

[Original article]

(2009年1月14日 Accepted)

## 仮想透視カメラ群を用いた立体の全周形状一括復元

守 啓祐<sup>1</sup>, 曾根 俊昌<sup>1</sup>, タン ジュークイ<sup>2</sup>, 金 亨燮<sup>2</sup>, 石川 聖二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州工業大学大学院工学府, <sup>2</sup>九州工業大学大学院工学研究院

**要約:** 本論文は, 仮想透視カメラ群を用いて, 立体の全形状を一度に復元する方法を提案する. 提案法は, 複数のカメラで立体を囲み, 後方の立体形状を手前のカメラ群で透視して見える形状に変換し, それを手前の形状に重ねる. また手前の立体形状を後方のカメラ群で透視して見える形状に変換し, それを後方の形状に重ねる. これらを全部まとめれば, 立体を囲む全カメラでその全周形状が観察されたことになり, 立体復元においてより強い幾何学的拘束が与えられることになる. この情報に因子分解を適用し, 一度に全周形状を復元する. 実験により, 本法は先に提案した方法よりも高い精度で形状復元を行うことができることを確認した.

**キーワード:** 3次元モデル, 形状復元, 因子分解法, 全形状, 透視, コンピュータビジョン

## Simultaneous Entire Shape Recovery of a Solid by Virtual See-through Cameras

Keisuke Mori<sup>1</sup>, Toshimasa Sone<sup>2</sup>, Joo Kooi Tan<sup>2</sup>, Hyoung Seop Kim<sup>2</sup>, Seiji Ishikawa<sup>2</sup>

1) Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology

2) Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

**Abstract:** This paper proposes a novel technique for recovering entire shape of a solid simultaneously by the employment of virtual see-through cameras. In the technique, a solid is surrounded by a set of cameras. The rear shape of the solid is transformed into the shape which would be observed from frontal cameras and it is superposed to the frontal shape, and vice versa. All this procedure results in that the entire shape of the solid is observed by all the cameras surrounding it. This gives stronger geometrical constraints in the shape recovery. The factorization is applied to this information and the entire shape recovers simultaneously. Experimental results show that this technique gives higher precision in the recovered shape than the technique proposed before by the authors.

**Keywords:** 3-D modeling, shape recovery, factorization, entire shape, see-through, computer vision

Seiji ISHIKAWA

Sensuicho 1-1, Tobata, Kitakyushu 804-8550, JAPAN

Phone: +81-(0)93-884-3183, Fax: +81-(0)93-884-3183, E-mail: ishikawa@cntl.kyutech.ac.jp

## 1. はじめに

本論文は、立体の3次元モデル化を効果的に行うための新たな方法を提案する。立体の3次元モデル化は、形状復元とも呼ばれ、コンピュータビジョンの分野で精力的に研究されてきた。形状復元は、仮想現実世界の生成や、ビデオゲームやマンマシンインタラクティブシステムにおける人の立体モデル生成等に利用されている。スポーツやリハビリテーションにおける人の動作解析などへも応用が広がっており、近年特に注目され需要の拡大している技術である。

立体モデル化は物体の全周または全形状の復元である。従来法はステレオ法[1]を基本とし、3次元対象物体の周囲に設置されたカメラで物体の部分ごとの特徴点を復元（3次元座標を計算）し、それをまとめて全周形状を得る。部分ごとの復元形状の重ね合わせであるから、重ね合わせ誤差を低減するには、物体を取り巻くカメラ群の高精度なキャリブレーションが必要である。このため立体器具を用いた精密なカメラキャリブレーションが事前に必要になる。しかしこれでは、キャリブレーションが困難な状況（突発的な事象のモデル化や人通りの多い場所にある物体のモデル化等）では利用できない。このことが立体モデル化技術の広範な普及を妨げている。

ステレオ法の他には、因子分解による立体モデル化法[2]が提案されている。これは、移動撮影するカメラのキャリブレーションは不要であるが、移動中常に観察される物体上の部分しか復元されないの、立体モデル化には復元された部分形状のつなぎ合わせが必要である。しかし因子分解法は結像系を線形近似するため、少なからぬ復元誤差が混入し、つなぎ合わせアルゴリズム[3]を適用するのは難しい。

