

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02844

研究課題名(和文)任意物体の3次元運動センシングに基づいた高速空間把握に関する研究

研究課題名(英文)3D motion sensing for an arbitrary rigid body and its applications

研究代表者

渡辺 義浩 (Watanabe, Yoshihiro)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：80456160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：幅広い応用展開において、ダイナミックなシーンで機能する実世界センシングのニーズが高い。なかでも物体の回転と併進の速度を捉える運動センシングは重要な役割を担っている。そこで、本研究では、非接触かつ高速で任意物体に適用可能な新しい3次元運動センシングを確立した。本技術は、観測物体の運動が起因する断片的な光現象の変化をレーザセンシングによって捉えるとともに、運動モデルに基づいて集約することで運動を把握するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動センシングは、物体やセンサ自身が予測不能かつ高速に時間変化する環境下で、十分な時空間情報量をリアルタイムに取得することが要請される。しかし、加速度センサやジャイロセンサを用いた従来技術は物体に設置する必要があるため、未知の物体には適用できなかった。カメラを用いた従来技術は計算コストが高いだけでなく、物体表面のテクスチャや形状に特徴がない物体には適用できなかった。提案する運動センシングには、従来技術の問題を解決しうるものであり、応用展開へのインパクトは大きい。

研究成果の概要(英文)：In a wide range of applications, there is a strong need for real-world sensing that can be used in dynamic scenes. In particular, motion sensing, which captures the target speed about rotation and translation, plays an important role. In this research, we have developed a new 3D motion sensing system that can be applied to an arbitrary object in a non-contact manner and can achieve high-speed acquisition. The proposed technique captures the changes in physical phenomena related with the object motion by laser sensing and estimates the motion from such information based on the movement model.

研究分野：情報理工学

キーワード：センシングデバイス・システム 運動計測 3次元計測 コンピュータビジョン 画像情報処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

次世代のアプリケーションでは、ダイナミックなシーンで機能する実世界センシングが必要不可欠である。このような実世界センシングでは、物体やセンサ自身が予測不能かつ高速に時間変化する環境下で、十分な時空間情報量をリアルタイムに取得することが要請される。なかでも物体の回転と併進の速度を捉える運動センシングは重要な役割を担っている。

これまでの運動センシングは、非接触で物体の運動情報を取得する性能が不足している。例えば、加速度センサ・ジャイロは対象物体にセンサを装着する必要があるため、未知の物体に対して使えない。同じように、磁気式・マーカ式のモーションキャプチャも同じ問題を抱えている。一方、カメラの動画を用いたものは、幾何学的拘束によって運動の復元を可能とするが、計算量が高い上に、対象表面に顕著なテクスチャがない場合には機能しない。同様に、デプスセンサを用いたものは、特徴的な凹凸形状を備えた対象のみでしか機能しなかった。また、高速ビジョンは、高フレームレート撮像によって運動を捉える時間性能を大幅に向上させたが、2次元の視覚情報を扱う以上、上記の問題からは逃れられない。このほか、TOF やドップラーシフト効果を用いたレーザ/レーダ型のセンシングも非接触ではあるが、1次元での光線方向の速度、または範囲内の動きの有無を取得する程度であり、剛体の回転と運動や非剛体の変形を定量的に得るものではなかった。このように、運動センシングは様々な応用分野に組み込まれている汎用的な技術であるにもかかわらず、十分な性能を備えるものがなかった。運動センシングには、いまだ新機軸を可能とする余地が残されており、これがもたらす応用展開へのインパクトは大きい。

2. 研究の目的

本研究では、多重化レーザ計測とモデル型認識を統合することで、非接触かつ高速で任意物体に適用可能な新しい3次元運動センシングを確立し、従来の問題を克服する。また、フィードバック制御によるトラッキングを始めとする性能強化によってシステムの発展可能性を限界まで上げる。さらに、3次元運動センシングと高速ビジョンによる画像センシングの情報統合がもたらす新たな時空間把握能力を明らかにするとともに、応用展開にも着手する。

3. 研究の方法

本研究計画は、提案する3次元運動センシングについて、基盤技術と拡張機能の確立、高速ビジョンとの融合に基づく時空間把握、非接触・高速性を始めとする独自の性能がもたらす応用展開の3つのサブテーマから構成されている。平成28年度は基盤技術の確立に着手し、高速化・高精度化の両面を達成するシステム原理と認識処理を明らかにする。この基盤技術の下、平成29年度以降は、センシング技術の拡張に着手し、種々の応用展開に向けた準備を図る。加えて、高速ビジョンとのセンシング情報の融合を図り、時間変化する動的環境下での時空間把握能力を高める。これらの技術をベースに、ロボティクス、ユーザインタフェース、デジタルアーカイブなどにおいて新応用の開拓を狙う。

