

反射の組み合わせによる歩行の実現

宮下 敬宏* 細田 耕* 竹内 進* 浅田 稔*

A Reflective Walk based on a Combination of Reflections

Takahiro Miyashita*, Koh Hosoda*, Susumu Takeuchi* and Minoru Asada*

This paper presents a reflective walk of a quadruped robot based on reflections to realize an adaptive walk in a dynamic environment. The combination of reflections, a vision-cued swaying reflection [1] and a reflective gait, makes the robot walk reflectively, without programming the exact motion of each joint of the legs. An experiment is shown to demonstrate how the proposed method works.

Key Words: a legged robot, reflective gait, vision-cued swaying, reflective walk.

1. はじめに

脚式ロボットは移動機構の自由度が多く、様々な不整地環境に対する高い適応性を持つ。このような適応性を有効に利用するには、環境を観測する外界センサの直接的な利用、および環境との相互作用に基づいた行動の生成が重要である。しかし、従来の脚式ロボットに関する研究の多くは、あらかじめ運動学・動力学を考慮した脚軌道を計算し、内界センサのフィードバックによってその軌道を実現する軌道計画型歩容 [2]~[4] であり、それらの手法の中で外界センサは、行動前に環境を観測し3次元再構成して脚軌道を計画するために用いられるにとどまっている。ロボットの遭遇するすべての状況を行動前の観測によりあらかじめ予測することは困難であり、これらの手法で環境の変化に対して柔軟な行動を生成することは難しい。

多くの生物の行動は、外界センサに基づく目的地までの移動、転倒の回避、不整地への適応等の動機が環境との相互作用によって複雑に組み合わせられ、その結果として生成されたものとみることができる。このような考え方に基づくと、ロボットに外界センサに基づいた複数の反射を埋め込み、それらを組み合わせることで環境との相互作用から行動を生成する手法が考えられる。特にロボットが多くの自由度を持つ場合は、特定の行動をあらかじめプログラムすることが難しいため、反射の組み合わせによる行動の実現が有効となる。

本論文では脚式ロボットにおいて、外界センサに基づく2つの反射、すなわち「視覚目標追従に基づく揺動」と「転倒回避のための踏み替え」の組み合わせにより環境との相互作用から

反射的な静歩行が生成される事を示す。視覚目標追従に基づく揺動は、適応型ビジュアルサーボ [5] を脚式ロボットに適用し、追従対象が常に同じ見え方になるようにロボットの胴体の位置・姿勢を変化させる反射である。また、転倒回避のための踏み替えは、整地水平面において脚先力覚センサによって観測される姿勢の安定性を脚を踏み替えることにより保つという反射である。この2つの反射を組み合わせることで、視覚ターゲットを動かすという環境の変化との相互作用から、あらかじめプログラムされていない静歩行が生成される。

このように反射を組み合わせることにより適応的なロボットを作ろうとする試みは、Brooksの包含アーキテクチャ (Subsumption Architecture) [6] や、Arkinのスキーマシステム [7]、中村らのロボットハンドの把握制御 [8] などがある。しかし、包含アーキテクチャは状況に応じて常に1つの反射を選択するシステムであり、スキーマシステムは複数の反射の出力をロボットの移動速度で統一し、それらを単純に足し合わせているだけであるため、これらのシステムで多自由度を持つロボットの反射の組み合わせによる行動を実現することは困難である。また、中村らはロボットハンドという多自由度系において、各指の反射を重みによって組み合わせているが、結果的に反射がセンサ信号に対応してどのような順序で発現するかを学習しているため、反射の組み合わせと環境との相互作用によって行動が生成されることについては触れていない。ロボットに埋め込む複数の反射が環境との相互作用によりロボットの行動を生成することは、動的に変化する環境や未知の環境にまで適応できるロボットを作る鍵になると考えられる。

以下では、まず第2章で2つの反射、視覚目標追従に基づく揺動と転倒回避のための踏み替えによって、静歩行が実現される概略について述べ、第3章、第4章では、それら2つの反射

原稿受付 1999年1月13日

*大阪大学大学院工学研究科

*Osaka University, Graduate School of Engineering

の詳細についてそれぞれ説明する．また，第5章では反射の自由度について考察し，さらに第6章では，実機に提案手法を適用し，反射を組み合わせることで環境との相互作用から静歩行が実現されることを実験的に示す．

