

として扱ったビジュアルサーボを適用することにより、これらの問題を解決する。なお、各関節は速度制御されており、与えられた目標速度を実現できるとする。またここでは、ロボットの慣性力が無視できる程度の動きを取り扱う。

ロボットの本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、第 i 脚の関節変位ベクトルを θ_i 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、 $\theta = [\theta_1^T \dots \theta_n^T]^T$, ${}^R r = [{}^R r_1^T \dots {}^R r_n^T]^T$, $J_{r\theta} = \partial {}^R r / \partial \theta^T$ である。以下では、各脚は ${}^R r_i$ を実現するのに必要十分な自由度を持っているとし、 $J_{r\theta}$ 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。

2.2 脚先間距離保持サーボ

脚先間の距離を集めたベクトル $l \in \mathbb{R}^{nC_2}$ は、 ${}^R r_i$ を用いて、

$$l = \begin{bmatrix} \| {}^R r_1 - {}^R r_2 \| \\ \vdots \\ \| {}^R r_{n-1} - {}^R r_n \| \end{bmatrix} \quad (3)$$

と定義することができる。式(3)を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(4)より、脚先間距離 l を一定値 l_d に保つ脚先間距離保持サーボは、

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

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。行列 $K_l \in \mathbb{R}^{nC_2 \times nC_2}$ は、フィードバックゲイン行列である。目標値 l_d を初期の脚間距離にすれば、この制御が十分働いている限り、ロボットの脚先位置は初期位置から動かないので、ロボットは仮想的に地面に固定されているとみなすことができる。

2.3 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が働いているときに、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 ${}^0 p_R$ 、姿勢 ${}^0 R_R$ が与えられたときに、これらを実現する Σ_R から見た脚先位置ベクトル ${}^R r_i$ 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。以下では、各脚は地面と摩擦あり点接触をしている場合について式の導出をしているが、各脚が地面と一般的な接触をしている場合にも吉川ら [6] によって提案されている拘束選択行列を用いて拡張できる。

Σ_0 に対する脚 i 先端の位置 ${}^0 \bar{r}_i$ は、

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

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、

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

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、

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

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、

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

が成立する。ここで、

$$\begin{aligned} {}^R \dot{r} &\triangleq \begin{bmatrix} {}^R \dot{r}_1^T & \dots & {}^R \dot{r}_n^T \end{bmatrix}^T \\ J_{rp} &\triangleq \begin{bmatrix} -{}^0 R_R^T & {}^0 R_R^T [({}^0 R_R {}^R r_1) \times] \\ \vdots & \vdots \\ -{}^0 R_R^T & {}^0 R_R^T [({}^0 R_R {}^R r_n) \times] \end{bmatrix} \\ &\in \mathbb{R}^{3n \times 6} \\ \dot{p} &\triangleq \begin{bmatrix} {}^0 \dot{p}_R \\ {}^0 \omega_R \end{bmatrix} \end{aligned}$$

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画像特徴量 $x \in \mathbb{R}^m$ として観測されるとする。画像特徴量 x は Σ_0 に対するロボット本体の位置、姿勢、 ${}^0 p_R$ 、 ${}^0 R_R$ の関数で

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

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。

一方、脚先間距離が保持されているという仮定の基で、式(9)は、

$$\dot{p} = J_{rp}^+ {}^R \dot{r} \quad (12)$$

と変形することができる。したがって、式(11)、(12)より、

$$\begin{aligned} \dot{x} &= J_{xp} J_{rp}^+ {}^R \dot{r} \\ &\triangleq J_{xr} {}^R \dot{r} \end{aligned} \quad (13)$$

となる。

2.4 脚式ロボットの揺動

脚式ロボットの揺動を脚先間距離を保持するタスクを第1タスク、ビジュアルサーボを第2タスクとするハイブリッド制御系 [7] で実現する。第1タスクを実現する式が(5)で与えられる

