インピーダンス制御による2足歩行ロボットの歩行制御

学生員 空 尾 謙 嗣 (慶應義塾大学)

正 員 村 上 俊 之 (慶應義塾大学)

正 員 大 西 公 平 (慶應義塾大学)

Walking Control of a Biped Robot by Impedance Control

Sorao Kenji, Student Member, Murakami Toshiyuki, Member, Ohnishi Kouhei, Member (KEIO University)

In this paper, a robust impedance control scheme is used to control a biped locomotion in sagittal plane. In particular, the torque observer is introduced and external-force feedback is achieved without force sensor. By the reaction force feedback, the stability of the biped robot increase at the contact of the swing leg and the arbitral impedance control is realized without force sensor. The walking trajectory reference is created from the virtual inverse pendulum model. Simulation and experimental results also show that the effect of the collision between biped leg and the ground is eased and by the proposed control method, the biped robot recover more quickly than the traditional robust position control.

キーワード：2足歩行ロボット，インピーダンス制御，力センサレス，反作用トルク推定オブザーバ，外乱オブザーバ，仮想倒立振子モデル

1. はじめに

近年，産業用ロボットは日々めざましい発展を遂げており，最近では従来の固定型ロボットに加えて目的に応じ自ら移動する機能を持つ移動型ロボットに関しても様々な研究が展開されている。それらの移動機構は車輪を用いたものが多く見られるが，不整地での移動など，汎用性の高いロボットの移動機構を追求すると，例えば人間のように2本足で移動することが理想の一つであると考えられる。

そこで，現在までに，歩行動作を倒立振子の運動に低次元化させて歩行を実現するもの⁽²⁾⁽¹⁰⁾や，歩行パターンに関して，歩行の周期的なリズムに注目したもの⁽¹⁾，ニューラルネットワーク等を用いてその自動生成を行うもの⁽⁵⁾，適応制御を用いたもの⁽⁶⁾など，さまざまな試みがなされており⁽³⁾⁽⁴⁾，多くの興味深い結果が報告されている。さらに，この2足歩行の実現に関しては，絶対的な固定点を持たないという歩行ロボット特有の構造上の不安定さから，多くの論文において，歩行中に作用する干渉力などの外乱に，低感度なロバスト位置制御系を構成することが有効な制御手法の一つであるとされている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかしながら，ロバスト制御による参照軌道追従型歩行においては，足と地面との衝突時における衝撃力をも補償してしまうため，かえってその影響で歩行が不安定になり易いという問題が同時に生じてしまう。この地面との衝突はインパルス状の衝撃力

であるためその定式化が難しく，現在までにその動特性まで考慮して議論されている論文は少ない。そこで，本論文ではこのようなロボット脚接地時の衝撃力を柔軟に吸収することを主たる目的として，支持脚の制御にインピーダンス制御を適用することを提案する。また，インピーダンス制御は従来より産業用ロボット等の制御によく用いられているが，そのような場合，力センサ等を用いて反作用力をフィードバックする方法が一般的である。しかしながら，同方法においてはセンサ取り付け部に作用する外力しか検出することができず，歩行ロボットのように固定点を持たないロボットに適用した場合，正確な反作用力を得られるとは限らない。しかも，特にロボット脚と地面との衝突の際に生じる衝撃力は大きいため，センサ自身が破損してしまうといった問題も生じてくる。そこで本論文では外乱オブザーバを応用して，力センサ等を用いずに反作用力を推定する方法を紹介する⁽⁹⁾。

なお，本論文で行わせる歩行軌道生成には，従来よく用いられる倒立振子モデル⁽¹⁰⁾から得られる歩行パターンを用い，エネルギー的に効率の良い，より人間に近い歩行状態を目指す。

以上，提案した手法は計算機によるシミュレーション実験，ならびに製作したsagittal平面にのみ6自由度を有する2足歩行ロボットを用いた実機実験により，その有効性を確認する。

図1 倒立振り子モデル

Fig. 1. A model of the inverse pendulum.

