アスリートの動きをリアルタイムに 数値化する3Dセンシング技術

3D Sensing Technology for Real-Time Quantification of Athletes' Movements

● 佐々木和雄 ● 桝井昇一 ● 手塚耕一

あらまし

スポーツ分野では近年、科学的な知見を取り入れてアスリートの技能を向上させる取り組みが盛んに行われている。一方、体操などの採点競技では、年々高度化する技の判定・採点が困難になりつつあり、判定・採点の正確さや公平性の向上に対して科学的な技術を取り入れる必要性が高まっている。このため富士通研究所では、複雑な人の動きを3次元で正確に数値化し、機械学習などを利用して解析する3Dセンシング技術の確立に向けた研究開発に取り組んでいる。3Dセンシングの主要技術は、人の動きを体表面の凹凸を示す深度画像として取得する3Dレーザーセンサー技術と、深度画像から3次元関節座標を高速に抽出する骨格認識技術の二つに大別できる。3Dレーザーセンサーについては、従来のLIDAR (Light Detection and Ranging)と比較して10倍以上の走査点数を実現するMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)ミラー投受光分離方式を紹介し、スポーツにおける画角制御技術の有効性を示す。骨格認識については、機械学習による骨格認識とフィッティングを組み合わせた、高速・高精度の3次元関節位置抽出手法について紹介する。

本稿では、富士通研究所が開発した3Dセンシング技術を紹介するとともに、実際のアスリートの動きにおける骨格認識の実験結果を示す。

Abstract

Recently, efforts to help athletes develop skills and abilities by incorporating scientific knowledge are actively deployed in the world of sports. At the same time, judging and scoring for increasingly sophisticated skills in scoring competitions such as gymnastics is becoming more difficult every year. The need to incorporate scientific technologies to improve accuracy and fairness in judging and scoring system is increasing. Therefore, Fujitsu Laboratories is engaged in research and development aimed at establishing 3D sensing technology that accurately quantifies and analyzes complex human movements three-dimensionally using machine learning. 3D sensing technology is comprised of 3D laser sensor technology, which represents human movements with depth images based on the contours of the body surface, and skeleton recognition technology, which quickly extracts the three-dimensional coordinates of joints from the depth images. Regarding 3D laser sensors, we will describe a split optical system with micro electro mechanical systems (MEMS) mirror for laser emission and detection, which is capable of more than 10 times the number of pixels obtained by conventional light detection and ranging (LIDAR) technology. We will demonstrate the usefulness of viewing angle control technology for sports. We will also describe skeleton recognition technology, noting the fast, high-accuracy 3D joint coordinate extraction method based on a combination of skeleton recognition through machine learning and subsequent fitting. This paper illustrates the 3D sensing technology developed by Fujitsu Laboratories and presents experimental results of skeleton recognition in actual athletes' movements.

まえがき

近年、スポーツ分野でのICT活用が加速している。例えばサッカーでは、フィールド上の選手を映像情報からトラッキングして、各選手の走行距離やフォーメーションの分析などに活用されている。また、テニスではボールの軌跡をとらえることで、ボールのイン・アウトのライン判定に活用されている。

一方で、アスリートの体の動かし方そのものを詳細に分析するには、人の動きを3次元データとして正確にとらえる必要があるため、実際の競技で実用化された例はない。その理由は、従来のモーションキャプチャー方式では、関節にマーカーと呼ばれる位置表示センサーや磁気センサーなどを装着する必要があり、それがアスリートの精密な動きを妨げるためである。

マーカーを装着することなく(マーカーレス),人の動きを3次元で正確に計測して数値化できれば,体操やフィギュアスケートなどの採点競技への適用や,選手強化の効率化,観客のエンターテインメント性の向上につなげることができる。富

士通研究所では、3DレーザーセンサーとAI(人工 知能)技術を用いることで、マーカーレスで人の 動きを3次元で計測して正確に数値化する3Dセン シング技術を開発している。

