

# 未知環境における脚式ロボットの視覚誘導制御

細田 耕(大阪大学), 浅田 稔(大阪大学), 鈴木 昭二(大阪大学)

## 1 はじめに

脚によるロボットの移動機構は、車輪移動機構などに比べて不整地に対する適応性・ロバスト性が高く、環境に適応することが必要な自律ロボットを作るためには欠くことのできない機構の一つである。しかしながら、脚式移動機構は一般に多くの自由度を持つので、この自由度を制御する方法が必要になる。従来、このような脚式ロボットを制御するには、あらかじめその静力学的・動力学的解析に基づいて各脚の軌道を計算し、この軌道に対して内界センサによる制御を適用する研究がほとんどであった。

一方、外界センサの一つである視覚センサを用いた応答の速い制御として、ビジュアルサーボについての研究が成熟してきている。ビジュアルサーボでは、視覚センサから得られた情報が直接ロボットの制御ループにフィードバックされ、外乱やモデル化誤差に対して頑健なロボットシステムを構築することができる。ビジュアルサーボを脚式ロボットに適用することにより、感覚から行動へ密な関係を構築することができ、これによって環境やロボットのパラメータ変化に対して頑健な制御則を構成することができると考えられる。また、ビジュアルサーボを用いると、あらかじめ各軸の動作をプログラミングしなくても、反射的行動の結果としてロボットを動作させることができると考えられる(図1参照)。脚式ロボットはマニピュレータと異なり、(i) 地面に固定されていないために、脚先が地面に対して相対運動をする可能性がある、(ii) 地面と閉ループ系を作っている、という理由により、今までに提案されているビジュアルサーボの手法をそのまま適用することができない。筆者らはこれらの問題点を解決し、サーボが適用されている注視対象を動かすことによって脚式ロボットの揺動を実現した[1]。しかしながら[1]では、ロボットは注視対象に対してキャリブレーションされている場合を取り扱っていた。

本報告では、注視対象に対して脚式ロボットがキャリブレーションされていない未知環境内における視覚誘導制御系を構成し、これによって環境の変化や外乱、モデル化誤差に頑健な脚式ロボットシステムを作ることを目的とする。視覚誘導制御系は、脚先間距離保持サーボ系と閉ループ系としての拘束を考慮したビジュアルサーボからなっており、この構成を用いることにより上述の(i), (ii)の問題を解決する。また、実験システムを試作し、提案する手法を適用することにより脚式ロボットが速い応答を実現できることを確認、ロボットが視覚によって追跡する対象物を動かすことによって、揺動させることができることを示す。

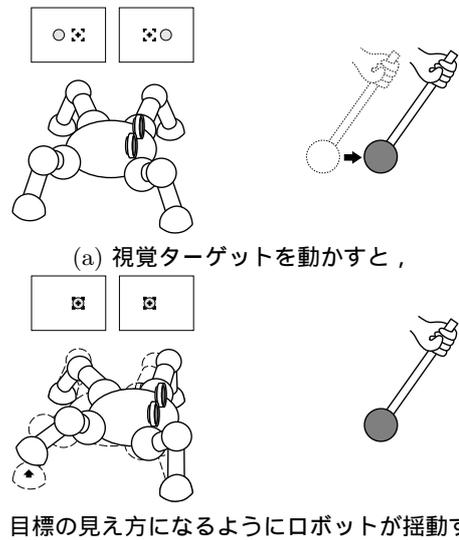


図 1: 注視対象に対する追従によって揺動する脚式ロボット

## 2 適応型視覚サーボを用いた視覚誘導制御

### 2.1 視覚誘導による揺動タスク

脚式ロボットは、装備されたカメラによって注視対象の画像特徴量を観測しているとし、ロボットに対して与えられるタスクは、これらの画像特徴量を与えられた目標値に収束させることとする。ロボットがこのタスクを実行すると、視覚目標を動かすことにより、脚式ロボットの揺動を実現することができる(図1(b)参照)。

[1]においては、カメラの注視対象に対する内部・外部パラメータがすべて既知とし、これらの値を用いて視覚誘導制御を実現していたが、そのために注意深いキャリブレーションが必要であった。未知の実環境内で動作するロボットを実現するためには、このような面倒なキャリブレーションを伴わない制御側が好ましい。本報告では、適応型視覚サーボ[2]を利用することによって、キャリブレーションに関して

