代表点教示のための局所方向ヒストグラムステレオ法*

前川 仁**, 森 昭人***, 竹村 功***, 仲田 周次****

Stereo Method Using Local Direction Histogram for Reference Points Teaching*

by Hitoshi Maekawa**, Akihito Mori***, Isao Takemura*** and Shuji Nakata****

In off-line teaching of a robot, motion data is generated on model space in a computer. The data is then to be converted to the coordinate system in real working space. This paper presents a simple stereo method for this coordinate transformation.

The stereo method runs as follows. Each stereo image is divided into small rectangle sub-areas for fast feature extraction. In each area, a local direction histogram (LDH) is calculated from intensity gradient. By the shape of LDH, sub-areas which include vertices of the object are selected as feature areas. Then 3-D location of vertices are calculated by stereo-corresponding of these feature areas. The transformation matrix between model space and real working space is obtained by selecting corresponding vertices as reference points from stereo data and from the object model.

The method was implemented on a personal computer. A result of simulation experiment of reference points teaching is shown.

Key Words: off-line teaching, reference points teaching, transformation matrix, stereo method, local direction histogram (LDH)

1. ま え が き

ロボットのオフラインティーチングでは、CAD データを参照して計算機内部即ちモデル空間で教示データを生成する。この教示データは実作業環境と独立している再配置可能（リロケータブル）なデータであるため、レイアウト変更や多数のロボット群への対応などが可能であり、生産ラインを柔軟に支援できる利点がある。

しかし、その教示データを実ロボットにロードするには、モデル空間から実作業環境への座標変換が必要である。その座標変換は、実作業環境のいくつかの点とモデル空間との対応を教示することで計算できる。本論文では、このように実作業環境とモデル空間との幾つかの点の対応を教示することを代表点教示と呼ぶ¹⁾。

このような代表点教示以外に、ロボットに作業箇所を教える方法はいくつか考えられる。例えばアーク溶接におけるアークセンサも、その一つに数えられることがある。しかし、アークセンサは施工時のアークを利用し、溶接線付近の誤差や施工時の変形などの外乱を吸収するためのものであり、アークセンサ単独でワークのどの部分が溶接線であるか検出する能力は持たない。一方、コーナー部を教示データ無しに発見し、それを追跡するロボットが工夫されているが、対象物の基本構造を箱形構造物に限定するなどにより、形状特徴に関する知識を有効にロボットシステム化したものであり、対象の大域的な基本構造が変わってもそのまま適用可能である訳ではない。これを逆に言えば、観測範囲を大域情報によって制限してやれば、これらのインプロセスセンシング法は極めて有効であることになる。

以上のことから、代表点教示は、CAD モデルなどの設計

情報と現実の作業対象物の観測の対応付けから作業対象の大域的な位置・姿勢を得るための手段と位置付けるのが適切であり、アークセンサなどのインプロセス・局所センサと相補う性質を持つものであることが分かる。

このため、本論文では非接触で代表点の計測が可能なステレオビジョンの適用を検討し、局所方向ヒストグラム²⁾を用いた代表点教示法を提案する。

2. 代表点教示と幾何学モデル

2.1 代表点教示とその役割

モデル空間及び実作業空間の点の同次座標表現（4 次の列ベクトル）を、それぞれ x_i , y_i とする。モデル座標系から実作業環境系への座標変換行列を A （4 次の正方行列）とすれば、

$$y_i = Ax_i \quad (1)$$

により、モデル空間で生成されたオフラインティーチングデータ $\{x_i\}$ を実作業空間のデータ $\{y_i\}$ に変換することができる。よく知られているように、行列 A の左上 3 行 3 列の小行列は両座標系の間の回転即ち姿勢を表し、右上 3 行 1 列の小行列は両座標系間の平行移動、即ち（相対）位置を表している。