タンら[4][5]は因子分解法を応用して、つなぎ合わせを行わずに物体（変形体を含む）の全周形状を復元する方法を提案した。この方法は、立体器具を使ったカメラキャリブレーションが不要という特徴を持つが、対象の回りに設置する包囲カメラ群において、相対するカメラの光軸を一致させなければならないという強い撮影条件があった。守ら[6]はこの撮影条件を緩和し、共通に観察される点が3点以上あれば、物体を囲むカメラ配置は自由という全周復元法を提案した。この方法は、複数方向から撮影した画像間で特徴点の対応が取ればカメラキャリブレーションができるという、

画像ベースのカメラキャリブレーションという使いやすさに特徴がある。しかし復元計算に部分的な幾何学拘束しか用いておらず、復元精度に問題があった。

本論文は、守らの提案したアルゴリズム[6]を改良し、画像ベースのカメラキャリブレーションのもとに、対象物体の全周囲に渡る幾何学的拘束を考慮した全周形状一括復元（モデル化）法を提案する。本法の第一の特徴は、立体器具を使うステレオ法と異なり、画像ベースのカメラキャリブレーションを行う点にある。このため、キャリブレーションが困難な場面でも利用可能である。第二の特徴は、物体形状の一括復元を行う点にある。形状のつなぎあわせを行わないため、つなぎあわせの誤差はない。第三の特徴は、全周囲に渡る幾何学的拘束を考慮することにより、復元精度の向上を図っている点にある。

本法の適用条件は、物体上の少なくとも3点が全カメラ群で共通に観察される必要があるという点である。この条件は、対象物体を見下ろすようにカメラ群を配置すれば、実現しやすい。

以下、提案法を述べ、それを守ら[6]の方法と実験的に比較し、本法の優位性を示す。

## 2. 全周復元の方法

本法のアイデアは次のとおりである。物体の周囲に配置したカメラ群を前面カメラ群と後面カメラ群に分け、前面カメラ群で物体の前面の形状情報だけでなく、前面からは直接見えない後面の形状を取得する。また、後面カメラ群で物体の後面の形状情報だけでなく、後面からは直接見えない前面の形状を取得する。この両情報をまとめ、一括して全形状を復元する。

対象物体を囲むカメラ群を前面のカメラ群 $C^F$ と後面のカメラ群 $C^R$ に分ける（図1参照）。提案法は物体上の点（特徴点）を復元する。この点は、 $C^F$ と $C^R$ の両方から観察される点 $P^{FR}$ （その集合を $G(P^{FR})$ とする）、 $C^F$ のみから観察される点 $P^{F-}$ （その集合を $G(P^{F-})$ とする）、 $C^R$ のみから観察される点 $P^{-R}$ （その集合を $G(P^{-R})$ とする）に分類される。よって、前面カメラ群 $C^F$ が観察する点の集合は $G(P^F) = G(P^{FR}) \cup G(P^{F-})$ 、後面カメラ群 $C^R$ が観察する点の集合は $G(P^R) = G(P^{FR}) \cup G(P^{-R})$ で与えられる（図2参照）。全点の集合を $G(P)$ で表す。

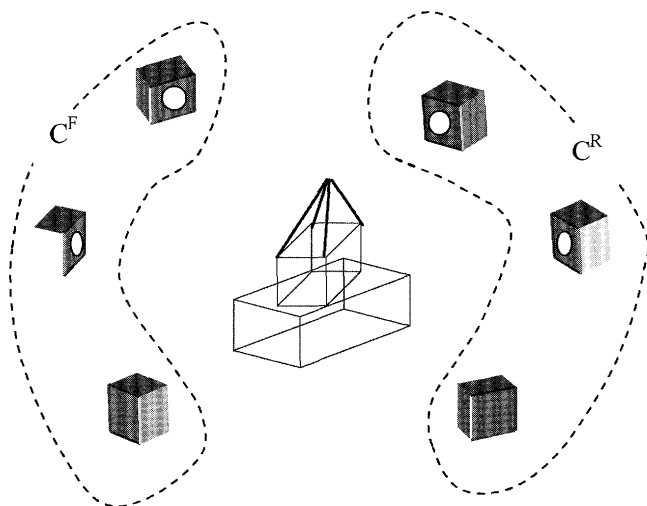


図1. 物体とカメラの配置.

