角運動量を考慮した 2 足歩行ロボットの動的制御[†]

——両脚支持期に蹴りを行う歩行——

古 莊 純 次*・山 田 誠**

Dynamic Control of Biped Locomotion Robot in Cosideration
of Anguler Momentum

——Bibed Locomotion with Kick Action during Double-Legs-Supporting-Phase——

Junji FURUSHO* and Makoto* YAMADA

There exist many kinds of biped locomotion as locomotive means. A good example of natural and dynamic biped locomotion is human walking. In fact, human walking utilizes the gravity effect very skillfully and does not depend on the ankle torque at the supporting leg so much except for the kick-phase. The robot in this study realizes such a dynamic biped locomotion with kick action only during double-legs-supporting-phase. Its step length is about 44 cm and the walking cycle is 0.9~1.0 sec. In its control, a hierarchical control structure is adopted in which each joint is locally controlled. Moreover, it is shown by the consideration of angular momentum that the kick action makes a biped locomotion more stable.

Key Words: biped locomotion, robot, hierarchical control

1. はじめに

歩くという運動は、動物にとって最も基礎的なものであるため、その解析についての関心も高く、運動生理学の中でも古い研究の歴史を持つ。一方、近年になって制御工学の見地からも、理論および実験の両面にわたって研究が行われるようになってきた^{1)~11)}。

自然な動的歩行は、支持脚足首のトルクによって強引に加減速を行うようなものではなく、重力場の巧み

な利用、および蹴り動作によって支持脚足首まわりの角運動量を制御することによって行われる。実際、人間の足底も、くるぶしより後方の部分をほとんど持たないため、足首トルクにより歩行速度を加速することは不可能であり、減速および蹴りの際にのみ効果的に働く形状をしている。しかし、連続歩行においては、足首トルクによる減速はエネルギー損失を招くだけなのでその使用は望ましいものではない。したがって、自然な歩行では蹴り動作を除いて足首トルクを使うべきではないと考えられる。

Fig. 1 は単脚支持期における歩行システムをモデル化したものである。単脚支持期に足首トルクを使用しないとしたら、他のどのような力がロボットシステムの角運動量を変化させるかをこの図を使って考えてみる。一点鎖線で囲まれた部分を一つのリンクシステムとすると、各関節（支持脚足首を除く）に働くト

Fig. 1 Biped locomotion system

[†] 日本ロボット学会第2回学術講演会で一部発表(昭59.11)

* 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

** ブラザー工業(株) 名古屋市中区大須

* Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu

** Brother Industry Corp., Naka-ku, Nagoya

(Received April 15, 1985)

(Revised December 11, 1985)

ルクは、このシステムの内力モーメントである。ニュートンの角運動量保存則からわかるように、システムの全角運動量は内力モーメントによっては影響されず、外力モーメントのみに影響されるので、これらの関節に働くトルクはロボットシステムの角運動量に影響を与えることができない。すなわち単脚支持期には、足首トルクを使用しなければ、角運動量に影響を与える要因としては重力によるモーメントだけである。また、自然な歩行においては蹴り動作が行われる。両脚支持期における蹴りは、支持脚足首（両脚支持期には前方の脚を支持脚と呼び、後方の蹴り動作を行う脚を蹴り脚と呼ぶことにする）まわりの外力モーメントを与え、角運動量の制御を可能にする。

筆者らは、上体、大腿部、すね部からなる 5 リンク型のロボットにより一歩 0.4~0.5 秒、歩幅 30~35 cm の重力場を巧みに利用した歩行を実現し、文献 7)、8) に報告した。しかし、蹴り動作の不可能な 5 リンク型のロボットでは、歩幅を広げると歩行が不可能になる、たとえ可能であっても歩行速度の変化が激しくなる、外乱に弱いなどの欠点をもつ。そこで、蹴り動作の機能をロボットに付加することが重要になる。