2. 倒立振り子モデルに基づいた軌道生成

人間に近い歩行をロボットに実現させるため、支持脚各関節の軌道を仮想的な倒立振り子モデルに基づいて生成する。

図1に示すような理想的な倒立振り子では、固定点周りの力学的エネルギー保存則より、

$$\frac{1}{2} M l_G^2 \dot{\theta}_G^2 = M g l_G (1 - \cos \theta_G) + \frac{1}{2} M l_G^2 \dot{\theta}_0^2 \cdots (1)$$

となる。ここで、 M 、 l_G 、 θ_G 、 $\dot{\theta}_0$ はそれぞれ、倒立振り子モデルの質量、質点までの長さ、倒立振り子の垂直軸から見た傾き、 $\theta_G = 0$ での角速度であり、 g は重力加速度である。また、(1)式を $\dot{\theta}_G$ について解き、(2)式を得る。

$$\dot{\theta}_G = \sqrt{\frac{2g}{l_G} (1 - \cos \theta_G) + \dot{\theta}_0^2} \cdots (2)$$

ここで、 $\dot{\theta}_G$ は重心についての角速度であるが、2足歩行ロボットにおいては支持脚の膝を任意の角度に固定することによって、 $\dot{\theta}_G$ を実現すべき支持脚足首の角速度にそのまま置き換えることが可能となる。さらにロボットの歩行速度をある程度任意に設定するため、(2)式に任意の定数 P を作用させることによって、支持脚足首の角速度指令値 $\dot{q}_1^{cmd}$ が(3)式で得られる。

$$\dot{q}_1^{cmd} = P \sqrt{\frac{2g}{l_G} (1 - \cos \theta_G) + \dot{\theta}_0^2} \cdots (3)$$

また、(3)式を時間領域において微分することにより、支持脚足首の角加速度指令値 $\ddot{q}_1^{cmd}$ が(4)式で得られる。

$$\ddot{q}_1^{cmd} = \frac{P}{2\sqrt{\frac{2g \cos \theta_G}{l_G}}} \sin \theta_G \dot{\theta}_G \cdots (4)$$

さらに、支持脚足首の位置指令値 q_1^{cmd} は(3)式を積分することによって得られる。

3. 2足歩行ロボットのインピーダンス制御

〈3・1〉 2足歩行ロボットの基本運動方程式 まず本研究で扱う2足歩行ロボットを図2に示す。このロボットはsagittal平面にのみ6自由度を持つため、図3に示されるような冗長マニピュレータとして扱うことができる。

図2 2足歩行ロボット

Fig. 2. The biped robot

図3で関節座標系 $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$ を一般化座標としてラグランジュ方程式を解くと、摩擦まで考慮したsagittal平面における2足歩行ロボット運動方程式が(5)式で定義される。

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) + F + D\dot{q} \cdots (5)$$

ここで、 $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5 \ \tau_6]^T$ は入力トルク、 M は 6×6 の慣性行列、 H は 6×1 のコリオリ力、求心力行列、 G は 6×1 の重力項、 $F + D\dot{q}$ は 6×1 の摩擦項である。(5)式より、ロボットの支持脚関節(関節1-支持脚足首、2-支持脚膝)について取り出すと、

$$\tau_1 = J_1 \ddot{q}_1 + \tau_{int1} + \tau_{g1} + F_1 + D_1 \dot{q}_1 \cdots (6)$$

$$\tau_2 = J_2 \ddot{q}_2 + \tau_{int2} + \tau_{g2} + F_2 + D_2 \dot{q}_2 \cdots (7)$$

となる。ここで、(6,7)式の (J_1, J_2) 、 $(\tau_{int1}, \tau_{int2})$ 、及び (τ_{g1}, τ_{g2}) はそれぞれ自己慣性、内部干渉トルク、重力に起因するトルクであり、その成分は次式のようになる。

