

ステレオビジョンとスポット光を用いた面の3次元再構成

紺野博之 今井正和 烏野武

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

環境中に存在する面の情報を獲得することは、ロボットビジョンの主要な問題の1つである。本論文では、ステレオビジョンとスポット光投影法といった、異なるセンシング手法を組み合わせることによって、信頼性の高く環境中の面の情報を獲得する一方法を提案する。この手法では、まず、ステレオビジョンによって、面もしくは模様境界線に相当するエッジセグメントの3次元位置を計測し、隣合うセグメント間に面候補を設定する。次に、この面候補が、物体表面であるか自由空間であるかを、スポット光投影法によって検証することによって、信頼性高く面の情報を検出する。

Surface Reconstruction Using Stereo and Spot Light

Hiroyuki Konno, Masakazu Imai and Takeshi Uno

Graduate School of Information Science
Nara Institute of Science and Technology

Reconstructing surfaces is an important problem in robot vision. In this paper, we propose a new method to reconstruct surfaces reliably in which two types of visual sensors, stereo and range finder based on a spot light, work cooperatively. First, 3D positions of boundaries of surfaces or textures, which we call 'edge segments', are estimated by using stereo, and candidates for surfaces are created between two edge segments which neighbor each other. Then, by using range finder, we decide whether there is actually an object surface at the place where each candidate for surface is estimated.

1 はじめに

環境中に存在する面の情報を獲得することは、ロボットビジョンの主要な問題の1つである。

一般に面情報を獲得する方法は、“受動的手法”と“能動的手法”とに大別することができる。受動的手法の代表は、ステレオビジョンを用いたものであり、画像全体の対応を取るにより求まる密な距離情報を用いて面の再構成を行なうもの[1]と、画像中で明るさが急変するエッジ部分のみの疎な距離情報を用いて面の再構成を行なうもの[2][3]の2つに分類することができる。前者では、発見的拘束条件を付加し正則化された問題を、弛緩法などの繰り返し計算を用いて解くことによって、密な距離画像を得ているので、計算時間が膨大にかかるといった問題がある。一方後者は、面の再構成を行なう際に、各エッジ間の距離情報を補間する処理が必要となり、オクルージョンが存在する環境でなければ補間を行なえなかつたり[2]、完全な3次元エッジのループが検出されることを前提としたり[3]、その処理の信頼性に問題がある。能動的手法は、レンジファインダによって獲得された距離画像を用いて、面の再構成を行なうものである[4][5]。Asada[4]は、スリット光投影型のレンジファインダによって得られた距離情報を明度画像上に投影し、環境の領域分割を行なっている。しかし、スリット光投影型レンジファインダは測定範囲が限られるため、屋外環境を模したジオラマを用いたシミュレーションにとどまっている。このように、レンジファインダには、適用できる環境が限定されたり、複数台用いたときに、お互いの光が干渉し合い正常に動作しなくなるといった問題がある。

本報告では、ステレオビジョンとスポット光投影法といった広範囲の測定が可能で2つのセンシング手法を組み合わせて、お互いの問題点を相補的に解決しながら、信頼性高く面の再構成を行なう手法を提案する。まず、ステレオビジョンによって、面もしくは模様境界線に相当する特徴線分の3次元位置を求め、隣合う特徴線分間に面候補を設定する。次に、その面候補が、物体表面であるか自由空間であるかを、スポット光投影法によって検証することにより面の再構成を行なう。本手法は、スポット光投影法を用いることにより、ス

テレオビジョンで問題となったエッジ間の距離情報補間処理を信頼性高く行なうことができるので、不透明な平面で構成された全ての物体に対して有効である。また、あらかじめ面候補上に設定された位置にスポット光を照射し、画像中の予測された位置から光が検出されるか否かによって、面候補の検証を行なうので、複数台用いたときに他の光の影響を受ける可能性も少ない。また、幾何学的ルールを定め、確実に自由空間である面候補を発見し、スポット光で検証する面候補の数を減らすことで、処理の効率化をはかる。

2 特徴線分の3次元位置の獲得

ステレオビジョンにより、面の境界線の3次元位置を検出する。本研究では、ステレオ対応の確実性を増すために、ステレオカメラの他にもう一つ検証用のカメラを用いた3眼視の手法を適用する。

