

[Original article]

(2010年4月23日 Accepted)

# 仮想透視カメラ群による物体の全周囲復元法と 人動作の立体モデル化への応用

タン ジュークイ<sup>1</sup>, 曾根 俊昌<sup>2</sup>, 石川 聖二<sup>1</sup>, 金 亨燮<sup>1</sup>, 四宮 孝史<sup>3</sup>

1) 九州工業大学大学院・工学研究院 2) 九州工業大学大学院・工学府 3) ㈱ニコン

**要約:** 本論文は、物体を包囲する仮想透視カメラ群を用いて、物体の全周囲形状のモデル化を行う新しい方法について述べている。提案法のカメラシステムは、前面のカメラ群が、物体の前面だけでなく後面も仮想的に観察し、後面のカメラ群は、物体の後面だけでなく前面も仮想的に観察するというシステムである。これにより、物体全体に広がる特徴点は単一の計測行列に記入され、この計測行列が因子分解されて、全特徴点の3次元座標が求められる。提案法は、リハビリテーションの分野でしばしば解析対象となる、椅子からの人の立ち上がり動作の立体モデル化に適用され、満足のいく結果が得られた。

**キーワード:** 3次元モデル, 全形状, 因子分解法, モーションキャプチャ, リハビリテーション

## Entire Shape Recovery of an Object by Virtual See-through Cameras and Its Application to 3-D Modeling of Human Motions

Joo Kooi TAN<sup>2</sup>, Toshimasa SONE<sup>1</sup>, Seiji ISHIKAWA<sup>2</sup>, Hyoungseop KIM<sup>2</sup>,  
Takashi SHINOMIYA<sup>3</sup>

1) Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology

2) Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

3) Nikon Corporation

**Abstract:** This article describes a novel technique for modeling an entire shape of an object by employing virtual see-through cameras surrounding an object interested. The proposed camera system works as a frontal camera system which observes not only frontal part of the object concerned but also its rear part virtually and, at the same time, as a rear camera system which observes not only rear part of the object but also its frontal part virtually. The feature points spread over the entire object are then collected and registered in a single measurement matrix which is factorized to obtain the 3-D locations of all the feature points. The technique is applied successfully to 3-D modeling of a human stand-up motion from a chair which is often analyzed in rehabilitation.

**Keywords:** 3-D modeling, Entire shape, Factorization, Motion capture, Rehabilitation.

Joo Kooi TAN

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

E-mail: etheltan@cntl.kyutech.ac.jp

## 1. はじめに

3次元物体の復元あるいは立体モデル化はコンピュータビジョン研究の重要な一分野であり、モーションキャプチャシステムの理論的基盤を与えるものである。応用分野として、3次元ビデオゲームや仮想現実空間のキャラクタ作成は確立した領域であり、スポーツのフォーム解析、リハビリテーションの訓練効果の解析等が今後期待される分野である。

画像からの3次元復元理論は種々あるが[1]、モーションキャプチャシステムの基礎となるのは、機械式、磁気式、光学式手法である[2]。この中でも身体や環境への拘束が最も少ないという点で、光学式のモーションキャプチャシステムが主流である。その復元理論はステレオ法であるが、ステレオ法によれば、部分的な復元形状をつなぎ合わせて全周囲モデルを作成するため、つなぎ合せの誤差が入るのが避けられない。

本稿では、仮想透視カメラ群を用いて、3次元物体の全周囲モデルを一度に作成する方法[3]について述べる。本法は、物体上の全特徴点を、物体を取り巻くどのカメラも観察するという仮想的状態を作る。すなわち、前面のカメラ群は物体の前面だけでなく後面も仮想的に観察し、後面のカメラ群は物体の後面だけでなく前面も仮想的に観察するという状況を作る。それに基づき計測行列を作成し、その特異値分解によって全特徴点の3次元位置を一度に求める。類似の方法がタン他[4,5]によって提案されているが、この方法は相対するカメラ対の光軸が一致していなければならないという強い条件があり、システムとしての柔軟性に欠ける。提案法は物体を取りまくカメラの配置は自由という大きな利点がある。唯一の条件は、すべてのカメラが少なくとも3点を共通に観察できなければならないという点である。

