

## ビデオレートステレオマシンにおける カメラ幾何補正機能の実現

蚊野 浩<sup>\*1</sup> 木村 茂<sup>\*2</sup> 田中昌也<sup>\*3</sup> 金出武雄<sup>\*4</sup>

### An Implementation of Camera Geometry Correction Capability in a Video-Rate Stereo Machine

Hiroshi Kano<sup>\*1</sup>, Shigeru Kimura<sup>\*2</sup>, Masaya Tanaka<sup>\*3</sup> and Takeo Kanade<sup>\*4</sup>

A video-rate stereo machine is a dedicated hardware device for range measurement. It can generate a dense range map and an associated intensity image at 30 frames per second. This paper shows a camera geometry correction module which is designed and implemented as an circuit module to improve the performance of the stereo machine. The main functions are input-image transformation and selection of candidate points of a corresponding point. The stereo machine integrated with the camera geometry correction capability not only corrects camera geometry and lens distortion, but also operates with multiple cameras positioned arbitrary, resulting in an improved measurement accuracy.

**Key Words:** Stereo Vision, Special Purpose Hardware, Camera Calibration

#### 1. はじめに

ステレオ視は三次元のシーンを複数の視点から観察した画像を用い、3角測量の原理によりシーン中の各点までの距離を測定する技術である。ステレオ視は非接触かつ受動的に距離計測が可能であるため、移動ロボットにおける三次元視覚センサや三次元シーンのモデリングにおける入力部として期待される技術である[10]。

しかし、ステレオ画像対における対応点問題の困難さと計算量の膨大さから実用化が遅れていた。これまで Teleos 社の PRISM3 システム [3]、JPL の DataCube を用いたシステム [4]、CMU の iWarp を用いたマルチベースラインステレオ [5] [7]、および INRIA のシステム [6] などが開発されてきたが、入力画像と同程度に密な距離画像をビデオレートで生成することには成功していない。また、これまでに開発されたハードウェアによるステレオシステムは、カメラ光軸を平行にし、かつ画像面が同一平面上に存在するという仮定のもとでアルゴリズムを実現している。これは対応点の探索範囲をビデオカメラの走査線上に拘束するための工夫である。しかし、物理的に複数のカメラを用いるステレオシステムにおいては、カメラ配置の

誤差やカメラ特性のばらつきから、このような平行・共面のステレオを仮定することができない。また、計測範囲を最適にするためには個々のカメラ光軸を測定対象物に向け、カメラ間に輻輳角を持たせることも必要である。

ソフトウェアによるステレオシステムの実現では輻輳を積極的に利用した例がある [14]。また、Kang によるマルチベースラインステレオシステム [7] は、水平に配置した4台のカメラを適当な輻輳角を持つように配置させ、64個の iWarp を用いてステレオ視の処理を行うマルチプロセッサによる専用システムである。iWarp は 20MFLOP の性能を持つ並列計算専用のプロセッサであるが、このような専用システムであっても輻輳角の補正と対応点探索のすべてをビデオレートで行うことは不可能であった。ステレオ視のこれらの問題に対して、金出ら [2] [9] はマルチベースラインステレオ法 [1] をもとに専用ハードウェアであるビデオレートステレオマシンを開発し、ビデオレートで密な距離画像を計測することに成功した。本論文は金出らのビデオレートステレオマシンの一部として開発されたカメラ幾何補正機能に関するものである。本機能は入力画像に対してステレオカメラ間の配置誤差、カメラ特性のばらつき、レンズ歪みなどの補正を行うことにより、ステレオカメラ間の精密な位置調整を不要にした。

本論文では、2章においてカメラ幾何補正機能の必要性を述べる。3章でこれを実現する補正回路のハードウェアアーキテクチャについて説明し、設計された回路の詳細を4章で述べる。最終的に実現されたビデオレートステレオマシンの計測精度などを5章で紹介し、6章をまとめにあてる。

原稿受付 1997年5月19日

\*1三洋電機(株)

\*2防衛庁

\*3(株)小松製作所

\*4カーネギーメロン大学

\*1 Sanyo Electric Co., Ltd.

\*2 Japan Defence Agency

\*3 Komatsu Ltd.

