

3枚の弱中心射影画像間の多重正規化相関による

密な3次元形状復元

藤井 友和 徐 剛

立命館大学理工学部情報学科コンピュータビジョン研究室, 草津市

画像間の対応と物体形状の復元はコンピュータビジョンにおける基本的な問題の1つである。本論文では画像間の密な対応と形状復元を行うことでこの双方の問題を同時に解決する手法を紹介する。まず、同一物体の写った画像を3枚用意する。この画像から特徴点とその対応をとり、各画像間のエピポラ方程式を復元する。さらにこの特徴点の対応からカメラの3次元運動をも復元する。3枚の画像中、基準となる1枚を選び、奥行きを変化させると、他の2枚の画像上に仮の対応点もエピポラ線上で移動する。その3点間の正規化相関値の和が最も高いものに対応する奥行きを正しいものとする。本論文の実験では、この手法によって直接的に密な形状復元ができた。

Direct Dense Depth from Three Weak Perspective Images Using Multi-Correlations

Tomokazu FUJII Gang XU

Computer Vision Laboratory, Department of Computer Science, Ritsumeikan University

We propose a new algorithm to recover dense depth from three weak perspective images using the sum of the normalized correlations. Given a few number of matched feature points over the three images, the 3D motions can be recovered. We assume that they are known, so that we can compute the image coordinates in each image given any 3D point. Now, for each point of the first image, we want to determine its depth. For each depth, we first compute their coordinates in the second and third images, then compute the normalized correlations between each image pair, and finally add them together. The depth that gives the highest score of the correlation sums is chosen. The depth is directly recovered rather than via the traditional disparity. The use of the sum of correlations help reduce correspondence ambiguity. Camera calibration is not needed because weak perspective images are used. Experimental results show the algorithm is effective.

1. はじめに

ステレオ画像による密な3次元形状復元に関しては、様々な研究がなされてきたが、その中でも特に効果的な方法としては、奥富と金出が提案したマルチベースライン法がある[1]。複数の画像間自乗誤差の総和を用いて対応点を判断すれば、特徴のはっきりしない画像でも、密な対応が可能であることを示した意味は大きい。自乗誤差の計算は単純であり、ハードウェアによる実時間のシステムも開発された[2]。しかし、最初の手法では事前にカメラを平行となるように厳密な調整を必要とした。その後、この制約を無くすために、任意のカメラ配置のもとで、カメラの校正を事前しておく手法も提

案されたが、複雑な手順が必要である[3]。

本論文では、中心射影画像ではなく、3枚の任意の角度からみた弱中心射影を用いることによって、事前にカメラ校正をしなくても、密な3次元形状を復元できることを示す。対象物体のサイズがカメラと物体の間の距離と比べて十分小さい場合、射影は弱中心射影と近似できる。3枚の弱中心画像があれば、その間の3次元運動が4点以上の対応点から求められる[4][5][6]。カメラの内部変数を厳密に求める必要がない。金出らの手法と比べると、弱中心射影という制約がつくが、比較的小さな物体の場合、本手法がより簡単である。

はじめに、3枚の画像間にある特徴点の対応は

既に得ているものとする[7].特徴点の対応があれば,それを基にカメラの3次元運動を復元することが可能である.基準となる画像(以下便宜上,画像1)上,ある1点の x, y 座標に z 座標を仮定すれば,その3次元点が他方の画像2,3ではどこへ射影されるかが計算できる.どの奥行きを仮定したときに対応点間の相関が最も高いかを計算し,奥行きを求める.

まず,相関計算をするために,画像のエピポーラ線を平行にする処理(これを以下,画像の平行化と呼ぶ)を行なう.2枚の画像のみで対応点を推定する際に,相関値のカーブの関係上,確実な対応を得難い場合が往々にして考えられる.そこで本論文においては,3枚の画像の組み合わせのうち,異なる正規化相関の結果を統合することでその問題を回避することにした.正しい対応がなされる点は,3枚の画像のどの組合せにおいても同様の場所においてピークを得られる.そこで正規化相関計算を同一の点に対して行ない,その相関値の和をもって相関カーブのピークを得ることとした.