4. 研究成果

平成28年度は、提案する運動センシングの基本ユニットを構築した。本ユニットは、TOF 測距、ドップラー速度計、ガルバノミラーから構成される。同ユニットは、3次元位置と計測方向の速度を、対象表面上の複数点で取得することができる。提案する運動センシングは、これらの情報から、剛体の剛体の回転と併進速度を取得することができる。構築したユニットによって、以上の原理を達成できることを確認した。次に、構築したユニットの計測精度向上に取り組んだ。本センシングでは、ドップラー速度が得られる方向と、対象の運動方向が直交する場合には、不良設定問題となる恐れがある。そこで、TOF 測距とドップラー速度計のレーザを照射する方向の自由度を向上させる構成を設計した。また、更なる拡張として基本ユニットを複数台用意して、多方向から観測するシステムの設計も検討を進めた。一方、基本ユニットでは計測できる範囲が限られている問題があった。そこで、リアルタイムに取得された3次元運動情報を用いて、対象の運動に合わせて、同物体表面に継続してレーザを照射し続けることができるように、トラッキング機能を組み込む案を検討した。

次に、法線を取得する画像センシング、及び形状を取得する画像センシングの2つと、開発した3次元運動センシングを統合するシステムを開発した。特に、法線を取得する代表的手法の照度差ステレオでは、光源と視点の位置関係を変化させるために、3回以上の撮像が必要とされており、運動物体への適用が難しかった。そこで、3次元運動センシングを利用することにより、運動物体を観測した時系列画像間で画素レベルの対応付けを行うことで、同問題を解決する手法を提案した。さらに、3次元運動センシングを利用することで、形状を取得する光切断法と法線を取得する照度差ステレオ法を同時に実現できるシステムを構成した。これらの手法・システムにより、高速かつ高精度・高解像度な三次元情報計測を実現した。図1に本成果を示す。

平成29年度は、前年度までに提案していた、剛体の回転と併進を含む6自由度運動の推定問題を見直した。その結果、これまでの枠組みで使用していたTOF 測距がない場合でも、最低3視点の速度情報がドップラー速度計で取得できれば、6自由度運動を推定できることを理論的に示

