

3D-CG 指向型ステレオビジョン

— 色領域に着目したステレオビジョンとカラー3次元地図の合成 —

江畑 昌紀, 古橋 裕崇, 大原 真, 岩月 正見

iwatsuki@ice.ee.hosei.ac.jp

法政大学工学部電気電子工学科

〒184 東京都小金井市梶野町 3-7-2

われわれは3次元コンピュータグラフィックスとロボットビジョンの手法を融合することにより、ロボットが持つべき視覚全体の処理を整合性良く統一的に扱うことのできるシステムを構築することを目指しており、その手法を”3D-CG 指向型ロボットビジョン”と呼んでいる。本稿では、これを実現するための第1段階となる”3D-CG 指向型ステレオビジョン”と呼ぶ新しい手法を提案する。

本手法は、ステレオ画像中の色領域の特徴点に着目することにより、隠ぺい部分の補間を可能にしている。領域分割の手法を用いてステレオ画像を左右同時に色領域に分割し、そのエッジの特徴点どうしを照合することにより領域の正確な対応付けが可能になる。さらに、対応領域のエッジの曲率を一致させたり、視差のステップ状の変化を検出することにより、隠ぺい部分を補間することができる。これにより得られた3次元地図を用いれば、3D-CGの手法により任意の視点から観測される仮想画像を合成することが可能となる。

3D-CG Oriented Stereo Vision

— Color Region Based Stereo Vision and Synthesis of Color 3-D map —

Masanori Ebata, Hirotaka Furuhashi, Makoto Ohara and Masami Iwatsuki

iwatsuki@ice.ee.hosei.ac.jp

Department of Electronics and Electrical Engineering,

Faculty of Engineering, Hosei University

3-7-2 Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo 184, Japan.

We aim to construct a new vision system for autonomous robot called ”3D-CG oriented robot vision”, which can unify the vision tasks properly by fusing 3D computer graphics and robot vision methods. This paper presents a new method called ”3D-CG oriented stereo vision” as the first approach for 3D-CG oriented robot vision. This approach can interpolate occlusions by using the features of color regions in stereo image. Corresponding regions can be correctly acquired by matching the edge features of color regions in left and right images partitioned simultaneously by a segmentation method. Furthermore, occlusions can be interpolated by adjusting the curvatures of corresponding regions in stereo images or detecting the step changes of disparity. Using the obtained 3D map, we can synthesize virtual image observed from any view-point by 3D-CG method.

1 はじめに

従来のロボットビジョン研究においては、距離情報の取得、3次元地図の構築、障害物の認識、移動物体の追跡などの研究がそれぞれ独立に行われていたため、個々の処理間の整合性がなく、ビジョンに関わる処理全体を統一的に扱う視点がなかった。しかも、それぞれの手法は限定された環境でしか適切に機能しないため、人間のような高度な認識を行うためには環境に応じて適合する処理を選択しなければならず柔軟性に欠けている。これに対処するため、われわれは3次元コンピュータグラフィックスとロボットビジョンの手法を融合することにより、ロボットが持つべき視覚全体の処理を整合性良く統一的に扱うことのできるシステムを構築することを目指しており、その手法を“3D-CG 指向型ロボットビジョン”と呼んでいる。この手法は以下のような大きく3つの柱に分類できる。

1. 3D-CG 指向型ステレオビジョン

3D-CG の手法に適合したステレオビジョンにより物体の色情報と距離情報を同時に取得し、カラー3次元地図を構築する。

2. 3D-CG 指向型アクティブビジョン [1]

得られた3次元地図から、視点移動に伴う仮想画像を3D-CG の手法により合成し、この仮想画像と実画像とを比較することで3次元地図を高精度化する。

3. 3D-CG 指向型ロボットビジョン [2]

得られた高精度なカラー3次元地図から合成された仮想画像とカメラから取り込まれた実画像との差分をとるという単純な処理を行うだけで、カメラ自身が移動している環境でも障害物や移動物体を完全に抽出する。

