人間型ロボットの作業移動

—作業移動に要求される脚機能の分析—

吉田 晴行* 井上 健司* 新井 健生* 前 泰志*

Mobile Manipulation of Humanoid Robots

—Analysis of the Required Function of Legs in Mobile Manipulation—

Haruyuki Yoshida*, Kenji Inoue*, Tatsuo Arai* and Yasushi Mae*

This paper describes mobile manipulation of humanoid robots. A humanoid robot is a kind of integrated machines: a two-arm and two-leg mechanism. It could be well applied to mobile manipulation in non-routine task automation. The main objective of the mobile manipulation is to obtain versatile and efficient manipulation by the arms. In this respect the legs are required to assist the arms obtaining their high manipulability by changing step length and timing of step motion. The required motion of the legs in mobile manipulation is different from the conventional biped locomotion. From this point of view, we discuss and analyze the required motion of legs in mobile manipulation. We propose a basic idea to quantitatively evaluate robot performance in mobile manipulation. Because manipulability and stability vary during the robot motion, we take an average and a variance of manipulability measure of arm, and an average and a minimum of stability margin per a locomotion cycle as an evaluation criterion. By computer simulations, the relationship between these evaluations and some patterns of leg motion is analyzed by using the proposed control method of mobile manipulation. The simulation results show that the leg motion can vary the manipulability of the arm by changing the step length and the timing of the step motion. It is also found that the manipulability of the arm and the stability of the robot are closely related.

Key Words: Mobile Manipulation, Integrated Motion Centered Manipulation, Manipulability, Humanoid Robot, Redundant Mechanism, Motion Analysis

1. 序 論

アーム機能と移動機能を併せ持つ作業移動型ロボットは一般に、ロボットアーム単体と比較して作業能力を増強できる特徴を持つ。例えば、移動の自由度によりアームの動作領域を拡大できる点や、機構の冗長自由度を利用した器用なマニピュレーションが可能となる点である。これらの特徴に着眼し、ハードウェア開発や制御手法の提案など、多数の研究がこれまでに報告されている [1] [2]。アームを移動プラットフォームに搭載したもの [3]~[5] や、生物の形態を参考とした昆虫型 [6]~[8]・人間型 [9] [10] 等がその例であり、様々な作業環境下での応用が期待できる。筆者らは、作業移動型ロボットの研究で目指すべき課題の一つとして、作業対象のマニピュレーションやハンドリングの中心はロボットアームであることに注目し、移動機能によりアーム機能を補完・増強させる手法の提案に重点を置く。また移動プラットフォームとしては、不整地や段差が伴う作業環

境下でも適用可能な脚式を対象とする。

筆者らの制御指針とする作業移動とは、先に述べたように、作業移動型ロボットが持つ移動機能により、アーム機能を補完・増強させる統合動作を意味する。アームによる器用かつ効率的なマニピュレーションを実現することが、作業移動の主な目的である。よって、アームを操作性の高い状態に維持するための運動が、移動プラットフォームに求められる。脚式作業移動型ロボットでは、その具体的な方法として、1) 脚接地点の変更、2) 脚の屈伸動作、による移動プラットフォームの位置姿勢の調整が挙げられる。ただし、その本体が土台に固定されていないので、安定性を維持できる範囲で、アーム機能を発揮できる脚の動作制御を検討する必要がある。

脚式作業移動型ロボットのうち人間型に関しては、すでに高度なハードウェアが開発された [9]~[11]。しかし、歩行中心の動作制御に重点を置いた研究が盛んであり [12]~[14]、筆者らが意図するアームを中心とした動作制御に関する報告は、これまでにない。

