

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02139

研究課題名（和文）人体装着ロボットのワイヤレス制御のための高感度人体通信型生体センサーの研究

研究課題名（英文）Study on High Sensitivity Human Body Communication Based Bio-Sensor for Wireless Control of Wearable Robot

研究代表者

王 建青 (WANG, JIANQING)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70250694

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、人体装着ロボット義手のワイヤレス制御で、耐電磁ノイズ型生体センサー部と人体通信部の一体化により、目的を達成した。まず、外部電磁界によるコモン・モード・ノイズが生体センサー信号への重畳機構をモード変換理論により解明し、95%のノイズ低減が実現できる自動ノイズキャンセリング回路を開発した。次に、人体通信の特徴を生かし、10～60MHz微弱無線帯を利用した広帯域インパルス・ラジオ型小型人体通信モジュールを開発し、人体上1メートルまで百万分の1以下のビット誤り率で、20Mb/sの高速通信を実現した。最後に、筋電を用いたロボット義手のワイヤレス制御を実験的に実証し、当初目標の達成を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢少子化社会において、ヒトの意図（筋電や脳波信号）に基づき、実際のヒトよりさらに力の要る仕事（産業ロボット）やヒトの手や指でできる仕事よりさらに精巧な仕事（精密ロボット、医療ロボット）をすることのできる人体装着型ロボットの普及が期待される。本研究は、筋電や脳波信号を用いて、人体装着ロボットをワイヤレスで制御するための耐ノイズ性高感度な人体通信型生体センサーの技術開発であり、その成果は、人体装着型ロボットのワイヤレス制御の要素技術の確立に大きく寄与し、産業界を始め、日常社会の生活品質の向上にも広い波及効果をもたらす。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to control a wearable robot hand wirelessly, and the purpose was realized by integrating a noise-resistant bio-sensor unit and a human body communication unit. First, we elucidated the mechanism by which common-mode noise generated by an external electromagnetic field is superimposed on the bio-sensor output signal by mode conversion theory, and developed an automatic noise canceling circuit that can achieve 95% noise reduction. Next, taking advantage of the characteristics of human body communication, we developed a wideband impulse radio type human body communication module using a weak radio band of 10 to 60 MHz, and high-speed communication of 20 Mb/s with a bit error rate of one millionth or less up to one meter above the human body was realized. Finally, the wireless control of a myoelectric artificial hand was experimentally demonstrated, and the usefulness of the developed technology was proved.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：ウェアラブルロボット ワイヤレス制御 人体通信 EMC 筋電/脳波センサー

## 1. 研究開始当初の背景

人間が筋肉を動かそうとすると、脳から出た指令が神経を伝わって筋肉に達し、数十ミリボルトの筋電信号が筋肉の膜上を伝わる。これを皮膚の表面に取り付けた電極センサーで検出し、それを利用して制御信号を生成すれば、人体装着ロボット義手を動かせるだけでなく、実際のヒトよりさらに力の要る仕事（産業ロボット）やヒトの手や指でできる仕事よりさらに精巧な仕事（精密ロボット、医療ロボット）をすることも可能となる。さらに、筋電位は脳の指令で発生されることを考えると、数 $\mu\text{V}$ の脳波を検出・識別し、それに基づく制御信号をロボットに送れば、脳で考えるだけでロボットを動かすことも近い将来実現できる可能性は十分にある。

人体装着ロボットは、主に人体表面で筋電または脳波信号を検出するセンサー回路部、信号を解析し、モーター制御に必要なパルス幅変調信号を生成する制御回路部、及びモーター駆動部から構成される。各モジュール間の信号伝送には多数のワイヤが用いられ、これらのワイヤは行動の不自由をもたらすだけでなく、電磁両立性(EMC)の観点からみても、ワイヤ自身がアンテナ的役割をすることが多く、電磁干渉による誤制御の発生要因の一つになる。このため、生体信号を利用した人体装着ロボットの制御には、高い耐電磁ノイズ性の有する生体信号センサー部と高速なワイヤレス人体通信部の一体化実現が望まれる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、図1中の「本研究の対象範囲」で示している耐電磁ノイズ型生体センサーと人体通信の一体化技術の研究開発である。即ち、人体装着ロボットを制御するための耐電磁ノイズ型生体信号センシング技術の確立； 高信頼・高速ワイヤレス制御のための広帯域人体通信技術の確立である。