本稿では、これを実現するための第1段階となる“3D-CG 指向型ステレオビジョン”と呼ぶ新しい手法を提案する。

本手法は、ステレオ画像中の色領域の特徴点に着目することにより、隠れ部分の補間を可能にしている。領域分割の手法を用いてステレオ画像を左右同時に色領域に分割し、そのエッジの特徴点どうしを照合することにより領域の正確な対応付けが可能になる。さらに、対応領域のエッジの曲率を一致させたり、視差のステップ状の変化を検出することにより、隠れ部分

を修正することができる。これにより得られた3次元地図を用いれば、3D-CG の手法により任意の視点から観測される仮想画像を合成することが可能となる。

2 本手法の特徴と処理の手順

本手法の特徴として次の点が挙げられる。

- 大規模な装置を必要とせず、コンピュータとステレオカメラという最小構成の環境でカラー3次元地図を作成できる。
- 左右2枚の画像を同時に領域分割することで、2台のカメラ間の特性や撮像のタイミングの違いを吸収することができる。また、これにより対応領域が同一色となるので照合が容易になり、誤対応の可能性が軽減される。
- 左右画像間の領域の形状を比較することにより隠れ部分の補間を行うので、領域全体に比して隠れ部分が小さければ、隠れ領域に対する距離情報を求めることができる。
- 領域境界の視差曲線のステップ状の変化を検出することにより、隠れによって誤った視差を修正できる。
- 色領域をポリゴンの集合とみなし、3D-CG の手法を用いて任意の視点から観測される仮想画像を作成することができる。

また、本手法では以下のような手順に従って処理を行う。

まず、2台のCCDカメラによりカラーステレオ画像を取得する。これらの画像に色空間変換を施した後、非階層的クラスタリングと呼ばれる領域分割の手法を用いて左右画像を同時に色領域ごとに分割し、ラベリングにより連結成分ごとに分離する。ただし、色領域の分割の結果は前処理である領域分割の手法によって大きく異なるため、最終的に得られる3次元地図に対して大きな影響を及ぼす。したがって、本手法ではどのような領域分割法を用いるかがきわめて重要になる。

つぎに、同一色領域に対して輪郭の抽出を行い、得られた輪郭の特徴点と総曲率を単純分解 [3] を用いて求める。ここで、左画像を参照画像、右画像を照合画像として、それぞれの画像中に含まれる色領域を、参

照領域および照合領域と呼ぶことにする。参照領域に対して複数の同一色領域が存在する場合は、参照領域の特徴点に対応したエピソード線上に、照合領域の特徴点か何点存在するかを調べることで対応領域を決定する。

ステレオ画像中の対応領域の一方のみに隠れが生じる場合 (Case 1)、領域の輪郭形状に差異が現れるので、対応領域間でその輪郭の総曲率曲線の差分をとることにより隠れ部分を検出し、差が大きな部分については曲率が同じになるように修正を施す。

また、対応領域の両方ともに隠れが生じる場合 (Case 2)、領域の輪郭形状には差異が現れないが、隠れによって手前の物体の視差が生じるのでその視差曲線にステップ上の変化を検出することができる。したがって、視差曲線が滑らかになるように修正して隠れによる誤りを軽減する。

最後に、色領域を三角形ポリゴンに分割し、CGの手法を用いてカラー3次元地図を作成する。

3 領域分割

前章で述べたように、本手法では色領域の分割結果が、最終的に得られる3次元地図に対して大きな影響を及ぼす。そこで本章では、前処理として重要な領域分割の手法について説明する。

3.1 領域分割の処理手順

領域分割の全体的な流れを図1のフローチャートに示した。図1に示すように、領域分割は大きく分けて3つのstepに分かれ、以下、順を追ってその概略を説明する。

3.1.1 色空間変換 (step 1)

クラスタリングによって得られる色領域は、データを与えている変数にのみ基づいて形成されるので、使われた特定の変数の選択にかなり敏感に反応する。

コンピュータ上のカラー画像フレームメモリで一般に使われるRGB系では、3つの刺激値が各々光の強さの成分を含み、互いに強い相関を持っている。また、RGB系は知覚色の均等性において必ずしも人間の直感と一致しない。したがって、RGB系に基づくクラスタリングは、人間の知覚によって判断された色領域の