$$J_1 = M_{11}, J_2 = M_{22}$$

$$\tau_{g1} = G_{11}, \tau_{g2} = G_{21}$$

$$\tau_{int1} = \sum_{i=2}^6 M_{1i} \ddot{q}_i + H_{11}$$

図3 2足歩行ロボットのモデル

Fig. 3. A model of the biped robot

図4 インピーダンスを持つ支持脚の動的モデル

Fig. 4. Dynamic model of the support leg with the impedance

$$\tau_{int2} = M_{21}\ddot{q}_1 + \sum_{i=3}^6 M_{2i}\ddot{q}_i + H_{21}$$

ただし M_{ij}, H_{ij}, G_{ij} はそれぞれ (5) 式各行列の要素である。

〈3・2〉ロボットのインピーダンスとモデル化 ロボット脚と地面との衝突を含め、外界からシステムに作用する外力に応じて位置制御を行なう制御方法の一つとしてインピーダンス制御があり、本研究では支持脚の2リンクの制御に同手法を用いる。

ここで、外力に対してインピーダンス特性を持たせた支持脚の運動を図4のような系でモデル化する。この図4よりその運動方程式は (8) 式ようになる。

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= K_p^{imp}(x^{cmd} - x) - K_v^{imp}\dot{x} - F_{ext} \\ &= K_p^{imp}\delta x - K_v^{imp}\dot{x} - F_{ext} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

また、 $x = [x \ y]^T$, $M = \text{diag}[M_x, M_y]$, $K_p^{imp} = \text{diag}[K_{px}^{imp}, K_{py}^{imp}]$, $K_v^{imp} = \text{diag}[K_{vx}^{imp}, K_{vy}^{imp}]$ である。

次に、(8) 式に示される運動を、前述の倒立振子モデルより得られた、関節の角加速度指令に反映させることにより、次の (9) 式を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{q}^{ref} &= K_p(q^{cmd} - q^{res} - J_{aco}^{-1}\delta x) \\ &\quad + K_v(\dot{q}^{cmd} - \dot{q}^{res} - J_{aco}^{-1}\dot{x}) \\ &\quad + \ddot{q}^{cmd} - J_{aco}^{-1}\ddot{x} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここで、 $q^{cmd} = [q_1^{cmd} \ q_2^{cmd}]^T$ は支持脚関節位置の指令値、 $K_p = \text{diag}[K_{p1}, K_{p2}]$, $K_v = \text{diag}[K_{v1}, K_{v2}]$ は関節 PD 制御器の各ゲイン、 J_{aco} は支持脚のヤコビ行列である。

また、本論文では基本的な制御系として、2足歩行ロボットの各関節に外乱オブザーバを用いたロバスト角加速度制御系を構成する。(9) 式に示されるインピーダンス特性を付加した加速度指令値と外乱オブザーバを併用することに

より、所望のインピーダンス特性が任意に実現されるロバストなインピーダンス制御系を構成することができる。ここで、(8) 式の水平方向成分を取り出し、ラプラス変換すると (10) 式が得られる。

$$\begin{aligned} x &= \frac{K_{px}^{imp} M_x^{-1} (x^{cmd} - K_{px}^{imp-1} F_{extx})}{s^2 + K_{vx}^{imp} M_x^{-1} s + K_{px}^{imp} M_x^{-1}} \dots\dots (10) \\ &= \frac{K_{px}^{imp} M_x^{-1}}{s^2 + K_{vx}^{imp} M_x^{-1} s + K_{px}^{imp} M_x^{-1}} \\ &= \left[\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right]_{diag} \end{aligned}$$

(ω_n : 固有振動数, ζ : 減衰率)

この (10) 式は、水平方向に関する位置指令と外力に対する位置応答を表している。また、垂直方向に関しても同様の関係式が成立する。よって、外乱オブザーバが各関節に適用されたロボットにおいて、作業空間における設計メカニカルインピーダンスは (8,10) 式の M , K_p^{imp} , K_v^{imp} と定めることができる。

〈3・3〉反作用力の推定法 次に、(8) 式における反作用力 F_{ext} の推定方法について説明する。一般に、ロボットの関節 i に適用した外乱オブザーバから得られる推定外乱 $\hat{\tau}_{disi}$ は (11) 式のように定義することができる。

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{disi} &= \tau_{inti} + \tau_{exti} + \tau_{gi} + (J_i - J_{ni})\ddot{q}_i \\ &\quad + (K_{tni} - K_{ti})I_{ai} + F_i + D_i\dot{q}_i \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

