能動視点を持ったステレオマシンビジョンシステムの開発*

水本 洋** 藪田義人** 小林弘典*** 有井士郎***

A Binocular Machine Vision System using an Active View Point

Hiroshi MIZUMOTO, Yoshito YABUTA, Hironori KOBAYASHI and Shiro ARII

Main difficulty of binocular vision systems is how to correspond the right and left cameras' image data. A binocular machine vision system proposed in the present paper has two CCD cameras, one of which has a laser pointer that actively indicates the view point of the camera. Using this active view point, the system rotates both cameras to coincide their center of views. Then a feature point in one camera's image is easily corresponded to another because the true corresponding point can be selected from points discovered on an epipolar line by using the information of the distance between these points and the center of view. Experiments show that the proposed system recognizes the feature points indicated by LEDs and corners of a square plate, and calculates the coordinates of these points and corners.

Key words: binocular vision, epipolar line, machine vision, robot vision, view point

1. はじめに

人間が行っている両眼立体視と同じように2台のカメラを用いて対象物の像を得ることで、その対象に関する3次元情報を直接的に得ることができると考えられている。そこでこのようなステレオマシンビジョンシステムを産業用ロボットや自立型歩行ロボットなどに組み込み、機械自らに周囲の状況に応じて危険回避等を行わせたり、非接触の距離センサとして用いる¹⁾などの研究が行われている。このような立体視を行うためには、2台のカメラより得られる画像データ間の対応関係を正確に知る必要がある。この2枚の画像間の対応付けを行う方法として、画像間の明るさなどの局所相関を求め対応付けを行う局所相関法^{1)~4)}がある。この方法では局所的な類似性だけを見るため、探索の領域が大きくなる、また類似した複数の対応候補が生じる場合が多い、などのことから対応を求めることが困難である。また2枚の画像中のエッジなどの特徴を利用する特徴照合法⁴⁾⁵⁾、疎密法⁴⁾⁵⁾、動的計画法を用いた対応付け⁴⁾⁵⁾、3台以上のカメラを用いる多眼視⁴⁾⁵⁾、カメラ1台を一定の軌道に沿って移動撮影する移動視³⁾⁵⁾等の方法もあるが、標準的な方法として確立されたものがないのが現状である。

これらの手法とは別に、一方のカメラを能動的なレーザスポット光やスリット光に置き換えることで立体視の問題点である2枚の画像間の対応付けを解決しようとする投光法が提案されている⁶⁾。近年、符号化法⁶⁾などの方法によって、この手法で問題であった処理速度の高速化が図られている。

そこで本研究では、立体視における左右2枚の画像の対応付け問題をより簡便に解決するために受動的な画像処理手法に能動的な投光法を組み合わせた方法を提案する。この方法でも通常の方法と同じく2台のカメラを用いるが、一方のカメラにレーザ光発射管を取り付け、カメラの光軸に沿ってレーザ光を照射することで対象物上におけるカメラの視点を常に能動的に表示できるようにしている。ここで、「視点」とは、各カメラの画像中心に撮像される空間上の点と考える。この能動的に示

された視点(レーザスポット)に他方のカメラの視点を一致させることで左右の画像間の最初の対応付けは、このレーザスポットについて機械的になされることになる。提案する方法の特徴は、左右のカメラの視点が一致した空間上の点を「注視点」と定義し、各カメラの視点が注視点で一致しているという事実をもとに、両画像中で検出された特徴点の像と視点の像との位置関係や方向を調べることで、特徴点間の対応付けを行おうとする点にある。このような考えのもとに能動視点を持ったマシビジョンシステムの試作を行い、立体視における左右の画像間の対応付けに対する有効性を実験的に検証した。

2. 能動視点を用いた両眼立体視

2台のカメラを用いて両眼立体視を行う場合を考える。このとき、左右のカメラにより3次元の立体から2次元に投影された画像を用いて立体の空間座標を再現するには、左右の画像間の対応付けを行わなければならない。本システムではまず、左右の画像間の対応付けを行うために、一方のカメラの視点を能動的に明示して各カメラを回転させることで、機械的に両カメラの視点を注視点で一致させる。すると、この注視点の座標は以下に示すように三角測量の考えにより算出できる⁴⁾。図1に示すように、左右カメラのレンズの主点を L_L, L_R とし、注視点を O とし、 $\triangle OL_L L_R$ を考える。ここで、カメラのレンズの主点から、画像面上までの距離を f 、左右それぞれのカメラの画像面上の注視点の像を O_L, O_R 、輻輳角を θ_L, θ_R 、左右のカメラ間の基線 $L_L L_R$ の長さを l とすると、注視点 O から基線に下した垂線の長さ z_d とその垂線の足と L_L との距離 x_d は次式で与えられる。

$$x_d = \frac{\tan \theta_R}{\tan \theta_L + \tan \theta_R} \cdot l \quad (1)$$

$$z_d = \frac{\tan \theta_L \cdot \tan \theta_R}{\tan \theta_L + \tan \theta_R} \cdot l \quad (2)$$