- ロボット座標系から見た各脚先の位置と、各脚の関節角の関係は既知。

という仮定のみを必要としている。

視覚誘導制御を実現するには、脚式ロボットにビジュアルサーボを適用する必要があるが、そのためには1で述べ

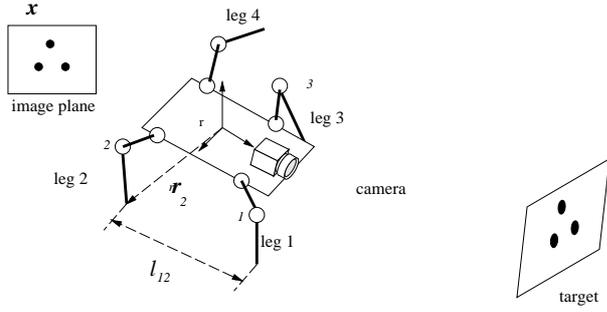


図 2: 4脚ロボットと設定された座標系

たように、(i) 地面に固定されていないために、脚先が地面に対して相対運動をする可能性がある、(ii) 地面と閉ループ機構を作っている、という問題を解決する必要がある。ここで提案する視覚誘導制御系では、(i) を解決するために、地面に対して脚先の相対距離を保持する脚先間距離保持サーボを適用し、また (ii) を解決するために、ロボットを閉ループ系として扱った適応型ビジュアルサーボ [3] 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。

以下、本報告では図2に示した4脚ロボットの第1, 2, 3脚が地面と摩擦あり点接触をし、第4脚が浮いている場合に着いて取り扱う。

## 2.2 脚先間距離サーボ

まず、ロボットの脚先間距離を一定に保つためのサーボ系を導く。これを適用することにより、脚式ロボットが仮想的に地面に固定されたときとみなすことができる。座標系  $\Sigma_w, \Sigma_r$  をそれぞれ、地面に固定された座標系、ロボットに固定されたロボット座標系とする (図2参照)。座標系  $\Sigma_r$  の原点から第  $i$  脚の脚先までのベクトルを  ${}^r r_i$  ( $i = 1, \dots, 3$ ) とすると、第  $i$  脚の関節角ベクトルの関数となるので、

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

と書ける。式 (1) を微分することにより、関節角とロボット座標系から見た脚先ベクトルとの関係を

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

のように得る。ここで、 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T \in \mathbb{R}^3$ ,  ${}^r \dot{r}_i = [{}^r \dot{r}_{i1} \ {}^r \dot{r}_{i2} \ {}^r \dot{r}_{i3}]^T \in \mathbb{R}^3$  であり、 $J_{r\theta} = \partial {}^r r_i / \partial \theta$  である。

脚先間距離を集めたベクトル  $l$  を

$$l = \begin{bmatrix} \| {}^r r_1 - {}^r r_2 \| \\ \| {}^r r_2 - {}^r r_3 \| \\ \| {}^r r_3 - {}^r r_1 \| \end{bmatrix} \quad (3)$$

と定義すると、この式を微分することにより、

$$\begin{aligned} \dot{l} &= J_{lr}({}^r r) {}^r \dot{r} \\ &= J_{l\theta}(\theta) \dot{\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

を得る。ここで、 $J_{lr} = \partial l / \partial r^T$ ,  $J_{l\theta} = J_{lr} J_{r\theta}$  である。式 (4) より、脚先間距離ベクトル  $l$  を目標値  $l_d$  に保つサーボ系として

$$u_l = J_{l\theta}^+ K_l (l_d - l) + (I_9 - J_{l\theta}^+ J_{l\theta}) k_1 \quad (5)$$

を得る。ここで、 $J_{l\theta}^+$ ,  $I_9$ ,  $k_1$  はそれぞれ行列  $J_{l\theta}$  の疑似逆行列、 $9 \times 9$  単位行列と冗長性を記述するベクトルである。また  $K_l \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はフィードバックゲイン行列である。この制御則で生じる  $J_{l\theta}$  の零空間  $(I_9 - J_{l\theta}^+ J_{l\theta}) k_1$  を利用することにより、適応型ビジュアルサーボを適用する。