このような観点から、筆者らは人間型ロボットに作業移動を実現させる制御手法の開発に取り組んでいる。これまでに提案

原稿受付 2000 年 6 月 16 日

*大阪大学大学院基礎工学研究科

*Graduate School Of Engineering Science, Osaka University

した手法 [15] [16] の主な特徴は以下の 3 点に集約される。(1) アーム先端に未知外力が作用する状況下でインピーダンス制御により、アーム先端はつねに目標軌道に追従する、(2) 肩はアームの操作性とロボットの安定性が改善される方向に制御される、(3) 脚の接地点を変更することにより操作性と安定性が改善される場合、脚はあらかじめ決められた楕円軌道に沿って踏み換える。ただしこの手法では、脚動作パラメータである歩幅と踏み換えタイミングを固定している。しかし、精度や外乱の有無といったアームに要求される作業条件に応じて脚動作パラメータを調整することは、アームの作業能力を増加させる有効な手段と考えられる。例えば、歩幅の小さい動作では、立ち位置の微調整が可能になるので、アームを操作性の高い状態に維持したマニピュレーションを実現できる。一方、歩幅の大きな動作では、安定領域の絶対幅が大きいことから、外乱が作用しても安定なマニピュレーションを維持できる。

そこで本論文では、作業移動型ロボットを対象とした作業移動の概念を提案し、人間型ロボットに作業移動を適用する場合の、脚の動作制御における着眼点および技術課題について論じる。そして、脚動作パラメータとアームの操作性・ロボットの安定性の間にみられる相関関係を明らかにし、パラメータ調整によりアームの作業能力を拡大する手段について考察する。具体的には、歩幅・踏み換えタイミングの組み合わせが異なる脚動作についてアームの可操作度 [17] とロボットの安定余裕を評価指標とし、パラメータ設定値が評価指標に与える影響を比較する。以下、2 章では作業移動の概念について述べ、人間型ロボットに作業移動を実現させる際に検討すべき脚の動作制御手法について論ずる。3 章では動作比較に用いる制御手法 [16] の概要を述べる。4 章ではコンピュータ・シミュレーションにより、脚動作パラメータが異なる場合の評価指標の変化について考察し、パラメータ調整によりアームの作業能力を拡大する制御手法の設計指針を明らかにする。

2. 作業移動

2.1 作業移動の概念

本研究の制御指針とする「作業移動」とは、作業移動型ロボットが持つ移動機能により、アーム機能を補完・増強させる統合動作を意味する。アームによる器用かつ効率的なマニピュレーションを実現することが、作業移動の主な目的である。よって、アームを操作性の高い状態に維持するための運動が、移動プラットフォームに求められる。これは、アームの自由度を除くシステムの冗長自由度を利用し、アームのベース部として適切な位置調節を行うことである。ただし、土台が固定された産業用ロボットアームと異なり、安定性も確保することが望まれる。脚式作業移動型ロボットでは、その具体的な方法として、1) 脚接地点の変更、2) 脚の屈伸動作、による移動プラットフォームの位置姿勢の調整が挙げられる。以下では人間型ロボットに作業移動を適用する場合の、脚の動作制御における着眼点および技術課題を述べる。

2.2 作業移動に要求される脚動作

従来の産業用ロボットアームは、土台が固定されているためその作業領域が極めて限定された。一方、人間型ロボットはア-

Fig. 1 By utilizing the redundancy of mechanism, leg motion can augment arm's manipulability by (a)→(b), while decreasing stability

ム機能と移動機能が統合された作業移動型ロボットであるため、移動機能が持つ運動の自由度によりアームの動作領域を拡大できる。この特徴に加えて、アームと移動機構から構成される冗長自由度系となるので、特定の作業点にアーム先端を位置決めした状態で、脚・胴体の姿勢調整や脚接地点の変更によりアームの操作性を改善できる。ただし Fig. 1 に示すように、ロボット本体が土台に固定されていないので、安定性を維持できる範囲で、アーム機能を発揮できる脚の動作制御を検討する必要がある。

