

未知環境における脚式ロボットの視覚誘導制御

Legged Robot with Adaptive Visual Servoing

竹内 進 (阪大) 准 細田 耕 (阪大) 正 浅田 稔 (阪大)

Susumu TAKEUCHI, Osaka University, 2-1, Yamadaoka, Suita, Osaka

Koh HOSODA, Osaka University Minoru ASADA, Osaka University

Abstract : This paper describes a method to achieve a vision-cued swaying task in unknown environments utilizing adaptive visual servoing. The proposed method has a hybrid structure consisting of a controller to keep the distances between feet constant and an adaptive visual servoing controller. An experimental result demonstrates how the proposed method realizes a vision-cued swaying behavior of the legged robot.

Key Words : unknown environments, adaptive visual servoing, keep the distances, legged robot

1 はじめに

脚式ロボットが未知環境に適応していく際に視覚センサは重要な役割を果たす。これまでに竈門ら [1][2] は、ビジュアルサーボの手法によりロボットの位置・姿勢を視覚によって誘導している。しかしこの手法ではカメラパラメータの同定が必要であり、またパラメータの変動に対応できないなどの問題がある。一方でマニピュレータに対しては、細田ら [3] により逐次最小二乗法に基づいた適応型ビジュアルサーボ系が提案され、未知環境や構造の変動があっても有効であることが実験により検証されている。

本報告では、脚式ロボットに適応型ビジュアルサーボを適用して、ロボットが目標物の動きに応じた揺動を実現するための制御則を提案する。また実験を行い、この手法の有効性を検証する。

2 視覚をもつ脚式ロボット

視覚センサとしてカメラを搭載した脚式ロボットを対象とする。ロボットは3脚で地面に立っており、各脚は3自由度を持つものとする。各脚の順運動学を既知とすると、脚先位置と関節角速度の関係は次のように表される。

$${}^r\dot{\mathbf{r}} = \frac{\partial {}^r\mathbf{r}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \triangleq \mathbf{J}_{r\theta}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{J}_{r\theta} \in \mathbb{R}^{3 \times 9}$ は脚先速度ベクトルと関節角速度ベクトルを関係づけるヤコビ行列である。

カメラはロボットの本体に固定されており、カメラパラメータは未知であると仮定する。ロボットはこのカメラを用いて、適当な目標物の画像上での特徴量を観測することができる。ロボットに与えられるタスクは、この画面上での特徴量を与えられた目標値に収束させるように体を動かすことである。

3 脚先間距離の保持

脚式ロボットは地面に対して絶対的な固定点を持たないため、むやみに関節を動かせば、接地点が変化して画像とロボットの動きとの関係が変化してしまう恐れがある。この点において、絶対的な固定点を基準に持つことができるハンドアームシステムなどと大きく異なる。そこで各脚先位置の距離を保持する制御を行い、脚先接地点が変化しないようにして画像とロボットの動きとの関係を保つ。

任意の2つの脚先位置 ${}^r\mathbf{r}_i$ 、 ${}^r\mathbf{r}_j$ の距離 l_{ij} を

$$l_{ij} \triangleq \|{}^r\mathbf{r}_i - {}^r\mathbf{r}_j\| = l_{ij}({}^r\mathbf{r}) \quad (2)$$

と表す。式 (2) を時間微分することにより

$$\dot{l}_{ij} = \frac{\partial l_{ij}}{\partial {}^r\mathbf{r}} {}^r\dot{\mathbf{r}} \quad (3)$$

を得る。これを全ての支持脚の組合せについてまとめて行列表示すると、

$$\dot{\mathbf{l}} = \frac{\partial \mathbf{l}}{\partial {}^r\mathbf{r}} {}^r\dot{\mathbf{r}} \triangleq \mathbf{J}_{lr}({}^r\mathbf{r}) {}^r\dot{\mathbf{r}} \quad (4)$$

