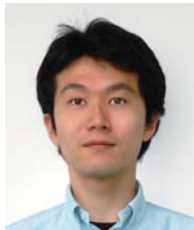


高運動機能性製品設計のための高分解能 4 次元計測技術の研究

High-speed hi-accuracy 4-dimensional acquisition for performance bodywear design

2031021



研究代表者

(独)産業技術総合研究所

主任研究員

山 崎 俊太郎

[研究の目的]

2020 年の東京オリンピックに向けて、アスリートのパフォーマンスを向上する、高機能なスポーツ用具の設計技術が求められている。多くのスポーツ競技において、適切なデザインの用具を用いることで、アスリートのパフォーマンスを向上できる可能性がある。筋力を増幅するコンプレッションウェアや、トレーニングを効率化するベアフットシューズは、その典型例である。申請者らは、こうした高機能製品設計の実現を目指して、人体の運動を、高い時間分解能、高い空間分解能で観測する技術の開発に取り組んでいる。

運動計測の代表的な手法として、モーションキャプチャを用いたマーカ位置追跡や、高速度カメラによる連続画像撮影が挙げられる。モーションキャプチャは、疎な特徴点集合の追跡に有効であるが、空間的に密な情報を得ることができない。高速度カメラ撮影は、体表面などの連続領域の計測に適している一方で、3次元構造を復元できない制限がある。人体と密接に相互作用するスポーツ用具の設計には、これらの両方の特長を持つ新しい計測手法が必要である。

本研究では、高速度3次元スキャナを開発し、計測対象の全周から、同時に、高いフレームレートで、高精度の距離画像を取得する方法を提案する。構造化光投影とステレオ復元を併用した3次元復元によって、モーションキャプ

チャと同程度のフレームレートと、静止物体の3次元計測と同程度の計測精度を実現する。また、計測によって得られた距離画像の時系列に人体モデルを当てはめ、人間の皮膚の伸縮や皮下組織の移動、着装品の変形をモデル化する方法を研究する。

[研究背景]

運動物体の観測に適した距離画像計測手法としては、計測対象に固定パターン光を投影し、一回の撮影画像から距離画像を復元するワンショット法がある。近年、この原理を利用したkinect センサが普及し、運動物体の形状計測技術が身近なものとなった。しかし、ワンショット法は複雑な形状を測ることができず、計測結果の空間分解能が低いという欠点がある。また投影パターンの種類によって、対応点の曖昧性を排除できず計測ノイズが発生する、計測対象の表面反射率の不均一性の影響を受けやすいなどの問題があり、高い精度が要求される計測には適していない。

時間コード化光投影法は、静止物体の計測に用いられる高精度の3次元計測技術である。また、高速度カメラを用いることによって、運動物体に対しても適用できる。しかし、一般に光学素子の信号雑音比と露光時間は反比例するため、高フレームレートと高精度計測を両立することは難しい。特に、高輝度かつ高フレーム

レート of 光源を実現する方法が明らかでなく、これまで人間の運動機能解析には用いられてこなかった。

本研究では、高フレームレートと高輝度を両立する動的光源を開発し、時間コード化光投影法による運動物体の距離画像計測を実現した。

〔研究の内容、成果〕

計画の全体を3つのステップに分け、段階的に遂行した。

第1に、高輝度と高フレームレートを同時に実現する新しいDLPプロジェクタを開発した。DLPプロジェクタは、DMD (Digital Micromirror-array Device) を用いて光源のPWM (Pulse width modulation) 制御を行う装置である (図1)。DMDは、独立に傾斜角を制御可能な極小の鏡の集合であり、固定光源と組み合わせることで5 kHz~10 kHzで任意の2進パターンを投影するプロジェクタを作成できる。

本研究では、Infocus LP-120プロジェクタを改変し、480 Hzで4種類の8 bit XGA画像を投影できる1100 lumensの高輝度動的光源を作成した。これは市販のDLPプロジェクタ (60 Hz) と比べて8倍高速であり、開発者用のカスタムDLPプロジェクタ (30 lumens) と比べて36倍高輝度である。

第2に、開発したプロジェクタと2台の高速カメラを同期し、高フレームレート・時間コード化光投影・ステレオ3次元スキャナを構

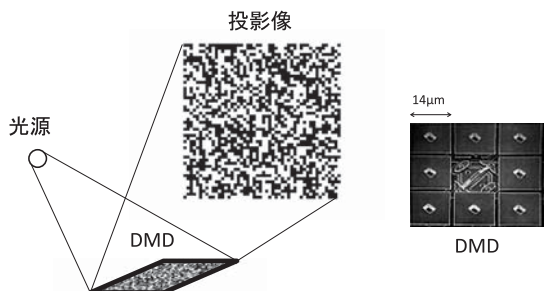


図1 DLPプロジェクタの光学系模式図

築した。さらに、同一のスキャナを2セット作成し、計測対象の全周を同時に撮影する計測システムを構築した。高速度カメラとして Allied Vision Pike F-032 を利用した。構造化光投影には位相が1/3異なる3組の正弦波パターンを用いる方法を用いた。また、ステレオカメラを用いて探索範囲を制限することによって正弦波パターンの周期性に起因する対応点の曖昧性を解消している。

