

領域分割に基づくステレオビジョンにおける復元精度の向上

秋元 崇 齋藤 宏尚 浜野 洋二
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

著者らは、色領域分割から得られた領域に基づいて左右画像の照合をとることにより、画像間に幾何学的歪みやオクルージョンなどが生じている場合でもロバストな対応付けが可能であるだけでなく、密な視差マップを取得できるステレオビジョンの手法を提案した。この手法では、ステレオ画像の領域分割結果の領域輪郭から特徴点を探索し、同一色領域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と3次元構造の復元が可能になる。しかしながら、特徴点位置はピクセル精度のため、エッジ拘束による完全な対応付けを行うことがむずかしく、3次元構造の復元精度もピクセル単位となる。そこで本論文では、最尤推定法を用いて領域輪郭のコーナーのモデリングから特徴点を決定することにより位置誤差の大幅な軽減を図り、高精度に3次元構造を復元する手法を提案する。

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おり、それらの手法を大別すると、以下のよう

- area-based matching
- feature-based matching

area-based matching による手法では、注目点に対する近傍の局所的なパターンの相関値を用いて対応付けを行うことによって視差を取得しているため、密な視差マップが得られる。しかしながら、異なる視点から撮影されたステレオ画像において、歪みやオクルージョンが生じることが避けられないので、左右画像間のパターンが大きく異なる場合があり、局所的にみてもその対応付けにあいまいな部分が残ってしまう。また、画像中の濃度あるいは色変化が少ない領域でも、相関値を用いている以上、対応付けを正確に行うことができないという問題点もある。一方、feature-based matching による手法を用いた場合、area-based matching のように歪みやオクルージョンによるあいまいさは大幅に軽減されるが、雑音による誤対応の可能性も大きく、抽出された特徴に対してのみ視差が取得できるだけなので、疎な視差マップしか得られないという問題点がある。

そこで、本論文では、色領域分割から得られた領域に基づいて左右画像の照合をとることにより、画像間に幾何学的歪みやオクルージョンなどが生じている場合でもロバストな対応付けが可能であるだけでなく、密な視差マップを取得できる手法を提案する。これまでに提案されている同様の手法として、文献[2]、[3]などがあるが、そこでは、左右画像間の領域の対応付けのみを行っているだけで、面の3次元構造の復元手法やオクルージョンに対する対処などについては言及されていない。

本手法では、領域分割の手法を用いてステレオ画像を同時に色領域に分割し、同一色領域の輪郭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と3次元構造の復元を可能にしている。しかしながら、特徴点位置はピクセル精度のため、エッジ拘束による完全な対応付けを行うことがむずかしく、3次元構造の復元精

度もピクセル単位となる。そこで本論文では、最尤推定法を用いて領域輪郭のコーナーのモデリングから特徴点を決定することにより位置誤差の大幅な軽減を図り、高精度に3次元構造を復元することを可能にしている。

2. 領域分割に基づくステレオビジョン

2.1 色領域分割

まず、CCD カメラから取り込まれたステレオ画像に対する前処理として KNN メディアンフィルタを適用して、微小領域を削除し、ノイズによる影響を軽減している。さらに、RGB 系から人間の視覚特性に近い表色系である $L^*u^*v^*$ 系へと色空間を変換した後、この色空間に対して非階層的クラスタリング[4]を用いてステレオ画像を同時に領域分割する。これにより、2視点での撮像のタイミングのずれによる画像特性の違いを吸収できる。

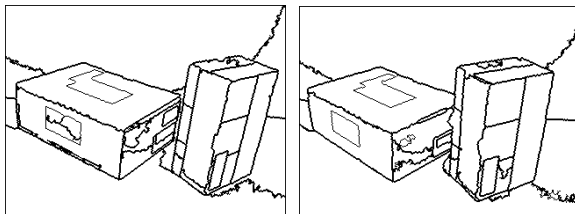
非階層的クラスタリングでは $L^*u^*v^*$ 空間を均等に分割して分割空間の中心を教師クラスとした後、各クラスの特徴量と画素値との色差（ユークリッド距離）を比較して、最も近いクラスに画像を割り当てる。クラス間の距離が、あるしきい値以下の場合、クラスを併合してから新しいクラスの特徴量を計算する。ここで、各クラスを併合する際に用いるしきい値によって処理結果が大きく変わり、過併合、過分割の問題が生じるので、しきい値を段階的に変化させて階層的に色領域分割を行い、各階層ごとのすべての分割結果を保持しておく。最後に、得られた全分割画像に対して、ラベリング処理を行って連結成分ごとに分離する。

