

視覚支援歩行ロボットの研究

- 第5報：本体揺動と基本行列による単眼歩行ロボットの奥行き知覚 -

Study on Vision Aided Walking Robots - Depth Map Estimation by Body Movement for Monocular Walking Robot -

○ 正倉爪 亮 (東工大)

正 広瀬 茂男 (東工大)

Ryo Kurazume, and Shigeo Hirose
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Acquisition of environmental information by visual sensors such as CCD cameras and laser range finders is indispensable for walking robots acting autonomously and intelligently. In this paper, we propose the depth map estimation system for the monocular walking robot using robot body movement. In this system, the specific body movement that can be attained using intrinsic redundant degree-of-freedom of a walking robot, is executed and the depth map of the scene is robustly created from the amount of body movement and optical flow. In order to estimate the body movement precisely, sensory information from internal sensors such as potentiometers and vision sensors are fused by the kalman filter, in which state variables are the elements of the fundamental matrix used in the structure-from-motion problem. Experiment with a quadraped robot, TITAN-VIII, mounted with a digital camera shows that the robot can recognize the position and distance of obstacles placed in front of the robot.

Keywords: Vision, Walking robot, Depth map, Structure from motion, Fundamental matrix, Kalman filter

1 はじめに

自律的かつ知的に行動する歩行ロボットの実現には、CCDカメラやレーザレンジファインダなど視覚センサの利用が有効である。一方、歩行ロボットは一般に対地適応性向上のために多くの冗長自由度を有しており、例えば足先接地位置を固定したまま本体の位置姿勢を変更することが可能である。そこで我々はこれらの冗長自由度を視覚による環境認識に積極的に利用することを考え、ロボット本体の揺動運動と単眼による移動ステレオ視を組み合わせた、歩行ロボットの奥行き知覚システムを構築した。本システムは、単一のCCDカメラを搭載した歩行ロボットに対し、i) カメラを搭載したロボット本体部にある特定の運動を行わせ、ii) 内界センサにより得られるロボット本体の移動推定量と、視覚センサから得られるオプティカルフローを、「基本行列」[1],[2],[3],[4]を状態変数とするカルマンフィルタにより融合し、さらに iii) 得られた移動推定量とオプティカルフローそれぞれの分散値から、その画素の奥行きをロバストに推定するものである。

2 基本行列を用いた内界センサ情報と視覚情報の融合

「基本行列 (Fundamental matrix)」は、いわゆる「動きからの構造復元 (Structure from motion)」問題の一解法であり、カメラの並進、回転運動と視野の変化の関係を線形連立方程式で記述し、カメラの運動や環境構造を復元する手法である。ある時刻で位置 A にあったカメラが並進 T 、回転 R で点 A' に移動した場合、移動開始前に単位ベクトル m の方向に見えていた空間上の一点 P が移動後に単位ベクトル m' の方向に見えた」とすると、

$$rm = r'Rm' + T \quad (1)$$

が成り立つ。この式は、3つのベクトル m, Rm', T が同一平面内に存在することを示しており、このことからこれらのベクトルの三重積がゼロ、すなわち

$$|m \ T \ Rm'| = m^T Gm' = 0 \quad (2)$$

が導かれる。ただし、 $G = [T \times]R$ 、 $[T \times]$ は歪み対称行列である。さらに行列 G の各項を並べた列ベクトルを \hat{G} とすると、上式は

$$M\hat{G} = 0 \quad (3)$$

という線形方程式に簡単化される。ただし、

$$M = (m_1m'_1, m_1m'_2, \dots, m_3m'_3) \quad (4)$$

であり、 G の9個の成分は、定数倍の自由度を除いた8組以上の m, m' の対応づけが得られれば最小自乗法により決定できる。この行列 G を基本行列 (Fundamental matrix) と呼び、これから R, T へ分解する手法も、Longuet [1] によって示されている。

