

ビジョンアレイのための複数カメラ画像の統合

佐藤辰雄*, 杓掛暁史*, 後藤和弘**

*大分県・産業技術総合研究所研究交流センター, **情報産業部

Integration of Multiple Camera Images

Tatsuo SATO*, Akifumi KUTSUKAKE*, Kazuhiro GOTO**

*Oita-AIST Joint Research Center, **Information Technology Div.

要旨

平成13年度即効型地域コンソーシアム研究開発事業において九州システム情報技術研究所他と共同で「ビジョンアレイ方式による超高速画像計測装置の開発と即効的応用」と題して技術開発を行い応用開発として稚魚計数装置の開発に参画した。そのなかで当センターでは画像統合手法の検討を分担し、三次元情報を考慮した画像統合手法を開発した。本研究ではカメラの撮像過程をモデル化した透視投影モデルに基づき物体座標系におけるレンズ光軸方向の奥行きを固定することで複数台のカメラ画像を一つの仮想カメラの座標系上で画像面に投影可能であることを理論的に示し実験的にその有効性を確認した。

1. はじめに

ビジョンアレイとは汎用のカメラを計測対象に合わせて複数台設置しこれらの画像をリアルタイムに統合し画像処理を行うものである。この統合画像は画像サイズは異なるが通常の画像処理と同様に処理することができ従来の画像処理の資産をそのまま利用可能である。例えば移動体計測では通常のCCDカメラを移動方向に複数台設置することで見かけ上高速度画像処理が可能となる。

当センターではこの研究開発事業の中で画像統合手法の検討と評価を分担し、三次元情報を考慮した画像統合手法を開発したので以下に説明する。

装置としては合成に用いる画像を得るための複数のカメラ（ここでは実際には2台とする）と画像をあたかも別の一台のカメラを用いて得たかのように画像を合成するための仮想的なカメラ（以下仮想カメラ）を考える。

開発した統合手法は概略次のような手順である。

まず仮想カメラに相当する仮のカメラを用意し透視カメラモデルによる透視変換を用いてパラメータのキャリブレーションを行う。これにより合成画像と物体座標系内の三次元的な幾何学関係を記述した数式モデルが得られる。次に初期画像を得るための左右の実カメラも同じ方法でかつ同じ基準物体を用いてキャリブレーションする。これにより全てのカメラについて同一座標系内での数式モデルができあがる。仮想カメラの透視変換と実カメラの透視変換から実カメラ上の2枚の画像を仮想カメラ上に逆投影する。これにより仮想カメラで撮影したかのような単一の画像が得られる。計算可能なための制

