法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-07

アクティブビジョンによる３次元形状復元の高精度化と完全化

KATSUMATA, Miyuki / IWATSUKI, Masami / 勝又, 美由紀 / 岩月, 正見 / 大石, 友明 / OHISHI, Tomoaki

(出版者 / Publisher)
法政大学計算科学研究センター
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学計算科学研究センター研究報告 / Bulletin of Computational Science Research Center, Hosei University
(巻 / Volume)
14
(開始ページ / Start Page)
27
(終了ページ / End Page)
32
(発行年 / Year)
2001-03-31
(URL)
https://doi.org/10.15002/00024911

アクティブビジョンによる３次元形状復元の高精度化と完全化

大石　友明　　勝又　美由紀
法政大学大学院工学研究科電気工学専攻

岩月　正見
法政大学工学部電気電子工学科

我々は，色領域分割に基づく左右画像のロバストな対応付けにより３次元構造復元ができるステレオビジョンの手法を提案した．しかしながら，取得される３次元地図は，誤対応や雑音などにより高精度な３次元情報が望めないばかりか，隠ぺいなどにより取得できない領域が存在することは避けられない．そこで本論文では，高精度すべき面や未取得面を決定できるような指標を定義し，それに基づいて視点制御を行い，再取得された３次元地図を融合して，高精度化・完全化を行うアクティブビジョンの手法を提案する．

1．はじめに

コンピュータビジョン研究においてステレオ視による３次元構造の復元手法に関する研究は，比較的古くから行われている．しかしながら，1 回のステレオ視による 3 次元情報だけでは，誤対応や雑音などにより高精度な 3 次元地図が望めないばかりでなく，隠ぺいや物体の裏側などの 3 次元情報が欠落しているため，完全な 3 次元地図を構築できない．この問題に対して，適切な視点制御を行って，複数回のステレオ視を行うことにより，高精度で完全なシーンの 3 次元構造を復元するアクティブビジョンの手法が提案されている[1]．そこでは，高精度化すべき誤差の大きい面と隠ぺいなどにより取得できない不完全な面を評価できる優先度指標を定義し，これに基づいて視点制御を行い，再取得した３次元地図を取得済みの３次元地図と融合することで，３次元地図を高精度化・完全化を行っている．しかしながら，この手法では，前提として採用されているステレオビジョンの手法に制限があり，色領域が面として正確に分離できるような物体からなるシーンに限定されていた．したがって，このような制限により，実際に 3 次元構造が復元可能なシーンは，一様な色領域によって構成される単純な物体のみからなるシーンに限定されていた．

そこで本論文では，多視点でのステレオビジョンによって得られた 3 次元情報を融合するアルゴリズムを改良することで，より一般的なシーンに対しても 3 次元地図の高精度化と完全化を行えるアクティブビジョンの手法を提案する．本手法は，ロボットが周囲の人工的な作業環境を認識するために応用することを想定しているため，シーンを構成する物体の多くは，平面からなると仮定している．したがって，取得された複数の 3 次元地図から同一平面を検出するために，平面の拘束条件を導入でき，誤りの少ない融合を可能にしている．

2．３次元地図のデータ構造

ステレオビジョンによって取得される 3 次元情報は，色領域ごとに分割されており，その色領域を構成する対応特徴点による 3 次元位置として与えられる[2]．

これらの特徴点を頂点データとして，その 3 次元位置から色領域を構成する辺データを構成し，さらに，この辺データを色領域と関連付けて面データを構成する．

このように定義することで，辺・面の 3 次元位置も頂点データから知ることができる．例として図１に示すような３次元物体の３次元情報が取得された場合について以下のように定義する．