ので、その零空間を利用することにより式(13)により与えられる第2タスクを実現する。

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

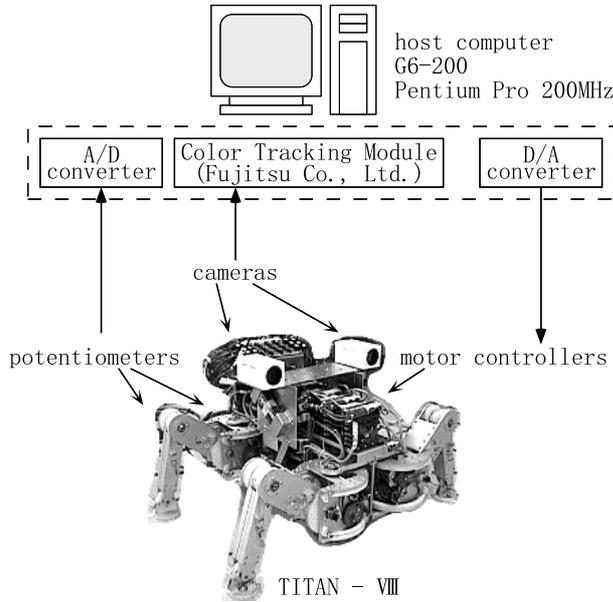


Fig. 2 Experimental equipment

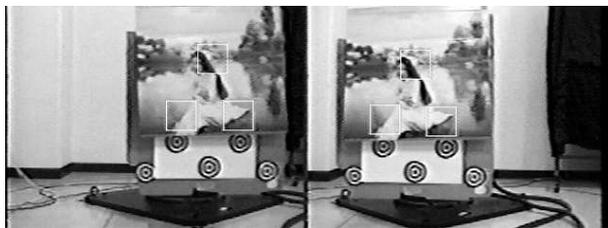


Fig. 3 Images captured by the left and right cameras

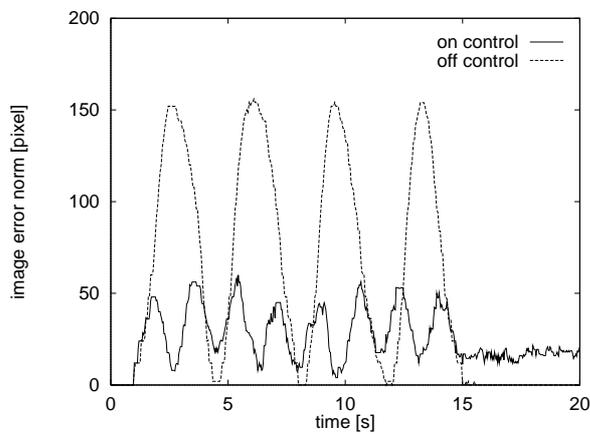


Fig. 4 Error norm of one point in the left image plane from its desired point (horizontal swaying)