提案法の理論的根拠は文献[3]で示した。よって本論文では、手法の概要を述べた上で、椅子からの立ち上がり動作の立体モデル化を例として、従来の光学的モーションキャプチャ法よりも、本法の方が簡便に動作の全周囲復元（立体モデル化）が可能であることを示す。

## 2. 全周囲復元法

提案法は、単一移動カメラによる剛体復元のために提案された因子分解法[6]を、全周囲復元に拡張した方法である。因子分解法は移動カメラで常に観察される

物体の部位が3次元復元されるため、全周囲の一括復元はできない。提案法は、物体を取り巻くすべてのカメラが、物体の全周囲に広がる特徴点をすべて観察するという状況を作り、全方向から観察される形状と最も矛盾のない形状を立体モデルとして作成する。

提案法の概要を述べる。撮影系は図1に示す通り、複数のカメラで対象物体 $O$ を囲む。物体上ですべてのカメラから観察される特徴点(丸で囲んだ点)を選び、因子分解を適用して全てのカメラの向きを求める。これらの特徴点で定義される計測行列を $W_A$ とすれば、

$$W_A = MS_A \quad (1)$$

なる分解から全カメラの向きを与える方向行列 $M$ と、特徴点の3次元位置を与える形状行列 $S_A$ が得られる。方向行列 $M$ を次のように書く。

$$M^T = (A^T B^T C^T \dots F^T) \quad (2a)$$

ここで、式(2a)右辺では

$$X^T = (i_X j_X) \quad (2b)$$

である。すなわち部分行列 $X(X=A, B, C, \dots)$ はカメラ $X$ のレンズ座標系 $(i_X j_X k_X)$ 座標系; $k_X = i_X \times j_X$ を与える行列である。

以上の過程がカメラキャリブレーションであるが、式(1)の計測行列 $W_A$ を得るには画像上で当該特徴点を選べばよい。従来、従来の光学式モーションキャプチャ法のように立体ツールを使うのではなく、画像のみを用いた簡便なカメラキャリブレーションである。

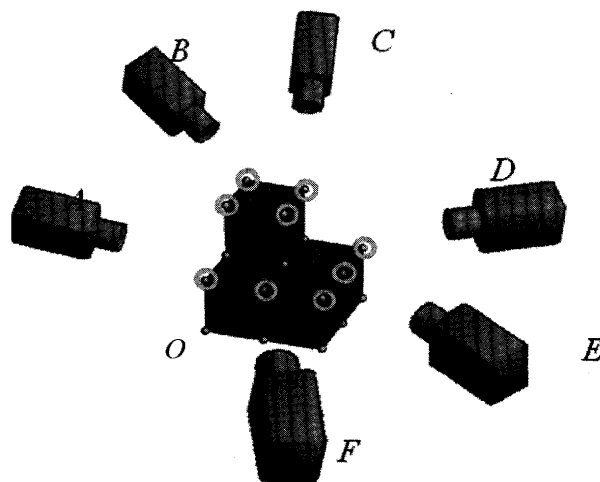


図1. 全カメラから観察される物体上の特徴点。

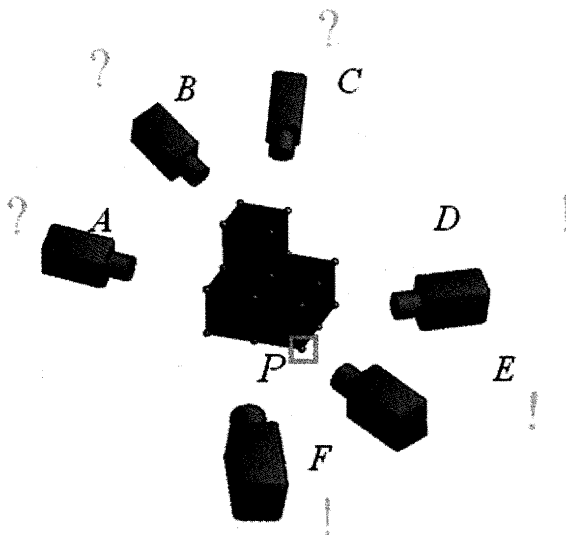


図2. 前面カメラ群のみから観察される特徴点.

