

光パターン投影を用いた人体形態の 3D 計測

東京大学工学系研究科 高増潔

1. はじめに

三次元形状測定は、産業における基本的な技術として広い分野で利用されている。我々の研究室では、幅広く三次元座標計測および形状計測に関連する研究を行っている。この中で、人体形態はいくつかの点で特別な対象として考慮する必要がある。本稿では、まず、人体形態の測定において考慮すべき項目について検討し、実際に開発された人体形態の三次元形状測定システムおよび手法を紹介する。

2. 人体形態測定における問題点

人間に使いやすい製品の設計 (人間中心設計) には基本的な要素として、人体寸法および人体形態の測定が不可欠である。従来は、人体の特徴点の相互距離および寸法を機械式の測定機によって測定することで、主に人体の寸法を求めていた¹⁾。図 1 は、JIS Z8500²⁾に示される特徴点とそれを利用した寸法の定義の一部である。このような特徴点は、歴史的に非常に多く定義されていて、種々の分野で利用されている³⁾。これらの測定は、ノギスなどを大きくしたようないわゆる「マルチン式計測器」を用いた手計測によるものが大部分で、これは 1 mm ピッチの目盛りがうってあり、人体の様々な部位を簡便に測るのに都合よくできている。

しかし、最近、測定の簡略化、高精度化および形態の測定も可能にするために三次元スキャナーによる寸法および形態の測定が行われるようになってきた。現在、米国、イタリア、オランダでは CAESAR (Civilian American and European Surface Anthropometry Resource) プロジェクトという三次元形状計測を含む人体計測が総計 1 万人規模で実施されている。このような測定では寸法も形態も単に測定しているだけで、精度評価が十分行われていない。また、トレーサビリティが十分確保されていないため、このようなデータを設計、品質保証、検査などに用いる場合の障害となることが予想される。

日本においても、1999 年度から NEDO「身体形態特性データの計測・データベース化手法に係る標準化」、高齢者特性計測機器等開発委託「寸法・形態計測機器開発」、知的基盤創成・利用技術研究開発「高効率人体計測器の研究開発」などの研究が行われ人体形態の測定手法が研究されている。この研究の中で以下の 4 つの問題が検討され、解決のための研究が行われている。

- 人体の体動揺が測定精度に影響するため、高速な測定が必要である。
- 人体全体を測定不可能な場所を少なく測定するには、複数の測定システムが必要である。

- 複数の測定システムを高精度に校正する手法の開発。
- 測定結果のトレーサビリティを確保する方法の開発。

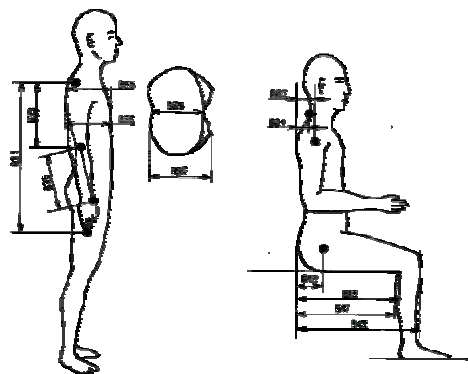


図 1 人体の特徴点と寸法の定義の一部 (JIS Z8500)²⁾

3. 人体形態の測定手法

3.1 スキャナーによる人体形状計測

図 2 は、人体計測用のスキャナーの例⁴⁾ (浜野エンジニア、VOXELAN) である。レーザビームをスキャンして、それを CCD カメラで観察し、三角測量の原理で形状を測定している (分解能 0.8 mm)。人体は大きいので、全体を測定するには測定範囲として上下 2 m 程度、左右 1 m 程度が必要である。このシステムでは、レーザスキャナーと CCD カメラを 4 台用意し、人体全体のスキャンを行っている。全体のスキャンには 15 秒ほどの時間がかかっている。

図 3 は同様の装置で人体形状を測定したデータから人体の胴部分の一断面を抜き出したものである。4 つの断面形状がうまく重なっていない様子が分かる。同じ測定機により同一被験者を 3 回ずつ 2 日間にわたり測定を行った。図 4 は、6 回の計測における人体の胸部部分の正面からの測定結果を重ねたものである。全体的な位置ずれを含め、ばらつきが大きいことが分かる。同様の測定をマネキンに対して行くと測定の繰り返しはかなりよく、ほとんど量子化誤差に入っている。以上のデータより、レーザスキャナーを利用した人体計測における測定の不確かさでは、測定対象としての人体の影響が一番大きく、5 mm から 10 mm の不確かさを持つことが分かった。