次に空間にある任意の点 P (物体上の特徴点)の座標測定について考える。注視点 O を空間座標の原点と考え、 $\triangle OL_L L_R$ を含む平面を基本平面とし、水平方向を x 軸、基本平面(紙面)に垂直な方向を y 軸、そして奥行き方向(上方向)を z 軸とした左手系の直交座標系により点 P の空間座標 (x_P, y_P, z_P) を算出する。

* 原稿受付 平成7年12月27日

** 正会員 鳥取大学工学部(鳥取市湖山町南4丁目101番地)

*** 鳥取大学工学部

Fig. 3 Flow chart for the machine vision system

の垂直軸まわりに回転させて画像の水平位置をずらすことでこのレーザスポット像の中心を画像の中心と一致させ、左右カメラの視点を注視点に一致させることができる。

立体視の第2段階は左右のカメラの視点が一致した後で得られる画像データをそれぞれ処理し、視点の像および画像データ中に含まれるエッジ、角、色の変化など何らかの特徴を持った点（画素）の抽出を行う。そして第3段階として左右の画像データそれぞれについて特徴点の抽出が完了した後、得られた特徴点の像それぞれについてエピポーラ対応と次節で述べる注視点を利用した拘束条件を用いて左右の像の対応付けを行う。最後に式(3)～(5)を用いて各特徴点の空間座標を求める。このようにすることで立体の形状をとらえることが可能となると考えられる。

4. 能動視点を用いた立体の形状測定

本研究で提案したエピポーラ対応と注視点を利用した拘束条件を用いる手法が立体視における左右画像間の対応付け問題に対して有用であることを確認するために次のような2つの実験を行った。なお実験での座標系は左手系とした。

4.1 特徴点をLEDで表示した場合

第1の実験はすべての特徴点と同じ特徴を持つ場合であり、このような点のパターンが反復することを想定したものである。図4に示した150×200×100(mm)の箱を平面上に取り付け、箱中黒丸で示す位置に特徴点として緑色のLEDを合計8個配置した測定試料を用いた。この試料をシステムのカメラから約1.5m離れたところに設置し、図3に示した手順で立体視を試みた。

実験を開始するとシステムはまず左右のカメラの視点を一致させる。次に、それぞれの画像データよりLED像の抽出を行う。赤色差信号の場合と同様に緑色差信号を計算し、緑色の領域をLEDの像として抽出し、像の重心を求めてそれを特徴点の画面上の座標とする。次に左右それぞれの画面において、抽

Fig. 4 A solid body with LEDs

Table 1 Correspondence between right and left views

Labels on the left screen (ratio)	Estimated labels on the right screen (ratio)	◎ Correspond × Not correspond	Calculated 3-D coordinates
L_0 (1.124)	R_0 (1.057) R_1 (0.918)	◎ ×	$P_0(-127, 99, 134)$
L_1 (0.941)	R_0 (1.057) R_1 (0.918)	× ◎	$P_1(-78, 98, 23)$
L_2 (0.851)	R_2 (0.855)	◎	$P_2(62, 96, 0)$
L_3 (1.063)	R_2 (0.855) R_3 (1.196)	× ◎	$P_3(126, 95, 95)$
L_4 (1.203)	R_4 (1.054)	◎	$P_4(-135, -88, 131)$
L_5 (1.026)	R_6 (1.180) R_7 (0.842)	◎ ×	$P_5(124, -92, 97)$
L_6 (0.895)	R_4 (1.054) R_3 (0.896)	× ◎	$P_6(-80, -92, 32)$
L_7 (0.798)	R_7 (0.842)	◎	$P_7(61, -92, 9)$

出されたLEDの像に画面左上より抽出された順にラベル付けを行う。左右画面それぞれについて抽出された特徴点の対応付けを行うために、このラベル付けされた左画面の各特徴点に対応する右画面の特徴点を、式(6)で表された直線（エピポーラ線）上について探索する。このとき、複数の対応候補が見つかる場合があるので、得られた候補の中から正しい対応を得るために次のような拘束条件を加えた。つまり、左右カメラの視点が注視点について一致していることより、左右それぞれの画面について注視点の像から各特徴点までの距離と平均距離を求め、各特徴点までの距離と平均距離との比を拘束条件とすることで、右画面で見つけられた候補点との対応付けを行うものである。

表1に対応付けの結果をまとめて示す。左画面上のLEDには $L_0 \sim L_7$ 、右画面上のLEDは $R_0 \sim R_7$ のラベル付けがされる。括弧内は拘束条件として用いた各点の距離比を示す。たとえば、エピポーラ線上の探索より L_0 に対しては、 R_0, R_1 の2つの候補点を得られた。ここで L_0 の視点からの距離比が、1.124