2.1 カルマンフィルタによる基本行列の推定

基本行列を用いた運動復元は、オプティカルフローの測定誤差に対して非常に敏感であることが指摘されているが、歩行ロボットに搭載したカメラの並進、回転運動は、ポテンショメータやジャイロセンサ等の内界センサによっても推定可能であり、これらの情報を統合すれば画像と内界センサ双方に含まれる測定ノイズを除去できる可能性がある。

そこで上述した基本行列の各項を状態変数とするカルマンフィルタを構成し、内界センサ情報と視覚情報を直接的に結び付ける。まず時刻 k での基本行列 $G(k)$ およびその微分値 $\dot{G}(k)$ の各項を並べた列ベクトル $x(k)$ を状態変数とし、この系の状態方程式を

$$x(k+1) = Ax(k) \quad (5)$$

とする。ただし、

$$A = \begin{pmatrix} I_{9 \times 9} & \Delta T I_{9 \times 9} \\ 0 & I_{9 \times 9} \end{pmatrix} \quad (6)$$

であり、 ΔT はサンプリング周期である。

また観測される情報として、ポテンショメータなどの内界センサから求められる基本行列 G_{robot} とその微分値 \dot{G}_{robot} 、及び CCD カメラ画像上に N 個の小領域を設定し、

それらを追跡して得られる方向ベクトルの組 $m_i, m'_i (i = 1 \sim N)$ を考え、これらから観測方程式を以下のように定義する．

$$y(k) = C(k)x(k) + w \quad (7)$$

ただし、

$$C(k) = \begin{pmatrix} I_{18 \times 18} & 0 \\ M_1(k) & 0 \\ \vdots & \vdots \\ M_n(k) & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

であり、 $M_i(k)$ は Eq.(4) で求められる係数行列、 w は観測ノイズである．また基本行列の微分値 \dot{G} は、

$$\dot{G} = ([\dot{T} \times] + [T \times][\omega \times])R \quad (9)$$

であるから、これは姿勢センサやジャイロセンサより計算可能である．

従って、Eqs.(5),(7) よりカルマンフィルタは以下のように構成される．

$$x(k) = x^\dagger(k) + P(k)C(k)^T W^{-1}(y(k) - (C(k)x^\dagger(k) + \bar{w})) \quad (10)$$

ただし、

$$S(k) = AP(k-1)A^T \quad (11)$$

$$P(k) = (S(k)^{-1} + C(k)^T W^{-1} C(k))^{-1} \quad (12)$$

$$x^\dagger(k) = Ax(k-1) \quad (13)$$

$$y(k) = (\hat{G}_{robot}(k), \hat{G}_{robot}(k), 0)^T \quad (14)$$

である．

ただし上述したカルマンフィルタの定式化の中で、ロボットの内外界センサから求められる基本行列 G_{robot} とその微分値 \dot{G}_{robot} は、移動絶対量等の完全な三次元情報を含んでいるのに対し、カメラ画像から得られる G に対する拘束は定数倍の自由度を有している．そこで、例えばロボットの内外界センサ情報から求められる基本行列 G_{robot} 、 \dot{G}_{robot} の各項を、まず $Tr(G_{robot} G_{robot}^T) = 2$ となるように $s = \frac{Tr(G_{robot} G_{robot}^T)}{2}$ で割り、カルマンフィルタの計算の後で再び各項に s を掛け合わせて、完全な三次元情報を含む G を計算することにする．

3 ロボット本体の円運動による奥行き の推定

多数の画素点に対するオプティカルフローや内外界センサ情報から基本行列を求める場合には、測定誤差の影響を上述した方法により打ち消すことができるが、求められた基本行列と個々のオプティカルフローから各点の奥行きを求める場合には、フローに含まれる測定誤差の影響から距離精度は非常に低くなる．