3.2 人体の体動揺の計測

測定対象としての人体の影響のうち最大のものは、体動揺であることが推測される。そこで、レーザ変位計 (キーエンス社 LB-1000, 分解能 8 μ m) を利用して、

人体の体動揺を計測した⁵⁾。図 5 は，人体の胸付近の前後への体動揺の計測結果である。60 秒の計測時間に対して， ± 5 mm 程度の体動揺が観察された。体動揺をフーリエ解析した結果，体動揺を $1/f$ ゆらぎで近似することができた。

近似された体動揺がレーザスキャンの測定に与える影響を計算した結果から，レーザスキャナーにより高精度（例えば 1 mm 以下の精度）で人体を測定するには，かなり高速（例えば 0.5 秒以内の測定）が必要ながことが分った。以上の結果から，新しいプロジェクトでは高速なレーザスキャナーを開発し，高精度で人体形状の測定を行うことを計画した。

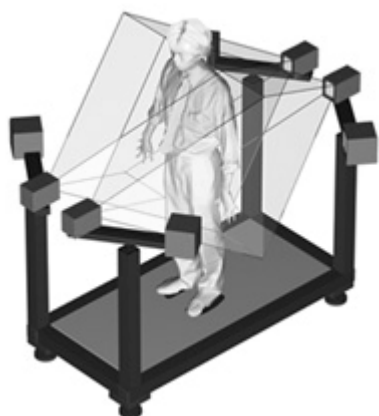


図 2 人体計測用スキャナーの例（浜野エンジニアリング製 Voxelan LPW-1100）⁴⁾

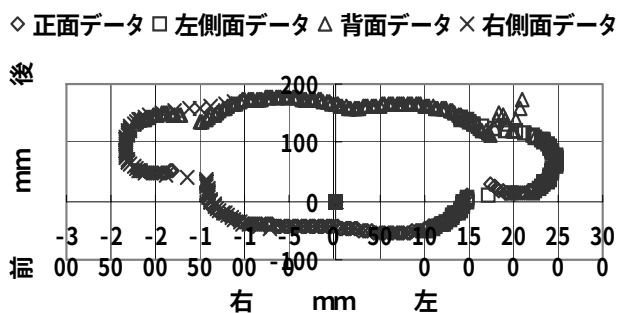


図 3 レーザスキャナーでの測定例：人体の胸部分の横断面，4 方向の測定の合成結果

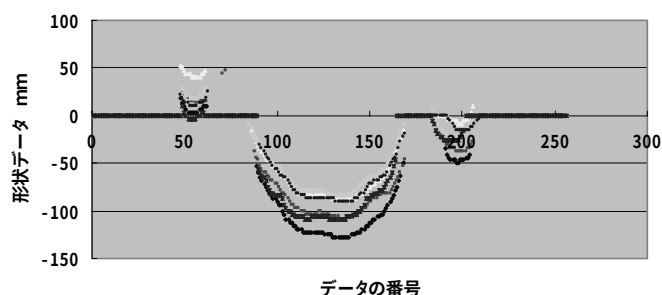


図 4 胸部分の前面の測定例：6 回の測定の重ね合わせ

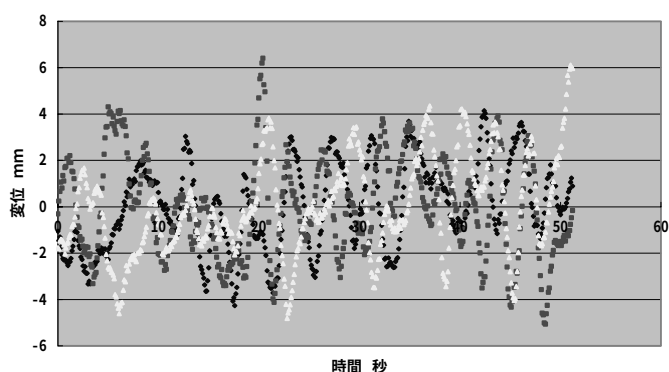


図 5 胸付近 3 箇所の体動揺の測定例：60 秒間の測定

3.3 新しい人体形態測定システムの開発

3.1 項で示した測定機を基本として，測定時間の短縮と測定不可能部分の減少を目的として新しい測定システムの開発が行われた。これは，2 項で示した NEDO のプロジェクトを中心に行われたものである^{6) 7)}。

