

一様色領域とテクスチャ領域の分離による3次元形状の復元

佐藤 正太 阿部 伸生
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

一様な色の面ごとに対応領域を探索した従来のステレオビジョンによる手法のみでは、テクスチャのよ
うな色変化の激しい面に対し、3次元形状を復元することは困難であった。そこで本論文では、ステレ
オ画像中のテクスチャ面のみを分離し、一様な色の面には従来のステレオビジョンを適用し、テクス
チャ面には同一テクスチャごとに照合を取ることににより3次元形状を復元する手法を提案する。本手法を
用いることにより、今まで困難であったテクスチャ面と一様な色の面が混在するようなシーンに対しても、
3次元形状の復元を行うことができる。

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、比較的早くから
行われており、それらの手法を大別すると以下の2つに
分類できる。

area-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、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は避
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。

feature-based matching

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。

このような問題に対処するため、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手法を提案し
ている。しかしながら、このような色領域に基づく手法
では、一様な色の面ごとに対応領域を探索していたため
布地などのようなテクスチャパターンをもつ物体の表面
に対しては、分割領域が小さすぎて照合がとれず、誤対
応が生じるという問題点があった。そこで本論文では、
あらかじめ画像中からテクスチャ面と一様な色の面を分
離しておくことにより、それぞれの処理を軽減するとと
もに画像中の特徴にあった手法で3次元形状を復元する
手法を提案する。

本手法では、前処理としてステレオ画像中の一様な色
の面とテクスチャ面を分離し、一様な色の面には従来の
ステレオビジョンを適用し、テクスチャ面には同一テク

スチャパターンごとに相関性とテクスチャの有効性を考
慮して照合領域を拡大していく手法を適用して、3次元
形状を復元するというものである。本手法を用いること
により、今まで困難であったテクスチャ面と一様な色の
面が混在するようなシーンに対しても、3次元形状の復
元を行うことができることを明らかにする。

2. 処理手順

本手法では、取得したステレオ画像に対して一様色領
域とテクスチャ領域を分離し、それぞれの特徴にあった
手法で3次元形状を復元している。そのおおまかな全体
的な流れを以下に示す。

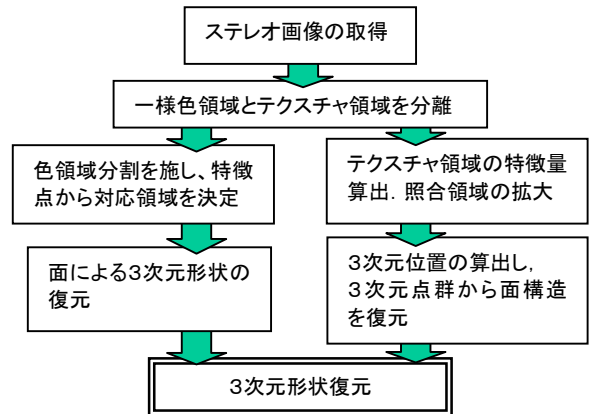


図1 処理手順

3. テクスチャ面の分離

テクスチャ領域と一様色領域それぞれに対してその領
域に適した手法を適用するため、テクスチャ領域と一様
色領域を分離する必要がある。そこで以下のような式を
用いて画素単位によるテクスチャ判別を行う。

$$C_{1n} = \sum_{i=1}^8 |r_n - r_i| > T_1 \quad (1)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^8 |r_i - r_{i+1}|_{\text{mod}(8)} > T_1 \quad (2)$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^8 C_{ii} > T_2 \quad (3)$$

r_1	r_2	r_3
r_8	r_n	r_4
r_7	r_6	r_5

図2 注目画素 r_n の近傍8画素

ここで、 T_1 および T_2 は任意のしきい値である。以下にテクスチャ面抽出の処理手順を簡単に示す。

- Step 1: (1)式により、注目画素 r_n (図2参照)と近傍8画素 $r_1 \sim r_8$ との色差の和が大きい画素をテクスチャ候補として抽出する。
- Step 2: (1)式のみでは一様色領域のエッジも含んでしまうため、(2)式を用いて隣り合う近傍8画素間の色差を計算しエッジ部分を取り除く。
- Step 3: このような局所領域のみの判別ではノイズの影響を受けやすいため、さらに(3)式を用いて隣接画素にテクスチャ候補が多数存在する画素のみを抽出しノイズによる影響を軽減する。
- Step 4: テクスチャ領域に対し収縮や膨張処理を数回行うことでノイズや微小領域の影響を吸収し、領域を滑らかに抽出する。