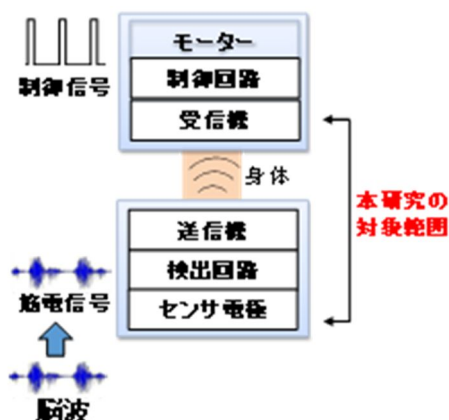


図1

## 3. 研究の方法

本研究では、この目的に向けて、次のように遂行した。

生体センサーの検出電極と人体との接触抵抗間のアンバランスが、コモン・モード・ノイズのディファレンシャル・モード・ノイズへのモード変換を引き起こし、生体センサーに電磁ノイズとして重畳される。このノイズ発生機構をまず理論的に定式化し、耐電磁ノイズ型生体センサーの設計指針を導出する。次に、このアンバランスを解消することのできるセンサー回路の構成を検討し、高感度で筋電及び脳波信号を検出できるセンサー回路を確立する。

人体装着ロボットのワイヤレス制御には、人体に沿った信号伝送は準静電界成分が支配的で、伝搬損失も低周波で小さい特徴に着目すれば、10～60MHz 微弱無線帯を利用する広帯域人体通信方式がワイヤレス制御に適している。多チャンネルの生体信号伝送に対応できる20Mbps以上の高速化・低遅延化の実現に目指し、通信品質、制御品質、対ノイズ耐性、回路規模の多角的視点から検討し、筋電または脳波信号を用いた人体装着ロボットのワイヤレス制御に適する変復調方式を試作と実験的検証により明らかにする。

さらに、人体装着ロボット特有な静電気放電 (ESD) による誤動作についてイミュニティ試験を実施し、提案方式の耐電磁干渉性の優位性を示すとともに、人体装着ロボットに対するイミュニティ試験法をまとめ、人体装着ロボット分野における EMC 試験法の国際標準化を先導する。

#### 4. 研究成果

人体装着ロボットの制御に必要な筋電または脳波信号の検出には複数対の電極が用いられる。しかし、検出電極の身体との接触状態が互いに異なり、検出電極と身体との接触抵抗値の間にアンバランスが存在する。図2に示すように、外部電磁界により人体と大地間に共通モード電圧  $V_c$  が生ずる。接触抵抗間のアンバランス ( $Z_{ea} \neq Z_{eb}$ ) により、 $V_c$  が後段の差動増幅器で消去できず、ディファレンシャル・モード電圧  $V_o$  に変換され、電磁ノイズとして生体信号に加わり、生体信号の検出を困難にする。

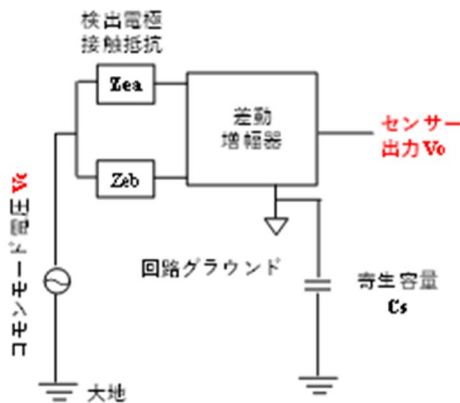


図2

この発生機構を理論的に検討し、差動増幅器前段両入力間の電圧のアンバランスを接触抵抗間のアンバランスの評価指標として用い、検出電極と差動増幅器の間に可変抵抗を挿入してアンバランスを自動キャンセルする回路を提案した。可変抵抗としては、デジタル・ポテショメータと CdS (Cadmium Sulfide) フォトレジスタの両方の回路を提案・試作し、いずれも共通モード・ノイズによる影響の低減に有効であることを確認した。例えば、図3の例に示すように、接触抵抗のアンバランスにより生体センサー出力に乗る電磁ノイズが増えるが、CdS を利用した接触抵抗間アンバランスキャンセル回路によって、95%のノイズ低減が実現された。これにより、日常的なノイズ環境においても、筋電及び脳波信号を精度よく検出できることを実証した。