と書ける。ここで、 $\mathbf{J}_{lr} \in \mathbb{R}^{3 \times 9}$ は脚先間距離の変化と脚先速度ベクトルを関係付けるヤコビ行列、 $\dot{\mathbf{l}}$ はすべての支持脚の組合せについての脚先間距離の変化をあらわすベクトルである。式 (1)(4) より関節角速度と脚先間距離の変化の関係式

$$\dot{\mathbf{l}} = \mathbf{J}_{lr}\mathbf{J}_{r\theta}\dot{\boldsymbol{\theta}} \triangleq \mathbf{J}_{l\theta}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (5)$$

を得る。このとき

$$\mathbf{l} = \mathbf{l}_{init} \quad (6)$$

を満たすような制御を行うことで脚先間距離を保持する。ここで \mathbf{l}_{init} は脚先間距離の初期値をあらわすベクトルである。

4 画像特徴量と関節変位間関係の推定 [3]

脚先間距離が式 (6) で表されているように保持され、注視対象が基準座標系に対して静止していると見なせる場合には、ロボットの関節角ベクトル $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^9$ と注視対象の画像特徴量 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ との間には次のような関係式が成り立つ。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_{x\theta}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (7)$$

ここで $\mathbf{J}_{x\theta}(\boldsymbol{\theta}) = \partial \mathbf{x} / \partial \boldsymbol{\theta}^T \in \mathbb{R}^{m \times 9}$ は画像特徴量速度と関節角速度の関係を表すヤコビ行列である。サンプリング時間 T が十分短くその間ヤコビ行列 \mathbf{J} が一定であると仮定すると式 (7) は以下のように離散化される。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{J}_{x\theta}(k)\mathbf{u}(k) \quad (8)$$

ここで $\mathbf{u} = T\dot{\boldsymbol{\theta}}$ である。式 (8) を満たすヤコビ行列の推定値 $\hat{\mathbf{J}}_{x\theta}$ およびその第 i 行ベクトル $\hat{\mathbf{j}}_i$ を、逐次最小二乗法をもとに以下のように推定する。

$$\hat{\mathbf{j}}_i(k+1) - \hat{\mathbf{j}}_i(k) = \frac{\{\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{J}}_{x\theta}(k)\mathbf{u}(k)\}_i}{\rho_i + \mathbf{u}(k)^T \mathbf{W}_i(k)\mathbf{u}(k)} \mathbf{W}_i(k)\mathbf{u}(k) \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{W}_i(k) \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ は $\hat{\mathbf{j}}_i(k)$ の変化に対する重み、 ρ_i は正の定数で $\|\mathbf{u}\|$ が十分に大きいときには無視でき、また小さいときには右辺が発散しないような適当な値を選ぶ必要がある。

5 制御則

これまでに得られた関係式から，視覚を持つ脚式ロボットの揺動を実現するための制御則を導く．

適応型ビジュアルサーボの手法は画像とロボットの動きとの関係が変化しない場合に限り適用することができる．脚先間距離を保持するというタスクを優先的にを行い，その後残された自由度で画像特徴量を目標値に収束させるための制御則は次のように与えられる．

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

ここで $J_{l\theta}^+$ は $J_{l\theta}$ の疑似逆行列， I_9 は 9×9 の単位行列， K_l および K_i は適当な正定ゲイン行列である．

6 実験

実験には東京工業大学で開発された多脚型ロボット TITAN-VIII を用いる (Fig.1)．ロボットには1台のカメラ (Sony 製 EVI-330T) が搭載されており，このカメラからの信号は画像処理装置であるトラッキングビジョン (富士通製 TRV-CPD6) に送られる．トラッキングビジョンによって追跡対象の画像上での位置が検出でき，これと関節角変位をもとに，ホストコンピュータ Gateway 2000 G6-200 (CPU: Pentium Pro 200MHz) によって各関節に対する速度目標値を計算する．計算された目標値は D/A ボードを通して各関節の専用コントローラに送られ，これにより各関節が速度制御される．制御系のサンプリングタイムは $0.033[\text{sec}]$ である．目標物は6軸ロボットマニピュレータ (川崎重工製 Js-5) の先端に取り付けられた絵を用いており，マニピュレータを専用コントローラで独立に操作することで目標物を移動させる．