蹴り動作を蹴りの時期に注目して分類するとつぎの 3 種類に分類できる。

- a. 単脚支持期にのみ蹴り動作を行う歩行。
- b. 単脚支持期に蹴りを始め両脚支持期にも蹴り動作を続ける歩行。
- c. 両脚支持期にのみ蹴り動作を行う歩行。

この三つの歩行のうち b の歩行が最も自然と考えられるが、この歩行では蹴り時間の配分などの要因が増え解析が複雑なので、筆者らは現在、b の歩行の両極端である a の歩行と c の歩行について研究している。本研究では、c の両脚支持期にのみ蹴り動作を行う歩行を扱う。

両脚支持期に蹴りのある歩行については、川野ら¹¹⁾が、拘束条件付レギュレータ理論を定式化し、あらかじめ設定された三つの定常状態につぎつぎと収束していくという制御方式を提案し、一歩約 3 秒の歩行を実現しているが、本研究とは異なった観点からの研究である。

以上のように、本研究では支持脚足首のトルクを使用しない、両脚支持期にのみ蹴り動作を行う動的歩行をロボットで実現することを目指している。以下、2 節ではロボットの概要を示し、つぎにその運動方程式を与える。3 節では制御方式を示し、さらにその制御方式を用いた際のシミュレーション結果について述べる。

4 節では角運動量の観点から歩行の安定性を考え、蹴り動作が歩行をより安定なものにすることを示す。5 節では歩行ロボットを用いた実験の結果を示す。得られた歩行は歩幅約 44 cm、1 歩にかかる時間が 0.9~1 秒の蹴りのある動的歩行である。

2. 歩行ロボットおよびその運動方程式

本研究に用いた 2 足歩行ロボットを Fig. 2 および Fig. 3 に示す。この 2 足歩行ロボットは、左右の足裏、すね、大腿および胴体の 7 つのリンクで構成され、それらを継ぐ関節を 6 つの DC サーボモータで駆動する。左右方向については、片足で立っても倒れない構造の足裏となっている。図中に見られるすね部に取りつけられた触角状のものは、すね部の絶対角を測定するセンサであり、ロボットを前後方向にささえる働きはない。歩行ロボットの全高は 1.1 m、重量は約 40.5 kg、つま先からかかとまでが 19 cm で、つま先から足首までの水平距離が 12 cm である。各リンクの質量、長さなどを Table 1 に示す。

歩行ロボットを進行方向を含む 2 次元平面内で Fig. 4 のようにモデル化する。図中の A 点は支持脚足首を示し空間の一点に固定されているとする。B 点は両脚支持期には蹴りを行う脚のつま先を示し、単脚支持期には遊脚つま先を示す。

まず、両脚支持期の運動方程式を求める。両脚支持期には B 点はつぎの拘束条件式によって地表の一点に固定される。

Fig. 2 Biped locomotion robot

Fig. 3 Perspective drawing

$$\left. \begin{aligned} x_7 &= x_1 + r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 - r_4 \cos \theta_4 \\ &\quad - r_5 \cos \theta_5 - r_6 \cos \theta_6 \\ y_7 &= y_1 + r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2 - r_4 \sin \theta_4 \\ &\quad - r_5 \sin \theta_5 - r_6 \sin \theta_6 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

表記を簡単にするため、この拘束条件式をつぎのように表わすことにする。

$$l(\theta) = 0 \quad (2)$$

このように拘束が付加された場合の運動方程式を求める方法は種々あるが、本研究では拘束力の概念^{2), 3), 5)}を導入して両脚支持期の運動方程式を求める。

一般化座標として $\theta_1 \sim \theta_6$ 、一般化力として各関節のトルクを採用すると、両脚支持期の運動方程式は

$$A(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta)\dot{h}(\dot{\theta}) + C(\theta)g(\theta) = E(\theta)F + DT \quad (3)$$

