

テクスチャを用いた曲面の領域照合と3次元形状の復元

阿部 伸生 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、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ないという問題点があった。そこで本論文では、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、テクスチャパターンをもつ複雑な形状の3次元復元を行う手法を提案する。

1. まえがき

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。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。

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[2]。しかしながら、このような色領域に基づく手法では、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ないという問題点があった。そこで本論文では、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[3]、テクスチャパターンをもつ複雑な形状の3次元復元を行う手法を提案する。文献[3]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、背景などに異なるテクスチャをもつ物体

が存在する場合、同一テクスチャとみなして領域を拡大していくため、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ことを明らかにする。

2. 領域分割

本手法では、まず、左右画像の照合精度の高いシード領域を検出し、その隣接領域のテクスチャパターンを相関の高さや特徴量を用いて拡大していきながら、テクスチャ全体の照合を行い、3次元形状を復元している。そこでまず、このような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う必要がある。本章では、このような前処理としての領域分割の手法について述べる。

2.1 初期領域の生成

まず、原画像において、1画素を1領域とみなし、画像の左上から順に、次式で表される色差を用いて領域を統合して、初期領域を生成する。

$$n(a,b) = 0.299 \times |r1 - r2| + 0.587 \times |g1 - g2| + 0.114 \times |b1 - b2| \dots (1)$$

ここで、 $(r1, g1, b1)$ $(r2, g2, b2)$ は、それぞれ隣接領域 (a, b) のRGB値を示す。注目領域とラベル付けされた隣接領域を、上式で与えられる色差を用いて比較し、しきい値以内の領域に対しては、注目領域と同一のラベル番号を割り当て、そうでなければ、その隣接領域を新たな領域として、新しいラベル番号を割り当てる。その際、領域の色は構成画素の色の平均値を用いる。これにより、一回の画像走査である程度まとまった初期領域を生成することができ、次節で述べる領域併合の処理時間を大幅に軽減できる。また、このときのしきい値を比較的厳しくすることにより、領域統合の順番によって、領域分割の最終結果が異なるという問題もなくなる。

図1のような 9×9 画素の画像を例にとり、初期領域の生成過程を説明する。図1において、画素 (A, C, D, F, G, H, I) と (B, E) で構成される領域を、それぞれ

同一領域となるべきものとする。まず、左上の画素Aを注目領域として、ラベル番号1を割り当てる。このとき、他にラベル付けされた隣接領域はないので、注目領域を画素Bに移し、すでにラベル付けされている隣接領域1との色差を求める。この場合、しきい値を越えているので、画素Bを新たな領域とみなし、ラベル番号2を割り当てる。同様の処理を画素Iまで行う。ここで、左上から順に右下の方向へ走査しながら、色差を比較していくため、初期領域生成の段階では、最終的に統合されるべき領域である画素群(A,C,D,F,G,H,I)は、(A,D,G,H)と(C,F,I)の2つの領域に分割されたままになるが、次節で述べる領域併合を行えば、これら2つの領域は必ず統合される。このように、すでにラベル付けされている領域のみと色差を比較し統合することにより、1回の画像走査で初期領域を生成できる。

