

ステレオ画像からの3次元立体の復元

阿部 正人・清水 誠司・古川 進*

Reconstructing 3-Dimensional Shapes from Stereo Images

Masahito ABE, Seiji SHIMIZU, Susumu FURUKAWA

要 約

製造ラインでのワークやツールの位置決めや、検査工程での良品・不良品の識別判定を行うことを目的に、コンピュータに画像キャプチャーボードを装着し、CCDカメラからのコンポジットビデオ信号のキャプチャーを試験的に行った。その結果、撮像した画像に対しノイズ除去、エッジ強調処理、2値化収縮処理、原画像との差分をとることにより、特徴点を抽出できることを確認した。

1. 緒 言

現在、無人化技術の活用は、光電スイッチ、近接スイッチ、圧力・温度センサー、CCDセンサー等の技術を基にしたアプリケーションである。半導体・電子部品製造業では、ICパターンの検査、半田槽の液面検出等、機械金属製造業では、ワークの位置検出、パーツフィード内のワーク検出、食品製造業では、ラベリングの不良、ホッパ内の原材料検査など、センサー技術の適用は、各産業の製造工程の自動化に大きく貢献をしてきている。しかし、企業においては、運用技術・人材の不足、導入・運用コストの増大の要因から、なかなか進んでいない。一方、自動化が大幅に図られても、作業者が判断しなければならない工程が存在し、未だ人間にしかできない作業工程が数多く残されているのも事実である。

周囲の状況を認識し判断するにあたって、人間は視覚から約80%もの情報¹⁾を得ているという。治具の取付・取り外し等の視覚センサーだけでは解決できない問題は存在するが、従来のセンサー技術によって代替が困難であった人手を必要とする作業工程を自動化するには、人間の視覚・認知と同等の機能を有するセンサー技術の開発が非常に有益である。安価なCCDカメラを用いて周囲の3次元立体を認識させ、立体の位置情報と環境情報の抽出を行う手法の開発とシステムの構築が可能となれば、従来作業者の視覚に依存していた作業の代替、具体的には企業の製造ラインでのワークやツールの位置決めや、検査工程での良品・不良品の識別判定への応用を行うことができる。現在、CCDカメラから取り込んだ画像を処理し、物体の計測や認識を行うシステムが開発されているが、カメラで取り込ん

だ画像は3次元空間にある物体を2次元平面に投影したものであるため、物体の裏側や他の物体の陰になって見えなくなったり、奥行き情報が失われてしまうという問題が生じる。

画像からの立体抽出や2次元画像から3次元立体を復元する手法として様々な手法^{2)~3)}が提案されているが、本研究では2台のカメラから得られる画像から3次元立体情報を抽出について検討を行う。この方法は、三角測量と同様な原理で2台のカメラから得られた画像をもとに、元の立体を復元するものである。しかし、カメラから取り込んだ原画像はノイズ等の不必要な情報が多く含まれている。これらの不必要な情報を含んだまま3次元空間処理を行うと、処理に膨大な時間がかかってしまい実用的ではない。本報は、山梨大学古川らの提案する手法⁴⁾を基に、ステレオ画像を用いた3次元立体データの復元時に必要な、原画像からのノイズの効果的な除去処理及びエッジ特徴点の抽出処理について考察する。

2. 幾何モデル

2-1 2次元幾何モデル

カメラによって立体をフィルム面に投影し像を結ぶ行為について、図1に示されるような計測点、レンズ、投影面から構成される2次元幾何モデルとして考えた。計測点からの光軸はレンズの中心を通り投影面と交差したところに像を結ぶ。レンズの中心を座標の原点とした座標系(x-z)を考える。このとき計測点の位置を(x,z)、レンズの焦点距離をf、投影面をpとすると、計測点は投影面p上の(-fx/z, -f)の位置に投影される。この考えを2つのレンズが平行に設置されかつ光軸に対して垂直であった時に拡張すると、次のように考えることができる。2つのレンズ