図 1(a)の原画像に対して、本手法により色領域分割した結果を図 1(b)~(c)に示す。原画像に対して、併合のしきい値によって色領域分割の結果が大きく変化していることがわかる。

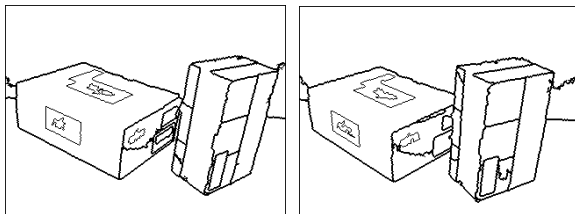
このように、1つのしきい値だけでは過併合、過分割のない領域分割を行うことはきわめて困難であることがわかる。したがって、しきい値を変化させて階層的に領域分割を行い、全階層にまたがって領域の対応付けを行えば、過併合、過分割に起因する誤対応の問題を解決できる。



(a) 実画像



(b) クラス併合のしきい値=8



(c) クラス併合のしきい値=15
図1 色領域分割実行例

2.2 特徴点抽出

本手法では色領域の輪郭の特徴点から領域の3次元情報を取得している。したがって、前節で述べたような領域分割によって得られた色領域の輪郭情報から、領域照合に用いる対応特徴点候補を抽出し、折れ線によって色領域を近似する方法について述べる。

まず、画像中のすべての色領域に対し境界線を検出し、その境界線について離散化誤差によるノイズを低減させる効果があることが知られている単純分解[5]を施す。次に、境界線から総曲率を計算し、曲率変化の大きい点を対応特徴点候補として検出する。さらに、曲率の大きな変化だけでは、円のように緩やかに曲率が変化する形状を復元できないので、総曲率が60度を超えても特徴点が生成されない場合は自動的に曲率変化が一番大きい点に特徴点を追加する。すべてのエッジを走査し終わったら、得られた特徴点群を、折れ線によって色領域を近似する特徴点としてすべて採用する。ただし、画像フレームの縁に領域の境界がかかってしまっている場合は、ステレオマッチングを行うとその部分で誤対応が生じ、不正確な3次元情報を得ることがあるので、このような色領域は除外する。

2.3 対応領域の抽出

任意の2視点から撮影されたステレオ画像のどちらか一方の画像を参照画像、もう一方を照合画像とする。まず、参照画像中の各色領域（以下、参照領域と呼ぶ）に

対して、それらに割り当てられるRGB値の色距離があるしきい値以下の色情報をもつ照合画像中の色領域（以下、照合領域と呼ぶ）を検出する。次に、その中からエッジポラ拘束を満たす特徴点を最も多く有する照合領域を対応領域として選択する。ここで、各領域の特徴点は、その領域の輪郭線に対して反時計方向に回るように順序づけられているので、同一領域上に複数のエッジポラ拘束を満たす特徴点が存在する場合でも、参照領域の特徴点に対して昇順にエッジポラ拘束を満たす特徴点を調べていけば、対応する照合領域の特徴点も必ず昇順に並ぶという事実を用いることにより、誤対応を生じないようにしている。

2.4 平坦性の仮定による隠べいの検出

前節で述べた領域照合を行った結果、対応づけられた色領域に手前の物体などによる隠べいが生じてなければ、対応特徴点から得られた3次元情報を修正する必要はない。また、各色領域の対応特徴点を決定する際、対応領域中のどちらかの領域に生じた隠べいや雑音による領域輪郭上の特徴点はエッジポラ拘束を満たさないもので、このような特徴点は単純に無視して領域の輪郭を構成すればよい。したがって、隠べいの修正ができるだけでなく、雑音によって生じた特徴点による誤対応も軽減することができる。

しかしながら、図2に示される物体の背景のように、ステレオ画像において、参照領域と照合領域ともに隠べいが生じている場合、図3のように、隠べいによって生じた偽の特徴点もエッジポラ拘束を満たしてしまい、正確な3次元構造を復元することができない。したがって、このような隠べいによって生じている偽の特徴点を削除する必要がある。本手法では、人工的な物体の側面は、ほぼ平面であると仮定し、その平面を構成する色領域も平坦であるとして、隠べいによって生じる偽の特徴点を削除する。

