研究速報

ビジュアルサーボによる脚式ロボットの揺動の実現

細田 耕^{*1} 竈門 光彦^{*2} 浅田 稔^{*1}

Vision-Guided Swaying Controller for Legged Robots by Visual Servoing

Koh HOSODA^{*1}, Mitsuhiko KAMADO^{*2} and Minoru ASADA^{*1}

This paper describes a vision-based servoing control scheme for legged robots to achieve a swaying task utilizing a visual servoing technique. According to the controller, motions of the legs are not pre-programmed by analyzing the kinematics/dynamics of the system, but are generated by the servoing scheme reactively. The proposed scheme is a hybrid one consisting of a controller to keep the distances between feet constant (a stance servoing controller), and a visual servoing controller. Some experimental results are shown to demonstrate the effectiveness of the proposed scheme.

Key Words: Legged Robot, Swaying Control, Visual Servoing, Redundancy, Hybrid Control

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.これまでの研究はあらかじめ脚の軌道をオ フラインで設計しておき,ロボットを制御する際にはこの軌道 に沿って内科医センサフィードバックを適用するものがほとん どで,外界センサを使う研究においても基本的に内界センサ フィードバックで,外界センサは目標値の切り替え程度にしか 用いられていない[1]~[3].このような場合,環境やロボット自 身のパラメータの変化を観測できないため,これらの変化に対 して適応的に運動させることができない.

本研究の最終目的は,あらかじめこのような脚の軌道を設計 せず,外界センサからのフィードバックを組み合わせることに より歩容を創発することである.本報告ではその基礎的な段階 として,ビジュアルサーボ[4]を脚式ロボットに適用し,視覚 ターゲットの移動によってロボットの姿勢を制御する方法を示 す.なお脚式ロボットの姿勢制御の論文として[5]があるが,基 本的に内界センサフィードバックで,ロボットに搭載された外 界センサの情報を直接利用していない.

2. 脚式ロボットの視覚誘導制御

2.1 視覚を持つ脚式ロボット

本論文で対象とする脚式ロボットはFig.1に示すようなn本 の脚を持つ脚式ロボットである.このロボットは視覚センサを 通して,注視対象の画像特徴量を観測することができる.ロ ボットに与えられる作業はこの画像特徴量を与えられた目標値 に収束するように体を揺らす(揺動運動)ことである.

脚式ロボットにビジュアルサーボを適用するには,(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



Fig. 1 A legged robot with cameras gazes at a visual target

原稿受付 1997年11月9日

 $^{^{*1}}$ 大阪大学工学研究科

^{*&}lt;sup>2</sup>大阪大学工学研究科,現在(株)小松製作所に勤務

^{*1}Osaka University

 $^{^{\}ast\,2} \textsc{Osaka}$ University, currently with Komatsu Co., Ltd.

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,

$${}^{R}\boldsymbol{r}_{i} = {}^{R}\boldsymbol{r}_{i}(\boldsymbol{\theta}_{i}) \tag{1}$$

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,

$$\vec{r} = \boldsymbol{J}_{r\theta}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}$$
 (2)

と書ける.ただし, $\theta = [\theta_1^T \cdots \theta_n^T]^T$, ${}^R r = [{}^R r_1^T \cdots {}^R r_n^T]^T$, $J_{r\theta} = \partial^R r / \partial \theta^T$ である.以下では,各脚は ${}^R r_i \epsilon$ 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 $l \in \Re^{nC_2}$ は、 Rr_i を用いて、

$$\boldsymbol{l} = \begin{bmatrix} \| {}^{R}\boldsymbol{r}_{1} - {}^{R}\boldsymbol{r}_{2} \| \\ \vdots \\ \| {}^{R}\boldsymbol{r}_{n-1} - {}^{R}\boldsymbol{r}_{n} \| \end{bmatrix}$$
(3)

と定義することができる.式(3)を微分することにより,

$$\dot{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{J}_{lr} ({}^{R}\boldsymbol{r})^{R} \dot{\boldsymbol{r}}, \qquad (4)$$