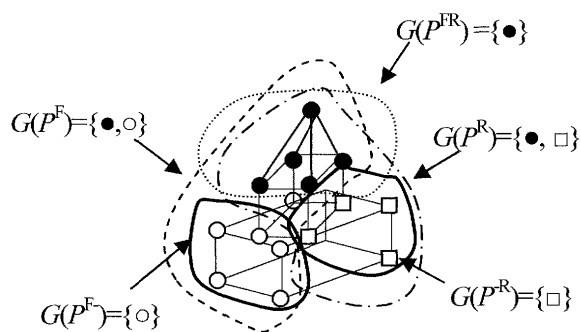


図2. 物体上の点の分類. ●は前後両面のカメラ群から観察される点, ○は前面のカメラ群のみから観察される点, □は後面のカメラ群のみから観察される点.

前面カメラ群が得る点群  $G(P^F)$  の画像に因子分解法を適用すれば, 次式が得られる.

$$W^F = M^F S^F \quad (1)$$

ここで  $W^F$  は集合  $G(P^F)$  に含まれる点の画像座標からなる計測行列,  $M^F$  は前面カメラ群の方向を与える方向行列,  $S^F$  はその点の3次元座標を与える形状行列である. 式(1)より  $M^F$  および  $S^F$  が得られる.

式(1)の行列  $S^F$  は次のように分解できる.

$$S^F = (S^{FR} | S^{F-}) \quad (2)$$

すなわち, 集合  $G(P^{FR})$  に含まれる点の3次元座標を与える行列  $S^{FR}$  と, 集合  $G(P^F)$  に含まれる点の3次元座標を与える行列  $S^{F-}$  に分けられる.

行列  $S^{FR}$  を用いれば, 後面カメラ群の方向行列  $M^R$  は次式を満たす.

$$W^{FR} = M^R S^{FR} \quad (3)$$

ここで  $W^{FR}$  は集合  $G(P^{FR})$  に含まれる点に関する計測行列である.  $W^{FR}$  は後面カメラ群の画像から得られ  $S^{FR}$  は式(2)から与えられるから,  $M^R$  は次式のように求められる.

$$M^R = W^{FR} [S^{FR}]^T (S^{FR} [S^{FR}]^T)^{-1} \quad (4)$$

式(4)より, 集合  $G(P^F)$  に含まれる点は次式によって, 仮想的に後面カメラ群の撮像面に投影される.

$$V^{F-} = M^R S^{F-} \quad (5)$$

式(5)より後面カメラ群は, 物体上の全点に対する次の計測行列  $W^R$  を得ることになる.

$$W^R = \{W^{FR} | V^{F-} | W^{-R}\} \quad (6)$$

一方, 集合  $G(P^{-R})$  に含まれる点については次の因子分解の関係式が成立する.

$$W^{-R} = M^R S^{-R} \quad (7)$$

行列  $W^{-R}$  は後面カメラ群の画像上の点から定義され, 方向行列  $M^R$  は式(4)で与えられるから, 次式のように, 集合  $G(P^{-R})$  に含まれる点の3次元座標を与える行列  $S^{-R}$  が求められる.

$$S^{-R} = ([M^R]^T M^R)^{-1} [M^R]^T W^{-R} \quad (8)$$

これらの復元された点を, 次式によって仮想的に前面カメラ群の撮像面に投影する.

$$V^{-R} = M^F S^{-R} \quad (9)$$

ただし前面カメラ群の方向行列  $M^F$  は式(1)で得られている. 式(9)により前面カメラ群についても, 次式のように, 物体上の全点に対する計測行列  $W^F$  が得られる.

$$W^F = \{W^{FR} | V^{F-} | V^{-R}\} \quad (10)$$

式(6), 式(10)より, 最終的な計測行列  $W$  が次のように定義される.

$$W = \begin{pmatrix} W^F \\ W^R \end{pmatrix} \quad (11)$$

即ち  $W$  は, 上半分は式(10)の  $W^F$ , 下半分は式(6)の  $W^R$  で構成される行列である.