- Point-A: 安定領域制限内で機構が持つ冗長性を利用し、アームの作業能力を増加させる。

次に、脚式の特徴は脚接地点を選択できる点にある。よって、アーム先端の運動方向・運動速度に応じて脚動作パラメータ—歩幅・踏み換えタイミング—を調節することで、アームの操作性やロボット本体の安定性は改善できると考えられる。例えば、歩幅が小さく単脚支持期が短い動作では、立ち位置の微調整が可能になるので、広範囲におけるアーム先端の運動に対しアームの操作性を高く維持したマニピュレーションを実現できる。ただし、狭い安定領域しか確保できないため、未知外乱や外力を伴う作業に不向きとなる。歩幅が大きな動作では、安定領域の絶対幅が大きいことから、未知外乱や外力が作用しても安定なマニピュレーションを維持できる。ただし、立ち位置の微調整が困難となることから、精度の要求される作業に対し不向きとなる。これらの性質に注目すると、アームの操作性やロボット本体の安定性を、共に高い状態へ改善していくパラメータの組み合わせが必ずしも存在しない (Fig. 2)。したがって、精度や外乱等の作業条件に応じてアームの作業能力を増加させるためのパラメータ調整が必要となる。

- Point-B: 作業条件に応じて脚動作パラメータを調整することにより、アームの作業能力を増加させる。

人間型ロボットに作業移動を実現させる場合、上記の 2 点をもとに制御手法を検討する必要がある。筆者らはすでに、Point-A の観点より制御手法の一提案を行った [15] [16]。本論文では Point-B の観点から、パラメータ調整によりアームの作業能力を拡大させる制御手法の設計指針を明らかにする。

Fig. 2 By adjusting leg motion parameters in accordance with manipulation, manipulability and stability are improved. However, set of parameters for improving all of these performances does not necessarily exist

3. 制御手法の概要

本章では、脚動作の分析に使用する制御手法の概要を述べる。詳細については文献[16]を参照する。

3.1 モデル

本研究では、sagittal plane 上でのロボットの運動を考える。そしてアーム先端には未知な外力が作用しているものとする (Fig. 3)。リンクモデルは一つのアームと脚部で構成されているものとし、胴体リンクと二脚を併せて脚部と呼ぶ。以下、“位置・姿勢”を“位置”、“力・モーメント”を“力”と表記する。 $\mathbf{r}_e \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{r}_s \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{r}_w \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ、アーム先端の位置、肩そして遊脚先端の位置ベクトルを示す。図より $\mathbf{r}_e$, $\mathbf{r}_s$ そして $\mathbf{r}_w$ が決定すると、ロボットの全関節変数 $\mathbf{q}$ は逆運動学より一意に求まる。以下では、制御の流れを説明する。

3.2 アーム先端のインピーダンス制御

アームのマニピュレーションに関する望みの挙動として、式(1)に示すインピーダンス特性がアーム先端に対し与えられているものとする。

$$M_e \ddot{\mathbf{r}}_e + D_e \dot{\mathbf{r}}_e + K_e (\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_{ed}) = \mathbf{f} - \mathbf{f}_d \quad (1)$$

ただし $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{f}_d \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{r}_{ed} \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ、アーム先端への外力・目標力、目標位置ベクトルを示す。 $M_e > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $D_e > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $K_e > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はそれぞれ、アーム先端の挙動における望みの慣性行列、粘性係数行列、剛性行列である。

3.3 評価関数

脚部は、次に示す評価関数 U を最小にするように制御される。

$$U(\mathbf{r}_e, \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_w, \mathbf{f}) \equiv U_z + U_a + U_b \rightarrow \min \quad (2)$$

ここで U_a , U_b および U_z はそれぞれ、アームの操作性、脚部の特異姿勢回避、ロボットの転倒安定性に用いる評価関数を示す。

各評価関数は以下に示す式で表現される。

$$U_z(\mathbf{r}_e, \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_w, \mathbf{f}) \equiv K_z (x_z - x_{zd})^2 \quad (3)$$

