

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H04103

研究課題名(和文)磁気式3次元モーションセンサシステムの試作と未踏問題への応用

研究課題名(英文)Prototype magnetic 3D motion sensor system and its application to unexplored problems

研究代表者

北村 喜文 (Kitamura, Yoshifumi)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：80294023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：人の手や身体の動き等を計測する3次元モーションキャプチャー技術は、バーチャルリアリティなどさまざまな場面で利用されるようになってきている。しかし、動きを連続して滑らかに計測できないことがある等の問題があった。そこで本研究では、磁気式3次元モーションキャプチャーの新しい方式とともに、深層学習とデータ処理のための新しいフィルタを提案することによりこの問題を解決し、人やモノの動きを連続して滑らかに、しかも正確に計測することを可能にした。複数の磁界センサで検出された磁界強度の分布から、マーカの3次元位置をDNNを利用して高速に求めることにより、高精度で高速のモーションキャプチャーが実現できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで様々な原理に基づく3次元モーションセンサが提案されてきたが、いずれも原理上の制約から3次元の運動を計測できる対象に制限があり、利用できる分野は限定的だった。例えば、道具使用時の細かい手作業中の手指の運動や、土中や障害物の中で動き回る小動物の運動、互いに複雑に絡み合う多関節物体の動き、流体の3次元動的な動きなどを直接計測することはできなかった。本研究より、これら従来は計測できなかった対象の3次元の動きを計測できる新しい磁気式モーションセンサシステムを実現することができた。これを用いて様々な分野への実応用や、重要な未踏問題の解決につなげることができる。

研究成果の概要(英文)：Dexterous 3D motion data can be used for multiple purposes: biologists can use the data to record detailed movements of small animals in their living environments, scientists can track the flow of fluids, and researchers can track finger movements and objects being manipulated by users in virtual reality.

We have captured dexterous 3D motion data from a flexible magnetic flux sensor array, using deep learning and a structure-aware temporal bilateral filter. We invented our new method by applying these ideas on a new magnetic tracking principle. First, the neural networks learn the regression from the simulation flux values to the LC coils 3D configuration at any location and orientation. The new filter further compensates the data to reconstruct smooth and accurate motion. Markers do not require batteries, so observation time can be maximized. As a result, the new integrated system can track multiple LC coils at 100Hz speed at millimeter level accuracy.

研究分野：ユーザインタフェース

キーワード：バーチャルリアリティ モーションキャプチャ 3次元ユーザインタフェース

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人の運動などを計測する3次元モーションセンサシステムは、人の自然な手・身体の動きやジェスチャを利用して誰でも直感的にコンピュータやその他の機械を使える未来型のユーザインタフェースを実現する重要な要素技術の1つとして、また、リアルな動きをコンピュータアニメーションとして再現するため等に盛んに利用されてきた。これまで、さまざまな原理に基づくものが提案されてきたが、いずれも原理上の制約から3次元の運動を計測できる対象に制限があり、利用できる分野は限定的であった。たとえば、道具使用時などの人の細かい手作業中の手指の運動や、土中や障害物の中で動き回る小動物の運動、互いに複雑に絡み合う多関節物体の動き、流体の3次元的な動きなどを計測することはできなかった。それは、カメラや距離画像入力装置を用いた光学式の手法によるモーションセンサでは、隠れ(オクルージョン)のために計測できない死角があり、複数の指や個体をそれぞれ区別して安定的に計測することは難しかったためである。また交流磁気式の3次元モーションセンサも幅広く利用されているが、電源供給や通信のために一般にセンサは有線接続されるため、上記のような対象の運動には邪魔になり、これを回避しようと無線通信やバッテリーを搭載すると、センサ自体が大きく重くなって、やはり自由な運動を阻害していた。流体も、レーザ光を照射して非接触で2次元断面中の速度分布を計測する手法はあるが、3次元的な流れを計測しようとする、流体表面にマーカとなる指標を浮かべてカメラで観察する手法などに留まっており、直接計測することはできなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、これら従来は計測できなかった対象の3次元の動きを計測できる新しい磁気式モーションセンサシステムを実現し、これを用いていくつかの分野への実応用を図り、重要な未踏問題の解決に寄与する。