以上の手続きによって, 物体上で選ばれた全点が全カメラで仮想的に撮影されたことになる.  $W$  を因子分解すれば

$$W = MS \quad (12)$$

となり, 全点の復元結果が形状行列  $S$  として得られる. 本アルゴリズムの流れ図を図3に示す.

## 仮想透視カメラ群を用いた立体の全周形状一括復元

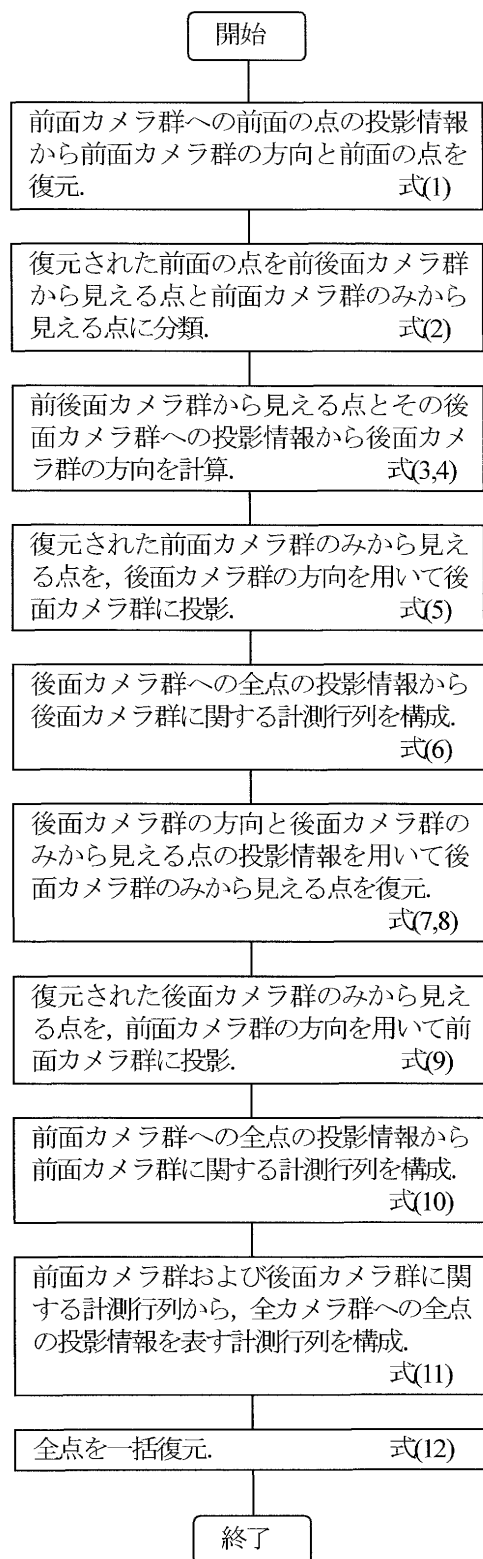


図3. 全形状一括復元の流れ図. 投影情報とは、カメラの撮像面に投影された点の画像座標のこと. 復元とは3次元位置を計算すること.

以上の手続きによって、式(6)に示すように、後面カメラ群は後方から観察される点だけでなく、前方

の见えない点の投影点も得ることができ、また式(10)が示すように、前面カメラ群は前方から観察される点だけでなく、後方の见えない点の投影点も得ることができる. これはカメラが物体の反対側を透視しているとみなすことができるので、これらのカメラを**仮想透視カメラ**と呼ぶ.

式(11)は全点の全カメラ方向への幾何学的拘束を与えており、式(12)は、最小二乗の意味でその幾何学的拘束を最大限満足する立体形状を与える.

### 3. 実験結果

提案法を用いて多面体の全周復元を行った. 撮影環境は守ら[6]と同様で、図4に示すように、1台の固定カメラとカメラから約2m離れた位置にあるターンテーブルからなる. ターンテーブル上に立体を置き、ターンテーブルを回転させて複数方向からその画像を撮影する. カメラの俯角は45度、ターンテーブルは前後面とも、0度を中心として左右に回転させて撮影する. ただし角度の値は、復元計算には用いない.

