

ロバスト統計を用いたステレオ視による自由空間の認識

高橋 裕信 末広 尚士

新情報処理開発機構

つくば研究センター 能動知能研究室

茨城県つくば市竹園 1-6-1 つくば三井ビル 13F

E-mail: hironobu@trc.rwcp.or.jp

TEL: 0298-53-1684 FAX: 0298-53-1640

自由空間の認識はコンピュータビジョンの重要なテーマの一つである。物体認識では対象物を識別したりその機能を知るために物体の表面を正確に記述することが不可欠である。移動ロボットでは経路探索のために移動可能な自由空間を知ることが不可欠である。この問題についてレンジファインダ等の能動的な手法では投影光の反射から対象物の表面が直接観測できるので有利とされている。これに対して受動的な方法のステレオ法では記述すべき部分に明確なエッジがなかったり、微細なテクスチャに覆われた場合にはステレオ画像の対応付けが困難となる。また、いずれの方法でも表面に鏡面成分が含まれていると認識を誤る問題もある。ここではエッジベースのステレオ法によって、3次元空間中のエッジの位置がわかっている場合に、それらが囲む部分の空間を認識する手法を報告する。この手法では画像中の対象とする空間について、画像中では鏡面反射等があるような場合や、左右のカメラは明るさについても正確に調整されていない場合でも適用できる利点がある。

Free Space Recognition using Robust Statistics

Hironobu TAKAHASHI Takashi SUEHIRO

Real World Computing Partnership

Tsukuba Research Center Active Intelligence Laboratory

Tsukuba Mitsui Bldg. 13F, 1-6-1, Takezono, Tsukuba-shi, 305 JAPAN

TEL: +81-298-53-1684 FAX: +81-298-53-1640

The description of free space in the 3-Dimensional world is the major issue of the computer vision. For example, the surface description is useful to the object recognition and the path detection is inevitable to the robot navigation. It is said that the active range finder have the advantage since it can detect surfaces directly. On the other hand, the stereo method often faces some difficulties on the complicated environment. This paper proposes the new method that distinguishes the free space surrounded by the known 3-Dimensional edges. This method is applicable to the real world stereo images even if they may include some specular points or they may be achieved by the stereo camera system whose brightness is not configured.

1. はじめに

自由空間の認識はコンピュータビジョンの重要なテーマの一つである。物体認識において対象物を識別したりその機能を知るためには、物体の表面を正確に記述することが不可欠である。移動ロボットにおいても経路探索のために移動可能な自由空間を知ることが必要である。

この問題についてレンジファインダ等の能動的な手法では投影光の反射から対象物の表面が直接観測できるので有利とされ、ステレオ法では受動的な方法であるために汎用性の面で優れているにもかかわらずこの点では遅れている。そのため従来よりこの問題について多くの試みがなされてきた [1, 2]。これらの方法は基本的には対象とする面の内部に、ステレオ画像間で対応付けられて3次元位置が確定した線分が発見できるかどうかで識別されている。そのため明確なエッジを持たない濃淡像やテクスチャの多い画像等で汎用的に使用できる方法はない。

本論文では濃淡画像からすでにエッジベースのステレオ法によって3次元空間中のエッジの位置がわかっている場合に、そのエッジが囲む部分に面がどのように存在しているか識別する方法について報告する。この方法は画像中の対象とする領域について、半数以上の画素点についてランバート反射をしていることを仮定しているが、それ以外の点については任意の明るさでよく、鏡面反射等があったり、左右のカメラは明るさについても正確に調整されていなくても適用することができる。

2. アルゴリズム

2.1 仮説の生成

ステレオの各画像からエッジを抽出し、従来報告している手法によって対応付けを行い空間中の3次元位置が得られているものとする [3]。それらのうちで同一平面上にあるものを選択し、これらを結んで閉じた領域を構成するようにする。例えば図1に示した錐体の底面のような、平面上の任意の閉曲面で囲まれた領域を対象とする。この領域の部分について仮説を

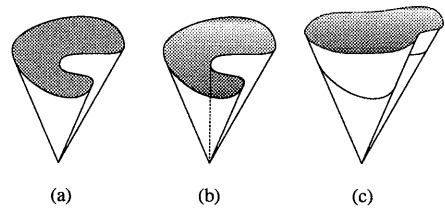


図 1: 仮説

作成し、次にのべる方法によってステレオ画像対応付けを行って正しいものを選択する。

この領域の近傍に図1のように錐体の側面を構成するエッジが見られる場合には次の仮説をおく。

1. 錐体の底面上に平面があり、ステレオの各カメラから見えている [図 1a].
2. 錐体の底面は自由空間で、その向こう側に錐体の側面が見えている [図 1b].
3. 錐体の側面が手前まで続いている [図 1c].