2. 奥行きを直接的な復元

2.1 奥行きの変化による点の移動

物体を多視点から撮影したとき,カメラの運動には次のような関係がある.

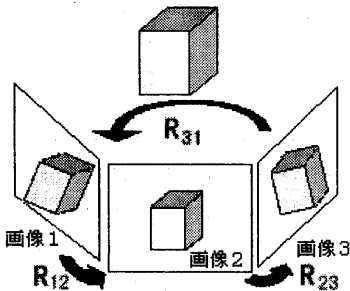


Fig.1 Three images are taken by moving the camera.

物体を撮影したカメラの3次元運動は,特徴点の対応が3枚の画像間で4点以上得られていれば復元が可能である.これは1枚の画像の座標系を基準として,その画像の1点 $P(x, y)$ の奥行き z が特定できていれば,他の2枚の画像上で P がどこに存在しているのかを計算できることを示す.

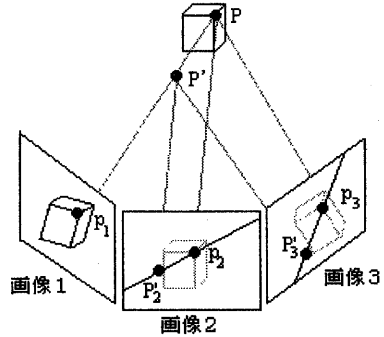


Fig.2 Points move along epipolar lines as the depth changes

図2は画像1上の点 P_1 の奥行きを仮定したときの仮の物体点 P' が,画像2と画像3上でどこに写っているかを示している.なお,図2の画像2と3上に引かれている直線はエピポーラ線である.この図からも分かるとおり,奥行きを変化させると他方の画像に写る P_2, P_3 の位置も変化する.それぞれの画像で特徴点の重心を座標原点としたとき, P' は次の式で他の画像へ射影できる.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = s_{12} \mathbf{R}_{12} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = s_{13} \mathbf{R}_{13} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{R}_{12} :画像1から画像2へ回転行列の3行目を除いた行列

\mathbf{R}_{13} :画像1から画像3へ回転行列の3行目を除いた行列

s_{12} :画像1に対する画像2のスケール

s_{13} :画像1に対する画像3のスケール

$[x_1 \ y_1 \ Z]^T$:画像1を基準とした時の3次元点

$[x_2 \ y_2]^T$:画像2上に射影された点

$[x_3 \ y_3]^T$:画像3上に射影された点

ここで用いられている行列 \mathbf{R}_{12} と \mathbf{R}_{13} は杉本・徐の手法により復元されたものである[6].この2つの式により, P' の奥行きを適当に変化させたとき,画像2と画像3上での P_2, P_3 は移動し,適当な奥行きが与えられたときに P_2, P_3 と一致することが分かる.

2.2 奥行き変化のステップ

図2の P'の奥行きの適当な変化量のステップ(以下単に,ステップ)をどのように決定すべきかという問題がある。

本論文では,画像が離散データであることを考慮する.奥行き ΔZ 分だけ移動した点と元の点の差分を取り,その大きさが1画素になるような ΔZ をステップとする.このとき,式(1)より次の式が得られる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} x_2 + \Delta x \\ y_2 + \Delta y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \\ &= s_{12} \mathbf{R}_{12} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ Z + \Delta Z \end{bmatrix} - s_{12} \mathbf{R}_{12} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ Z \end{bmatrix} \end{aligned}$$

すなわち

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = s_{12} \mathbf{R}_{12} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta Z \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \end{bmatrix} \Delta Z$$

ただし, r_{13} と r_{23} はそれぞれが \mathbf{R}_{12} の第1行第3列成分と,第2行第3列成分である.この式に対して $[\Delta x \ \Delta y]^T$ の長さが1になるような ΔZ を選べばよい.したがって,

$$\left\| s_{12} \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \end{bmatrix} \Delta Z \right\|^2 = s^2 (r_{13}^2 + r_{23}^2) \Delta Z^2 = 1$$

