

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14641

研究課題名（和文）高出力アクチュエータ駆動パワーモジュールの集積化技術に関する研究

研究課題名（英文）Development on Integration Technology for Actuator Drive Module

研究代表者

上口 光 (Johguchi, Koh)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：30536925

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：人体の動作を補助するウェアラブルスーツの実用化に向けて、サーボアンブシステム全体の最適化、小型化を目指した。

ゲートドライバにソフトスイッチングと動的最適制御を適用し、EMIノイズを一桁削減と消費電力の低減を実証した。信頼性向上のため、温湿度センサ回路、センサ回路が安定動作のために低ノイズ降圧電源回路の設計も行った。またアクチュエータ駆動回路用MCUボード上で動作するファームウェア開発を行い高信頼性と小面積軽量化を実現した。

これらの成果でウェアラブルスーツにも十分適用可能な安定した駆動システムが、従来の者より小型軽量でできることを実証し、装着感を感じないウェアラブルスーツの実現の目途が立った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した高耐圧ドライバ回路の制御手法、ゲートドライバ設計は、ウェアラブルスーツへ応用のみでなく、より大電力、大電流を応用先としたSiCやGaNといったドライバデバイスを駆動する場合にも適用可能な技術である。また、本研究を通じて得られたセンサ回路、A/D変換回路設計技術は本研究のロボット制御にとどまらず、生体センシングなど医療応用や流量測定のような社会インフラのIoT化にも寄与できるものである。

研究成果の概要（英文）：In this project, a compact and optimized servo-system has been developed for realization of wearable robot suits.

By applying a soft-switching technique and dynamic optimal control method for gate driver circuit, EMI noise is suppressed up to x1/10 and the reduction of power dissipation is achieved. In addition, a temperature/humidity sensor and low-dropout regulator circuits are designed for high reliability.

A compact MCU board is also developed with customized firmware. These technologies contribute stable operation and downsizing and lightening of the proposed wearable robot suits system.

研究分野：集積回路設計

キーワード：高耐圧回路 集積化技術 パッケージ技術

### 1. 研究開始当初の背景

世界的に高齢化の進行が社会問題となっている。特に日本においては、平成 26 年 10 月の時点で 65 歳以上の高齢者人口が総人口の 26% を占めるまでになっており[1]、深刻な課題となっていた。そこで、介護・福祉分野での支援技術確立に向けて研究開発が行われているが、申請者が所属する信州大学でも「近未来体内埋め込み型歩行アシストサイボーグプロジェクト」を組織して、それらの課題を同調制御法と衣服のようなウェアラブルロボットを実現することで解決し、高齢者、患者の生活支援のために利用することを目指し、研究を行っている。申請者は、プロジェクトに平成 27 年 10 月より加わり、アクチュエータ制御ユニットの小型化という課題について取り組み、集積回路技術を積極的に利用することにより、この課題に挑戦していた。

従来のアクチュエータ制御ユニットは、背中に背負う形となっており、運用上の大きな制約になっていた。この制御ユニットは、バッテリー、CPU 基板と、サーボアンプ回路基板群から成っており、この内、サーボアンプ回路基板は制御軸分の制御基板が必要であるため、非常に大きな容積を占めていた。そこで申請者は、既に本研究に先行する検討として、この制御回路を最適設計し専用基板化することで、約 30% の大幅な容積削減を実現した。この制御ユニットは、パンツタイプの歩行アシストスーツに実装されていた[3]。しかしながら、市販回路モジュールを用いて専用基板化するだけではこの程度の小型化が限界であり、これ以上の小型化のためには高出力ドライバ回路の専用 IC (Integration Circuit : 集積回路) 化が必要不可欠であった。先行事例として、テキサスインスツルメンツ社やアレグロマイクロシステムズ社といった企業からワンパッケージ化された三相モータードライバ回路製品も販売されていたが、どの製品も最大出力電流が大きくても数 A 程度までであり[4]、今回目指す高トルク出力アクチュエータが必要とする数十 A といった電流出力を満たすものは存在していなかった。