約条件は奥行きがわかっていることである。もし物体の大きさがカメラと物体間の距離と比べて十分小さいと見なせれば奥行きは0と考えてよい。

以下にその詳細を説明する。このときカメラの配置はFig.1のように仮定する。

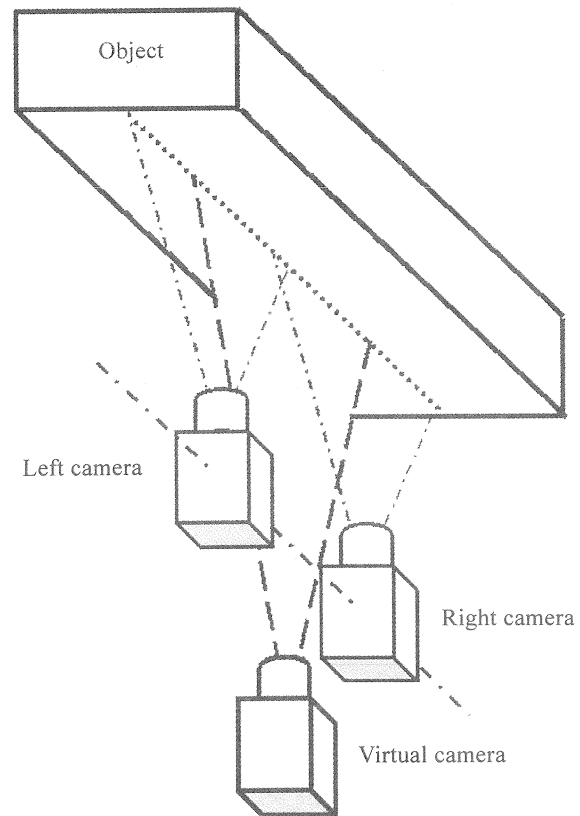


Fig. 1 Geometry of camera location

2. カメラパラメータを用いた画像統合

2.1 カメラモデルとキャリブレーション

カメラモデルは Fig.2 のようなピンホールカメラに基づきその射影は撮像面上の座標 $(x_c, y_c)'$ 、物体座標 $(X, Y, Z)'$ はパラメータ C_{ij} (射影カメラ行列) を用いて同次座標表現で次のように表される¹⁾。

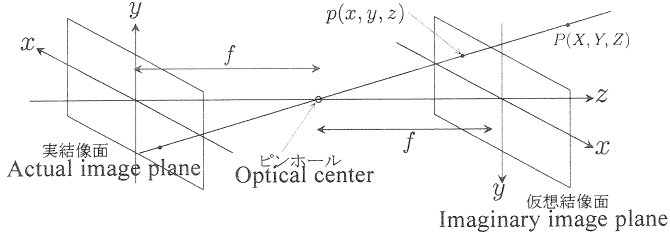


Fig. 2 Camera model

$$\lambda \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

キャリブレーションのため上式から λ を消去し整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} c_{11}X + c_{12}Y + c_{13}Z + c_{14} - c_{31}Xx_c - c_{32}Yx_c - c_{33}Zx_c - c_{34}x_c &= 0 \\ c_{21}X + c_{22}Y + c_{23}Z + c_{24} - c_{31}Xy_c - c_{32}Yy_c - c_{33}Zy_c - c_{34}y_c &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $c_{34} = 1$ とおき、精度を高めるため $n(\geq 6)$ 個の基準点の物体座標とカメラ座標との組が与えられると、

$$\begin{pmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ \vdots \\ x_{cn} \\ y_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{c1}X_1 & -x_{c1}Y_1 & -x_{c1}Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & -y_{c1}X_1 & -y_{c1}Y_1 & -y_{c1}Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{cn}X_n & -x_{cn}Y_n & -x_{cn}Z_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & -y_{cn}X_n & -y_{cn}Y_n & -y_{cn}Z_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ \vdots \\ c_{32} \\ c_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。これを $r = Ac$ と表せば最小 2 乗法により以下のように同定できる。(ただし A^+ は pseudo inverse)

$$\begin{aligned} c &= (A'A)^{-1}A'r \\ &= A^+r \end{aligned} \quad (4)$$

また実際のキャリブレーションでは Fig.3 のような基準物体を使用する。

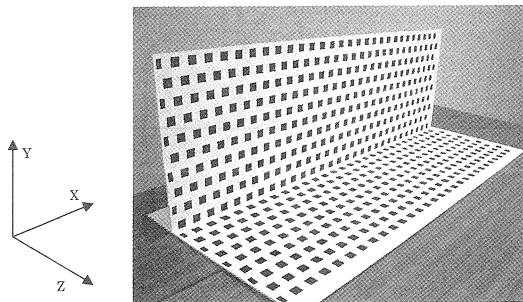


Fig. 3 Calibration standard object

2.2 逆投影

(2)式を書き直すと

$$\begin{pmatrix} c_{11} - c_{31}x_c & c_{12} - c_{32}x_c \\ c_{21} - c_{31}y_c & c_{22} - c_{32}y_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (c_{34} + c_{33}z_0)x_c - (c_{14} + c_{13}z_0) \\ (c_{34} + c_{33}z_0)y_c - (c_{24} + c_{23}z_0) \end{pmatrix} \quad (5)$$