復元対象は[6]と同じ多面体を用いた. その全面、後面の形状を図5(a)に示す. 辺の長さは短辺5cm、長辺10cm、各頂点に集まる辺のなす角度は90度である. 復元する点は多面体の各頂点、および各長辺の midpoint に球状の小マーカを張り付けている. 点の総数は21点、すなわち  $n(G(P))=21$ , このうち共通点(●)は13点、すなわち  $n(G(P^{FR}))=13$ , 前面カメラ群でのみ観察される点(○)は4点、すなわち  $n(G(P^{F+}))=4$ , 後面カメラ群でのみ観察される点(□)は4点、すなわち  $n(G(P^{-R}))=4$ , である. ただし、 $n(A)$ は集合  $A$  の要素数である.

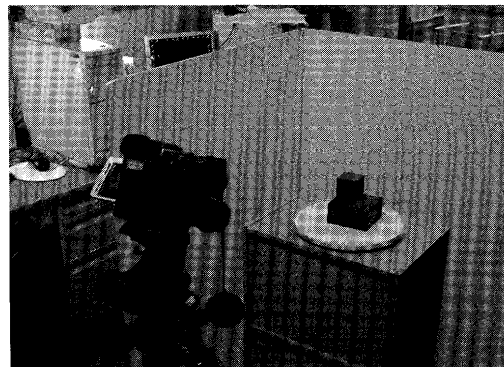


図4. 実験環境.

前節で述べた方法に従い、前面カメラによる計測行列(6)および後面カメラによる計測行列(10)を求め、それらをまとめて全周囲の計測行列(11)を作成し、それを式(12)によって因子分解し、最終的な復元結果を与える形状行列 $S$ を得た。復元結果を図5(b)に示す。半透明表示で全周形状を表示している。ただし復元されるのは特徴点の3次元位置であるが、わかりやすいように面を貼り付けて表示している。

また、論文[6]と同様の方法で復元精度の評価を行った。評価は、4～8方向撮影による復元について、辺の長さで角度で行った。ただし辺とは、図5(a)に示す立体を構成する各辺、角度とは各頂点に集まる3辺が隣接辺どうして作る角度(90度)である。その結果を表1に示す。平均の復元精度は、辺の長さで1.66%、角度で2.27%であった。

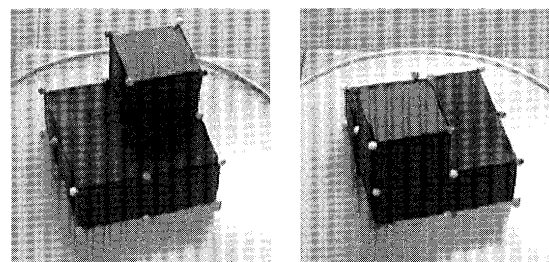
本論文の目的は全周復元法の提案とその効果の検証であるから、復元する点の指定・分類・画像間での対応付け等はマニュアルで行っている。

#### 4. おわりに

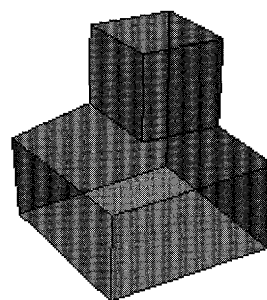
本論文では、守ら[6]の物体全周復元法を改良した方法を提案し、復元精度の改善を実現した。同一物体の全周復元結果の精度は、守ら[6]の方法では辺の長さで4.83%、角度で3.58%の復元誤差が含まれたが、本論文で提案する方法では、辺の長さで平均1.66%、角度で平均2.27%と改善された。撮影方向数が変化しても、辺の長さの誤差は安定して2%未満であり、角度の誤差も2.6%未満である。誤差減少の理由は、守ら[6]の方法では、前面のみあるいは後面のみの幾何学的拘束を考慮した復元であった、すなわち、全カメラで観察される点を復元した後は、前面(後面)カメラのみで観察される点の前面(後面)カメラ群への投影情報のみを利用した復元計算であったのに対し、提案法では、式(11)が示すように、全面(全方向)の幾何学的拘束を一括して考慮しているため、すなわち全周囲に渡る投影形状を同時に考慮しているために精度が向上したものと考えられる。

また、撮影方向数が増えるに従い誤差は減少しているが、これは幾何学的拘束が増えるに従って、より正確な形状が復元されていることを示している。

今後は提案法を、人の運動のような変形する物体の全形状復元に拡張する予定である。



(a)



(b)

図5. 対象と復元結果. (a) 多面体の前面と後面およびマーカ(復元する点)の位置, (b) 全周の復元結果.