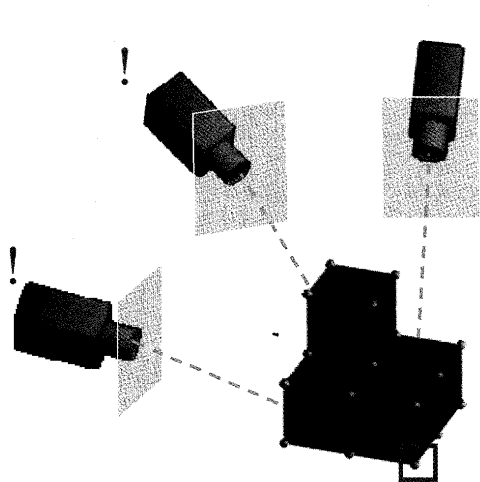


図3. 前面カメラ群のみから観察される特徴点の後面カメラ群への投影.

次に、図2の点Pのように、前面のカメラ（同図ではカメラD,E,F）のみから観察される特徴点の3次元位置を、それらのカメラの向きを含む行列  $M_F$

$$M_F^T = (D^T \dots F^T) \quad (3)$$

を利用して次式から求める.

$$S_F = (M_F^T M_F)^{-1} M_F^T W_F \quad (4)$$

ただし、 $W_F$ は前面の特徴点を作る計測行列である.

式(4)で求められた前面の特徴点を後面のカメラ群に投影する. 図3はその様子を示す. 後面のカメラ群の方向行列は式(2)より

$$M_R^T = (A^T \dots C^T) \quad (5)$$

で与えられるから、特徴点の投影は次式による.

$$V_R = M_R S_F \quad (6)$$

後面のカメラ群は実際には前面の点は見えないから、式(6)は仮想的な投影となる. これにより後面のカメラ群は、後面の特徴点だけでなく前面の特徴点も見ることになるので、仮想透視カメラ群と呼ぶ.

同様に、後面のカメラ群のみが観察できる特徴点を3次元復元して前面のカメラ群に投影することができる. この結果、全てのカメラが全ての特徴点を観察することになる. そこで結局、得られる計測行列は、模式的に次のように表される.

$$W = \begin{pmatrix} \text{①} & \text{②} & \text{④} \\ \text{③} & \text{⑤} \end{pmatrix} \quad (7)$$

- ① 全カメラから観察される特徴点の画像座標を与える部分行列
- ② 前面カメラ群のみから観察される特徴点の画像座標を与える部分行列
- ③ 前面カメラ群のみから観察される特徴点を後面カメラ群に投影したときのそれらの特徴点の画像座標を与える部分行列
- ④ 後面カメラ群のみから観察される特徴点を前面カメラ群に投影したときのそれらの特徴点の画像座標を与える部分行列
- ⑤ 後面カメラ群のみから観察される特徴点の画像座標を与える部分行列

行列  $W$  を

$$W = MS \quad (8)$$

のように因子分解すれば、物体の全周囲に広がる特徴点の3次元座標が行列  $S$  によって与えられる. これらの復元された特徴点群に立体形状をあてはめることにより、立体モデルが得られる.

### 3. 人動作の立体モデル化

本法は全周囲形状を一括復元するため、対象の前面だけでなく後面の観察も容易である. 本節では、人の動作の全周囲モデル化の例を示す.

実験では、リハビリテーションや福祉の分野でしばしば解析対象となる、椅子からの人の立ち上がり動作の立体モデル化を行った。図4に示すように6台のカメラで対象を撮影した。隣接するカメラのなす角度は $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ で、撮影対象までの距離は約5[m]である。身体には主に関節部に30個のマーカを装着し、全カメラより共通に観測される点を床面や椅子から10点取得した。立体モデル化の一部を図5に示す。復元されるのはマーカの3次元位置であるが、視認性を上げるために結果を円筒等で表現している。円筒等は身体上の各マーカの3次元位置をできるだけよく近似するサイズのを、OpenGL (Open Graphics Library) を用いて作成した。また、手足の重なり時の視認性を上げるために、異なる色を左右手足に与えて表示している。

全周囲復元のため、動作者がどちらを向いても観察できる。図6は左側面、正面、右側面、後面からの動作を示している。これらは図4の結果において、視点を固定して得られたものである。また図7は、高い椅子と低い椅子からの立ち上がり動作の様子を真上からの見え方で示している。低い椅子からの立ち上がり動作の方が上半身がより前に出る様子がわかる。図6(a)の正面や図7の真上からの観察を利用すると、動作の