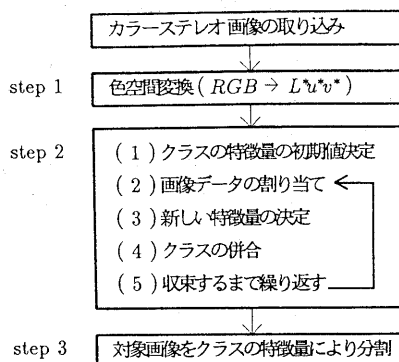


図1 領域分割の流れ

分割と異り、最終的に得られるカラー3次元地図が想像されるものとは大きく異なる可能性が高い。とくに、同一色とみなせる1つの領域が微妙な差異によって分割されてしまい、あいまいな部分を含む輪郭の視差を求めることになってしまうため、誤った奥行き情報を得る可能性が高くなる。そこで、この点を改善するために、人間の感覚に近い表色系である $L^*u^*v^*$ 系を採用し、CCDカメラから取り込まれた画像は、まずRGB系から $L^*u^*v^*$ 系に色空間を変換する [4] [5]。

3.1.2 クラスタリング (step 2)

クラスタリングには非階層的クラスタリングと階層的クラスタリングがあるが、本手法では、距離の選択に依存しない非階層的クラスタリングを用いている [6]。非階層的クラスタリングはまずクラスターの初期値を設定しなければならないが、得られる最終結果はほとんど初期値に依存しないことが知られている。また、この処理には繰り返しが多く非常に時間がかかるため、 512×480 画素の原画像を $1/16$ の 128×120 画素に縮小した画像を用いてクラスデータを取得する。これにより得られたクラスを用いて 512×480 画素の原画像の領域分割を行っている。ここで、縮小の際に近傍16画素の平均値を用いてしまうと、領域の境界部分が中間色となり、新たな色領域が現れてしまうので、近傍16画素のうちで平均値に最も近い色を採用している。これにより、画像を縮小することによる結果への影響はほとんどない。

クラスタリング処理の概略を以下に示す。

- (1) クラスの初期値を決定する。このアルゴリズムでは、この初期値の数以上の領域には分割され得ないので、少し多めに設定しておく方がよい。初期値の選択の仕方が、最終結果に及ぼす影響はほとんどないため、ここでは $L^*u^*v^*$ 空間を均等に分割して初期値を選んでいる。
- (2) 各クラスの特徴量と画像データとのユークリッド距離、すなわち色差を比較して、最も近いクラスに画素を割り当てる。
- (3) 各クラス内の平均値を計算し、それを新しいクラスの特徴量とする。
- (4) クラス間の距離が、あるしきい値以下の場合はクラスを併合して新しいクラスの特徴量を計算する。併合の後、各クラスのクラス間距離の $1/2$ を信頼区間として算出する。
- (5) クラス間の移動のない安定状態に収束するまで、(2)~(4) の処理を繰り返す。

3.1.3 対象画像の分割 (step 3)

対象画像の画素と step 2 で求めたクラスの特徴量との距離を比較し、step 2 で決めた信頼区間未満の場合そのクラスに画素を登録し、その後の比較は行わない。それ以外の場合は最も距離の近いものをその画素のクラスとする。

3.2 領域分割結果

図 2 の原画像に対して、 RGB 空間と $L^*u^*v^*$ 空間による領域分割を行った結果をそれぞれ図 3 と 4 に示す。この図からわかるように、 RGB 空間を用いた場合、人間が 1 つの色領域として認識している領域を 2 つ以上に分割してしまっているが、 $L^*u^*v^*$ 空間を用いた場合は、人間の感覚に一致していることがわかる。

4 領域照合の原理

連結成分ごとに領域分割された画像において、照合領域の候補としてエピソード条件を満たす同一色領域を検出する。それらの色領域の境界線について単純分解 [3] を施し、その曲率と総曲率から特徴点である頂