2. 反射の組み合わせによる歩行

脚式ロボットを歩行させる枠組みとして，歩行を陽にプログラムするのではなく，反射を組み合わせ，環境との相互作用によって生成される歩行を提案する．ここでは視覚目標追従に基づく揺動と転倒回避のための踏み替えという二つの反射を組み合わせることで静歩行を実現する．視覚目標追従に基づく揺動の概略を Fig.1(a) に，転倒回避のための踏み替えの概略を Fig.1(b) に示す．

追従目標を動かすと，視覚に基づく揺動の反射により，ロボットは視覚によって追従目標を注視し，その見え方が常に等しくなるように胴体を動かす．このとき脚先接地点は地面に対して動かさない．つまりこの反射によりロボットは視覚目標に追従する運動を揺動によって実現する．

ロボットは揺動によってバランスが崩れそうになるのを安定余裕(ゼロモーメント点(以下, ZMP) [9]と支持多角形の辺までの最短距離)から観測し，踏み替えの反射により安定余裕を一定値以上に保持する脚の踏み替えを行う．ただし，安定余裕を保持するための脚の踏み替えには力学的拘束により，図のように2歩を要する．

これら2つの反射を組み合わせることによって，追従目標が大きく移動する場合は結果的に静歩行が生成される．本研究

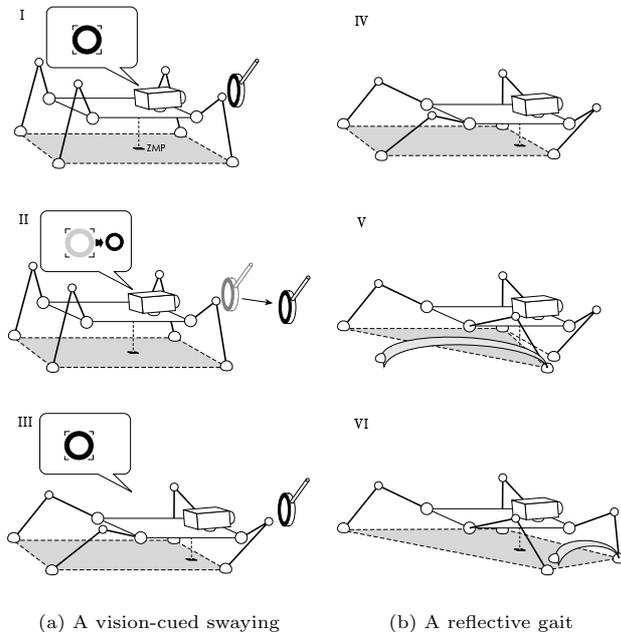


Fig. 1 An outline of proposed method

ではこのような反射を適用する脚式ロボットとして，3自由度の脚を4本(合計12自由度)持ち，外界センサとして視覚セン

サ(1個)，脚先力覚センサ(計4個)を，内界センサとして関節角度センサ(計12個)を装備したものをを用いる．

3. 視覚目標追従に基づく揺動

ロボットに，観測される画像特徴量が与えられた目標値に追従するように揺動する反射を埋め込む．ここで，ロボットは視覚センサを通して追従目標の画像特徴量を観測でき，またリンクパラメータのみ既知であるとする．

本研究では，この反射を脚式ロボットに適応型ビジュアルサーボ [5] を適用することで実現する．脚式ロボットは，マニピュレータなどのビジュアルサーボが多く用いられているシステムと異なり，(i) 地面に固定されていないため脚先が地面に対して相対運動する，(ii) 地面と閉ループ機構を作っている，という問題点があり，そのままではビジュアルサーボを適用できない．そこで，(i)の問題には脚先間の距離を一定に保持するサーボ系を構成し仮想的に脚先を地面に固定することで対処する．また，(ii)の問題にはロボットを閉ループ系として扱ったビジュアルサーボを用いることで対処する．つまり，脚先間距離を一定に保つサーボと追従対象の見え方を一定に保つサーボの2つを組み合わせることによって視覚目標追従に基づく揺動を実現する．以下では，まず脚先間距離保持サーボを説明し，次にこのサーボの下でロボットを閉ループ系として扱ったビジュアルサーボが導出できることを示し，適応型ビジュアルサーボ系の構成について述べる．ここでは，4脚中3脚を支持脚とした場合について扱う．