本研究で用いる3眼視の原理を図1に示す。3台のカメラは、レンズ中心が一直線上にのり、光軸が平行になるように配置し、真中のカメラを検証用とする。対応の単位は、画像中から明るさの急変する部分を検出し、その点を追跡し直線近似した特徴線分のうち垂直に近い傾きを持つもの¹(エッジセグメントと呼び、 s で表す)を用いる。これは、面もしくは模様の境界線に相当する。いま、図1において、左画像中のエッジセグメント s_i^l の対応をとる場合を考える。まず、 s_i^l の端点のエピポーラライン $e_{1,2}$ を右画像中に引く。右画像中で、少なくともその一部が $e_{1,2}$ 間に存在し、かつ、 s_i^l の座標よりも左側(図1斜線部)にあるエッジセグメントを対応の候補とする。次に、全ての対応候補から、三角測量の原理にもとづき3次元線分を計算する。これらの3次元線分のうち、検証画像中にその像が存在するものを真の3次元線分として検出する。このように検出された3次元線分を3次元エッジセグメントと呼び S で表す。

本来、エッジセグメントは、他の画像中の1本のエッジセグメントと対応する。しかし、遮蔽により、対応するエッジセグメントの存在しないものもある。このようなエッジセグメントを、オクルーデッドセグメントとして分類しておく。

¹ステレオビジョンでは、エピポーララインに近い傾きを持つものの対応がとり難い

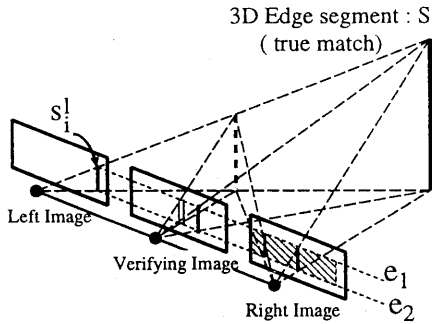


図 1: 3眼視の原理

3 面候補の設定

ステレオ処理によって得られた、3次元エッジセグメントの位置情報をもとに、面候補を設定する。

面候補は、基本的に隣合う3次元エッジセグメント間に作られるが、面の候補としての妥当性を考慮に入れ、次の条件を満たすときに設定されるものとする。

面候補の設定条件

面候補 $C_{i,j}$ は、次の3つの条件を満たすときのみ生成することができるものとする (図2参照)。

- ① S_i, S_j が、各々の像に同一のエピポーラライン上にのる部分を持つ。その共通部分を $S_{i,n}, S_{j,m}$ とする。
- ② 左右の画像の内少なくとも一方の画像において次の条件が成り立つ。
 - $S_{i,n}$ の像と $S_{j,m}$ の像に挟まれる領域 (図2斜線部) に、他の3次元エッジセグメントの像が存在しない。
- ③ $S_{i,n}$ と $S_{j,m}$ の間に平面を定義することができる。

以上の設定条件を満たすとき、 $S_{i,n}$ と $S_{j,m}$ を対辺とする四角形平面を面候補 $C_{i,j}$ とする。

このように設定された面候補を用いると、環境中の面の再構成は、「全ての面候補について、それが実際の物体表面であるか、自由空間であるかを検証する」という問題に置き換えることができる。

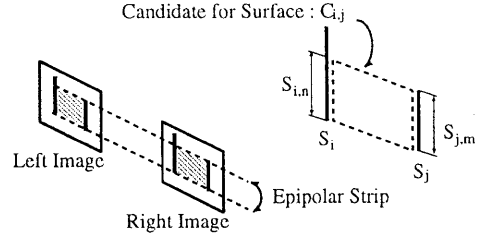


図 2: 面候補

4 面候補の検証

4.1 幾何学的ルールを用いた検証

面候補の設定条件にしたがって求められた面候補の中には、幾何学的に、その位置に面が存在し得ない、すなわち、確実に自由空間であると言えるものがある。スポット光による検証を行なう前に、そのような面候補を発見することは、処理の効率化の点で有効である。以下に、確実に自由空間である面候補を発見する3つの幾何学的ルールを示す。