## 2.3 適応型ビジュアルサーボ

脚間距離保持サーボ (5) が十分に機能しているときには、視覚によって捕らえられる画像特徴量  $x$  は、関節角ベクトル  $\theta$  の関数

$$x = x(\theta) \quad (6)$$

となる。脚先間距離保持制御が十分に機能していない場合には、画像特徴量  $x$  は脚先の地面に対する滑り量などの関数になり、式 (6) は成立しない。式 (6) を微分することにより、

$$\dot{x} = J_{x\theta}(\theta) \dot{\theta} \quad (7)$$

を得る。ここで、 $J_{x\theta} = \partial x / \partial \theta^T$  は、既知のパラメータであるロボットの運動学的パラメータのほかに、カメラの内部・外部パラメータという未知パラメータを含んでおり、この未知の部分  $\theta$  と  $x$  のデータを収集することにより推定する必要がある。本報告では、[3] で提案されている適応側を使うことにより、ヤコビ行列  $J_{x\theta}$  を

$$\begin{aligned} \hat{j}_i(k+1) - \hat{j}_i(k) &= \\ & \frac{\{x(k+1) - x(k) - \hat{J}_{x\theta}(k)u(k)\}_i}{\rho_i + u(k)^T W_i(k)u(k)} W_i(k)u(k) \end{aligned} \quad (8)$$

と推定する。ここで、 $\hat{J}_{x\theta}(k)$ ,  $\hat{j}_i(k)$ ,  $u(k) (= T\dot{\theta})$ ,  $\rho_i$ ,  $W_i(k)$  はそれぞれ、サンプリング時間内で定数のヤコビ行列とその行ベクトル、 $k$  ステップにおける制御入力、忘却係数、及び重み行列である。重み行列  $W$  が共分散行列、 $\rho_i$  が  $0 < \rho \leq 1$  の範囲に入るとき、この制御側はよく知られている重み付き最小二乗法となる。

推定されたヤコビ行列  $\hat{J}_{x\theta}$  を用いて、カメラから得られる画像特徴量を目標  $x_d$  に追従させるビジュアルサーボ系を

$$u_v = \hat{J}_{x\theta}^+ K_v (x_d - x) + (I_m - \hat{J}_{x\theta}^+ \hat{J}_{x\theta}) k_2 \quad (9)$$

と得ることができる。ここで、 $K_v$ ,  $k_2$  は、 $m \times m$  ゲイン行列と、冗長性を記述する適当なベクトルである。

## 2.4 適応型視覚誘導制御

脚式ロボットは3脚が地面と接触しており、各脚が3自由度を持つので合計で9自由度を持つ。脚先間距離保持サーボは脚先の相対距離3自由度を制御しており、ビジュアルサーボはロボットのカメラの姿勢6自由度を制御する。したがって、脚式ロボットの持つ9自由度は視覚目標に追従する脚式ロボットにとって必要かつ十分な自由度である。

脚先間距離保持サーボが十分に機能している場合、ヤコビ行列  $\hat{J}_{x\theta}$  は関節角  $\theta$  のみの関数となるので、適応型ビジュアルサーボが正常に機能することができる。この意味で、脚先間距離保持サーボは適応型ビジュアルサーボに対して優先度が高いといえるので、これに基づいて、これらのサーボ系のハイブリッド構造として脚式ロボットの適応型視覚誘導制御系を構成すると、式 (5), (9) より

$$\begin{aligned} u &= J_{l\theta}^+ K_l (l_d - l) \\ & + (I_9 - J_{l\theta}^+ J_{l\theta}) \{ \hat{J}_{x\theta} (I_9 - J_{l\theta}^+ J_{l\theta}) \}^+ \\ & \{ K_v (x_d - x) - \hat{J}_{x\theta} J_{l\theta}^+ K_l (l_d - l) \}. \end{aligned} \quad (10)$$