ロボットの胴体に固定された座標系 Σ_R から見た第 i 脚先端の位置 ${}^R r_i$ は，3自由度ある第 i 脚の関節変位ベクトルを $\theta_i \in \mathbb{R}^3$ とすると，

$${}^R r_i = {}^R r_i(\theta_i) \quad (1)$$

と書ける．式(1)を時間微分したものをすべての脚について集めると，

$${}^R \dot{r} = J_{r\theta}(\theta) \dot{\theta} \quad (2)$$

と書ける．ただし， $\theta = [\theta_1^T \ \theta_2^T \ \theta_3^T]^T$ ， ${}^R r = [{}^R r_1^T \ {}^R r_2^T \ {}^R r_3^T]^T$ ， $J_{r\theta} = \partial {}^R r / \partial \theta^T$ である．以下では， $J_{r\theta}$ が正則であるとして議論を進めているが，各脚が冗長な自由度を持っている場合にも同様の議論ができる．

3.1 脚先間距離保持サーボ

3本の支持脚の脚先間距離を保持するサーボ系は次のように実現する．脚 i, j の脚先間の距離を l_{ij} とし，脚先間距離ベクトル l を

$$l = \begin{bmatrix} l_{12} \\ l_{23} \\ l_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|{}^R r_1 - {}^R r_2\| \\ \|{}^R r_2 - {}^R r_3\| \\ \|{}^R r_3 - {}^R r_1\| \end{bmatrix} \quad (3)$$

と定義する．式(3)を両辺微分することにより，

$$\dot{l} = J_{lr}({}^R r) {}^R \dot{r}, \quad (4)$$

を得る．ここで $J_{lr} = \partial l / \partial {}^R r^T$ である．式(2)，(4)より，脚先間距離 l を一定値 l_d に保つサーボは，

$$u = J_{r\theta}^{-1} \{ J_{lr}^+ K_l (l_d - l) + n(J_{lr}) \} \quad (5)$$

で与えられる．ここで， J_{lr}^+ は J_{lr} の疑似逆行列， $n(J_{lr})$ は J_{lr} の零空間を表す．また，行列 $K_l \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は，フィードバックゲイン行列である．

3.2 閉ループ系としての考慮を含むビジュアルサーボ

式(5)で与えられる脚先間距離保持サーボの下で，仮想的に脚が地面に固定されていると考え，地面に適当に固定された座標系 Σ_0 に対する Σ_R の位置 0p_R ，姿勢 0R_R が与えられたときに，これらを実現する Rr_i を求めることができる．この関係を基に地面と閉ループ系をなす脚式ロボットのためのビジュアルサーボを導出する．ここでは，各脚と地面の接触は摩擦あり点接触とする．

Σ_0 に対する脚 i 先端の位置 ${}^0\bar{r}_i$ は，

$${}^0\bar{r}_i = {}^0p_R + {}^0R_R {}^Rr_i \quad (6)$$

となる．式(6)を時間微分すると，脚先ベクトル ${}^0\bar{r}_i$ は定数なので，

$$\begin{aligned} {}^0\dot{\bar{r}}_i &= {}^0\dot{p}_R + {}^0R_R {}^R\dot{r}_i + {}^0\omega_R \times ({}^0R_R {}^Rr_i) \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (7)$$

となる．ここで ${}^0\omega_R$ は Σ_R の Σ_0 に対する回転速度ベクトルである．(7)式を ${}^R\dot{r}_i$ について展開すると，

$${}^R\dot{r}_i = \begin{bmatrix} -{}^0R_R^T & {}^0R_R^T [({}^0R_R {}^Rr_i) \times] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0\dot{p}_R \\ {}^0\omega_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる．脚先間距離が保持されている場合には(8)式をすべての脚についてまとめた，

$${}^R\dot{p} = J_{rp} \dot{p} \quad (9)$$

が成立する．ここで，

$$\begin{aligned} {}^R\dot{p} &\triangleq \begin{bmatrix} {}^R\dot{r}_1^T & {}^R\dot{r}_2^T & {}^R\dot{r}_3^T \end{bmatrix}^T \\ J_{rp} &\triangleq \begin{bmatrix} -{}^0R_R^T & {}^0R_R^T [({}^0R_R {}^Rr_1) \times] \\ -{}^0R_R^T & {}^0R_R^T [({}^0R_R {}^Rr_2) \times] \\ -{}^0R_R^T & {}^0R_R^T [({}^0R_R {}^Rr_3) \times] \end{bmatrix} \\ \dot{p} &\triangleq \begin{bmatrix} {}^0\dot{p}_R \\ {}^0\omega_R \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である．