\*4 Carnegie Mellon University

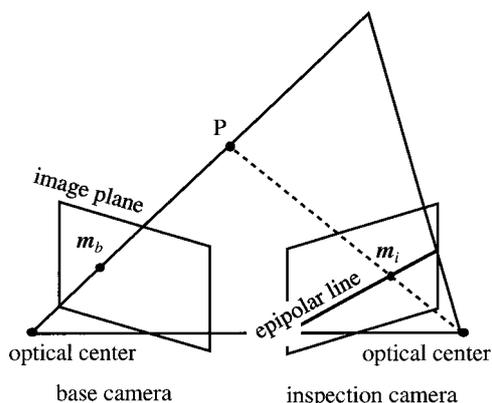


Fig. 1 Measurement of three dimensional scene by stereo vision

## 2. カメラ幾何補正機能の必要性

### 2.1 ステレオ視の原理

Fig. 1 に基準カメラ, 検査カメラと呼ぶ2台のカメラを用いて三次元シーンを観察する状態を示す. 三次元シーン中の点Pが基準カメラによって  $m_b$  に観察され, 検査カメラによって  $m_i$  に観察されたことが分かれば, 両カメラのレンズ中心とそれぞれの観察点を結ぶ直線の交点として, 点Pの三次元位置を求めることができる. 基準カメラの観察点  $m_b$  に対応する検査カメラの観察点はエピポーラ線と呼ばれる直線上に存在することが知られており, これをエピポーラ拘束条件と呼ぶ. 基準カメラと検査カメラの幾何学的な配置が既知であれば, 基準カメラの各観察点ごとに検査カメラの画像面上のエピポーラ線が決まる. ビデオレイトステレオマシンでは基準カメラ上の各観察点に対してエピポーラ線上から対応点候補を順次選択し, 観察点とのマッチング度が最も高い対応点候補を推定される対応点とすることで三次元シーンの計測を行う.

### 2.2 カメラ配置

ビデオレイトステレオマシンのように3台以上のカメラを同時に用いるステレオ視において, 各カメラを正確に所望の位置に据え付けることは容易な問題ではない. 通常この問題を解決するために, 精密な位置決めが可能な移動ステージなどが利用される. しかし, このような装置は可搬性が劣り, また, 振動などの機械的なノイズに非常に弱い実用上問題が多い.

一方, ステレオ計測の精度を向上させるために, カメラ間に輻輳角を持たせることと, 複数のカメラを配置させることが行われる. 測定対象物や測定範囲があらかじめ特定されているような場合, 各カメラをある程度の輻輳角をもって配置することにより, 複数のカメラで共通に観察される三次元空間の大きさを最適に設定することができる. レンズ歪みの少ない画像中心付近で計測することも有利である. また, 3台以上のカメラを異なった位置に配置することにより遮蔽輪郭による計測誤差を回避できる場合がある. Satohら[12]はカメラをマトリックス状に配置し, 領域の隠蔽を検出する処理を加えることで, 遮蔽輪郭近傍においても正しく距離計測を行うことに成功している.

これらの考察から輻輳角をつけた複数のカメラを配置するこ

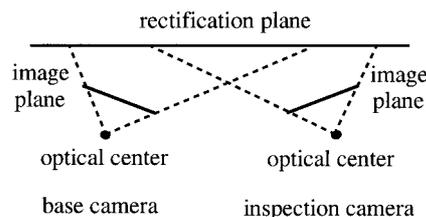


Fig. 2 Rectification of stereo image pair

とが有利であり, かつそれらの角度・位置がかなりの誤差を持つことを想定した補正機能が望まれる.

### 2.3 カメラ特性

多数のカメラを用いたカメラヘッドでは, カメラ特性のばらつきが測定誤差に結びつく. 筆者らの予備的な実験では, レンズに対する CCD 撮像素子の取り付け精度などでカメラごとに数画素の誤差が見られた. また, レンズにはラジアル歪[8], タンジェント歪[16]と呼ばれる歪みが存在するため, 入力画像は一定の傾向を持った歪みを受ける. ステレオ視による三次元シーンの計測において高精度な計測を実現するためには, これら各カメラ固有の特性も補正する必要がある.