4. 一様色領域に対する処理

前節で述べたような分離の処理の後、一様な色領域のみに対して、従来のステレオビジョン[1]を適用する。まず、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。

4.1 アルゴリズムの概略

本アルゴリズムでは、その主要目的であるロバストな領域照合と3次元形状復元を行うために前処理と後処理を必要としている。以下にその全体的な流れの概略を示す。

- Step 1: テクスチャ領域分離後のステレオ画像に対してKNNメディアンフィルタをかける。これによりノイズによる微小領域を削除し、影などの影響も軽減できる。
- Step 2: ステレオ画像をRGB表色系から人間の視覚特性に近い $L^*u^*v^*$ 表色系に色空間を変換し、この色空間に対して非階層的クラスタリングを用いて左右画像を同一色空間内において色領域へ分割する。 $L^*u^*v^*$ 表色系は、証明の明度変化に対して

色相・彩度が不変であるため、左右画像に対して安定した領域分割を行える。しかし、上記の手法のみではクラスごとに領域を分けるだけなので、領域色が同じでも離れた別の領域も一つの領域として認識されているため、ラベリング処理を施すことで各領域を連結成分ごとに分離する。

- Step 3: 得られた画像中のすべての色領域に対して境界線を検出し、その境界線について単純分解を施してエッジ境界の離散化誤差によるノイズを低減させる。つぎに、単純分解により得られた境界線を用いて、曲率の積分で定義される全曲率を取得する。
- Step 4: 各色領域の境界の全曲率を用いて、全曲率の変化が大きい点を対応特徴点候補として検出する。ただし、画像フレームの縁に境界がかかっている場合は、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、このような色領域に対しては処理を除外する。各色領域に対してすべてのエッジを捜査し終えたら、得られた特徴点候補を折れ線によって色領域を近似する特徴点として採用する。最後に、一つの色領域の特徴点は、その隣接色領域の特徴点でもあるので、すべての色領域の輪郭線に対して折れ線近似を行ったあと、得られたすべての特徴点に対して、近傍5画素の特徴点群は同一の特徴点とみなし、それらの特徴点群の位置の平均値を与えて、一つの特徴点として統合している。
- Step 5: 色情報と特徴点のエピポーラ拘束によって対応領域を決定する。まず、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。参照画像中の各色領域に対して、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を検出する。つぎに、その中からエピポー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出する。
- Step 6: 色領域の平坦性の仮定に基づいて対応領域の隠蔽部分を検出する。領域照合を行った結果、対応領域に隠れが生じていなければ、それらの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、対応領域中のどちらか一方の領域に生じた隠れや雑音による領域輪郭上の特徴点は、エピポーラ拘束を満たさないで、このような特徴点は無視してよい。しかしながら、参照領域と照合領域ともに隠れが生じている場合、偽の特徴点もエピポーラ拘束を満たしてしまい、正確な3次元構造を復元できない。そこで、人工的な面の物体は、ほぼ平坦であると仮定して、その平面を構成する色領域も同様に平坦であるとして隠れによって生じる偽の特徴点を削除している。
- Step 7: 併合のしきい値を大きくすると信頼性は高いが、左右両画像に同じように過併合が生じて、複数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、包含率を計算し、2平面からなる色領域を各面ごと分割する。ただし、3つ以上の平面が1つの領域に過併合することは稀であるので、過併合が生じる領域は、2つの平面からなるもの