ただし、係数 $K_z > 0$. x_z は、各リンクの重力によるモーメン

Fig. 3 Link model of the robot and its variables

トと、アーム先端に作用する外力 $\mathbf{f}$ によるモーメントの総和がゼロとなる床面上の点を意味する。マニピュレーションを主体とする統合動作を実現する上で、加減速の著しい運動が脚に要求されないものと想定し、現段階では慣性力によるモーメントを含めていない。 x_{zd} は安定領域内に設定された目標 ZMP であり、その設定方法は次節以降で説明する。

$$U_a(\mathbf{r}_e, \mathbf{r}_s) \equiv \{(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_e) - \bar{\mathbf{r}}_{se}\}^T \frac{K_a}{2} \{(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_e) - \bar{\mathbf{r}}_{se}\} \quad (4)$$

ただし、係数行列 $K_a > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. $\bar{\mathbf{r}}_{se} \in \mathbb{R}^3$ は $(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_e)$ の理想値を示し、アームの可操作度[17]が最大値をとるように設定する。ここでアームの可操作度とは、アームのみの姿勢により規定される可操作度を意味し、脚部の自由度による可操作度は含めていない。

$$U_b(\mathbf{r}_s) \equiv \{\mathbf{r}_s - \bar{\mathbf{r}}_s\}^T \frac{K_b}{2} \{\mathbf{r}_s - \bar{\mathbf{r}}_s\} \quad (5)$$

ここで、係数行列 $K_b > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. $\bar{\mathbf{r}}_s \in \mathbb{R}^3$ は脚部の特異姿勢回避のための理想位置ベクトルを示す。

3.4 両脚支持における脚部の制御手法

両脚支持状態では、遊脚先端の位置 $\mathbf{r}_w$ は一定であり歩幅に相当する。そして、アーム先端の位置 $\mathbf{r}_e$ と外力 $\mathbf{f}$ は式(1)より既知となる。ここで、評価関数 U が最小になるように、式(6)を用いて肩の位置 $\mathbf{r}_s$ を制御する。

$$M_s \ddot{\mathbf{r}}_s + D_s \dot{\mathbf{r}}_s = -\partial U / \partial \mathbf{r}_s \quad (6)$$

ただし $M_s > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ と $D_s > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はそれぞれ、肩の挙動における望みの慣性行列、粘性係数行列である。なお両脚支持状態 (left in Fig. 4) では、ZMP の目標値 x_{zd} を安定領域中央に設定する。

3.5 単脚支持における脚部の制御手法

式(1)より拘束されるアーム先端の位置 $\mathbf{r}_e$ に対し、評価関数 U を用いて踏み換えの判断を行う。まず、A) 現在の両脚支持状態、と B) アーム先端の運動方向に歩幅一步踏み換えた両脚支持状態、についてそれぞれ、肩が最適位置となる U を U_{m1} , U_{m2} とする。条件 $U_{m1} < U_{m2}$ が成立した場合、A) の、現在の両脚支持状態のままで式(6)により肩が制御される。条件 $U_{m1} > U_{m2}$ が成立した場合、B) の両脚支持状態へ

Table 1 Outline of x_{zd} control during step motion of legs

state	x_{zd} control
double support	x_{zd} is placed on the center of stable region
transition from double to single support	x_{zd} is moved to the center of sole of support leg
single support	x_{zd} is placed on the center of sole of support leg
transition from single to double support	x_{zd} is moved to the center of stable region

Fig. 4 Image of x_{zd} control during step motion of legs

と立ち位置を移行させる。その際、(i) ZMP の目標値 x_{zd} は、Table 1 に従い移行する (Fig. 4 も参照する)、(ii) 肩の位置 r_s は式 (6) によって制御される、(iii) 脚はあらかじめ決められた楕円軌道に沿って踏み換える。ここで、楕円軌道は歩幅 w_s 、単脚支持時間 t_s と両脚支持移行時間 t_t の関数である。