## 3. カメラ幾何補正回路のアーキテクチャ

### 3.1 従来法

Fig. 1 に示した2台のカメラのように, お互いにある程度の角度を持って向かい合ったカメラ配置ではエピポーラ線の幾何学的条件が若干複雑になる. 一方, カメラ光軸がお互いに平行であり, かつ画像面が同一平面上にある場合, エピポーラ線がビデオカメラの走査線と一致し, 対応点探索が容易になる. このようなステレオカメラ配置を平行・共面なステレオカメラと呼ぶことにする.

複数のカメラを同時に用いるマルチベースラインステレオ法で精度の高い測定を行うためには一般のカメラ配置を仮定したステレオ計測が必要なことを2章で述べた. しかし, ステレオカメラ対が平行・共面でない場合であっても, カメラの配置関係などが既知であれば, 各カメラ画像に適当な幾何変換を施すことで平行・共面な画像に変換することが可能である. これは両カメラのレンズ中心を結んだ直線に平行な平面を仮定し, 各カメラ画像をこの平面に投影することにより実現される (Fig. 2 参照). この幾何変換は一般に射影変換で実現することができ, レクティフィケーション (rectification) と呼ばれる.

従来から, 任意のカメラ配置を許したステレオ視を高速に実行するためにレクティフィケーション法が用いられてきた. この場合, ステレオ計測処理の主な部分は,

- (1) 入力画像に対するレクティフィケーション (射影変換による幾何変換),
- (2) 平行・共面なステレオ画像対による対応点探索 (マッチング処理),
- (3) 入力画像に対する距離情報に変換するための逆レクティフィケーション (射影変換による幾何変換),

となる. レクティフィケーションはステレオ画像対ごとに定義される変換である. マルチベースライン法に適用する場合は,

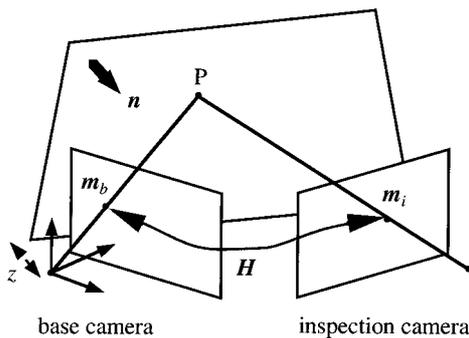


Fig. 3 Projection of plane to stereo cameras

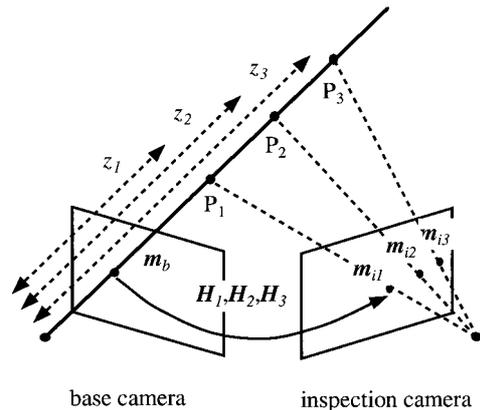


Fig. 4 Selection of candidates of corresponding points

各ステレオ画像対ごとにレクティフィケーションを行い、さらに各ステレオ対で得られる距離情報を正規化し統合する必要があるため、計算量が膨大になる [7] .

### 3.2 ステレオマシンにおけるカメラ幾何補正

レクティフィケーション法では、入力画像に対してあらかじめレクティフィケーションと呼ばれる幾何変換を施すことで対応点探索における対応点候補の選択を走査線上に制約し、計算の効率化を図っている。一方、Fig. 1 に示すように、レクティフィケーション前のステレオ画像対において対応点候補は走査線上に存在せず、このような状態で対応点候補を選択するには各候補点ごとに画素アドレスの計算が必要である。

ステレオシステムをソフトウェアで実現する場合、画像の幾何変換という計算コストを要する処理をレクティフィケーション、逆レクティフィケーションの 2 回ですませることで、全体の計算コストを削減することが可能である。しかし、ハードウェアによるステレオシステムの実現では、各対応点候補ごとにそれを選択するためのアドレス計算を行いつつ対応点探索を行うことで、回路規模を小さくしつつ処理速度を早くすることが可能である。なぜならば、レクティフィケーションのような幾何変換を行う回路と対応点候補の画素を選択する回路は、アドレス生成回路であるという点において類似の処理をしており、これらを一つのモジュールにまとめることが可能であり、さらに逆レクティフィケーションが不要になるからである。

さて、三次元空間に存在する平面を 2 台のカメラで観察したとき、平面上に存在する点の各カメラにおける観察点の画像座標値は、二次元の射影変換により変換することができる (Fig. 3 を参照) [13] [17] .

