両脚支持期における2足歩行システムのトルク配分制御[†]

佐野 明人*・古 莊 純次*・伊 神 也寸志*

Control of Torque Distribution in Biped Systems during Double-Support Phase

Akihito SANO*, Junji FURUSHO* and Yasushi IKAMI*

A force distribution in locomotion systems containing closed kinematic chains is a difficult problem since a degree of freedom of the systems is reduced by certain holonomic constraints. Control of the force distribution in biped locomotion robot during double-support phase is discussed in this paper.

Inequality constraints on reaction forces are considered, in addition to equality constraints which specify desired trajectories of some joints of the biped locomotion system. Minimizing consumption of joint torques under these constraints is used to obtain a proper distribution of input torques. We put an angular momentum of the locomotion system close to reference function given in advance by using this torque distribution method which prevents the foots from any slipping and the soles from any lifting. The effectiveness of the proposed control method was examined by experiments with our BLR-G2 walking robot.

Key Words: robotics, biped locomotion, angular momentum, torque distribution, walking control

1. はじめに

2足歩行システムの制御について、制御工学およびロボット工学の観点から多くの研究が行われてきた^{1)~19)}。人間の歩行は、単脚支持期と両脚支持期と呼ばれる二つの運動相を繰り返すことによって行われ、それぞれの運動相は異なる力学的構造をもつ。両脚支持期において、歩行システムは閉じた連鎖機構であり、両足部が床面に床反力（自重や静止摩擦力）によって保持されている状態である。したがって、適切な制御を行わないと、足底の滑りや支持点の一部が浮

き上がる現象を引き起こす²⁰⁾。しかし、単脚支持期に比べ、支持点によって囲まれる面積が広く安定性が高いので、より安定な歩行を実現するためには、両脚支持期をもった歩行を検討し、その運動を十分解析したうえで有効な制御則を開発することが重要である。

高西ら¹⁾は、両脚支持期をいくつかの運動状態に分け、前後の足首の機械インピーダンスを制御し、他の関節については固定して倒立振子として斜め前方へ倒れ込む制御方式を提案している。彼らの研究では、ロボットはかかとから着地するようにし、このとき関節インピーダンスを適切に設定することで、着地時の衝撃を吸収している。成清ら²⁾は両脚支持期における運動制御を拘束空間における固有値指定問題として扱い、理論および実験の両面から検討している。また、川野ら³⁾は、現代制御理論の有効性の実証も兼ねて、拘束条件付最適レギュレータを適用し、蹴りのある動歩行を実現している。筆者らは、両脚支持期に蹴りのある歩行について検討し、比較的歩幅の長い（歩幅35 cm程度）歩行を実現した^{5),6)}。これらの歩行においては、主に後脚つま先による蹴り動作を用いて両脚支持期の歩行制御を行っているため、この制御則をそのまま歩幅の短い歩行に適用すると、蹴りによって前脚足底の一部が浮き上がる現象がみられた。本研究では、両脚支持期における蹴り相に注目して、足底の浮き上がりや滑りを防ぐ一つの制御方式を提案する。筆者らの行った歩行実験においても、かかとから着地することで衝撃を防ぐ歩行パターンを採用する場合もあるが、本論文では蹴り相のみに限定して議論する。

両脚支持期の運動制御は、開ループリンク機構の一端に拘束条件の付加された問題として表わされる。一般には、 n 自由度の力学システムに r 個($<n$)の拘束が付加されると自由度が $n-r$ に減る。この自由度低下のために入力が冗長になることが、制御を複雑にしている面もあるが、逆に入力の冗長性を利用して巧みな制御が可能な時期でもある。すなわち、両脚支持

[†] 日本ロボット学会第7回学術講演会で一部発表
(1989・11)

* 岐阜大学工学部 岐阜市柳戸 1-1

* Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu
(Received January 12, 1990)

(Revised May 8, 1990)