τ_{inti} : 内部干渉トルク
 τ_{exti} : 反作用トルク
 τ_{gi} : 重力に起因するトルク
 $F_i + D_i\dot{q}_i$: 摩擦トルク

ここで、(11) 式の τ_{inti} , τ_{gi} は (5) 式の運動方程式および、実際のロボットを用いた同定試験の結果より、その内部パラメータをすべて計算することが可能である。さらに、摩擦トルク $F_i + D_i\dot{q}_i$ も実機を用いた等角速度試験を行なうことにより、あらかじめ測定が可能となる。また、上述の同定試験の結果より関節の自己慣性項のノミナル値 J_{ni} のパラメータとモータ定数のノミナル値 K_{tni} を算出することによって、(11) 式の第4, 5項を無視することが可能となる⁽⁹⁾。よって、これらの測定値を実際の制御系で用い、(11) 式に示される外乱オブザーバの出力から差し引くことにより、反作用トルク τ_{exti} が次の (12) 式で算出可能となる。冗長になることを避けるため、各パラメータの同定法と (12) 式の導出法に関しては省略する。詳しくは文献 (9) を参照されたい。

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{exti} &= \frac{\alpha}{s + \alpha} (K_{tni}I_{ai} + \alpha J_{ni}\dot{q}_i - \tau_{inti} \\ &\quad - \tau_{gi} - F_i - D_i\dot{q}_i) - \alpha J_{ni}\dot{q}_i \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

α : オブザーバの遮断周波数

図5 反作用トルク推定オブザーバのブロック線図

Fig. 5. Diagram of the external torque observer

また、この(12)式より反作用トルク推定オブザーバが図5に示すように構成できる。

そこで、上述の同定試験を実験に用いる2足歩行ロボット(図2)に対して行ない、得られた(6,7)式に示される内部干渉トルク τ_{int1}, τ_{int2} 、重力トルク τ_{g1}, τ_{g2} 、摩擦トルク $F_1 + D_1 \dot{q}_1, F_2 + D_2 \dot{q}_2$ の各モデルより反作用トルク推定オブザーバを構成し、支持脚の2関節に適用する。すると、その出力 $\hat{\tau}_{ext} = [\hat{\tau}_{ext1} \ \hat{\tau}_{ext2}]^T$ から(13)式によって、ロボットに作用する外力 $F_{ext} = [F_{extx} \ F_{exty}]^T$ を推定することが可能となる。

$$\hat{F}_{ext} = J_{aco}^{-T} \hat{\tau}_{ext} \quad (13)$$

ここで、 $\hat{F}_{ext}$ は F_{ext} の推定値である。

4. シミュレーション

〈4・1〉 トータルシステム 以上より、2足歩行ロボットにおける支持脚制御のトータルシステムを図6のブロック線図にまとめる。ここで、 $\hat{F}_{ext}$ は反作用力推定オブザーバによって得られる支持脚に作用する推定外力であり、任意のメカニカルインピーダンス $M K_p^{imp} K_v^{imp}$ を仮想的に支持脚に持たせるため、(9,10)式に基づいて反力の作用

を各関節の角加速度指令にフィードバックしている。また、倒立振り子モデルによる歩行の実現のため、支持脚ひざ関節 q_2 には $q_2^{cmd} = 40[deg]$ の一定値を与えてある。さらに、遊脚の制御は人間の歩行パターンを解析することによって得られた単純な角度指令を外乱オブザーバを用いたロバスト位置制御系で実現する。

図6に示すブロック線図に基づいて歩行シミュレーションおよび実験を行ない、本制御法の有効性を確認する。本研究では、歩行ロボットは遊脚が地面に接した瞬間に支持脚と遊脚の交換が行なわれるため、歩行は2足支持状態を含まないものとする。