この性質を利用すると、Fig. 4 において基準カメラからの距離  $z_1$  に存在する点  $P_1$  が同カメラで画素位置  $m_b$  に観察されるとき、 $P_1$  を検査カメラで観察する画素位置  $m_{i1}$  は式 (1) で求めることができる。ここで、 $m_b, m_{i1}$  は画素アドレスを同次座標で表したもので、 $H_1$  はカメラの内部パラメータ、外部パラメータ、および距離  $z_1$  で決まる  $3 \times 3$  の射影変換行列であり、等号は射影的な意味において成り立つ。さらに、参考文献 [11] で示したように、基準カメラ、および検査カメラの内部パラメータを  $3 \times 3$  の行列である  $N_b, N_i$  で表し、ステレオカメラ対の外部パラメータを回転行列を表す  $3 \times 3$  の行列である  $R$ 、移動ベクトルである  $t$  で表し、定数ベクトルとして  $n^T = (0, 0, 1)$  と

すると、式 (1) における  $H_1$  は式 (2) と記述することができる。

$$m_{i1} = H_1 \cdot m_b \quad (1)$$

$$H_1 = N_i \cdot \left( R + \frac{t \cdot n^T}{z_1} \right) \cdot N_b^{-1} \quad (2)$$

したがって、測定したい距離のステップ  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_k$  に応じて  $k$  個の射影変換行列を準備しておき、基準カメラの各画素アドレスにこれらの射影変換行列を演算することで対応点候補を直接画像面上から抽出することができる。

式 (1) のアドレス変換を算術演算回路で実現することも可能であるが、大量のメモリを用いたテーブルルックアップによるアドレス変換方式で実現することにより、レンズ歪み補正を同時に行うことができる。このような大容量のルックアップテーブルを用いた対応点探索段階における幾何補正は、従来のレクティフィケーションによるものと比較してハードウェア化において有利なだけでなく、ワークステーション上でのプログラムにおいても現実的かつ高速である。また、本論文の幾何補正はカメラ単体の校正にルックアップテーブルを用いたもの [15] ではなく、ステレオ対をなすカメラ間の対応点探索を含むアドレスの変換にルックアップテーブルを用いている。

## 4. ハードウェアの設計

### 4.1 ハードウェア化における工夫

画像に対する幾何変換は一画面分をフレームメモリにいったん記憶し、記憶された画像に対して変換処理を行うことが一般的である。しかし、この方式では最低でも 1 フレーム分の遅延を生じる。画像入力から距離画像出力までの遅延を小さくするために、必要最小限のライン数だけを記憶しながら全体としてパイプライン動作をさせる工夫を行った。

入力画像のサイズを  $256 \times 256$ 、選択する対応点候補の最大数を 60 とし、変換されたアドレスの精度を整数部 8 ビット、小数点以下 4 ビットの計 12 ビットとした。このアドレス変換テーブルを直接実現すると、水平・垂直のアドレス指定に各 8 ビット、対応点候補の指定に 6 ビット必要で、変換結果の水平・垂直のアドレスを 12 ビット精度で出力することになり、各カメラごとに 22 ビット入力 24 ビット出力の 96 [M] ビットのメモ