図 6 は，システムの構成を示す。レーザスキャナーと CCD カメラを組み合わせたスキャニングシステムを人体の前側に 5 組，後側に 5 組，左右の横側に 1 組ずつ設置し，合計 12 台によりあごの下や腕の付け根なども測定可能とした。実際の人体の測定では，人体の特徴点にマークをつけ，マークを画像処理により検出することで，形態だけでなく寸法の測定も可能となっている。

図 7 にレーザスキャナーの測定原理を示す。それぞれのスキャナーは 9 本のレーザを帯状に投影することで，測定速度を $1/9$ にすることができた。さらに，2 種類の波長のレーザを使うことで 12 台のスキャニングシステムを 2 組の測定グループに分けて測定することができる。全体の測定時間は従来に比べ非常に高速で，1.8 秒とすることができた。図 8 は測定例，図 9 は測定結果の解析例である。三次元的な人体形態を完全に入力できるため，自由なデータ処理が可能となった。

表 1 に試作したシステムの仕様を示す。それぞれのスキャニングシステムを個別に校正することで，測定精度は 0.5 mm 程度と高精度に行うことができた。しかし，12 台のシステムを統合して校正する部分は，装置全体が大きいこともあり校正は必ずしも容易ではなく，全体的な測定精度は ± 1 mm 程度となっている。また，スキャニングシステムによる測定結果は，従来の手計測による結果と必ずしも整合していないため，今後はどのように校正を高度化するか，トレーサビリティを確保するかが問題となる。