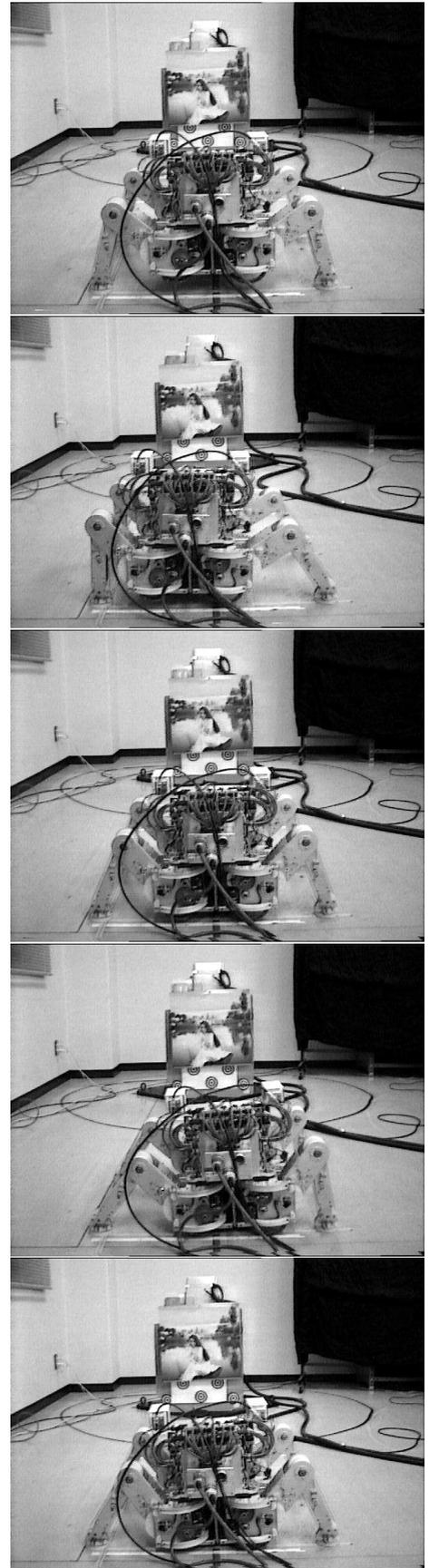


Fig. 5 A realized horizontal swaying motion

3. 実 験

提案した制御則を脚式ロボットに適用し、追従目標を動かすことによってロボットの揺動を実現できることを実験で検証する。

3.1 実験装置

Fig.2に、実験に使用した脚式ロボットTITAN-VIII [8]と実験装置の概略を示す。ロボットは3自由度の脚を4本、計12自由度を持つ。ロボット本体には2台のカラー CCDカメラ(ソニー, EVI-330)が0.1[m]離れて装備されている。各カメラからの画像は256[pixel] × 256[pixel]で、これらは、トラッキングモジュール(富士通)に送られる(Fig.3参照)。本実験では、左右カメラの各画像毎に三つの特徴テンプレートを用いているので、合計6個のテンプレートの画像内での x, y 座標値を集めたものが画像特徴量ベクトルとなり、 x の次元は12となる。脚式ロボットの各関節にはポテンショメータが装備されており、各関節の変位を測定できる。このシステムを用い、制御用ソフトウェアをMS-DOS上のC言語で記述したところ、サンプリング時間は33[ms]となった。追跡対象となるテンプレートは産業用ロボットの先端に取付けてあり(Fig.5参照)、脚式ロボットは、このテンプレートから1.0[m]のところを配置した。

3.2 実験結果

3.2.1 水平方向揺動

次に、追跡対象を水平方向に動かすことにより、脚式ロボットに水平方向の揺動をさせる。追跡対象は約3.5[s]で左方に0.07[m]往復し、さらに3.5[s]で右方に0.07[m]往復、これを2度繰り返す。初期姿勢から左右一往復づつするまでのロボットの動きを約2[s]毎にFig.5に示す。追跡対象の動きに合わせて、脚式ロボットが左右に揺動するのがわかる。画像平面における画像特徴の座標の誤差ノルム $\|x - x_d\|$ をFig.4に示す。比較のためにロボットを動作させない場合の画像特徴量の変化をグラフ中に示した。提案する手法を用いることによって誤差が低減されていることが確認できる。

4. お わ り に

本論文では、ビジュアルサーボを利用することにより、脚式

ロボットが視覚情報を基に速い応答をする視覚誘導制御系を導出し、試作した実験システムに適用することによって、ロボットを揺動させることができることを示した。本手法は、外界センサに基づく脚式ロボットの制御方法として、新しい側面を持つ。すなわち、従来の方法のように各関節の軌道があらかじめ計算されているのではなく、外界センサの信号に対して反射的な動作として、各関節が制御されている。結果的に視覚目標を動かすことにより、反射的なロボットの揺動運動を実現することができる。一方、ビジュアルサーボの研究として見ると、ロボットが地面に固定されていないため、従来のマニピュレータのためのビジュアルサーボに脚先間距離保持サーボを組み合わせたハイブリッドサーボの形式を持つという特徴を持つ。また、地面と閉ループをなす脚式ロボットのためのビジュアルサーボの新しい制御法ともとらえることができる。

なお本研究は、文部省科学研究費重点研究(領域番号266, 知能ロボット), 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] E. Krotkov and R. Hoffman. Terrain mapping for a walking planetary rover. *IEEE Tras. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 6, pp. 728-739, 1994.
- [2] M. Inaba, F. Kanehiro, S. Kagami, and H Inoue. Two-armed bipedal robot that can walk, roll over and stand up. In *Proc. of the 1995 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 297-302, 1995.
- [3] 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.
- [4] P. I. Corke. Visual control of robot manipulators - a review. In *Visual Servoing*, pp. 1-31. World Scientific, 1993.
- [5] H. Adachi, N. Koyachi, T. Arai, and K. Nishimura. Control of a manipulator mounted on a quadruped. In *Proc. of the 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 883-888, 1996.
- [6] 吉川, 鄭. 拘束運動下にある対象物の複数台ロボットによる協調ハイブリッド制御. システム制御情報学会論文誌, Vol. 3, No. 10, pp. 326-334, 1990.
- [7] 吉川. ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.
- [8] K. Arikawa and S. Hirose. Development of quadruped walking robot TITAN-VIII. In *Proc. of the 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 208-214, 1996.