

ステレオ動画像処理による3次元情報の抽出

山内俊明¹・熊井正司²・関 靖夫¹

¹ 情報工学科

² 神奈川県警

Three Dimensional Recovery by Dynamic Stereo Processing

Tosiaki YAMANOUCHI¹⁾, Shoji KUMAI²⁾, Yasuo SEKI¹⁾

Abstract

The purpose of this research is to establish three dimensional recovery method with higher accuracy than any similar method. As a first step, we proposed Dynamic Stereo Processing method that uses dynamic image processing as front processing of stereo image processing in this manuscript. Furthermore, validity of this method was investigated by means of computer simulation. The results showed that information obtained by dynamic image processing was important to characteristic axis point matching between right and left camera image.

Key Words: three dimensional recovery, stereo image processing, dynamic image processing

1. まえがき

物体の運動をとらえた複数枚の動画像から、物体の運動や形状を推定する研究はこれまで盛んに行われてきた。しかし、フレーム間の対応付けは比較的容易である反面、物体の特徴点の奥行きが絶対値として求まらないという欠点がある。一方、複数台のカメラによって異なる位置・角度から同時に取得した画像を用いて物体の3次元情報を推定する研究も行われているが、画像間の対応付けが困難であることが知られている。

本研究では両手法の欠点を克服するために、ステレオ画像処理の前処理として動画像処理を行う手法を検討した。特に、静止物体を対象に2台のカメラが移動する場合を取り扱った。ただし、相対的なカメラの初期位置と初期角度は既知であるが、その後の移動は未知であり得られた動画像から推定するものとした。具体的な処理としては、(1)カメラ移動により得られる各カメラの動画像系列を用いて、対応する特徴点からカメラの運動パラメータ(並進ベクトル・回転行列)をおおよそ把握する。(2)各カメラの運動パラメータをもとに、特徴点の奥行きの絶対値を幾何学的計算によって求める。(3)算出した奥行きを用いて他方のカメラの画像上の対応特徴点を検出し、左右カメラ画像間で対応付けを行う。(4)この対応をもとにステレオ画像処理を行い、精度の良い3次元情報を求めるというものである。

2. ステレオ動画像処理

2.1 動画像処理によるカメラの運動パラメータ推定

空間中の点Pのカメラ移動前の \vec{N} ベクトルを m 、視点Oから点Pまでの距離を r とし、移動後の \vec{N} ベクトルを m' 、距離を r' とする。このとき m 、 m' はZ成分が

正になるようにする。また並進ベクトルを $\vec{h} = (A \ B \ C)^T$ とおき、運動パラメータを $\{R, \vec{h}\}$ とする。これらの様子を図1に示す。

このとき、運動パラメータ $\{R, \vec{h}\}$ のカメラ移動において、 \vec{N} ベクトル m 、距離 r の点が \vec{N} ベクトル m' 、距離 r' の点に対応するとき

$$rm = r'Rm' + \vec{h} \quad (2.1)$$

となる。また、運動パラメータ $\{R, \vec{h}\}$ 、 $\vec{h} \neq 0$ のカメラ移動において、 \vec{N} ベクトル m の点が \vec{N} ベクトル m' の点に対応すれば

$$(m, Gm') = 0 \quad (2.2)$$

$$|\vec{h} \ m \ Gm'| \geq 0 \quad (2.3)$$

ただし G は基本行列とし、

$$G = (\vec{h} \times r_1 \ \vec{h} \times r_2 \ \vec{h} \times r_3) \quad (2.4)$$

であり、 r_1, r_2, r_3 はそれぞれ R の要素である。しかし、実際には雑音などの混入が予想されるため、

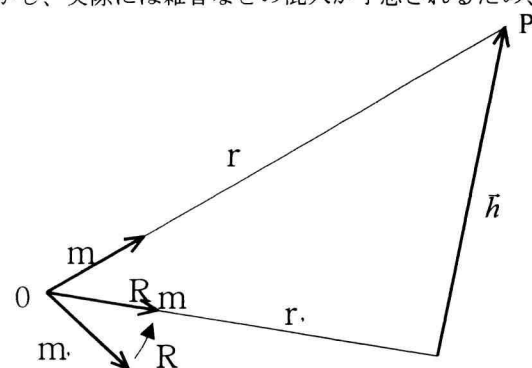


図1 カメラの運動パラメータと点Pの関係

しかし、実際には雑音などの混入が予想されるため、

$$\sum_{a=1}^N (m_a, Gm_a)^2 \rightarrow \min \quad \text{Tr}[GG^T] = 2 \quad (2.5)$$