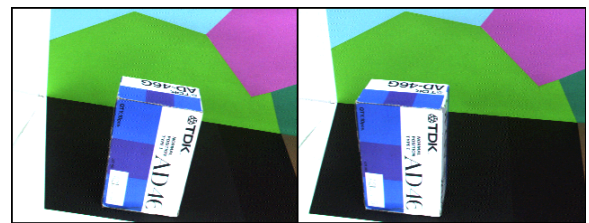


図2 ステレオ画像

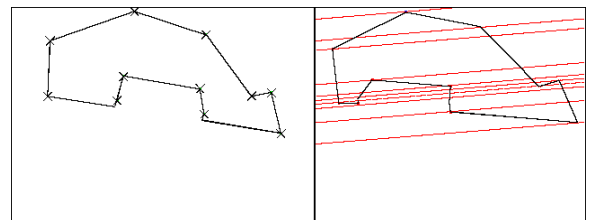


図3 隠べいのある領域輪郭形状

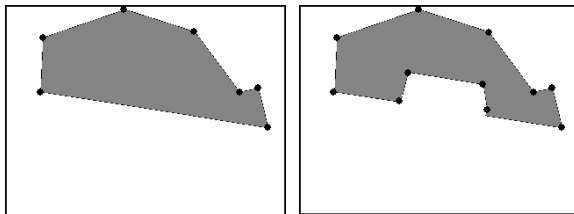
以下にその手順を示す。

- 1) 対応が決定した色領域輪郭上の特徴点群から得ら

れるすべての 3 点の組み合わせから平面方程式 $ax+by+cz=1$ を導出し、その結果得られるすべての係数の組 (a_i, b_i, c_i) , $(i=1, \dots, N)$ を求める。ここで、 N は平面方程式の数である。

- 2) 得られた平面方程式の係数 (a_i, b_i, c_i) 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できる各平面を統合する。
- 3) 得られたすべてのクラスタについて、クラスタをなす特徴点を、参照画像、照合画像それぞれの画像平面へ射影し、クラス分けされた特徴点によって構成される領域の面積を R_A 、元の対応領域を R_B として、次式より、 R_B に対する R_A の包含率 I を求める。その中から最大の包含率をもつクラスタを選び、そのクラスタに含まれる特徴点によって構成される領域を対応領域とする。これにより、手前の物体によって生じた偽の特徴点が平面を構成したとしても、それらは領域の外部に生成されるので、偽の特徴点を削除することができる。ただし、包含率の誤差を $\pm 5\%$ として、その範囲に含まれるクラスタについては、それぞれの平面方程式の係数の分散が小さい方を採用する。また、それらの分散がほぼ等しい場合は、クラスタを構成する特徴点数が多い方を採用する。

$$I_i = \frac{|R_{Ai} \cap R_{Bi}|}{|R_{Bi}|} \quad (i=1, 2) \quad (1)$$



(a) 特徴点数 7 点 (b) 特徴点数 11 点
図 4 クラスタをなす特徴点の画像平面への射影結果例

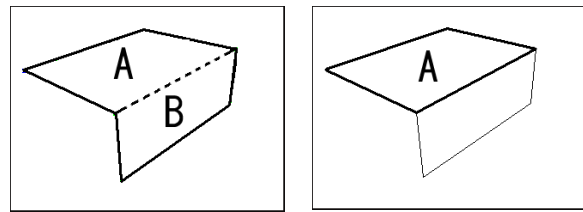
図 3 に示した参照領域、照合領域それぞれに隠べいがある対応領域について、階層的クラスタリングを行い、包含率が最も大きいクラスタをなす特徴点から構成される領域の参照画像面への射影結果を図 4 に示す。図 4 の (a)(b) は、ともに図 3 で示した参照領域全体を含むため、それらの包含率はほぼ等しくなり、 $\pm 5\%$ の誤差範囲に含まれる。しかし、上述の 3) の処理を行うことにより、それぞれの平面方程式の係数の分散が小さい方が採用され、最終的に図 4(a) の結果を得る。これから、隠べいにより生じた特徴点が削除されていることがわかる。

また、大きな併合のしきい値による分割画像から優先的に照合するため、図 5 の (a) のように、左右両画像に同じように過併合が生じて、2 つの平面からなる対応領域が採用されることがある。この場合、先ほどの包含率が最大の領域を採用すると、平面 A が採用され、平面 B は隠べいによる領域と判断され削除されてしまい、対応を取ることができない。そこで、さらに以下の手順を追加して、この問題に対処する。