[ルール1] 最奥性のルール: 面候補 $C_{i,j}$ の左右の画像への写像領域のうち少なくとも一方に、その面候補の後方 (視点と反対側) にある3次元エッジセグメントの像が含まれる場合 $C_{i,j}$ は自由空間であると判断する。

説明: 例えば、図3に示すようなシーンから面候補を求めると、 $C_{1,2} \sim C_{4,5}$ の6つの面候補が設定される。ここで、 $C_{4,5}$ に注目すると、右画像上で $C_{4,5}$ の写像領域内に、 $C_{4,5}$ より後方にある3次元エッジセグメント S_1 の像が存在する。仮に、 $C_{4,5}$ が面ならば、その面が S_1 を隠してしまうことになるので、 $C_{4,5}$ は確実に自由空間であるということができる。 □

[ルール2] 立体性のルール: 面候補 $C_{i,j}$ を形成する3次元エッジセグメント S_i, S_j の像の出現順序が、左右の画像で反転しているとき、 $C_{i,j}$ は自由空間であると判断する。

説明: 面候補 $C_{i,j}$ を形成する3次元エッジセグメント S_i, S_j の像の出現順序が、左右の画像で反転しているとき、 $C_{i,j}$ は左右のカメラによって表裏別々の方向から観測されていることになる。これは、物

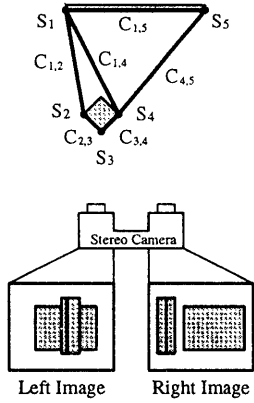


図 3: 幾何学的ルールによる検証 (1)

理的には厚さの無い面を表しており、現実世界には存在しない。よって、 $C_{i,j}$ は、確実に自由空間であるということが出来る。図 3 の $C_{1,2}$ 及び $C_{1,4}$ がこれにあたる。□

[ルール 3] オクルージョンを利用した最奥性のルール： 面候補 $C_{i,j}$ を左右の画像に射影した領域のいずれか一方にオクルーディッドセグメントが含まれる場合、それを通る視線群と面候補の交点群(直線になる)と、左右の視点を結んだ直線によって決まる三角錐領域のうち測定可能領域に含まれる部分に、他の面候補が存在しない場合、 $C_{i,j}$ は自由空間であると判断する。

説明： 簡単のために、あるエピポーラ平面に注目して説明する。図 4 において、 o は、エピポーラライン e とオクルーディッドセグメント o' の交点である。ここで、 o に対応する3次元点は、 o を通る視線上に存在し、障害物によって右カメラに対して遮蔽されている。この視線と面候補の交点を A としたとき、 A と左右の視点を頂点とする三角形領域のうち、測定可能な部分(図 4 斜線部)を考える。いま、この領域に他の面候補(遮蔽する障害物)が存在しない場合、 o に対応する3次元点が面候補より手前にあるならば、その像は右画像中にも存在するはずである。よって、その3次元点は面候補 $C_{i,j}$ より遠くにあると限定することができる。すると、最奥性のルールより $C_{i,j}$ は自由空間であると言える。以上のことを、オクルー

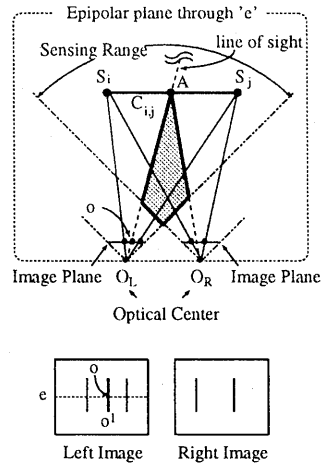


図 4: 幾何学的ルールによる検証 (2)

ディッドセグメント o' を通る全てのエピポーラ平面に拡張したものが、オクルージョンを利用した最奥性のルールである。□

4.2 スポット光を用いた検証

幾何学的ルールにより、確実に面でない面候補を自由空間であると決定した後、残った面候補(面か自由空間か決定されていない面候補)を、スポット光投影法の原理を使って検証する。