に限定している。

Step 8: 上記の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、このまま3次元構造を復元すると再現性が悪くなる。そこで、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。ここで、3DCGで3次元曲面を再現する場合、この面要素を三角形ポリゴンで与えることが多く、しかも歪みの少ない曲面にするために正三角形に近い形に分割する必要がある。そこで、修正ドロネー三角分割法によって領域内部のメッシュ生成を行っている。また、曲面で記述される物体に対して本手法を拡張した場合でも、この内部補間の手法はそのまま適用できる。

Step 9: 得られた三角形ポリゴン群の奥行き情報と各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3次元構造を復元できる。

上記1~4までが領域分割と特徴点抽出を行う処理であり、前処理にあたる。これらの手順は従来手法の組み合わせであり本手法に適合させるための修正が施されている。また、5~7が主要部分であり、領域分割結果に基づいてロバストな領域照合を行っている。8~9は後処理にあたり、取得した色領域の視差情報を基に3次元形状を復元するための処理である。

5. テクスチャ領域に対する処理

本手法は、照合精度の高い小領域のみをシード領域として採用し、このようなシード領域に対する周辺画素の相関とテクスチャの有効性を考慮して、照合領域を拡大していくことにより[2]、テクスチャパターンをもつ複雑な形状の3次元復元を行っている。文献[2]では、テクスチャの有効性の指標として、近傍画素との差分値の大きさのみを用いているため、誤対応を生じることがある。本論文では、GLDMと呼ばれる手法から求められるテクスチャの特徴量を新たに照合の指標に追加することにより、同一テクスチャ間でのみ領域を拡大することができ、誤対応の少ない照合が行える。

5.1 特徴量による各テクスチャパターンの分離

照合領域を拡大する際、次節で定義する信頼度のみで対応画素を決定した場合、テクスチャとして隣接画素間の色変化が大きく有効であったとしても、別のテクスチャパターンもつ領域が隣接していると、単に相関の高い画素を照合して拡大しようとするため、誤対応が生じる可能性が高い。そこで本手法では、濃度レベル差分法(gray level difference method: GLDM)という手法をグレースケール画像に対する処理からRGB表色系に対する処理に拡張し、テクスチャパターンの特徴量を求め、異なるテクスチャパターンをもつ領域を分離して、探索範囲を限定することにより誤対応を軽減させる。

まず、GLDM法を適用するため、画像を16×16の大きさの区画に分割し、区画ごとにGLDM法を適用し、テクスチャの特徴量を求める。始めに、画像中の赤色の

輝度値 $\ell_r(x, y)$ において、距離 $\delta = (\Delta x, \Delta y)$ に対して $\ell'(x, y)$ を次式のように定義する。

$$\ell_r'(x, y) = |\ell_r(x, y) - \ell_r(x + \Delta x, y + \Delta y)| \quad (4)$$

ここで、 δ として、(0, d), (-d, d), (d, 0), (-d, -d) の4通りを用いる。本実験では $d=3$ とした。いま注目する区画に対して $\ell_r'(x, y)$ が I の値をとる確率関数 $f(I|\delta)$ を次式で定義する。

$$f(I|\delta) = \frac{P}{4N} \quad (5)$$

ここで N は1区画を構成している画素数であり、 P は注目区画内において $\ell_r'(x, y)$ が I の値を取った回数である。上式で表される確率関数 $f(I|\delta)$ を用いて、区画の特徴量は次式で与えられる。

$$F_r = \sum_{i=0}^{M-1} i \cdot f(I|\delta) \quad (6)$$

ここで I は濃度値であり、 M は画像の濃度値の総数である。上式で表される特徴量を R, G, B それぞれについて求めこれをその区画の特徴量とし、全区画に対して求める。

同一テクスチャパターンをもつ領域のみに限定して、照合領域を拡大するため、次式のような特徴量の差の絶対値を用いて、隣接画素が属する区画を比較する。

$$M(a, b) = |F_a - F_b| \quad (7)$$

ここで F_a と F_b は画素 a と b が属する区画のテクスチャの特徴量を示す。上式の特徴量差がしきい値以内であれば、その隣接区画に属する画素を同一テクスチャ領域内にあるものとする。

5.2 領域の照合

まず、照合精度の高いシード領域を見つけるため、近傍画素の色差を用いて領域分割を行い、得られた領域分割結果から、左右画像中の照合精度の高いシード領域を決定する手法について述べる。

