

カメラ2台による因子分解法に基づく3次元復元法

Three-Dimensional Recovery Based on Factorization with Two Cameras

田房 友典* 山田 敬太郎† 石川 聖二キ
Tomonori Tabusa Keitarou Yamada Seiji Ishikawa

1. まえがき

変形物体(人)の3次元データは、スポーツ応用をはじめ、医療・福祉分野でリハビリの訓練評価、障害者専用の器具や家具の開発など様々な分野で利用ニーズが高まり、容易かつ安価な3次元復元法の開発が求められている。

容易な3次元復元法として、カメラキャリブレーション不要な因子分解法[1]がよく知られている。因子分解法は、計測行列と呼ばれる画像内の特徴点の時系列データの特異値分解によって、物体の形状とカメラの運動を表す行列に分解する手法である。問題点は、画像のノイズが大きく、あるいは追跡の不確かさから、計測行列がランク3であるにもかかわらず、3つ目以降の特異値を無視できない事も多々ある。このため、従来法[1]では、3つの特異値で安定した復元精度を得るために、多くのカメラからの多視点画像を用いて、計測行列の作成を行っている。タンら[2]および田房ら[3]は、因子分解法をモーションキャプチャに適用する手法を提案しているが、本法に用いられている拡大計測行列は、同様に3台のカメラを利用している。

近年、因子分解法の原理が、特異値分解による行列の因子分解が直接の要因でないことが指摘され、特異値分解は、因子分解の最小二乗解の数値計算の一手段に過ぎないことが明らかとされた[4]。つまり、理論的に2台以上のカメラを用いて4行以上の計測行列を作成できれば、因子分解することは可能である。

本論文は、特異値分解が最小二乗法の一手法であると考えると、復元精度と2台のカメラ間隔に大きな影響があることが予測される。最低数(2台)のカメラでの安定した復元精度を得るための計測条件(カメラ間隔)を実験的に明らかにする。

2. 因子分解法に基づく変形体の3次元復元法

まず、時間的に変化する対象(変形体)を、因子分解法を用いて3次元復元する手法[2]を述べる。計測対象に P 個の特徴点を付け、 F 台のビデオカメラによって同時に撮影する。そのビデオ画像を一定のサンプル時間で静止画像として取り込み、各画像上で特徴点の2次元座標を抽出する。時刻 t において、全ての画像上で対応が取れる特徴点数を P_f ($f=1,2,\dots,T$)とする。時刻 t における f ($f=1,2,\dots,F$)枚目の画像上で観測される特徴点 p ($p=1,2,\dots,P_f$)の座標を $(x_{fp}(t), y_{fp}(t))$ とし、対応を取りながら式(1)で与えられる行列 $W(t)$ に記入する。

式(1)の $W(t)$ の上半分は特徴点の x 座標値 $x_{fp}(t)$ 、下半分は特徴点の y 座標値 $y_{fp}(t)$ を表し、各行は各カメラにおける全特徴点の x 座標値、または y 座標値に対応する。

$$W(t) = \begin{pmatrix} x_{11}(t) & x_{12}(t) & \cdots & x_{1P_f}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{F1}(t) & x_{F2}(t) & \cdots & x_{FP_f}(t) \\ y_{11}(t) & y_{12}(t) & \cdots & y_{1P_f}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{F1}(t) & y_{F2}(t) & \cdots & y_{FP_f}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

全てのサンプル時刻における行列 $W(t)$ を時間軸方向に一列に並べ、式(2)の拡大計測行列 W を作成する。

$$W = (W(1), W(2), \dots, W(t), \dots, W(T)) \quad (2)$$

W を次式によって変換し、全サンプル時刻中における、全特徴点の重心からの相対位置を示す拡大計測行列 \tilde{W} を得る。

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= W - \frac{1}{Q} W \cdot E \\ &= (\tilde{W}(1), \tilde{W}(2), \dots, \tilde{W}(t), \dots, \tilde{W}(T)) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 Q は全サンプル時刻で観測された全特徴点数で

$$Q = \sum_{t=1}^T P_t \quad (4)$$

で与えられる。また E は成分が全て1の $Q \times Q$ の行列である。

行列 \tilde{W} は、特異値分解を用いてビデオカメラの姿勢を与える $2F \times 3$ 行列 M と、全特徴点の3次元座標を与える $3 \times Q$ の形状行列 S とに分解される。

$$\tilde{W} = M \cdot S \quad (5)$$

3. 特異値分解の条件

拡大計測行列 \tilde{W} を式(5)のように分解するには、特異値分解を用いる。特異値分解定理によれば、任意の $2F \times Q$ の行列 \tilde{W} は、 $2F \leq Q$ の場合、次のような3つの行列に分解できる。

$$\tilde{W} = U \Sigma V^T \quad (6)$$

ただし、 U は $2F \times Q$ の直交行列、 S は拡大計測行列の特異値から成る $Q \times Q$ の対角行列、 V は $Q \times Q$ の直交行列で $U U^T = I$ 、 I は $2F \times 2F$ の単位行列となるような行列である。 S の対角成分には \tilde{W} の負でない特異値 (s_1, s_2, \dots, s_Q) が降順に並んでいる。

ここで、拡大計測行列の階数が3であれば、 s_4 以降は0に近い値となる。よって s_4 以降を無視し、式(6)において U の最初の3列、 S の最初の 3×3 の行列、 V の最初の3列に注目し、それぞれを U' 、 Σ' 、 V' とすれば、二乗誤差の最小化の意味での最適分解が得られ、次式が成り立つ。

$$\tilde{W} = U \Sigma' V'^T \quad (7)$$

*弓削商船専門学校情報工学科

†香川大学工学部

‡九州工業大学工学部

そこで、

$$\hat{M} = U' \tag{8}$$

$$\hat{S} = \Sigma' V'^T$$

と定義すれば、一つの分解

$$\tilde{W} = \hat{M}\hat{S} \tag{9}$$

が得られる。しかし、式(9)の分解は一意ではない。実際、任意の3×3の正則行列 D を用いて分解すると、

$$(\hat{M}D)(D^{-1}\hat{S}) = \hat{M}(DD^{-1})\hat{S} = \hat{M}\hat{S} = \tilde{W} \tag{10}$$