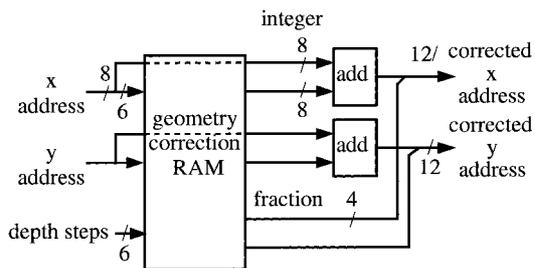


Fig. 5 Address correction using RAM

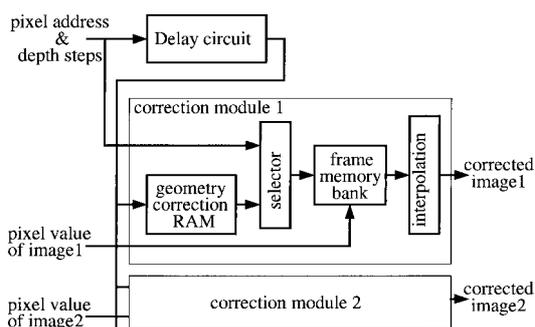


Fig. 6 Block diagram of geometry correction circuit

りが必要である。これを単純に実現すると、かなりの回路規模になる。実際には Fig. 5 に示すように、画素アドレスの上位各 6 ビットをアドレス変換 RAM への入力とし、RAM に記憶させる内容を入力アドレスからの増減分とすることで、実質的にアドレス変換の精度をほとんど低下させることなく、カメラあたり 6 [M] ビットの RAM で実現した。

4.2 回路構成

Fig. 6 にカメラ幾何補正回路の主要部のブロック図を示す。ラスタ走査された各カメラの画像データは、各画素の画素値に水平・垂直の画素アドレスが付加されて本ブロックに入力される。画像入力時には、入力画像とそれを水平・垂直に 1 画素ずつずらせた計 4 枚の画像をフレームメモリ群に書き込み、補正された画像の出力時には、補正アドレスに隣接する 4 画素の値を同時に読み出すことができる構成にした。四つの画素値と、補正アドレスの小数部 4 ビットは、フレームメモリ群に続く補間回路に入力され、補正された画素値が計算される。このような回路構成によって、アドレス変換された画素の値をサブピクセル精度で求めるための、近隣 4 画素を用いた線形補間処理を高速に実行することが可能になった。

入力された画素アドレスは、段数をプログラム可能なパイプラインレジスタで遅延させた後、幾何補正用 RAM の入力となる。Fig. 7 は幾何補正回路において生成されるアドレスを示したものである。遅延されたアドレスを  $(x', y')$  遅延のないアドレス  $(x, y)$  とするとき、薄く網掛けした部分の画像データが有効である。したがって、アドレス  $(x', y')$  の距離計算に必要な対応点候補は網掛け部分から選択されなければならない。対応点候補の位置はステレオカメラのパラメータと探索範囲からあらかじめ計算することができるので、対応点候補が網掛け

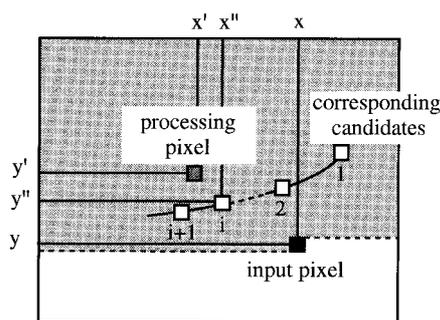


Fig. 7 Pixel address generation in geometry correction circuit

部分を越えないように、遅延回路の段数を設定する。

補正回路からの出力画像は、入力画像を対応点の探索ステップの数だけ幾何変換したものである。このデータは、一つの画素アドレスごとに、変換された画素値がステップ数連続して出力され、次の画素アドレスに移るといふ順番で出力される。このようにすることで、全画面の入力を待つことなく、各画素の距離情報を計算することが可能である。

4.3 幾何補正回路の性能

一般の位置に配置された、任意の特性のカメラで構成されるステレオシステムにおいて、幾何補正回路は画素値 4 ビットで  $256 \times 240$  画素の画像の対応点探索を、探索の位置精度を小数点以下 4 ビットの精度で実行する。幾何補正回路のその他の性能を以下に示す。

- カメラ台数：最大 6 台
- 処理速度：33 [nsec]  $\times$  (探索対応点候補数 + 2) 画素
- フレームレート：最高 30 フレーム/秒
- 距離画像サイズ：最大  $256 \times 240$  画素

幾何補正機能を、従来のビデオレートステレオマシン [2] の性能を劣化させることなく、その一部として組み込むことができた。実現された幾何補正機能付きのビデオレートステレオマシンは、 $200 \times 200$  の画像サイズの場合、対応点候補の探索数が 23 画素までビデオレートで処理可能である。

5. ステレオマシンの測定精度

5.1 ステレオカメラ校正

Fig. 8 に示す対称型のステレオカメラヘッドを開発した。中心のカメラと周辺のカメラの基線長は約 90 [mm]、周辺の 4 台のカメラは適当な角度をもって向かい合うように配置されている。以下の実験で用いたレンズの焦点距離は 25 [mm] である。本カメラヘッドを Tsai の方法 [8] で校正し、カメラ歪み係数、焦点距離などの内部パラメータ、および三次元ワールド座標における各カメラの位置を回転および並進として求めた。