ロボット本体に固定された視覚センサによって，追跡対象物上の特徴が m 個の画像特徴量を集めたベクトル $x \in \mathbb{R}^m$ として観測されるとする．画像特徴ベクトル x は Σ_0 に対するロボット本体の位置，姿勢， 0p_R ， 0R_R の関数で

$$x = x({}^0p_R, {}^0R_R) \quad (10)$$

と書ける．式(10)を微分することにより，

$$\dot{x} = J_{xp} \dot{p} \quad (11)$$

を得る．

したがって，式(9)，(11)より，

$$\begin{aligned} \dot{x} &= J_{xp} J_{rp} {}^R\dot{p} \\ &\triangleq J_{xr} {}^R\dot{p} \end{aligned} \quad (12)$$

となる．

3.3 適応型ビジュアルサーボ系の構成

式(12)のロボットの脚先速度と画像特徴量速度の関係を示す画像ヤコビ行列 J_{xr} は，脚先間距離保持サーボの下では視覚センサの内部パラメータ及び視覚センサと追従目標の相対位置姿勢の関数となる．しかし，それらのパラメータは厳密なキャリブレーションにより求める必要があり，また脚式ロボットの場合は移動に伴う踏み替えの度に変化するため，容易には求められない．そこで，適応型ビジュアルサーボ [5] における画像ヤコビ行列の推定法を用いる．

式(12)を満たす推定画像ヤコビ行列 \hat{J}_{xr} を，時間重み付き最小二乗法を基に以下のように推定する．

$$\begin{aligned} \hat{J}_i(k+1) - \hat{J}_i(k) &= \\ &= \frac{\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}_{xr}(k)u_r(k)\}_i}{\rho_i + u(k)^T W_i(k)u(k)} \times W_i(k)u(k) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで $\hat{J}_{xr}(k)$ ， $u_r(k) (= \Delta T \{J_{r\theta} \dot{\theta}\})$ は k 番目のサンプリングにおける推定行列およびそのときの脚先速度レベルの入力， ΔT はサンプリング時間， \hat{J}_i^T は推定画像ヤコビ行列 \hat{J}_{xr} の第 i 行ベクトル， $W_i(k)$ は重み行列， ρ_i は適当な正の定数である．

以上から，脚先間距離を保持する制御の下で推定画像ヤコビ行列を用いて画像特徴量を与えられた目標値 x_d に収束するような揺動行動を生成する制御式は，式(2)，(5)，(12)，(13)より，

$$\begin{aligned} u &= J_{r\theta}^{-1} [J_{lr}^+ K_l (l_d - l) \\ &+ (I - J_{lr}^+ J_{lr}) \{ \hat{J}_{xr} (I - J_{lr}^+ J_{lr}) \}^+ \\ &+ \{ K_x (x_d - x) - \hat{J}_{xr} J_{lr}^+ K_l (l_d - l) \}] \end{aligned} \quad (14)$$

となる．式(14)は，右辺の第一項が脚先間距離保持サーボを表し，第二項が J_{lr} の零空間を利用した適応型ビジュアルサーボを表している．

4. 転倒回避のための踏み替え

反射的な踏み替えにより安定余裕を一定値以上に保つことで，脚式ロボットの整地水平面における転倒回避を実現する．踏み替えによって安定余裕を保持するには力学的な拘束から必ず2歩を要するが，ロボットの遊脚の状態を2つに分類し，それぞれの行動を規則化することで，1歩分の簡単なアルゴリズムとして表すことができる．

Fig.2の3本の支持脚の脚先配置を考え，遊脚の状態を，支持脚の脚先とZMPの移動速度の関係から次のように2通りに分ける．すなわち ${}^R\dot{r}_{zmp}$ の延長線が交わる支持三角形の辺を構成する脚(A, B)のどちらかの対角脚が遊脚の場合と，支持三角形の残りの頂点の脚(C)の対角脚が遊脚の場合である．これは， ${}^R\dot{r}_{zmp}$ の方向をロボットの前方と定義すれば，前者を「遊脚が後脚の場合」，後者を「遊脚が前脚の場合」ということがで

