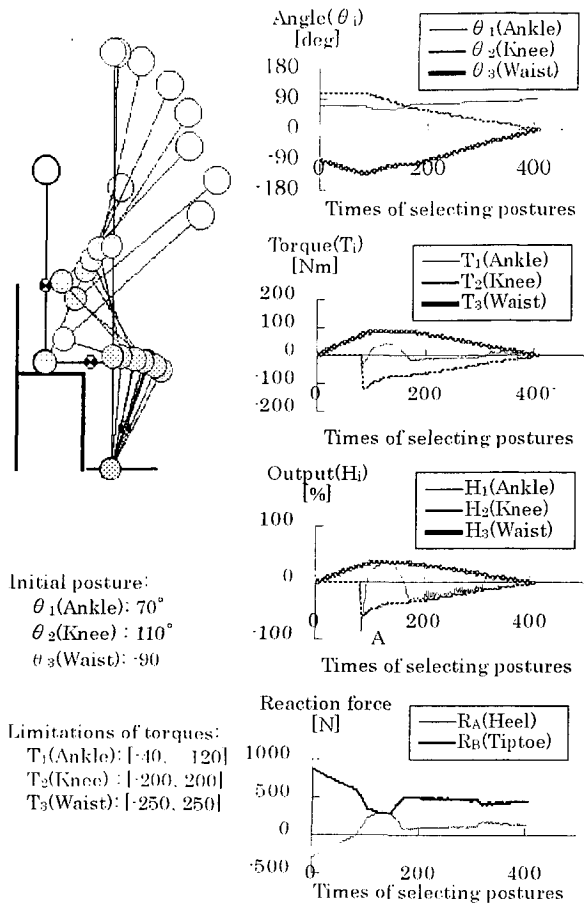
椅子に座っているロボットの足首がより先の方に位置している場合にはロボット上部部を前傾させてもロボットが転倒しない条件を作り出すことができない。この場合には、ロボットの各関節の許容発生トルクが非常に小さい場合と同様に、ロボットは椅子から立ち上がることはできない。この場合の事例を図2(c)に示す。

4.4 シャガんだ状態からの立ち上がり動作

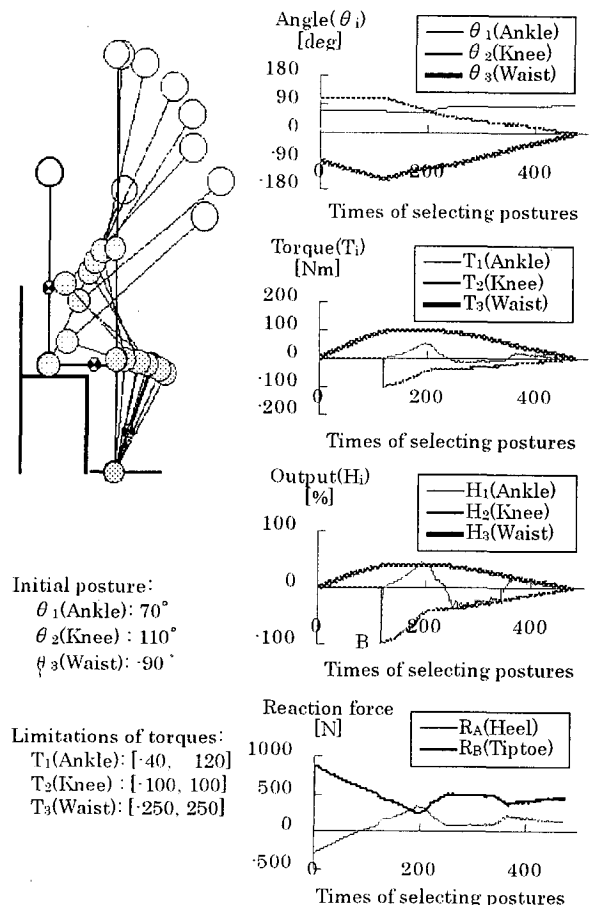
シャガんだ状態からロボットが立ち上がる動作のシミュレーション結果を図2(d)に示す。椅子からの立ち上がり動作である図2(a)と比較すると、発生した各関節の最大トルクにはあまり大きな違いはないが、発生トルクの大きい状態が長く続いている。