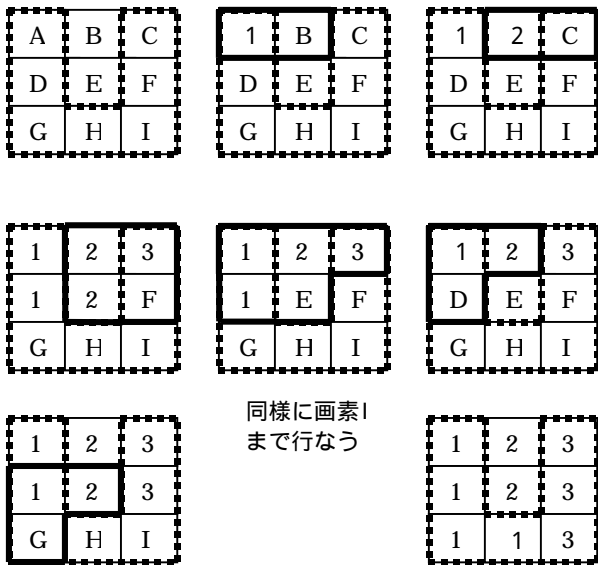


図1 初期領域の生成

2.2 領域の併合

前節で述べたように、初期領域生成の段階では、統合されるべき領域が分割されたままであり、また、統合のしきい値も厳しくしてある。したがって、最終的に妥当な領域分割結果を得るためには、しきい値をもう少し大きく目にとり、併合の順番によって領域分割結果が大きく異なるような領域の併合を行う必要がある。そこで、前節の手法によって得られた初期領域に対して、注目領域のエッジ部分を2×2の窓で走査し、隣接する他の領域との色差の比較を同様にを行い、しきい値以内ならその領域を注目領域に併合していく。このときも、併合後の領域の色は、その領域を構成する全画素の平均色を用いる。これを注目領域周辺で併合すべき領域がなくなるまで繰り返す。この注目領域の併合が終了したら、その右隣の領域を注目領域とする。これを全領域について繰り返す。

図2に、前節の手法によって得られた初期領域に対して領域の併合を行う過程の例を示す。まず、ラベル番号1の領域を注目領域とし、図2の左上段のように、2×2の窓をエッジ部分におき、この窓に含まれるすべての

隣接画素との色差を求め、しきい値以内なら併合する。この場合は、2つの画素はともに、しきい値を越えるので、ラベル番号2の領域は併合されない。つぎに、図2中上段のように、窓を移動するが、この場合もしきい値を越えるので併合されない。さらに、図2の右上段のように、エッジに沿って窓を移動し、ラベル番号3の領域は、しきい値以内なので併合される。併合後の領域のラベル番号は小さい方を新たなラベル番号とする。以上の処理を画像全体に施すことにより、最終的な領域分割結果が得られる。

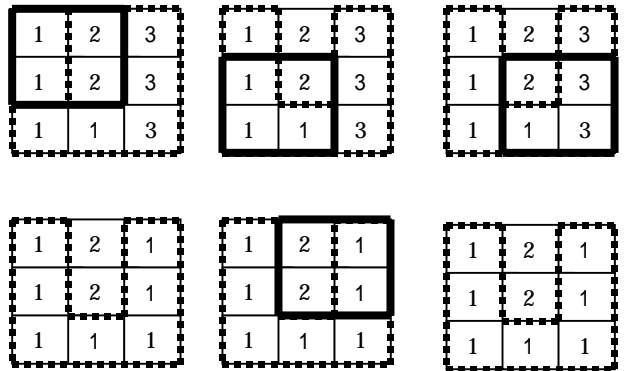


図2 領域の併合

3. 領域の照合

本手法では、左右画像中の照合精度の高いシード領域をもとにして、テクスチャ領域を拡大しながら照合を行っている。そこで本章では、前章の手法により得られた領域分割結果から、このような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、前章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。
2. 式(1)で表される領域間の色差がしきい値以内である。
3. 次式で定義される形状差C(A,B)がしきい値を満たす。

$$C(A, B) = \frac{|t(A) \cup B| - |t(A) \cap B|}{|A| + |B|} \dots (2)$$

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。

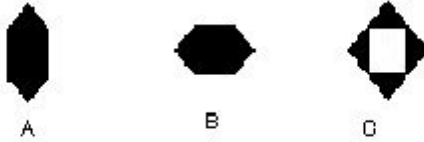


図3 領域の比較

4. テクスチャパターンを用いた照合領域の拡大

本手法では、テクスチャ領域を相関性の高さやテクスチャの有効性とその特徴量を用いて、左右画像間の照合領域を拡大し、テクスチャ全体の密な視差分布を求め、3次元形状を復元している。本章では、このようなテクスチャパターンを用いて照合領域を拡大する手法について述べる。

4.1 テクスチャの特徴量

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、テクスチャとしては、隣接画素間の色変化が大きく有効であったとしても、奥行きが大きく異なる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、濃度レベル差分法(gray level difference method: GLDM)という手法を用いて、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、次式を用いて原画像をグレースケール化する。

$$\ell(x, y) = r(x, y) \times 0.299 + g(x, y) \times 0.587 + b(x, y) \times 0.114 \quad \dots (3)$$