期には、同じ軌道を実現するのにも無数の関節トルクの組合せが存在する。本論文では、このトルク配分制御について議論し、角運動量、床反力およびトルク和を指標としながら、両脚支持期の運動に対して一つの制御方式を提案する。

2. 両脚支持期における角運動量制御

2.1 足首関節のトルク制御

歩行システムは、床面に完全に固定されたマニピュレータとは異なり、自重や静止摩擦力などによって発生する床反力により床面に保持されているだけである。制御方式を決定する際には、この点を十分考慮する必要がある。たとえば、産業用ロボットの制御に多く採用されている高ゲインの局所位置フィードバックをすべての関節に適用したとする。このような制御方式でも静歩行の間はそれほど問題はないが、歩行が動的になると目標値と実際の関節角度との間に大きな偏差が生じることがある。その結果、関節に過大なトルクが発生し、両脚支持期には足底の滑りなどを生ずる。

一般的に、局所位置フィードバックは、外乱やパラメータ変動に対してロバストであるという点で優れた制御方式である。しかし、上述のようにすべての関節に対して適用することには歩行ロボットの制御においては問題がある。特に、外界と接している足底部に最も近い足首関節に対して、高ゲインの局所位置フィードバックの適用は避けるべきである。人間の歩行を高速写真および筋電図などを用いて解析した研究においても、足首関節での繊細な制御が報告されている²¹⁾。すなわち、足首関節は、外界に従った制御を行う必要があり、本論文では、足首関節に対してはトルク制御を適用する。

2.2 制御量としての角運動量

歩行が滑らかに行われるためには、歩行全体の様子を表わす量を制御量として、フィードバックする歩行制御方式が有効であると考えられる。そこで、単脚支持期における歩行システムの角運動量について、Fig. 1(a)を用いて考えてみる。ニュートンの角運動量保存則からわかるように、歩行システムの支持脚足首まわりの角運動量は、外力モーメントである重力効果 MgY_G と支持脚足首トルク T_1 によってのみ変化し、内力モーメントの影響は受けない。ここで、重力効果は、制御入力として用いることがほとんどできないのに対して、支持脚足首トルクは有効な制御入力である。しかし、足底が浮き上がらない範囲に制限されるので、支持脚足首トルクによる十分な角運動量制御は難しくなる。したがって、単脚支持期の初期角

(a) Single-support phase (b) Double-support phase

Fig. 1 Biped locomotion system

運動量（両脚支持期の最終角運動量）が適切な値に制御されていないと、歩行継続が非常に困難になることさえある。

一方、両脚支持期には、Fig. 1(b)からわかるように、後脚による蹴り動作も利用でき、比較的角運動量制御がしやすい時期である。そこで、単脚支持期の初期角運動量を目標値に収束させることを目的として、両脚支持期の角運動量を制御することが考えられる。本論文では、両脚支持期における希望の目標角運動量関数が与えられたとき、この関数に従いながら、しかも足底の滑りや浮き上がりを防ぐ一つの歩行制御方式を提案する。

2.3 各関節の制御モード

本論文で提案する制御方式は階層構造となっており、下位レベルの制御としては、各関節における位置制御およびトルク制御を行うことにする。たとえば、本論文の制御対象とする2足歩行ロボット BLR-G 2 のピッチ軸まわりに回転する6個の関節の制御については、つぎに示すように制御モードを選んだ (Fig. 2 参照)。

① 前脚腰および前後の膝：高ゲイン位置制御モード

② 後脚腰および前後の足首：トルク制御モード

このように各関節の制御モードを選ぶと、歩行ロボットの Sagittal 平面（進行方向を含む床面に垂直な平面）内における運動はつぎようになる。Sagittal 平面内におけるロボットの運動は、単脚支持期では6自

Fig. 2 Control mode of each joint

自由度をもつが、両脚支持期では後脚つま先の接地により自由度が低下し 4 自由度となる。高ゲインの位置制御モードで制御される関節は 3 カ所であり、これらの関節はあらかじめ決められた目標値にほぼ従って動くので、残された自由度は 1 となる。そこで、トルク制御モードとなっている残りの三つの関節のトルクを用いて、この一つの自由度を制御することになる。以上のように各関節の制御モードを決めたのはつぎの理由による。