3Dセンシング技術の概要を**図-1**に示す。マー カーレスでアスリートの動きを3次元計測するため に3Dレーザーセンサーを使用し、人体表面の凹凸 情報を表す深度画像を取得する。次に、骨格認識 技術によって、この深度画像から主要関節の3次元 位置を導出する。関節の3次元位置を把握すること で、肘や膝、背骨などの角度を正確に計算できる ため、これらの角度の時系列的な変化を基に、体 の動きの詳細な分析が可能となる。例えば、採点 競技ではアスリートの背骨や膝関節の角度から. 背筋が伸びているか、膝が曲がってないかといっ た審判員の採点支援に活用できる。また、体の動 きを客観的な数値データとして提供できるため, 数値に基づく科学的なトレーニングにも活用でき る。更に、観客や視聴者などに対しては、アスリー トの技の構成や難度をリアルタイムに提供するこ とで、アスリートの驚異的な身体能力を目に見え

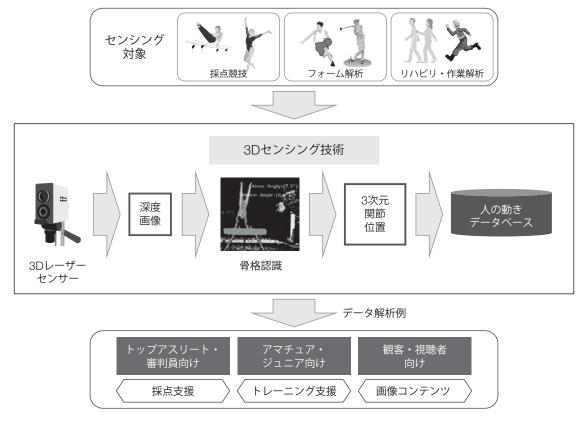


図-1 3Dセンシング技術のスポーツへの応用

る形で伝え、スポーツの魅力をより向上させることができる。また、スポーツへの活用だけにとどまらず、リハビリなどの運動機能回復や製造現場における作業分析など、様々な分野への応用も期待できる。

次章以降, 3Dセンシング技術を構成する3Dレーザーセンサーと骨格認識の両技術を解説する。⁽¹⁾

3Dレーザーセンサー技術

アスリートの素早い動きを正確に捉えるためには、高いフレームレートと、遠距離にいるアスリートを高い解像度で取得できる深度画像取得方式が必要である。表-1は、各種の深度画像取得方式を比較している。深度画像カメラとは、投射光からの反射を解析して得られる深度情報を集積化イメージセンサー⁽²⁾により取得するカメラであり、ゲーム用途向けに市販されている。⁽³⁾ 深度画像カメラは、高速・高分解能の深度情報は得られるが、5m以上の距離に対応できないため、スポーツへの応用には制約がある。

スポーツ全般に応用可能な、15 m離れた場所からの深度画像を得るために、LIDAR (Light Detection and Ranging) 技術を採用したレーザーセンサーが広く注目されている。LIDARは、パルス照射されたレーザー光の反射を利用して、対

象物との距離やその外形などの性質を分析する。 LIDARは、採用される投光側のスキャン方式と 受光側の光学系の構成によって、速度や分解能が 変わる。スキャンにポリゴンミラーなどを用いる 回転モーター型では、1ラインの走査後、次の走 査まで回転待ちが発生するため、高速化が困難で ある。この問題を克服するために、一定の範囲内 のみ機械的な走査を行うMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)ミラー型が有効となる。

スポーツ用途では、高分解能化のために従来の LIDARと比べて10倍以上の走査点数が必要であ り、MEMSミラーのスキャン速度を更に高速化し なければならない。このため、走査角度拡大レン ズを使用して、MEMSミラーを小型化する必要が ある。投受光が同軸であると, 受光系にも使用さ れるMEMSミラーの小型化により、散乱の影響を 受けた対象からの反射光全てを捕捉できず、光検 出器において光量低下を起こす。そこで, 受光量 確保のために投受光を分離した光学系を採用した。 富士通研究所が開発した、MEMSミラーを用いた 投受光分離方式3Dレーザーセンサーの構成を図-2 に示す。4 対象物との距離測定には、レーザーパル ス投射から反射光検出までの時間を測定するToF (Time of Flight) 方式を利用している。レーザー パルスが投射されてから対象物で反射し、受光ユ