4. 作業移動における脚動作の評価と考察

本章では、パラメータ設定値の組み合わせが異なる脚動作を比較し、その設定値によってアームの操作性やロボットの安定性がどのように変化するかを定量的に評価する。特に本論文では、踏み換え動作を必要とする広範囲にわたるマニピュレーションを想定し、その簡素化した入力として、アーム先端に等速運動を与える。ただし、実際の非定型作業では、この基本動作を中心に未知外乱や外力がアーム先端に作用するものと思われる。そこで、アームの可操作度 [17] とロボットの安定余裕を評価指標として用いる。アームの可操作度を評価することは、上述した状況下でのマニピュレーションに対し、アームが対処しうるかを判断する尺度となる。

動作比較に用いるモデルの物理パラメータを Table 2 に示す。また制御則内で固定するパラメータを Table 3 に示す。アーム先端に与える速度 $v_e (= \dot{r}_{ed})$ は 0.05 [m/s] の一定値とし、以下に示す二つのパラメータ設定値をかえて実験する。すなわち、歩幅 w_s と、踏み換え時間 $t_{cy} (= w_s/v_e)$ において両脚支持移行状態 (transition state in Fig. 4) が占める時間割合 C_t である。単脚支持状態 (single support state in Fig. 4) が占める割合 C_s は、踏み換え時間全体に C_t が占める割合の残りを割り当てる。これにより、両脚支持移行時間 t_t と単脚支持時間 t_s

Table 2 Parameters of robot model used in simulation

Link number	Length [m]	Weight [Kg]
L_0	0.624	34.8
L_1, L_4	0.542	11.5
L_2, L_5	0.434	17.0
L_3, L_6	0.480	0.00
L_7	0.542	19.0
L_8	0.597	0.00

Table 3 Parameters of control method in simulation

Arm control		
Mass	M_e [Kg]	0.900
Damping	D_e [Nsec/m]	8.00
Stiffness	K_e [N/m]	21.0
Leg control		
Mass	M_s [Kg]	3.00
Damping	D_s [Nsec/m]	57.0
Stiffness	K_a [N/m]	4.98×10^1
	K_z [N/m]	2.23×10^3
	K_b [N/m]	1.70×10^2
Desired distance between arm tip and shoulder	$\bar{x}_e$ [m]	0.804
Desired height of shoulder	$\bar{y}_s$ [m]	1.36

(Desired impedance: x and y direction)

が、 $t_{cy} \cdot C_t$ と $t_{cy} \cdot C_s$ から求められ、踏み換え時の遊脚の運動が決定する。本論文では、歩幅 $w_s = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ [m] と両脚期移行時間割合 $C_t = 30, 50, 70\%$ の、計 12 の組み合わせからなる脚動作を比較する。制御のサンプリング周期は 4.0 [ms] である。

脚動作パラメータの設定値が異なる動作例を Fig. 5, 6 に示す。設定値の組はそれぞれ、 $w_s = 0.3$ [m], $C_t = 70\%$, $C_s = 30\%$ と $w_s = 0.3$ [m], $C_t = 30\%$, $C_s = 70\%$ である。Fig. 5, 6 の (b), (c) より、アームの可操作度とロボットの安定余裕は、踏み換え動作中のロボットの姿勢変化に伴い変動している。よって、踏み換え動作が終了するまでの時間幅における指標の平均値・分散値や最小値に注目し、評価指標の時間変動を含めた評価を行う必要があることが分かる。

計 12 のパラメータの組み合わせについて、アームの操作性とロボットの安定性の評価結果を Fig. 7, 8 に示す。Fig. 7 (a) ~ (c) において、水平軸は両脚期移行時間割合 C_t を示し、鉛直軸は正規化されたアームの可操作度を示す。Fig. 8 (a), (b) において、水平軸は両脚期移行時間割合 C_t を示し、鉛直軸はロボットの安定余裕を示す。以下、アームの操作性を評価する場合は、Fig. 7 (a) ~ (c) を参照し、ロボットの安定性を評価する場合は、Fig. 8 (a), (b) を参照する。