ΔZ は次式より計算される。

$$\Delta Z = \sqrt{\frac{1}{s_{12}^2 (r_{13}^2 + r_{23}^2)}} \quad (3)$$

式(2)からも同様にもう一つ ΔZ が求められるが,より小さな ΔZ を採用し,画像上での点の射影位置の移動は最大で1画素になるようにする。

3. 画像の平行化

3.1 画像の平行化

正規化相関を用いた対応づけでは,エピポーラ線に沿って相関ウィンドウを切る.その際,エピポーラ線が画像に対し水平に現れなければ,その相関ウィンドウもエピポーラ線に沿って斜めに切ることになり,その際に内包の問題が生じる.そこで,2枚の画像にそれぞれ適当な回転,拡大・縮小,平行移動を行ない,両画像のエピポーラ線を水平に揃え

る処理を行ない,後の対応づけ処理をより円滑に行なう.この2枚の画像間のエピポーラ線の水平統一化を「ステレオ画像の平行化」と呼ぶ[8].

通常,エピポーラ方程式は,

$$\bar{\mathbf{x}} \mathbf{F} \bar{\mathbf{x}}' = 0 \quad (4)$$

である.ここで, $\bar{\mathbf{x}} = [x, y, 1]^T$, $\bar{\mathbf{x}}' = [x', y', 1]^T$ は両画像における対応点の座標の拡張ベクトル(augmented vector)であり,弱中心射影のときは, \mathbf{F} は 3×3 の行列であり,

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & f_{13} \\ 0 & 0 & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}$$

と表せる。

よって式(4)を展開すれば,エピポーラ方程式は

$$f_{13}x + f_{23}y + f_{31}x' + f_{32}y' + f_{33} = \mathbf{f}^T \mathbf{p}_i + f_{33} = 0 \quad (5)$$

と表される.ただし,

$$\mathbf{f} = [f_{13}, f_{23}, f_{31}, f_{32}]^T, \mathbf{p}_i = [x_i, y_i, x_i', y_i']^T$$

エピポーラ方程式(5)の幾何学的な意味は次のように変形すると分かる。

$$(-x \sin \alpha + y \cos \alpha) - \rho (-x' \sin \gamma + y' \cos \gamma) + \lambda = 0 \quad (6)$$

ただし, $\alpha = \arctan 2(f_{13}, -f_{23})$, $\gamma = \arctan 2(f_{31}, -f_{32})$

$$\rho = \sqrt{\frac{f_{31}^2 + f_{32}^2}{f_{13}^2 + f_{23}^2}}, \lambda = \frac{f_{33}}{\sqrt{f_{13}^2 + f_{23}^2}} \quad (7)$$

ここで $\arctan 2(b, a)$ は範囲 $[-\pi, \pi]$ の $\tan^{-1}(b/a)$ である。

α, γ は画像平面内での回転角度, ρ はスケールの変化, λ は回転後の縦方向の平行移動を表す.つまり,画像1を画像平面内で α 回転させ,画像2を γ 回転させ ρ 倍し,縦方向に λ 移動させると,2枚の画像間の対応点の縦座標が一致するということである(図3).

このことを式を使って説明すると次のようになる.画像1の点 (x, y) と画像2の点 (x', y') に対して,次のように点 (\bar{x}, \bar{y}) と (\bar{x}', \bar{y}') へ変換を行なう。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \bar{x}' \\ \bar{y}' \end{bmatrix} &= \rho \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

よって,以上のことより式(9)を得ることができる。

$$\bar{y} = \bar{y}' \quad (9)$$

これにより,対応点の垂直座標を一致させることができる。

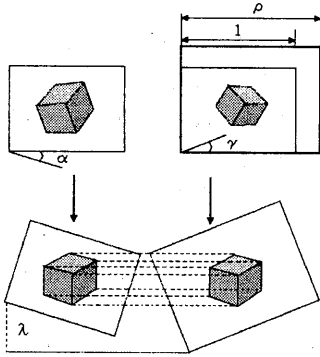


Fig.3 Epipolar equation can be used for image rectification.

4. 多重正規化相関

相関法は,コンピュータビジョンの世界では古くから用いられてきた方法であり,本論文では正規化相関法を用いる[8][9][10][11].