のように、無数の解が存在する。そこで、拘束条件を導入し、拘束条件を満たす変換行列 D を求める。拘束条件にはカメラレンズ座標系を与える単位ベクトル i_f, j_f ($f=1, \dots, F$) の正規直交性を利用する。

$$\|i_f\| = \|j_f\| = 1 \tag{11}$$

$$i_f^T j_f = 0$$

式(11)を満たす変換行列 D が求めれば、次式よりカメラ姿勢を与える行列 M と物体形状を与える行列 S の唯一解を求めることができる。

$$M = \hat{M}D \tag{12}$$

$$S = D^{-1}\hat{S}$$

つまり、これまでの分解を拘束する条件は、式(6)の S の対角成分に負でない特異値(s_1, s_2, s_3)が求めればよく、カメラ台数 $F=2$ 以上であれば、理論的に特異値分解を用いてビデオカメラの姿勢を与える $2F \times 3$ 行列 M と、全特徴点の3次元座標を与える $3 \times Q$ の形状行列 S とに分解が可能である。

4. カメラ間視差による復元実験

タンら[2]および田房ら[3]は、カメラ3台以上で安定した復元精度を得ている。カメラ台数が2台と3台において、それぞれカメラ間視差を変化させながら三次元計測実験を行なう。

計測対象は、一辺15 cmの透明の立方体とし、その頂点8つを特徴点として抽出する。カメラ配置は、図1のように1台目のカメラを固定し、2台目のカメラを視差40°から120°まで10°ずつ変化させ撮影を行う。カメラ3台の場合は、1台目と2台目のカメラ間視差の中央位置にカメラを配置する。この条件で計測対象は固定したまま、1台目カメラ位置を変化させて、5回の撮影を行う。

実験により得られた特徴点の2次元座標を式(1)に代入し、8つの3次元座標を得る。復元精度は、この3次元座標を結んで立方体を構成する線分12本と、各平面の対角線を結ぶ線分6本の計18本の分散値によって評価する。ただし、対角線を結ぶ線分は $1/\sqrt{2}$ を乗じて正規化を行なう。

カメラ間視差と復元精度(分散)の関係を図2に示す。同図では、3台のカメラでは、各視差において安定した復元精度を得ており、2台のカメラでは、90°~100°において3台のカメラと同等の復元精度が得られている。

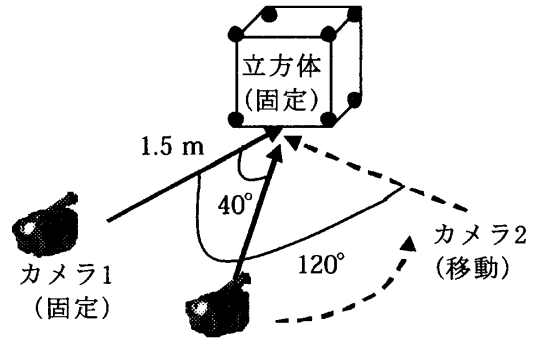


図1 実験環境

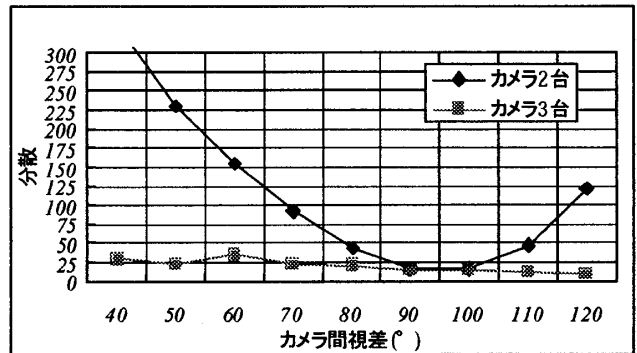


図2 カメラ間視差と復元精度(分散)の関係

5. おわりに

従来の論文[1][2][3]で安定した復元精度が得られるには、カメラ3台以上($F \geq 3$)の必要であると定義されていたが、本実験で示す条件であれば、2台のカメラでも3台のカメラで撮影した同等の復元精度が得られる事を示した。本実験結果は、カメラ台数の削減によるシステム構成の簡略化やコストの削減ができるだけでなく、汎用的な三次元計測システムの開発にも大きく貢献できる。

参考文献

- [1] 金出武雄, コンラッドボールマン, 森田俊彦, 因子分解法による物体形状とカメラ運動の復元, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J76D-II, No.8, pp.1497-1505(1993).
- [2] タン・ジュークイ, 石川聖二, 加藤清, 因子分解を利用したモーションキャプチャ法, 計測自動制御学会論文集, Vol.36, No.11, pp.980-984(2000).
- [3] 田房友典, タン・ジュークイ, 石川聖二, 横田臣博, 移動カメラを用いた広範囲に移動する動作の3次元計測法, バイオメディカルファジィシステム学会誌, Vol.6, No.1, pp.32-41(2004).
- [4] 藤木淳, 点対応を用いた複数の2画像からの3次元形状復元—因子分解法の数理—, 統計数理, Vol.49, No.1, pp.77-107(2001).
- [5] 金谷健一, 菅谷保之, 因子分解法の完全レシピ, 電子情報通信学会技術報告 PRMU2003-118, pp.19-24(2003).