いま、面候補 $C_{i,j}$ の検証をする場合を考える。まず、 $C_{i,j}$ の4つの頂点の重心を観測点 P とする。 P の座標及びカメラの位置姿勢から、 P の像 $p(X_p, Y_p)$ の座標が計算できる。次に、 P の位置をスポット光でねらい²、画像中で光のあたっている部分 $q(X_q, Y_q)$ を検出する。仮に $C_{i,j}$ が面ならば、 p と q は一致する。よって、 $C_{i,j}$ が面である条件は、次式によって与えることができる。

$$X_p - \Delta X \leq X_q \leq X_p + \Delta X \quad (1)$$

$$Y_p - \Delta Y \leq Y_q \leq Y_p + \Delta Y \quad (2)$$

ここで、 $\Delta X, \Delta Y$ は、特徴抽出などに起因する検出誤差である。

²スポット光線と光源の座標形の1つの軸を一致させることで、簡単な幾何学計算により P を狙うための姿勢を決定することができる

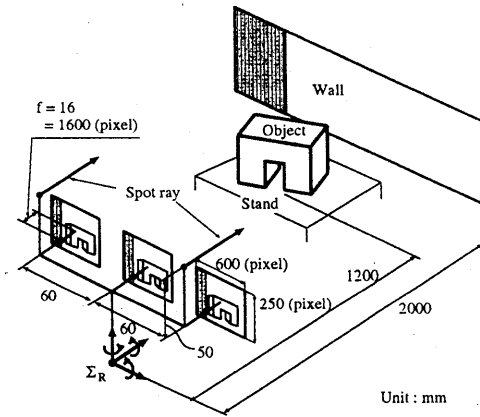


図 5: 実験環境

5 実験結果

以上に示したアルゴリズムの有効性を確かめるために、実画像を用いた実験を行なった。

5.1 実験方法

図 5 に示すような実験環境を実現し、面の再構成を行なった。3 台の CCD カメラ (焦点距離 16mm) は、レンズ中心間の距離が 60mm になるように配置され、スポット光の光源は、左右のカメラの上に光線とカメラの光軸が平行になるように設置されている。以上の装置は、各々の相対位置及び姿勢を保持したまま、3 自由度を持つ関節 (図中 Σ_R) により全体の姿勢を制御される。ここで、画像は全て 640×480 画素、8 ビットである。この視覚システムから、約 1200mm の位置に図に示すような物体がおかれ、約 2000mm の位置に壁がある。図 6 に各々のカメラによって得られた原画像を示す。

実験は、以下の手順で行なった。まず、原画像に対し、標準偏差 $\sigma = 1.5$ (pixel) を持つ $\nabla^2 G$ フィルターを積和的に作用し、そのゼロ交差点を抽出する。次に、各ゼロ交差点のうち原画像の 1 次微分の値がある閾値以上のものを特徴点として抽出する。その特徴点を追跡し、ベクトルトレース法により直線近似したものをエッジセグメントとして検出する。以下、提案するアルゴリズムにしたがい面の再構成を行なう。ここで、スポット光に

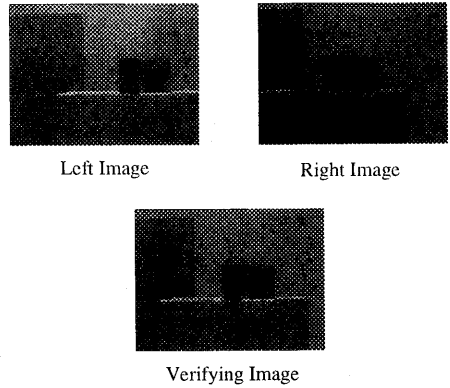
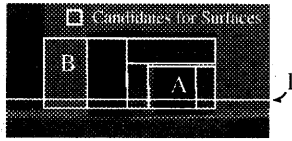


図 6: 原画像

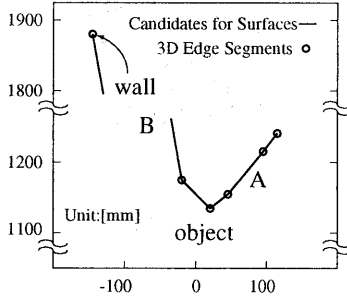
よる検証は、面候補の設定条件②において、この条件が左右の画像、もしくは右画像に対してのみ成り立つ場合は、右カメラとその上のスポット光を用い、左画像に対してのみ成り立つ場合は、左カメラとその上のスポット光を用いるものとした。