そこで歩行ロボットの有する冗長自由度を利用してカメラを搭載した歩行ロボットの本体部に特定の運動を行わせ、運動中に計測される同一地点に対する複数のオプティカルフローから測定誤差に対してロバストに奥行きを求めることを考える．ただしここでは特に歩行ロボットが歩行を停止し同一の姿勢を維持した状態で、ロボット本体にカメラ光軸まわりの円運動を行わせ、その際 CCD カメラにより得られる円弧状のオプティカルフローと、カルマンフィルタにより推定される本体の移動量から、各領域までの距離を求めることにした．円運動を選択したのは、あらゆる方向のエッジに対してオプティカルフローをできる限り正確に測定するためである．

具体的には距離測定を以下の手順により行う．

1. ロボットを停止させる．
2. CCD カメラにより撮影された画像を特定の大きさの小領域に分割し、それらを領域法によるオプティカルフロー計算の初期画像として保存する．
3. Fig.1 に示すように、ロボット本体にカメラ光軸まわりの円運動を行わせる．

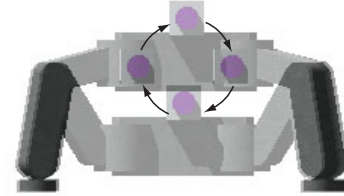


Figure 1: Circular body movement

4. 円運動中の画像を CCD カメラにより撮影し、オプティカルフローを計算する．
5. ロボット脚関節に取りつけられたポテンショメータ、本体の姿勢センサ、ジャイロセンサとオプティカルフローから、カルマンフィルタにより基本行列 G を推定し、並進移動量 T 、回転量 R を計算する．
6. ロボット本体が 1 ～ 数回転した後に静止させ、本体の並進移動量 T と各オプティカルフローのそれぞれの平均値、及び分散値を計算する．
7. 各小領域の奥行きを以下の式で求める．

$$D = f \left(\frac{\det(\Sigma_{body})}{\det(\Sigma_{area_i})} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (15)$$

ただし、 f はレンズの焦点距離、 Σ_{body} 、 Σ_{area_i} は、(6) で求めた並進移動量 T と小領域 i のオプティカルフローの分散行列であり、回転移動量 R は十分小さいとしている．

4 四足歩行ロボットによる奥行き知覚 実験

CCD カメラを搭載した四足歩行ロボット TITAN-VIII を使い、提案した手法による基本行列の導出、及び奥行き
の推定実験を行った．実験では、ロボットが停止した状態でロボット本体に半径 50[mm] の円運動を行わせ、運動中に CCD カメラ (Kodak 社製 ES310) により撮影された画像を画像入力ボード (Datacube 社製、MaxPCI) を介してコンピュータ (PentiumII 400MHz) のメインメモリに転送した．次にこの画像中に大きさ 32x32[pixel] の小領域を 192 個設定し、Pentium MMX 命令を用いた SSD 演算により各小領域のオプティカルフローを求めた．

Fig.2 に CCD カメラを搭載した四足歩行ロボット TITAN-VIII を、Figs.3,4 に円運動中の CCD カメラの画像、および得られたオプティカルフローを示す．また、Fig.5 に Eq.(15) により計算された奥行き地図を示す．これらより、ロボット前方 1.5m と 3m の位置に置かれた 2 つの障害物の有無、及びおおよその距離が認識できていることがわかる．