1) 前後の足首関節は、2.1 節および 2.2 節で述べた理由によりトルク制御モードとした。

2) 膝関節をトルク制御すると関節角度が定まらず、その結果、足首から腰までの距離が不定となる。これにより、姿勢が大きく崩れる可能性があるので、前後の膝関節の制御モードは位置制御モードとした。

3) 前脚あるいは後脚のどちらの腰関節を位置制御モードとするかについては、胴体部の姿勢制御の観点から考えてつぎのようにした。両脚支持期では、一般に後脚より前脚の荷重負担のほうが大きくなる。その結果、足底が滑ることなく耐えられる水平方向の力は、前脚足底のほうが大きくなる。そこで、前脚腰関節を位置制御モードとし、胴体が床面に対してほぼ垂直になるように目標関数を与えて制御することにした。

局所位置フィードバックされる前脚膝、前脚腰および後脚膝の三つの関節に対する目標関数 $\theta_{r2}(t)$ 、 $\theta_{r3}(t)$ および $\theta_{r5}(t)$ は、加減速のほとんどないものを選ぶことにする。すなわち、

$$\ddot{\theta}_{ri}(t) = 0 \quad (i=2, 3, 5) \quad (1)$$

本論文では、目標関数をつぎのような 1 次関数に選んだ。

$$\theta_{ri}(t) = p_i + q_i t \quad (i=2, 3, 5) \quad (2)$$

3. システムの定式化

3.1 拘束条件式

本研究で用いる歩行ロボットの両脚支持期における Sagittal 平面内の運動は、6 リンクモデルで表わせる (Fig. 3 参照)。各リンクの質量、長さおよび慣性モーメントを Table 1 に示す。まず、各リンクの絶対

Fig. 3 6-link model (sagittal plane)

角 θ_i を一般座標に選ぶことにする。ここで、 $\theta_1 \sim \theta_6$ は独立ではなくつぎのような拘束条件式を満たす必要がある。両脚支持期において、歩行システムは前脚足首と後脚つま先の 2 点で回転支持される。そこで、後脚つま先はつぎのように床面の一点 B に拘束される必要がある (Fig. 3 参照)。

$$\begin{cases} x_6 = x_1 + r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 \\ \quad - r_4 \cos \theta_4 - r_5 \cos \theta_5 - r_6 \cos \theta_6 \\ y_6 = y_1 + r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2 \\ \quad - r_4 \sin \theta_4 - r_5 \sin \theta_5 - r_6 \sin \theta_6 \end{cases} \quad (3)$$

この二つの拘束条件式をまとめてつぎのように表わす。

$$h_1(\theta) = 0 \quad (4)$$

さらに、本論文ではつぎのような拘束条件を付加する。高ゲインの位置フィードバック制御された関節は、ほぼ目標関数 $\theta_{r2}(t)$ 、 $\theta_{r3}(t)$ および $\theta_{r5}(t)$ に従って動くので、つぎのように仮定する。

$$\begin{cases} \theta_2 - \theta_1 = p_2 + q_2 t \\ \theta_3 - \theta_2 = p_3 + q_3 t \\ \theta_4 - \theta_5 = p_5 + q_5 t \end{cases} \quad (5)$$

この三つの拘束条件式をまとめてつぎのように表わす。

$$h_2(t, \theta) = 0 \quad (6)$$

(4) 式と (6) 式をまとめて、つぎのように表わすこと

Table 1 Values of parameters of biped

	Mass (kg)	Moment of inertia (kg·m ²)	Length (m)	Center of mass from lower joint (m)
Body	$m_3 = 9.32$	$I_3 = 0.1110$	—	$a_3 = 0.155$
Upper part of leg	$m_2 = m_4 = 4.68$	$I_2 = I_4 = 0.0337$	$r_2 = r_4 = 0.29$	$a_2 = a_4 = 0.178$
Lower part of leg	$m_1 = m_5 = 1.52$	$I_1 = I_5 = 0.0165$	$r_1 = r_5 = 0.25$	$a_1 = a_5 = 0.182$
Foot	$m_6 = 1.64$	$I_6 = 0.0112$	$r_6 = 0.147$	$a_6 = 0.115$