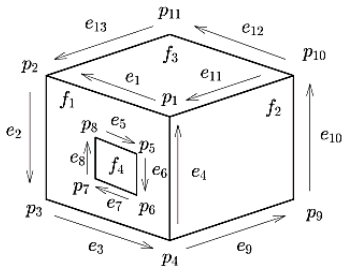


図 1．データ構造

2.1　頂点データ

頂点の 3 次元位置は移動しない限り，何回観測しても同じはずである．しかし，ステレオ視における視点位置のずれや，離散化による誤差などにより，観測するごとにばらついて取得される．そこで，頂点の真の 3 次元位置が存在し得る領域として，頂点の存在領域を次のように定義し，求める．

図 2 上図に示すような対応点が得られたとする．

１．対応点(L_c,R_c)においてエピポーラ線との距離をそれぞれ求め，大きい方を誤差とする．

２．対応点からその誤差分だけ離れた画素を抽出し，その領域の 4 隅(L_1,R_1)･･･(L_4,R_4)の組み合わせで 3 次元位置をそれぞれ算出する

３．対応点から算出した３次元位置を中心とし，２．で求めた３次元位置をすべて含む最小の球体を，1 回の観測における頂点の存在領域とする．

この存在領域内に，真の 3 次元位置が一様な確率で分布していると仮定しているので，存在領域が小さいほど高精度な頂点データということがいえる．

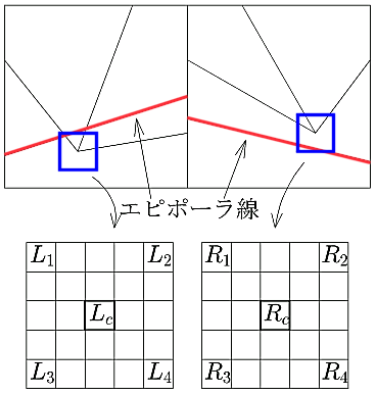


図２．存在領域算出例

以上より，頂点の３次元位置 x,y,z と，存在領域の半径⊿r を用いて，頂点データを以下のように定義する．

{x, y, z}{⊿r}

2.2　辺データ

すべての辺に対して，その辺の両端点を構成する頂点データの指標$\{p_i,p_j\}$と，その辺を共有する２つの面データの指標$\{f_k,f_l\}$を用いて以下のように定義する．

$\{p_i,p_j\}$ $\{f_k,f_l\}$

面の指標は，その辺を共有する面が１つしかない場合，一方を NULL 指標とする．以下に図１での例を示す．

e_1: $\{p_1, p_2\}$ $\{f_1, f_3\}$

e_2: $\{p_2, p_3\}$ $\{f_1$, NULL$\}$

2.2　面データ

すべての面に対して，面の色{R,G,B}，面を構成する辺数{n}，辺データの指標$\{e_i,e_j,\cdots,e_l\}$，内部領域数{m}，内部領域を構成する辺データの指標$\{e_s,e_t,\cdots,e_v\}$を用いて，面データを以下のように定義する．

$\{R,G,B\}\{n\}\{e_i,e_j,\cdots,e_l\}\{m\}\{e_s,e_t,\cdots,e_v\}$

ここで，辺データの指標には，面の法線ベクトルに対して，右ネジの方向の順に指標を与える．辺の方向が逆のとき，指標を負の値とする．以下に図１での例を示す．

f1 ： $\{R,G,B\}\{4\}\{e_1,e_2,e_3,e_4\}\{1\}\{e_5,e_6,e_7,e_8\}$

f2 ： $\{R,G,B\}\{4\}\{e_5,e_6,e_7,-e_4\}\{0\}$

3．優先度指標

３次元地図の高精度化および完全化をするためには，再度ステレオ視を行い，物体の３次元情報を再取得する必要がある．そこで，以下に示す各指標を用いてすべての面の優先度指標を算出し，再取得する優先順位を決定する．この優先順位に基づいて，面の３次元情報を再取得するための視点制御を行う．