5.2 測定条件

ステレオ計測の精度はカメラ校正の精度や計測アルゴリズムだけでなく、測定対象物の形状やその表面のテクスチャ形状などによっても影響される。ここではステレオマシンの各パラメータを以下の条件に設定し、後述する対象物を測定したときの精度を評価した。

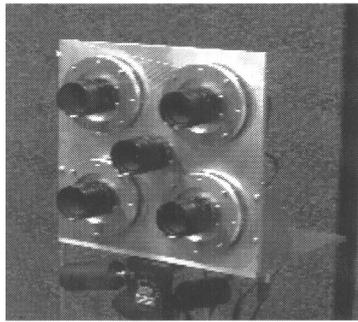


Fig. 8 Stereo camera head

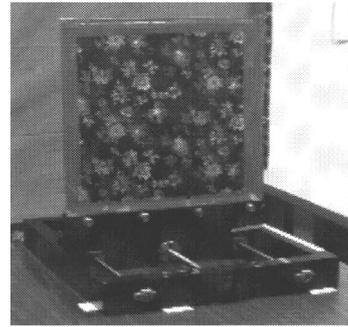


Fig. 9 Sheet pasted to calibration jig

- (1) 256×240 画素の入力画像をウインドウサイズ 11×11 の LOG フィルタで前処理し, LOG 出力の上位 8 ビットを非線形関数により 4 ビットに圧縮する.
- (2) カメラ幾何補正回路は位置精度 12 ビット, 画素値の補間精度 4 ビットで補正を行う.
- (3) 対応点探索におけるイメージマッチングのためのウインドウサイズは 11×11 を用いる.
- (4) 測定範囲をカメラヘッドからの距離で 1,458 [mm] ~ 2,500 [mm] に設定し, この間を距離に逆比例した間隔で 30 段階のステレオ計測を行う.
- (5) 30 段階の離散値で得られる距離を内挿計算により 8 ビット (256 段階) に変換し, ステレオマシンの出力とする. これらのパラメータの多くは経験的に最適なものを選択した. ただし, 計測時の奥行き分解度を 30 段階とし, 計測範囲を距離に逆比例した間隔に設定することにより画像面上で対応点候補をほぼ 1 画素間隔で選択することになり, 対応点候補の選択としてはこれが最適であると考えられる.

観察点の真の三次元位置とステレオマシンにより計測された位置の誤差を評価することを目的として, カメラ校正用画像を取り込むときに, 同時に校正板上に適切なテクスチャが描かれた薄いシートを張り付け, シートの画像を取り込んでおく. このようにすることで, シートの特定の位置 (校正板の黒丸の重心位置と同じ画像中の位置) の真の三次元位置を知ることができ, これをステレオマシンの出力と比較することで精度を評価した. シートを張り付けた状態での校正用治具を Fig. 9 に示す.

### 5.3 測定誤差の評価

カメラヘッドからおおむね 1,500 [mm], 1,600 [mm], 1,700 [mm] の 3 カ所に置かれたシートを測定した場合の誤差を評価した. Table 1 は各距離における 72 点のステレオマシンの出力値と真の値の誤差 (ユークリッド距離) の平均と標準偏差を示したものである. この数値はレンズ歪みを考慮した補正を実施し, すべてのカメラを用いてステレオ計測した場合のものである.

カメラ校正の結果から推定される本カメラヘッドによるステレオ三次元計測の誤差は 1 [mm] 以下であるが, 7 [mm] から 10 [mm] という計測誤差はその 10 倍程度である. これはステレオマシンにおける LOG フィルタを用いた入力画像のぼかしや画素値の 8 ビットから 4 ビットへの圧縮, 領域ベースのイメージマッチング処理などの複合的な効果による精度の劣化が原因である.