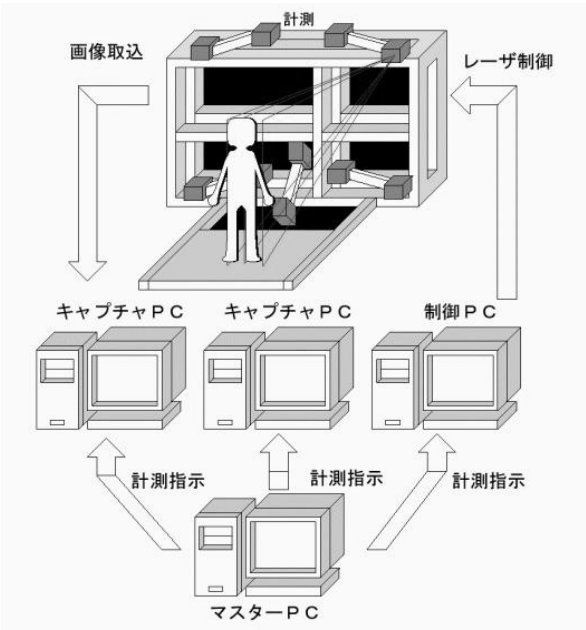


図 6 開発した高精度人体スキャナーシステム：図には前面測定用の 5 台のレーザスキャナーを示している⁷⁾

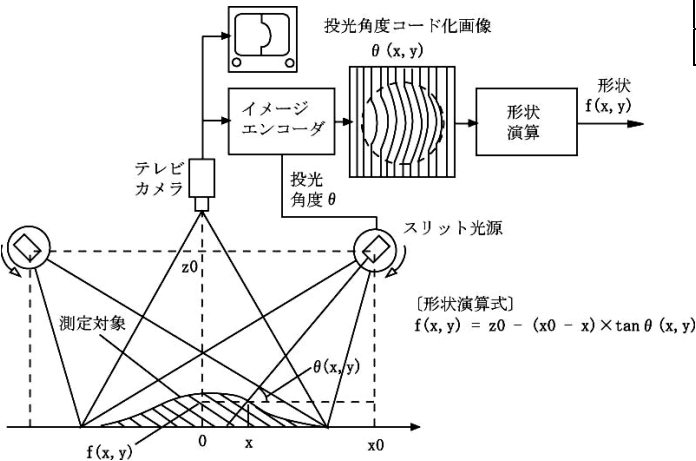


図 7 レーザスキャナーの原理⁷⁾

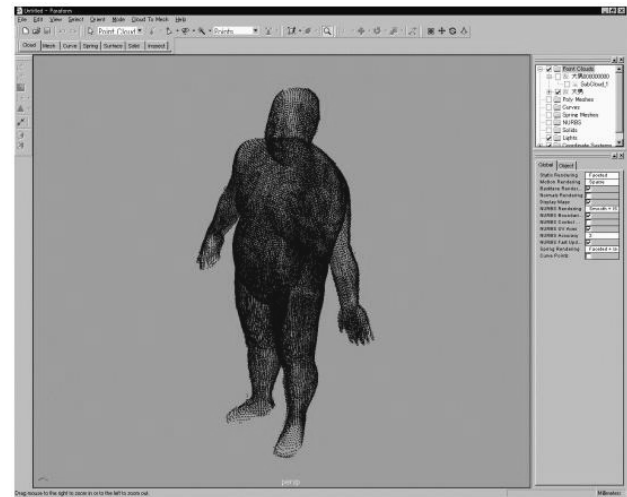


図 8 人体測定例⁷⁾

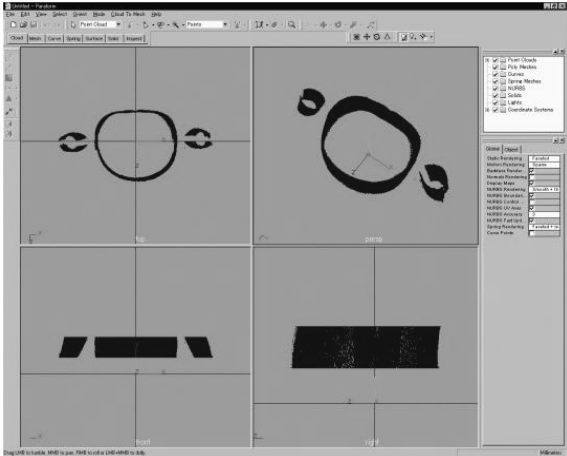


図 9 測定データからの解析例⁷⁾

表 1 高精度人体スキャナーの仕様⁷⁾

測定範囲	W 1200 mm, D 800 mm, H 1800 mm
スキャナー台数	12 台
データ点数	3,686,400 点
データピッチ	2.1 mm
レーザ本数	スキャナー 1 台で 9 本
測定時間	1.8 秒
測定精度	±1 mm
装置外形寸法	3700 mm x 2800 mm x 2215 mm

3.4 カラーパターン投影を用いた高速人体形態測定システムの開発

前項で示した測定機は、実用性も高く、測定時間は最高速で人体全体を測定できる、優れたシステムと考えられる。しかし、3.2 項で説明したように、人体の体動揺の影響を除くにはより高速なシステムが必要であり、全体として高精度化するためには、より柔軟で高精度な校正方法を確立することが重要である。

この目的のために、我々の研究室ではプロジェクタと複数のカメラを用いた人体形態測定システムを開発している。DLP (Digital Light Processing) を利用したプロジェクタと 2 つのカラー CCD カメラをそれぞれデジタル的にコンピュータに接続し、プロジェクタからのカラー投影パターンを 2 つの CCD カメラで得た画像を処理することで、高速で柔軟性の高いシステムを構築を目指している⁸⁾。

図 10 は、このシステムを校正する方法を示している。平面パネルを三次元測定機によって 10 mm 間隔で移動し、プロジェクタからの 81 点のドットパターンを投影し、この画像を 2 台のカメラで得ることでプロジェクタとカメラの位置、方向、レンズ収差などの 27 個の幾何学パラメータを計算できる⁹⁾。このシステムではプロジェクタと 2 台のカメラで冗長な測定系を構築できるため、自己校正も可能である。平面パネルを適当な位置と方向に設置し、2 台のカメラからの画像により 27 個のパラメータを計算できる。自己校正の場合には、長さの情報が入っていないため、どこかのパラメータの長さ情報は別途設定する必要があるが、こ

のように，冗長なシステムを利用することで自由度の高い校正が可能となり，測定範囲全体にわたって，0.5 mm 程度の精度で校正が行われている。

つぎに，従来のシステムをより高速にするためにカラーパターンの投影を行った．対象物の色や反射率を考慮して，多くのカラーを対象物に投影し，色が全ての測定領域で分解できるような色の種類を決定した．今回は 6 種類の色を選択し，6 種類の色が繰り返される縞パターンを投影した．また，空間的な分解能を考慮して水平方向の分解能は 3 mm と設定した．この条件では，測定範囲を 1 回のパターン投影で測定することが可能である。