また、錐体の側面を構成するエッジが発見できない場合には、閉曲線が構成する平面の垂直方向に側面が続く柱体と仮定し、錐体の頂点が無限遠点にあるとして同様に仮説を生成する。

2.2 対応点の探索

各仮説ごとに対象領域内でのステレオ画像間での対応点を求める。左カメラの画像の領域内の点を P として、その点が右画像上に見える位置を各仮説ごとに Q_1, Q_2, Q_3 として求める (図 2)。

1. 錐体の底面が見えている場合には、底面上と同じ平面上にすべての対応点があるのでカメラパラメータと面の位置から決まる同次変換によって Q_1 の位置が求められる。
2. 錐体の底面が自由空間になっている場合には、曲面のトポロジーを考慮する必要があるので、次の手順で対応点を求める。まず左画像上で点 P と錐体の頂点を結ぶ線を求め、その輪郭線と

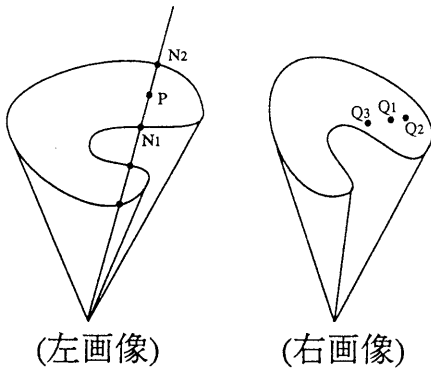


図 2: 対応点

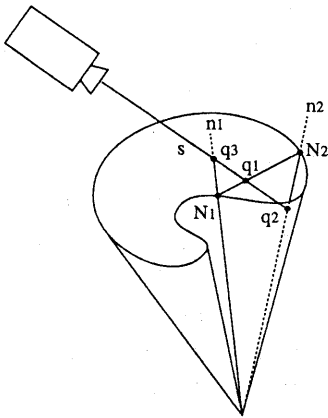


図 3: 点の選択

の交点を求める。複数の交点の中から P から見て頂点側に最も近い点 N_1 と反対側の点 N_2 を求める。またそれぞれと頂点を通る直線を n_1, n_2 とする。これらを側面から見ると図 3 のようになっているので、 n_1 および n_2 のうち観測する左カメラから遠い方の直線 (図中では n_2) と、カメラ焦点と P を通る直線の交点を q_2 とする。この点を右画像中で見える位置が対応点 Q_2 となる。

3. 錐体の手前側面が見えている場合は 2 と同様に頂点を結ぶ線との交点を求める。 n_1 と n_2 のう

ちで観測しているカメラに近い直線 (図中では n_1) を用いて同様に q_3 を求める。この点が右画像中で見える位置が対応点 Q_3 となる。

2.3 ロバスト統計による仮説の検証

それぞれの各仮説 ($i = 1, 2, 3$) における対応点の組 $(P_j, Q_{ij}) (j = 1, 2, \dots, N)$ についてその画素の明るさの対を (I_{Ln}, I_{Rij}) とする。仮説 i が正しくかつ対象物の表面が理想的なランバート面であれば等しくなる。ここではステレオカメラの設定による明るさの違いがあるので、正しい仮説であれば次の式が各対応点について成立する。ここでパラメータ a_i, b_i は左右のカメラの明るさの違いを意味している。

$$I_{Ln} \equiv aI_{Rij} + b \quad (1)$$

ここでパラメータ a_i, b_i は左右のカメラの明るさの違いを意味している。

次に各仮説・各対応点の組ごとの誤差を次のように定義する。なお左右の画像について対象にするために正規化した。

$$D_{ij} = |I_{Ln} - aI_{Rij} + b| / \sqrt{a^2 + 1} \quad (2)$$

この各 D_{ij} のそれぞれを最小化するように適当な a_i, b_i と、その時の誤差から、各仮説 ($i = 1, 2, 3$) のうち正しいものが決定できる。この最小化の手法として種々の方法が考えられるが、例えば最小二乗法であれば次の式の S を最小化することによって求められる。

$$S(a_i, b_i) = \sum_{n=1}^N D_{ij}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

しかし最小二乗法ではガウス分布をモデルとしているために、正しい仮説であってもごく一部の点で大きな誤差が発生すると正しいパラメータや収束値を求められない問題がある。例えば対象物の表面に鏡面反射成分があれば、その対応点では明度が大きく異なってしまう。同様にテクスチャがある場合には、対象物の計測位置のわずかな誤差があればテクスチャのエッジ近傍では大きく異なった値となってしまう。

