

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

○ 竈門 光彦 細田 耕 浅田 稔
大阪大学 工学部

Visual Servoing Control for Legged Robot

○ Mitsuhiro Kamado Koh Hosoda Minoru Asada
Osaka University

1 はじめに

従来の脚式ロボットの研究では、人間によってあらかじめ行われたロボットの運動学的、動力学的解析に基づいた動作パターンを組み込んでおくことが多い。

一方、近年、アームなどの制御においてカメラシステムを同時に利用したビジュアルサーボ¹⁾の手法が提案され、数多く研究されている。この手法は、カメラでとらえた画像特徴量の変化とロボットの運動との間の関係を用いて、画像特徴量を目標値に収束させるものである。このようなビジュアルサーボの手法を脚式ロボットにも適用することにより、ロボットを動作させるための人間による解析を容易にすることが期待される。

そこで本報告では、カメラを搭載した脚式ロボットのためのビジュアルサーボ系を構成し、その位置、姿勢を視覚情報を用いて制御する手法を提案する。脚式ロボットの場合、地面と閉リンク系をなすことによる新たな拘束を考慮しなければならない。ここでは、脚先接地点間の距離を保持するような制御を行うことでこの拘束を考慮する。このような制御系を構成することで、画像特徴量という視覚的な入力により、ロボットの位置、姿勢の制御を行うことができることを示す。最後にシミュレーションによって、提案する手法の有効性を示す。

2 脚式ロボットの位置・姿勢制御

従来の脚式ロボットの制御においては、あらかじめ人間がロボットを運動学的、動力学的に解析し、目標の動作を実現させている。しかしながら、脚式ロボットにビジュアルサーボの手法を適用することにより、このような解析をできるだけ行わずに、目標の動作を実現させることができると考えられる。ビジュアルサーボ系に対して目標値として与える画像特徴量は、カメラと追跡対象物との相対的な位置関係の情報を含んでおり、ロボットがこれを達成するように行動することによって、ロボットと追跡対象物との位置関係を制御することができる (Fig.1)。

これまでに報告されているビジュアルサーボ系の研究は、アームのような開リンク系に対するものであった。脚式ロボットはアームと異なり、地面を含めた閉リンク系としての拘束を考慮しなければならない。ここでは、ロボットの位置、姿勢と同時に脚先接地点間の相対距離を一定に保持するような制御により、脚先接地点の変化を防ぐことで、この拘束を考慮する。脚先接地点の保持は、多指ハンドにおいて指先位置を滑

べらさないための制御に類似しており、これによって脚式ロボットと接地面との位置関係を簡単に記述することができるようになる。

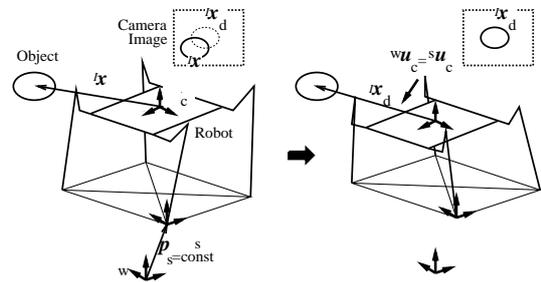


Fig.1 Robot action

3 関節角速度と画像特徴量および脚先相対距離の変化

脚先接地点が変化しないような制御が十分に行われているものとすれば、脚先接地点で構成される支持多角形は変化することがなく、これに固定された支持平面座標系 Σ_s に対するカメラの並進及び回転速度は関節角 $\theta \in \mathbb{R}^n$ と関節角速度 $\dot{\theta}$ の関数となる。脚先接地点が変化しないので、支持平面座標系は慣性系 Σ_w に対して速度を持たないとしてよいので、慣性系に対するカメラ速度 ${}^w u_c$ 、支持平面座標系に対するカメラ速度 ${}^s u_c$ は、

$${}^w u_c = {}^s u_c = J_{robot}(\theta) \dot{\theta} \quad (1)$$

となる。ここで、 $J_{robot} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ は関節角速度とカメラ速度を関係づけるヤコビ行列である。また、追跡する対象物の画像特徴量 ${}^I x \in \mathbb{R}^m$ はカメラの位置の関数となるので、

$${}^I \dot{x} = J_{image}(\theta) {}^w u_c \quad (2)$$

となる。ここで、 $J_{image} \in \mathbb{R}^{m \times 6}$ はカメラ速度と追跡対象物の画像特徴量の変化速度を関係づけるヤコビ行列である。式 (1), (2) より、

$${}^I \dot{x} = J_{image} J_{robot} \dot{\theta} \triangleq J_{sys}(\theta) \dot{\theta} \quad (3)$$

を得る．ここで， $J_{sys} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ は追跡対象物の画像特徴量の変化速度と関節角速度を関係づけるヤコビ行列である．