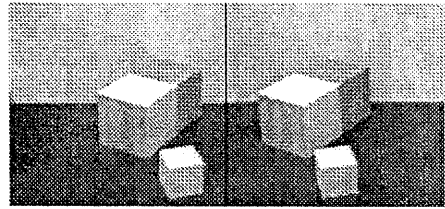


図 2 原画像

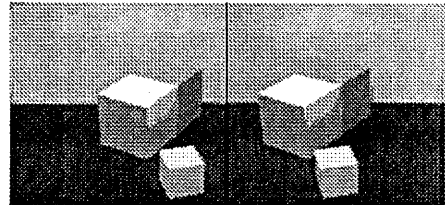


図 3 RGB 空間による領域分割結果

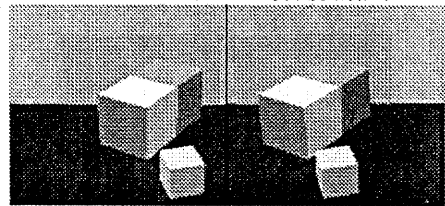


図 4 $L^*u^*v^*$ 空間による領域分割結果

点を検出する。そして共通のエピソード線上に存在する特徴点の数を比較して照合領域を決定する。

4.1 領域の分類

まず、ここでは色領域の場合分けについて説明する。一対の対応領域はまったく隠ぺいのない場合と隠ぺいのある場合に分けられる。さらに隠ぺい部分が存在する場合は、つぎのように 2 つの場合に分類される。

Case 1 : 一方の領域だけに隠ぺい部分がある場合

Case 2 : どちらの領域にも隠ぺい部分がある場合

Case 1 の場合、エピソード条件を満たす特徴点間の総曲率曲線はほぼ一致しているが、そうでない特徴点間の曲率は大きく異なっている。また、Case 2 の場合は境界線上の対応点の視差を求めるとステップ状に大きく変化する部分が見い出せる。

このような特徴をもとに隠ぺい部分の処理を行う。

4.2 隠ぺいのない領域

図4に示した領域分割画像において隠ぺいのない領域の例を図5(a)に示す。ここで、左右のカメラの視点の違いによって、同一形状であっても総曲率曲線は対応領域間で一致しない。そこで、照合領域の特徴点間における輪郭曲線の長さを、参照領域のそれと一致するように総曲率曲線を正規化している。また、エッジポラ拘束により各特徴点間の輪郭上の対応点を決定する。図5(a)において点の打ってあるところが、互いにエッジポラ線上に存在する対応特徴点对である。

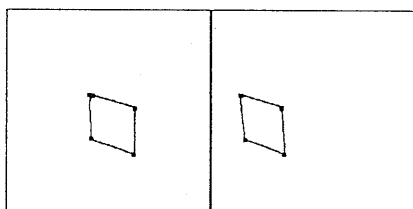


図5(a) 隠ぺいのない色領域

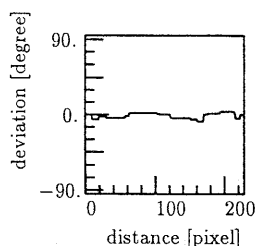


図5(c) 総曲率曲線の差分

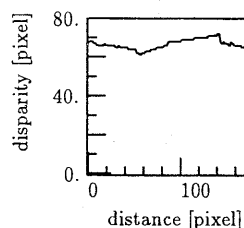


図5(d) 視差曲線

4.2.1 隠ぺいのない場合の総曲率曲線

領域に隠ぺいがない場合は総曲率曲線の差分からも左右の領域のそれに大きな違いがないことがわかる。このような場合、Case 1による隠ぺいはないものとして修正は行わない。

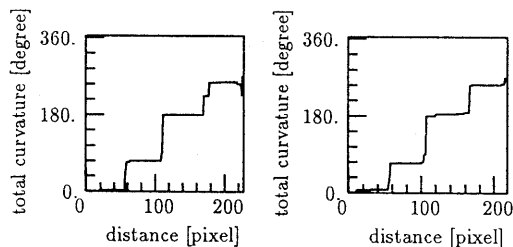


図5(b) 総曲率曲線

4.2.2 隠ぺいのない場合の視差

視差曲線を見るとステップ状に大きく変化している部分は見られない。この場合誤対応はないものとしてとくに修正は行わない。

4.3 隠ぺいのある領域 (Case 1)