・頂点の存在領域指標

面を構成する頂点データの存在領域半径平均$\overline{r_i}$を次式により求める．

$$\overline{r_i} = \sum_{k=1}^{n_i} \frac{r_k}{n_i}$$

ここで，r_kは面の k 番目頂点の存在領域半径，n_iはその面を構成する頂点数である．これをすべての面において算出し，存在領域半径平均の最大値を選び，それで正規化した値R_iを次式により算出し，指標とする．

$$R_i = \frac{\overline{r_i}}{\max_i \overline{r_i}}$$

・差分指標

ある視点位置から取得した実画像と３次元地図により合成した仮想画像との差分をとる．このとき，差分画像に残る画素数が多いほど，精度は低い．したがって，各面の仮想画像にある画素数u_iに対する差分画像に残った画素数v_iの割合を次式により算出し，指標とする．

$$I_i = \frac{v_i}{u_i}$$

・削除特徴点指標

ステレオビジョンでは，左右画像の対応点探索において，隠ぺいなどによって生じた特徴点はエピポーラ拘束を満たさないため，単純に削除している．このとき，削除特徴点数p_iを次式により算出する．

$$p_i = \left| P_l - P_r \right|$$

ここで，P_l, P_rは左右画像それぞれにおける i 番目の面の特徴点数である．削除特徴点数は複数回のステレオ視のなかで最小値を採用する．すべての面について算出し，最大削除特徴点数を選び，それでp_iを正規化した値P_iを次式により算出し，指標とする．

$$P_i = \frac{p_i}{\max_i p_i}$$

・面積・取得回数指標

３次元地図を構築するすべての面は，三角形ポリゴンに分割されている[5]．したがって，この面積の合計をその面の面積s_iとし，次式により算出する．

$$s_i = \sum_k^{q_i} \Delta s_k$$

ここで$\Delta s_k, q_i$は，それぞれ面を構成する三角形ポリゴンの k 番目の面積，ポリゴン数である．これをすべての面について算出し，面積の最大値を選び，それで各面の面積s_iを正規化した値S_iを算出し，指標とする．

$$S_i = \frac{s_i}{\max_i s_i}$$

また，複数回のステレオ視によってその面の３次元情報をT_i回取得したとき，面積・取得回数指標U_iを次式により算出する．

$$U_i = S_i \exp(-(T_i - 1))$$

ここで，面積がなるべく大きい面を再取得するように面積指標を定義しているが，それだけだと同一面ばか

り再取得される可能性がある．したがって，同時に取得回数も考慮することで，これを回避している．

以上の各指標を用いて，次式により各面について優先度指標 E_i を算出する．

$$E_i = C_0 R_i + C_1 I_i + C_2 P_i + C_3 U_i$$

$$C_0 + C_1 + C_2 + C_3 = 1.0$$

ここで，E_i は i 番目の優先度指標を表し，$C_0 \cdots C_3$ により適当な重み付けをしている．この優先度指標により決定される再取得する優先順位が最も高い面を見込むように視点制御し，改めてステレオ視を行い，面の 3 次元情報を取得する．

4．３次元地図の更新

図３に３次元地図更新処理のフローチャートを示し，以下，その流れについて述べる．

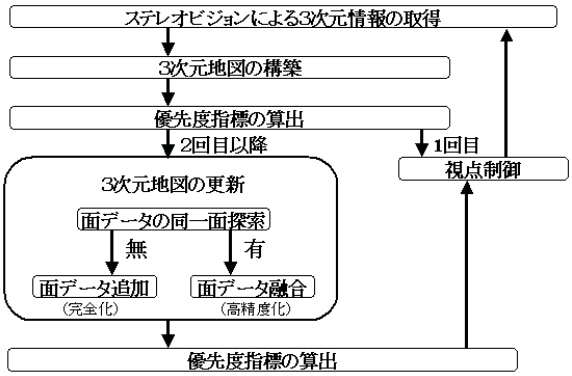


図３．３次元地図更新処理

4．1　データ融合処理手順

まず，適当な視点位置において，ステレオビジョンの手法を用いて 3 次元情報を取得し，初期の 3 次元地図を構築する．この際，取得された 3 次元情報は色領域ごとに分割されており，隣接する面と頂点を共有していない場合がある．したがって，頂点間距離がしきい値以内である頂点を融合する．また，従来までは著しく精度の低い頂点なども無条件に追加していたが，本手法では同一面を構成する頂点内で存在領域が他と比較して著しく大きい頂点については，誤対応によって生じた頂点であると判断し，削除している．