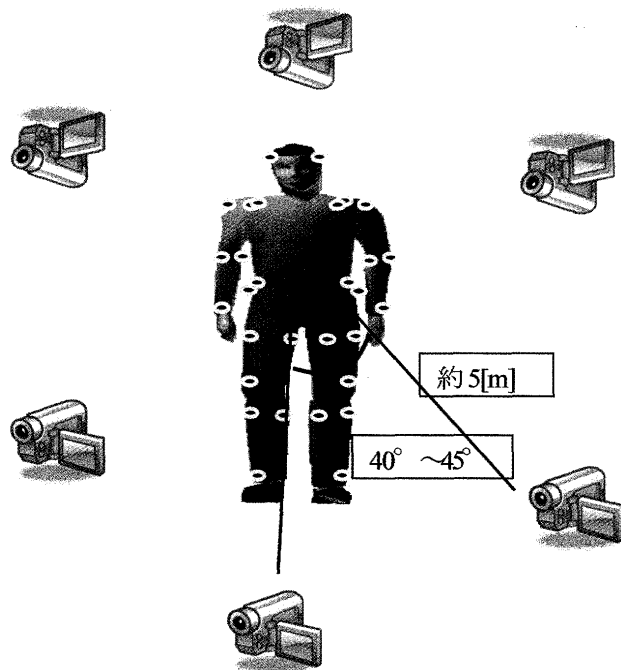


図4. カメラの設置位置及び撮影対象の関節に装着したマーカ。

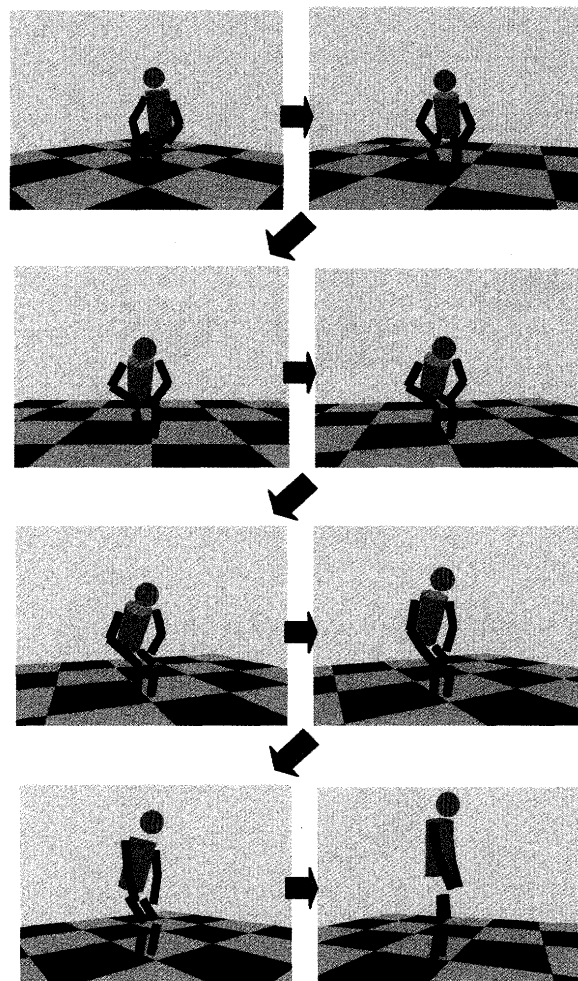


図5. 椅子からの立ち上がり動作の復元結果。視点を移動させながら表示。矢印は時間の推移を表す。

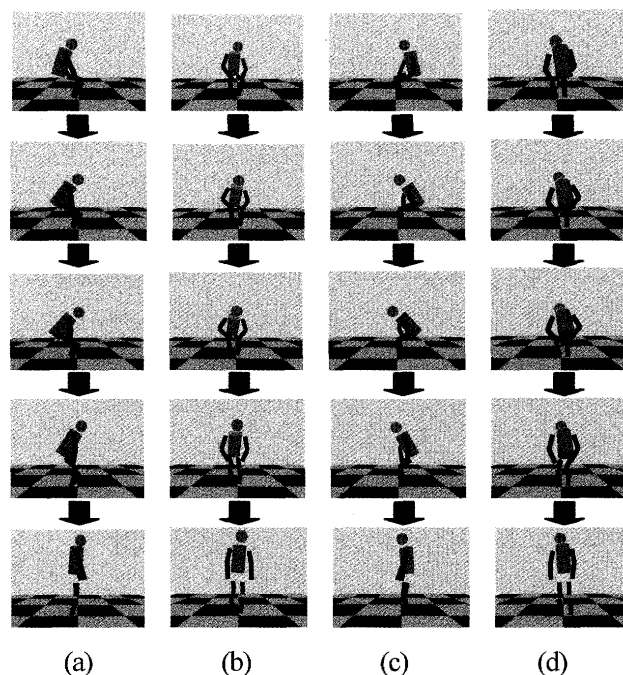


図6. 視点固定による動作の観察。(a)左側面、(b)正面、(c)右側面、(d)後面。矢印は時間の推移を表す。

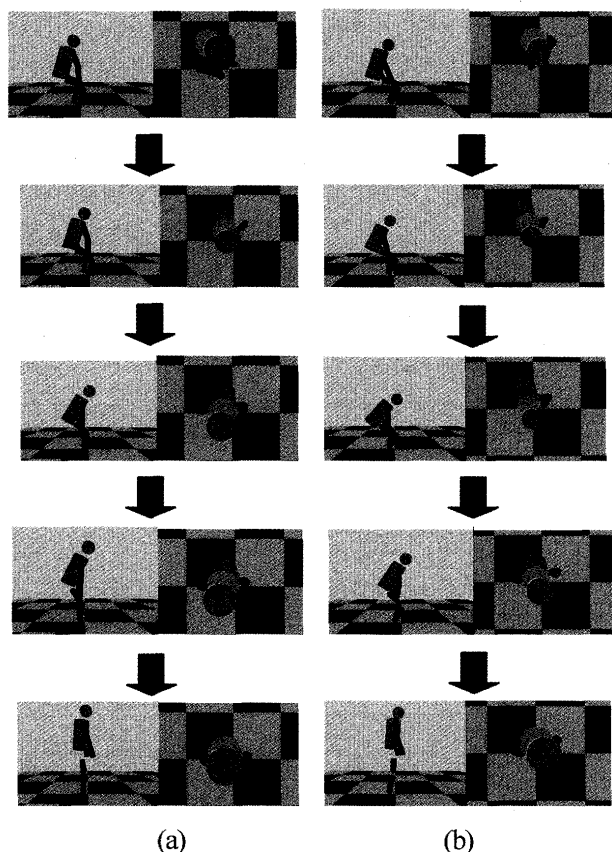


図7. 椅子の高さの違いによる動作の違いの左側面および頭上からの観察. (a)高い椅子の場合, (b)低い椅子の場合. 矢印は時間の推移を表す.

左右のブレ(矢状断面に対する非対称性)も観察でき、非対称の程度の数量化が可能である。また、体幹傾斜角度、各関節(股関節・膝関節・足関節)の運動角度・運動角速度、左右変動幅、重心位置の変化における開脚側への偏倚・離殿指標・運動時間の比率などの計測も可能となる。さらに、異なる高さの状況下における椅子からの立ち上がり動作は、動作開始前の最善・最適な座位姿勢修正、また転倒予防との関連性の指標となると思われる[8,9]。