図4に示した領域分割画像において隠ぺいのある領域 (Case 1) を図6(a)に示す。これを見ると、隠ぺい部分の形状が異なることが明らかである。

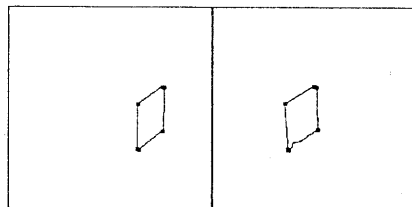


図6(a) 隠ぺいのある色領域 (Case 1)

4.3.1 Case 1 の総曲率曲線

Case 1の場合、すべてがエッジポラ条件を満たす特徴点間の総曲率曲線はほぼ一致しているが、そうでない特徴点間の総曲率曲線は左右で大きく異なっている。長さを正規化した総曲率曲線の差分のグラフに、正弦波形状の歪みが存在すればその部分を隠ぺいとみなして修正を施す。

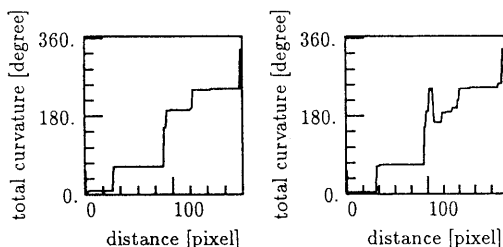


図 6(b) 総曲率曲線

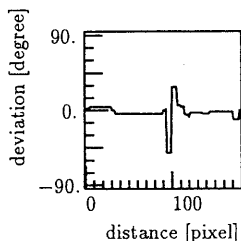


図 6(c) 総曲率曲線の差分

左右どちらの領域に隠れが存在しているかによって、その正弦波形状の部分の符号が異なることから、どちらの領域に隠れを生じているのかわかる。Case 1 の場合、隠れを含まない領域からは領域の形状が完全にわかっているので隠れのない領域の総曲率に合うように隠れ部分の境界を修正する。

4.3.2 Case 1 の視差

Case 1 の場合は隠れのない場合と同様に視差のグラフにステップ状の大きな変化は見られない。したがって視差修正の必要はない。

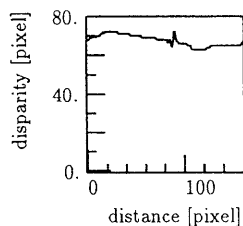


図 6(d) 視差曲線

4.4 隠れのある領域 (Case 2)

図 4 に示した領域分割画像において隠れのある領域 (Case 2) を図 7(a) に示す。この場合領域の形状は左右ではほぼ同じであるが、隠れ部分は手前の物体の視差が現れるのでこの誤りを修正する必要がある。

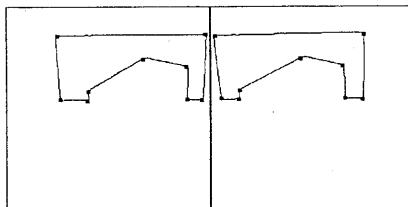


図 7(a) 隠れのある色領域 (Case 2)

4.4.1 Case 2 の総曲率曲線

Case 2 の場合は境界上のすべての特徴点対がエッジポラ条件を満たし、左右の領域の総曲率曲線に大きな違いは見られない。したがって差分のグラフに正弦波形状の差異も現れないので、隠れのない場合と同様に境界曲線の修正は行わない。