となる基本行列Gを求め、それを \hat{G} とする。

式(2.4)より、並進ベクトル \vec{h} は基本行列Gのすべての列に直交する。そこで基本行列 $\hat{G} = (\hat{g}_1 \quad \hat{g}_2 \quad \hat{g}_3)$ として

$$(\hat{g}_i, \vec{h}) = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.6)$$

となるが、これも最小二乗法を用いて

$$\sum_{i=1}^3 (\hat{g}_i, \vec{h})^2 \rightarrow \min \quad |\vec{h}| = 1 \quad (2.7)$$

となる単位ベクトル \vec{h} を求め、それを \hat{h} とする。符号は

$$\sum_{a=1}^N |\hat{h} \cdot m_a \cdot \hat{G}m_a| > 0 \quad (2.8)$$

の条件にしたがって求める。

次に式(2.4)より

$$\hat{h} \times \hat{r}_i = \hat{g}_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.9)$$

となるような、互いに直交して右手系をつくる単位ベクトル $\{\hat{r}_1, \hat{r}_2, \hat{r}_3\}$ を求め、これをその順に列とする行列を $\hat{R} = (\hat{r}_1 \quad \hat{r}_2 \quad \hat{r}_3)$ とし、次のように求める。

$$\sum_{i=1}^3 |\hat{h} \times r_i - \hat{g}_i|^2 \rightarrow \min \quad (2.10)$$

2.2 ステレオ画像処理による並進ベクトルと奥行きの絶対値の決定

並進ベクトル及び奥行きの絶対値を幾何学的計算で求める方法を図2に示す。

まず、左カメラのフレームiでのカメラ座標系を $O_l^i - X_{l,1}^i - X_{l,2}^i - X_{l,3}^i$ 、右カメラのフレームiでのカメラ座標系を $O_r^i - X_{r,1}^i - X_{r,2}^i - X_{r,3}^i$ 、空間中の点Pのフレームiでの左カメラ座標を $\vec{X}_l^i \equiv (\vec{X}_{l,1}^i, \vec{X}_{l,2}^i, \vec{X}_{l,3}^i)$ 、空間中の点Pのフレームiでの右カメラ座標を $\vec{X}_r^i \equiv (\vec{X}_{r,1}^i, \vec{X}_{r,2}^i, \vec{X}_{r,3}^i)$ とする。ここで、右カメラの左カメラに対する並進量を $\vec{X}_l^r \equiv (\vec{X}_{l,1}^r, \vec{X}_{l,2}^r, \vec{X}_{l,3}^r)$ 、回転を R_l^r とすれば、次のようになる。

$$\vec{X}_l^r = R_l^r \vec{X}_r^r + \vec{X}_l^r \quad (2.11)$$

また、左および右カメラのフレームi+1のフレームiに対する並進量を、

$$\vec{X}_l^{(i,j+1)} \equiv (\vec{X}_{l,1}^{(i,j+1)}, \vec{X}_{l,2}^{(i,j+1)}, \vec{X}_{l,3}^{(i,j+1)}) \quad (2.12)$$

$$\vec{X}_r^{(i,j+1)} \equiv (\vec{X}_{r,1}^{(i,j+1)}, \vec{X}_{r,2}^{(i,j+1)}, \vec{X}_{r,3}^{(i,j+1)}) \quad (2.13)$$

回転を、

$$R_l^{(i,j+1)} \equiv (R_{l,ij}^{(i,j+1)}) \quad (2.14)$$

$$R_r^{(i,j+1)} \equiv (R_{r,ij}^{(i,j+1)}) \quad (2.15)$$

とする。このとき時間変化での回転、並進を

$$\vec{X}_l^i = R_l^{(i,j+1)} \vec{X}_l^{i+1} + \vec{X}_l^{(i,j+1)} \quad (2.16)$$

$$\vec{X}_r^i = R_r^{(i,j+1)} \vec{X}_r^{i+1} + \vec{X}_r^{(i,j+1)} \quad (2.17)$$