衣-1 合性深度画像取待万式の比較					
方式分類			特長	課題	構成
深度画像カメラ			高速高分解能	短距離 (5 m以下) 耐光性	深度 カメラ RGB カメラ 投射光
LIDAR	回転モーター型		遠距離 耐光性	低速 (低分解能)	光検出器
	MEMS ミラー型	投受光 同軸型	遠距離 耐光性	低速 (低分解能)	光検出器 復路 を を を を を を を を を を を を を を を を を を
		投受光 分離型	遠距離 高速 高分解能	耐光性	クロス レーザー MEMSミラー 光検出器

表-1 各種深度画像取得方式の比較

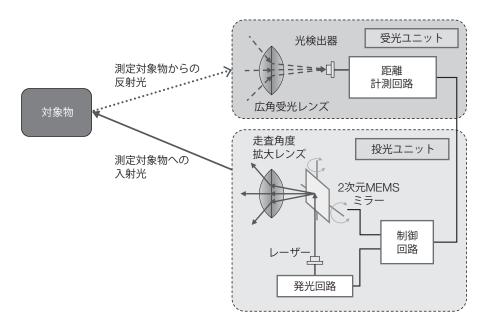


図-2 3Dレーザーセンサーの構成

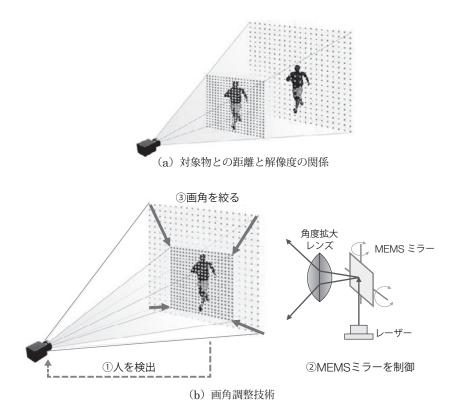


図-3 画角調整技術の概要

ニットで検出されるまでの時間を ΔT , 光速をc (約 30万km/s) とすると、対象物までの距離dは以下の式で求められる。

$$d = \frac{c \times \Delta T}{2}$$

また、様々なスポーツ競技に対応するためには、幅広い距離と領域にわたって高解像度の3Dセンシングの実現に向けて、3Dレーザーセンサーの設置場所に自由度を持たせる必要がある。図-3(a)に示すように、対象者が近距離に存在する場合には、

高い解像度で深度情報を取得できるが、遠距離の場合にも同じ画角では解像度が低下する。このため、図-3(b)に示すように、対象者が遠距離に存在する場合にはMEMSミラーの制御によって画角を絞り、解像度を近距離と同等のレベルに向上させる画角制御技術が必須となる。図-4では、近距離の深度画像を基準として、遠距離において画角制御をON/OFFした場合の比較を行っている。画

角制御を行うことにより、対象者の動きを近距離 と同じレベルの高い解像度でセンシングできるこ とを示している。

MEMSミラー投受光分離方式は、広角受光レンズを使用しているため、図-5(a)に示すように太陽光や照明などの外乱光の影響を受けやすいという性質を持っている。そこで、図-5(b)に示すように光検出器を分割し、MEMSミラーからの制御



近距離の場合



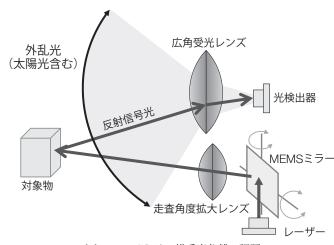
画角制御OFF →近距離と同じ画角で 解像度が低い



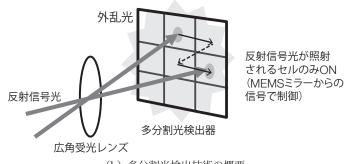
画角制御ON →高解像度でセンシング可能

遠距離の場合

図-4 画角調整の効果



(a) MEMSミラー投受光分離の課題



(b) 多分割光検出技術の概要

図-5 多分割光検出技術の概要

信号と同期して、対象物からの反射光が最も多く 入射される1個の受光器のみを選択的にオンにし、 外乱光の影響を受けるそれ以外の受光器はオフに する制御を行う多分割光検出技術を開発した。