Table 1 Measurement error of sheet

position of object	average error	standard deviation
1,500 [mm]	7.45 [mm]	9.08 [mm]
1,600 [mm]	8.51 [mm]	10.47 [mm]
1,700 [mm]	9.91 [mm]	11.23 [mm]

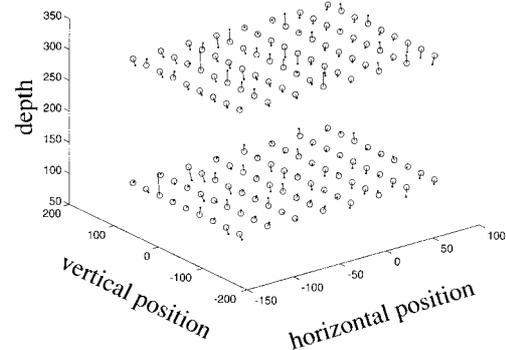


Fig. 10 True positions and estimated positions in measurement

また, 誤差の標準偏差が平均誤差に比較してかなり大きい. 計測点近傍に顕著な画像特徴が存在する場合は測定精度が向上することが知られており, 本実験では Fig. 9 のような絵柄を用いたために, 特徴が少ない計測点において比較的大きな誤差を持ち, このため誤差のばらつきが大きくなった. Fig. 10 に本計測における 1,500 [mm] と 1,700 [mm] に置かれたシートの計測点の真の三次元位置と計測された三次元位置の誤差をプロットしたものを示す. 図において白丸は真の位置であり, 白丸からのびた線分の先端が計測された位置である. 計測の多くは 10 [mm] 以下の誤差であるが, いくつかの点は 20 [mm] 程度の大きな誤差を伴っている. 誤差の大きな点はその部分における画像が十分な特徴を持たないためである.

10 [mm] 近い平均誤差は自律移動ロボットなどの応用を想定した場合は十分な精度である. さらに精度を要する応用に対処するためにはより長い焦点距離のカメラと長い基線長のステレオを用いることが有効である. また, 25 [mm] のレンズを用いた本実験ではレンズ歪みを補正した場合とレンズ歪みを補正しない場合で計測誤差に顕著な差はなかった. しかし, 2 章で述べたように焦点距離が 8 [mm] 程度のレンズを用いる場合, ステレオマシンにおける計測においてもレンズ歪み補正は必要で

あると思われる。

## 6. む す び

本論文ではビデオレイトステレオマシンにおけるカメラ幾何補正機能の必要性を示し、カメラ配置の誤差、カメラ特性のばらつき、レンズ歪みなどをビデオレイトで補正しつつ、ステレオ視による距離計測を可能にする幾何補正回路について述べた。本回路を用いたステレオマシンは、カメラ配置の誤差やカメラ特性のばらつきを補正するだけでなく、対称形に配置したビデオカメラに輻輳角を持たせた計測を行うことにより、計測対象に応じた理想的なステレオ計測が可能である。また、カメラ幾何補正機能を実装したビデオレイトステレオマシンの測定精度の評価を行い、本ステレオマシンの絶対的な計測精度を実験結果に基づいて定量的に示した。

ビデオレイトステレオマシンは汎用部品のみを用いた比較的大規模な回路であるが、VLSI 技術を用いることで多くの回路部分を小型化することが可能である。しかし、今回開発したカメラ幾何補正回路は多くの RAM を用いているため、この部分を小型化することは容易ではない。ステレオマシンにとって幾何補正機能は不可欠であるため、RAM の容量を減らす方法などを検討する必要がある。また、本ステレオマシンにおいてカメラ校正の結果得られた測定精度の上限に近い性能を実現するためには、対応点を精度良くマッチングさせることが可能なアルゴリズムの開発などが課題である。

謝 辞 本研究の多くは、カーネギーメロン大学におけるビデオレイトステレオマシンの開発においてなされたものであり、本ステレオマシンの共同開発者である(株)サイヴァースの川村英二氏、富士電機(株)の吉田収志氏、(株)アジア航測の織田和夫氏に感謝する。また本発表の機会を与えてくださった、三洋電機(株)メカトロニクス研究所大隅正人所長ならびに関係諸氏に感謝する。