となりこれから物体座標 (X, Y) は以下のように求められカメラ画像から物体座標系への逆投影が得られる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} - c_{31}x_c & c_{12} - c_{32}x_c \\ c_{21} - c_{31}y_c & c_{22} - c_{32}y_c \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (c_{34} + c_{33}z_0)x_c - (c_{14} + c_{13}z_0) \\ (c_{34} + c_{33}z_0)y_c - (c_{24} + c_{23}z_0) \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.3 画像統合

式(4)を 2 台の実カメラに適用して物体座標 (X, Y) カメラ座標 $(x, y)'$ とすると

$$X = \frac{-c_{v,24}c_{v,32}x + c_{v,22}c_{v,34}x + c_{v,14}(-c_{v,22} + c_{v,32}y) - c_{v,13}c_{v,22}z_0 - c_{v,23}c_{v,32}x_0 + c_{v,22}c_{v,33}x_0 + c_{v,13}c_{v,32}y_0 + c_{v,12}(c_{v,24} - c_{v,34}y + c_{v,23}z_0 - c_{v,33}y_0)}{-c_{v,12}c_{v,21} + c_{v,11}c_{v,22} - c_{v,22}c_{v,31}x + c_{v,21}c_{v,32}x + c_{v,12}c_{v,31}y - c_{v,11}c_{v,32}y} \quad (7)$$

$$Y = \frac{c_{v,24}c_{v,31}x + c_{v,21}c_{v,34}x + c_{v,14}(c_{v,21} + c_{v,31}y) - c_{v,13}c_{v,21}z_0 - c_{v,23}c_{v,31}x_0 + c_{v,21}c_{v,33}x_0 + c_{v,13}c_{v,31}y_0 + c_{v,11}(-c_{v,24} + c_{v,34}y - c_{v,23}z_0 + c_{v,33}y_0)}{-c_{v,12}c_{v,21} + c_{v,11}c_{v,22} - c_{v,22}c_{v,31}x + c_{v,21}c_{v,32}x + c_{v,12}c_{v,31}y - c_{v,11}c_{v,32}y} \quad (8)$$

ここで奥行き $z_0 = 0$ として(2)式に代入すれば式(9)、(10) (別掲) によりカメラ座標 $(x_c, y_c)'$ を求めることができる。この操作を左右の実カメラに適用すれば Fig.4 により画像合成が得られる。

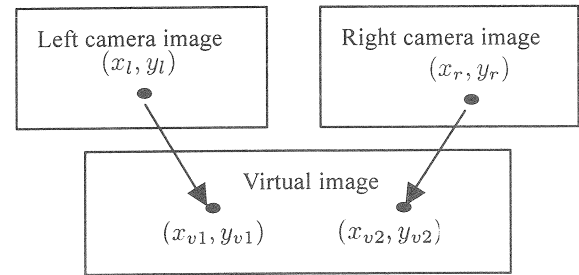


Fig. 4 Procedure of integration

2.4 画像統合実験と統合結果の例

Fig.5 のような構成で実際に画像統合の実験を行った。

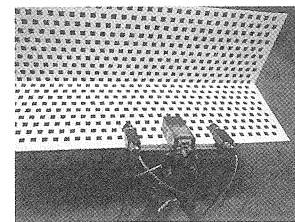
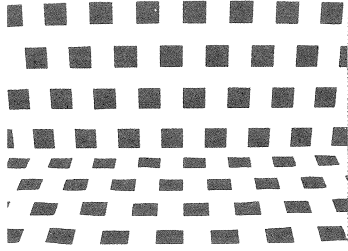
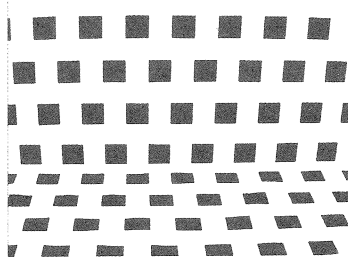