対応する各点を同一の添字で表し、実作業環境に置かれた作業対象物（ワーク）上の 4 点とそれに対応するモデル上の点を並べて

$$X = (x_1 | x_2 | x_3 | x_4) \quad (2)$$

$$Y = (y_1 | y_2 | y_3 | y_4) \quad (3)$$

と表すと、

$$Y = AX \quad (4)$$

であるから、行列 X が正則であれば変換行列 A は

$$A = YX^{-1} \quad (5)$$

で求めることができる。即ち、実ワーク上で同一平面上にはない 4 点の同次ベクトルを並べて正則行列 Y をつくり、それに対応するモデル上の 4 点で正則行列 X をつくれば、式(5)によって座標変換行列 A を求めることができる。

ワークの代表点 Y の計測法は、3 次元触針式計測器による方法、実ロボットの教示を計測器として用いる方法など

*原稿受付 平成7年3月9日 平成6年6月軽構造接合加工研究委員会で発表

**正 員 埼玉大学工学部 Member, Saitama Univ., Faculty of Eng.

*** 大阪大学工学部 Osaka Univ., Faculty of Eng.

****正 員 大阪大学工学部 Member, Osaka Univ., Faculty of Eng.

% 頂点の定義

```
vertex(v1,0,0,0).
vertex(v2,136,0,0).
vertex(v3,136,200,0).
vertex(v4,0,200,0).
vertex(v5,6,0,6).
....
```

% 稜線の定義

```
edge(e1,v1,v2,1).
edge(e2,v2,v3,1).
edge(e3,v3,v4,1).
edge(e4,v4,v1,1).
edge(e5,v5,v6,1).
....
```

% 面ループの定義

```
flp(lp1,[e4,e3,e2,e1]).
flp(lp2,[e9,e10,e11,e12]).
flp(lp3,[e1,e15,e5,e14,e9,e13]).
flp(lp4,[e2,e16,e6,e15]).
flp(lp5,[e3,e18,e11,e17,e7,e16]).
....
```

% 面分の定義

```
face(f1,[lp1]).
face(f2,[lp2]).
face(f3,[lp3]).
....
face(f7,[lp7,lp8,lp9]).
....
```

Fig. 1 Prolog representation of an object by B-rep.

が考えられるが、ここでは、非接触で計測可能なステレオビジョンの適用を検討する。

2.2 対象物の幾何学モデル

本論文では、板を組み合わせた部材をロボットによって溶接などを行う状況を扱う。施工対象物（ワーク）の幾何学モデルは多面体の境界表現（B-rep）^{7,9)}を用いており、Fig. 1に示すように、頂点、稜線、面ループ、面分の階層構造をそのまま prolog 表現している²⁾。

この表現法では、頂点（述語 vertex）が3次元座標を持っており、稜線（edge）、面ループ（flp）面分（face）はそれぞれの位相構造を保持している。

3. 局所方向ヒストグラム（LDH）によるステレオ法

3.1 ステレオ法の概要

ステレオ法では、左右画像の特徴点あるいは特徴領域を対応付けて視差 d を求めることにより、その部分の3次元座標を求める³⁾。即ち、2台のカメラを距離 l だけ離して光軸が平行になるように水平に配置し、左右の画像上の対応点の座標をそれぞれ (x'_L, y'_L) , (x'_R, y'_R) とする。このとき、視差は

$$d = x'_L - x'_R \quad (6)$$

で定義される。また、観測系の原点を両カメラの中央にとり、奥行き方向を z 軸にとる。このとき、対応が得られた点の観測系での座標 $(x, y, z)^T$ は、

$$x = \frac{2}{l} \frac{x'_L + x'_R}{d}, \quad y = \frac{2}{l} \frac{y'_L + y'_R}{d}, \quad z = l \frac{f}{d} \quad (7)$$

（ f はレンズ中心から撮像面までの距離）

で与えられる⁴⁾。さらに(6)式を用いて x'_R , y'_R を消去し、

$$x = \frac{2}{l} \left(\frac{2x'_L}{d} - 1 \right), \quad y = \frac{2}{l} \left(\frac{2y'_L}{d} - 1 \right), \quad z = l \frac{f}{d} \quad (8)$$