図 11 は，カラーパターンのマッチングを行う手法を示す．6 色のカラーを使っても人体のような複雑な形態ではカラーパターンのマッチングは難しい．そこで，マッチングには 2 つのカメラを使い両方の画像を同時に処理することでマッチングの精度を向上させる手法を用いた．2 つのカメラを用いることで，手の指などの複雑な形態でもほとんどマッチングミスを起こさないで計算が行えた。

図 12 および図 13 は，カラーパターン投影システムによる人体の測定例である．図 12 では体の前側を，図 13 では腕を測定している．別途行った測定精度の評価によると全体として 0.5 mm 程度の測定精度で測定が行われている．全体のシステムの仕様を表 2 に示す。

このシステムは，複数のカメラを使うことで 1 枚の画像から人体形態の測定を行える．このシステムを 3.3 項で示したように複数組み合わせることで人体全体を高速で測定するシステムが構築可能である．また，ここで用いている自己校正を含む柔軟な校正手法は，複数のシステムを組み合わせる場合に有効と考えている。

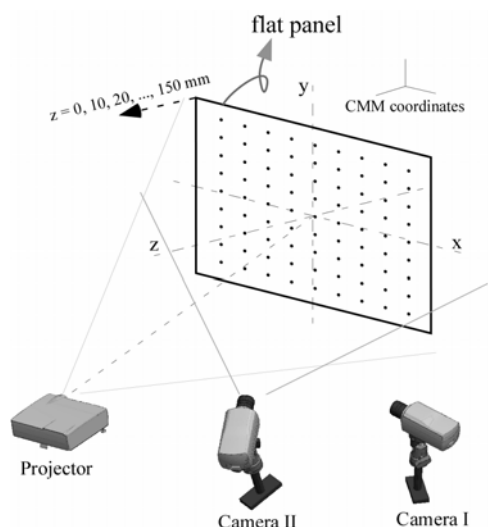


図 10 プロジェクタと 2 つのカメラによるカラーパターン投影，校正方法

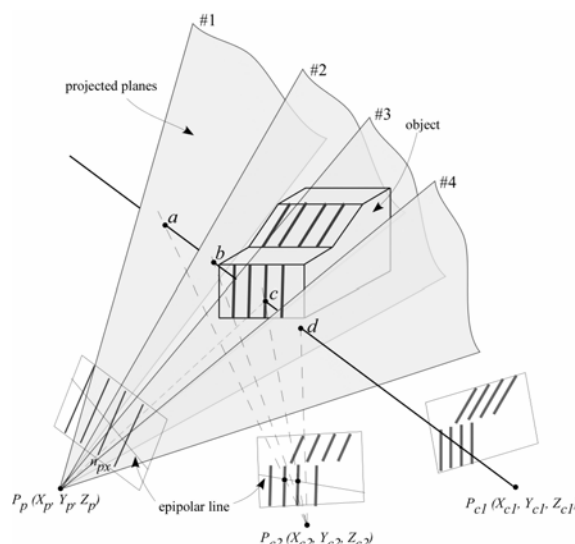
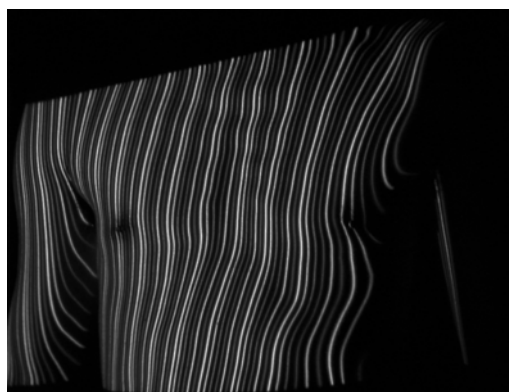
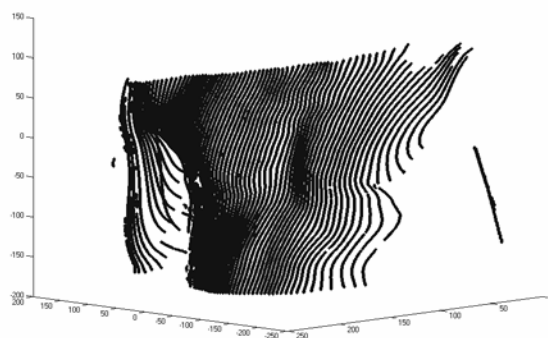