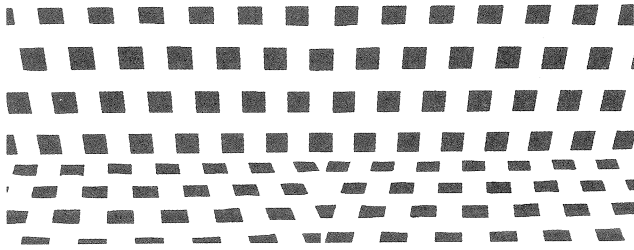
Fig. 5 Fixture of experiment



(a) Right camera image



(b) Left camera image



(c) Integrated image

Fig. 6 Examples of images

統合結果は Fig.6 のようになり 2 枚の画像がなめらかに統合されていることがわかる. ただし奥行き Z 方向に位置がずれていくとその距離に応じて統合位置がずれていく. 結果画像はその様子もよく表している.

3. 簡約化

ここまで述べてきた統合手法では(a)いちいちカメラパラメータを求める必要がある(b)統合画像はカメラに対して垂直面ではなく斜めなので場所により見え方が異なるなどといった欠点を有する. ここではこれらの欠点を改良する.

ここで式(7)(8)から求められる $(x_c, y_c)'$ は $z=0$ とすればこれらはいずれも

$$\frac{Dx + Ey + F}{Ax + By + C} \quad (11)$$

の形で表せる. この式をモデルとしてこれを直接同定できればいちいちカメラパラメータを求めることなく直接画像統合が実現できることになる.

そこで右カメラについて右カメラの座標を $(x_r, y_r)'$ 仮想カメラの座標を $(x_v, y_v)'$ として

$$\begin{aligned} x_r &= \frac{Dx_v + Ey_v + F}{Ax_v + By_v + C} \\ y_r &= \frac{Gx_v + Hy_v + J}{Ax_v + By_v + C} \end{aligned} \quad (12)$$

とおきこれを同定する.

これらを展開し整理すると

$$\begin{aligned} Cx_r &= -Ax_v x_r - By_v x_r + Dx_v + Ey_v + F \\ Cy_r &= -Ax_v y_r - By_v y_r + Gx_v + Hy_v + J \end{aligned} \quad (13)$$

ここで $C=1$ とおくと右カメラと仮想カメラ上で対応する $n(\geq 4)$ 組の対応点の座標がわかっているならば

$$\begin{pmatrix} x_{r1} \\ y_{r1} \\ \vdots \\ x_{rn} \\ y_{rn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_{v1}x_{r1} & -y_{v1}x_{r1} & x_{v1} & y_{v1} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{v1}y_{r1} & -y_{v1}y_{r1} & 0 & 0 & 0 & x_{v1} & y_{v1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_{vn}x_{rn} & -y_{vn}x_{rn} & x_{vn} & y_{vn} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{vn}y_{rn} & -y_{vn}y_{rn} & 0 & 0 & 0 & x_{vn} & y_{vn} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ D \\ E \\ F \\ G \\ H \\ J \end{pmatrix} \quad (14)$$

これを $\mathbf{r} = \Sigma \mathbf{p}$ と表せば最小 2 乗法により

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= (\Sigma' \Sigma)^{-1} \Sigma' \mathbf{r} \\ &= \Sigma^+ \mathbf{r} \end{aligned} \quad (15)$$

となりパラメータが同定される.

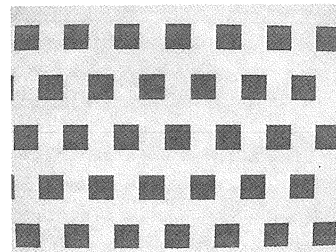
左カメラについても全く同様に行う

以上の手順で求めたパラメータを式(13)に代入すればいちいちカメラパラメータを求めることなく容易に画像の統合が行える. その手順は Fig.4 と同じである.