* 山梨大学工学部機械システム工学科

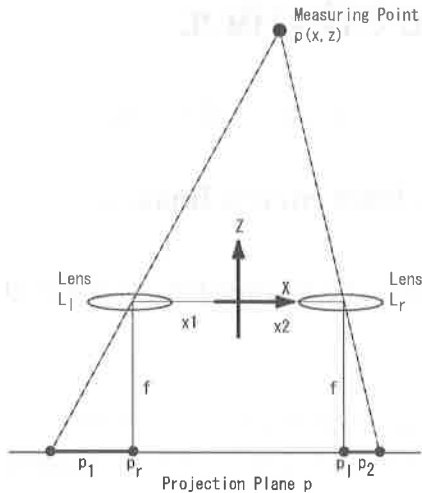


Fig. 1 2-dimensional optical geometry model

の光学中心を結ぶ線分の中点を原点とし、レンズの右方向を x 軸、奥行き方向を z 軸とする。原点からレンズの光学中心までの距離を dx 、左側のレンズを L 、右側のレンズを R 、レンズ L の光学中心から投影面におろした垂線と投影面 p との交点を p_l 、レンズ R の光学中心から投影面におろした垂線と投影面 p との交点を p_r 、計測物の光軸がレンズ L の光学中心を通り p と交差した位置を p_l からの距離 p_1 、レンズ R の光学中心を通り p と交差した位置を p_r からの距離 p_2 とすると、

$$x = - (fp_1 dx + fp_2 dx) / (fp_2 - fp_1)$$

$$z = f (dx - ((fp_1 dx + fp_2 dx) / (fp_2 - fp_1))) / p_1$$

で与えられる。この幾何光学モデルを Fig. 1 に示す。

2-2 3次元幾何モデル

2次元幾何光学モデルさらに発展させ3次元空間上に配置される物体を計測するために、以下の座標系を考慮することにする。

- (1) それぞれのカメラに固有に設定されるカメラ座標系
- (2) 3次元空間全体を表すワールド座標系
- (3) 2台のカメラ間を結ぶ線分の中点を原点とするステレオ座標系
- (4) それぞれのカメラのレンズからの光軸が投影される画像平面座標系

これらの座標系を Fig. 2 に示す。

レンズの焦点距離を f 、 (u, v) で表される画像平面と光軸が交わる点を (u_0, v_0) とし、カメラ座標系に対する画像平面のスケールを k_u, k_v とする。画像平面上の投影された点を $p_l(i_l, j_l)$ 、 $p_r(i_r, j_r)$ とする。空間上の点 P を画像平面に投影した点 p_l, p_r のステレオ座標系で表すと次のとおりに表される。

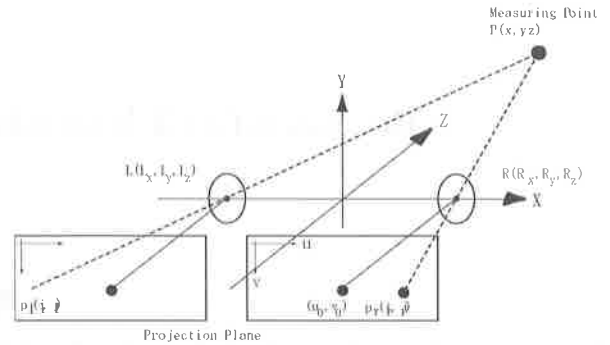


Fig. 2 3-dimensional optical geometry model

$$x_{sl} = k_u (i_l - u_0) - d/2$$

$$y_{sl} = k_v (j_l - v_0)$$

$$x_{sr} = k_u (i_r - u_0) + d/2$$

$$y_{sr} = k_v (j_r - v_0)$$

さらに、ステレオ座標系で表した空間上の点を $P_s(X_s, Y_s, Z_s)$ とし、左右のカメラの焦点を $L(L_x, L_y, L_z)$ 、 $R(R_x, R_y, R_z)$ とすると空間上の点 $P_{sl}(x_s, y_s, z_s)$ は、以下の式によって求められる。

$$x_s = (L_x (-x_{sr} z_{sl} + R_x (z_{sl} - z_{sr})) + R_x x_{sl} z_{sr}) / (R_x z_{sl} - x_{sr} z_{sl} - L_x z_{sr} + x_{sl} z_{sr})$$

$$y_s = ((L_x - R_x) y_{sl} y_{sr}) / (-R_x y_{sr} + x_{sr} y_{sr} + L_x y_{sr} - x_{sl} y_{sr})$$

$$z_s = ((L_x - R_x) z_{sl} z_{sr}) / (-R_x z_{sl} + x_{sr} z_{sl} + L_x z_{sr} - x_{sl} z_{sr})$$