となる。このブロック図を図3に示す。

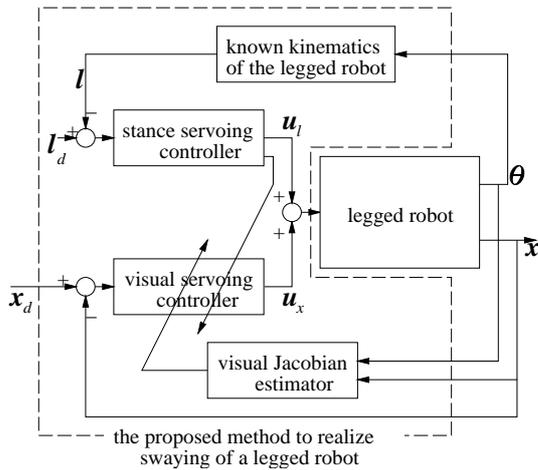


図 3: 適応型視覚誘導制御のブロック図

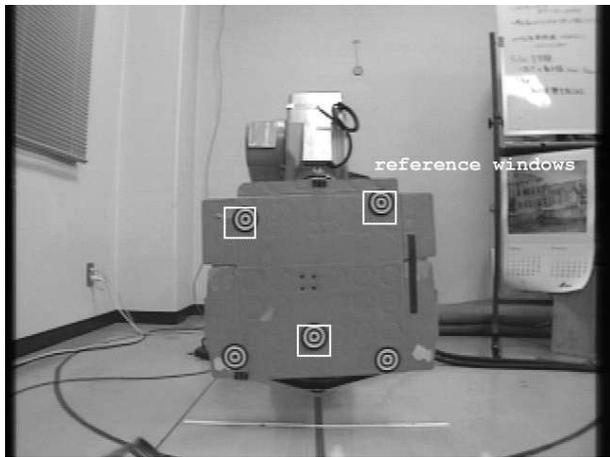


図 4: ロボットに搭載されたカメラの画像

### 3 実験

本手法の有効性を検証するために実験を行い、提案する視覚誘導制御系が注視対象の画像特徴量を目標値に収束させることができることを示し、注視対象を動かすことによって脚式ロボットの揺動を実現できることを確認する。

#### 3.1 実験装置

実験には、東京工業大学によって開発された4脚ロボット TITAN-VIII[4]を用いた、そのサイズはおよそ0.5(W)×0.6(D)×0.4(H)[m]、重さがおよそ25[kg]である。ロボットと視覚目標までの距離はおよそ1.0[m]である。ロボットに搭載されたカメラから得られた画像の例を図4に示す。

#### 3.2 実験結果

視覚目標は、時刻  $t = 9.0$  に左方に8.0[s]で0.2[m]動き、5.0[s]停止する。そして、右方に8.0[s]で0.2[m]動き、5.0[s]停止、さらに右方に8.0[s]で0.2[m]動き、左方に8.0[s]で

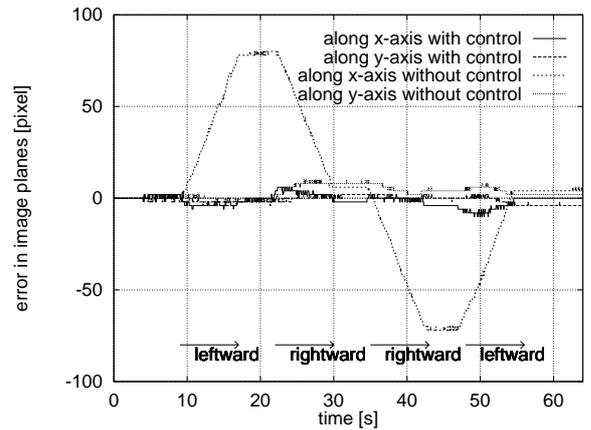


図 5: 実験結果 (右上のターゲットの画像上での目標値からの誤差ノルム)

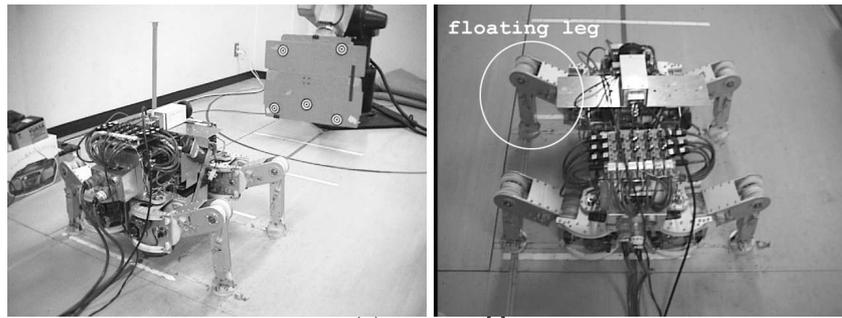
0.2[m]動いて停止する。画像内での画像特徴量と目標値との誤差ノルムを図5に示す。提案する手法により、注視対象のステップ状の変化に対し、画像特徴量が目標値に収束することがわかる。また図6に、視覚目標の動きに応じたロボットの追従動作の様子を示す。この図より、注視対象を動かすことによってロボットの揺動を実現できることが確認できる。