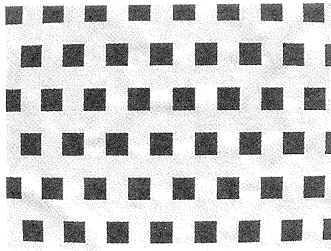
3.1 簡約化した画像統合の実験

Fig.7 の左右カメラ画像および仮想カメラ画像を用いて式(15)のパラメータ \mathbf{p} を算出する. 手順は以下のとおりである.

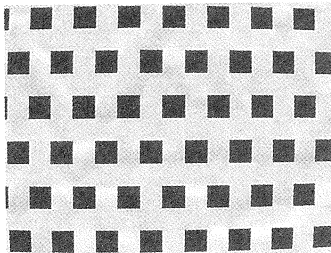
- (1) 左右カメラ画像と仮想カメラ画像中の基準点候補の検出 (SUSAN²) フィルタを用いて検出する)
 - (2) 左右カメラ座標と仮想カメラ座標との対応付け (基準点の抽出)
 - (3) パラメータ算出
 - (4) 画像の再投影 (reverse then forward projections)
- これに従って行った実験の結果を以下に示す.



(a) Virtual camera image



(b) Left camera image



(c) Right camera image

Fig. 7 Input images used for parameter identification

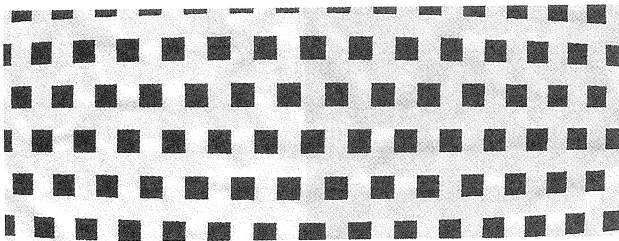


Fig. 8 Integrated image

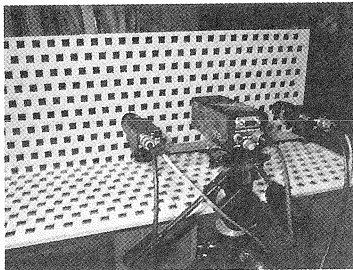


Fig. 9 Fixture of cameras and object

統合された画像は Fig.8 のようになり接続部の形状がなめらかに統合されていることがわかる. この画像はあたかも一つの広角レンズで撮影したかのような形状ひずみ特性を有しているがこの点は透視変換モデルをそのまま反映した結果でありそのまま多眼ステレオなどに応用可能であることを意味する.

またこの場合は実験では仮想カメラに広角レンズを使用したためであり, もしこのようなひずみを嫌う応用の場合には画角の狭いレンズを使用すればよい.

4. まとめ

三次元の幾何学的な情報 (位置関係) を考慮してカメラキャリブレーション等の理論的解析を行いそれに基づく画像統合を構成し実用化のための簡約化を試みた. その上で実験として実際に2台のカメラとキャリブレーション用基準パターンを準備しカメラパラメータ等を実際に求めて画像統合の数式モデルを同定し実際の画像を使ってマルチ画像の統合を行って統合手法の有効性を確認した.

統合結果は Fig.6(c)および Fig.8 の様になり特に後者は正面から観測できるため各種の自動化装置に利用するのに都合のよい良好な画像である.

今後は4枚以上の画像の統合, 形状ひずみの除去などの研究を行い, 検査装置などへの応用を検討する予定である.

なお本研究は経済産業省の平成13年度即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業の一部として行われました. 関係各位のご尽力に感謝いたします.