#### [参考文献]

- [1] “平成 27 年版高齢社会白書”、内閣府
- [2] 歩行アシストスーツ“curara” (<http://www.shinshu-u.ac.jp/movie/2015/09/66479.html>)
- [3] 日本初の「穿くロボット」、ロボティックウェア curara® (クララ) 新パンツタイプ・試作 (<http://www.shinshu-u.ac.jp/topics/2016/07/-curara-3.html>)
- [4] DRV8332-HT (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8332-ht.pdf>)

### 2. 研究の目的

本研究では、更なるサーボアンプ回路の小型化を目指して、サーボアンプ回路のワンモジュール化に取り組んだ。また、課題を通じて高トルク出力アクチュエータを駆動する高耐圧ドライバ回路基板の小型モジュール集積化技術の確立を目指した。具体的には、ドライバ回路について専用チップを作成し回路の最適化を図る共に、それを効率よくパッケージ化する実装技術について研究し、パッケージや基板を含めた配線やアクチュエータのダイナミックな電氣的負荷変動をモデル化し、これら考慮した最適な高耐圧ドライバ回路の設計指針を確立することを目指とした。

### 3. 研究の方法

本研究でサーボアンプ回路のワンモジュール化を行う。パッケージを含めた配線の寄生成分、特にインダクタンス成分は、回路出力にリンギング、オーバーシュートなどの悪影響をもたらす。これまでの高耐圧 IC 設計者は、この予測できない状況に対応するために、例えば 2 倍の耐圧を持つトランジスタをドライバ回路として使用するという対策を採ってきた。しかしながら、ユニポーラ型の高耐圧トランジスタは、その構造的に、空乏層幅を増やすことによって耐圧を稼いでいるため、信頼性のために耐圧の高いトランジスタを採用すると、必然的にオン抵抗が増え、電力損失、及び、発熱が増えてしまうといった悪循環に陥る。ワンモジュール化により、アクチュエータ制御ユニットの小型化が図れるのみならず、アンプ回路をモータの直近に配置することができる。これにより電氣的な寄生成分(インダクタンス、抵抗、キャパシタンス)を削減し、大幅な効率改善が望める。また、インダクタンス成分を減少させ、且つ、配線成分とアクチュエータ負荷のダイナミックな変動を正確にモデル化、見積もることができれば、回路システムにフィードバックすることにより、リンギングを抑制する回路制御を行うこともできる。

また、システム全体の制御を司る MCU ボードとそのファームウェアも統合的に開発を行うことにより、システム全体の高信頼性と小型軽量化を実現する。

#### 4. 研究成果

初年度である2017年度は、第一段階としてアクチュエータ駆動回路設計のための高耐圧トランジスタ回路設計環境を構築し、アクチュエータドライバ回路と電源回路などその周辺回路の回路設計、レイアウト設計を実施した。また、トランジスタの発熱等を考慮したシミュレーション/評価環境を構築し、より精度の高い高耐圧集積回路の設計技術を確立し、パッケージ設計に適用可能とした。確立した設計環境を用いて、検討を行った結果、従来のブートストラップ回路を使用しNMOSトランジスタのみでドライバ回路構築する場合よりも、CMOSトランジスタを用いた方が、追加で必要となる降圧電源回路を含めて考えた場合、電力効率の面と実装面積の観点で有利であることが分かった。また、サーボ制御に必要な各種センサ回路に関しても回路設計を開始し、温度センサを試作、測定評価を行って集積化に向けた検討を実施した。また、周辺回路の第一段階検討として、制御コントローラとして使用するCPU回路の選定とOSを含めたソフトウェア最適化を行った。最新製造テクノロジーとマルチチップパッケージを利用したARMプロセッサを選定し、サーボ処理の高速化を図った。また、制御OSをリアルタイム化することにより、通信安定化を実現し、システム全体の信頼性向上を実現した。

2018年度には2017年度までに実施した、高耐圧CMOS技術を用いたアクチュエータドライバ回路と降圧電源回路を含めた周辺回路の回路設計回路シミュレーション、設計を基にして、更なる評価を行った結果、負荷変動やノイズなどに対して更なる最適化が必要であることが明らかになった。そこで、これら課題に対して、ゲートドライバを最適に動的制御することでこれが克服できる可能性を考えて、これを実現する回路について検討を行った。また、制御CPU、電源を含む周辺回路の試作、評価を行い、最新製造テクノロジーのARMプロセッサとリアルタイムOS、更に電源回路と通信回路を含む制御ボードをカスタムワンボードで設計、試作した。これらの回路をカスタムワンボード化することにより、従来のものと比較して、約1/3の容積を実現した。また、設計したボードを評価して、サーボアンプ回路との通信を安定化し、システム信頼性向上に寄与できることを実証した。