左右画像間で領域の照合を行うとき、比較領域が小さすぎた場合、周辺領域との色差が大きくなれば領域分割時に他の領域に併合されるため、誤対応となる可能性が高い。また逆に、領域が大きすぎる場合も、左右画像間で視点の違いによる歪みなどの影響が大きくなるため、誤対応となる可能性が高い。そこで、求めた領域分割結果の中から、構成画素数が100から2000画素の範囲内の領域に限定して、照合を行う。照合のとられたシード領域がきわめて少ない場合でも、テクスチャ領域の中に最低1つでもシード領域があれば、それをもとに拡大しながら、テクスチャ全体が照合されるので、シード領域の数よりも照合精度が重要になる。

上述のような領域の構成画素数の条件を満たしたもので、次の条件を満たす領域の組み合わせを照合領域とする。

条件1: 右画像の領域重心から、左画像の領域重心に対するエピポーラ線までの距離がしきい値以内である。

条件 2: 領域間の色差がしきい値以内である .

条件 3: (8)式で定義される領域の形状差 $C(A, B)$ がしきい値を満たす .

$$C(A, B) = \frac{|t(A) \cup B| - |t(A) \cap B|}{|A| + |B|} \quad (8)$$

ここで, $t(A)$ は, 領域 A の重心を領域 B の重心に移動した領域であり, $|A|$ と $|B|$ は, それぞれ領域 A と B の面積である . また, $|t(A) \cup B|$ と $|t(A) \cap B|$ は, それぞれ領域 $t(A)$ と B の合併領域と共通領域の面積である . 例えば, 図 3 のような領域 A と B を考えると, 上式の分子は, 領域 C の面積となる .

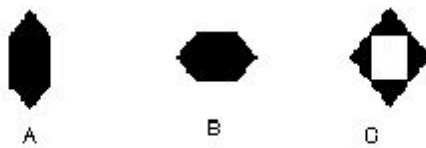


図 3 領域の比較

5.3 照合領域の拡大

テクスチャの特徴量のみでは, 注目画素が同じテクスチャに属するか否かを判定しているだけなので, 左右画像の対応画素を決定することはできない . そこで, 領域の相関性の高さやテクスチャの有効性をともに考慮し, テクスチャの信頼度という指標を用いることにより同一テクスチャパターン内において対応点探索を行う .

まず, 次式で定義される注目画素のテクスチャとしての有効度を求める .

$$s(a) = \max\{n(a, e), (e - a) \in \{(1,0), (-1,0), (0,1), (0,-1)\}\} \quad (9)$$

ここで a は注目画素であり, e は画素 a の上下左右の 4 画素を示す . 上式からわかるように, テクスチャの有効度とは, 近傍画素との色変化の大きさを表している . この有効度がしきい値以上ならば, その画素をテクスチャとして有効であるとして採用する .

さらに, 左右画像間の相関度として次式を定義する .

$$d(a, b) = \frac{1}{9} \sum_{\delta \in \{-1,0,1\} \times \{-1,0,1\}} n(a + \delta, b + \delta) \quad (10)$$

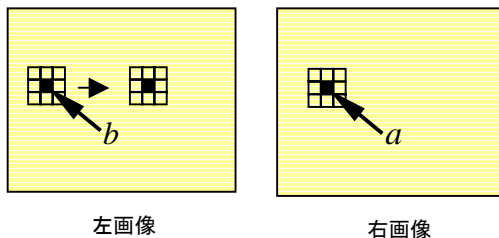


図 4 左右画像間の相関

ここで, a および b は, それぞれ右および左画像の注目画素を示す . 相関度があるしきい値以内の場合, この画素対に相関性があるとして採用する .

最後に, (9)式と(10)式を用いて, テクスチャとしての有効性と相関性をともに考慮した対応の信頼度を次式で定義する .

$$r(a, b) = \frac{\min\{s(a), s(b)\}}{d(a, b)} \quad (11)$$

本手法では, (9)式で定義されるテクスチャとしての有効度, (10)式で定義される画像間の相関度, (11)式で定義される対応の信頼度をすべて考慮して, 同一テクスチャパターン内で照合領域を拡大していく .