ここで、 $E(\theta) = (\partial l / \partial \theta)^T$ である。ただし、 $A(\theta)$ 、 $B(\theta)$ 、 $C(\theta)$ 、 D は 6×6 行列であり、 θ 、 $h(\dot{\theta})$ 、 $g(\theta)$ 、 T は 6 次ベクトルである。また、 F は拘束力であり (2) 式を満たすように与える。つぎに F の求め方について述べる。

$$x = (x_1^T, x_2^T)^T = (\theta^T, \dot{\theta}^T)$$

とおき、制御系の標準的な表記法に書き直すと (3) 式はつぎのようになる。

Table 1 Values of parameters of links

	Mass (kg)	Moment of Inertia (kgm ²)	Length (m)	Center of Mass from Lower Joint (m)
Body	14.79	0.33	0.445	0.2818
Upper part of Leg	5.28	0.054	0.302	0.236
Lower Part of Leg	5.5	0.055	0.265	0.169
Foot	2.0	0.0005	0.147	0.143

Fig. 4 6-link biped model

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -A^{-1}(Bh + Cg) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A^{-1}D \end{bmatrix} T + \begin{bmatrix} 0 \\ A^{-1}E \end{bmatrix} F \quad (4)$$

(2) 式の拘束条件式を時間に関して 2 回微分するとつぎのようになる。

$$\ddot{l}(\theta) = F\dot{x} \quad (5)$$

ここで

$$F = \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial l}{\partial \theta} \right) \middle| \frac{\partial l}{\partial \theta} \right]$$

拘束はすべての時間に対して成立しているから、 $\ddot{l} = 0$ であり、(5) 式はつぎのようになる。

$$F\dot{x} = 0 \quad (6)$$

(4) 式の両辺に左から F をかけ、(6) 式を用いると F はつぎのように求まる。

$$F = -(E^T A^{-1} E)^{-1} F \left\{ \begin{bmatrix} x_2 \\ -A^{-1}(Bh + Cg) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A^{-1}D \end{bmatrix} T \right\} \quad (7)$$

この F を (3) 式に代入すると、両脚支持期の運動方

程式が得られる。

単脚支持期に対する運動方程式は、(3)式において $\mathbf{F}=\mathbf{0}$ とすることによって得られる。

遊脚の着地は、一種の地面との衝突現象と考えることができ、着地直前と直後では各部材の角速度は瞬時に変化する。着地直前の角速度と着地直後の角速度の関係を与える式は、ラグランジェの衝突方程式を用いることによって文献 2), 3) と同様にしてつぎのように得られる。運動方程式の場合と同様、Fig. 4 を用いて議論する。ただし、図中の A 点は着地した脚の足首を示しているものとし、B 点は地表の一点にあるものとする。このとき、着地直前の各リンクの角速度を $\dot{\theta}_{ai}$ 、着地直後の各リンクの角速度を $\dot{\theta}_{bi}$ とすると、ラグランジェの衝突方程式よりつぎようになる。

$$P(\theta)\dot{\theta}_a=Q(\theta)\dot{\theta}_b \quad (8)$$

上式において、行列 P, Q は 6×6 行列であり、その要素 p_{ij}, q_{ij} はつぎのように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} p_{ij} &= \alpha_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + \beta_{ij} \\ q_{ij} &= \gamma_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + \delta_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし、 α_{ij}, γ_{ij} は、リンクの長さ、質量、慣性モーメントによって、 β_{ij}, δ_{ij} は、モータの慣性モーメント、減速比によって決定される定数である。

3. 制御則およびシミュレーション

(3)式および(7)式よりわかるように、歩行ロボットは各関節におけるトルク $\mathbf{T}$ を入力とした機械システムである。この歩行システムを制御する方法としては種々の方法が考えられるが、本研究では各関節における局所フィードバックをその基本とする。各関節における局所フィードバック制御則としては、生体の運動制御に指摘されており¹²⁾、サーボシステムでしばしば採用されている比例微分制御とする。この局所フィードバックは、外乱などの影響を受けにくくする効果があり、実際、実験における歩行はある程度高ゲインにするとしっかりしたものになる。