つぎに，初期の 3 次元地図に対する各面の優先度指標を算出し，その優先度指標に基づいて，再取得するための優先順位を各面について決定し，優先順位の高い面を見込むように視点制御を行う．この視点から再度ステレオ視を行って 3 次元情報を取得し，次節で述べるような処理を行って取得済みの 3 次元地図と融合する．このような処理を繰り返すことで, 3 次元地図の高精度化と完全化を行う．

4．2　面データの融合

再度ステレオ視により取得した 3 次元地図と，すでに取得済みの 3 次元地図から，下記の 3 つの条件を満たす面を同一面として抽出する．

・同一色であること
・同一平面上にあること
・少なくとも１つ辺を共有すること

また，これらを満たさず，未取得面と判断された場合には新規に追加する．

以下に，抽出された同一面を融合する手順を示す．

１．2 つの面データから，頂点・色データを融合する．頂点融合は，存在領域に共通部分があり，頂点間距離がしきい値以下であれば同一頂点として図４に示すように融合する．また，このような同一頂点が存在しない場合，新規頂点として追加する．色データは単純に平均を取って更新する．

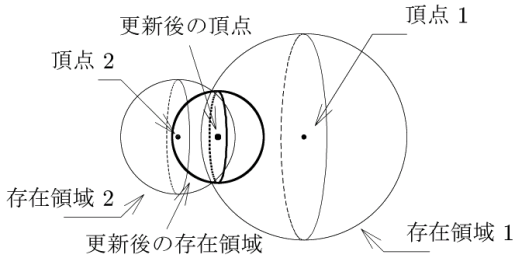


図４．頂点融合

２. それぞれの面を構成する頂点群から得られる全ての 3 点の組み合わせで，平面方程式を算出し、その結果得られる全ての係数の組を求める．

３．得られた平面方程式の係数の集合に対して，階層的クラスタリングを行い，同一平面上に存在すると判断される各平面を統合する．

４．得られた全てのクラスタについて，クラスタをなす頂点を画像平面上に射影し，既に取得済みの頂点データと一致した場合，その頂点を更新後の面データを構成する頂点データとして採用する．

以上の処理を，３次元地図を取得するごとに繰り返し行う．

5．実験

7 自由度ロボットマニピュレータの先端に CCD カメラを固定し，精度の高い視点制御を行い，3 次元情報を取得する（図５）．ただし，ロボットマニピュレータの可動範囲を考慮した視点制御がまだ実現されていないため，ステレオ視を行う視点位置は手動により決定している．

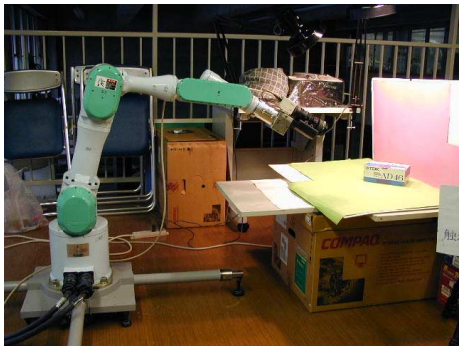
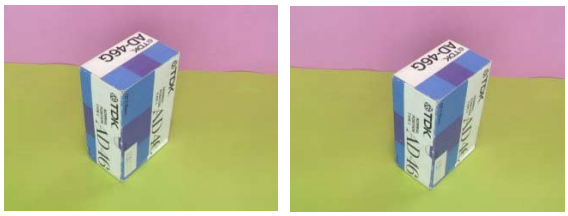