Fig. 5 LEDs and measured points

であることより、 L_0 は平均よりも視点から遠いことがわかる。したがって、この L_0 に対して、対応候補点としてあげられた R_0, R_1 のうち距離比が L_0 のそれにより近い R_0 が対応点であると決定する（表中第3欄の◎印）。以下同様に、 $L_1 \sim L_7$ についての対応点を探し、表1のように左右の画面の対応付けを行うことができる。このようにして対応関係が明らかになれば式(3), (4), (5)を用いて第4欄に示す各LEDの空間座標 $P_0 \sim P_7$ を算出することができる。

図5に表1の第4欄に示した特徴点 $P_0 \sim P_7$ の位置（白丸）と試料上のLEDの位置（黒丸）を示す。図5より、試料上に設置された各LEDに対して算出点 $P_0 \sim P_7$ はねじれた配置になったものではなく、左右の画像間の対応付けが正しくなされたことがわかる。このように能動視点によって機械的に一致した左右カメラの視点で最初の対応点となることを利用し、視点から各特徴点までの距離比を拘束条件として左右の画像中の特徴点の位置関係を調べることで、同様の特徴を持つ点（LED）すべてについてその対応関係を明らかにできることがわかった。

システムによって算出された特徴点の空間座標値と、実際のLEDの配置との間には図5に示したように各軸についてそれぞれ、 x 軸方向：1～10 mm、 y 軸方向：1～8 mm、 z 軸方向：0～34 mmの範囲で誤差が生じている。本システムの画像処理における分解能は x, y 軸方向に関して約1 mm/pixel、 z 軸方向に関しては約10 mm/pixelである。カメラ駆動系の分解能（0.01°）と測定距離から算出される位置分解能が0.25 mmであることより、LEDの光量の個体差などの影響を考慮してもシステムの測定誤差は画像処理の分解能内に収まっていると考えられる。しかしながら、点 P_0, P_1, P_4, P_6 の図の左側に配置された4つのものの z 方向の誤差の大きさがどれも約30 mmとなっているのに対し、右側に配置された残りの4つの点の誤差は少なくなっている。これは測定時のカメラの光軸が試料面に垂直になっていなかったためと思われる。

測定には左右カメラの視点の一致、LEDの対応付け、LEDの空間位置算出すべてを終了するまで約300 s程度の時間を要

Fig. 6 Algorithm of correspondence between right and left images

した。この測定時間のうち、そのほとんどは左右のカメラの視点の機械的な一致に費やされた。このように測定精度および測定時間の問題は残るが、能動視点を利用することで、左右の画像間の対応付けが従来のような複雑な処理を施さずに行うことができ、特徴点の情報量が少ない反復パターンに関する問題にも対処できることが確認できた。

4.2 平面試料の角検出を行った場合

第2の実験はより実際の状況に近い条件でのシステムの有効性を検証するために、左右それぞれの画像を処理して得られる角などの特徴に関する対応付けを想定したものである。したがって、この実験では特徴点である角を構成する線分の向きに関する情報なども利用できることになる。

実験は、赤色の1辺300 mmの正方形の板を測定試料とし、背景を白色として行った。背景が白色であるので得られる画像データより赤色差信号を算出することで、エッジ抽出を行う。次に、特徴点とする角部検出のために、図6に示すようにこの抽出された測定物のエッジを小領域に分割し、各領域ごとにエッジを直線化し、図形に対して反時計回りにベクトルで表現する。そして、ベクトルトレサ法⁹⁾を用いて図形の角 P_L, P_R を見つけ出す。この時、見つけたそれぞれの角について、角へ入射するベクトルを $V1$ 、角から出ていくベクトルを $V2$ とする。対応付けはまず、第1の実験と同様に、右画面上のエピポーラ線を探し左画面上の特徴点に対応する点の候補を見つけて出す。対応点は、得られる候補の中から次のように決定する。図6に示した視点の像 O_L を原点とする左画像上に存在するベクトル $(V1_{Li}, V2_{Li})$ で構成される i 番目の角（特徴点） $P_{Li}(x_{Li}, y_{Li})$ に対応する右画像上の角を求める場合を考える。エピポーラ対応によって視点の像 O_R を原点とする右画像上に角 $P_{Rij}(x_{Rij}, y_{Rij})$ ($j=1, 2, \dots, n$) が見つけたと、それぞれの角を構成するベクトルを $(V1_{Rij}, V2_{Rij})$ とする。