支持脚膝関節を例にとると、制御トルク T_2 は次式で与えられる。

$$T_2 = k_{p2} \{\theta_{r2} - (\theta_2 - \theta_1)\} - k_{d2} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)$$

ここで、 θ_{r2} は支持脚膝関節の曲げ角に対する目標値であり、 k_{p2}, k_{d2} はフィードバックゲインである。

局所フィードバック制御は、単脚支持期には、支持脚足首以外のすべての関節で行う。支持脚足首については、自由回転とする。両脚支持期には、蹴り脚のつま先が地面に拘束されるため自由度が低下するので、支持脚足首および蹴り脚の腰関節については自由回転とし、さらに蹴り脚足首についても局所フィードバ

ック制御をせず、一定トルクを与えることにする。

つぎに各関節に対する目標パターンの与え方について述べる。本研究では各ステップに対して同じ目標パターンを繰返し与える制御方式を採用する。以下に、シミュレーションおよび実験で採用した歩行パターンの特徴を箇条書きに示す。

- 1 遊脚が着地する時刻より十分前に目標値を一定値に固定する。これは歩幅の変動を防ぐ効果をもつ。
- 2 支持脚膝については、着地直後の曲がった状態からすみやかに伸ばし、その状態を保持する。
- 3 遊脚膝をすこし曲げた状態にして着地する。これは、ロボットの重心が支持脚足首の後方にある時間を前方にある時間より短くする効果をもつ。その結果重力モーメントによって、単脚支持期の終りの角運動量は始めの角運動量より大きくなる。すなわちこのように着地すると角運動量を増加する効果をもつ。また、膝を曲げて着地することは、着地時の衝撃を吸収する効果をもつ。
- 4 蹴り脚の足首トルクは一定値とする。その一定値トルクとして種々の値を選びシミュレーションを行ったが、値が大きすぎると蹴り時間が短くなり、小さすぎると蹴りの効果がわからなくなった。10~60 N.m が適当な足首トルクであるが、本論文には 30 N.m とした場合の計算結果および実験結果を示す。
- 5 上体が垂直となるように支持脚腰の目標値を与える。
- 6 遊脚足首は足裏が床に水平となるように制御する。

歩行においては支持脚の切換えによって角運動量の損失が起きるが、継続歩行を行うためにはこの損失を補う必要がある。この損失を補う効果を上述の項目 3 および 4 はもつ。

一歩区間の目標パターンを Fig. 5 に示す。図の左側には両脚支持期における目標パターンを示す。両脚支持期は、蹴り脚つま先の垂直抗力が零になった瞬間に終了する。また図の右側には単脚支持期における目標パターンを示す。

つぎに、この目標パターンを用いた時、歩行がどのようなになるかを考える。単脚支持期には、(3)式において $\mathbf{F}=\mathbf{0}$ とした運動方程式を R. K. G 法で解き、遊脚の着地による角速度の変化は(8)式の代数方程式を解くことによって求め、両脚支持期には(3)式における $\mathbf{F}$ を(7)式のように与えた運動方程式を解くことによって、直立静止状態から定常歩行に至るシミュ

Fig. 5 Reference signals to joints

Fig. 7 Locomotion of center of gravity and variation of angular momentum

ーションを行った。1歩目を除いて、上述の目標パターンを繰返し用いたシミュレーションにおける、4歩目の0.1秒毎の様子をFig. 6に示す。またFig. 7にはこのシミュレーションにおける全角運動量の変化と重心位置の変化を示す。

Fig. 7(a)は支持脚足首まわりの全角運動量の変化を示し、Fig. 7(b)は支持脚つま先を原点とし進向方向を正とした時のロボットの全重心の位置の変化を示す。図からわかるようにロボットはすみやかに定常歩