図 5 と 6 のような 5×5 の画素の画像例を用いて左右画像間の照合領域の拡大手順を示す . まず, すでに対応がとれている画素対の中で最大の信頼度を持つ画素対を左右画像それぞれより選択し注目画素とする . 初期段階では, 領域分割時に生じる多少の領域構成画素数の誤差を考慮して, 照合領域の重心位置を対応画素対として信頼度を求める . つぎに, 図 5 のように注目画素を中心に 5×5 を探索範囲とし, その中でまず左画像からまだ対応がとられておらず, 注目画素と同じテクスチャ領域に属し, かつテクスチャとして有効である画素 a を選択する . さらに, 図 6 のように右画像で左画像注目画素と画素 a との位置関係と同じ位置関係にある画素 b を選択する . つぎに, 画素 b を中心に 3×3 の範囲内で, まだ対応がとられておらず, かつテクスチャとして有効であるすべての画素と画素 a との相関度を求める . さらに, 相関性があると認められた画素と画素 a との信頼度を求める . 同様に左画像の探索範囲内で, 注目画素と同じテクスチャ領域に属し, テクスチャとして有効であり, かつまだ対応が取れていないという条件を満たす画素すべてについて同様に信頼度を求める . 求めた信頼度のうち最も信頼度の高い組を新たに対応画素対とする . これを対応が取れる画素がなくなるまで画像全体で繰り返す .

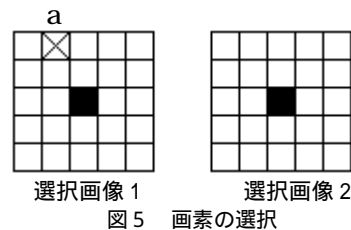


図 5 画素の選択

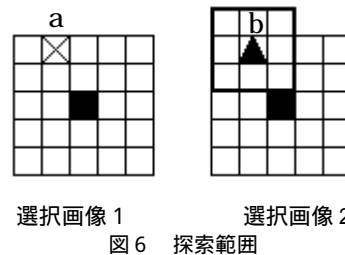


図 6 探索範囲

は注目対応領域を示し, x は選択画素 a を示す .
は選択画素 b を示し, 太枠が探索範囲となる .

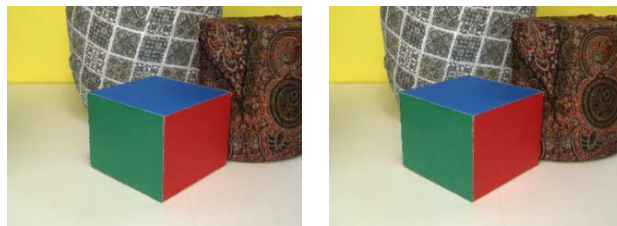
上述のようにテクスチャ領域内において全ての点に対して対応が取れたら, 3 角測量の手法により 3 次元位置を算出し, 3 次元形状を面構造として復元する .

6. 実験結果

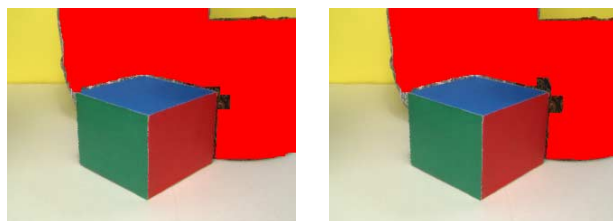
本章では、実際の一様色領域とテクスチャを含む画像に対して、本手法を適用し、本手法の有効性を示す。

まず、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データを取得する。実験に用いた入力ステレオ画像を図7に示す。このステレオ画像について一様色領域のみを抽出した結果を図8に示す。ここでは、判別のしきい値 T_1 および T_2 を 0.15 とし、RGB 値を用いて分離している。また、前処理として、一様領域に対して、収縮処理を6回、膨張処理を3回行うことにより、ノイズを除去し、一様領域に欠損部分が生じないように、領域を少し大きめにとるようにしている。