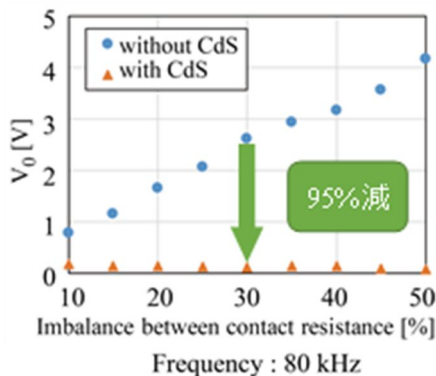


図3

また、人体装着ロボットの制御に適した脳波検出箇所 (センサーの配置箇所) の検討も行い、運動野に近い頭部表面で検出された脳波の  $\beta$  成分やその周辺周波数成分が筋電信号と高い相関を有することを見出した。

人体通信の特徴を生かし、10~60MHz 微弱無線帯を利用した広帯域インパルス・ラジオ型人体通信方式をワイヤレス制御に適用した。複数のパルスで1ビットを表すマルチパルス位置変調 (MPPM) を中心に変調方式を考案し、脳波信号の多チャンネル検出に対応できるように20Mbps の高速通信モジュールをFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて試作・開発した。

また、生体信号検出電極と人体通信送信電極を時分割で共用させ、送信アンテナ不要とする送信モジュールの回路構成を開発し、2cm 四方の送信モジュールの小型化を実現した。図4と図5は、筋電を用いてロボット義手を制御するブロック図及び実際にロボット義手をワイヤレスで動かす様子をそれぞれ示す。

検証実験の結果、20Mbps の高速通信が、人体上で1メートルまで  $10^{-6}$  以下の BER(Bit Error Rate)、 $10^{-5}$  以下の FER(Frame Error Rate)を物理層で達成できた。

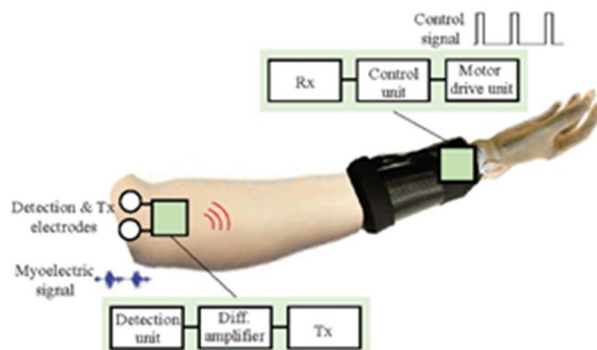


図4

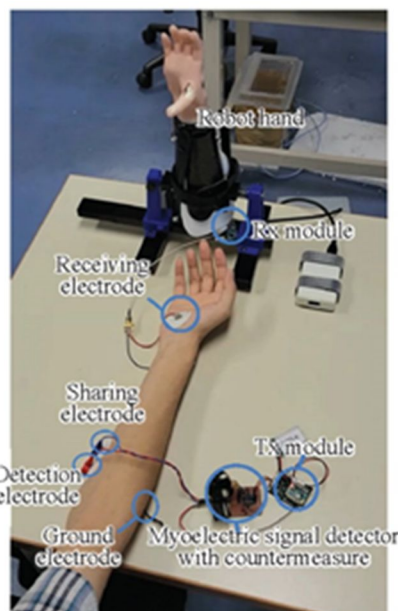


図5

また、開発したESDに対するイミュニティ試験系を用い、筋電信号を利用して制御するロボット義手へのESDイミュニティ試験を実施した。その結果、開発した本人体通信型生体センサーを用いれば、8kVのESD放電電圧において、従来の有線制御に対して20%の誤動作率の低減を実現した。

よって、本研究の実施を通じて、耐電磁ノイズ型生体センサーと人体通信の一体化が実現でき、当初の研究目的は達成された。図6に本研究の成果物を示す。通信モジュールは22mm×18mmで、生体センサー部を含めると44mm×33mmとなり、十分に人体装着可能である。