ところで，追跡対象物の画像特徴量の変化と関節角速度の関係を示す式 (3) は，脚先接地点が変化しない場合のものである．そこで，脚先接地点を変化させないように脚先相対距離を制御する必要がある．これに必要な脚先相対距離の変化と関節角の変化の関係を求める． t 本の脚先位置をあらわすベクトルを， r_1, \dots, r_t とし，脚先の相対的な位置関係として，2本ずつの脚先相対距離を， $l_{ij} = \|r_i - r_j\|$ ($1 \leq i < j \leq t$) とすれば， tC_2 個の l_{ij} が与えられ，これらをまとめて， $l = [l_{11} l_{12} \dots]^T \in \mathbb{R}^{tC_2}$ と書くことにする．これらは関節角 θ の関数であるから $l = l(\theta)$ であり，これを微分すれば，

$$\dot{l} = \frac{\partial l}{\partial \theta} \dot{\theta} \triangleq S(\theta) \dot{\theta} \quad (4)$$

を得る．ここで， $S \in \mathbb{R}^{tC_2 \times n}$ は脚先相対距離の変化と関節角の変化の関係をあらわすヤコビ行列である．

4 制御則

各脚の各関節角は速度制御されているとして，式 (3)，(4) より次の制御則，

$$\begin{aligned} \dot{\theta} = & S^+ K_l (l_{init} - l) \\ & + (I - S^+ S) \tilde{J}_{sys}^+ \\ & (K_i (x_d - x) - J_{sys} S^+ K_l (l_{init} - l)) \end{aligned} \quad (5)$$

を用いる．ただし， A^+ は A の疑似逆行列をあらわし， $\tilde{J}_{sys} \triangleq J_{sys} (I - S^+ S)$ である． l_{init} は脚先相対距離の初期値， x_d は追跡する対象物の画像特徴量の目標値， K_l, K_i は正定ゲイン行列である．これにより，脚先接地点を変化させずに，追跡対象物の画像特徴量を目標状態に収束させることができ，すなわち，追跡対象物とロボットの位置関係を目標状態にするような制御が行われる．

5 シミュレーション

本シミュレーションでは，カメラ2台と3自由度の脚4本を持つロボットを対象とする．追跡する対象物の画像特徴量として3つの特徴点の画像上での座標を $\pm 2[\text{pixel}]$ の誤差を含んで画素単位で得ることができるものとする．ロボットの大きさはおよそ $0.15 \times 0.20 \times 0.10[\text{m}]$ で，追跡対象物はロボットのほぼ正面 $0.20[\text{m}]$ の位置から慣性座標系で $[-0.06 \ -0.04 \ -0.04][\text{m}]$ だけを20秒間で直線上に等速で移動した後，その場で停止する．初期の追跡対象物の見え方を画像特徴量の目標値として与えた．このときの画像特徴量の目標値との誤差，脚先相対距離，およびロボットの位置の変化を Fig.2 に示す．比較対象として，追跡対象物の画像特徴量の変化に対してサーボをかけない場合の画像特徴量の目標値との誤差も同時に示す．

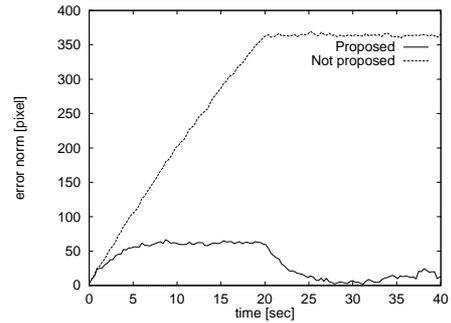
画像特徴量の誤差を小さくするように行動することで，追跡対象物の動きに追従するようにロボットの位置が変化しているのがわかる．また，脚先相対距離の変化量は小さく，接地点を変化させないとする要求を十分満たしている．

6 おわりに

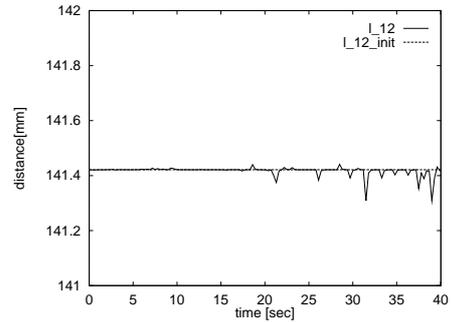
本手法の有効性を実機により検証する予定である．また，このような視覚的に制御された脚式ロボットを用いることで，あらかじめ歩行パターンなどを与えることなく歩行を実現させることができると考えている．

参考文献

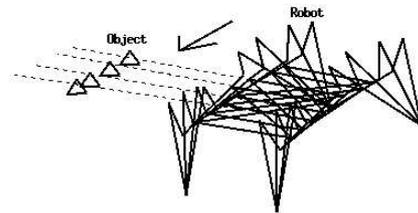
- [1] L.E.Weiss, A.C.Sanderson, and C.P.Neuman. Dynamic Sensor-Basad Control of Robots with Vidual Feedback. *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 5, pp. 404–417, 1987.



(a) error norm



(b) distance



(c) position

Fig.2 Simuration results