図５．実験環境

まず，適当な視点から物体を撮影した１回目のステレオ画像を図６に示す．これらから，ステレオビジョンの手法を用いて構築した初期の３次元地図を図７に示す．



(a) 左画像　　(b)右画像

図６．初期のステレオ画像

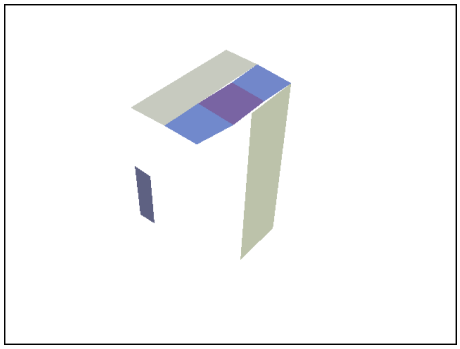


図７．初期の３次元地図

この初期の 3 次元地図の各面に対して優先度指標を算出した結果を表 1 に示す．これより，第 1 面が最も優先度指標が高いことから再取得面と決定される．したがって，第 1 面を見込むように視点制御を行い，再びステレオ画像を取得し（図９），ステレオビジョンの手法により 3 次元地図を構築する（図 10）．

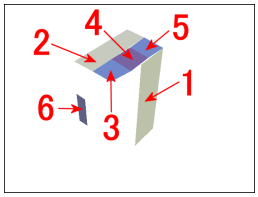


図 8．面番号

表１．初期の優先度指標

面番号	優先度指標
第１面	0.42
第２面	0.22
第３面	0.25
第４面	0.20
第５面	0.18
第６面	0.16

(a) 左画像　　(b)右画像

図９．再取得したステレオ画像

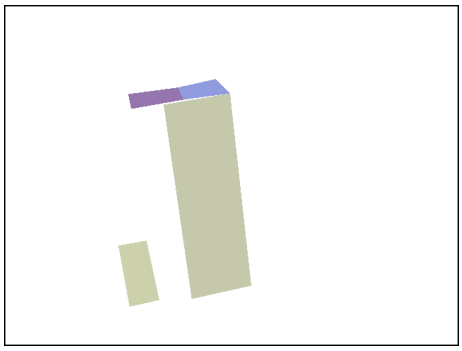


図 10．再取得した３次元地図

このようにして再取得された 3 次元地図と，初期に得られた 3 次元地図を融合し，融合後の３次元地図においてもさらに同様の更新を繰り返すことで得られた最終的な融合後の 3 次元地図を図 11 に，また，その３次元地図上で別視点から見込んで合成した仮想画像を図 12 に示す．