4.1 正規化相関

まず相関法の原理を簡単に図4に示す。

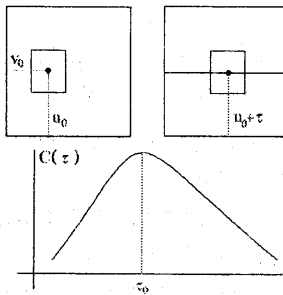


Fig.4 The principle of matching by correlation

画像1の点 (u_0, v_0) を中心に置く,一辺の長さが $(2Q+1)$ の正方形のウィンドウを画像1上に切り,同じ大きさのウィンドウを他方の画像上のエピポーラ線に沿って動かしながら,双方のウィンドウの相関値を計算する.その相関値がもっとも高くなる点を対応点とする.なお,画像の平行化が行なわれた場合,エピポーラ線は水平になっているため,ウィンドウの移動はx方向の変化をさせるだけでよい。

本論文に用いる相関の式は次の関数である。

$$C(\tau) = \frac{1}{K} \sum_{u_1=-Q}^{+Q} \sum_{v_1=-Q}^{+Q} (I_1(u_1 + u_0, v_1 + v_0) - \overline{I_1(u_0, v_0)})(I_2(u_1 + u_0 + \tau, v_1 + v_0) - \overline{I_2(u_0 + \tau, v_0)}) \quad (10)$$

ここで,

$$K = N\sigma_1(u_0, v_0)\sigma_2(u_0 + \tau, v_0)$$

$$N = (2Q + 1)^2$$

式(10)の $\overline{I_1(u_0, v_0)}$ と $\sigma_1(u_0, v_0)$ は,画像1の (u_0, v_0) を中心とした相関ウィンドウの輝度平均値と標準偏差である.それぞれを求める式は次に示すものである。

$$\overline{I_1(u_0, v_0)} = \frac{1}{N} \sum_{u_1=-Q}^{+Q} \sum_{v_1=-Q}^{+Q} I_1(u_1 + u_0, v_1 + v_0)$$

$$\sigma_1^2(u_0, v_0) = \frac{1}{N} \sum_{u_1=-Q}^{+Q} \sum_{v_1=-Q}^{+Q} (I_1(u_1 + u_0, v_1 + v_0) - \overline{I_1(u_0, v_0)})^2$$

なお, $\overline{I_2(u_0 + \tau, v_0)}$ と $\sigma_2(u_0 + \tau, v_0)$ に関しても,これと同様の関数で与えられる.この平均値と標準偏差により,式(9)の相関値は-1~+1の間に正規化される.正規化によって,画像間の明るさの違いによる相関の影響を減らし,より安定した結果を得られる。

4.2 多重正規化相関

正規化相関のカーブのピークが明確な場合は,その点を対応点とする.しかし2枚の画像による相関計算では,画像上に特徴があまりないような場所でのピークが明確でない場合がある(図5).

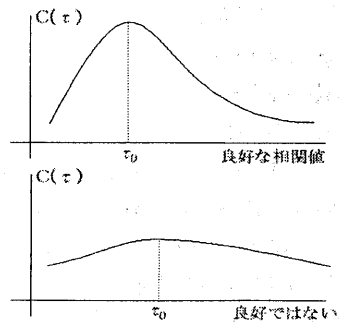


Fig.5 A Good and a bad examples for matching by correlation

そこで、より相関カーブのピークを明確にするために3枚の画像を用い、正規化相関計算の結果を多重化することとした。相関カーブは、同一点に関しては正しい対応の場所で高い相関値が得られる[1]。正規化相関も同様の性質を有するため、相関カーブを多重化し、そのピークの場所を対応点と判断する。

実際に多重正規化相関によって実験中に得られた多重正規化相関カーブの例を紹介する。

図6はピークが同様の場所に現れており、多重化の結果も同じ場所にピークが表れている。図Yref{curve2}は緩やかなカーブが多重化により明確なカーブになっている。図Yref{curve3}も図Yref{curve2}と同様に緩やかなカーブが多重化によりピークを明確にあらわした典型例といえる。