開発した計測システムの写真を図2に示す。左上は単一のスキャナ、右上は同期回路、下図は2つのスキャナを複合した全周計測システムである。各スキャナは持ち運び可能であり、計測対象に応じて撮影視点を調節可能である。プロジェクタとカメラは160 Hzで同期し、撮影サイクル時間全体の1/3を使って投影・露光している。理論上、最大3つのスキャナを同時に、干渉なく利用できる。カメラとプロジェクタの幾何校正にはOpenCVライブラリを用いた。

開発した3次元スキャナで取得した距離画像の例を図3に示す。距離画像の計測速度は160 Hz、空間解像度は640×480ピクセル、距離の

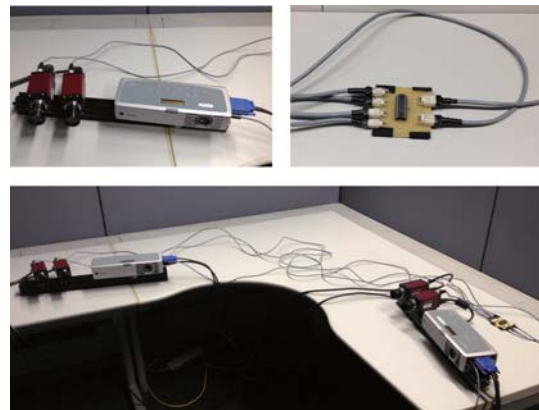


図2 構造化光時分割投影ステレオ



図3 距離画像計測結果

平均精度は約 0.1 mm 程度である。なお、距離画像の取得速度は 160 Hz であるが、1 つの距離画像の復元に 4 回の画像撮影が必要である。したがって計測対象は 1/40 秒間静止している必要があるが、多くの人体計測ではこの条件は満たされない。そこで 1/40 秒間の動きを線形近似し、動作補償を行うことで、距離画像の精度を向上している。

第 3 に、計測できなかった領域の補完と、人体上の解剖学的特徴点の自動抽出を同時に行う手法を開発した。人体の 3 次元計測では、手や足などによる遮蔽を避けることができず、カメラの数を増やしても、計測できない箇所が必ず存在する。その一方で、人体の形状はおおまかな形状が既知であるため、事前知識を使うことによって欠損箇所を精度良く補うことができる。

本研究では、人体の代表的な形状を表現するテンプレートメッシュモデルを作成し、これを計測点群に当てはめて計測欠損箇所を埋めると同時に、テンプレート上に定義された解剖学的特徴点から計測対象表面の特徴点を推定する技術を開発した。体型の個人差や姿勢のばらつきによる形の違いを単一のテンプレートメッシュモデルで扱うために、3 次元メッシュモデルの非剛体的な位置合わせの手法を用いた。

提案手法は、従来法と異なり、手作業による対応付けを必要としない自動対応点推定、局所相似変換モデルを用いた高精度な位置合わせ、多重解像度表現を利用した高速で安定した数値計算、といった特徴を持つ。図 4 に全身形状の 3 次元点群をメッシュモデル化した例を示す。

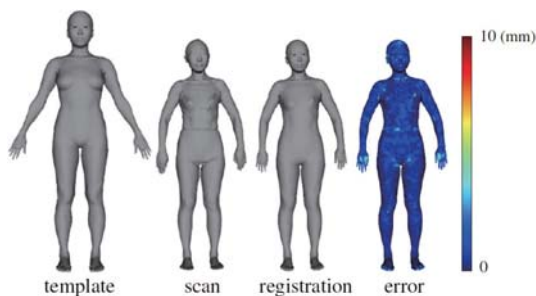


図 4 全身形状モデル

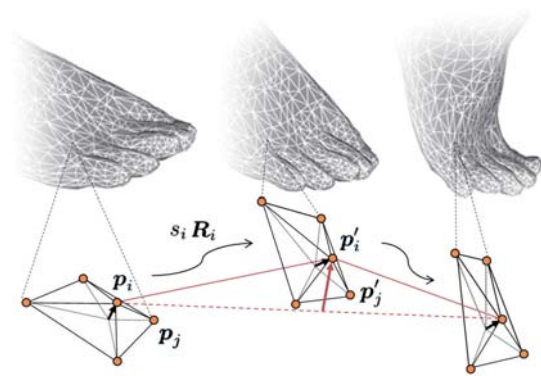


図 5 時間拘束を考慮した変形推定

解剖学的特徴点の推定精度検証のため、全身の代表的な特徴点から得られる寸法の精度を検証した。日本人の人体寸法・形状データである AIST/HQL 2003 データセットを用いて、全身 64 箇所の特徴点を抽出し、国際標準 ISO 20685 で規定された許容誤差と比較したところ、63 点が合格した。研究成果は国際会議で発表[1]し、成果物をソフトウェアとして公開した。