### 3. 研究の方法

励磁コイル(driving coil)によって生成される磁界中に置かれたLC共振型磁気マーカ(LCコイル)が発する誘導磁界を複数の磁界センサ(pick-up array)で検出し、それらの計測データを基にLCコイルの3次元位置を特定する。異なる複数の周波数を畳み込んで励磁することにより、これらに対応する複数の共振周波数を持つLCコイルが発する誘導磁界をそれぞれFFTにより識別することができる。この際、LCコイルの軸が励磁コイル(driving coil)によって生成される磁界の向きに垂直に近い姿勢の場合、LCコイルを貫く磁束が不足し、計測に十分な強度の誘導磁界を発生できないために、3次元位置を計測できないという問題がある。

そこで本研究では、励磁コイルの向きを変化させることによりこの問題を解決し、あらゆる姿勢のマーカの3次元位置を計測できるシステムを実現する。各LCコイルを、重さ1g、直径4mm、長さ15mmの小型軽量で作成し、15個までをそれぞれ区別して、1mm程度以下の位置精度で同時に約30Hzで検出できる。このシステムは、ワイヤレスでバッテリーレスで、隠れ(オクルージョン)の問題もない等、他に類を見ない大変ユニークな特徴を有している。そのため、道具使用時の細かい手指の運動や、土中や多くの障害物の中で動き回る小動物の運動、互いに複雑に絡み合う多関節物体の動き、流体の3次元的な動きなどのモーション計測を可能とする唯一の方法だと言える。そこで、これらの重要分野の未踏問題の解決にも寄与する。またそのために、機械学習を用いて安定な解を高速で計算するアルゴリズムを確立する。

#### 4. 研究成果

今回開発したシステムの構成を図 1 に示す[1]. 複数の磁界センサー (Flux Sensors) で検出された磁界強度の分布から, マーカの 3 次元位置をディープニューラルネットワーク (DNN)を利用して高速に求める. そのため, 計測空間中の約 2 億個所にマーカを仮想的に置き, 各磁界センサで検出される磁界強度をビオ・サバルの法則で計算し, これらをラベル付けされたデータとして DNN の構造を利用して予め学習させた. これらにより, 高精度で高速のモーションキャプチャーが実現できた. 計測誤差は約 1.8 mm で, 15 のマーカの 3 次元位置を求める時間は約 10 ミリ秒である. 図 2 に計測誤差の様子を示す. 図 3 は, 磁気マーカをロボットハンドに付けて動かした際の計測精度の従来手法との比較である. 黒色が本手法を示し, 他と比較して, 最も誤差が小さくなっていることがわかる.

図 4 左は, 不透明な水中に入れた磁気マーカの動きをリアルタイム計測している例である. 従来手法ではこのように水の動きを直接計測することができなかった. 同図 2 つ目は, 昆虫 (クワガタ) にマーカを背負わせている例である. これらが飼育箱の中で, 土の中や木・葉の下に潜ろうとも見失わず, 長期間継続してこれらの活動を記録できる. ケーブルや電源による制約がないので, 運動の自由度を阻害することはない. マウスなどの小動物の動きの計測・生態観察も同様にできる. 3 つ目はボールの中に磁気マーカを入れ, 不透明の布袋の中に入った複数の色付きのボールの動きを区別して計測できていることを示している. 一番右は, 10 個の磁気マーカを両手の指先に付け, 指を高速にからめるなどの動作をしても, それぞれを区別して約 100 Hz で計測できている例を示している.

また, マーカの姿勢により計測できなくなる死角の問題と計測領域が狭いという 2 つの問題を解決するため, 磁界発生装置とセンサをロボットに搭載し, マーカの姿勢に応じて最適となる位置と方向に PID 制御で移動させるシステムを試作したものを図 5 に示す[2]. (a)はシステムの外観, (b)は指先に付けたマーカの位置と方向を計測している例である. さらに, 同一の共振周波数を持つ複数の LC コイルを複数用いて, 死角の問題を解決する方法を提案した (図 6). 励磁コイルの向きを高速に変化させることにより死角の問題を解決した実装例を図 7 に示す.