さらに、

$$\vec{X}_l^{(i,j+1)} = |\vec{X}_l^{(i,j+1)}| \vec{n}_l^{(i,j+1)} \quad (2.17)$$

$$\vec{X}_r^{(i,j+1)} = |\vec{X}_r^{(i,j+1)}| \vec{n}_r^{(i,j+1)} \quad (2.18)$$

とおく。ここで $\vec{n}_l^{(i,j+1)}$ 、 $\vec{n}_r^{(i,j+1)}$ は単位ベクトルである。

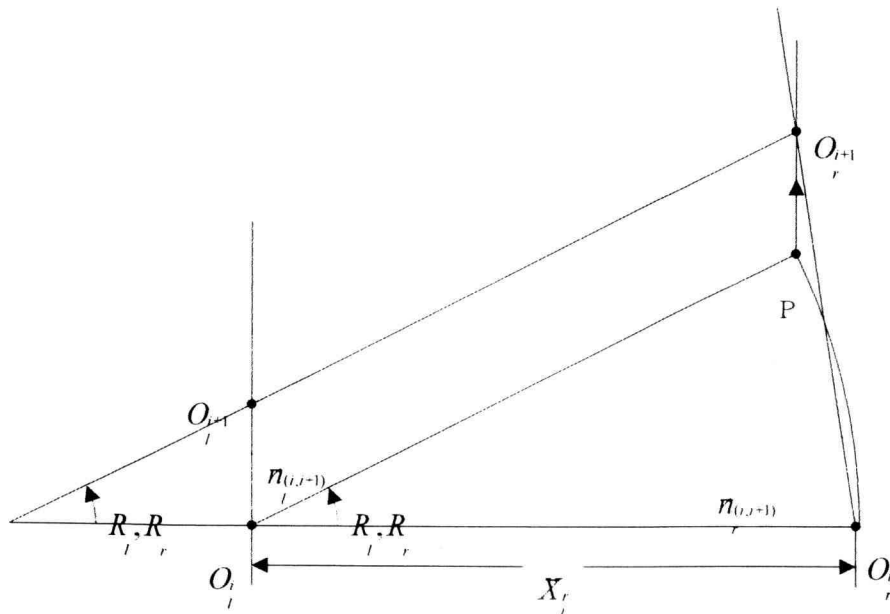


図2 移動前後の左右カメラ座標系の幾何学関係

ここで、 $R_l^{(i,j+1)}$, $R_r^{(i,j+1)}$, $\bar{n}_l^{(i,j+1)}$, $\bar{n}_r^{(i,j+1)}$ は前節の動画画像処理によって推定した左右カメラの回転行列及び並進ベクトルである。 $O_l^i P = O_l^{i+1} O_r^{i+1}$ となる点 P を選べば、 $PO_r^{i+1} = O_l^i O_l^{i+1}$ が成立する。 O_r^{i+1} は P から $\bar{n}_l^{(i,j+1)}$ 方向の直線と O_r^i から $\bar{n}_r^{(i,j+1)}$ 方向の直線の交点、実際には雑音があるので両者が最接近する点より、 $|\bar{X}_l^{(i,j+1)}|$, $|\bar{X}_r^{(i,j+1)}|$ が求まる。

次に、奥行きを絶対値を求める方法を述べる。まず \bar{m}_a , \bar{m}_a' を特徴点 α の移動前、移動後の N ベクトルとする。このとき N ベクトルは各フレームでのカメラ中心座標での特徴点方向の単位ベクトルである。また、 \bar{h} を移動前の座標系から見た並進ベクトル \bar{r}_a , \bar{r}_a' を特徴点 α の移動前後の視点からの奥行きとすると、次の式のようになる。

$$r_a = \frac{(\bar{h}, \bar{m}_a) - (\bar{m}_a, R\bar{m}_a')(\bar{h}, R\bar{m}_a')}{1 - (\bar{m}_a, R\bar{m}_a')^2} \quad (2.19)$$

$$r_a' = \frac{(\bar{h}, R\bar{m}_a')(\bar{h}, \bar{m}_a) - (\bar{h}, R\bar{m}_a')}{1 - (\bar{m}_a, R\bar{m}_a')^2} \quad (2.20)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \bar{h} &= h \cdot n_h \\ h &> 0 \\ |n_h| &= 1 \end{aligned} \quad (2.21)$$

とおけば、

$$r_a = \bar{h} \frac{(n_h, \bar{m}_a) - (\bar{m}_a, R\bar{m}_a')(n_h, R\bar{m}_a')}{1 - (\bar{m}_a, R\bar{m}_a')^2} \quad (2.22)$$

$$r_a' = \bar{h} \frac{(\bar{h}, R\bar{m}_a')(n_h, \bar{m}_a) - (n_h, R\bar{m}_a')}{1 - (\bar{m}_a, R\bar{m}_a')^2} \quad (2.23)$$