4.1 脚移動時間割合に関する評価

両脚期移行時間割合 C_t が異なる 2 種類の脚動作を比較する。ここで $C_t = 30, 70\%$ 、歩幅は $w_s = 0.3$ [m] の一定値である。結果より、以下に示す関係が明らかになった。

●アームの操作性の評価：

Fig. 7 より、脚動作 $C_t = 30\%$ におけるアームの可操作度分散値は、 $C_t = 70\%$ の際に比べて大きな値を示した。Fig. 5 (a) より単脚支持期では、一定速度でアーム先端が進

(a) Arm tip and shoulder motion in x direction

(b) Normalized manipulability measure

(c) Stability margin

Fig. 5 An example of simulation results when: $w_s = 0.3$ [m], $C_t = 30\%$, $C_s = 70\%$

(a) Arm tip and shoulder motion in x direction

(b) Normalized manipulability measure

(c) Stability margin

Fig. 6 An example of simulation results when: $w_s = 0.3$ [m], $C_t = 70\%$, $C_s = 30\%$

行方向に変位するのにに対し、狭い安定領域内に ZMP を維持するために肩が制御される。結果として、進行方向におけるアーム先端と肩の相対距離を一定に保った状態で、肩はアーム先端に追従することができない。一方、Fig. 7 より、脚動作 $C_t = 30\%$ におけるアームの可操作度平均値は、 $C_t = 70\%$ の際に比べて高い値を示した。

● ロボットの安定性の評価：

Fig. 8(a) より、脚動作 $C_t = 30\%$ における安定余裕の平均値は、 $C_t = 70\%$ の際に比べて小さい値を示した。これは Fig. 5(a) より、 $C_t = 30\%$ での脚動作は単脚支持期が長いので、安定領域の絶対幅が制限され続けるためである。一方、Fig. 8(b) より、脚動作 $C_t = 30\%$ における安定余裕の最小値は $C_t = 70\%$ の際に比べて高い値を示した。これは $C_t = 70\%$ での脚動作の方が、慣性力が大きく作用するためである。

4.2 歩幅に関する評価

歩幅 w_s が異なる 2 種類の脚動作を比較する。ここで $w_s =$

0.2, 0.5 [m]、両脚期移行時間割合は $C_t = 70\%$ の一定値である。結果より、以下に示す関係が明らかになった。

● アームの操作性の評価：

Fig. 7(b) と Fig. 7(c) より、脚動作 $w_s = 0.2$ [m] におけるアームの可操作度分散値は、 $w_s = 0.5$ [m] の際に比べて小さい値を示した。これは $w_s = 0.2$ [m] の脚動作が頻繁に脚を踏み換えて移動するので、アーム先端と肩の位置誤差を減少させることができるためである。一方、Fig. 7(a) より、脚動作 $w_s = 0.2$ [m] におけるアームの可操作度平均値は、 $w_s = 0.5$ [m] の際に比べて高い値を示した。

● ロボットの安定性の評価：

Fig. 8(a) より、脚動作 $w_s = 0.2$ [m] における安定余裕の平均値は、 $w_s = 0.5$ [m] の際に比べて小さい値を示した。これは、脚動作 $w_s = 0.2$ [m] における安定領域の絶対幅が、 $w_s = 0.5$ [m] の際に比べて狭いためである。一方、Fig. 8(b) より、脚動作 $w_s = 0.2$ [m] における安定余裕の最小値は、 $w_s = 0.5$ [m] の際に比べて高い値をとる。

(a) Normalized manipulability measure (average/step motion)

(b) Normalized manipulability measure (variance/step motion)