〈4・2〉 ロボット胴体部加速度の比較 次に、歩行中に生じる歩行路面からの衝撃が与える影響に注目して、一般的なロバスト位置制御を行なった場合と、提案するインピーダンス制御を行なった場合での歩行状態(歩行時のロボット胴体部での垂直方向加速度の変動)の比較をシミュレーションにより行なう。ここで行なわせた歩行は、どちらも前述の倒立振り子モデルより得られる歩行パターンに基づいている。また、比較用のロバスト制御では2足歩行ロボットの支持脚の各関節に外乱オブザーバを適用し、各関節空間においてロバスト加速度制御系を構成させた。

歩行時のロボット胴体部加速度について、ロバストに位置制御した場合と、提案するインピーダンス制御を適用した場合の数値実験結果を図7,8にそれぞれ示す。なお、図8でのメカニカルインピーダンスは以下の通りである。

$$\begin{aligned} M &= \text{diag}[M_x, M_y] = \text{diag}[10, 10] \\ K_p^{imp} &= \text{diag}[K_{px}^{imp}, K_{py}^{imp}] = \text{diag}[500, 500] \\ K_v^{imp} &= \text{diag}[K_{vx}^{imp}, K_{vy}^{imp}] = \text{diag}[140, 140] \end{aligned}$$

両グラフとも、ロボット脚と地面とに衝突が生じた瞬間に、急激な加速度の変動が見られるが、本制御法を用いた場合、反力のフィードバックによって、加速度変動の幅が小さく抑えられ、その収束もより速くなっていることが確認できる。

図6 提案する支持脚制御系のトータルシステム

Fig.6. Total system of proposed controller.

図7 ロボット胴体での垂直方向加速度
(ロバスト制御)

Fig.7. Acceleration in vertical direction at the body (with robust control)

図8 ロボット胴体での垂直方向加速度
(インピーダンス制御)

Fig.8. Acceleration in vertical direction at the body (with robust impedance control)

5. 実験結果

さらに本制御法の有効性を確認するため、実機を用いた歩行実験を行なった。ここで、以下に示す実験結果はコンピュータのメモリ及び処理速度、一度に使用できる加速度センサの数などの制約から、同じパラメータの結果であっても、それぞれ別の歩行実験によるデータである。また、本制御方法におけるロボットへの指令値の与え方は(3)式に示されるように、歩行毎に絶対的な指令値ではなく、その時点の重心位置から指令値を生成するものである。歩行実験はロボットの微妙な初期位置の誤差や、関節軸の緩み加減などの誤差によって多少その挙動が変化することをはじめに断わっておく。

〈5・1〉 実験システム 実験で使用した2足歩行ロボットは図2に示すような、sagittal平面にのみ6自由度を有するものである。今回用いた実験システムのシグナルフローを図9に示す。また、実験でのサンプリングタイムは1[msec]である。

さらに、本実験は歩行ロボットのfrontal平面をルーズに拘束することによりsagittal平面にのみ運動が可能となるようにしている。

〈5・2〉 反作用力の推定結果 図5に示した反作用トルク推定オブザーバを用いて支持脚に作用する反作用力を推定した結果を図10に示す。0.6秒でロボット脚の着地動作が発生していることが分かる。しかしながら、2章で述

べたロボットのパラメータ同定に関する測定誤差から、外力が生じていない間も約20[N] ~ -10[N]の出力が見られる。それら図10に現れている誤差のうち、周期約0.6秒で変動している誤差は重力項の誤差であり、その中に含まれる小さな周期の波は内部干渉力に関する誤差であると予想される。

〈5・3〉 ロボット胴体部での加速度応答 次に、シミュレーション同様、各関節を外乱オブザーバを用いて、ロバストに位置制御させた歩行と、本研究で提案するインピーダンス制御を適用した歩行との遊脚接地による衝撃力の影響に関する比較を実験結果より行う。なお、どちらの制御においても、指令値として与える歩行パターンは前述の倒立振子モデルから実時間で生成される。