これを平行と回転の変換マトリックスによって座標変換を行い、最終的には次式でワールド座標系における点 $P(x_w, y_w, z_w)$ を求めることができる。 $r_x(r_{11}, r_{12}, r_{13})$ 、 $r_y(r_{21}, r_{22}, r_{23})$ 、 $r_z(r_{31}, r_{32}, r_{33})$ は、ステレオ座標系でのワールド座標系の x 軸、 y 軸、 z 軸を表す単位ベクトルである。

$$[x_w y_w z_w 1] = [x_s y_s z_s 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & m & n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 1 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. エッジ・特徴点の抽出

3-1 ノイズ除去

CCDカメラで撮像された画像には、処理対象とする情報以外の様々な情報が含まれている。本研究では、CCDカメラの画像からエッジ検出・特徴点の抽出を行って、3次元空間上の位置を推定する。この処理過程で本来エッジ



Fig. 3 Original Image taken from CCD Camera

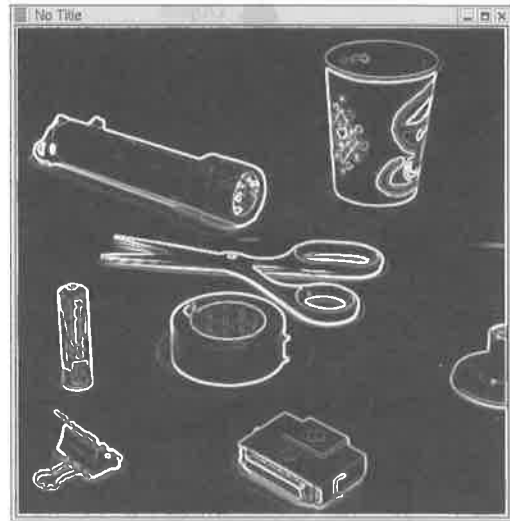


Fig. 4 A Boundary Candidated Image

ではない画素についてエッジ抽出処理をすると、計算時間を浪費するばかりか、存在するはずのない点について位置推定してしまうなどの不具合が発生する。本来の情報を抽出するために、このような画像に平滑化処理を行って不必要な情報を取り除いておく必要がある。単純な局所平均フィルタでは画像の濃淡変化パターンをばかしてしまうため、ここではノイズ成分のみの排除を行うためにメディアンフィルタ³⁾を原画像に適用した。メディアンフィルタは、注目画素の周辺 3×3 の画素をソートして中央にくる値をその画素の値とする方法である。スパイク状のノイズ削減に効果が高く、計算にかかる負担が少なく、比較的エッジ情報は良好に保存することができた。

3-2 エッジ検出

デジタル画像処理において、物体の認識や画像の解析を行うには、画像の線分や輪郭情報の抽出から始めることが多い。ここでは線分や輪郭を総称してエッジと呼びその抽出手法について述べる。画像領域で濃淡の変化が急激に現れる箇所は、何らかの物体の輪郭存在しているところ、あるいは物体になんらかの模様状のものが付いているところと考えることができる。黒い背景にライトで照らされた物体を撮影した場合や白い物体に黒い文字が書かれている場合などがそうである。このようなエッジを検出する方法は既に数々の方法^{4) 7)}が提案されているが、ここでは最も単純な方法である画素間の明るさ変化の1次微分を利用したエッジ検出オペレータ⁸⁾を利用した。画素に対しエッジ付近の濃淡パターンを想定した8種類の方向性を持った 3×3 のエッジ検出テンプレートで局所積和演算を行い、その中の最大値をグラジエント強度とし、エッジ方向をグラジエント方向とする。次にエッジ方向に隣接する画

素のグラジエント方向のチェックを行い、方向が異なる不要なエッジの削除を行う。CCDカメラから得られた画像をFig. 3に、輪郭強調処理をした画像をFig. 4に示す。得られたエッジは明るさを持った画素の集合体であるので、この画素集合体から輪郭を順序付けられた点列集合として抽出処理を行う。抽出処理は、画像を順に走査し明るい画素を探す。見つかった場合、その画素をスタート点とし、画素近傍の8画素について左周りに次の明るい画素を探していく。探索を終えた画素が探索済みマークの記録を施す。この手順をスタート点に戻るまで行っていく。Fig. 5に探索方法を示す。