きる。脚式ロボットの転倒回避は、支持脚の脚先位置と $R\dot{r}_{zmp}$ を入力とし、これによって選択される以下の2通りの踏み替えによって実現される。

脚 A(または脚 B) の対角脚が遊脚の場合 (後脚モード)

遊脚を、遊脚と脚 A(または脚 B)、脚 C でできる支持三角形の中に ZMP が入るように接地し、脚 B(または脚 A) を遊脚化する (Fig.2(a))。

脚 C の対角脚が遊脚の場合 (前脚モード)

遊脚を適当な位置に動かし、接地せずに浮かせたまま待機させる。ZMP の位置が支持三角形 ABC の中から、遊脚と脚 A、脚 B でできる支持三角形の中に入れば、力の釣り合いによって自然に遊脚が接地し、脚 C が遊脚になる (Fig.2(b))。

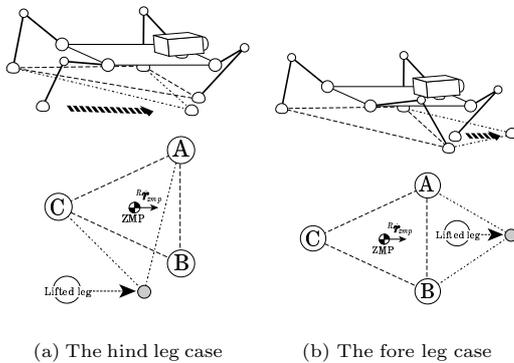


Fig. 2 Supporting leg triangles and a lifted leg

5. 歩行制御系の実現

揺動と踏み替えの2つの反射を組み合わせたハイブリッド制御の概略を表すブロック線図を Fig.3 に示す。図中の Lifted leg selector は、ロボットの関節角度 θ と脚先力覚センサの値 f から、遊脚の行動と次の遊脚、支持脚を選択するモジュールである。

揺動には、脚先間距離制御に3自由度、ビジュアルサーボに6自由度用いるため、計9自由度必要である。また、踏み替えは遊脚の制御のみなので3自由度必要である。故に2つの制御に必要な自由度は合計12自由度であり、各脚3自由度の4脚ロボットであれば2つの制御を同時に行うことができる。

6. 実験

複数の反射を脚式ロボットに適用し、追跡対象を動かすという環境の変化によって反射的な静歩行が実現されることを実験により検証する。

6.1 実験システム

Fig.4 に実験に使用した脚式ロボットと実験装置の概略を示す。本実験には脚式ロボットとして、東京工業大学により試作された TITAN-VIII [10] を用いた。ロボットは3自由度の脚を4本有する。ロボットの胴体には、カラー CCD カメラ (ソニー, EVI-330) を1台取り付けた。カメラからの画像

情報は $512[\text{pixel}] \times 512[\text{pixel}]$ で、ホストコンピュータ (Gateway2000, G6-200, CPU: Pentium Pro 200MHz) 上のトラッキングモジュール (富士通, TRV-CPD6) に送られる。トラッキングモジュールは前もって与えられた画像テンプレートと、現在の画像の相関をとることによって、そのテンプレートと最も相関が高い画像が現在の画像平面上のどこにあるかを検出できる [11]。本実験では、 $16[\text{pixel}] \times 16[\text{pixel}]$ の大きさの3つのテンプレートを実験開始前に与え、画像内でのテンプレートの重心位置の x, y 座標値を集めたものを画像特徴ベクトルとする。ロボットの各関節にはポテンシオメータが装備されており、また ZMP の位置が計測できるように各脚先には1軸の力覚センサ (共和電業, LM-50KA) を取り付けた。このポテンシオメータと力覚センサの計測値、および画像特徴ベクトルからホストコンピュータは、提案手法により各関節の目標角速度を計算し、D/A ボード (富士通, RIF-01) を通してロボット本体のモータドライバ (Titech motor driver) に入力する。