5. 各関節に与えた軌道に対する時間軸の設定

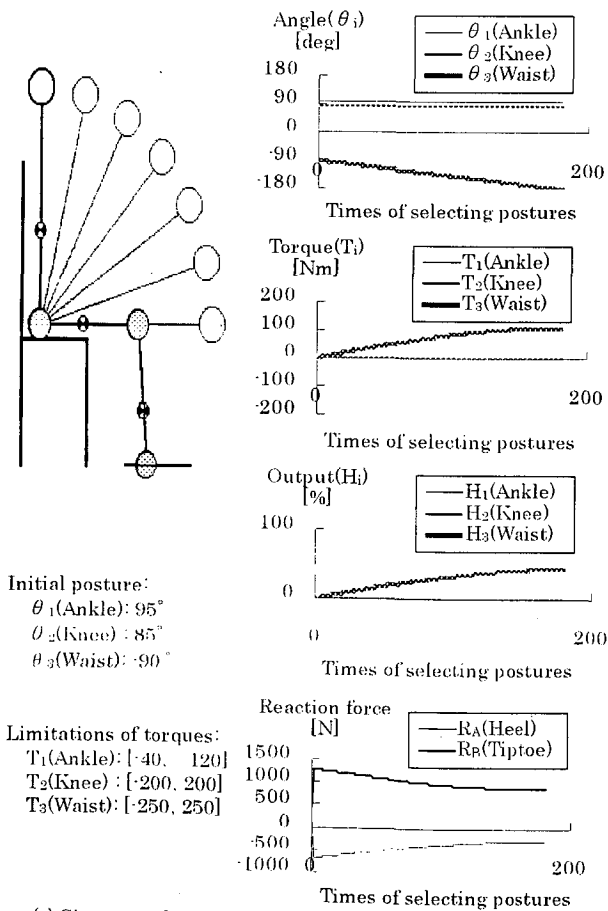
各関節の軌道生成に用いた微小増分 $\Delta\theta_i$ にそれぞれの時間 Δt_i を設定することにより各リンクの持つ慣性力が各関節の負荷トルクに与える大きさを評価できる。軌道中の Δt_i の値を小さく設定すればそれに伴う慣性力、遠心力、コリオリ力等が大きくなり、逆に Δt_i の値を大きく設定すればそのときの慣性力等は小さくなる。本研究では各 $\Delta\theta_i$ 間の時間を適当に与え、それを立脚型ロボットの持つ運動方程式(立脚型ロボットの運動方程式¹⁾を付録に示す)に用いることにより、慣性力等が各関節の負荷トルクに与える影響を評価する。そしてその



