

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」
研究課題「ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用創出」

研究終了報告書

研究期間 2014年10月～2021年3月
(2020年4月～2021年3月 1年追加支援実施
新型コロナウイルス感染症の影響を受け、さらに2021
年9月まで延長)

研究代表者: 益 一哉
(東京工業大学、学長)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

2020年3月末完了予定の本プロジェクト期間を1年延長し、MEMS デバイスを搭載したモジュールの完成度向上と応用としての筋音測定による早期診断法の基本検討に集中実施する予定であったが、さらに、新型コロナウイルス感染症の影響により半年間研究期間を延長した。本プロジェクト推進としては、これまでにプロジェクトの目標数値を達成していることを踏まえ、1年半の延長によりモジュールの完成度向上と応用展開のための筋音計測の基礎データの積み上げを実施した。

しかしながら、新型コロナウイルス感染症の影響により、従来と同様の実験スケジュールの確保は難しく、特に、患者接触制限による病院(関東中央病院、日産厚生会玉川病院)での実験不可能なこと、および、企業装置の稼働率確保の難しさ、などの理由により、基礎検討での評価を実施した。

【目的】

本提案では「ナノ G*計測」が産み出す新機能実現を目的とする。目標性能として $mG(10^{-3} G)$ から $\mu G(10^{-6} G)$ オーダーの加速度を測定可能な新たな慣性計測デバイス・システム技術を開発し、その応用分野を創出する。

【方法】

研究代表者がこれまでに開発してきたプロセス、機械系－電気系 統合解析・設計環境技術による慣性センサの超高感度化と小型化研究を核として、材料レイヤと応用レイヤの研究者と連携して、ナノ G 計測の実現と応用展開を目指す。

【結果】

●診断 (東京工業大学 三宅グループ)

高感度慣性センサの応用創出の一例として、パーキンソン病 (PD) の重症度ステージ分類を取り上げ、ウェアラブル診断支援システムの構築を進め、歩行障害を対象として 96.3% という世界最高の分類精度を達成した。さらに筋肉の極微細振動である筋音に計測対象を拡張し、PD 患者における神経由来の筋音減弱を世界で初めて示した。

●慣性センサ (東京工業大学 益グループ)

Au 錘 MEMS デバイスを用いた加速度センサモジュールを試作し、従来の市販小型加速度センサより 1 桁以上低い雑音フロアを達成した。デバイス、回路、モジュールのさらなる低ノイズ化、および、CMOS-MEMS 集積化も実施した。現時点において、デバイスと回路の個々の性能は $1\mu G$ 以下検出の目標値を達成した。

●材料 (東京工業大学 曾根グループ)

デバイスの高精度設計に向けて、マイクロ寸法金/チタン構造のヤング率を定量評価した。金合金開発では、純金で降伏強度 $0.8GPa$ を超える材料の試作に成功した。この純金属材料は一千万回の振動において変形せず、温度耐久性も高い。金銅合金材料では降伏強度 $1.5GPa$ 、曲げ強度 $2.0GPa$ を超える材料の開発に成功した。これは金属材料の世界最高値である。金銅合金材料は、純金属材料よりも更に高い信頼性を有することを示した。

診断グループと慣性センサグループの連携:

今後のさらなるセンサ高性能化に向けて、診断グループと連携して、ウェアラブル診断支援システム応用に向けた高分解能加速度センサモジュールを開発した。試作した加速度センサモジュールを用いて、従来センサでは検出できない筋音情報の取得に成功した。

慣性センサグループと材料グループの連携:

新規合金金属材料をデバイス構造・プロセスに適用するため、材料グループと連携して評価サンプルの作製・評価と材料パラメータのモデル化を実施した。具体的には、積層メタル密着力をモデル化し、耐衝撃性能を回路シミュレータ上で解析可能とする統合設計環境を構築した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1.

概要

【原著論文】

C.-Y. Chen, M. Yoshiba, T. Nagoshi, T.-F. M. Chang, D. Yamane, K. Machida, K. Masu, and M. Sone, "Pulse Electroplating of Ultra-Fine Grained Au Films with High Compressive Strength," *Electrochemistry Communications*, **2016**, 67, 51-54.

バルクの金の降伏強度は 50~200MPa であることが知られている。また金属をナノ結晶化することにより、降伏強度を向上できる。本論文では、亜硫酸金めっき浴を用いてパルスめっきを行うことで、ナノ結晶化した金めっきを作製し、同時に得られた金めっき薄膜からマイクロメートルサイズの圧縮試験片を作製し、降伏強度を測定した結果、800MPa の値を得た。この強度は、バルク金よりはるかに大きな値であるのみならず、いまままで報告された純金属材料の中で最も高い値を示している。

2.