Fig. 6 Stick diagram (Simulation)

Fig. 8 External Moment with respect to the Ankle Joint of Supporting Leg

行に入っている。支持脚切換えによって角運動量は減少し、両脚支持期の蹴りによって増加する。単脚支持期には、重心が支持脚足首より後方にある間は重力モーメントにより角運動量は減少し、重心が支持脚足首の前方に移動すると増加する。

Fig. 8には、上述のシミュレーションの4歩目における、支持脚足首まわりに作用する二つの外力モーメントである蹴りによって生じるモーメントと重力によって生じるモーメントを示す。角運動量の変化率は、この二つのモーメントの和に等しい。

本研究のように各関節ごとに局所フィードバックしたときの閉ループシステムの性質について、その閉ループモードを考えることによって、ここで少し考察しておく。まず、単脚支持期については、支持脚足首以

外は各関節ごとに局所フィードバックされているので、文献6)に示されるように、この6リンクシステムの閉ループモードは、1組の倒立振子モードと10個の応答の速い安定なモードとからなる。両脚支持期については、蹴り脚のつま先が一点に固定されるため、自由度が2失われる。そのため、(4)、(7)式で表されるシステムのモードを考えると、伊藤ら⁶⁾が論議しているように、次元縮小系における8個のモードについて考えればよい。両脚支持期には、支持脚膝、支持脚腰および蹴り脚の膝を局所フィードバックしているため、1組の一種の倒立振子モードと6個の応答の速い安定なモードとからなっている。

4. 歩行の安定性

各ステップに対して同じ目標パターンを与える前節の制御方式により得られる歩行の安定性について本節では論じる。一般にシステムが安定であるとは、ある一つの状態にシステムの状態が収束することを意味するが、歩行においては状態は常に変化し一つの状態に収束することはない。そこで、歩行が安定であるとは、何らかの外乱が加わっても一つの定常軌道に復帰することと定義する。

しかし、本研究の歩行ロボットでさえ単脚支持期には12次の微分方程式で記述されるため、このモデルを用いて直接歩行の安定性を論じることは難しい。本研究では、歩行システムの角運動量に注目して歩行の安定性を論じる。1節で述べたように、単脚支持期には支持脚足首まわりの角運動量は、重力によるモーメントだけに影響される量であり、システムの状態を記述するのに優れた量である。

さらに、ロボットの重心が支持脚足首の真上にあるときの角運動量(このとき角運動量はそのステップでの最小値となるので「最小角運動量」と呼ぶことにする)を、そのステップにおける歩行の状態を示す指標とする。たとえば最小角運動量が零になることは、歩行が停止状態になることを意味する。

i 歩目の最小角運動量を横軸、 $i+1$ 歩目の最小角運動量を縦軸として、その関係を Fig. 9 に示す。図の(a)は蹴り動作を行った場合であり、前節で述べた制御策を用いて制御した際の計算結果であり、つぎのようにして求めた。前節に示した歩行の定常歩行において、角運動量が最小となる時点での各リンク角度を表わすベクトルを θ_0 とし、各リンクの角速度を表わすベクトルを $\dot{\theta}_0$ とする。この $\theta_0, \dot{\theta}_0$ を基準の初期状態として選ぶ。そして、初期角速度だけを変化させて、 θ_0 および $\dot{\theta}_0 + \Delta\dot{\theta}_0$ を初期状態として、つぎのステップ

(a) Case with kick action

(b) Case without kick action

Fig. 9 Relation between the Minimum Angular Momentums at the i th step and $i+1$ th step

における角運動量が最小となる時点まで、(3)、(7)、(8)式を用いてその運動を計算する。この計算における最初の角運動量を i 歩目の最小角運動量と名づけ、最後の角運動量を $i+1$ 歩目の最小角運動量と名づけた。 $\Delta\dot{\theta}_0$ の意味は、外乱による角速度の変化を意味する。角運動量保存則から予想できることであるが、どのリンクに角速度変化を与えるかということは、 i 歩目の最小角運動量と $i+1$ 歩目の最小角運動量の関係を求める計算にほとんど影響を与えなかった。