2019年度は2018年度までの成果を基にして、更なる評価を行った結果、負荷変動やノイズなどに対して最適化を行った。ゲートドライバにソフトスイッチングを適用し、且つ、タイミング制御を最適なものにすることにより、消費電力とノイズ双方が削減できることを示した。また、信頼性向上のため、温度管理のための温度センサ回路、センサ回路が安定動作するために必要な低ノイズ降圧電源回路の設計も行った。これらに加えて、前年度に引き続き、制御MCUボードの検討、開発も行った。前年度まで検討していた中国製のものが政情不安により入手困難、価格上昇となったためMCUボードは再検討を行った。その結果、MCUボードはコストと性能のバランスの観点から、Raspberry Pi4を採用することとした。回路を駆動するためのソフトウェア(ファームウェア)開発と通信ボードの再設計、試作も併せて行い、前年度までに得られたサーボアンプ回路との通信を安定化させるコードも組み込んだ。これらの成果でアクチュエータ制御回路をカスタムボード化し、高信頼性なシステムを小型に実現できることを実証した。

計画最終年にあたる2020年度は高耐圧回路の効率と安定性の向上に関する検討を行った。具体的には、2019年度に実施した、ゲートドライバにソフトスイッチングと動的な最適制御を適用し、EMIノイズを一桁削減と消費電力の低減が両立とできることを実証した。開発した制御手法、ゲートドライバ設計は、ウェアラブルスーツへ応用のみでなく、より大電力、大電流を応用先としたSiCやGaNといったドライバデバイスを駆動する場合にも適用可能な技術である。また、前年度に引き続き、信頼性向上のため、温湿度センサ回路のブラッシュアップ、センサ回路が安定動作するために必要な低ノイズ降圧電源回路の設計も行った。また、アクチュエータ駆動回路を制御するために制御MCUボード上で動作するソフトウェア(ファームウェア)開発と通信プログラムの改善も行い、誤動作が起きないような信頼性の高いシステムも構築した。