にする。

$$\mathbf{h}(t, \theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(\theta) \\ \mathbf{h}_2(t, \theta) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

3.2 運動方程式

Hemami ら⁸⁾および有本ら⁹⁾が提案した方法を用いて、拘束条件の付加されたシステムの運動方程式をつぎに求める。拘束力 $\mathbf{F}$ を導入することによってラグランジェの運動方程式は、つぎのように表わされる²²⁾。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial \theta} = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \theta} \right)^T \mathbf{F} + D\mathbf{u} \quad (8)$$

ここで、 K : 運動エネルギー、 U : ポテンシャルエネルギー

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = [T_1 \quad T_4 \quad T_6]^T$$

T_1, T_4, T_6 : 前脚足首, 後脚腰, 後脚足首トルク
運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを計算して上式に代入すると、つぎの運動方程式を得る。

$$A\ddot{\theta} + B(\theta)\dot{\theta} + \mathbf{g}(\theta) = E^T \mathbf{F} + D\mathbf{u} \quad (9)$$

ここで、

$$\mathbf{f}(\dot{\theta}) = [\dot{\theta}_1^2, \dot{\theta}_2^2, \dots, \dot{\theta}_6^2]^T, \quad E(\theta) = \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \theta} \right)$$

(9)式の左辺第1項は慣性力項であり、第2項は遠心力項であり、第3項は重力項である。(7)式を満たす $\mathbf{F}$ はつぎのようにして求められる。(7)式は恒等式であり、また $\mathbf{h}_2(t, \theta)$ は(6)式のように定義されるものなので、(7)式を時間について2回微分するとつぎのようになる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \dot{\theta}} \right) \dot{\theta} + \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \theta} \ddot{\theta} = \mathbf{0} \quad (10)$$

(9)式および(10)式より、 $\mathbf{F}$ はつぎのように与えられる。

$$\mathbf{F} = (E \quad A^{-1} \quad E^T)^{-1} \{ EA^{-1}(B\dot{\theta} + \mathbf{g}) - EA^{-1}D\mathbf{u} - \dot{E}\dot{\theta} \} \quad (11)$$

上式の $\mathbf{F}$ を(9)式に代入することにより両脚支持期の運動方程式が得られる。また、拘束力 $\mathbf{F}$ の各要素はつぎのようなものからなっている²³⁾。

$$[\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5]^T = [G_x, G_y, T_2, T_3, T_5]^T$$

ここで、

G_x, G_y : 後脚つま先の垂直および水平床反力

T_2, T_3, T_5 : 前脚膝, 前脚腰および後脚膝関節の角度を目標関数に従って変化させるために必要な関節トルク

4. 角運動量変化率とその効果係数

本章ではトルク制御モードとなっている関節のトルク

T_1, T_4, T_6 および重力効果が角運動量の変化にそれぞれどの程度の効果をもつかを与える式を導く。

(9)式に(11)式を代入することにより次式を得る。

$$\ddot{\theta} = -P(\theta)\dot{\theta} - Q(\theta)\mathbf{g}(\theta) - H(\theta)\dot{E}\dot{\theta} + R(\theta)\mathbf{u} \quad (12)$$

ここで、

$$\begin{cases} H(\theta) = E^T(EA^{-1}E^T)^{-1}, & P(\theta) = QB \\ Q(\theta) = A^{-1}(I - HEA^{-1}), & R(\theta) = QD \end{cases}$$