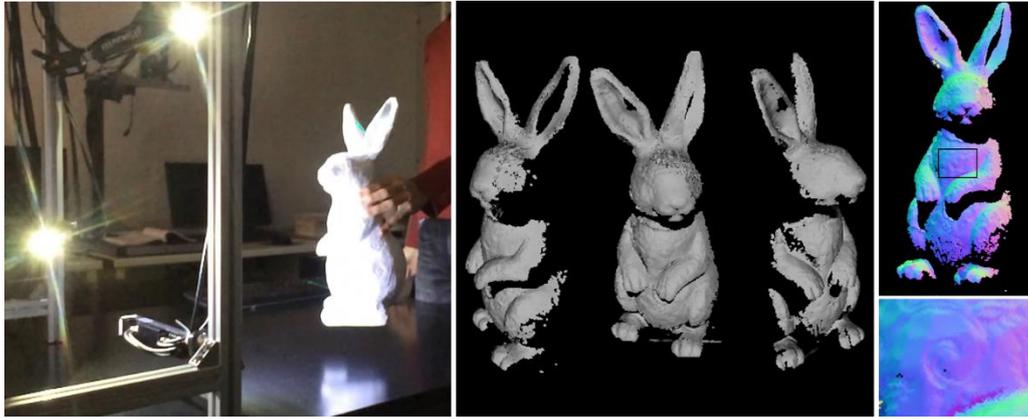


図 1. 3次元運動センシングを用いた運動物体の三次元形状・法線統合

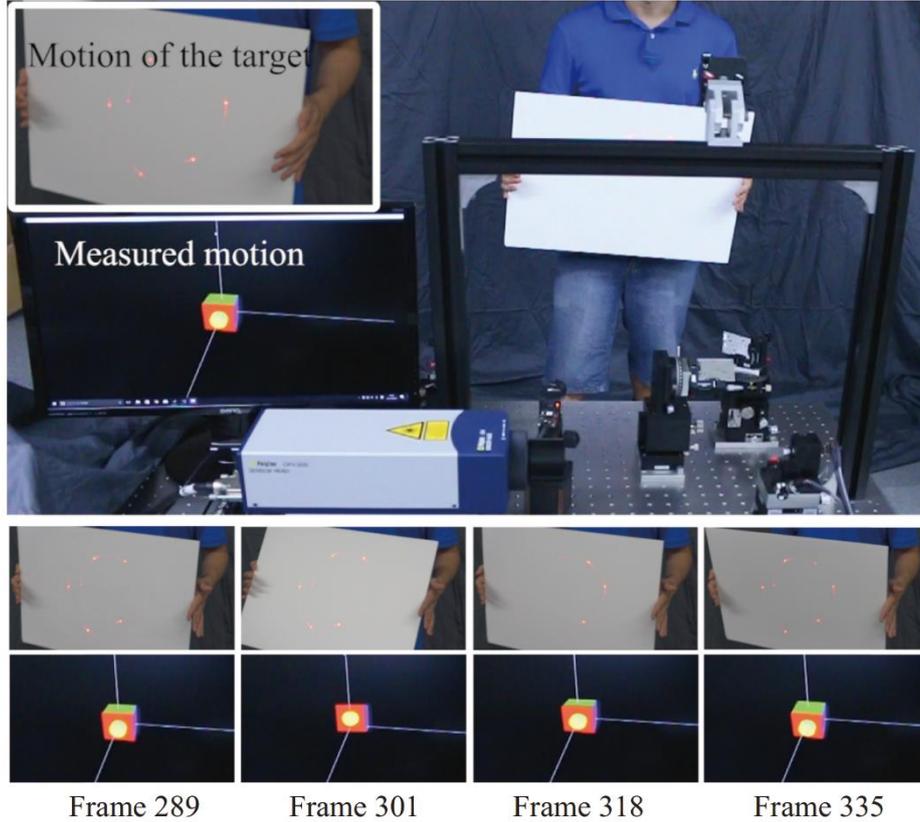


図 2. ロバスト化された 3次元運動センシング

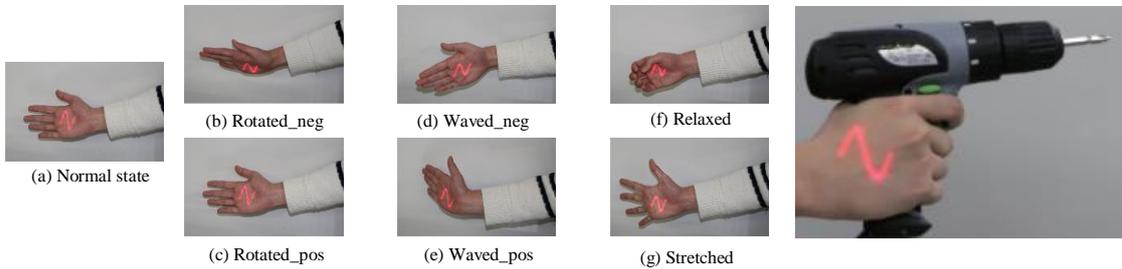


図 3. 3次元運動センシングを用いたユーザインタフェースへの応用

した。これにより、よりコンパクトなシステムを構築できることを実証した。さらに、同問題における条件数を用いて、運動推定の高精度化に向けた最適なシステム構成を設計する手法を示した。以上の理論のもと、システムを構築するとともに、リアルタイムにセンシングを実施するソフトウェアを実装した。同システムを用いて、精度を定量的に評価し、想定通りの結果が得られることを示した。図 2 に実現したシステムを示す。

次に、3次元運動センシングをユーザインタフェースに応用展開する研究に着手した。これは、人間の手や日常の物体を、ユーザインタフェースのツールとしてシームレスに組み込むことを目指したものである。通常は、これらの対象物にセンサを搭載する方式が一般的であった。これに対して、本手法の場合、非接触で取得された速度情報のみから様々な入力を提供できる点で優

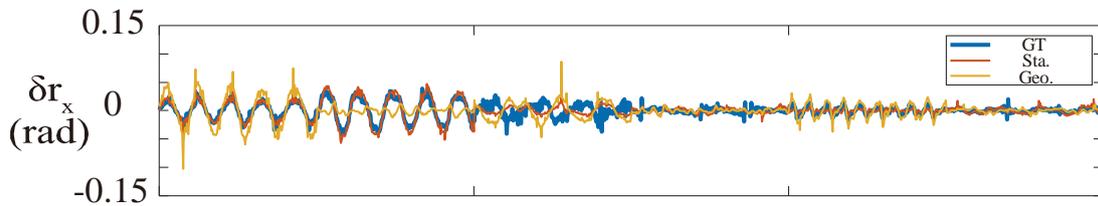


図 4. キャリブレーション強化による精度向上 (GT: 真値, Sta.: 提案手法, Geo.: 従来手法)