表1. 多面体の復元誤差(%).

撮影方向数	辺の長さ	角度
4	1.85	2.57
5	1.79	2.42
6	1.68	2.14
7	1.54	2.12
8	1.44	2.09
平均	1.66	2.27

#### 参考文献

- [1] 井上康男, 桜井伸二, 矢部京之輔: “DLT法”, Japanese Journal of Sports Science, 10, 3, 191-195 (1991年).
- [2] 金出武雄, コンラッド ポールマン, 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, J76-D-II, 8, 1497-1505 (1993年).
- [3] Chen, Y., Medioni, G: “Object modeling by registration of multiple range images”, Image and Vision Computing, 10, 3, 145-155 (1992).
- [4] タン ジュークイ, 石川聖二, 有田哲志: “全周の特徴点情報を含む計測行列を用いた3次元物体モデルの一括生成法”, 映像情報メディア学会誌, 53, 3, 433-436 (1999年3月).
- [5] タン ジュークイ, 石川聖二, 廣川俊二: “多視点画像を用いた変形物体の一括3次元モデル化法”, 画像電

## 仮想透視カメラ群を用いた立体の全周形状一括復元

子学会誌, 32, 4, 483-487(2003年8月).

- [6] 守 啓祐, 曾根俊昌, タン ジュークイ, 金 亨燮, 石川聖二: “包围カメラ群を用いた立体の全周復元法”, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, 10, 2, 39-45(2008年10月).



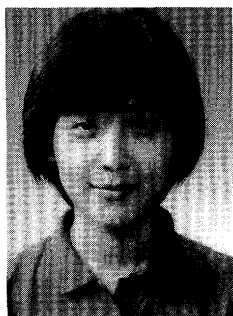
守 啓祐 (もり けいすけ)

熊本大学工学部電子工学科卒. 熊本大学大学院工学研究科電子工学専攻修了. 九州工業大学大学院工学研究科機械知能工学専攻在学中. 現在, 九州共立大学工学部情報学科准教授. 主にコンピュータネットワーク, 情報教育および画像計測の研究に従事. 計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 音響学会, IEEE 各会員.



曾根 俊昌 (そね としまさ)

九州工業大学工学部機械知能工学科卒. 現在, 同大学院工学府機械知能工学専攻知能制御工学コースに在学中. 3次元物体復元の研究に従事.



タン ジュークイ (たん じゅくい)

九州工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 工学博士. 現在, 同大学院工学研究科機械知能工学研究系知能制御工学部門助教. 98年度計測自動制御学会九州支部奨励賞, 2004年度情報処理学会九州支部第13回奨励賞, 同年度知能生命・ロボット国際シンポジウム若手奨励賞, 平成20年度本学会和文論文誌優秀論文賞, 英文論文誌 The Best Paper Award 受賞. 主に画像計測及び解析, コンピュータビジョンの研究に従事. IEEE, 情報処理学会, 計測自動制御学会各会員.



金 亨燮 (きむ ひよんそぶ)

1994年九州工業大学工学部卒. 1996年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了. 1997年より九州工業大学工学部助手(機械知能工学科). 03年同大学講師, 05年より同大学工学部准教授. 医用画像処理, パターン認識に関する研究に従事. 博士(工学). 電子情報通信学会, IEEE, 日本医用画像工学会, バイオメディカル・ファジィ・システム学会, 医用画像情報学会の各会員.



石川 聖二 (いしかわ せいじ)

東京大学工学部計数工学科卒. 東京大学大学院工学系研究科博士課程了. 工学博士. 現在, 九州工業大学大学院工学研究院教授. 連合王国シェフィールド大学客員研究員. オランダ王国ユトレヒト大学客員教授. 主に3次元画像計測の研究に従事. 平成20年度本学会和文論文誌優秀論文賞, 英文論文誌 The Best Paper Award 受賞. 計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 画像電子学会, バイオメディカル・ファジィ・システム学会, IEEE 各会員.