4. システム構成

コンピュータに画像とキャプチャーボードを装着し、CCDカメラからのコンポジットビデオ信号のキャプチャー

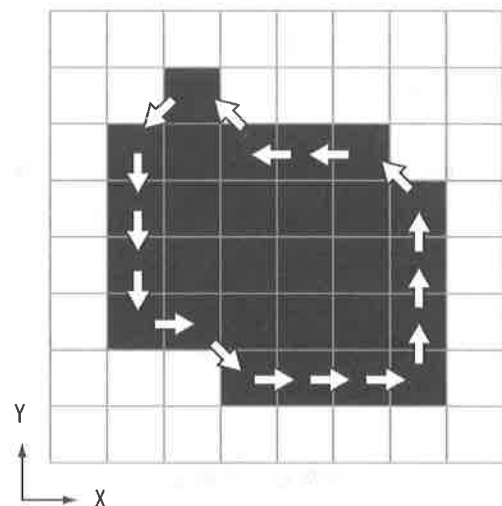


Fig. 5 Edge Detection Method

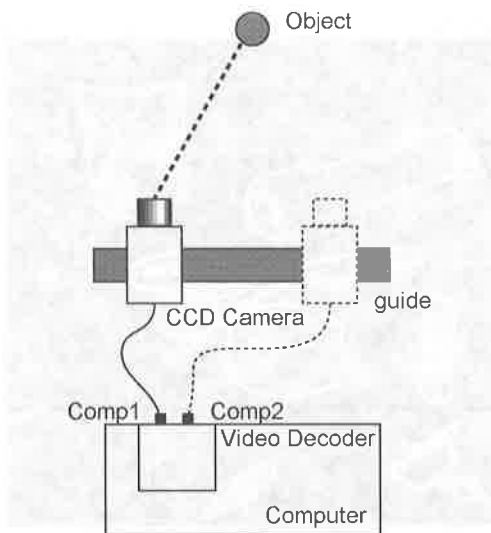


Fig. 6 System Configuration

を試験的に行った。

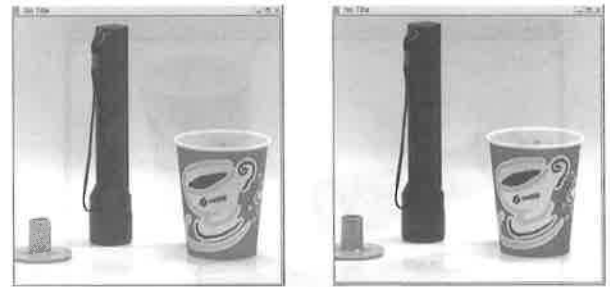
使用した機器は、CCDカメラとしてXC-38、ビデオデコーダー用チップBt-848、CPUはAMD Athlon、OSはLinuxである。プログラム開発言語はCを、ウィンドウシステムはXfree86、グラフィクスライブラリーはXlibをそれぞれ使用した。Bt848の駆動は、Linuxカーネルにビデオデバイスのドライバーを組み込んで行った。システムの構成図をFig. 6に示す。

5. 画像処理

CCDカメラによって撮像された原画像をFig. 7に示す。画像は $512 \times 512 \times 24$ ビットの解像度で処理を行った。この画像に対してメディアンフィルターの処理をした例をFig. 8に、 3×3 テンプレートによりノイズ除去を行い強調処理を行った例をFig. 9に、2値化処理後にエッジ要素を抽出した例をFig. 10に示す。比較のためにガウシアンフィルターを使用しノイズ除去を行った例をFig. 11に示す。ガウシアンフィルターを使用した場合においても効率よくノイズを除去できている。ノイズ除去の品質を考えるとガウシアンフィルターを使用するべきと考えられるが、画像の処理時間を優先して考慮すると、比較的少ない計算量で十分なノイズ除去ができるメディアンフィルターを今回の研究では使用することとした。どのフィルターを使用しノイズを除去するかは、多様な状況下での実験と次章で記述する3次元データの復元にかかる時間等から最適なフィルターの選択をする必要がある。