図 11 カラーパターンのパターンマッチングの手法

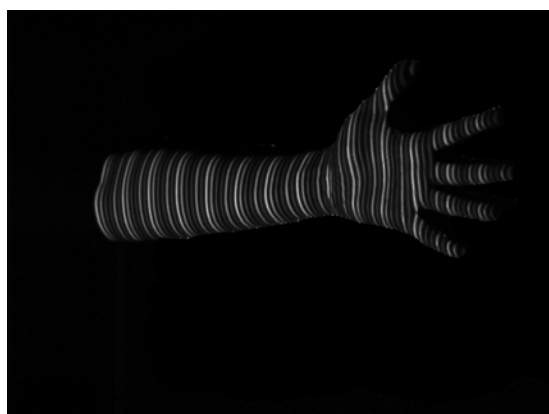


(a) カラーパターンの投影



(b) 三次元データ処理

図 12 測定例 1：体の前側の測定



(a) カラーパターンの投影

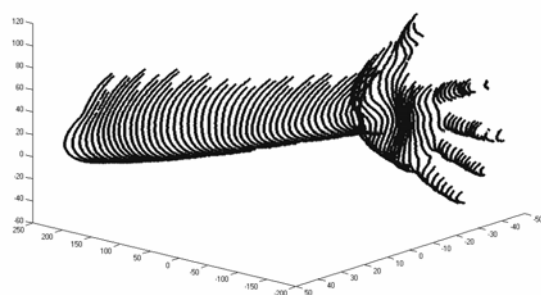
(b) 三次元データ処理
図 13 測定例 2：腕の測定

表 2 カラーパターン投影による人体形態測定の仕様

プロジェクタ	DLP プロジェクタ 1 台 1024 x 768 素子 DVI-I 接続
カメラ	カラー CCD カメラ 2 台 1024 x 768 素子 IEEE 1394 接続
投影パターン	6 色のカラー縞パターン
測定範囲	500 mm × 700 mm × 200 mm
測定時間	1/60 秒
測定分解能	水平方向：3 mm 奥行き方向：0.5mm
測定精度	測定距離の 0.25% (0.5 mm 以下)

4. まとめ

人体は一般の機械部品などに比べて，測定範囲が大きい，常に動いていること，複雑な形状をしているなど対応が難しい測定対象である．ここでは，複数のパターン投影を組み合わせることで人体形態を測定するシステムの開発について紹介した．人体形態は，多くの製品を開発する上で基本的なデータとなるため，今後もより柔軟で高精度な測定機の開発が重要となる．また，多くの人体を測定してデータベースを作ること重要である．

このようなデータベースを有効に使うためには，測

定データのトレーサビリティが重要となる．一般の形状測定に関しても，測定の不確かさの評価方法やトレーサビリティの確立方法などが問題となっている．光を利用した三次元形状測定において，その標準化，トレーサビリティの確保は今後の重要な研究テーマとなると考えている．

参考文献

- 1) 黒川隆夫：人体形状の計測・記述とその応用，計測自動制御学会誌，Vol.36，No.9，1997.
- 2) JIS Z 8500-1994：人間工学—人体寸法測定.
- 3) ISO 7250-2: Basic list of anthropometric measurements.
- 4) Voxelan Home Page, <http://www.voxelan.co.jp/>
- 5) 高井雄一，江並和宏，平木雅彦，高増潔，大園成夫：人間計測の不確かさ解析，2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，2000，p. 630.
- 6) 人間生活工学研究センター：身体形態特性データの計測・データベース化手法に係る標準化，2000.
- 7) 平成 13 年度知的基板創成・利用技術研究開発「高効率人体計測器の研究開発」，NEDO，（社）人間生活工学研究センター，2000.
- 8) C. Sinlapcheewa and K. Takamasu: 3D Profile Measurement by Color Pattern Projection and System Calibration, IEEE ICIT'02, Bangkok, 2002.
- 9) 高増潔，下嶋賢，古谷涼秋，佐藤理：座標測定機のアーティファクト校正（第 1 報）—運動学パラメータの校正—，精密工学会誌，69（6），2003，851-855.