(c) Normalized manipulability measure (variance/step motion)

Fig. 7 Estimation of Manipulability

脚動作 $w_s = 0.2[m]$ では、ロボット全体の姿勢変化が、 $w_s = 0.5[m]$ の際に比べて小さいため、脚接地時に生ずる慣性力が小さくなるためである。

4.3 脚動作パラメータが操作性と安定性に与える影響

脚動作パラメータとアームの操作性・ロボットの安定性について、得られた知見は以下の通りである。

- 歩幅の小さい踏み換え動作は、アームの可操作度平均値を高く維持すると共に分散値も抑制できる (Fig. 7(a),(b)). その反面、安定余裕の平均値は低い値を示す。一方、歩幅の大きな動作では、可操作度の平均値を低下させるが、安定余裕の平均値を高く維持できる (Fig. 8(a)).
- 両脚支持移行期が長い踏み換え動作は、高い安定余裕平均

(a) Stability margin (average/step motion)

(b) Stability margin (minimum/step motion)

Fig. 8 Estimation of Stability

値を維持できる (Fig. 8(a)). また可操作度の分散値を抑制できる (Fig. 7(a)). その反面、安定余裕の最小値は低下する傾向がみられる (Fig. 8(b)).

以上より、操作性や安定性についての各評価指標を、共に改善するパラメータの組が必ずしも存在しないことが分かる。この性質に注目すると、精度や外乱といった作業条件に応じて、脚動作パラメータを調整することが、アームの作業能力を増加させるために必要であることも分かる。なお、Table 3 に挙げたパラメータ設定値をかえた場合にも、同様の傾向が確認された。

5. 結 論

本論文では、作業移動型ロボットを対象とし、移動機能によりアーム機能を補完・増強させる統合動作「作業移動」の概念を提案した。また、人間型ロボットに作業移動を適用する場合の、脚の動作制御における着眼点および技術課題について論じた。歩行を目的とした脚の動作制御では、歩幅・踏み換えタイミングの調整を特に必要としない。しかし、アームの作業能力を増加させる脚の動作制御では、これらの調整が重要となる。そこで、パラメータ設定値の組み合わせが異なる脚動作を比較し、その設定値によってアームの操作性やロボットの安定性がどのように変化するかを定量的に評価した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 評価指標に用いたアームの可操作度とロボットの安定余裕は、踏み換え動作中のロボットの姿勢変化に伴い変動する。

そこで、踏み換え動作が終了するまでの時間幅における指標の平均値・分散値や最小値に注目し、評価指標の時間変動を含めた評価を行う必要がある。

- (2) 歩幅の小さい踏み換え動作は、アームの可操作度平均値を高く維持すると共に分散値も抑制できるので、精度が要求される作業に対し有効である。その反面、安定余裕の平均値は低い値を示す。一方、歩幅の大きな動作では、安定余裕の平均値を高く維持できるので、未知外乱や外力が作用する作業において安定なマニピュレーションが可能となる。
- (3) 両脚支持移行期が長い踏み換え動作は、高い安定余裕平均値を維持できる。また可操作度の分散値を抑制できることから、未知外乱や外力の作用する作業に有効である。ただし、遊脚接地時に生ずる慣性力により、安定余裕の最小値が低下することに注意する必要がある。

上記の知見は、作業条件に応じた脚動作パラメータ調整法の設計指針となる。今後はこれらの性質を応用し、脚動作パラメータ調整によりアームの作業能力を増加させる制御手法の提案を行う。