目標物を初期位置から左右に動かした時の実験結果を示す．制御を始めて約10秒後から，7秒かけて目標物を左へ $0.05[\text{m}]$ 動かして一時停止し，約30秒後から7秒かけて初期位置へ動かして一時停止し，約50秒後から7秒かけて右へ $0.05[\text{m}]$ 動かして一時停止し，約65秒後から7秒かけて初期位置へ動かした．このときの脚先間距離の初期値に対する脚先間距離の誤差の割合を Fig.2 に示す．また画像上での水平方向の画像特徴量の誤差の変化を Fig.3 に示す．Fig.2 から脚先間距離の変化は非常に小さく，脚先接地点は十分保持されていることがわかる．また Fig.3 から，目標物が移動して画像特徴量に目標値との誤差が生じると，その誤差を減少させる方向にロボットが位置および姿勢を変化させていることがわかる．

この実験結果より，カメラパラメータに関する先験的知識がなくても，目標物の動きに対応して脚式ロボットを視覚的に誘導できることがわかる．

7 おわりに

カメラパラメータに関する先験的知識を与えずに，脚式ロボットの視覚誘導型行動を実現するための手法を提案した．また実機を用いて目標物の追従実験を行い，提案する手法の有効性を確認した．

参考文献

- [1] 竈門光彦，細田耕，浅田稔．ビジュアルサーボによる脚式ロボットの目標物追従制御．第13回ロボット学会学術講演会，pp. 979-980, 1995.
- [2] 竈門光彦，細田耕，浅田稔．視覚情報に基づく脚式ロボットの行動 — 実機による実験 —．第14回ロボット学会学術講演会．

- [3] 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.

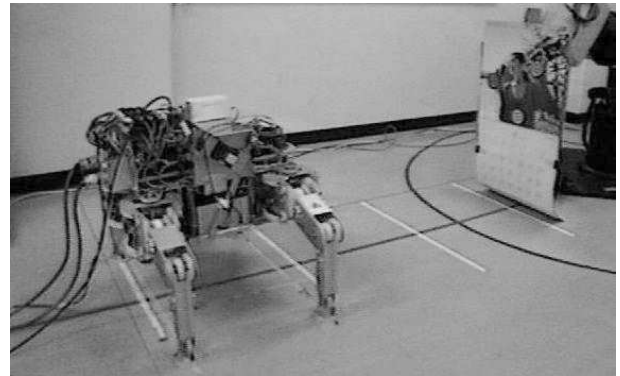


Fig.1 Experimental System

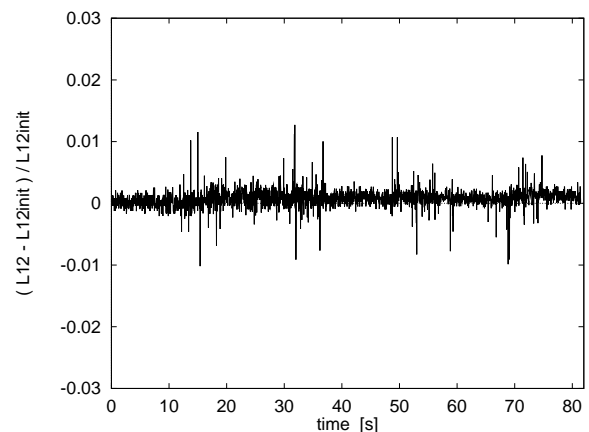


Fig.2 Normalized Distance between Legs

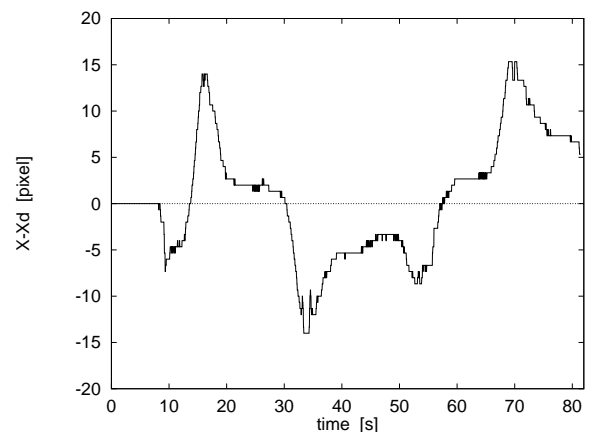


Fig.3 Error on Image