また、計測点群の時系列データに対して、時間方向の連続性を仮定してテンプレートを当てはめる手法を提案した（図 5）。空間的な 3 次元座標値と計測時刻の 1 次元を統一的に表現する Laplacian 座標表現を用いて、静止形状の場合と同様、高速かつ安定したモデル化を実現した。

提案手法を足の計測に適用した結果を図 6 に示す。上図は走行中の足を全周から計測した計測点群の時系列であり、下図は復元された 3 次元モデルと推定された解剖学的特徴点である。計測点群には多くの穴が存在するが、モデル化によって穴のないメッシュモデルが復元できている。推定された特徴点の誤差を図 7 に示す。誤差は足の変形に伴い増大する傾向があり、変

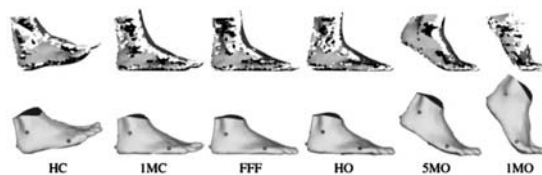


図 6 走行中の足の形状モデル化

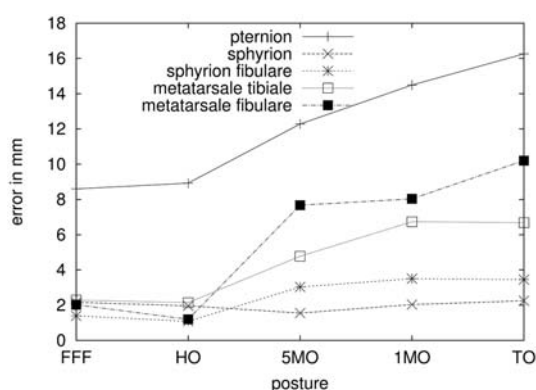


図7 解剖学的特徴点の推定誤差

形の小さい姿勢では数 mm 程度，最も変形の大きい姿勢で平均 5 mm 程度であった。研究成果を関連学会で発表し，高い評価を得ることができた[2]。

運動中の全身形状をモデル化した結果を図8に示す。全身運動の計測では隠れの問題が大きく，現在の計測システムではごく一部の表面形状しか測ることができない。しかし，テンプレートモデルを当てはめることによって，全く見えていない部位であっても，見えている部分から推定される，最もあり得る形として全身形状を補完することができる[3]。

[今後の研究の方向，課題]

本研究では，人体運動を計測する技術とモデル化する技術を研究した。今後は，複数の被験者実験を行い，統計的な手法によって人間工学的な知見を取得する研究に取り組む予定である。体型，性別，運動能力などに違いのある複数の

人体運動データから統計モデルを作成することで，集団としての傾向や個人差が明らかとなる。これによって，一方ではすべての人に有益な高機能装着品の設計を，他方では個人差を考慮したカスタム装具のデザインを実現することができる。また，皮膚表面の応力分布の推定や，筋骨格系を用いた動力学モデルの復元にも取り組みたい。

開発した計測装置はプロトタイプであり，研究を進める上で多くの現実的な課題を解決する必要がある。現在は，3次元スキャナの台数を増やして計測範囲を拡大するとともに，計測システムの使い勝手を向上させることに注力している。モーションキャプチャなど既存の計測手法との併用や，モデル化計算の実時間化などは，今後の研究課題である。

[成果の発表，論文等]

- [1] Shuntaro Yamazaki, Makiko Kouchi, and Masaaki Mochimaru, "Markerless landmark localization on body shape scans by non-rigid model fitting," Proc. Digital Human Modeling Symposium 2013, pp. 1: 43-8: 43, June 2013
- [2] Shuntaro Yamazaki, Makiko Kouchi, Masaaki Mochimaru, Shunta Saito, Yuji Yoshida, and Yoshimitsu Aoki, "Homologous Shape Modeling of Deforming Human Foot", Proc. the Eleventh Footwear Biomechanics Symposium, pp. S120-S121, July 2013
- [3] Shuntaro Yamazaki, Satoshi Kagami, and Masaaki Mochimaru, "Non-rigid shape registration using similarity-invariant differential coordinates", Proc. International Conference on 3D Vision, pp. 191-198, June 2013

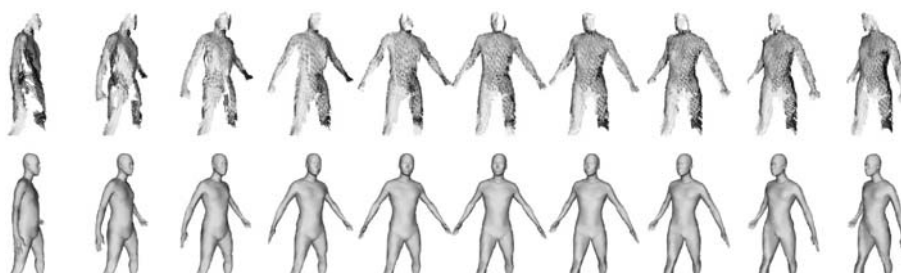


図8 運動中の全身の形状モデル化