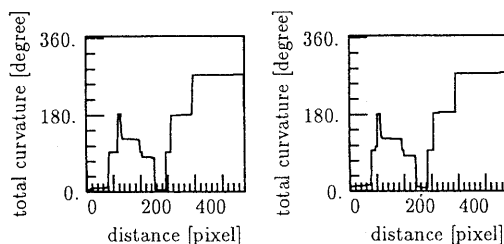


図 7(b) 総曲率曲線

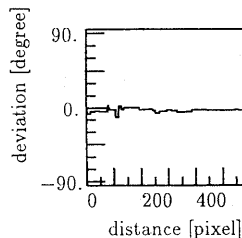


図 7(c) 総曲率曲線の差分

4.4.2 Case 2 の視差

境界線上の対応点の視差曲線を見ると、そのグラフにステップ状に大きく変化する部分が現れていることがわかる。このような部分は隠ぺいを生じさせている手前の物体の領域境界が現れていることからその面に引きずられて視差が大きくなっているため、このような部分は視差曲線が滑らかになるように視差を修正して誤対応を軽減させる。また、このような修正を行った場合その特徴点が隠ぺいによって生じたものであることがわかる。

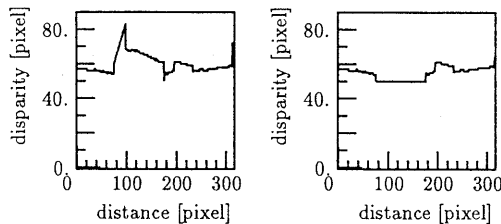


図 7(d) 修正前および修正後の視差曲線

5 3次元地図による仮想画像の合成

前章で述べた手法を用いれば、色領域の境界上のほとんどすべて点の視差を得ることができる。ここでは簡単のため、シーンに現れる物体の輪郭は直線のみ表現できると仮定して、カラー3次元地図の合成を行い、仮想画像を生成できることを示す。このような仮定を設けた場合領域の輪郭上の特徴点、すなわち曲率変化の大きな頂点のみに着目して領域をポリゴンに分割することによって、3D-CGの手法を用いて容易に仮想画像を生成することができる。

三角形の頂点は必ず一平面上に存在しているので、領域の特徴点の集合から領域全体を埋め尽くすように三角形を分割できれば、3D-CGで最もよく用いられる三角形ポリゴンから仮想画像を生成できる。ここでは、この分割の方法について述べる。

5.1 分割のための条件

お互いが交差することなしに、領域全体を完全に埋め尽くすように三角形ポリゴンに分割するためには、要素となる三角形が以下の2つの条件を満たさなければならない。

- 1) 三角形が領域内部に存在する。
- 2) 三角形内にその他の頂点が存在しない。

条件1)については以下のように判別できる。まず、反時計回りで順序づけされた領域の頂点列から、順に3点 v_1, v_2, v_3 を選び出して三角形を決める。つぎに、 v_1 から v_2 へ方向ベクトル V_{12} が第何象限を向いているかを調べる。また、 V_{12} を通る直線 αV_{12} を $y = ax$ 、点 v_2 の座標を (x_2, y_2) として、 $y_2 - ax_2$ が正、負あるいは0であるかを調べる。この結果、 V_{01} が第1, 4象限を向き、かつ $y_2 - ax_2$ が正であるとき、あるいは第2, 3象限を向き、かつ負であるとき、条件1)を満たす。これにより、条件1)を判別できる。

条件2)については、以下のように判別できる。まず、領域の頂点列から、選び出された三角形の頂点を除く点 v_m を1点選び出す。 (v_i, v_j, v_k) からなる三角形 Δ_{ijk} の面積を S_{ijk} とすると、 $S_{123} \neq S_{12m} + S_{23m} + S_{13m}$ のとき、 v_m は三角形内に存在しない。したがって、すべての頂点に対してこの条件を満たすかどうかを調べることによって、条件2)を判別できる。