Fig. 9 においては、原点を通る 45° の直線と得られた曲線との交点が、定常歩行における最小角運動量を示す。最小角運動量が何らかの原因で変動したときも、図からわかるように、すみやかに定常値に収束する。

Fig. 9 の(b)には、蹴り動作を行わない場合を比較のため示す。制御策は、蹴り動作を行わない点を除いて図(a)の場合と同じである。図(a)、(b)の比較からわかるように、蹴り動作を行った場合のほうが、最小角運動量の定常値への復帰がすみやかである。すなわち蹴り動作は、より歩行を安定なものにすることが

Fig. 10 A schematic diagram of control system

わかる。

5. 歩行実験

3節で述べた階層制御策を用いて、蹴りのある動的歩行をロボットで実現する。Fig. 10 に制御システムの構成を示す。腰と膝の関節については、高ゲインフィードバック制御を行う必要があり、また計算機の負担を減らす必要があるため、アナログ制御器により比例微分制御を行った。ただし、3節で述べたように両脚支持期には自由度が低下し、これらの関節すべてを制御すると幾何的矛盾を生じる。そこでアナログ制御器を切り離し自由回転とする切換装置を設け、コンピュータの平行I/Oからの信号によって切り換えを行った。蹴り足の足首については、足首トルクが一定となるように、モータへ一定の電流を供給した。支持足の足首については、制御を行わず自由回転とした。

大型計算機によるシミュレーションから得た目標パターンを実験時に発生するためのプログラムは、68000のアセンブラを使って製作した。そのプログラムにおいては、着地センサが着地を検知すると、両脚支持期における目標パターンを発生し、蹴り脚つま先が地面を離れると、単脚支持期における目標パターンを発生する。歩行実験時のストロボ写

Fig. 11 Stroboscopic photograph

真を Fig. 11 に示す。ストロボの周期は 3.3 Hz であり、蹴りのある連続歩行の様子を示す。歩行幅は約 44 cm である。写真を横切る 2 本の棒は、歩行ロボットが転倒した時に、歩行ロボットをささえて破損を防ぐための棒であり、普通に歩行を行っている限りはロボットとまったく接触していない。Fig. 12 は、膝関節の変化の様子を示す。実線は目標値であり、点は関節の応答を示す。一つの関節に固定してデータを見ているので、支持脚相、遊脚相を一回おきに繰返して

Fig. 12 Response of Knee Joint (Experimental Data)

Fig. 13 Angular momentum (Experimental data)

いる。図からわかるように、関節角がそのステップの最終目標値に十分に一致してから、遊脚の着地が起きている。

Fig. 13 は、支持脚足首まわりのロボットシステムの全角運動量の変化を示す。角度データを微分して角速度を得、これから角運動量を計算しているの、図中の角運動量を示す丸印はかなり散らばっている。しかし、角運動量の変化は3節におけるシミュレーションとはほぼ同じ傾向を示している。3歩目の単脚支持期における角運動量の乱れは、ロボットが地面に垂直な軸まわりにすこし回転したためである。しかし、蹴りのある歩行は安定性がよいため、4歩目では急速に元の歩行に復帰している。

実験で得られた歩行は、3節におけるシミュレーションで得られる歩行より一步にかかる時間が長くなっている。この大きな原因は、シミュレーションでは自由回転とした支持脚の足首が、実験では完全な自由回転とはできなかったためである。すなわち、機械的な摩擦損失などにより角運動量損失が起きたためである。これを粘性減衰によりモデル化し、角速度 1 rad/s 当り $19.4 \text{ N}\cdot\text{m}$ モーメントが発生するとシミュレーションをした結果を、Fig. 13 上に一点鎖線で示す。両脚支持期の初期においてシミュレーションと実験データのずれが特に大きい時期がある。この時期は、支持脚切り換えのために、触角状の角度検出器が不安定となる時期にあたる。