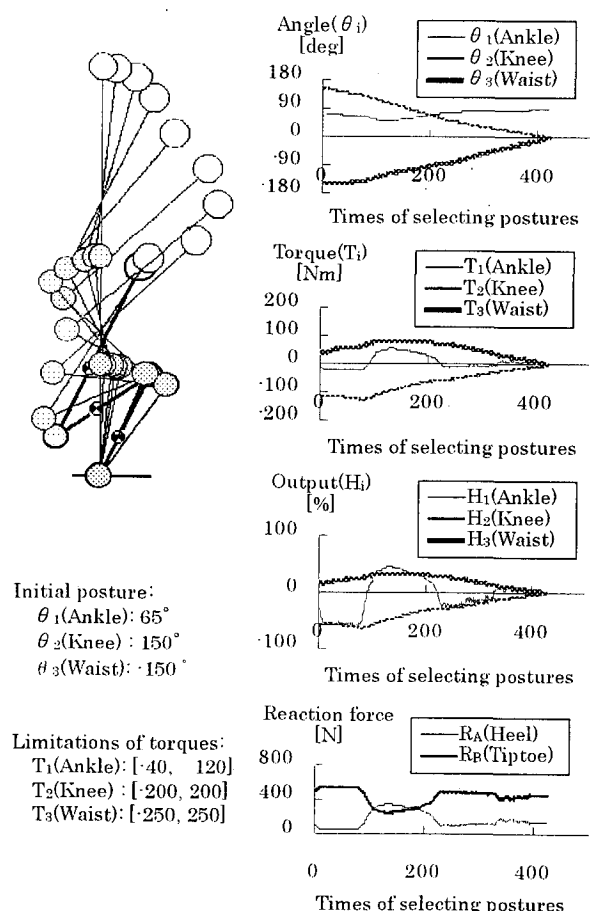
(a) Normal sit-to-stand movement



(b) Sit-to-stand movement with knee disability



(c) Sit-to-stand movement with foot's being put forward



(d) Normal squat-to-stand movement

Fig.2 Static performances of various sit-to-stand and squat-to-stand movements

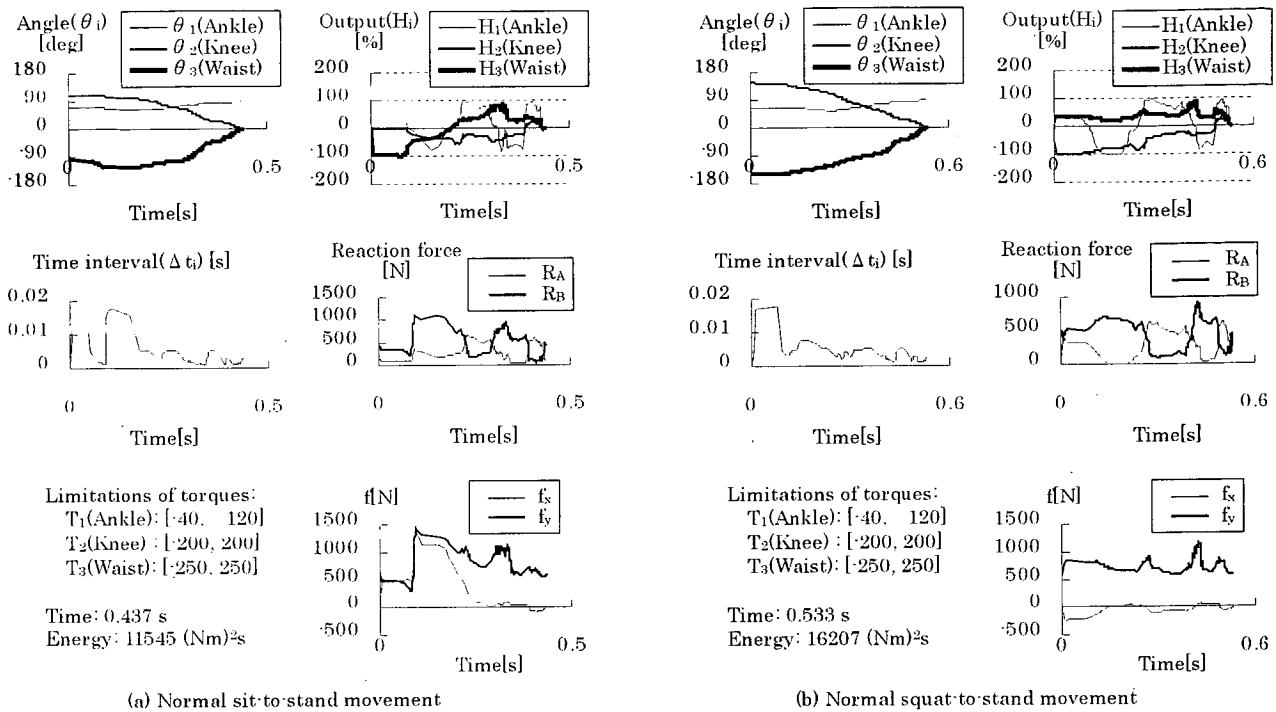


Fig.3 Dynamic performances of various sit-to-stand and squat-to-stand movements

ときに発生する関節駆動トルクのどれかが、 R_A と R_B を含め、それぞれの関節の持つ許容発生トルクに達する時間をそのときの Δt_i として与えることとした。