6.2 実験結果

追跡対象をロボットから見て前方に動かしたとき、提案手法により生成された行動を Fig.5, 6 に示す。本実験で用いたフィードバックゲインは以下の通りである。

$$K_x = \text{diag} [1.5 \times 10^{-4} \ 1.5 \times 10^{-4} \ 1.5 \times 10^{-4} \ 1.5 \times 10^{-4}],$$

$$K_l = \text{diag} [5.0 \ 5.0 \ 5.0]$$

まず $t=0.0[\text{s}]$ で、追跡対象を前方にゆっくり動かし始めた。ロボットの最初の設定は、支持脚が右前脚 (RF), 左前脚 (LF), 右後脚 (RH), 遊脚が左後脚 (LH) とした。ロボットは追跡対象の動きに合わせて揺動しつつ遊脚を動かし、 $t=8.2[\text{s}]$ で遊脚を左後脚から左前脚に切り替えている (Fig.5(a)-(b))。その後、ロボットは $t=22.3[\text{s}]$ で遊脚を左前脚から右後脚に、 $t=25.8[\text{s}]$ で右後脚から右前脚に、 $t=39.2[\text{s}]$ で右前脚から左後脚に次々と切り替えており、揺動によって小さくなる安定余裕を一定値以上に保ち転倒を回避していることがわかる (Fig.5(c)-(f))。本実験では Fig.5(f) の後も踏み替えが続き、所定の制御時間 (100[s]) で視覚目標追従に伴う10回の踏み替えを行った。Fig.6には、ロボットの初期位置での重心位置を原点とする世界座標系での支持脚三角形と遊脚接地点を示した。本実験における画像特

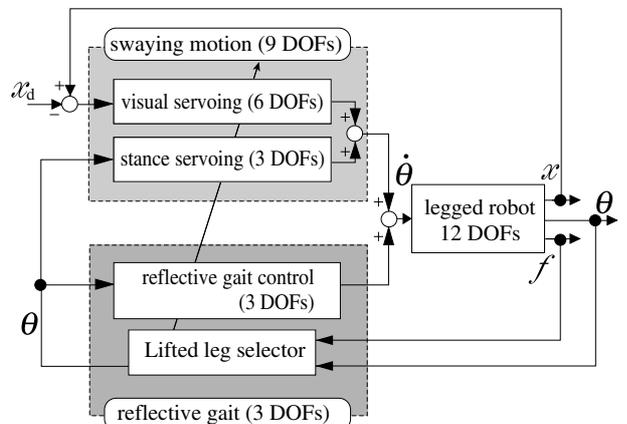


Fig. 3 Block diagram of the proposed method

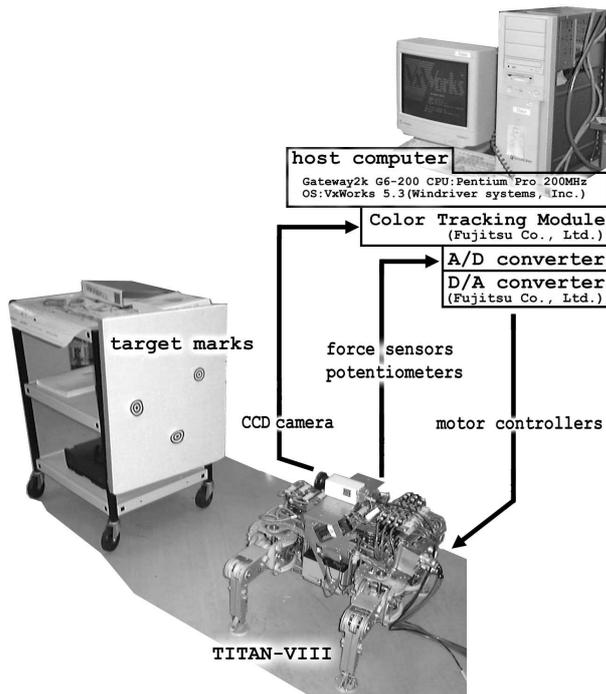


Fig. 4 Experimental systems

微の目標値との誤差を Fig.7(a), (b) に示す. このグラフから, 揺動と踏み替えの2つの反射が同時に実現されており, 踏み替えに伴い追跡対象が目標位置から大きく離れても, 視覚目標追従に基づく揺動によって目標位置に収束することが確認できる.

これらの実験結果から, 本手法により追跡対象の運動に追従する反射的な行動が実現され, その結果として反射的な静歩行が生成されることが示された.