この問題を解決するためにロバスト統計によって a, b を求める手法について検討した [4]。ロバスト統

計は真値から大きく離れたデータに影響されにくい利点がありこの問題に適している。

ロバスト統計には最小中間値法 (LMed 法) 等の離散的な手法と M- 推定法による連続的の手法がある。離散的な手法ではその解法としてモンテカルロ法のような乱数を用いた解法が知られているが、一般に計算量が大きい問題がある。一方連続的の手法では繰り返し法によって求められるので計算量を小さくできるが適切な初期値を与える必要があることやパラメータに対する単調性が保証されなければしばしばローカルミニマムに陥る問題がある。ステレオ画像の対応付けでは、左右のカメラが近い特性を持っていることが期待できるので、これを初期値として利用できる。また正しい仮説であれば真値の近傍では単調減少するのでここでは M- 推定法を採用した。M- 推定法には重み関数 (ψ 関数) によって多くのバリエーションがあるが、鏡面反射等による値の影響を排除するために中間値以上の D_i の値が統計に反映しにくくする目的と、中間値付近での関数の微分値を連続にして収束性をよくするために、次のような biweight 法に類似した手順を用いている。

1. 左右のカメラの明るさが等しいと仮定した初期値を与える

$$a_i \leftarrow 1, b_{ij} \leftarrow 0 \quad (4)$$

2. 各対応点について式 (2) により D_{ij} を求め、次に仮説ごとにその中間値 $\hat{med}_i$ を求める

$$\hat{med}_i = \text{Median}\{D_{ij}\} \quad (5)$$

3. 各対応点について $\hat{med}_i$ で規格化した x_{ij} を求める。

$$x_{ij} = D_{ij} / \hat{med}_i \quad (6)$$

4. これから各対応点ごとの重み w_j を求める。

$$w_j = \begin{cases} x_{ij}^2 - 1 & \text{if } x_{ij} < 1 \\ 0 & \text{if } x_{ij} \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

5. 仮説毎の分散 $\hat{S}(a_i, b_i)$ を次のように定義する。

$$S(a_i, b_i) = \sum_{n=1}^N w_j D_{ij}^2 \quad (8)$$

6. S を (a_i, b_i) の関数として漸近法により最小値を与える (a_i, b_i) を求め、収束するまで 2 から手順を繰り返す。

収束後の a_i, b_i の値を用いて各仮説毎に $D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{ij}$ の中間値 Med_i を求め最も小さな値を持った仮説が正しいものと判断する。

3. 実験結果

有効性の検証のためにカップの各面について実験を行ない有効性を確認した。図 4-12 に示した円筒状のカップの円の部分を抽出し、その内部についてそれぞれの仮説およびロバスト統計による収束後の値を示した。これらはそれぞれ仮説 1, 2, 3 に対応している。それぞれの画像例の各仮説について対応する点を明るさをプロットした結果を各画像の下に示した。それぞれの横軸と縦軸はそれぞれ左画像と右画像上での対応点の明るさを示している。

プロットのうち図 5, 10, 15 は正しい仮説であり、理想的なランバート面であれば原点を通る一直線上にすべての点がプロットされる。しかし正しい仮説であっても鏡面反射や位置の誤差のために、真値から大きく離れた点が見られる。これらの円についてロバスト統計を行い、得られた中間値は次のようになっている。各例について正しい仮説での収束値がそれぞれの最小値となっており、正しく識別できていることがわかる。