## 参 考 文 献

- [1] 奥富正敏, 金出武雄: “複数の基線長を利用したステレオマッチング”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J75-D, no. 8, pp. 1317-1327, 1992.
- [2] 金出武雄, 木村茂: “ビデオレイト・ステレオマシン”, 日本ロボット学会誌, vol. 13, no. 3, pp. 322-326, 1995.
- [3] H.K. Nishihara: “Real-time implementation of a sign-correlation algorithm for image matching,” TR-90-02, Teleos Research, 1990.
- [4] L.H. Matthies: “Stereo vision for planetary rovers: stochastic modeling to near real time implementation,” International Journal of Computer Vision, 8 (1), pp. 71-91, 1992.
- [5] J. Webb: “Implementation and performance of fast parallel multibaseline stereo vision,” In Proc. of DARPA Image Understanding Workshop, pp. 1005-1012, DARPA, 1993.
- [6] Oliver Faugeras, et al.: “Real time correlation based stereo algorithm and application,” Research Report 2013, INRIA, 1993.
- [7] Sing Bing Kang, Jon Webb, Lawrence Zitnick and Takeo Kanade: “An active multibaseline stereo system with real-time image acquisition”, CMU-CS-94-167, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1994.
- [8] Roger Y. Tsai: “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the shelf TV cameras and lenses”, IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3, 4, pp. 323-344, 1987.
- [9] 金出武雄, 蚊野浩, 木村茂, 川村英二, 吉田収志, 織田和夫: “ビデオレイト・ステレオマシンの開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 2, pp. 261-267, 1997.
- [10] 富田文明: “3次元ビジョンの実用化に向けて”, 日本ロボット学会誌, vol. 8, no. 8, pp. 1124-1127, 1994.
- [11] 蚊野浩, 金出武雄: “任意のカメラ配置におけるステレオ視とステレオカメラ校正”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J79-D, no. 11, pp. 1810-1818, 1996.
- [12] K. Satoh and Y. Ohta: “Passive Depth Acquisition for 3D Image Display,” IEICE Trans. Inf. & Syst., vol. E77-D, no. 9, pp. 949-957, 1994.
- [13] Olivier Faugeras: “Three-Dimensional computer vision, a geometric viewpoint,” The MIT press, 1994.
- [14] 富田文明, 高橋裕信: “ステレオ画像の境界線表現に基づく対応”, 電子情報通信学会論文誌, J71-D, no. 6, pp. 1074-1082, 1986.
- [15] MaoLin Qiu, Song De Ma: “The Nonparametric Approach for Camera Calibration,” Proc. of 5th Int. Conf. on Computer Vision, pp. 224-229, 1995.
- [16] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou: “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation,” IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell., vol. 14, no. 10, pp. 965-980, 1992.
- [17] 金谷健一: 画像理解—3次元認識の数理—. pp. 82-86, 森北出版, 1990.



蚊野 浩 (Hiroshi Kano)

1960年3月5日生。1984年京都大学工学部大学院修士課程情報工学専攻修了。同年三洋電機(株)入社。1993~95年カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員。現在、三洋電機(株)メカトロニクス研究所主任研究員。カラーハードコピー装置、カラー画像処理、コンピュータビジョンの研究開発に従事。情報処理学会各会員。(日本ロボット学会正会員)



田中昌也 (Masaya Tanaka)

1965年10月3日生。1988年東京大学工学部機械工学科卒業。同年(株)小松製作所入社。1995~97年カーネギーメロン大学ロボテックス研究所客員研究員。現在、(株)小松製作所研究本部所属。産業用視覚センサ、外観検査装置の研究開発に従事。(日本ロボット学会正会員)



木村 茂 (Shigeru Kimura)

1955年11月4日生。1978年名古屋工業大学電気卒業。1980年名古屋大学修士課程修了。同年防衛庁技術研究本部入庁(防衛庁技官)。1991年工学博士(慶大)。1992~94年カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員。戦闘機搭載用コンピュータおよび実時間動画像処理システムの研究開発に従事。現在、防衛庁第2研究所1部情報第1研究室主任研究官。(日本ロボット学会正会員)



金出武雄 (Takeo Kanade)

1945年10月24日生。1973年京都大学工学部大学院博士課程修了。同年同大学情報工学科助手。1976年同助教授。1980年カーネギーメロン大学計算機科学科高等研究員。1985年同教授。現在、同 U.A. and Helen Whitaker 教授、同大ロボテックス研究所所長。工博。計算機視覚、ロボットの腕、自律走行車、VLSI センサに関する研究に従事、IEEE Fellow, AAAI Fellow。(日本ロボット学会正会員)