これまでに述べた技術に加え、3Dレーザーセンサーを複数台同期して動作させることにより、1台のレーザーセンサーでは死角となる領域の動きも正確に検出できるようになる。こうした技術を組み合わせて、判定・採点の正確性・公平性だけでなく、技能の習得しやすさも高めることができる。このように、富士通研究所はスポーツ分野の3Dセンシング精度を高めるために、3Dレーザーセンサーの画角制御技術と、多分割光検出技術、および複数台連携技術を開発した。

骨格認識技術

3Dレーザーセンサーが取得した深度画像から人体を構成する各関節の位置を抽出するのが骨格認識技術である。体操競技などで使用する採点支援システムでは、審判員の判定をリアルタイムに支援するために、関節位置や関節角度を3次元データとして出力する必要がある。このため、ゲーム用途などに比べて極めて高い精度が要求される。3Dセンシングの要件を満たす、高速・高精度骨格認識技術の概要を図-6に示す。深度画像からの骨格

認識には機械学習を利用するため、認識フェーズの前に学習フェーズが必要となる。

学習フェーズでは,深度画像を入力として関節 座標の推定値を出力する予測モデルを作成する。 このために, あらかじめ取得した動作の関節座標 からCGによって深度画像を作成し、機械学習のた めのトレーニングセットを準備する。認識フェー ズでは、複数台の3Dレーザーセンサーから得られ た多視点の深度画像から、学習フェーズで生成さ れた予測モデルを用いて3次元関節座標を導出する (骨格認識)。続いて、この関節座標を初期値とし、 各センサーからの深度画像に対応する点群に対し て人体モデルを当てはめる。これをフィッティン グと称する。ここでは、点群座標とフィッティン グ用人体モデルの表面座標ができるだけ一致する ように、一致の度合い(尤度)を定義し、最も尤 度が高くなる関節座標を探索することで、 最終的 な3次元関節座標を決定する。

機械学習を利用した骨格認識では、予測モデルに基づいて関節位置を推定するため、一般的に精度は低くなる。しかし、後に続くフィッティングにより、複数の3Dレーザーセンサーからの点群に合わせて関節位置を実測値に合わせこむことにより、精度を向上できる。このとき、学習型骨格認識の推定値の精度はフィッティングの範囲を決め

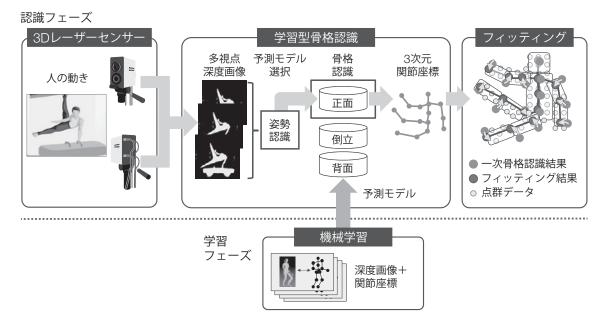


図-6 高速・高精度骨格認識技術の概要

るため、最終的な骨格認識結果の精度・処理時間に影響を与える。学習型骨格認識の精度を上げるために、図-6に示すように、正面や倒立、背面などの姿勢に集約される複数の予測モデルをあらかじめ用意し、骨格認識に先立って実施される姿勢検出により最適な予測モデルを選択する手法を採用している。この手法では、全ての動きを一つの予測モデルに集約した場合と比較して、予測モデルで学習する動きを限定することによって認識精度を大幅に改善できる。

図-7は、体操のあん馬競技において、複数センサーを用いた学習型骨格認識の結果を示している。図-7(a)の旋回運動では姿勢が正面を向いた際の予測モデルを使用し、図-7(b)の終末動作では倒立時の予測モデルを使用している。姿勢ごとに予測モデルを切り替えることで、体操のような複雑な運動においても精度の高い骨格認識が行えることが確認できた。