復元精度は多面体の全周囲復元によって評価している。復元結果から辺長や隣接辺間の角度を計算し元の多面体と比較した。それによれば角度で約2%、辺長で約3%の復元誤差が含まれた。

#### 4. 考察

物体の全周囲復元を一度に行う手法について述べ、その応用として人の動作の全周囲モデル化の例を示し

た。提案法のアイデアは、物体を観察する全てのカメラが対象物体のカメラ側の形状を見るだけでなく、物体を仮想的に透視して、カメラの反対側の形状も獲得するという点にある。そのため、仮想透視カメラ群と命名している。

本復元法の利点は、第1に、全観察方向の形状に関する拘束を同時に満たす復元形状を求める点である。従来法のような局所的な復元のつなぎあわせではないため、復元結果の形状的整合性が従来法よりも良いと考えられる。第2に、カメラキャリブレーションが3Dツールでなく画像ベースで行われるという点である。したがって、従来のステレオ法のように、3Dツールを使った事前のカメラキャリブレーションに悩まされることがなく、より簡便な復元システム(あるいはモーショキャプチャシステム)が構築できる。エピソード幾何を用いた画像ベースのカメラキャリブレーションに基づく復元法も提案されているが[10,11]、全周囲復元のための仮想透視というアイデアはない。