式 (2.21), (2.22), (2.23) を左画像に適用すれば

$$\bar{h} = h \cdot n_h = \bar{X}_l^{(i,j+1)} = t_1 \bar{n}_l^{(i,j+1)} \quad (2.24)$$

これより

$$h = t_1 \quad (2.25)$$

$$n_h = \bar{n}_l^{(i,j+1)} \quad (2.26)$$

ただし、 $\bar{n}_l^{(i,j+1)}$ は $|\bar{h}| = 1$ とした場合の \bar{h} である。また、

$$R = R_l \quad (2.27)$$

このとき、式 (2.23) より

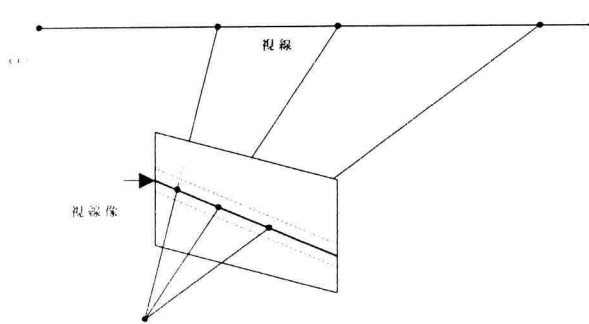
$$r_a = t_1 \frac{(\bar{n}_l^{(i,j+1)}, \bar{m}_a) - (\bar{m}_a, R_l \bar{m}_a')(\bar{n}_l^{(i,j+1)}, R_l \bar{m}_a')}{1 - (\bar{m}_a, R_l \bar{m}_a')^2} \quad (2.28)$$

$$r_a' = t_1 \frac{(h, R_l \bar{m}_a')(\bar{n}_l^{(i,j+1)}, \bar{m}_a) - (\bar{n}_l^{(i,j+1)}, R_l \bar{m}_a')}{1 - (\bar{m}_a, R_l \bar{m}_a')^2} \quad (2.29)$$

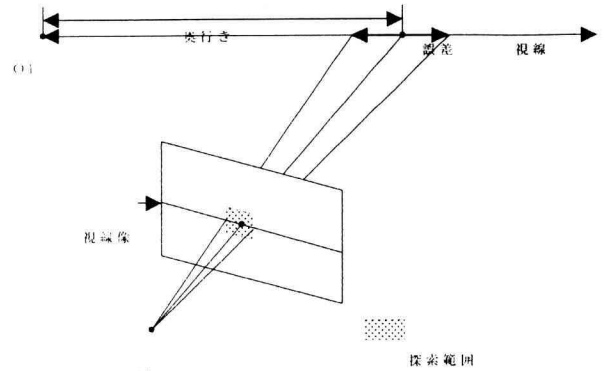
右カメラの画像に対しても同様の方法で、奥行きを絶対値を算出することができる。

2.3 奥行き情報を用いた左右カメラ画像間の対応付け

得られた奥行きを利用して三角測量を行い、一方の画像のある点に対応するもう一方の画像での座標を予測する。ただし、入力としての奥行き情報には誤差が含まれることが当然予想されるため、予測した座標値は必ずしも正しいとは限らない。しかし、一般の視線像による幾何学的拘束を用いた探索方法では、探索範囲は視線像上以下には狭まらない上、当然誤差が予想されるので厚みのある直線上なのに対し (図3 (a))、本研究の方法では、ある1点が示されるため、誤差を考慮しても、一般的な幾何学的拘束による探索範囲の限定方法よりかなり狭い範囲まで狭められる (図3 (b))。



(a) 従来手法



(b) 奥行き情報を用いた本手法

図3 左右カメラ画像間の対応点の探索範囲

2.4 ステレオ画像処理による3次元情報の抽出

ステレオ視は、シーンの画像情報を三角測量の原理で得る基本的な方法である。図4にステレオ視の原理を示す。同図で距離 b だけ離れた点 O_l 、 O_r にそれぞれ左カメラおよび右カメラのレンズ中心がある。空間中の点 $P(x, y, z)$ を撮影して得た左画像において、点 P を投影した点 P_l の $X_l Y_l$ スクリーン座標系における座標を $P_l(x_l, y_l)$ 、右画像における点 P の投影点 P_r の $X_r Y_r$ スクリーン座標系における座標を $P_r(x_r, y_r)$ とする。また、カメラの焦点距離を f とする。このとき、点 $P(x, y, z)$ の座標値は次式で計算される。