このとき左画面上の角（特徴点）に対する右画面上の対応する角（点）は、式(9)によって得られる評価変数 d が最小となるものであると決定する。

$$d = a(x_{Li} - x_{Rij})^2 + b(y_{Li} - y_{Rij})^2 + (V1_{Li} - V1_{Rij}) + (V2_{Li} - V2_{Rij}) \quad (9)$$

i : 左画面の i 番目の特徴点

j : 左画面の i 番目の候補点に対する右画面の j 番目の候補点

x_{Li}, y_{Li} : 左画面上の i 番目の特徴点の x, y 座標

x_{Rij}, y_{Rij} : 左画面上の i 番目の特徴点に対する右画面の j 番目の候補の x, y 座標

a, b : 座標値とベクトル値の重みを調整する係数

$V1_{Li}, V1_{Rij}$: 角へ入射するベクトル

$V2_{Li}, V2_{Rij}$: 角から出ていくベクトル

この方法により左右画面での像の対応関係を明らかにした後、

Fig. 7 A square plate and location of calculated corners

点Pの空間座標は式(3),(4),(5)より算出する。

図7には上述の方法によって測定、算出された各角の空間的配置を示す。図は測定を13回行い、対応付けを行った後に算出された特徴点を空間的にプロットしたものである。図中 $C_0 \sim C_3$ と示したものは実際の試料の角部を表している。そして黒丸の点は z 方向に関して測定試料よりも手前に、そして白丸の点は試料よりも奥にその座標が算出された特徴点を表している。図示したように算出された特徴点はすべて試料の角部 $C_0 \sim C_3$ で囲まれた正方形の内側に配置され、それらはすべて4つの角部のいずれかの近傍に配置されている。このことより算出結果はそれぞれ測定試料の角部 $C_0 \sim C_3$ に対応していることがわかる。したがって、左右のカメラより得られる画像データそれぞれについて測定試料の4つの角の抽出、対応付けが正確になされたことがわかる。

しかしながら、算出された各角の空間座標は本来の位置よりも、 x - y 平面について、測定試料の寸法よりも10~20 mm程度小さな値となっていた。これは角部抽出のために画像データに施したエッジの分割・直線近似処理によって、検出される角の位置が本来の位置よりも画面上で10 pixel程度内側にずれるためであると考えられる。また奥行き(z 軸)方向について誤差の範囲が-92~100 mmと特に大きい。この原因は、本システムの z 軸方向の分解能が x, y 軸方向に比べて劣るためと、画像処理によって検出される各画面上の角の位置が本来の位置よりもずれてしまうことが z 座標算出に影響するため

ある。このような誤差は、エッジの分割数をより細かくすることで小さくできるものと思われる。

この実験においても測定時間は、左右カメラの視点の一致、測定試料のエッジ検出、試料角部検出などについて実験1と同様に約300 sであった。ここでも測定精度および測定時間の問題は残るが、実験の目的である画像処理による試料の特徴点の抽出、および能動視点を利用した拘束条件による左右の画像間の対応付けは正確に行え、試料の形状、空間的配置の認識が可能であることを示すことができた。

5. ま と め

本研究で提案した能動視点を持ったステレオマシンビジョンシステムを試作してその性能の評価を行った結果、以下のようことがわかった。

- (1) 左右のカメラの視点の一致が機械的に保証されていることを利用することで、これまで複雑な処理を必要としていた左右の画像の対応付けが簡単な拘束条件で可能となる。
- (2) その結果より、三角測量法を用いて特徴点それぞれの空間的な位置関係を求めることができる。

このような結果を踏まえて、今後は機械部分の高速化などのハードウェアの改善、画像処理法の改良などにより測定時間・測定誤差の減少を図り、ここで提案した方法が有効となるようにより複雑な特徴を持った測定対象を取り上げていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、二宮芳樹、杉本軍司：ステレオ視による障害物の検知，第12回ロボット学会学術講演会予稿集，(1995) 323.
- 2) 例えば、市山知博、岩月正見：ステレオ視のためのカラー画像領域分割による対応領域探索，第12回ロボット学会学術講演会予稿集，(1995) 321.
- 3) 例えば、海老原一郎、池田信一：相関を用いたステレオ視による高精度レンジデータ生成法，情報処理学会第39回(平成元年度後期)全国大会講演論文集，1，(1989) 432.
- 4) 谷内田正彦：ロボットビジョン，昭晃堂，(1990) 181~185.
- 5) 富田文明：コンピュータステレオビジョン，システム/制御/情報，40，1 (1996) 36.
- 6) 荒木和男：装置化における問題点——実用化，高速化に向けて，計測と制御，34，6 (1995) 440.
- 7) 例えば、舟久保 登：視覚パターンの処理と認識，啓学出版，(1990) 218.
- 8) 安居院 猛，長尾智晴：画像の処理と認識，昭晃堂，(1992) 75.
- 9) 八木伸行，井上誠喜，林 正樹，中須英輔，三谷公二，奥井誠人，鈴木正一，金次保明：C言語で学ぶ実践画像処理，オーム社，(1992) 114.