7. おわりに

本論文では, 視覚目標追従に基づく揺動反射と転倒回避に基づく踏み替え反射を多自由度を持つ脚式ロボットに埋め込み, 視覚ターゲットを動かすという環境の変化との相互作用で静歩行が実現できることを実験により示した. 本論文で議論されている踏み替え反射では, 基本的に整地水平面のみを想定しているが, 3軸力覚センサや姿勢角センサを搭載して不整地面に対応できる反射を考案することにより, 容易に不整地面の歩行を実現できると考えられる.

ロボットの適切な行動があらかじめプログラムすることによって実現できるのは, 環境があらかじめ規定されている場合のみである. 規定されていない環境では, 複数の反射を組み合わせることで環境との相互作用から行動を生成することが準最適な行動を実現する鍵であり, 本論文で考案した反射の組み合わせに基づく行動は, この意味で環境適応性の高いロボットを構成する重要な要素になると考えられる. 今後は様々なロボットシステムにおける多くの反射の組み合わせによる環境の変化に柔軟な行動の実現を目指す.

なお本研究は, 文部省科学研究費重点研究(領域番号 266, 知

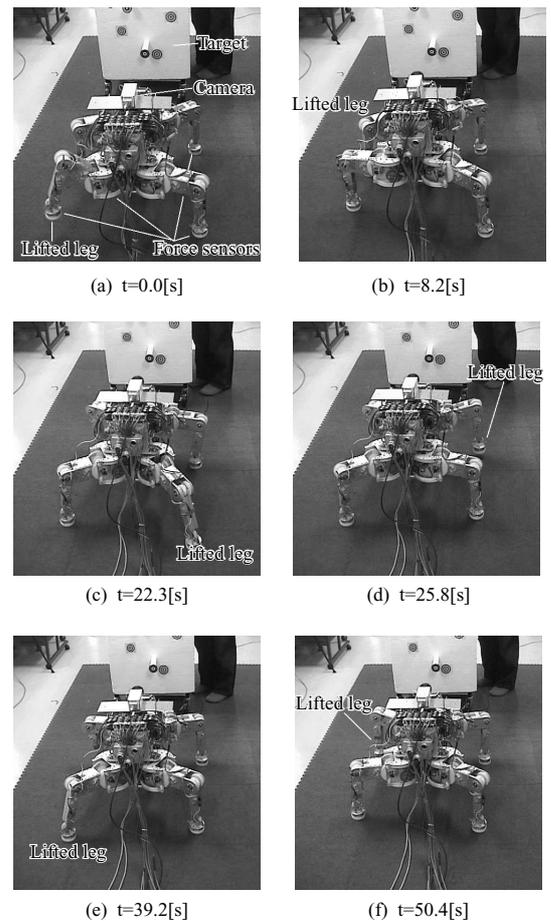


Fig. 5 The reflective walk (forward motion)

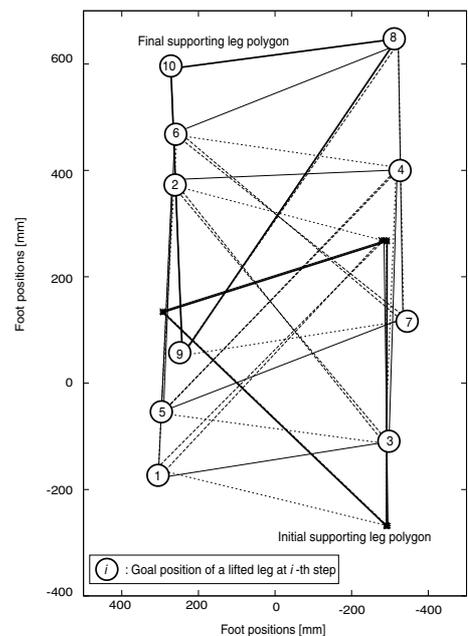
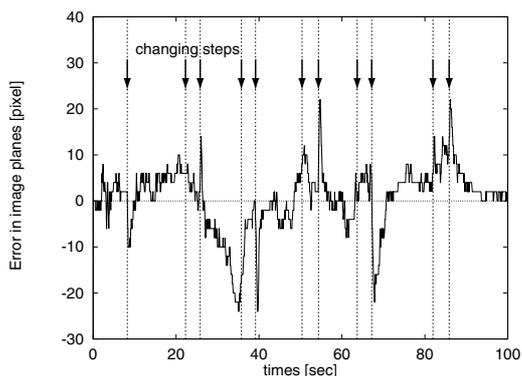
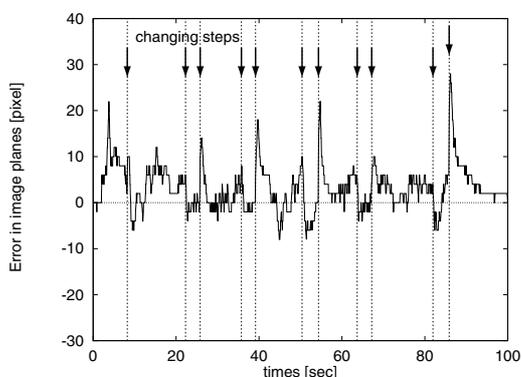