5.2 実験結果

図 7~図 9 に実験結果を示す。図 7 は、初めに設定された面候補を示している。(a) は面候補を右画像上に投影し、面候補が設定されている部分を拡大したものを表す (これ以外の部分に面候補は設定されていない)。(b) は (a) に示した直線 l を通るエピポーラ平面で面候補を切り、 xz 平面に正射影したものを表す。図 8 は、幾何学ルールにより確実に自由空間である面候補を発見した後に、今だ状態の決定していない面候補を示す。ここで、図 7 に示されている面候補 A が、その像の領域内にオクルーデッドセグメント (図 8 中 o) が存在するために、オクルージョンを利用した最奥性のルールによって、自由空間であると判断されている。図 9 は、スポット光による検証で、最終的に検出された面を示す。図 7 同様、(a) は右画像上への投影、(b) は xz 平面への投影を表している。図 7 に示されている面候補 B が、スポット光による検証で自由空間と判断されている。以上の結果が示す通り、提案したアルゴリズムによって、環境中の面を正しく検出することができた。



(a) Candidates for Surfaces projected on the Right Image



(b) Candidates for Surfaces projected on the xz plane

図 7: 設定された面候補

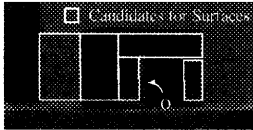
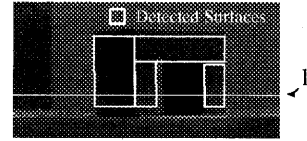


図 8: 幾何学ルール適用後に状態の決まっていない面候補

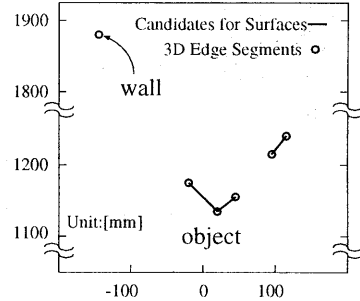
6 おわりに

本報告では、ステレオビジョンとスポット光投影法を組み合わせ、面の3次元再構成を行なう手法を提案した。本手法は、異なる2種類の手法を組み合わせることにより、各々の問題点を相補的に解決することができる一例を示している。提案した手法を用いると、特徴部分の3次元位置情報から、信頼性高く面が再構成できることを実験によって示した。また、幾何学的ルールによって処理を効率化できることも確認された。

提案する手法は、隣合う3次元エッジセグメントの像で、同一のエピポーララインにのる部分を面候補とする。そのため、面を構成する3次元エッジセグメントの長さが異なったり、同じ長さでも



(a) Detected Surfaces projected on the Right Image



(b) Detected Surfaces projected on the xz plane

図 9: スポット光による検証で検出された面

空間上で異なる高さ、もしくは距離に存在するような場合は、各々の像で同一エピポーラライン上にのらない部分が存在し、面の一部しか再構成することができない。面の不完全な部分を補うことによって、より完全な面の再構成を行なうことが今後の課題である。

参考文献

- [1] 横矢直和: “多重スケールでの正則化によるステレオ画像からの不連続を保持した曲面再構成”, 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1667-1675, 1993.
- [2] A. Nishikawa, et al.: “Detecting Object Surfaces by Using Occlusion Information from Active Binocular Stereo”, Proc. Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2974-2981, 1995
- [3] 杉本和英, 富田文明: “ステレオ画像の境界表現に基づくシーンの解釈”, 信学論, D-II, Vol.J76-D-II, No.3, pp.524-533, 1993.
- [4] M. Asada: “Map Building for a Mobile Robot from Sensory Data”, IEEE Trans. SMC., Vol.37, No.6, pp.1326-1336, 1990.
- [5] Y. Goto, et al.: “CMU Sidewalk Navigation System: A Blackboard-Based Outdoor Navigation System Using Sensor Fusion with Colored-Range Images”, Proc. Fall Joint Computer Conf., pp.105-113, 1986.