前脚足首まわりに関する歩行システムの角運動量 L はつぎのように表わすことができる。

$$L = \mathbf{v}^T(\theta)\dot{\theta} \quad (13)$$

ただし、 $\mathbf{v}(\theta)$ は角度ベクトル θ によって変化する6次ベクトルである。上式の両辺を時間について微分するとつぎのようになる。

$$\dot{L} = \dot{\theta}^T \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \theta} \dot{\theta} + \mathbf{v}^T(\theta)\ddot{\theta} \quad (14)$$

上式に(12)式を代入するとつぎのようになる。

$$\dot{L} = \dot{\theta}^T \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \theta} \dot{\theta} - \mathbf{v}^T P \mathbf{f}(\dot{\theta}) - \mathbf{v}^T Q \mathbf{g} - \mathbf{v}^T H \dot{E} \dot{\theta} + \mathbf{v}^T R \mathbf{u} \quad (15)$$

上式の右辺第1項、第2項および第4項は、 $\dot{\theta}_i$ に関する2次の項からなっている。これらの項は、通常の歩行においては、微小項としてはば無視できることがシミュレーションにより確認できた。そこで、角運動量変化率 $\dot{L}$ (kgm²/s²)は近似的につぎのように表わされる。

$$\dot{L} = \alpha T_1 + \beta T_4 + \gamma T_6 + \delta \quad (16)$$

ここで、

$$[\alpha, \beta, \gamma] = \mathbf{v}^T R, \quad \delta = -\mathbf{v}^T Q \mathbf{g}$$

上式において、 α, β および γ はそれぞれ前脚足首トルク、後脚腰トルクおよび後脚足首トルクの角運動量変化率に対する効果係数となっている。また、 δ (kgm²/s²)は重力の角運動量変化率への効果を表わしている。

Fig. 4 に示すようにロボットの外形が変化する場合を考える。重心位置 Y_G が -8.5 cm $\sim$ 0.5 cm(前脚足首を原点として)まで変化している。ただし、歩幅は20 cmであり、足底の前後長が20 cm程度($h_1 = 12.9$ cm, $h_2 = 6.2$ cm)の本研究で用いたロボットでは、歩幅が短い場合に対応する。さらに、前後の膝関節はその関節角度を一定に保持しており、(2)式において $p_2 = -0.2998$, $p_5 = 0.0$ および $q_2 = q_5 = 0.0$ としたものになっている。**Table 2**にロボットの初期および終端外形における各効果係数と重力効果 δ を示す。表からわかるように後脚腰関節の効果係数 β の絶対値は比較的小さい。すなわち後脚腰トルクは角運動

Fig. 4 Transition of posture

Table 2 Values of α , β , r and δ

Y_G	-8.5	0.5
α	-0.99	-0.99
β	0.18	0.20
r	-0.56	-0.47
δ	16.13	-3.95

量の増減にはあまり寄与しないことがわかる。そこで、本論文では、後脚腰関節のトルク目標値を零（自由回転状態）にすることにする。すなわち、次章以降では前後の足首関節のトルク配分制御について議論する。

5. トルク配分

5.1 床反力とその制約条件

まず、床反力の誘導について示す。 θ 、 $\dot{\theta}$ および u が与えられれば(12)式から $\ddot{\theta}$ が得られ、また(11)式から後脚つま先の床反力 G_x 、 G_y および関節トルク T_2 、

T_3 、 T_5 が得られる。さらに、並進運動に関する力のつり合いにより、前脚足首に作用する力 N_x および N_y が求められる。得られた N_x 、 N_y および前脚足首トルク T_1 を用いて前脚足底に作用する床反力が計算できる。前脚足底に作用する床反力 F_{x1} 、 F_{x2} 、 F_y (Fig. 4 参照)はつぎようになる。