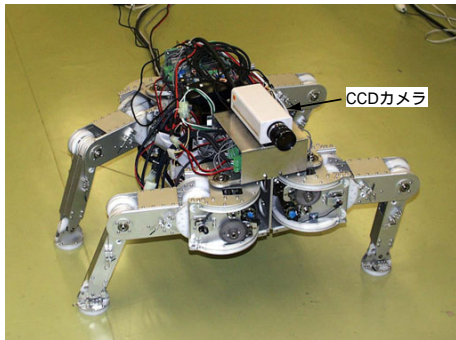


Figure 2: TITAN VIII with CCD camera

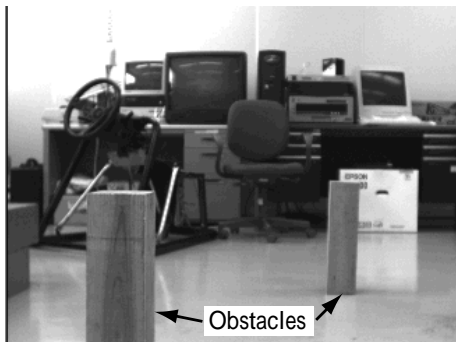


Figure 3: An example of image from CCD camera

5 おわりに

本報告では、多くの歩行ロボットが歩行を実現するために必要な最小自由度以上の冗長な運動自由度を有していることに着目し、これら冗長自由度を利用したロボット本体の揺動運動と、単眼による移動ステレオ視を組み合わせた歩行ロボットのための奥行き知覚システムを提案した。本手法は基本行列を状態変数としたカルマンフィルタによる内界センサと視覚情報との融合、及びロボット本体への円運動命令により生成された運動情報とオプティカルフローそれぞれの分散値を用いた奥行き計測からなる。また CCD カメラを搭載した四足歩行ロボットによる運動推定および奥行き計測実験により、提案した手法により安定に奥行き情報が得られることを確認した。

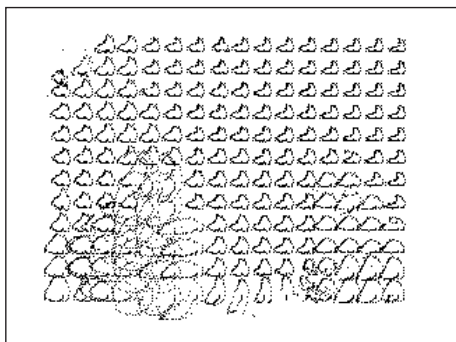


Figure 4: Appearance of calculated optical flow

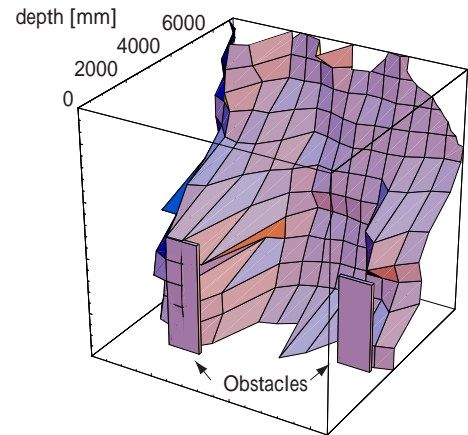


Figure 5: Obtained depth map

References

- [1] Longuet-Higgins H.C, A computer program for reconstructing a scene from two projections, Nature, 293, pp.133-135, 1981
- [2] Tsi R.Y. and Hung T.S., Uniqueness and estimation of three dimensional motion parameters of rigid object with curved surface, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.6, pp.13-27, 1984
- [3] "X. Ahuang, T. S. Hung and R. M. Haralick", Two-view motion analysis: A unified algorithm, J. of Optical Society of America, Vol.A-3, pp.1492-1500, 1986
- [4] J. Weng, T. S. Hung and N. Ahuja, Motion and structure from two perspective view: Algorithm, error analysis, and error estimation, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11, pp.451-476, 1989
- [5] 高松, 倉爪, 広瀬, 視覚支援歩行ロボットの研究 - 第1報: 歩行時画像の安定化と姿勢制御 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 1P1-42-059, (1999).
- [6] 倉爪, 広瀬, 視覚支援歩行ロボットの研究 - 第2報: 本体揺動を利用した奥行き知覚 -, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99 講演論文集, 1P1-42-061, (1999).
- [7] 倉爪, 広瀬, 視覚支援歩行ロボットの研究 - 第3報: 高速画像安定化機構の開発 -, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.135-136, (1999).