実用化への取り組みと将来展望

富士通は、国際体操連盟(FIG)や日本体操協会 (JGA) と連携して、3Dセンシングによる採点支 援システムの開発に取り組んでいる。詳細は、本 特集号に掲載の「体操の採点支援と3Dセンシングの目指す世界」を参照されたい。体操競技は、人の動きの中でも最も高度な宙返り・ひねり運動を含み、バリエーションに富んでいる。この競技に対応できる骨格認識技術を確立することで、全ての人の動きの解析に応用できるようになる。富士通研究所では前述した連携に基づき、カナダ(モントリオール)で2017年に開催された第47回世界体操競技選手権大会において、つり輪競技で本技術の実証実験に成功するとともに、体操競技全種目に対して適用する目途をつけることができた。図-8は、国際大会における初の取り組みとなった3Dレーザーセンサーの設置準備の様子を示している。

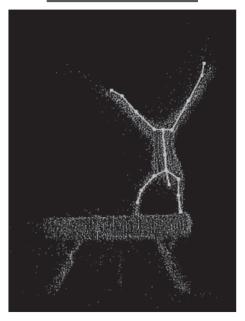
3Dセンシング技術は、これまで述べてきたように、体操以外の様々な競技やスポーツ以外の分野にも応用が可能である。バスケットボールでは、アスリートのシュート成功率を向上させたり、スランプ脱出のヒントを与えたりするためのシュートフォーム解析に利用できる。また、フィットネスジムにおいて、正しく骨格を動かしているかのトレーニングフォーム解析や、リハビリセンターにおいて、骨折などによって減じられた関節可動

正面時予測モデル選択



(a) 旋回運動

倒立時予測モデル選択



(b) 終末動作

図-7 あん馬競技における学習型骨格認識結果



図-8 世界選手権におけるセンサー設置準備の様子

域の回復度合いの評価に利用できる。このように、 他競技や他分野への展開においては、図-6に示さ れた骨格認識における予測モデルを適用分野ごと の人の動きに合わせて置き換えることで容易に対 応できる。

む す び

本稿では、アスリートの動きをリアルタイムに数値化する3Dセンシング技術について述べた。本技術は、従来までの経験と勘に基づくトレーニングの仕方を大きく変える可能性を秘めているとともに、観客に観る楽しさを提供することで観客数の増加を通じたスポーツ産業拡大にも貢献できる技術である。そのためにも、富士通研究所は本技術をできるだけ早く実用化することで、様々なスポーツ競技への展開を通じてスポーツ界の発展に貢献していきたい。

参考文献

(1) 桝井昇一ほか: 3Dセンシングがスポーツを変える. 電子情報通信学会誌, Vol.100, No.11, p.1182-1188 (2017).

- (2) A. Payne et al. : A 512x424 CMOS 3D Time-of-Flight Image Sensor with Multi-Frequency Photo-Demodulation up to 130MHz and 2GS/s ADC. IEEE International Solid-State Circuits Conference, No.7.6, p.134-135, San Francisco, U.S.A., Feb., 2015.
- (3) J. Han et al.: Enhanced Computer Vision with Microsoft Kinect Sensor: A Review. IEEE Trans. on Cybernetics, Vol.43, No.5, p.1318-1334, Oct., 2013.
- (4) K. Iida et al.: Development of 3D Range Sensor with Super-wide Angle Detection to Observe Vehicle Surrounding. 19th ITS World Congress, No.AP-00079, Vienna, Austria, Oct., 2012.

著者紹介



佐々木和雄 (ささき かずお) (株) 富士通研究所 応用研究センター スポーツ分野における研究開発の統括, およびアスリートのスキル分析の研究 に従事。



桝井昇一(ますい しょういち) (株)富士通研究所 応用研究センター 運動認識に関わる研究に従事。



手塚耕一 (てづか こういち) (株) 富士通研究所 フロントテクノロジー研究所 光センシングシステムの光学系,機構 系の研究開発に従事。

20 ©2018 富士通株式会社 FUJITSU. 69, 2 (03, 2018)