- [1] Jiawei Huang, Ryo Sugawara, Kinfung Chu, Taku Komura, and Yoshifumi Kitamura: Reconstruction of Dexterous 3D Motion Data from a Flexible Magnetic Sensor with Deep Learning and Structure-Aware Filtering, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, October 2020. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3031632>
- [2] Pascal Chiu, Jiawei Huang, and Yoshifumi Kitamura: Enabling Robot-assisted Motion Capture with Human Scale Tracking Optimization, Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST), Article No.: 32, December 2021. <https://doi.org/10.1145/3489849.3489881>

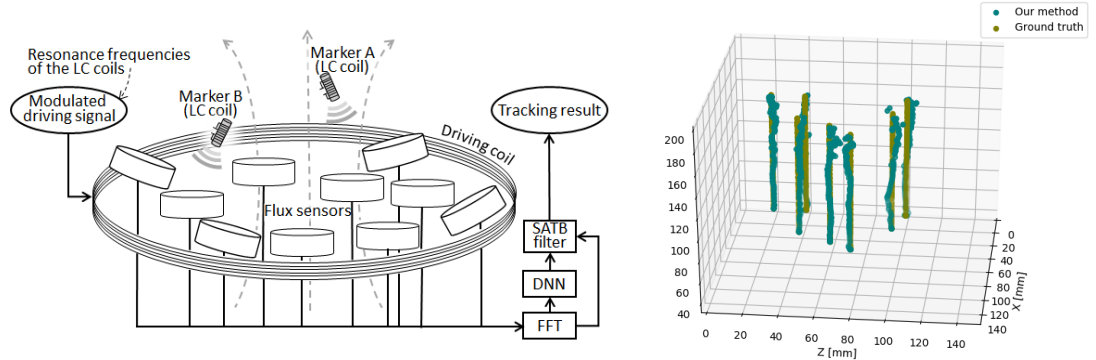


图 1

图 2

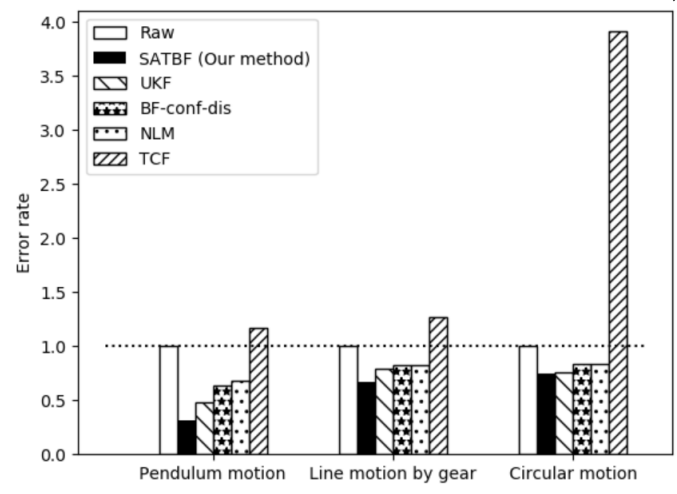


图 3



图 4

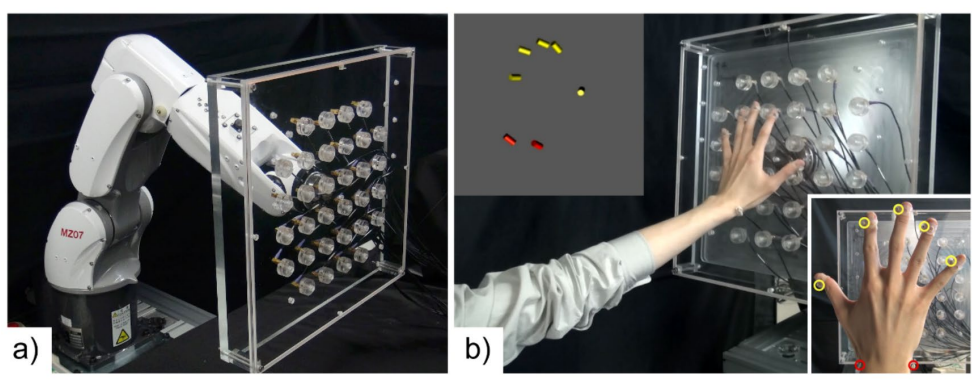


图 5

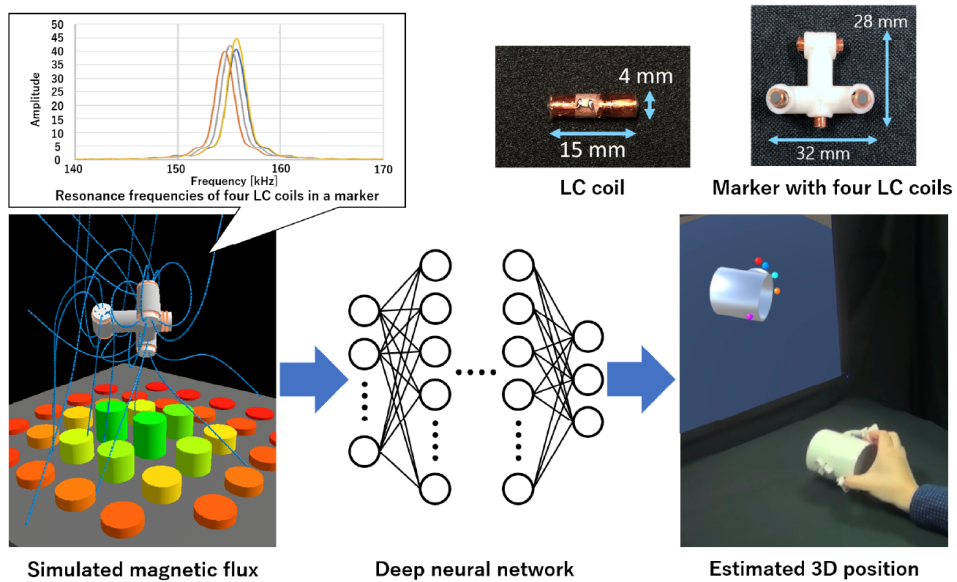


図 6

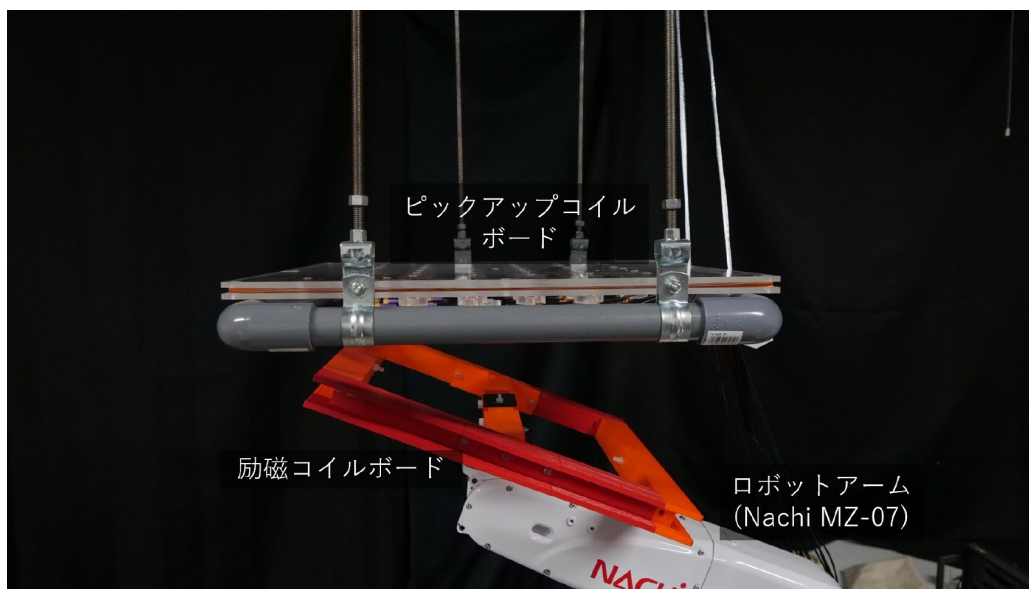


図 7

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ryo Sugawara, Jiawei Huang, Kazuki Takashima, Taku Komura and Yoshifumi Kitamura	4. 巻 Article 116
2. 論文標題 Random-Forest-Based Initializer for Solving Inverse Problem in 3D Motion Tracking Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceeding of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)	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) 10.1145/3281505.3283393	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 該当する
1. 著者名 Mannone Maria, Eri Kitamura, Jiawei Huang, Ryo Sugawara and Yoshifumi Kitamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Cubeharmonic: A New Interface from a Magnetic 3D Motion Tracking System to Music Performance	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression	6. 最初と最後の頁 350-351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する
1. 著者名 M. Mannone, E. Kitamura, J. Huang, R. Sugawara, and Y. Kitamura	4. 巻 Sixth Issue