一例として、図2(a)と(d)の動作事例においてその軌道に時間軸を設定した。その結果を図3(a),(b)に示す。いずれの微小増分 $\Delta \theta_i$ 間においてもどれかの関節が許容発生トルクに達しているか、あるいはロボットの転倒条件である $R_A=0$ あるいは $R_B=0$ になるようにその間の Δt_i が決定されている。また椅子からの立ち上がり動作としゃがんだ状態からの立ち上がり動作におけるそれぞれのエネルギーを比較するために、エネ

ルギーに関連する量 $\sum [T_1(\theta_1)^2 + T_2(\theta_2)^2 + T_3(\theta_3)^2] \Delta t_i$ の計算を

行った。この結果は当然のことながらしゃがんだ状態からの立ち上がり動作の方がより多くのエネルギーを必要としている。これは障害のある人にとって和式よりも洋式トイレの方が使い易いこととも関連付けられるように思われる。

6. 結 言

本研究では繰返し順変換の手法を用いて多関節構造を有する機械の一つである立脚型ロボットの立ち上がり動作の軌道生成を試みた。本研究を通して得られた結論をまとめて以下に述べる。

- (1) 繰返し順変換の中でロボットが転倒しなく、かつ全関節にかかる負荷トルクをできるだけ小さくする姿勢を逐次選択していくことにより、椅子からの立ち上がり動作およびしゃがんだ状態からの立ち上がり動作における各関節の軌道を生成した。
- (2) 椅子からの立ち上がり動作において、膝関節に障害がある場合の各関節の軌道生成を試みた。この結果、ロボットの上部体をより前傾させることが膝関節へのトルク負担を小さくし得ることもあることがわかった。また立ち上がることができない場合の事例につ

いても明かにした。

- (3) 微小増分にそれぞれの所要時間を設定することによって各軌道に対する時間軸を設定した。この場合各リンクの持つ慣性力等により増加する各関節のトルク負担量を評価することによりそれぞれの所要時間を決定した。
- (4) 立脚型ロボットのような機械においてはその上部部の移動がロボットの転倒および各関節に与えるトルク負担量を支配していることがわかった。

謝 辞

最後に、本研究の遂行にご協力いただいた金沢大学大学院柴田英明氏および同工学部野村久直氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 吉川恒夫：ロボット制御基礎論，コロナ社，1988。
- 2) 神谷好承，久保哲也，青柳誠司，岡部佐規一：繰返し順変換によるロボットの運動制御，日本機械学会論文集(C編)，59(564)，125/130，(1993)。
- 3) 生田宗博，立野勝彦：垂直荷重力の測定による椅子座位からの立ち上がり動作の解析，リハビリテーション医学，29(3)，199/209，(1992)。
- 4) 塩川満久，渡部和彦：立ち上がり動作の制御に関する基礎的研究—身体動揺度の定量解析—，広島大学教育学部紀要 第2部，40，157/161，(1991)。
- 5) 島田洋一：立ち上がり動作の解析(特集 表面筋電図による動作解析)，総合リハビリテーション(医学書院)，27(11)，1023/1028，(1999)。
- 6) 田宮幸春，稲葉雅幸，井上博允：人間型ロボットの片足立脚動作における全身を用いた実時間動バランス補償，日本ロボット学会誌，17(2)，266/274，(1999)。
- 7) 新小田幸一，田中光晴，池内秀隆，加藤三，山下忠：椅子からの立ち上がり動作の位相面解析，日本機械学会論文集(C編)，65(634)，2436/2442，(1999)。
- 8) 新宅英司，清水京子，古川美佳：GAによるマニピュレータのエネルギー最小軌道の簡易推定法に関する研究，第16回日本ロボット学会学術講演会，95/96，(1998)。
- 9) 加島正，石動善久：人の上肢運動の軌道生成，計測自動制御学会論文集，34(10) 1440/1447，(1998)。
- 10) 加島正，石動善久，島公脩：ヒトの運動軌道の再現，第16回日