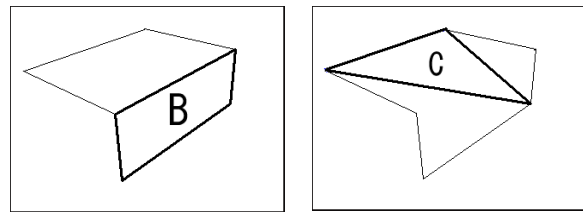
- 1) 隠べい処理を行った際、最終的に得られた最大包

含率があるしきい値以下のとき、1 平面で構成されていない領域と判断し再取得フラグをたてる。

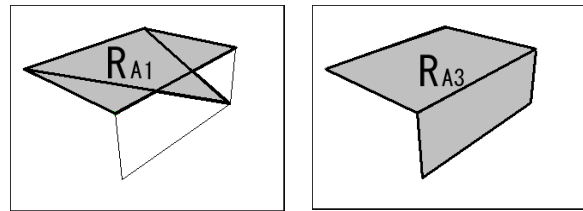
- 2) 再取得フラグがたっている場合、2 つのクラスタのそれぞれの包含率の和が 100% を越えないものを選び、包含率が最大の対から降順で並べる。
- 3) 検出された 2 つの領域の対に共通部分がある可能性があるため、2 つのクラスタを同時に画像面に射影し直し、そのときの包含率があるしきい値以下の場合には共通部分があるので採用せず、次の対の射影結果を求める。
- 4) 3) を繰り返し、2 つのクラスタの射影結果がしきい値を越えた結果が出た場合、その 2 つのクラスタを別平面として採用する。



(a) 原画像 (b) 平面 A の射影結果



(c) 平面 B の射影結果 (d) 平面 C の射影結果



(e) A C の射影結果 (f) A B の射影結果

図 5 同一色隣接領域への対応

図 5 の例では、図 5(b) ~ (c) のように面 A、面 B、面 C が、対応領域を構成する平面としてクラスタリングされたとする。まず、面 A、面 B、面 C それぞれの対応領域に対する包含率を求め、2 つの面のすべて組み合わせに対する包含率の和を計算する。仮に、面 A と面 C の包含率の和が 100% であったとしても、共通領域が存在するため、二つの領域を同時に射影すると、図 5(e) のようになり、この対は不採用となるが、面 A と面 B には共通領域がないため、射影結果は図 5(f) のようになり、この 2 つの平面が採用されることになる。

2.5 領域の内部補間

前節で述べたように、対応領域は平坦性の仮定により

ほぼ平面に分割されるが、その特徴点の 3 次元位置は、完全にその平面上にのっているわけではない。したがって、これらの平面を多角形ポリゴンによって 3 次元構造を復元すると、再現性が悪くなる。そこで本手法では、対応領域内部を面要素に分割し、有限要素法により内部補間を行って、面要素ごとに 3 次元位置を計算している。3DCG の手法で 3 次元曲面を再現する場合、一般的には、この面要素を三角形ポリゴンとして与えることが多く、歪みの少ない曲面を合成するためにはこれらの三角形群をなるべく正三角形に近い形に分割する必要がある。そこで、このような要求に対処するため、本手法では、修正ドロネー三角分割法[6]と呼ばれる手法を用いている。修正ドロネー法により色領域境界の三角形分割を行うことはできるが、ステレオ視によって取得できる奥行き情報は領域境界のみであるため、内部の三角形要素の頂点の奥行き情報を補間する必要がある。そこで、領域境界の奥行き情報を境界条件として、有限要素法を用いて、次式のようなラプラス方程式を満たすように内部を補間する。

$$\frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

ここで、 (x, y) は参照画像上の位置座標であり、 $z(x, y)$ はその位置における奥行き値である。上式は、奥行きの変化率を最小にするように領域内部を補間することを意味している。この結果、得られた三角形ポリゴン群の奥行き情報と領域の色情報を用いることにより、3DCG の手法を用いて任意の視点から見込んだ復元画像を合成できる。

3. 特徴点位置の最尤推定

前章の特徴点抽出および対応領域の抽出処理はピクセル精度で行っているため、3 次元構造の復元精度も低かった。そこで、次節で述べるように、最尤推定法を用いて、領域輪郭のコーナー位置を高精度に求める手法を導入する。