$$\text{前脚つま先の垂直床反力 } F_{x1} = \frac{N_x h_2 + N_y h_3 - T_1}{h_1 + h_2}$$

$$\text{前脚かかとの垂直床反力 } F_{x2} = \frac{N_x h_1 - N_y h_3 + T_1}{h_1 + h_2}$$

$$\text{前脚足底の水平床反力 } F_y = N_y$$

安定な歩行を実現するために、床反力が満たすべき制約条件はつぎのように決めた。

① 前脚つま先およびかかと、さらに後脚つま先の垂直床反力がある値 n_1 、 n_2 および n_3 以上（支持点が浮かない条件）。すなわち、

$$F_{x1} > n_1 > 0, F_{x2} > n_2 > 0, G_x > n_3 > 0 \quad (17)$$

② 前脚足底に働く垂直方向と水平方向の床反力の比率および後脚つま先に働く垂直方向と水平方向の床反力の比率がある値以下（滑らない条件）。すなわち、

$$\frac{F_y}{F_{x1} + F_{x2}} < \mu_1, \quad \frac{G_y}{G_x} < \mu_2 \quad (18)$$

ただし、安全のため μ_1 、 μ_2 は床面の摩擦係数より十分小さな値に選ぶ必要がある。

5.2 制約条件を満たす足首トルク

床反力は前節でも述べたように、 θ 、 $\dot{\theta}$ および u の関数として厳密には求まる。しかし、 $\dot{\theta}$ は運動方程式においては2次の項として作用するため、通常の歩行においては、その影響は非常に小さい。そこで、 $\dot{\theta}$ の影響を無視し $\dot{\theta} = 0$ とにおいて床反力を求めることにする。すなわち、角運動量変化率 $\dot{L}$ も床反力も、 θ と u の関数として決定される。

Fig. 5 は横軸に前脚足首トルク T_1 を、縦軸に後

Fig. 5 Contour lines of variation ratio of angular momentum

脚足首トルク T_6 がとってある。図中に角運動量変化率一定の等高線が描かれている。ただし、負の値は角運動量が減少することを意味する。さらに、前節の制約条件を満たす許容領域がハッチングで示されている。ただし、 n_1 , n_2 および n_3 を 20 N とし、 μ_1 および μ_2 を 0.1 とした場合である。また、許容領域の境界上ではつぎの条件のいずれかが成立している。

- (A) $F_{x1}=n_1$, (B) $F_{x2}=n_2$
 (C) $F_y/(F_{x1}+F_{x2})=\mu_1$
 (D) $G_y/G_x=\mu_2$

Fig. 5(a), (b)および(c)は、それぞれ Fig. 4 に示した初期、中間および終端外形に対応している。図からわかるように、ロボットの外形に応じて許容領域が大きく変化している。また、角運動量変化率一定の等高線も左下に向かって移動している。初期外形では角運動量を増加させることが不可能であり、終端外形では、逆に減少させることが不可能となっている。一方、中間外形では、正負両方向に角運動量制御が可能であり、その許容領域も広がっている。

5.3 トルク和最小化によるトルク配分の決定

本節では、希望の角運動量変化率 $\dot{L}$ が与えられたときに、歩行システムの外形に応じた適切なトルク配分を行うことを考える。4章および5.1節ではつぎのような関係式が得られた。

① 角運動量変化率と足首トルクの関係式 ((16)式)

② 床反力制約式 ((17)式および(18)式)

床反力制約式は不等式条件であり、唯一解が得られないのでつぎの評価関数を導入する。

③ 関節トルクの絶対値の総和が最小

$$T_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^6 |T_i| \rightarrow \min$$

以上三つの関係式から、前後脚の足首トルク T_1 , T_6 の配分を決定することにする。

Fig. 6 は、Fig. 5 の角運動量変化率一定の等高線 ($-5, 0$ および $5 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$ の場合) 上における関節トルクの絶対値の総和 T_{sum} の変化を示している。縦軸には T_{sum} がとってあり、横軸には後脚足首トルク T_6 がとってある。図(a)および図(b)はそれぞれ $Y_G = -4.0 \text{ cm}$ および $Y_G = 0.5 \text{ cm}$ の場合を示している。図中の実線部分は床反力制約条件を満たしている場合を示しており、破線は満たしていない場合を示している。たとえば、 Y_G が -4.0 cm で希望の角運動量変化率が零の場合、本手法を用いると図中のA点における後脚足首トルク T_6 が選ばれる。Fig. 7 は、希望