れている。本年度は、このようなユーザインタフェースの検証を実施した。運動情報として、剛体運動、変形運動、振動の3種類を識別しつつ、その量を取得できることを示した。さらに、これらの情報を用いて、ハンドジェスチャやオブジェクトの運動・変形を介した直感的な入力や、振動情報を用いた対象物の識別について検証実験を実施した。図3に動作の様子を示す。

平成30年度は、運動センシングシステムのための新たなキャリブレーション手法を提案した。これまでは、レーザの設置に関する幾何的な構成のみに注目していたため、精度に限界があった。具体的には、複数のレーザ方向のみを個別に推定する方法を採用していた。しかし、同方法で生じる誤差が、計測処理時に大きな誤差へとつながることが問題となっていた。これに対して、提案手法は、同幾何構成だけでなく、運動センシングのモデル並びにセンサ特性も取り込んだ形でキャリブレーションパラメータの最適化を図るものである。従来手法と提案手法の比較実験を実施し、従来よりも高精度な運動センシングが実現できることを確認した。図4に比較結果を示す。

次に、高速ビジョンと運動センシングの融合を図った。具体的には、高フレームレートのカメラによるトラッキングと、運動センシングによる動き推定を組み合わせることで、相対速度、並びに絶対位置のセンシングの両方を高精度化することを目指した。手法を設計するとともに、高いセンシングレートで実行できるソフトウェアを構築した。また、検証実験を行い、その効果を確認した。

令和元年度は、これまでに開発した技術をもとに、応用展開を検討した。検討の結果、有望な応用に向けて、追加の要素技術が必要であることが明らかになった。具体的には、より実用的な局面での展開に向けて、観測シーンを運動に応じて領域分割するとともに、その動きを復元できる技術が必要であった。そこで、視線速度分布を取得可能なドップラーカメラの使用を前提としたアルゴリズムを設計した。本手法は、剛体の運動を3次元の部分空間へ射影することで、動きによる領域分割とその動きの復元を線形的に解くことを可能とするものである。通常の輝度カメラを用いたアプローチに比べて、対象のテクスチャや構造に依存しないだけでなく、効率的かつ安定に問題を解くことができる点で有効であることを確認した。さらに、本手法で着目したドップラーカメラは原理的な実現可能性が示されたのみで、上記のような認識処理と組み合わせたときに動作に耐えうるレベルかは明らかにされていない。そこで、ドップラーカメラの開発にも着手した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yunpu Hu, Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa	4. 巻 19
2. 論文標題 Visual Calibration for Multiview Laser Doppler Speed Sensing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s19030582	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Masahiko Yasui, Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Occlusion-robust sensing method by using the light-field of a 3D display system toward interaction with a 3D image	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 A209-A227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.58.00A209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yunpu Hu, Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa	4. 巻 25
2. 論文標題 Robust 6-DOF motion sensing for an arbitrary rigid body by multi-view laser Doppler measurements	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 30371-30387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1364/OE.25.030371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshihiro Watanabe	4. 巻 5
2. 論文標題 High-speed optical 3D sensing and its applications	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Advanced Optical Technologies	6. 最初と最後の頁 367-376
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1515/aot-2016-0047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yunpu Hu, Leo Miyashita, Yoshihiro Watanabe, Masatoshi Ishikawa
2. 発表標題 GLATUI: Non-intrusive Augmentation of Motion-based Interactions Using a GLDV
3. 学会等名 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊
2. 発表標題 多重化レーザー計測による3次元運動センシングを用いた物体トラッキング
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshihiro Watanabe
2. 発表標題 High-speed 3D vision and its applications for real-world interaction
3. 学会等名 The 31st International Congress on High Speed Imaging and Photonics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡辺義浩
2. 発表標題 高速性がもたらす実世界把握・提示の新展開
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 齋藤謙二郎, 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊
2. 発表標題 高速BRDF計測に向けた代数的解法の拡張の実機検証
3. 学会等名 第19回画像の認識・理解シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 板垣俊輝, 米澤亮太, 宮下令央, 渡辺義浩, 石川正俊
2. 発表標題 三次元運動センシングを用いた運動物体の三次元形状・法線統合
3. 学会等名 第22回画像センシングシンポジウム
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	宮下 令央 (Miyashita Leo) (40808721)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任講師 (12601)	