ただし、 $r(x, y)$, $g(x, y)$, $b(x, y)$ は、現画像のRGB値であり、 (x, y) は画像上の座標値を示す。上式によって変換されたグレースケール画像を 5×5 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。つぎに、求めたグレースケール値 $\ell(x, y)$ 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。

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

ここで、 δ として、 $(0, d)$, $(-d, d)$, $(d, 0)$, $(-d, -d)$ の4通りを用いる。つまり $\ell'(x, y)$ は座標 (x, y) において4つの値

を取るようになる。いま注目する区画に対して $\ell'(x, y)$ が I の値をとる確率関数 $f(I | \delta)$ を次式で定義する。

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

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 $\ell'(x, y)$ 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。

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

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。

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

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。

4.3 テクスチャの信頼度

前節の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。

$$s(a) = \max\{n(a, e), (e - a) \in \{(1,0), (-1,0), (0,1), (0,-1)\}\} \quad \dots (8)$$

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。

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

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、式(8)と式(9)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。

$$r(a, b) = \frac{\min\{s(a), s(b)\}}{d(a, b)} \quad \dots (10)$$

本手法では、式(8)で定義されるテクスチャとしての有効度、式(9)で定義される画像間の相関度、式(10)で定義される対応の信頼度をすべて考慮して、照合領域を拡大していく。

図4と5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4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5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。

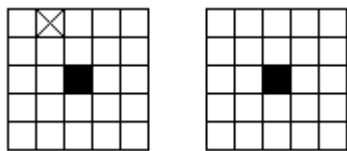


図4 画素の選択

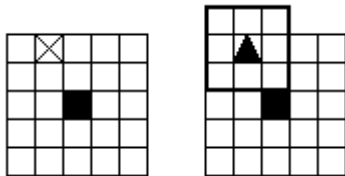


図5 探索範囲

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。

5. 実験結果

本章では、実際の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。実験に用いたステレオ原画像を図6に示す。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。

5.1 領域分割

図6に示す左画像に対して、本手法で用いている初期領域生成を行った場合と行わない場合の領域分割結果を図7に示す。分割結果は、領域のエッジのみを表示している。また、表1に領域分割の処理に要した時間をそれ

ぞれ場合について示す。ここで、色差のしきい値は5とし、初期領域作成後の領域併合のしきい値は8とした。また初期領域を生成しない場合は、併合のしきい値は8とした。



図6 入力画像

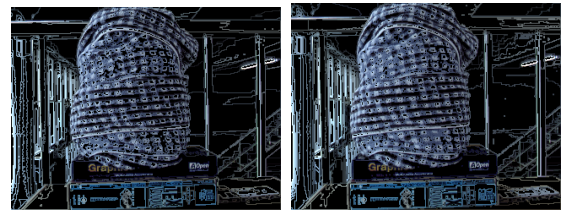


図7 領域分割結果

表1 領域分割結果

初期領域	経過時間(s)	領域数
生成あり	165	6198
作成なし	854	6,550

表1から明らかなように、初期領域を生成することにより、領域併合の処理順序に影響されずに、大幅な高速化が計られたことがわかる。

5.2 領域の照合

図7の領域分割結果に対して、本手法を適用し、シード領域を選択した結果を図8に示す。ここで、シード領域の構成画素数は、100から2000画素とし、領域の重心位置のエピポーラ線からのずれは、2画素以内としている。

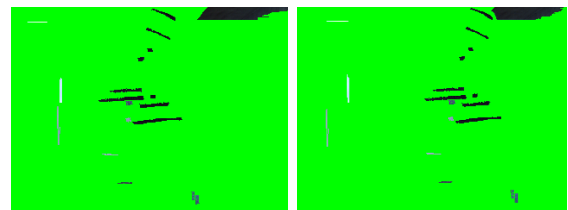
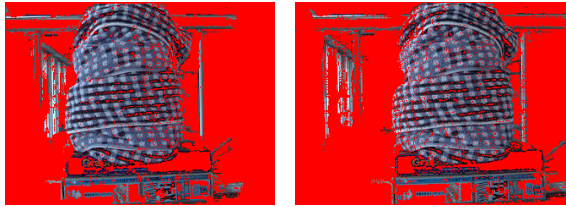