とすることができる。

特徴点ベースの接近法は、特徴点が正確に抽出できれば対応づけによる3次元計測が比較的高精度で行える³⁾。特徴点としては、濃淡画像にラプラシアン・ガウシアン (LOG) フィルタをかけ、そのゼロ交差点を用いる方法などが提案されている⁵⁾。しかし、LOG フィルタはガウス関数のパラメータ σ を選ぶことによって帯域特性を調節できる点で汎用性が高い反面、耐ノイズ性を考慮するとあまり小さな

σ にすることはできず、畳み込みマスクが大きくなって計算量が増加しがちである。

本研究のように、対象が比較的限られている生産工程を想定している場合、より簡便に画像から特徴部分を検出する方法が望まれる。一方、前述のように、代表点教示という観点からは、対象物の精密計測を行うのではなく、その概形を大域的に認識し、アークセンサなどの局所センサを相互補間的に活用できる方が、施工時の外乱などへも対応できてより現実的である。そこで、本研究では対象の特徴点の存在する小領域を局所方向ヒストグラム (LDH: Local direction histogram) によって簡便に検出する領域ベースの方法を提案する。

3.2 LDH による特徴抽出

Fig. 2 は、画像中で濃淡変化のある小領域での濃度勾配と、その小領域における局所方向ヒストグラム LDH を模式的に示したものである。画像中の点 (x, y) における濃度（輝度）を $h(x, y)$ とすると、その濃度勾配

$$g(x, y) = \text{grad } h(x, y) \quad (9)$$

は、次の式で計算できる。

$$|g| = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta V^2} \quad (10)$$

Fig. 2 Intensity gradient and local direction histogram (LDH).

1	0	-1
1	0	-1
1	0	-1

ΔH

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

ΔV

Fig. 3 Operators to calculate intensity gradient.

$$\phi(g) = \tan^{-1}(\Delta V / \Delta H) \quad (11)$$

ここに ΔH , ΔV は、濃度の水平方向、及び垂直方向の差分。本研究では、簡便さとノイズ除去の兼ね合いから、Fig. 3 に示す 8 近傍マスクを用いてその中央画素での濃度勾配を求める。

エッジ方向 θ は濃度勾配方向 ϕ と垂直、即ち

$$\theta(g) = \phi + \frac{\pi}{2} \quad (12)$$

である。ここで画像中の任意の小領域に着目し、その中で $|g|$ がある値を越えた画素を式(12)で示される各方向について累積したものを、その小領域の方向ヒストグラム LDH と呼ぶ。

Fig. 4 に、LDH を計算するための画面の領域分割を模式的に示す。LDH は、図中の網かけで示した小領域で計算する。これを半分ずつ重複させて画像全体を覆う。LDH の計算は各領域で他と独立に行うことができる。また、各領域をさらに Fig. 4 (b) で示すサブ領域に分割し、領域の中央部に重みをつけた特徴抽出ができるよう配慮している。

本研究の対象物は多面体であるから、稜線のまわりでは、Fig. 2 のように濃度勾配の方向が一方向に揃う。また、頂点のまわりには複数の稜線が存在するはずであるから、その局所方向ヒストグラム (LDH) には稜線数に対応したピークが表われることになる。従って、方向を量子化して N 個

Fig. 4 Division of image plane into sub-areas.

Fig. 5 Schematic illustration to define a feature vector of an area by LDH.

の方向コードで表し、各方向コードにおける画素数を成分とするベクトル

$$q = (S_0, \dots, S_i, \dots, S_{N-1}) \quad (13)$$

をその領域の特徴ベクトルとすればよい。本研究では $N=16$ すなわち 16 方向にコード化している。実際には、稜線数に対応していくつかの分離したピークをもつ領域だけに着目すればよいから、Fig. 5 に示すように隣接部を含めた面積を各々のピークの強度とし、

$$q^i = (S_p, S_q) \quad (14)$$

のように扱うのが便利である。

3.3 LDH 法によるステレオ計測手順

以上に述べた LDH 法によるステレオ計測の手順は以下の通りである。

1. 左右両画像で濃度勾配から LDH を算出する
2. 左右両画像で LDH により特徴領域を抽出する
3. 左右両画像の特徴領域の対応づけにより平均視差を算出する