概要

【原著論文】

K. Hori, Y. Mao, Y. Ono, H. Ora, Y. Hirobe, H. Sawada, A. Inaba, S. Orimo, Y. Miyake, "Inertial Measurement Unit-Based Estimation of Foot Trajectory for Clinical Gait Analysis," *Frontiers in Physiology*, **2019**, 10, 1-12.

両足首に装着した加速度センサとジャイロセンサを用いて足首の運動軌道を推定する手法を構築した。さらに、健常者およびパーキンソン病患者の両方において足首の運動軌跡を高精度に推定できることを示した。これにより、簡便な歩行計測によって歩行の空間的特徴量を推定し、パーキンソン病の診断支援をすることが可能となった。

3.

概要

【原著論文】

D. Yamane, T. Konishi, T. Safu, H. Toshiyoshi, M. Sone, K. Machida, H. Ito, and K. Masu, "A MEMS Accelerometer for Sub-mG Sensing," *Sensors and Materials*, vol. 31, 2019. (Available online 23 July 2019)8. [Sensors and Materials Young Researcher Paper Award 2019 受賞論文]

1G 以下を従来よりも高精度に検出可能な加速度センサの実現に向けて、高密度 Au 積層錘を用いて錘質量に反比例するブラウニアン・ノイズを低減した MEMS デバイス構造を新たに提案し、試作・評価した。実験的に評価したノイズは 100nG/√Hz 以下であり、同じサイズの従来シリコン加速度センサでは実現困難な 1μG レベルの分解能を達成した。これは加速度セン

サ高性能化のブレークスルーである。

4.
概要

【原著論文】

T. Ichikawa, K. Shibata, T. Koga, K. Machida, S. Iida, N. Ishihara, K. Masu and H. Ito, "A High Resolution Single Gold Proof-Mass CMOS-MEMS Accelerometer" in Proc. 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2020), C-9-02, Online, Japan, Sept. 27-30, 2020.

高分解能 CMOS-MEMS 加速度センサ実現に向けて、これまでに検討してきた 0.18 μm CMOS 弛張発振型容量検出回路⁽⁵⁾ 上に MEMS 加速度センサを形成する CMOS-MEMS 化を実現した論文である。提案した CMOS-MEMS 加速度センサは、 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ のチップサイズで $44 \mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ のトータルノイズと $92 \text{ nG}/\sqrt{\text{Hz}}$ のブラウニアンノイズを得るとともに、 $77 \mu\text{G}$ の分解能を実現することを確認した。従来の CMOS-MEMS 加速度センサと比較して、本 CMOS-MEMS 加速度センサは、マイクロ G レベルのセンシングの可能性を示した。本結果は、1 年半の追加支援時の成果である。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1.
概要:

【国際会議論文】

Ono, Y., Ora, H., Hori, K., Hashiguchi, H., Mao Y., Sawada, H., Inaba, A., Orimo, S., Miyake, M., "A gait evaluation of patients with Parkinson's disease with inertial measurement units," Proc. of the 14th International Conference on Alzheimer's and Parkinson's Diseases (AD/PD2019), Lisbon, Portugal, pp.247 (2019)

パーキンソン病 (PD) をはじめとする神経変性疾患を対象として、その歩行障害を慣性センサで計測し重症度ステージを自動分類できる、ウェアラブル診断支援システムを世界で初めて開発した。PD 患者と健常高齢者の分類精度が 96% を越えており、すでに実用化レベルに到達している。さらに PD の類似疾患であるアルツハイマー病 (AD) や正常圧水頭症 (NPH) の分類にも適用可能であり、包括的な早期診断システムにも道が開かれた。この成果に対応する原著論文は現在査読中である。

2.
概要:

【原著論文】

Motohiro Takayasu, Shiro Dosho, Hiroyuki Ito, Daisuke Yamane, Toshifumi Konishi, Katsuyuki Machida, Noboru Ishihara, and Kazuya Masu "A 0.18- μm CMOS Time-Domain Capacitive-Sensor Interface for Sub-1mG MEMS Accelerometers," IEICE Electronics Express (ELEX), vol. 15, no. 2, 2018, pp.20171227.