6. 結 論

支持脚足首の力に頼らない蹴り動作のある動的歩行をロボットで実現した。制御方式としては、下位レベルにおいて各関節における局所フィードバックを行う階層制御策を用いた。この制御策を用いた際の歩行の安定性を角運動量の観点から考察し、蹴り動作が歩行の安定性を増すことを示した。歩行ロボットは、2次元歩行を行う構造をしており、歩幅約 44 cm 、一步にかかる時間の $0.9 \sim 1$ 秒の歩行を実現した。

最後に、筆者らが文献(7),(8)で報告した蹴り動作のない5リンク型の歩行ロボットによる歩行と、本研究の歩行ロボットの歩行を、実際にロボットを製作して動かすという観点から比較してみる。本研究におけるロボットは、蹴り動作を実現するため、5リンク型のロボットに較べて、脚の下部が非常に重い構造となっている。すなわち、鉄製の下駄を履いて歩くような感じになってしまった。そのため、遊脚を急速に振ると

上体がふらつきやすく、歩行が不安定になる面があった。一方、5リンク型のロボットでは、角運動量不足により後方へ倒れてしまうことがあったが、蹴り動作の可能な本研究のロボットでは、そのようなことはほとんど起こらなくなった。今後、蹴り動作が可能でしかも腰から見たときの慣性モーメントが小さい脚をもつロボットを製作することが、制御方法の改善と並んで重要であると考えている。

謝辞

本研究にご支援いただいた大阪大学工学部増淵正美教授および岐阜大学工学部大川善邦教授（現大阪大学教授）に深く感謝いたします。また卒業研究において本研究にご協力いただいた佐野明人君、池川教俊君に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. Ogo, A. Ganse and I. Kato: Quasi Dynamic Walking Machine, Aiming at Completion of Steady Walking, Proc. of RO. MAN. SY. Symp., Udine, 340/356 (1978)
- 2) C. L. Golliday and Hemami: An Approach to Analyzing Biped Locomotion Controls, IEEE Trans. on Automatic Control, **AC-12-6**, 963/972 (1977)
- 3) F. Miyazaki and S. Arimoto: A Control Theoretic Study on Dynamical Biped Locomotion, ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **102**, 223/239 (1980)
- 4) 三浦, 下山: 竹馬型二足歩行運動の制御系, 日本ロボット学会誌, **1-3**, 176/181 (1983)
- 5) 伊藤, 成清: 拘束のある二足歩行運動の解析と制御, 日本ロボット学会誌, **1-3**, 191/195 (1983)
- 6) 古荘, 森塚, 増淵: 局所フィードバックの概念を考慮した2足歩行の低次元モデル, 計測自動制御学会論文集, **17-5**, 596/601 (1981)
- 7) 古荘: 動的二足歩行ロボットの制御（その低次元モデルおよび階層制御策）, 日本ロボット学会誌, **1-3**, 182/190 (1983)
- 8) J. Furusho and M. Masubuchi: Control of Dynamic Biped Locomotion for Steady Walking, ASME Winter Annual Meeting, Sensors and Controls for Automated Manufacturing and Robotics, 297/308 (1984)
- 9) T. Mita et al.: Realization of a High Speed Biped Using Modern Control Theory, Int. J. of Control, **40-1**, 107/119 (1984)
- 10) R. Katoh and M. Mori: Control Method of Biped Locomotion Giving Asymptotic Stability of Trajectory, Automatica, **20-4**, 405/414 (1984)
- 11) 川野, 松井, 新郷, 美多: 二足歩行ロボットの拘束条件運動制御, 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 183/186 (1983)
- 12) 赤沢, 梶山, 藤井: 神経一節制御系のシミュレーション, バイオメカニズム **2**, 71/81, 東京大学出版会 (1973)