マーカを増やせばそれだけ復元形状が正確になるのは言うまでもない。カメラ台数の増加も復元形状の一層の正確さにつながる。マーカのオクルージョンは特徴点の追跡問題では常に生じる問題である。ラインフィッティングによる予測等が利用されるが、本実験ではまだ考慮していない。

提案法では、物体上の特徴点は、全カメラで見える点、前方カメラでしか見えない点、後方カメラでしか見えない点の3種類に分ける必要がある。この分類は現在マニュアルで行っている。本法は立体モデル作成法であるため、この分類の自動化は必ずしも必要ないが、分類を行うための半自動インタラクティブシステムの開発は有効である。点のオクルージョン(隠ぺい問題)の対策も今後の課題である。

本法の応用としては、リハビリテーションやスポーツにおける動作の解析が考えられる。リハビリテーション分野においては、高齢者の日常生活動作を調べると、歩行や階段昇降動作に比べて、床からの立ち上がりや特に用便動作に不自由・困難を感じる者が多い[8]。これは、下肢機能が低下する高齢者には、和式トイレのしゃがみ動作や、近年広く用いられている洋式トイレの便座の高さによる着席・立ち上がり動作を行う際に、姿勢を崩しやすく、転倒傾向に間接的に影響を与えている[9]。また、高齢者の椅子からの立ち上がり動作では、若年者よりも後方に足を引いて立ち上がることで報告され[12]、高齢者における身体アライメント

変化（体幹，股関節，膝関節の屈曲位姿勢）は，姿勢の安定性に悪影響を及ぼし，バランス能力の低下に結びつくと考えられる[13,14]。したがって，高齢者や脳卒中後片麻痺者等に対する理学療法において，転倒予防のための立ち上がり動作練習や，座位・立位におけるバランス訓練の効果を検証するための根拠や定量的評価等に，モーションキャプチャシステムへの期待が大きい。しかし現在市販されているモーションキャプチャシステムは，高額であることと3Dツールを使ったカメラキャリブレーションが必要なために，リハビリ関係のユーザからは敬遠されがちである。提案法によって，カメラキャリブレーションの簡便なモーションキャプチャシステムの実現が可能のため，この分野への貢献が期待される。

人の動作や運動のカメラ1台による2次元の観察と解析に対して，本法のような立体モデル化の意義は，任意の視点からの観察が容易な点である。椅子からの立ち上がり動作を立体モデル化の例として取り上げたが，リハビリテーションの分野では普通，カメラ1台で側面から立ち上がり動作を観察するのみである。これは，動作が矢状断面に対して（正面から見て）対称であることを前提としているが，実際には左右にぶれる非対称な動作を行う患者も多いと思われる。著者らは先に開発したモーションキャプチャ法[7]（前面カメラ群のみの撮影システム）を用いて，矢状断面に関する歩行動作の対称度の評価を股関節症の患者に対して行った[15]。全周囲の立体モデル化を行えば，本論文で示したように任意方向からの観察と解析が行えるため，効率的でもある。

## 5. おわりに

仮想透視カメラ群を用いて物体の全周囲形状をモデル化する方法について述べた。本法の特徴は，①全周囲に渡る幾何学拘束を同時に満たす形状を求めるので，局所的に形状復元してつなげる従来法よりも形状全体の整合性が大きい点，また，②カメラキャリブレーションが画像ベースであるという簡便さにある。

本法を椅子からの立ち上がり動作のモデル化に適用し，立体モデル化の効果を示した。将来は，リハビリテーション分野における訓練効果の評価システムとして利用されることが期待される。