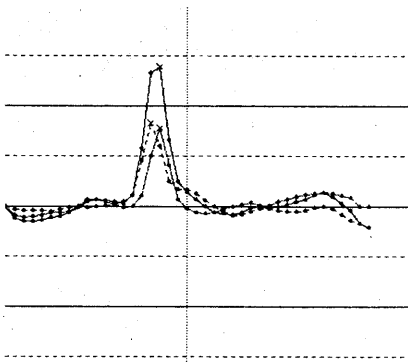


Fig.6 Example 1 of multi-correlation

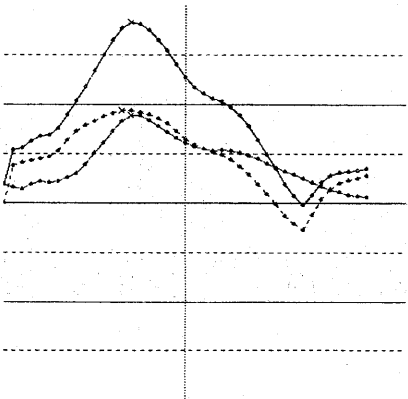


Fig.7 Example 2 of multi-correlation

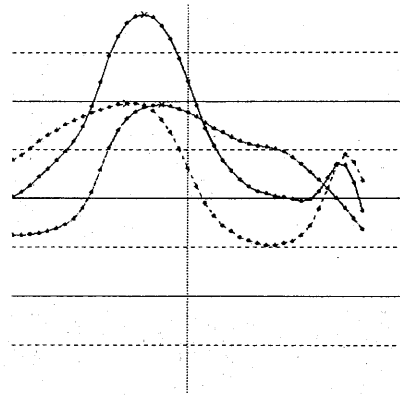


Fig.8 Example 3 of multi-correlation

5. 実験結果

前述の手法を統合し、いくつかの例に対して物体形状を密に復元した。なお、本実験での多重正規化相関計算は、基準画像(画像 1)と他方の画像による2つの正規化相関によるものである。正規化相関計算では、ウィンドウの大きさが極端に大きい場合や小さい場合には正しい結果を得られない場合がある。本実験においては相関ウィンドウの大きさは 15×15 (式(10))の $Q=7$ と設定した。これは度重なる試行により得られた経験により、適当と判断した値であった。

最初の例として、人形の画像を3枚撮った。それを図9に示す。

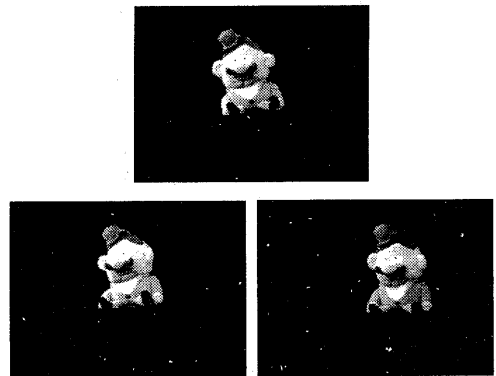


Fig.9 Three original images

これら原画像3枚に対し画像の平行化を行うと、次のようになる。



Fig.10 Rectified image 1 and image 2



Fig.11 Rectified image 1 and image 3

これらの平行化画像に多重正規化相関を用いて奥行きを復元した。ここで、あまり広い範囲に正規化相関計算を行なうと、誤りの可能性と処理時間の増加につながる。そこでこの実験の相関計算の範囲(奥行き変化量)は $-20\Delta Z \sim +20\Delta Z$ としている。この値は人形の特徴点の奥行きの範囲を考慮した値である。

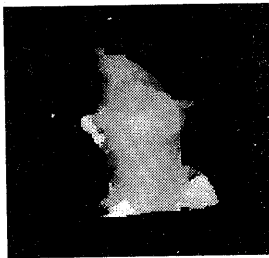


Fig.12 Recovered depth map

図 12 がその奥行き復元の結果である。より手前にある点を高輝度に、奥にある点ほどより低輝度で表現してある。得られた復元結果では、所々にノイズの影響による大幅な奥行きの変化がある。一般的に物体の奥行きは滑らかに変化するため、著しく奥行きの変化する点に関して、その両隣の点の奥行きを利用してスムージングを行ない最終結果(図 13)を得た。