図9にテクスチャ領域のみを抽出した結果を示す。テクスチャ領域に対しても、一様領域と同様に欠損部分が生じないように、収縮処理を5回、膨張処理を5回行っている。また、ここでは、判別のしきい値 T_1 および T_2 を 0.1 としている。図10に一様色領域、テクスチャ領域それぞれの手法から3次元形状を復元した結果を示す。左側の一様な色領域について行った結果は、領域分割の際の併合のしきい値を30とした。右側にテクスチャ領域について3次元形状を復元した結果を示してある。また、今回の実験で用いた各種のしきい値は、いろいろな画像に対して本手法を適用し、その中で最も有効性の高かったものを経験的に求めたものである。図11に両手法から求めた3次元形状の情報を合成した結果を示す。



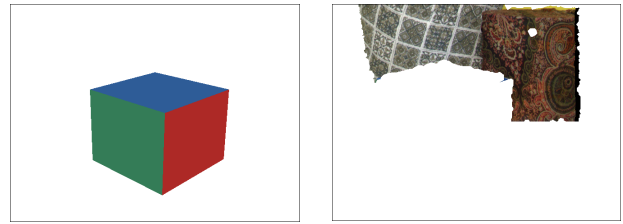
左画像 右画像
図7 入力ステレオ画像



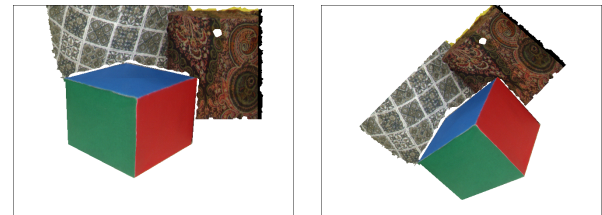
左画像 右画像
図8 一様色領域抽出結果



左画像 右画像
図9 テクスチャ領域抽出結果



一様色領域のみ テクスチャ領域のみ
図10 3次元形状復元結果



左画像取得時の視点 別視点
図11 最終的3次元形状復元結果

これらの図からわかるように、一様領域とテクスチャ領域が混在しているようなシーンに対して、適切に3次元形状が復元されていることがわかる。

7. おわりに

本論文では、ステレオ画像中の一様な色の面とテクスチャ面を分離し、それぞれの特徴にあった手法で3次元形状を復元する手法を提案した。本手法を用いることにより、テクスチャ面と一様な色の面が混在するようなシーンに対しても、3次元形状の復元を行うことができることを明らかにした。

今後の課題として、より一般的で複雑なシーンに対しても3次元構造が精度よく復元できるように開発していきたい。また、テクスチャ領域に対する手法では、最終的に得られた3次元点群から最適なポリゴンを生成し、テクスチャ領域を曲面として復元することが挙げられる。

参考文献

- [1] 岩月正見, 鈴木浩二, 山口剛弘, “階層的な領域分割によるステレオビジョン”, 計測自動制御学会論文集, vol.36, No.11, pp.887/893, 2000.
- [2] Maxime Lhuillier, “Efficient Dense Matching for Textured Scenes Using Region Growing”, N° 3382, INRIA Rapport de recherche, 1998.
- [3] 森俊二, 坂倉梅子, “画像認識の基礎”, pp.195-218, オーム社, 1990.
- [4] 松山, 久野, 井宮, “コンピュータビジョン, 新技術コミュニケーションズ”, pp123/137, 1998.

キーワード.

3次元形状復元, テクスチャ, ステレオビジョン, 濃度レベル差分法, 分離

Summary.

3D Reconstruction Based on Separation of Texture and Uniform Color Regions

Shouta Sato Nobuo Abe
Division of Engineering, Graduate School, Hosei University

Masami Iwatsuki
Faculty of Engineering, Hosei University

This paper proposes 3D reconstruction method using separation of texture and uniform color regions. The proposed method can reconstruct 3D shapes for complicated scenes mixed with texture and uniform color regions by taking account of the correlation, validity of texture and resemblance obtained from GLDM.

Keywords.

3D Reconstruction, Texture, Stereo Vision, Gray Level Difference Method, Separation