4. 一方の画像で頂点検出と稜線追跡を行う

ステップ 1 の処理で、濃度勾配の大きさ $|g|$ がある値以上の画素から成る画像を得ることができる。これは稜線に対応する部分が強調された画像であり、方向画像と呼ぶ。

ステップ 2 で、前述の特徴ベクトルにより、複数の稜線が交差している小領域を特徴領域として抽出する。これ以後の処理は、抽出された特徴領域に対してのみ行う。

ステップ 3 では、エッジポーラ線拘束と視差の連続性の拘束を用いて偽対応のチェックを行う。即ち、左右画像で LDH のピーク数とピーク位置即ち方向コードが一致する特徴領域について、各エッジ方向に対応する画素グループ同士での対応をチェックする。その後、左画像の小領域の方向画像をテンプレートとして、相関法で視差を求める。この段階で、左右の対応づけに成功した小領域の“平均視差” d が得られる。

ステップ 4 で、視差が求まった左画像の小領域内での頂点検出を行う。即ち、この小領域内には、複数の稜線が存在することがすでに分っているため、各エッジ方向に対応する画素グループの中心線の交点を算出することによって画像上の頂点座標 (x_L, y_L) を求め、式(8)によって実作業空間での頂点座標が求まる。さらに、他の小領域を含めた範囲での稜線追跡を行う。稜線まで求めることによって、モデルとの照合が容易となる。

4. 実験結果及び検討

以上のアルゴリズムをパーソナルコンピュータ (PC) に実装し、実験を行った。撮像対象は、ある小物部品を頂点数 45、稜線数 69、面分数 25 の多面体で近似したモデルで、先の Fig. 1 に示したのは、その幾何学モデルの一部である (モデル全体は簡単のため省略した)。

4.1 ステレオ観測

Fig. 6 は、画素数 256×240 、 $f=25$ [mm] の CCD カメラを撮像間隔 $l=60$ [mm] として撮像し、PC のフレームメモリに 8 ビット量子化で取り込んだステレオペアのモニタ出力である。また、対象までの距離は約 1 m である。撮像したステレオ画像を Fig. 4 (b) に示す 32×32 画素の小領域に分割し、そのおのおのを半分の 16×16 画素ずつオーバーラップさせて Fig. 4 (a) のように全画面を覆う。このように

Fig. 6 Original stereo pair image.

Fig. 7 Extracted feature areas on left image. Feature areas are shown by small rectangles.

% 頂点

vertex(v1,-6,1022,94).
 vertex(v2,119,1117,22).
 vertex(v3,33,1043,11).
 vertex(v4,25,1049,32).
 vertex(v5,-113,1065,8).
 vertex(v6,-54,1026,30).
 vertex(v7,86,1019,2).
 vertex(v8,-55,1044,99).
 vertex(v9,8,1065,95).
 vertex(v10,24,1071,116).
 vertex(v11,-75,1145,28).
 vertex(v12,13,1025,23).
 vertex(v13,121,1148,141).
 vertex(v14,-78,1174,142).
 vertex(v15,22,1069,111).

% 稜線

edge(e1,v1,v12).
 edge(e2,v1,v8).
 edge(e3,v1,v10).
 edge(e4,v2,v13).
 edge(e5,v2,v7).
 edge(e6,v3,v5).
 edge(e7,v4,v12).
 edge(e8,v5,v11).
 edge(e9,v7,v5).
 edge(e10,v9,v15).
 edge(e11,v11,v14).
 edge(e12,v12,v3).
 edge(e13,v13,v14).

Fig. 8 Prolog representation of obtained vertices and edges.

分割した全16×15個の各小領域ごとに濃度勾配を求め、LDHを計算する。

濃度勾配がある値以上となっている画素を表示した方向画像が Fig. 7 である。同図には、特徴ベクトル q 、即ち LDH の形状によって抽出された特徴領域を長方形で示してある。この結果から、頂点の存在する小領域が特徴領域として抽出されていることが分かる。

これらの対応計算より頂点座標を求め、さらにそれらを

Fig. 9 Line drawing from obtained vertices and edges of Fig. 7.