Fig.13 Smoothed depth map

2 番目の例として、人の顔を使った。



Fig.14 Three original images

これら原画像 3 枚に対し画像の平行化を行うと、次のようになる。

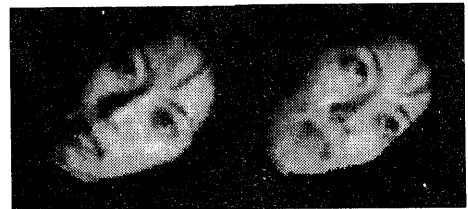


Fig.15 Rectified image 1 and image 2



Fig.16 Rectified image 1 and image 3

この平行化画像に対して多重正規化相関を用いて奥行きを復元することで図 17 の結果を得た。この実験の相関計算の範囲(奥行き変化量)は $-15\Delta Z \sim +15\Delta Z$ としている。

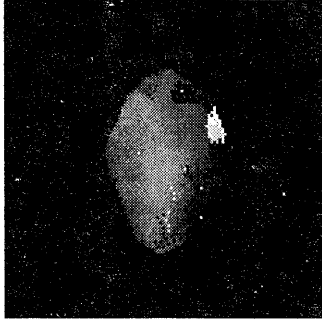


Fig.17 Recovered depth map

図 17 の右上の黒い領域は、原画像の髪の毛の影響を受けた部分であり、白い部分はセルフオクルージョンの影響を受けた部分である。これらはいずれも誤った奥行きを示している。人形の実験と同様の理由から、こちらにもスムージングを行なった。図 18 に示す。

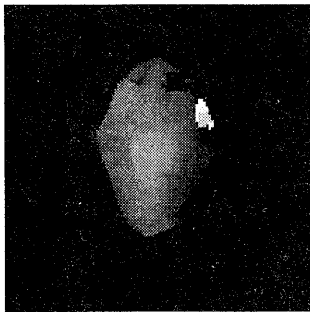


Fig.18 Smoothed depth map

その他の例も同様の結果を示し、本手法の有効性を実証している。

6. むすび

本論文では 3 枚の弱中心射影画像からの密な形状復元に関して、多重正規化相関と画像の平行化、更に奥行き変化ステップの算出法を用いて行なう手法を述べてきた。

本手法を用いた形状復元の手順は非常に簡単で容易である。まず、弱中心射影の画像を使用するため、複雑なカメラキャリブレーションの計算を必要としない。そして対になる画像における正規化相関が計算できる時、その値の足し合わせの結果得られる多重正規化相関値により直接的に奥行きが復元可能であることを示した

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-II No.8, pp.1317-1327, Aug.1992
- [2]金出武雄, 蚊野浩, 木村茂, 川村英二, 吉田収志, 織田和男, “ビデオレー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
- [3]蚊野浩, 木村茂, 田中昌也, 金出武雄, “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”, 日本ロボット学会誌, Vol.16 No.4 pp. 527-532, 1998
- [4]S. Ullman, “The Interpretation of Visual Motion”, MIT Press, Cambridge, MA, 1979.
- [5]C. Tomai and T. Kanade, “Shape and motion from image streams; A factorization method”, International Journal of Computer Vision, Vol.9, No.2, pp.137-154, 1992
- [6]杉本典子, 徐剛, “弱中心射影からオイラー角を利用したモーション復元の線形アルゴリズム”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-II No.4 pp.681-688, 1998
- [7]前田幸枝, 徐剛, “タブー探索法による特徴点の滑らかな対応づけとエピポラ方程式の復元”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-D-II No.3 に掲載予定, 1999
- [8]徐剛, 辻三郎, “3 次元ビジョン”, 共立出版, 1998
- [9]O.Faugeras, “THREE - DIMENSIONAL COMPUTER VISION:AGEOMETRICVIEWPOINT,Massachusetts Institute of Technology, 1993
- [10]Olivier Faugeras, et.al., “Real time correlation-based stereo: algorithm, implementations and applications”, Research Report 2013, INRIA, 1993
- [11]G. Xu and Z. Zhang, “Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition: A Unified Approach”, Kluwer Academic Publishers, 1996.