- 本ロボット学会学術講演会, 97/98, (1998).
- 11) Tinetti, M. E., Richman, D. and Powell, L. : Falls Efficiency as a Measure of Fear of Falling, *J. Gerontol. Psychol. Sci.*, 45(6), 139/243, (1990).
- 12) Nyberg, L. and Gustafson, Y. : Patient Falls in Stroke Rehabilitation—A Challenge to Rehabilitation Strategy—, *Stroke*, 26(5), 838/842, (1995).
- 13) Roberts, P. D. and McCollum, G. : Dynamics of the Sit-to-Stand Movement, *Biol. Cybern.*, 74(2), 147/157, (1996).
- 14) Ikeda, E. R., Schenkman, M. L., Riley, P. O. and Hodge, W. A. : Influence of Age on Dynamics of Rising from a Chair, *Phys. Ther.*, 71(6), 473/481, (1991).

付録 立脚型ロボットにおける運動方程式

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 + J_2 + J_3 + 2(Q_2L_1C_2 + Q_3L_2C_3 + Q_3L_1C_{23}) & J_2 + J_3 + 2Q_2L_1C_2 + 2Q_3L_2C_3 + Q_3L_1C_{23} & J_3 + Q_3L_2C_3 + Q_3L_1C_{23} \\ J_2 + J_3 + 2Q_2L_1C_2 + 2Q_3L_2C_3 + Q_3L_1C_{23} & J_2 + J_3 + 2Q_3L_2C_3 & J_3 + Q_3L_2C_3 \\ J_3 + Q_3L_2C_3 + Q_3L_1C_{23} & J_3 + Q_3L_2C_3 & J_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & -(Q_2L_1S_2 + Q_3L_1S_{23}) & -(Q_3L_2S_3 + Q_3L_1S_{23}) \\ Q_2L_1S_2 + Q_3L_1S_{23} & 0 & -Q_3L_2S_3 \\ Q_3L_2S_3 + Q_3L_1S_{23} & Q_3L_2S_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix}$$

$$- 2 \begin{bmatrix} Q_2L_1S_2 + Q_3L_1S_{23} & Q_3L_2S_3 + Q_3L_1S_{23} & Q_3L_2S_3 + Q_3L_1S_{23} \\ 0 & Q_3L_2S_3 & Q_3L_2S_3 \\ -Q_3L_2S_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} Q_1C_1 + Q_2C_{12} + Q_3C_{123} \\ Q_2C_{12} + Q_3C_{123} \\ Q_3C_{123} \end{bmatrix} g$$

$$R_A = \frac{T_1 + f_y b}{a + b}, \quad R_B = \frac{-T_1 + f_y a}{a + b}$$

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(Q_1S_1 + Q_2S_{12} + Q_3S_{123}) & -(Q_2S_{12} + Q_3S_{123}) & -Q_3S_{123} \\ Q_1C_1 + Q_2C_{12} + Q_3C_{123} & Q_2C_{12} + Q_3C_{123} & Q_3C_{123} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} Q_1C_1 + Q_2C_{12} + Q_3C_{123} & Q_2C_{12} + Q_3C_{123} & Q_3C_{123} \\ Q_1S_1 + Q_2S_{12} + Q_3S_{123} & Q_2S_{12} + Q_3S_{123} & Q_3S_{123} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix}$$

$$- 2 \begin{bmatrix} Q_2C_{12} + Q_3C_{123} & Q_3C_{123} & Q_3C_{123} \\ Q_2S_{12} + Q_3S_{123} & Q_3S_{123} & Q_3S_{123} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_3\dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ M_1 + M_2 + M_3 \end{bmatrix} g$$

ただし,

$$C_i = \cos \theta_i \quad S_i = \sin \theta_i$$

$$C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j) \quad S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$$

$$J_1 = M_1Lg_1^3 + (M_2 + M_3)L_1^3 + I_1$$

$$J_2 = M_2Lg_2^3 + M_3L_2^3 + I_2$$

$$J_3 = M_3Lg_3^3 + I_3$$

$$Q_1 = M_1Lg_1 + (M_2 + M_3)L_1$$

$$Q_2 = M_2Lg_2 + M_3L_2$$

$$Q_3 = M_3Lg_3$$