弛張発振回路をベースとした容量センサ回路を考案。内部発生雑音 (熱雑音、フリッカ雑音) を抑圧でき、また、外来の電源雑音の影響を受けない特徴を有する。さらに、時間領域での平均化処理を施すことにより雑音を抑圧でき、より高感度な容量センシング動作 (高い信号対雑音比) が可能となる。回路は、0.18 μm CMOS プロセス技術により試作し、MEMS 慣性センサデバ

イスとモジュール化し評価した結果、分解能 1mG 以下の高感度動作の実現に成功した。

3.

概要:

【原著論文】

Keisuke Asano, Tso-Fu Mark Chang, Hao-Chun Tang, Takashi Nagoshi, Chun-Yi Chen, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone, "High Strength Electrodeposited Au-Cu Alloys Evaluated by Bending Test Toward Movable Micro-Components" ECS Journal of Solid State Science and Technology, Vol. 8, No. 8 pp. 412-415

本プロジェクトの高感度 MEMS 加速度センサに用いる金属材料において要求される機械的特性は、高い曲げ強度である。本論文ではマイクロサイズの金銅合金めっきのカンチレバーを作成し、曲げ強度を微小材料試験により測定した。この結果、金銅合金めっきは 2.0 GPa という高い曲げ強度を有することを明らかにした。この成果は、金合金材料の常識を覆す成果であり、実用的に大きな意味がある。

< 代表的な論文 >

1. 【材料 G】

Hao-Chun Tang, Tso-Fu Mark Chang, Yaw-Wang Chai, Chun-Yi Chen, Takashi Nagoshi, Daisuke Yamane, Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Kazuya Masu, Masato Sone, "Nanoscale Hierarchical Structure of Twins in Nanograins Embedded with Twins and the Strengthening Effect " Metals, Vol.9, No.9, Sep. 2019, p987

2. 【慣性センサ G】

Tatsuya Koga, Takashi Ichikawa, Naoto Tanaka, Taiki Ogata, Hiroki Ora, Daisuke Yamane, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito, Masato Sone, Katsuyuki Machida, Yoshihiro Miyake, Kazuya Masu "High-Sensitivity Inertial Sensor Module to Measure Hidden Micro Muscular Sounds," in Proc. Biomedical Circuits and Systems Conference (BiOCAS 2019), Nara, Japan, pp.8077, 2019.

3. 【診断 G】

Ono, Y., Ora, H., Hori, K., Hashiguchi, H., Mao Y., Sawada, H., Inaba, A., Orimo, S., Miyake, M., "A gait evaluation of patients with Parkinson's disease with inertial measurement units," Proc. of the 14th International Conference on Alzheimer's and Parkinson's Diseases (AD/PD2019), Lisbon, Portugal, pp.247 (2019)

4. 【慣性センサ G】

Hiroyuki Ito, Katsuyuki Machida, Noboru Ishihara, Yoshihiro Miyake and Kazuya Masu, "A Highly Sensitive MEMS Accelerometer Module for Measuring Micro Muscular Sounds", ECS Transactions, Volume 104, 2021(accepted). 本結果は、1年半の追加支援時の成果である。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「慣性センサ」グループ

研究代表者: 益 一哉 (東京工業大学 学長)

研究項目

- ・市販モジュールを用いた基礎実験
 - 市販モジュール評価
- ・0.1G センサによる実験
 - 身体運動解析と理解、0.1G センサ開発・評価、信頼性に関するデバイス・材料検討
- ・1mG センサによる実験
 - 姿勢からの難病解析、1mG センサ開発・評価
- ・1 μ G センサによる実験
 - 全身運動からの難病解析、1 μ G センサ開発・評価、センサ構造・プロセスへの材料適用検討
- ・新規アプリ検討実施

② 「診断」グループ

研究代表者: 三宅 美博 (東京工業大学情報理工学院情報工学系 教授)

研究項目

- ・市販モジュールを用いた基礎実験
 - 身体運動解析と理解、市販モジュール評価、診断内容とデータ解析手法の検討
- ・0.1G センサによる実験
 - 身体運動解析と理解
- ・1mG センサによる実験
 - 姿勢からの難病解析
- ・1 μ G センサによる実験
 - 全身運動からの難病解析

③ 「材料」グループ

研究代表者: 曾根 正人 (東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所 教授)

研究項目

- ・0.1G センサによる実験
 - 硬度 200HV・降伏強度 0.6GPa の金合金開発
- ・1mG センサによる実験
 - 硬度 300HV・降伏強度 0.9GPa の金合金開発
- ・1 μ G センサによる実験
 - 硬度 340HV・降伏強度 1.0GPa の金合金開発、センサ構造・プロセスへの材料適用の検討

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

該当なし