2. 論文標題 Musical Combinatorics, Tonnetz, and the CubeHarmonic	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Collected papers of Academy of Arts	6. 最初と最後の頁 104-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する
1. 著者名 Huang Jiawei, Sugawara Ryo, Chu Kinfung, Komura Taku, Kitamura Yoshifumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Reconstruction of Dexterous 3D Motion Data from a Flexible Magnetic Sensor with Deep Learning and Structure-Aware Filtering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	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) 10.1109/TVCG.2020.3031632	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 該当する

1. 著者名 Chiu Pascal、Huang Jiawei、Kitamura Yoshifumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Enabling Robot-assisted Motion Capture with Human Scale Tracking Optimization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)	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) 10.1145/3489849.3489881	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 Mannone, M., Yoshino, T., Chiu, P., Kitamura, Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 Hypercube + Rubik's Cube + Music = HyperCubeHarmonic	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Mathematics and Computation in Music	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) なし	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 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 Designing Interactive Content with Digital and Physical Artifacts
3. 学会等名 6th International Conference on Networking, Systems and Security (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiawei Huang, Ryo Sugawara, Taku Komura, and Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 Random-Forest-Based Initializer for Real-time Optimization-based 3D Motion Tracking Problems
3. 学会等名 ICAT-EGVE 2019 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Maria Mannone, Eri Kitamura, Jiawei Huang, Ryo Sugawara, Pascal Chiu, and Yoshifumi Kitamura
2 . 発表標題 CubeHarmonic: A New Musical Instrument Based on Rubik ' s Cube with Embedded Motion Sensor
3 . 学会等名 ACM SIGGRAPH 2019 Poster ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Pascal Chiu, Isamu Endo, Kazuki Takashima, Kazuyuki Fujita, Yoshifumi Kitamura
2 . 発表標題 FreeMo: Extending Hand Tracking Experiences Through Capture Volume and User Freedom
3 . 学会等名 SIGGRAPH Asia 2019 XR ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Pascal Chiu, Kazuki Takashima, Kazuyuki Fujita, Yoshifumi Kitamura
2 . 発表標題 Pursuit Sensing: Extending Hand Tracking Space in Mobile VR Applications
3 . 学会等名 ACM Symposium on Spatial User Interaction ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Ryo Sugawara, Yoshifumi Kitamura, Jiawei Huang and Shunsuke Yoshida
2 . 発表標題 Interacting with 3D Images on a Rear-projection Tabletop 3D Display Using Wireless Magnetic Markers and an Annular Coil Array
3 . 学会等名 Proceeding of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年



1. 発表者名 菅原 諒, 黄 佳維, 高嶋 和毅, 北村 喜文
2. 発表標題 磁気式モーションセンサと CNN を用いたオクルージョンに強い非グローブ型手形状・位置・姿勢推定手法
3. 学会等名 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 データ処理装置、データ処理方法及びプログラム	発明者 北村喜文, 黄佳維	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/016175	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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	片山 統裕 (Norihiro Katayama) (20282030)	尚絅学院大学・総合人間科学研究機構・教授 (31311)	
研究分担者	高嶋 和毅 (Kazuki Takashima) (60533461)	東北大学・電気通信研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	藤田 和之 (Kazuyuki Fujita) (70835545)	東北大学・電気通信研究所・助教 (11301)	
研究分担者	梶 修一郎 (Shuichiro Hashi) (90324285)	東北学院大学・工学部・教授 (31302)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	University Palermo			
英国	University of Edingburgh			
中国	University of Hong Kong			