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,

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{J}_{r\theta}^{-1} \left\{ \boldsymbol{J}_{lr}^{+} \boldsymbol{K}_{l} (\boldsymbol{l}_{d} - \boldsymbol{l}) + \boldsymbol{n} (\boldsymbol{J}_{lr}) \right\}$$
(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 $K_l \in \Re^{nC_2 \times nC_2}$ 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ると,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 $ar{r}_i$ は,

$${}^{0}\bar{\boldsymbol{r}}_{i} = {}^{0}\boldsymbol{p}_{R} + {}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{R}\boldsymbol{r}_{i} \tag{6}$$

日本ロボット学会誌17巻5号

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

$${}^{0}\dot{\boldsymbol{r}}_{i} = {}^{0}\dot{\boldsymbol{p}}_{R} + {}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{R}\dot{\boldsymbol{r}}_{i} + {}^{0}\boldsymbol{\omega}_{R} \times ({}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{R}\boldsymbol{r}_{i})$$
$$= \mathbf{o}$$
(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,

$${}^{R}\dot{\boldsymbol{r}}_{i} = \begin{bmatrix} -{}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{T} & {}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{T} \begin{bmatrix} ({}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{R}\boldsymbol{r}_{i}) \times \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{0}\dot{\boldsymbol{p}}_{R} \\ {}^{0}\boldsymbol{\omega}_{R} \end{bmatrix}$$

$$(8)$$

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,

$${}^{R}\dot{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{J}_{rp}\dot{\boldsymbol{p}} \tag{9}$$

が成立する.ここで,

$${}^{R}\dot{\boldsymbol{r}} \stackrel{\triangle}{=} \begin{bmatrix} {}^{R}\dot{\boldsymbol{r}}_{1}^{T} & \cdots & {}^{R}\dot{\boldsymbol{r}}_{n}^{T} \end{bmatrix}^{T}$$
$$\boldsymbol{J}_{rp} \stackrel{\triangle}{=} \begin{bmatrix} {}^{-0}\boldsymbol{R}_{R}^{T} & {}^{0}\boldsymbol{R}_{R}^{T} \begin{bmatrix} ({}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{R}\boldsymbol{r}_{1}) \times \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots \\ {}^{-0}\boldsymbol{R}_{R}^{T} & {}^{0}\boldsymbol{R}_{R}^{T} \begin{bmatrix} ({}^{0}\boldsymbol{R}_{R}{}^{R}\boldsymbol{r}_{n}) \times \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$
$$\stackrel{\in}{=} \Re^{3n \times 6}$$
$$\dot{\boldsymbol{p}} \stackrel{\triangle}{=} \begin{bmatrix} {}^{0}\dot{\boldsymbol{p}}_{R} \\ {}^{0}\boldsymbol{\omega}_{R} \end{bmatrix}$$

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 $x \in \Re^m$ 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, 0p_R , 0R_R の関数で

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}({}^{0}\boldsymbol{p}_{R}, {}^{0}\boldsymbol{R}_{R})$$
(10)

と書ける.式(10)を微分することにより,

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}_{xp} \dot{\boldsymbol{p}} \tag{11}$$

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,

$$\dot{\boldsymbol{p}} = \boldsymbol{J}_{rp}^{+R} \dot{\boldsymbol{r}} \tag{12}$$

と変形することができる.したがって,式(11),(12)より,

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{J}_{xp} \boldsymbol{J}_{rp}^{+R} \dot{\boldsymbol{r}}$$
$$\stackrel{\triangle}{=} \boldsymbol{J}_{xr}^{-R} \dot{\boldsymbol{r}}$$
(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

-147-

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.

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



 ${\bf Fig. 5} \quad {\rm A \ realized \ horizontal \ swaying \ motion}$

752

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]のところに配置した.

3.2 実験結果

3.2.1 水平方向摇動

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

- 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.