図11, 12はそれぞれ、支持脚の関節をロバストに制御させた場合と、提案するロバストインピーダンス制御をロボットの支持脚に適用させた場合のロボットの胴体部での垂直方向加速度の様子を示している。また、これらの加速度はロボットの胴体部にとりつけた加速度センサからの出力である。シミュレーション結果同様、反力をフィードバックすることによって、ロボット脚接地時の衝撃力の影響が緩和されていることが分かる。(遊脚の接地は図11で0.46[sec], 図12で0.9[sec]にそれぞれ生じている。) また、図12に示す結果は、メカニカルインピーダンスを

$$\begin{aligned} M &= \text{diag}[M_x, M_y] = \text{diag}[100, 100] \\ K_p^{\text{imp}} &= \text{diag}[K_{px}^{\text{imp}}, K_{py}^{\text{imp}}] = \text{diag}[5000, 5000] \\ K_v^{\text{imp}} &= \text{diag}[K_{vx}^{\text{imp}}, K_{vy}^{\text{imp}}] = \text{diag}[1400, 1400] \end{aligned}$$

と設定してある。

次に、メカニカルインピーダンスを水平方向に対して硬く、垂直方向には柔らかく設定した場合(Case 1)と、それとは逆に、水平方向に対して柔らかく、垂直方向には硬くした場合(Case 2)の作業空間内での歩行中ロボット胴体部における加速度変動の様子をそれぞれ図13, 14に示す。(それぞれの図で、ロボットの遊脚の接地が生じている時間は、図13(a)で0.78[sec], 図13(b)で0.76[sec], 図14(a)で0.75[sec], 図14(b)で1.1[sec]である。)

図9 実験システムのシグナルフロー図

Fig.9. Signal flow diagram of control system

図10 推定反作用力

Fig. 10. Estimated external force.

図11 ロボット胴体部でのy方向加速度（ロバスト位置制御）

Fig. 11. Acceleration in the vertical direction at the robot body (with only robust control).

図12 ロボット胴体部でのy方向加速度（ロバストインピーダンス制御）

Fig. 12. Acceleration in the vertical direction at the robot body (with robust impedance control).

設定したメカニカルインピーダンスを表1に示す。なお、どちらの実験も水平方向、垂直方向共に $\omega_n = 7.07$, $\zeta = 1.0$ としてある。

得られた結果より、インピーダンスを適当に柔らかく設定することにより、加速度の変動が比較的小さく押さえられるという傾向がある。しかしながら、歩行状態の観点から見ると、水平方向に対して柔らかく設定し、制御した Case 2ではインピーダンス応答が歩行本来の動作に大きく干渉してしまう傾向があり、転倒を引き起こすことが多かった。

〈5・3・1〉ロボットの歩行状態 最後に実験における歩行の様子を図15に示す。設定したメカニカルインピーダンスは前節の case 1 の値を用い、 $P = 0.7$, $\theta_0 = 5[\text{deg/sec}]$ (1)参照)とした。歩幅約12cm、歩行周期約0.8秒の安定

(a) in the vertical direction.

(b) in the horizontal direction.

図13 ロボット胴体部加速度（Case 1）

Fig. 13. Acceleration in the vertical direction at the robot body (in Case 1).

した歩行が実現できている。

6. む す び

本論文では、2足歩行ロボットに環境に対応した柔軟な歩行を実現させるため、ロボットの支持脚制御にインピーダンス制御を適用した。本手法では、外乱オブザーバを応用した反作用力推定オブザーバを用いることによって、ロボット構造上の制約から設置が困難である力センサ等を用いることなく反作用力のフィードバックを実現することができる。また、人間に近い省エネ型歩行を実現させるため、基本的な歩行パターンを倒立振子モデルを用いて生成した。提案するセンサレスインピーダンス制御を適用することにより、ロボットは力センサを用いることなく、遊脚と支持脚の切り替わりの際に生じる衝撃力を柔軟に吸収し、衝撃

表1 実験に用いたメカニカルインピーダンス

Table 1. Mechanical impedance parameters used in the experimentants

(a) Case 1	
$M = \text{diag}[M_x, M_y] = \text{diag}[500, 10]$	
$K_p^{\text{imp}} = \text{diag}[K_{px}^{\text{imp}}, K_{py}^{\text{imp}}] = \text{diag}[25000, 500]$	
$K_v^{\text{imp}} = \text{diag}[K_{vx}^{\text{imp}}, K_{vy}^{\text{imp}}] = \text{diag}[7070, 140]$	
(b) Case 2	
$M = \text{diag}[M_x, M_y] = \text{diag}[10, 500]$	
$K_p^{\text{imp}} = \text{diag}[K_{px}^{\text{imp}}, K_{py}^{\text{imp}}] = \text{diag}[500, 25000]$	
$K_v^{\text{imp}} = \text{diag}[K_{vx}^{\text{imp}}, K_{vy}^{\text{imp}}] = \text{diag}[140, 7070]$

(a) in the vertical direction.