(a) $Y_G = -4.0 \text{ cm}$ (b) $Y_G = 0.5 \text{ cm}$
 Fig. 6 Variations of T_{sum} on the contour lines of $\dot{L}$

(a) $Y_G = -4.0 \text{ cm}$ (b) $Y_G = 0.5 \text{ cm}$
 Fig. 7 Proper distribution of ankle torque

の角運動量変化率 $\dot{L}$ と適切に配分された足首トルク T_1 , T_6 との関係を示している。横軸は希望の角運動量変化率を示し、縦軸は適切な足首トルクを示している。

6. 制御実験

6.1 制御システムと制御方法

2足歩行ロボットの外観を Photo. 1 に示す。総重量 25 kg, 全高 0.97 m の人間型ロボットである。腰、膝および足首に各ピッチ軸の1自由度、足底にロール軸の1自由度の計8自由度構成となっている。ロボットに取り付けた傾斜角計、角速度センサおよび速度センサなどからの情報によって、ロボットの姿勢角や角運動量の計算を行った。また、足首トルクは、中間段プーリーに内蔵されたトルクセンサを用いて検出され、Fig. 8 に示すフィードバック則によって制御される。

本論文では、角運動量を制御量として歩行システムを制御する方法を採用した。その具体的な制御方法はつぎのようなものとした。希望の角運動量変化率は次式から求めることにする。

Photo. 1 Biped locomotion robot (BLR-G2)

Fig. 8 Block diagram of ankle torque control

$$\dot{L} = K_L(L_{ref} - L_{BLR}) \quad (19)$$

ここで,

$\dot{L}$: 希望の角運動量変化率 (kgm^2/s^2)

L_{ref} : 目標角運動量 (kgm^2/s)

L_{BLR} : ロボットがもつ角運動量 (kgm^2/s)

K_L : 比例フィードバックゲイン

つぎに, 希望の角運動量変化率およびロボットの外形をもとに, あらかじめ準備されたテーブルから適切な足首トルクを決定する. すなわち,

$$\begin{cases} T_{1ref} = f_1(\dot{L}, \theta) \\ T_{6ref} = f_2(\dot{L}, \theta) \end{cases}$$

ただし, ロボットの外形によっては, 希望の角運動量変化率が必ずしも実現できるとは限らない. この場合, 床反力の制約条件を満たす範囲内で可能な角運動量変化率に対する足首トルクが準備される.

6.2 実験結果

初期角運動量が零の場合の実験結果について示す.

初期角運動量が零なので, 正の角運動量増加が実現できるロボット外形を選ぶ必要があり, 本実験では $Y_G =$

Fig. 9 Angular momentum of biped robot

(a) Ankle torque T_1 (b) Ankle torque T_6

Fig. 10 Response of ankle torque

(a) Fore foot

(b) Hind foot

Fig. 11 Reaction force

-4.5 cm とした。実験の結果、歩幅 20 cm の両脚支持状態で滑らかな重心移行を実現した。Fig. 9 は、角運動量の時間変化を示している。破線が目標角運動量であり、実線が得られた角運動量の実験データである。かなりよく角運動量が制御されていることがわかる。このとき、胴体速度は 0.12 m/s に達している。Fig. 10 は、前後の足首トルクを示している。破線がトルク目標値であり、実線が得られたトルクデータである。Fig. 11 は垂直床反力の計測結果である。前脚つま先、かかとおよび後脚つま先とも 5.1 節に示した支持点が浮かない条件を満足していることがわかる。

7. おわりに

本論文で得られた結果をまとめるとつぎのようになる。

1) 支持脚足首トルクを制御入力とした角運動量制御の重要性を指摘し、前後の足首関節および後脚腰関節に対してトルク制御を行い、他の関節に対しては高ゲイン位置制御を適用する制御構造を採用した。