参 考 文 献

- [1] 新井健生：“作業移動型ロボットの研究動向と今後の展開”，日本ロボット学会誌，vol.13，no.7，pp.896-899，1995。
- [2] 日本ロボット学会編：作業移動型ロボット研究専門委員会報告書，1996。
- [3] Y.F. Zheng and A. Yin: “Coordinating multilimbed robots for generating large cartesian force,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.3, pp.1653-1658, 1990。
- [4] H. Adachi, N. Koyachi, K. Nishimura and T. Arai: “Control of a Manipulator Mounted on a Quadruped,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.883-888, 1996。
- [5] Q. Huang, S. Sugano and K. Tanie: “Stability Compensation of a Mobile Manipulator by Manipulator Motion: Feasibility and Planning,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.1285-1292, 1997。
- [6] E.F. Fukushima, S. Hirose and T. Hayashi: “Basic Manipulation Considerations For The Articulated Body Mobile Robot,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.386-393, 1998。
- [7] 福島，広瀬：“最適配分を考慮した計算トルク法に基づく節体型移動ロボットの姿勢制御の提案”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.4，pp.576-583，2000。
- [8] 小谷内，安達，新井：“脚・腕統合リムメカニズム—腕転用脚機構の運動学解析—”，日本ロボット学会誌，vol.14，no.7，pp.968-976，1996。
- [9] 広瀬，竹中，五味，小澤：“人間型ロボット”，日本ロボット学会誌，vol.15，no.7，pp.983-985，1997。
- [10] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: “The Development of Honda Humanoid Robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1321-1326, 1998。
- [11] 人間協調・共存型ロボットシステム研究開発成果発表会報告書，（財）製造科学技術センター，1999。
- [12] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue and A. Takanishi: “Development of a Bipedal Humanoid Robot: Control Method of While Body Cooperative Dynamic Biped Walking,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.368-374, 1999。
- [13] 玄，青柳，S.A. Setiawan, 山口，高西：“2足歩行型ヒューマノイドロボットと人間との物理的インタラクション—手をういた人間追従歩行—”，第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.951-952，1998。
- [14] 田宮，稲葉，井上：“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，vol.17，no.2，pp.268-274，1999。
- [15] 井上，石井，大川：“腕で作業をしながら移動する人間型ロボットの時間制御—Sagittal Plane内の運動の制御—”，日本ロボット学会誌，vol.18，no.1，pp.75-86，2000。
- [16] K. Inoue, H. Yoshida, T. Arai and Y. Mae: “Mobile Manipulation of Humanoids: Real-Time Control Based on Manipulability and Stability,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2217-2222, 2000。
- [17] T. Yoshikawa: “Manipulability of robotic mechanism,” Intern. J. of Robotics Research, vol.4, no.2, pp.3-9, Summer, 1985。

吉田晴行 (Haruyuki Yoshida)

1973年4月2日生。1997年立命館大学理工学部機械工学科卒業。1999年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。同年、大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程に進学。現在に至る。作業移動型ロボットの研究に従事。計測自動制御学会の学生会員。（日本ロボット学会学生会員）

新井健生 (Tatsuo Arai)

1952年1月6日生。1977年東京大学大学院工学系修士課程修了。工業技術院機械技術研究所を経て、現在大阪大学大学院基礎工学研究科教授。パレルメカニズム，マイクロマニピュレーション，作業移動型ロボット等の研究に従事。工学博士。1986年～1987年MIT客員研究員。日本機械学会，計測自動制御学会，IEEE等の会員。（日本ロボット学会正会員）

井上健司 (Kenji Inoue)

1963年10月10日生。1988年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年、東京大学工学部助手。1993年大阪大学工学部助手。1995年同学部講師。1998年より大阪大学大学院基礎工学研究科講師となり現在に至る。超冗長マニピュレータ，ロボット協調システム，人間型ロボットの研究に従事。工学博士。日本機械学会，精密工学会等の会員。（日本ロボット学会正会員）

前 泰志 (Yasushi Mae)

1971年3月11日生。1993年大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業。1998年同大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士課程修了。工学博士。同年、同大学大学院基礎工学研究科助手。コンピュータビジョン，知能ロボットの研究に従事。情報処理学会の会員。（日本ロボット学会正会員）