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_l b}{x_l - x_r} - \frac{b}{2} \\ y &= \frac{y_l b}{x_l - x_r} = \frac{y_r b}{x_l - x_r} \quad (2.30) \\ z &= \frac{fb}{x_l - x_r} \end{aligned}$$

これらの式から、空間中のある点を、左画像に投影したときの点、および右画像に投影したときの点の座標を求めること、言い換えれば、左画像と右画像で対応する点を決定することによって、画像中の各点の3次元座標を求めることができる。

3 計算機シミュレーションによる評価

平行に置かれた2台のカメラに対して図5のような動きを与えたと仮定し、その移動前後に両カメラから得られる画像を計算機シミュレーションにより生成した。具体的には、両カメラの前方に静止した立方体の存在を仮定し、そのワイヤーフレームを描画した。その様子を図6に示すが、赤と白のワイヤーフレームはそれぞれ右側のカメラ及び左側のカメラに写る立方体を示している。

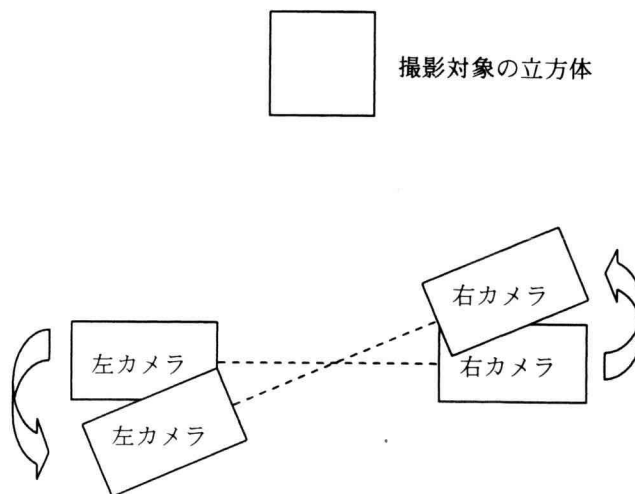


図5 左右カメラに与えた動き

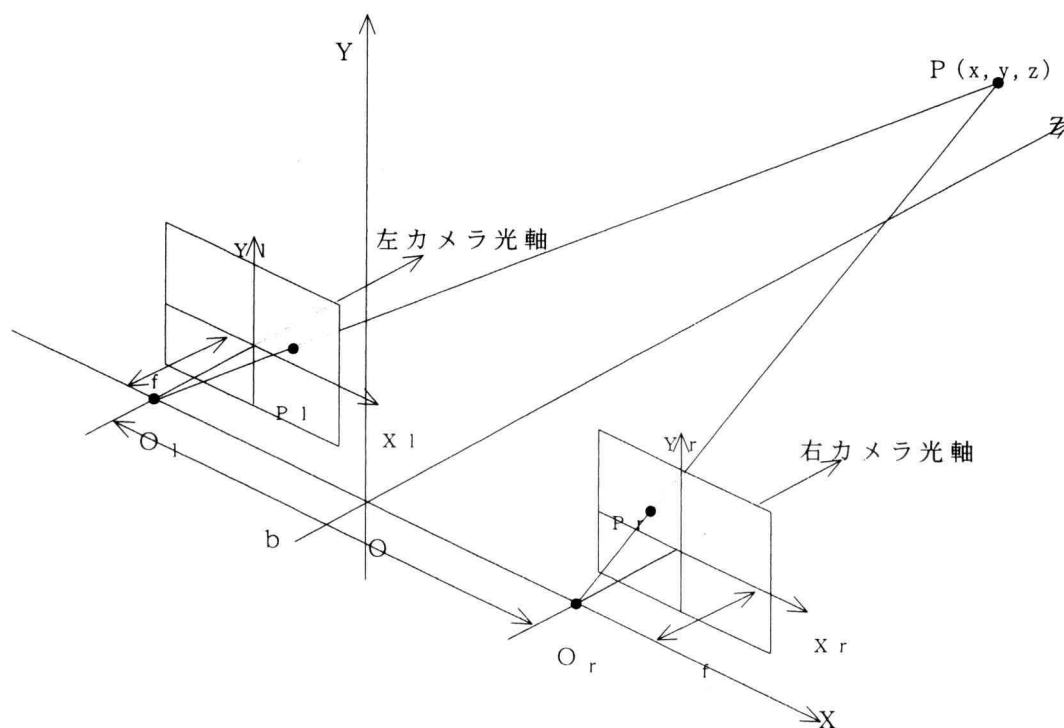


図4 ステレオ画像処理の原理

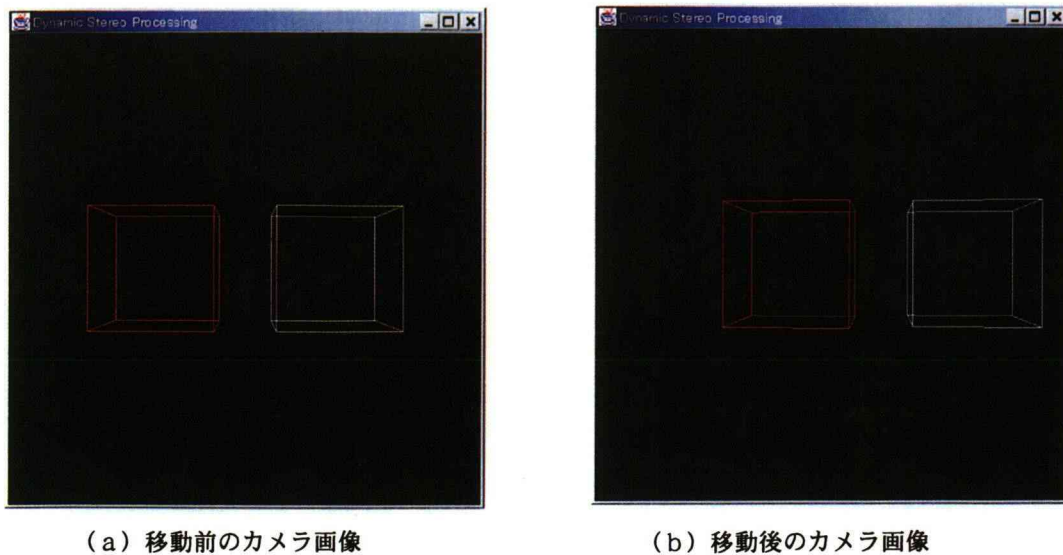


図6 計算機により生成したステレオ動画画像

これらの画像にステレオ動画画像処理を適用するにあたり、実際にはエッジ検出・ハフ変換・直線の交点算出という手順をふんで立方体の頂点の座標を算出する必要がある。しかし、ここでは画像中の頂点の二次元座標から3次元情報座標を算出することが目的なので、頂点の二次元座標は既知であることにした。

まず、左右のカメラから得られる動画画像を用いて、カメラの運動パラメータを算出した。その結果を表1に示す。この表から明らかなように左カメラからの推定値は理論値とすべて一致したが、右カメラからの推定値は並進ベクトル・回転行列ともに誤差を含んでいた。

この結果を用いて、左右カメラ画像間の対応付けを行ったところ、すべての特徴点を正しく特徴づけることができた。

4 むすび