2) 角運動量変化率を求める式を導き、前後の足首トルクおよび後脚腰トルクの角運動量変化率に対する効果係数を求めた。その結果、後脚腰トルクは角運動量の増減にあまり寄与しないことを確認した。

3) 安定な歩行を実現するために、床反力が満たすべき条件を決め、この制約条件を満たす足首トルクの組合せを各歩行外形に対して求めた。つぎに、トルク和を最小化することによって、適切な足首トルク配分の決定を行った。

4) 希望の目標角運動量関数に従いながら、しかも、足底の滑りや浮き上がりを抑えた滑らかな運動を2足歩行ロボットを用いて実現した。

参考文献

- 高西, 石田, 山崎, 加藤: 2足歩行ロボット WL-10 RD による動歩行の実現, 日本ロボット学会誌, **3-4**, 325/336 (1985)
- 成清, 小林, 伊藤, 細江: 二足歩行系の両脚支持期の制御について, 電気学会論文誌 C 編, **103-12**, 281/286 (1983)
- 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)
- 五十嵐, 野飼: 二足歩行運動における両脚支持相の力学解析と制御, 日本ロボット学会誌, **7-3**, 142/150 (1989)
- 古荘, 山田: 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—, 計測自動制御学会論文集, **22-4**, 451/458 (1986)
- 佐野, 古荘: 角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行, 計測自動制御学会論文集, **26-4**, 459/466 (1990)
- 宮崎, 有本: 二足歩行のダイナミクスの制御理論的考察, 計測自動制御学会論文集, **14-4**, 428/433 (1978)
- H. Hemami and B.F. Wyman: Modeling and Control of Constrained Dynamic Systems with Application to Biped Locomotion in Frontal Plane, IEEE Trans. Automatic Control, **AC-24-4**, 526/535 (1979)
- 有本, 宮崎: 二足歩行ロボットの階層制御, 日本ロボット学会誌, **1-3**, 167/175 (1983)
- 伊藤, 成清: 拘束のある2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)
- H. Miura and I. Shimoyama: Dynamic Walk of Biped, Int. J. of Robotics Research, **3-2**, 60/74 (1984)
- R. Kato and M. Mori: Control Method of Biped Locomotion Giving Asymptotic Stability of Trajectory, Automatica, **20-4**, 405/414 (1984)
- T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase and T. Kawase: Realization of a High Speed Biped Using Modern Control Theory, Int. J. Control, **40-1**, 107/119 (1984)
- 川村, 川村, 藤野, 宮崎, 有本: 運動パターン学習による二足歩行ロボットの歩行実現, 日本ロボット学会誌, **3-3**, 177/187 (1985)
- 梶田, 小林: 位置エネルギー保存形軌道を規範とする動的2足歩行の制御, 計測自動制御学会論文集, **23-3**, 281/287 (1987)
- J. Furusho and A. Sano: Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped, Int. J. of Robotics Research, **9-2**, 83/98 (1990)
- M. Yamada, J. Furusho and A. Sano: Dynamic Control of Walking Robot with Kick-Action, Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Robotics, 405/412 (1985)
- J. Furusho and M. Masubuchi: Control of a Dynamical Biped Locomotion System for Steady Walking, Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **108-2**, 111/118 (1986)
- 佐野, 古荘: 最適レギュレータを用いた二足歩行ロボットの動的制御, 日本機械学会論文集 (C), **54-504**, 1804/1811 (1988)
- D.E. Orin and S.Y. Oh: Control of Robotic Mechanisms Containing Closed Kinematic Chains, Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **102-2**, 134/141 (1981)
- 森本, 笠原, 土屋: 高速度カメラを含む高精度歩行分析システムによる足部を中心とする下肢機能の解析, バイオメカニズム, **5**, 159/167 (1980)
- 後藤, 山本, 神吉: 力学演習, 306/307, 共立出版 (1971)