結ぶ稜線を隣接小領域の追跡で得た。その結果を Fig. 8 の prolog 表現で示す。ここでの頂点 (vertex) 番号 (v1-v15) 及び稜線 (edge) 番号 (e1-e13) は、検出された順につけたものであり、Fig. 1 の内部モデルとは独立である。

これを再描画したものが Fig. 9 である。同図では、両端に頂点が検出された稜線を実線で示しており、それぞれ Fig. 7 の稜線 (e1-e13) に対応している。Fig. 9 において、頂点 v3 と頂点 v5 を結ぶ稜線 e6 (Fig. 8 参照) は誤りであるが、他の稜線に位相的な誤りはない。

本手法では、最初の小領域中の頂点が得られる。この時点でその頂点から出ている稜線の存在も検出されるが、それらを隣接小領域に追跡していても、反対側の頂点が常にみつかるとは限らない。Fig. 9 の破線は、このように開始頂点はあるが終端頂点はみつからない稜線を示しており、これを不完全稜線と呼ぶ。

4.2 代表点教示

Fig. 8, Fig. 9 で得られた頂点から 4 頂点の組を 4 つ、即ち (v14, v13, v2, v1), (v14, v13, v2, v7), (v14, v13, v2, v5), (v8, v10, v12, v1) を選び、これと対応するモデル頂点から、式(5)によって 4 個の変換行列を計算し、その平均をとって

$$A = \begin{pmatrix} -0.3 & 1.0 & 0.0 & -77.7 \\ -0.7 & 0.2 & 0.2 & 1144.8 \\ -0.1 & 0.0 & 1.1 & 17.6 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{pmatrix}$$

Table 1 Comparison of length of edges between object model and observed data.

番号	観測値	変換値	モデルの値
1(e13)	201	203	200
2(v2-v11)	196	203	200
3(e9)	204	203	200
4(e11)	118	123	110
5(e4)	123	123	110
6(e8)	91	100	130
7(e5)	105	100	130

(各数値の単位は mm)

を得た。

代表点教示は、観測された一部のデータから変換行列 A を求め、次に、必要な点の作業空間での座標をその A によって求める操作である。Fig. 8 の $v11 = (-75, 1145, 28, 1)^T$ に対応するモデル上の点は $x = (6, 0, 6, 1)^T$ であり、 $v11$ をモデルデータから再計算すると

$$A_x = (-79.2, 1141.4, 23.8, 1)^T$$

が得られる (単位は [mm])。

代表点教示の誤差を推定するために、稜線の長さを観測結果とモデルデータと比較したものが Table 1 である。この表において、「観測値」とはステレオ観測データ Fig. 8 から直接計算した値、「変換値」とはモデルデータを上記 A によって変換した結果による値をそれぞれ示す。また、頂点 $v2$ と頂点 $v11$ 間を結ぶ稜線は、稜線追跡からは得られていないが、両頂点から延びる不完全稜線が接続されたと仮定したときの値を番号 2 に示した。

これをみると、ワークのアウトラインを形成する長い稜線のうち、カメラ光軸とほぼ直交する $e13$, $e9$ などの誤差は 3 mm 程度であるのに対し、カメラ光軸との角度が小さい $e8(v5, v11)$ と $e5(v2, v7)$ などの誤差は 3 cm となっている。測定精度は実際の生産システムにとって許容できるか否かが重要であるため、この値の評価を単独で下すことは必ずしも容易でない。しかし、インプロセスでの修正機能としてのセンサを前提とするなら、少なくとも前者はワークの大域計測として許容範囲内であると思われる。

4.3 検討

ここで、施工のためのツールとしての本方法の可能性について検討する。

[ステレオ観測法]