本研究の目的は、互いに異なる欠点を有する動画画像処理とステレオ画像処理を組み合わせ、複数の二次元画像からより精度の高い3次元情報を抽出する手法を確立することである。本稿では、その第一歩として動画画像処理をステレオ画像処理の前処理として利用するステレオ動画画像処理を提案した。さらに、簡単な計算機シミュレーションも行っており、同手法の妥当性を評価した。その結果、最終的な左右カメラ画像間の対応付けにおいて、動画画像処理によって得られる情報が有用であることが確認された。

参考文献

- [1] 熊井正司, “ステレオ動画画像による3次元認識の研究”, 神奈川工科大学情報工学科平成12年度卒論(2001).

表1 動画画像処理により推定したカメラの運動パラメータ

	理論値	推定値
並進ベクトル (左カメラ)	$\begin{pmatrix} -0.04 \\ 0.00 \\ 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.04 \\ 0.00 \\ 1.00 \end{pmatrix}$
並進ベクトル (右カメラ)	$\begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.00 \\ -1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.04 \\ 0.19 \\ 0.98 \end{pmatrix}$
回転行列 (左 カメラ)	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.09 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.09 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$
回転行列 (右 カメラ)	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & -0.09 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.09 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.01 & 0.00 \\ -0.01 & 0.93 & -0.37 \\ 0.00 & -0.37 & -0.93 \end{pmatrix}$