(b) in the horizontal direction.

図14 ロボット胴体部加速度 (Case 2)

Fig. 14. Acceleration in the vertical direction at the robot body (in Case 2).

図15 実験での歩行状態

Fig. 15. Experimental Walking Motion.

力が歩行におよぼす影響を減少させることが可能となる。

本手法の有効性は数値実験, および製作した sagittal 平面に 6 自由度を有する 2 足歩行ロボットを用いた歩行実験により確認された。また実験結果より, 支持脚にインピーダンス特性を持たせる際には, 垂直方向には柔らかく, 水平方向に関しては堅めに設定するとより安定な歩行が実現できることが分かる。これは, 歩行という動作が主に重心を水平方向に運動させるというものであるため, 床反力等の影響が歩行パターンの水平方向に過剰に干渉することが望ましくないということを示している。しかしながら, 最適なインピーダンス特性とは環境(床の硬さ, 勾配等の形状など)によって, 大きく変化することが考えられる。環境を含めた最適なインピーダンス特性の設定法などについて

では今後検討する予定である。

(平成 8 年 12 月 18 日 受付, 同 9 年 5 月 30 日 再受付)

文 献

- (1) 川路, 小笠原, 飯盛: 「コンプライアンスを用いた二足歩行ロボットの運動制御」, 電気学会産業応用部門誌, Vol.116-D, No.1, pp.11-pp.18, 1996
- (2) 特集「二足歩行ロボット」, ロボット学会誌, Vol.11, No.3, 1993
- (3) H.HEMAMI, R.L.FARNSWORTH: "Postural and Gait Stability of a Planar Five Link Biped by Simulation", IEEE Trans. on Automatic Control, pp.452-pp.458, 1977
- (4) 山口, 高西, 加藤: 「上体運動により 3 軸モーメントを補償する 2 足歩行ロボットの開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.101-pp.106, 1993
- (5) Iqbal, Hemami, Simon: "Stability and Control of a Frontal Four-Link Biped System", IEEE Trans. on Biomedical Engineering, Vol.40, No.10, pp.1007-pp.1017, 1993
- (6) Yang, Shahaduddin: "Trajectory Planning and Control for a Five-Degree-of-Freedom Biped Locomotion System" Proc. of the American Control Conference, pp.3105-pp.3109, 1994
- (7) C.Shih, William A.Gruver: "Control of a Biped Robot in the Double-Support Phase", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.22, No.4, pp.729-pp.734, 1992
- (8) Raibert, S.Tzafestas, C.Tzafestas: "Comparative Simulation Study of Three Control Techniques", IEEE Int. conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vol.1, 1993
- (9) 村上, 中村, 郁, 大西: 「反作用力推定オブザーバに基づいた多自由度ロボットの力センサレスコンプライアンス制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.5, pp.765-pp.768, 1993
- (10) 南方, 堀: 「仮想倒立振子パラメータ指定による可変速二足歩行」, 電気学会産業計測制御研究会, IIC-94-6, 1994

空 尾 謙 嗣 (学生員) 1973 年 6 月 28 日生。1996 年 3 月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月同大学大学院電気工学専攻修士課程入学, 現在に至る。2 足歩行ロボットの歩行制御に興味を持つ。

村 上 俊 之 (正員) 1988 年 3 月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1993 年同大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年同大学勤務。現在同大学理工学部システムデザイン工学科専任講師。工学博士。現在, ロボティクス, モーションコントロールに関する研究に従事。

大 西 公 平 (正員) 1980 年 3 月東京大学大学院電気工学科博士課程修了。現在, 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科所属。工学博士。