これらの研究成果により、ウェアラブルスーツにも十分適用可能な安定した駆動システムが、従来の者より小型軽量でできることを実証し、装着感を感じないウェアラブルスーツ実現に対する目途が立った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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<br>Kaga Yuta, Johguchi Koh  | 4. 巻<br>60                    |
| 2. 論文標題<br>A 180 nm CMOS smart ultrasonic water flow meter circuit for IoT smart society | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>SBBL05 ~ SBBL05 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.35848/1347-4065/abe99b                                     | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Yusuke Mitani, Kousuke Miyaji, Satoshi Kaneko, Takaharu Uekura, Hideya Momose, Koh Johguchi                | 4. 巻<br>57                    |
| 2. 論文標題<br>A compact perspiration meter system with capacitive humidity sensor for wearable health-care applications | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>04FF10 ~ 04FF10 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.7567/JJAP.57.04FF10  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>石倉佳汰、上口光                         |
| 2. 発表標題<br>ウェアラブル歩行補助ロボット用スマートアクチュエータ制御ユニット |
| 3. 学会等名<br>2021年電子情報通信学会総合大会                |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>坂田天来、狩野楓、百瀬英哉、上口光       |
| 2. 発表標題<br>ウェアラブル発汗計の小型化に向けた周辺回路開発 |
| 3. 学会等名<br>2021年電子情報通信学会総合大会       |
| 4. 発表年<br>2021年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>石倉佳汰、上口光                      |
| 2. 発表標題<br>歩行補助ロボット用制御ユニットの専用拡張ボードによる小型化 |
| 3. 学会等名<br>2021年第68回応用物理学会春季学術講演会        |
| 4. 発表年<br>2021年                          |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>坂田天来、狩野楓、百瀬英哉、上口光           |
| 2. 発表標題<br>小型ウェアラブル発汗量計測システムに向けた周辺回路開発 |
| 3. 学会等名<br>2021年第68回応用物理学会春季学術講演会      |
| 4. 発表年<br>2021年                        |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>加賀悠太、上口光               |
| 2. 発表標題<br>CMOS技術を用いた超音波式流量計測システム |
| 3. 学会等名<br>2021年第68回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年<br>2021年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuta Kaga and Koh Johguchi   |
| 2. 発表標題<br>A Smart Ultra-Sonic Water-Flow Meter with 180-nm CMOS Technology                     |
| 3. 学会等名<br>2020 International Conference on Solid-State Devices and Materials (SSDM2020) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Koh Johguchi  |
| 2. 発表標題<br>A Smart Hybrid Solid-State-Drive Storage System based on Nonvolatile Storage-Class-Memories -Device, Circuit Design and Architecture- |
| 3. 学会等名<br>3rd International Symposium on Devices, Circuits and Systems (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hassan Arafat, Ryohei Shimizu, Koh Johguchi        |
| 2. 発表標題<br>Hierarchial hybrid solid state drive               |
| 3. 学会等名<br>2018 IEEE Region 10 Conference (TENCON2018) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tera Sakata, Yusuke Mitani, Reiji Kaneko, Takaharu Uekura, Hidetoshi Taki, Hideya Momose and Koh Johguchi |
| 2. 発表標題<br>A CMOS integrated sweat monitoring system for medical applications  |
| 3. 学会等名<br>2nd International Symposium on Devices, Circuits and Systems (ISDCS2019) (国際学会)                           |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hassan Arafat S.A., Ryohei Shimizu, Koh Johguchi    |
| 2. 発表標題<br>Data management methods for hierarchical hybrid SSD |
| 3. 学会等名<br>2019年電子情報通信学会総合大会                                   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉井高嶺, 竹下潤, 甲田真己, 進士拓郎, 上口光                   |
| 2. 発表標題<br>ウェアラブルスーツ用アクチュエータ駆動回路/パッケージの省電力、コンパクト化に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>LSIとシステムのワークショップ2017                         |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yusuke Mitani, Kosuke Miyaji, Reiji Kaneko, Takaharu Uekura, Hideya Momose and Koh Johguchi                 |
| 2. 発表標題<br>A compact sweat monitoring system with CMOS capacitive humidity sensor for wearable health-care application |
| 3. 学会等名<br>2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017) (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>三谷勇介, 宮地幸祐, 金子怜史, 上倉宇晴, 百瀬英哉, 上口光 |
| 2. 発表標題<br>静電容量型湿度センサを用いたウェアラブル発汗量モニタリングシステム |
| 3. 学会等名<br>2017年電子情報通信学会信越支部大会               |
| 4. 発表年<br>2017年                              |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>清水峻平, アラファト・ハッサン, 上口光   |
| 2. 発表標題<br>階層型ハイブリッドSSDシステムの信頼性の比較 |
| 3. 学会等名<br>第65回応用物理学会春季学術講演会       |
| 4. 発表年<br>2018年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>三谷勇介, 宮地幸祐, 金子怜史, 上倉宇晴, 百瀬英哉, 上口光 |
| 2. 発表標題<br>180 nm CMOS技術を用いた発汗量観測システムの集積化    |
| 3. 学会等名<br>第65回応用物理学会春季学術講演会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>清水峻平, Hassan Arafat, 上口光     |
| 2. 発表標題<br>高速不揮発メモリを用いた階層型ハイブリッドSSDシステム |
| 3. 学会等名<br>2018年電子情報通信学会総合大会            |
| 4. 発表年<br>2018年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>三谷勇介, 宮地幸祐, 金子怜史, 上倉宇晴, 百瀬英哉, 上口光 |
| 2. 発表標題<br>静電容量型湿度センサを用いたコンパクト発汗量観測システム      |
| 3. 学会等名<br>2018年電子情報通信学会総合大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|                                 |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名<br>上口光                  |
| 2. 発表標題<br>発汗センサ の開発            |
| 3. 学会等名<br>第31回長野実装フォーラム (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2018年                 |



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|