5.2 処理の手順

前節で述べた分割の条件を用いて、以下のような処理手順にしたがうことにより、交差することなしに領域を三角形に分割できる。

- (1) 領域の頂点列から順に3点を選び出し、仮の三角形を作る。
- (2) 条件1)と2)をともに満たせば、三角形ポリゴンの要素として選択した3点を採用する。満たさなければ、この三角形の第2, 第3番目の頂点を新たな三角形の第1, 第2番目の頂点として選択し直し、領域上のまだ採用されていない頂点列から第3番目の頂点を選び出し、(2)を繰り返す。
- (3) 採用された三角形の頂点列から第2番目の点を除き、まだ採用されていない頂点列が2点以下であれば処理を終了する。
- (4) 採用された三角形の頂点列から第1, 第3番目を改めて第1, 第2番目の頂点とし、まだ採用されていない頂点列から第3番目の頂点を選び出し、新たな三角形を作り、(2)へ戻る。

図7(a)において直方体の背後にある壁の部分にあたる領域を本手法を用いて三角形ポリゴンに分割した

結果を図8に示す。この図からわかるように、領域全体が交差することなく三角形ポリゴンに分割されていることがわかる。しかしながら、図に示されるように、鋭角をもつ細い三角形が生じてしまう場合があることがわかる。この点については、前処理としてDelaunay三角形自動要素分割[7]を行い、内点をラプラス方程式あるいは重調和方程式を用いて補間することで正三角形に近い分割が可能になると考えている。この手法を用いれば、一般的な曲面で表現される領域も三角形ポリゴンで近似することができると期待される。このような拡張については今後の課題としたい。

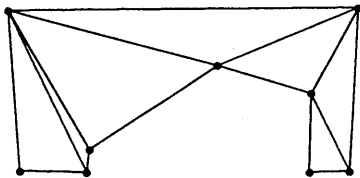


図8 三角形分割結果

6 実験結果

図2の原画像から本手法を用いてカラー3次元地図を作成し、ステレオ視を行った2つのカメラの視点とは異なる視点から見たとして推定した仮想画像を図9に示す。図9からわかるように、Case 2にあたる直方体による背後の壁の隠ぺいが修正され、壁の面とその手前の直方体がうまく分離されていることがわかる。また、Case 1に当たる一番手前の立方体による直方体の隠ぺいも修正されている。

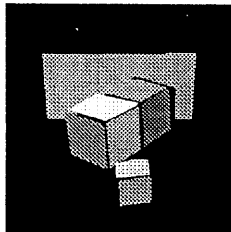


図9 仮想画像

7 おわりに

カラーステレオ画像を同時に領域分割した色領域の特徴量を照合し、隠ぺい部分に対する処理を可能とするテレオマッチングの手法を提案した。Case 1を処理した後にCase 2の処理を行うことで、Case 1と2が同時に1つの領域に生じている場合にも対処することが可能である。また、本手法によって得られるカラー3次元地図から合成した仮想画像は、1つの色領域が三角形ポリゴンの集合として表示される。したがってCGの手法を用いて視点移動を行った場合の仮想画像を容易に作成することができるという特徴を持っている。さらに、本手法と3D-CG指向型アクティブビジョンを融合させることにより、高精度なカラー3次元地図を作成することができる。

参考文献

- [1] 池田, 有田, 岩月, “3D-CG 指向型アクティブビジョン— 仮想画像と実画像の比較による3次元地図の高精度化 —,” 信学技報, PRU95, (1995)(本研究会にて発表予定).
- [2] 井上, 斉藤, 岩月, “3D-CG 指向型ロボットビジョン— 仮想画像と実画像の比較による出現物体の抽出と追跡 —,” 信学技報, PRU95, (1995)(本研究会にて発表予定).
- [3] Arie Pikaz and Its'hak Distin, “Using Simple Decomposition for Smoothing and Feature Point Detection of Noisy Digital Curves,” *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 16, No. 8, pp. 808/813, (1994).
- [4] 日本色彩学会編, “色彩科学ハンドブック,” 東大出版会, pp. 137/141, (1980).
- [5] Toshio Uchiyama and Michael A. Arbib, “Color Image Segmentation Using Competitive Learning,” *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 16, No. 12, pp. 1197/1206, (1994).
- [6] 田村, “コンピュータ画像処理入門,” 総研出版, pp. 153/160, (1984).
- [7] O. Faugeras, “Three-Dimensional Computer Vision A Geometric Viewpoint,” *MIT Press*, (1993).