収束後の中間値

	例 1	例 2	例 3
仮説 1	5.1	12.3	11.9
仮説 2	7.2	6.6	54.2
仮説 3	9.3	41.4	6.0

4. まとめと課題

ステレオによる自由空間の認識のために、仮説を生成してロバスト統計を利用し識別する方法について



図 4: 例 1: 底面が見えている場合

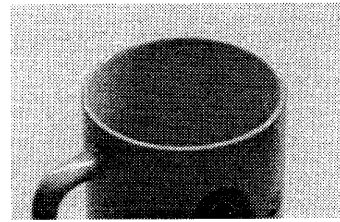


図 8: 例 2: 側面が面を通して見えている場合

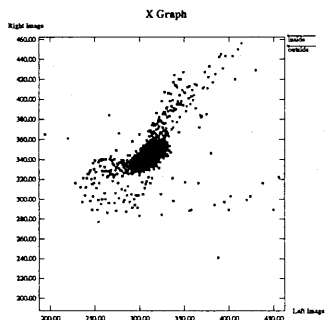


図 5: 仮説 - 円上に面がある

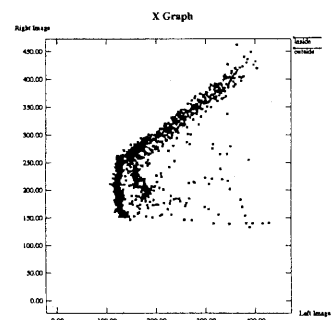


図 9: 仮説 - 円上に面がある

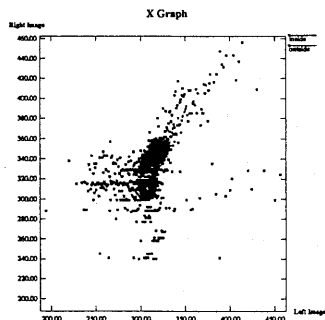


図 6: 仮説 - 向こう側に面がある

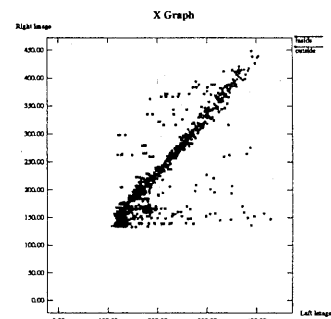


図 10: 仮説 - 向こう側に面がある

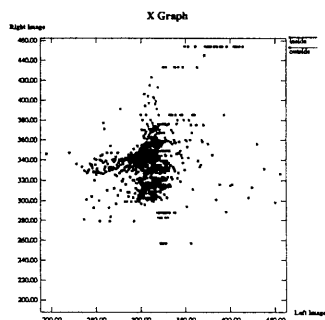


図 7: 仮説 - 手前に面がある

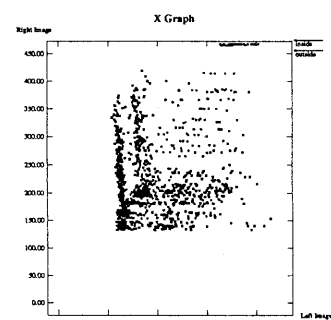


図 11: 仮説 - 手前に面がある

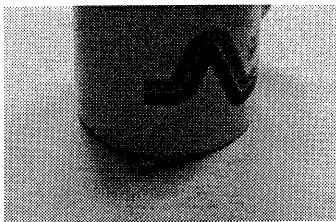


図 12: 例 3: 手前の側面が見えている場合

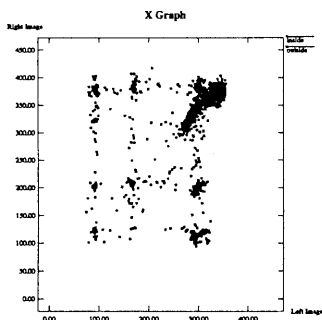


図 13: 仮説 - 円上に面がある

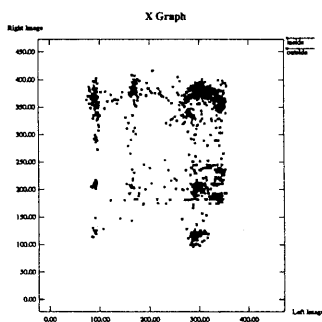


図 14: 仮説 - 向こう側に面がある

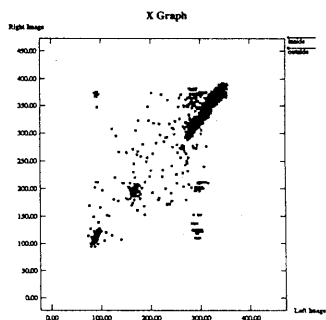


図 15: 仮説 - 手前に面がある

提案した。この方法はロバストであることに加えて
 相関法等を利用した通常のステレオ法に比べて対応
 点探索をする必要がなく対応する点をプロットする
 だけで面が認識できるので高速処理ができる利点も
 ある。

移動ロボットは最も自由空間の認識を必要として
 いる分野であり、これに適した仮説について検討し応
 用を図りたい。

謝辞

本研究にあたって有益な助言をいただく電子技術
 総合研究所知能システム部と新情報処理開発機構の
 諸兄に感謝する。また、本研究の推進にあたって貴
 重なご助言をいただいた奈良先端技術大学の横矢教
 授に感謝する。

参考文献

- [1] 杉本, 高橋, 富田: 移動ロボットのためのステレオ
 ビジョンによる環境の幾何モデリング: 情報 CV
 研資, 68-5 (1990).
- [2] 八木, 津戸, 谷内田: 移動視により得られたワイヤ
 フレームモデルからの空間構成の理解: ロボット
 誌, 11-3, pp.477-480 (1993).
- [3] H. Takahashi, F. Tomita: Primitive-based Stereo
 Vision for Can Picking Robot: Int. Conf. of
 Machine Vision and Applications (1992).
- [4] 佐藤: 画像処理における統計モデル利用に関する
 最近の動向: Medical Imaging Technology, 12-
 1, pp.48-58 (1994).