本手法を施工との関連で考えると、施工上重要な基準となる長い稜線や、溶接線を含む稜線を観測系に正対するように配置することにより、数 mm 以下の変換精度が容易に得られることを示している。また、一旦対象の配置に関する大域的な情報が得られれば、次のステップの一段階詳細な観測を実施することは可能であり、目的に応じて粗から精への観測戦略 (coarse to fine approach)¹⁰⁾ の実現が期待できる。

本実験では 2 台のカメラを平行に固定配置する方法でステレオ画像を得ているが、観測用のロボットにカメラを搭載し、これを移動させて撮像する移動ステレオを採用すれ

ば、上記のような観測は可能である。また、移動ステレオ以外に、三眼視による方法も精度向上に有効であると思われる¹¹⁾。

[アルゴリズム]

本手法は、画像を分割した局所領域で LDH を求め、それによる特徴領域だけをステレオの対応付けに用いる点に特色がある。LDH 計算は各領域ごとに独立に行うことが可能であるため、特徴抽出までの計算は並列化による高速化が容易である。

一方、特徴抽出を領域ベースの LDH で行うため、複数の平行な稜線が存在する領域ではそれらを分離できない。板構造物の大域計測では、「板」は厚みのないものとして扱われるためむしろ好都合であるが、板の上面と下面を対応付けるような誤対応が起こる。本手法単独でこれを解決するのは困難であり、前述の粗-精戦略や、一旦モデルとの照合を行った後、その知識を利用して再観測を行うトップダウンアプローチとの融合が必要であり、今後の課題としたい。

5. む す び

オフラインティーチングにおける代表点教示のため、局所方向ヒストグラム (LDH) による特徴領域に基づくステレオ法を提案した。ステレオ撮像データからいくつかの頂点を選び、それを用いて変換行列が作成できることを示した。

問題点として、カメラ光軸と平行に近い稜線の観測精度が低くなることがあげられるが、LDH 算出小領域の再分割、すでに得られた大域情報を利用した再観測などを取り入れることが必要と考えられる。即ち、モデルとの照合を一度行なった後、さらにデータを見直して観測精度をあげるトップダウン的の手法の併用が必要である。

参 考 文 献

- 1) 前川, 牧野, 気賀, 飯島, 仲田, “アーク溶接ロボットのオフラインプログラミングシステムにおけるロボット動作軌跡処理”, 溶接学会論文集, Vol. 6, No. 2, pp. 245-251 (1988).
- 2) 前川, 長井, 堀部, 仲田, “部材表現による板構造物のモデリングとその部分特徴に関する一考察”, 溶接学会論文集, Vol. 9, No. 4, pp. 507-512 (1991).
- 3) Umesh R. Dhond and J.K. Aggarwal, *Structure from Stereo—A Review*, IEEE Trans. SMC, Vol. 19, No. 6, pp. 1489-1510 (1989).
- 4) B.K.P. Horn, *Robot Vision*, The MIT Press, McGrawhill (1986) (NTT ヒューマンターフェース研究所 RVT 訳, “ロボットビジョン”, 朝倉書店, p. 231 (1993)).
- 5) D. Marr and E. Hildreth, *Theory of edge detection* Proc. Royal Society of London, Vol. B207, pp. 187-217 (1980).
- 6) G. Xu, M. Asada and S. Tsujii, *Hierarchically Controlled Motion Stereo*. Trans. on IEICE, Vol. J69-D, No. 11, pp. 1765-1773 (1986).
- 7) R. Hillyard, *The build group of solid modelers*, IEEE CG & A, pp. 43-52 (1982).
- 8) 依田, 本池, 江尻, 弓仲, “実時間画像を用いた待客検出方式”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J69-D, 11, pp. 1679-1686 (1986).
- 9) 高橋, 富田, “ステレオ画像の 3 次元シーンの記述”, 情報コンピュータビジョン研究 46-8, pp. 69-78 (1987).
- 10) 大田, 池内, “3 次元情報の再構成とモデル化”, Oplus E 別冊, 1986年11月, pp. 108-127.
- 11) 北村, 谷内田, “三眼視による三次元情報の計測”, 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 2, pp. 131-138 (1987).