## 参考文献

- [1] B. K. P. Horn : Robot Vision, The MIT Press, 1986.
- [2] ミニ特集：“人間の運動計測とその応用”，計測と制御，Vol.36, No.9, 1997.
- [3] 守啓祐，曾根俊昌，タンジュークイ，金亨燮，石川聖二：“仮想透視カメラ群を用いた立体の全周形状一括復元”，バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌，Vol.11, No.1, pp.17-22, 2009.
- [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，Vol.53, No.3, pp.433-436, 1999.
- [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”，画像電子学会誌，Vol.32, No.4, pp.483-487, 2003.
- [6] 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，Vol.J76-D-II, No.8, pp.1497-1505, 1993.
- [7] タンジュークイ，石川聖二，加藤清史：“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.
- [8] 岩倉博光，谷岡達男，八木久夫，金森正恭：“老年者の膝関節機能”，総合リハ，No.6, pp.127-135, 1978.
- [9] 谷内幸喜：“椅子座位姿勢の変化が立ち上がり動作・立体姿勢に及ぼす影響”，日本職業・災害医学会会誌（JJOMT），Vol.55, No.2, pp.85-92, 2006.
- [10] Sugimoto, N., Xu, G.: “A linear algorithm for motion from three weak perspective images using Euler angles”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.21, No.1, pp.54-57, 1999.
- [11] 松田淳平，タンジュークイ，金亨燮，石川聖二：“高速な3次元物体復元法の開発”，バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌，Vol.10, No.1, pp.58-64, 2008.
- [12] Wheeler J., Woodward C, Ucovich R. L, Perry J, Walker J M. : “Rising from a chair : influence of age and chair design”, Journal of the American Physical Therapy, Vol.65, No.1, pp.22-26, 1985.
- [13] 久保晃：“高齢者の身体アライメントと転倒”，理学療法，Vol.18, No.9, pp.135-138, 1999.
- [14] 星文彦，山中雅智，高橋光彦他：“椅子からの立ち上がり動作に関する運動分析”，理学療法学，No.19, pp.43-48, 1992.
- [15] タンジュークイ，野田景子，金亨燮，石川聖二：“モーションキャプチャを用いた人の歩行動作の3次元解析”，第19回ソフトサイエンス・ワークショップ講演論文集，pp. 75-76, 2009.

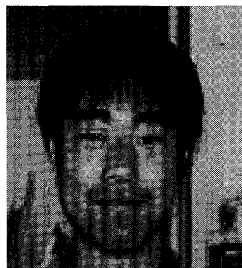
タン ジュークイ (たん じゅーくゐ)



九州工業大学大学院工学研究科機械知能工学専攻修了。博士(工学)。現在、九州工業大学大学院工学研究科助教(機械知能工学研究系)。3次元復元、人の動作・挙動解析の研究に従事。SICE九州支部奨賞(1999), AROB Young Author's Award(2004), 情報処理学会九州支部奨励賞(2004), Biomedical

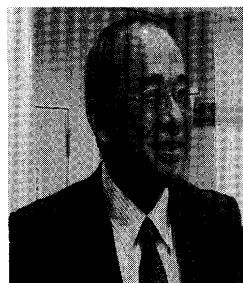
Fuzzy Systems Association The Best Paper Award (2008), バイオメディカル・ファジィ・システム学会和文誌優秀論文賞(2008)各受賞。計測自動制御学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。

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業。現在、同大学大学院工学研究科機械知能工学専攻博士前期課程在学中。計測自動制御学会学生会員。

石川 聖二 (いしかわ せいじ)



東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。九州工業大学情報工学科講師を経て、現在、九州工業大学大学院工学研究科教授(機械知能工学研究系)。この間、連合王国シェフィールド大客員研究員。オランダ王国ユトレヒト大客員教授。画像計測、拘束解析問題等の研究に従事。Biomedical

Fuzzy Systems Association The Best Paper Award (2008), バイオメディカル・ファジィ・システム学会和文誌優秀論文賞(2008)各受賞。IEEE, 計測自動制御学会, 電子情報通信学会各会員。

金 亨燮 (きむ ひょんそふ)



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)。2005年、同大学工学部講師を経て、現在、同大学工学部准教授。画像計測、対称性解析、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, 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, IEEE 各会員。

四宮 孝史 (しのみや たかし)



1972年、日本大学生産工学部管理工学科卒業。1996年、九州芸術工科大学(現、九州大学)大学院博士後期課程(生活環境専攻)修了。博士(工学)。1972年、日本光学工業(株)(現(株)ニコン)入社。現在コアテクノロジーセンター企画部ゼネラルマネジャー。人間工学、画像処

理の研究開発に従事。