3.1 コーナーモデリング

本手法では、最尤推定法の一つである Levenberg Marquadt 法を用いて、領域輪郭のコーナー位置をサブピクセル精度で推定する[7]。この手法は、図 6 のような 1 つのコーナーモデルを用いてその位置を推定しているため、実画像から局所的に抽出された領域輪郭のコーナー部分のウィンドウ画像もただ 1 つのコーナーをもつ必要がある。しかし実際には、このようなウィンドウ画像に、複数のコーナーが含まれてしまうことがある。そこで本手法ではこのような場合に対しても、文献[7]の手法を適用できるようにするため、次節で述べるように、注目する特徴点を含む領域とそれ以外の領域に分離し、領域輪郭の輝度値変化を考慮して実画像を変換することにより最尤推定を可能にしている。ここで、図 6 において、 (x_0, y_0) は領域の頂点座標、 θ はコーナーの二等分線と画像座標系の x 軸との角、 β は領域のコーナー角、 A, B はコーナー領域とそれ以外の領域の輝度値、 η はガウス関数に従う、エッジのボケ具合である。

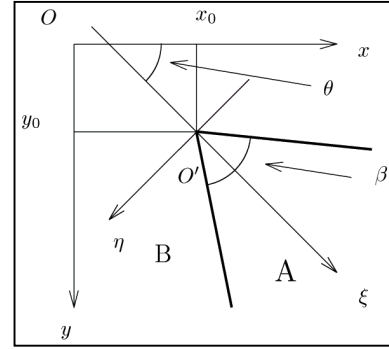


図 6 Corner Model

3.2 最尤推定法

以下のような手順で特徴点位置の最尤推定を行う。

- 1) 注目している特徴点を含む対応領域を構成する他の特徴点を含まないサイズでウィンドウを設定し、ウィンドウ画像を抽出する。ここでは、他の特徴点を含んでしまうとコーナーが 2 つ以上あることになり、最尤推定を適切に行うことができないが、他の対応領域の特徴点は、3) の処理でコーナー領域とそれ以外に分離される。
- 2) 対応付けを行った際に用いた領域分割の色空間や併合のしきい値を用いて、改めてウィンドウ画像の色領域分割を行い、連結成分ごとに分離する。
- 3) 対応領域の領域色とウィンドウ画像の各領域の領域色で色距離を求め、しきい値以内の領域をコーナー領域候補とする。その中から同一サイズで抽出した対応領域と最も重なっている領域をコーナー領域として採用し、それ以外の領域とに分離する。ここで、しきい値は対応領域色の標準偏差の 3 倍とする。また、コーナー領域内にある内部領域もコーナー領域とする。
- 4) コーナー領域の領域輪郭部分の輝度の変化を考慮し、次式を用いて各画素の輝度値を求め、コーナーモデルに適合したグレースケール画像を求める。ここで、 b_i はウィンドウ画像の i 番目の画素の輝度値、 a_i はその画素を含む領域の領域色、 c_i は画素の色、 $D(x)$ は x の輝度値である。また、画像全体で行った領域分割とウィンドウ画像の領域分割では領域輪郭部周辺の画素の領域色が違うため、本手法ではこれら 2 通りの領域分割画像と初期値を与えて最尤推定を行い精度の高い方を採用する。

$$b_i = D(a_i) - D(c_i) + \text{const} \quad (3)$$

$$\text{const} = \begin{cases} 100 \dots \text{コーナー領域} \\ 200 \dots \text{非コーナー領域} \end{cases}$$

- 5) グレースケール画像より初期値を求め、前節で述べた最尤推定法を用いて領域輪郭のコーナー位置を求める。
- 6) ステレオ画像のもう一方の画像についても同様に 1) ~ 5) の処理を行う。
- 7) ステレオ画像のそれぞれで最尤推定された特徴点

位置と最尤推定する前の特徴点位置をエピポーラ線との距離で比較し、小さい方を採用する。最尤推定後の特徴点位置が採用された場合、最尤推定後の特徴点位置を初期値として 1)~6)の処理を繰り返す。

3.3 同一特徴点の融合

対応領域ごとに特徴点の最尤推定を行うため、隣接する対応領域と共有していた特徴点が完全には一致しなくなってしまう。そこで、共有していた特徴点それぞれに対して次式で定義される h を求め、 h が最大となる特徴点をその共有する特徴点とし、他の特徴点を融合する。