Fig. 6 The feet motion w. r. t. a world coordinate frame fixed on the ground



(a) along x-axis



(b) along y-axis

Fig. 7 Error of the target mark 1 (upper left mark in the image plane)

能ロボット), 研究番号 97245102 の助成を受けて行われた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] K. Hosoda, T. Miyashita, S. Takeuchi, and M. Asada. Adaptive visual servoing for legged robots -vision-cued swaying of legged robots in unknown environments-. In *Proc. of the 1997 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 778-784, 1997.
- [2] M. H. Raibert et al. Special issue on legged locomotion. *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 2, 1984.
- [3] E. Krotkov and R. Hoffman. Terrain mapping for walking planetary rover. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 6, pp. 728-739, 1994.
- [4] D. J. Pack. Perception-based control for a quadruped walking robot. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2994-3001, 1996.
- [5] 細田, 浅田. 構造やパラメータに関する先験的な知識を必要としないフィードフォワード補償器を持つ適応型ビジュアルサーボ系の構成. *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 2, pp. 313-319, 1996.
- [6] R. A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, Vol. 47, pp. 139-159, 1991.
- [7] R. C. Arkin. *BEHAVIOR-BASED ROBOTICS*. The MIT Press, 1998.

- [8] 中村, 山崎. 行動の重ね合わせ理論の研究-多指ハンドの把握動作への応用-. 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 1047-1048, 1996.
- [9] 米田, 広瀬. 歩行機械の転倒安定性. *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 4, pp. 517-522, 1996.
- [10] K. Arikawa and S. Hirose. Development of quadruped walking robot titan-viii. In *Proc. of the 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems*, pp. 208-214, 1996.
- [11] M. Inaba, T. Kamata, and H. Inoue. Rope handling by mobile hand-eye robots. In *Proc. of Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 121-126, 1993.

宮下 敬宏 (Takahiro Miyashita)

1970年7月30日生。1993年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1995年同大学大学院基礎工学研究科物理系制御工学分野博士前期課程修了。同年同大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程入学。現在に至る。1998年より日本学術振興会特別研究員。視覚を持つ移動ロボットの研究に従事。人工知能学会会員。

(日本ロボット学会学生会員)

細田 耕 (Koh Hosoda)

1965年11月9日生。1988年京都大学工学部精密工学科卒業。1993年同大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年大阪大学工学部助手, 1997年同大学大学院工学研究科助教授となり, 現在に至る。この間, 1998年チューリッヒ大学客員教授。1995年日本ロボット学会研究奨励賞, 1996年日本ロボット学会第10回論文賞受賞。ロボット工学の研究に従事。博士(工学)。IEEE, 計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

竹内 進 (Susumu Takeuchi)

1973年7月8日生。1997年大阪大学工学部電子制御機械工学科卒業。1999年同大学大学院知能・機能創成工学専攻博士前期課程修了。現在(株)村田製作所勤務。在学中は脚式ロボットに関する研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

浅田 稔 (Minoru Asada)

1953年10月1日生。1982年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学基礎工学部助手。1989年同大学工学部助教授, 1995年同教授, 1997年同大学大学院工学研究科教授となり現在に至る。この間, 1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員。1989年情報処理学会研究賞, 1992年IEEE/RSJ IROS'92 Best Paper Award, 1996年日本ロボット学会第10回論文賞受賞。知能ロボットの研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, IEEEなどの会員

(日本ロボット学会正会員)