図8 シード領域

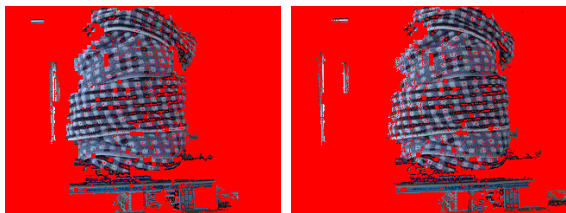
5.3 照合領域の拡大

図8のシード領域に対して、照合領域の拡大の際に、式(7)の同一テクスチャ条件を加えた場合と加えなかった場合の結果をそれぞれ図9および10に示す。また、

表3に、それぞれの場合についての処理時間と対応画素数を示す。さらに、得られた照合結果から、3次元構造を復元した結果を、それぞれ図11および図12に示す。ここで、信頼度のしきい値を8、相関性のしきい値を18、テクスチャとしての有効性のしきい値を5とし、また、同一テクスチャ領域条件は区画間の特徴量の差が5以下とした。



右画像 左画像
図9 照合領域拡大結果(領域条件なし)



右画像 左画像
図10 照合領域拡大結果(領域条件あり)

表3 対応画素探索結果

領域条件	処理時間(s)	対応画素数
あり	473	24,304
なし	745	34,445

図10と図11を比較すると、同一テクスチャ条件を加えたことにより、テクスチャとはみなされない様領域のエッジ部分に拡大が及んでいないことがわかる。ただし、実際には同一テクスチャ領域であるにもかかわらず、そうでないと誤って判断されている部分が若干あるが、図12と図13を比較すれば分かるように、拘束条件を加えた方が精度の高い復元結果が得られていることがわかる。

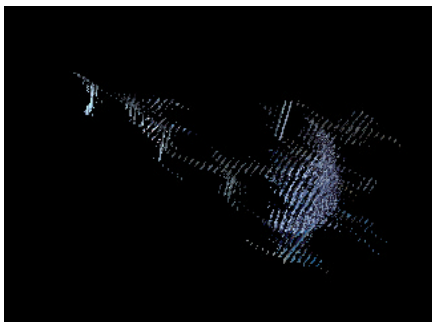


図11 3次元構造復元結果(拘束条件無し)

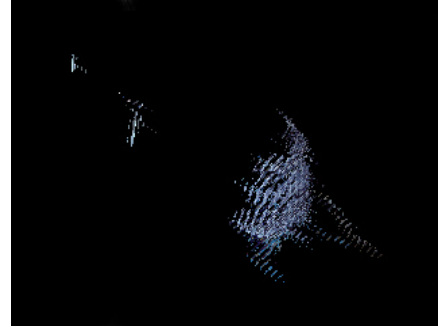


図12 3次元構造復元結果(拘束条件有り)

6. あとがき

本論文では、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、テクスチャパターンをもつ複雑な3次元形状を高精度に復元できることを示した。

今後の課題として、本手法によって最終的に得られた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。また、文献[2]で提案されている一様領域に対して有効なステレオビジョンの手法と融合して、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手法を開発していきたい。

参考文献

- [1]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", 123/137, 1998年
- [2] 鈴木, 大石, 秋元, 岩月, "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, PRMU99-121, 145/150, 1999年
- [3]Maxime Lhuillier, "Efficient Dense Matching for Textured Scenes Using Region Growing", INRIA Rapport de recherche, N° 3382 1998年
- [4]森俊二, 坂倉梅子 "画像認識の基礎" オーム社 1990年

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

Summary.

Region Matching and 3D Reconstruction of Curved Surfaces with Textures

Nobuo Abe 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. This method can detect occluded parts and modify the depth values by assuming that artificial objects consist of flat color regions approximately. However, this method based on color regions cannot acquire correct matching for curved surfaces on objects with textures because the segmented regions are too small. Therefore, this paper proposes region matching and 3D reconstruction method for curved surfaces with textures by detecting seed areas with high accurate matching and growing the seed areas by taking account of the correlation, validity of texture and resemblance obtained from a method for texture analysis called gray level difference method.

Keywords.

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