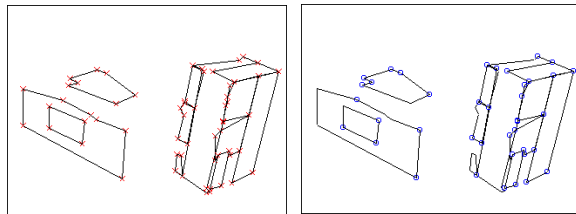
$$h = \left(\frac{a_1}{w_1} + \frac{a_2}{w_2} \right) / d \quad (4)$$

ここで、 a_1 、 a_2 はステレオ画像それぞれの最尤推定を行ったときの対応領域の面積、 w_1 、 w_2 はウィンドウサイズ、 d は特徴点とエピポーラ線との距離である。

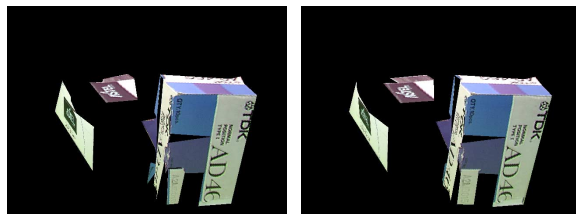
4. 実験結果

本章では、ステレオ画像に対し本手法を適用した結果を示し、その有効性を確認する。7 自由度ロボットマニピュレータの先端にカメラを固定し、精度の高い視点制御を行い 2 枚のステレオ画像とその視点位置座標を取得する。

図 1(a)に示すようなステレオ画像に対し、色領域分割の色空間を $L^*u^*v^*$ 系、併合のしきい値を 15, 8 とし、従来手法と本手法で各色領域の対応を決定した結果を図 7 に、その 3 次元情報を元にテクスチャマッピングにより復元した画像を図 8 に、従来手法と本手法の特徴点とエピポーラ線との距離の平均と分散の比較を表 1 に示す。これらの図と表から、本手法を用いて特徴点位置を高精度化することにより、3 次元構造の復元精度を向上させることができることが分かる。



(a) 従来手法 (b) 本手法
図 7 対応領域決定画像



(a) 従来手法 (b) 本手法
図 8 復元画像

表 1 従来手法と本手法の比較

	平均距離[pixel]	分散[pixel]
従来手法	1.85	1.00
本手法	0.55	0.33

5. あとがき

本論文では、階層的な領域分割によるステレオビジョンにおける特徴点位置を、ピクセル精度からサブピクセル精度へとコーナーのモデリングから最尤推定を行い高精度化することにより、3 次元構造の復元精度を向上させる手法を提案した。今後は、2 つのコーナーからなるようなジャンクションに対しては、ジャンクションモデルを用いて最尤推定を行うことで、より複雑なシーンに対しても、高精度に 3 次元構造を復元できるように拡張してきたい。

参考文献

- [1] 松山隆司,久野義徳,井宮淳,"コンピュータビジョン", 新技術コミュニケーションズ,pp.123-137, (1998).
- [2] Laurent Cohen and Laurent Vient and Peter T. Sander and André Gagalo, "Hierarchical regions Based Stereo Matching", Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego,California,pp.416-421, June 1989.
- [3] S.Randriamasy and A.Gagalowicz, "Region based Stereo Matching Oriented Image Processing", Proceedings 1991 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp736--737, June 1991
- [4] 田村, "コンピュータ画像処理入門", 総研出版, pp.153-160, (1984) .
- [5] Arie Pikaz and Its'hak Distein, "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).
- [6] 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 .
- [7] Thierry Blaszk, Rachid Deriche, "Recovering and Characterizing Image Features Using An Efficient Model Based Approach", INRIA, No.2422, 9/10, (1994).
- [8] 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.

キーワード.

ステレオビジョン、色領域分割、3次元復元、最尤推定法、コーナー検出

.....

Summary.

Improvement in Accuracy of reconstruction on Stereo Vision based on Color Segmentation

Takashi Akimoto Hironao Saito Yoji Hamano
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 accuracy of reconstruction is limited to the pixel resolution on this method because the corner detection is based on a line segmentation for region contours. Therefore, this paper proposes an approach to improve the accuracy of corner positions on contours to the subpixel resolution by using a maximum likelihood method.

Keywords.

stereo vision, color segmentation, 3D reconstruction, maximum likelihood method, corner detection