6. 3次元位置推定

得られたエッジ画像から特定の点に注目し、その点の3次元空間上での位置の特定を試みた。ここで注目をした点



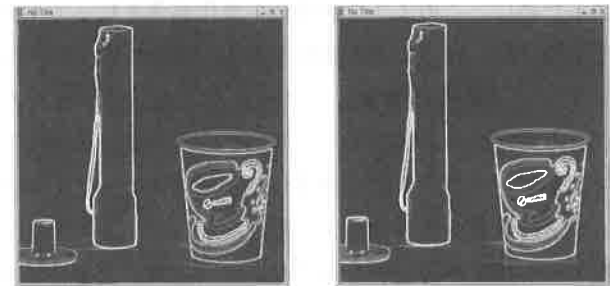
(a) Left (b) Right

Fig. 7 Original Images



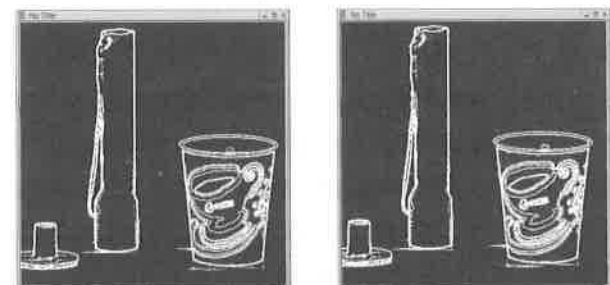
(a) Left (b) Right

Fig. 8 Median Filter



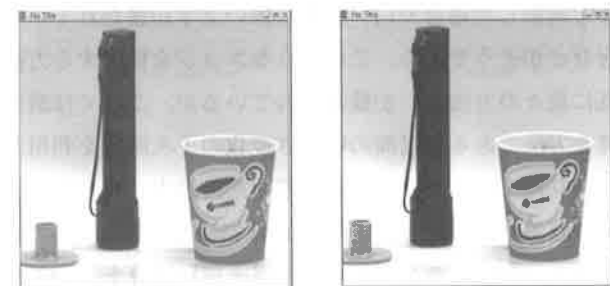
(a) Left (b) Right

Fig. 9 Edge Enhancement Processing



(a) Left (b) Right

Fig. 10 Edge Detection



(a) Left (b) Right

Fig. 11 Gaussian Filter

Table 1 Results of measuring

	x	y	z
計測ポイントの位置	0.00	0.00	120.00
推定位置	-2.79	6.96	133.54
ステレオ座標系の位置 単位mm			

はディスプレイ上で操作者がマウス使用しカーソルで指示を行った点である、点の位置は第2章に記述した幾何光学モデルを利用して、3次元空間上でのX、Y、Z座標値で推定を行った。撮影は1台のカメラをスライドテーブルの上に設置し、まず左側の画像を撮像し、次に50mmスライドさせて右側の画像の撮像を行った (Fig. 7) .その結果をTable 1 に示す。

実際の位置と推定位置との誤差は以下のことが大きく影響していると考えられる。

- 1) CCDカメラを画像認識として使用した場合、対象はある大きさを持った画素で表されることになる。そしてその大きさは、撮像に使用するCCD、キャプチャーに使用したビデオデコーダーの解像度に依存する。
- 2) カメラ取付時の校正が不正確。
- 3) スケーリングパラメータの誤差。

7. 結 言

CCDカメラから得られる画像を基に、撮影された情報に対し画像処理を施し、3次元物体の空間上の位置情報を求める手法の検討を行った。その結果以下の結論を得た。

1. 画像ノイズの除去のために、周辺ピクセルとの比較によるノイズ除去と、中間値フィルターを合わせてノイズ除去を試みた。試験的に撮像された画像では効率よくノイズが除去されたが、比較的粗いノイズに対しては、複数枚の画像から、その点がノイズであるかどうかの判定が必要である。

2. 特徴点抽出処理として、エッジ近郊での画素の濃淡を想定した3×3テンプレートを用意し、局所積和演算を行い輪郭抽出処理を行った結果、エッジ要素を強調することができた。

3. 特徴点抽出処理をした画像についてエッジ探索を試みた結果、試験的に使用した画像では、十分エッジ検出が可能であることを確認した。

4. 3次元空間上での位置特定について、さらに精度の高い安定した計測を行うには、カメラの座標系設定、光学系補正に関する安定した補正方法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 木内雄二：画像認識のおはなし，日刊工業新聞社，p1，1984
- 2) NairH.：Reconstruction of planar boundaries from incomplete information, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol.39, pp.383-387, 1987
- 3) Stestrom J.R. and Connolly C.I.: Construction of object models from multiple images, International Journal of Computer Vision, Vol.9, pp.185-212, 1992
- 4) 太田和範：ステレオビジョンを利用した画像処理について，山梨大学卒業論文，1999
- 5) 高木幹雄他：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，pp.539-540, 1992
- 6) 和田俊和他：Hough変換に基づく図形検出法の新展開，情報処理，Vol.36, pp.253-270, 1995
- 7) John CANNY：A Computational Approach to Edge Detection, Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, pp.679-698, 1986
- 8) 高木幹雄他：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，pp.553-564, 1992