参考文献

- 1) 佐藤淳: コンピュータビジョン-視覚の幾何学- コロナ社 (1999-5) ほか
- 2) 杏掛, 佐藤, 後藤: SUSANオペレータを用いた画像特徴点の抽出”平成14年度研究報告(本誌) (2003-6)

$$\begin{aligned}
 \text{注)} \quad x_l = & \frac{(-c_{v,14}c_{v,22} + c_{v,12}c_{v,24})c_{l,11} + (c_{v,14}c_{v,21} - c_{v,11}c_{v,24})c_{l,12} + (-c_{v,12}c_{v,21} + c_{v,11}c_{v,22})c_{l,14} +}{(-c_{v,24}c_{v,32} + c_{v,22}c_{v,34})c_{l,11} + (c_{v,24}c_{v,31} - c_{v,21}c_{v,34})c_{l,12} + (-c_{v,22}c_{v,31} + c_{v,21}c_{v,32})c_{l,14}}x_{v1} + \\
 & \frac{((c_{v,14}c_{v,32} - c_{v,12}c_{v,34})c_{l,11} + (-c_{v,14}c_{v,31} + c_{v,11}c_{v,34})c_{l,12} + (c_{v,12}c_{v,31} - c_{v,11}c_{v,32})c_{l,14})y_{v1}}{-c_{v,12}c_{v,21} + c_{v,11}c_{v,22} + (-c_{v,14}c_{v,22} + c_{v,12}c_{v,24})c_{l,31} + (c_{v,14}c_{v,21} - c_{v,11}c_{v,24})c_{l,32} +} \\
 & \frac{(-c_{v,22}c_{v,31} + c_{v,21}c_{v,32} + (-c_{v,24}c_{v,32} + c_{v,22}c_{v,34})c_{l,31} + (c_{v,24}c_{v,31} - c_{v,21}c_{v,34})c_{l,32})x_{v1} +}{(c_{v,12}c_{v,31} - c_{v,11}c_{v,32} + (c_{v,14}c_{v,32} - c_{v,12}c_{v,34})c_{l,31} + (-c_{v,14}c_{v,31} + c_{v,11}c_{v,34})c_{l,32})y_{v1}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_l = & \frac{(-c_{v,14}c_{v,22} + c_{v,12}c_{v,24})c_{l,21} + (c_{v,14}c_{v,21} - c_{v,11}c_{v,24})c_{l,22} + (-c_{v,12}c_{v,21} + c_{v,11}c_{v,22})c_{l,24} +}{((-c_{v,24}c_{v,32} + c_{v,22}c_{v,34})c_{l,21} + (c_{v,24}c_{v,31} - c_{v,21}c_{v,34})c_{l,22} + (-c_{v,22}c_{v,31} + c_{v,21}c_{v,32})c_{l,24})x_{v1} +} \\
 & \frac{((c_{v,14}c_{v,32} - c_{v,12}c_{v,34})c_{l,21} + (-c_{v,14}c_{v,31} + c_{v,11}c_{v,34})c_{l,22} + (c_{v,12}c_{v,31} - c_{v,11}c_{v,32})c_{l,24})y_{v1}}{-c_{v,12}c_{v,21} + c_{v,11}c_{v,22} + (-c_{v,14}c_{v,22} + c_{v,12}c_{v,24})c_{l,31} + (c_{v,14}c_{v,21} - c_{v,11}c_{v,24})c_{l,32} +} \\
 & \frac{(-c_{v,22}c_{v,31} + c_{v,21}c_{v,32} + (-c_{v,24}c_{v,32} + c_{v,22}c_{v,34})c_{l,31} + (c_{v,24}c_{v,31} - c_{v,21}c_{v,34})c_{l,32})x_{v1} +}{(c_{v,12}c_{v,31} - c_{v,11}c_{v,32} + (c_{v,14}c_{v,32} - c_{v,12}c_{v,34})c_{l,31} + (-c_{v,14}c_{v,31} + c_{v,11}c_{v,34})c_{l,32})y_{v1}} \quad (10)
 \end{aligned}$$