## 4 おわりに

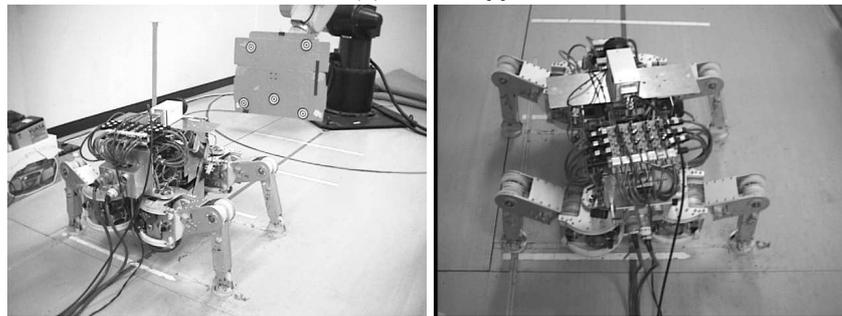
本報告では、適応型視覚誘導制御によって、未知環境において脚式ロボットが視覚目標を望みの目標値に見続けることによって、ロボットの揺動が実現できることを示したが、今後さらに遊脚の振り出し制御と組み合わせることによって、視覚誘導による歩容の実現を目指す。

## 参考文献

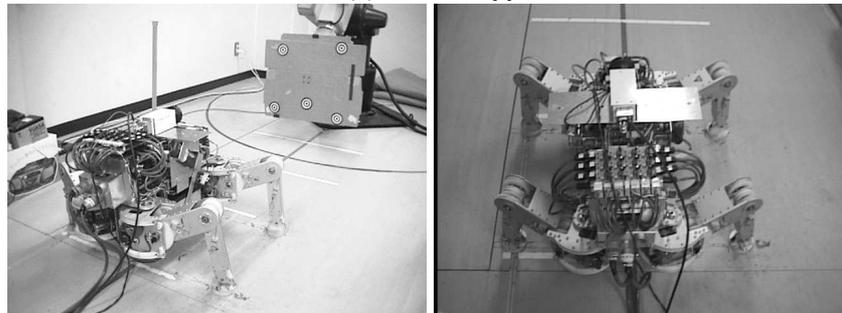
- [1] 浅田, 細田, 鈴木. 視覚サーボを用いた脚式ロボットの揺動行動の実現. 第2回重点領域研究「知能ロボット」シンポジウム予稿集, pp. 79–82, 1997.
- [2] K. Hosoda and M. Asada. Versatile visual servoing without knowledge of true jacobian. In *Proc. of the 1994 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 186–193, 1994.
- [3] K. Hosoda, M. Kamado, and M. Asada. Vision-based servoing control for legged robots. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3154–3159, 1997.
- [4] 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.



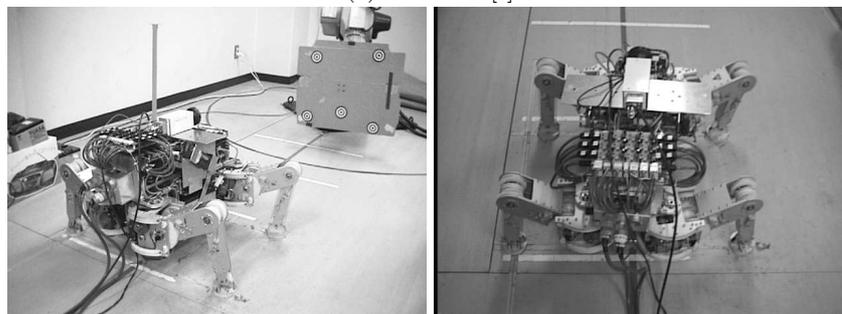
(1) at  $t = 8$  [s]



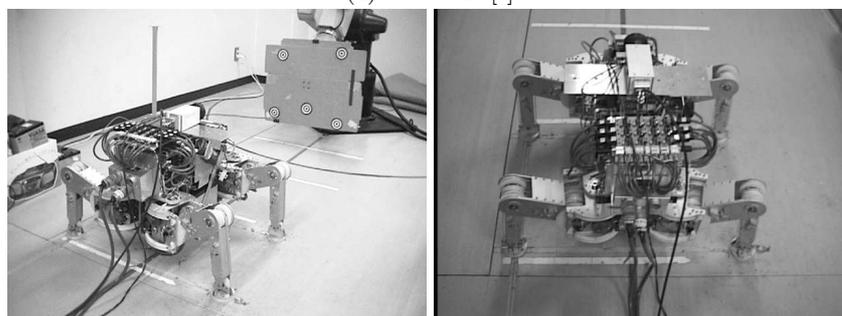
(2) at  $t = 21$  [s]



(3) at  $t = 34$  [s]



(4) at  $t = 47$  [s]



(5) at  $t = 60$  [s]

図6: 実験結果 (注視対象を動かすことによって実現された揺動)