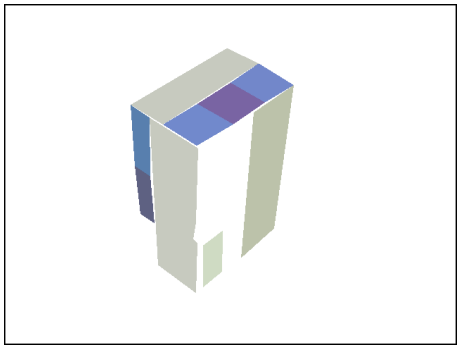


図 11．融合後の３次元地図

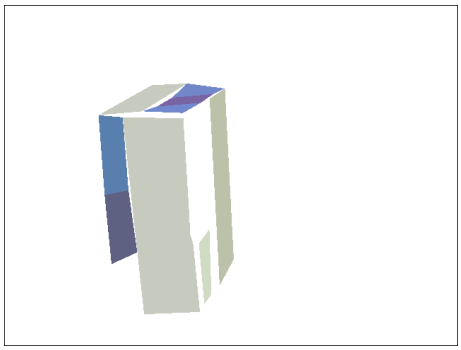


図 12．融合後の３次元地図上で合成した仮想画像

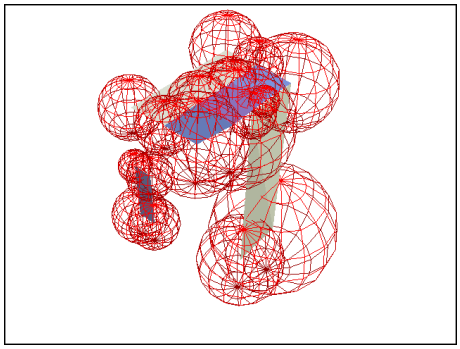


図 13. 頂点の存在領域（初期）

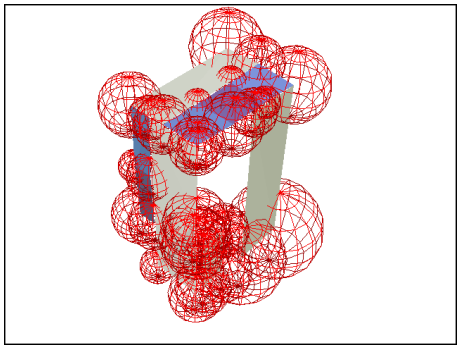


図 14. 頂点の存在領域（融合後）

図 11 より，初期の３次元地図上には存在しなかった面が，融合後の３次元地図ではいくつか追加されている．このように，本手法により，シーンの 3 次元構造を完全化していくことができる．

また，初期の３次元地図と，融合後の３次元地図を構成する頂点の存在領域を図 13，14 に示す．これらの図から，初期の 3 次元地図と融合後の 3 次元地図との精度を比較すると，初期の 3 次元地図に比べて融合後の 3 次元地図では，頂点の存在領域が収縮しているのがわかる．このように，本手法を適用することにより，3 次元構造を高精度に復元できる．

5．おわりに

本論文で提案した手法を用いれば，ステレオビジョンによって得られた 3 次元地図の誤差の大きい面と，隠ぺいなどにより不完全な面を，特徴点の誤差や差分画像に残った画素数などから定義される指標を用いて, 3 次元地図を構成する面に対して，総合的に評価することができる優先度指標を定義できる．

また，この優先度指標に基づいて視点制御し，再取得した 3 次元地図を，取得済みの 3 次元地図と融合することで, 3 次元地図を高精度化および完全化することができることも示した．

今後の課題として，ステレオ視を行う回数を最小にするような効率の良い融合手法を開発していきたいと考えている．また，ロボットマニピュレータの可動範囲を考慮した視点制御を行えるように改善したい．

参考文献

[1] 若月忍，工藤弘義，岩月正見，“ 色領域の総合的な優先度指標に基づくアクティブビジョン ”，第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集(RSJ'98)，vol.3 1481-1482, Sep 1998.

[2] 鈴木浩二，秋元崇，大石友明，岩月正見，“ 階層的な領域分割によるステレオビジョン ”，電子情報通信学会技術研究報告(PRMU99), vol.99 No.448 pp.145-150, Nov 1999.

[3] 工藤弘義，宮澤正明，岩月正見，``3DCG 指向型ロボットビジョンのための出現物体追跡手法の比較と処理の並列化”，画像の認識・理解シンポジウム(MIRU'98), pp.485-490, 1998.

[4] 石井繁夫，“ 続・C 言語による 3D グラフィックス入門 ”，技術評論社，1991.

[5] 谷口健男, "FEM のための要素自動分割 ---デローニー三角分割法の利用---"，森北出版, 1992.

キーワード.

ステレオビジョン、アクティブビジョン、３次元地図、優先度指標

Summary.

High Accurate and Complete 3D Reconstruction based on Active Vision

Tomoaki Ohishi　Miyuki Katsumata
Division of Engineering, Graduate School, Hosei University

Masami Iwatsuki
Faculty of Engineering, Hosei University

We proposed a new stereo vision method that can reconstruct 3D structures robustly by matching left and right images based on regions given by color segmentation. However, the acquired 3D map inevitably contains lacking or error parts caused by occlusion and noise. Therefore, this paper proposes an approach to detect and modify the error and lacking parts by fusing multiple 3D maps acquired by the active vision.

Keywords.

Stereo Vision, Active Vision, 3D Map, Priority index