また、それに関連して多数の成果（招待論文1件、学術論文6件、国際会議基調講演2回、招待講演1回）も生み出された。

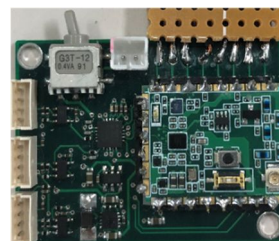


図6

下表に、本研究で開発した一体型センサーとその他の代表的近距離通信方式を用いたワイヤレスセンサーの特徴比較をまとめて示す。表から、本提案方式の優位性が伺える。

	Bluetooth	UWB	HBC
Frequency	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	10-60 MHz
Bandwidth	~ 1 MHz	~ 500 MHz	~ 50 MHz
Transmission speed	Not fast	Very fast	Fast
Transmission loss	Large	Very large	Small
Transmission mechanism	Radiation	Radiation	Electric field coupling
Antenna	Need	Need	Not need
Sharing of electrodes	Not possible	Not possible	Possible

今後は、人の意図によりロボットを制御することに目指し、本研究の成果をワイヤレス BMI (Brain Machine Interface) への拡張を目指して研究開発を進めていく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 J. Wang	4. 巻 E103-B
2. 論文標題 Wide band human body communication technology for wearable and implantable robot control (招待論文)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 628-636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2019HMI0001	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 M. Chen, J. Wang, D. Anzai, and G. Fischer	4. 巻 139
2. 論文標題 Common-mode noise reduction circuit design for biosignal acquisition system - in comparison with the DRL	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 657-662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.139.657	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
1. 著者名 W. Liao, K. Nagai, and J. Wang	4. 巻 62
2. 論文標題 An evaluation method of electromagnetic interference on bio-sensor used for wearable robot control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility	6. 最初と最後の頁 36-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TEMC.2019.2896974	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
1. 著者名 Y. Morinaga, K. Nagai, J. Wang, and D. Anzai	4. 巻 9, 4
2. 論文標題 Impact of electrostatic discharge on wearable robotic hand and improvement of immunity performance by wireless control	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine	6. 最初と最後の頁 37-45
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 -

1. 著者名 M. Chen, J. Wang, D. Anzai, G. Fischer, and J. Kirchner	4. 巻 20, 7140
2. 論文標題 Common-mode noise reduction in noncontact biopotential acquisition circuit based on imbalance cancellation of electrode-body impedance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20247140	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 W. Liao, K. Muramatsu and J. Wang	4. 巻 9
2. 論文標題 Path loss analysis and transceiver development for human body communication-based signal transmission for wearable robot control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 20127-20135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3055261	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 T. Iguchi, I. Kondo, J. Wang	4. 巻 13, 290
2. 論文標題 Wireless Control Combining Myoelectric Signal and Human Body Communication for Wearable Robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mi13020290	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15件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 J. Wang
2. 発表標題 Implant communication based on 10-60 MHz band impulse-radio technology
3. 学会等名 13th International Symposium on Medical Information and Communications Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Wang
2. 発表標題 Wide band human body communication technology for wearable robot control
3. 学会等名 3rd Int. Conf. on Innovations in Science, Engineering and Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 J. Wang
2. 発表標題 An impulse radio transceiver for body area communication and wireless robot control
3. 学会等名 2019 International Workshop on Electromagnetics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Chen, D. Anzai, J. Wang, and G. Fischer
2. 発表標題 Circuit design for common-mode noise rejection in biosignal acquisition based on imbalance cancellation of electrode contact resistance
3. 学会等名 EMC Sapporo & APEMC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagai, Y. Morinaga, D. Anzai, and J. Wang
2. 発表標題 Measurement of malfunction rate of wireless myoelectric artificial hand based on IEC61000-4-2
3. 学会等名 EMC Sapporo & APEMC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 T. Iguchi, I. Kondo, J. Wang, and D. Anzai
2. 発表標題 Design of human body communication module for wearable robot control
3. 学会等名 URSI GASS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Takahashi, M. Tanaka, S. Muroga, Y. Niiyama, and J. Wang
2. 発表標題 A Study on feature extraction of EEG signals related to opening and closing movements of the hand
3. 学会等名 9th International Conference on Materials Engineering for Resources (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋彰人、田中元志、室賀 翔、新山喜嗣、王 建青
2. 発表標題 運動想起時脳波の機械学習による手の開閉動作判別に関する一検討
3. 学会等名 第36回 エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 庄司怜雄、王 建青、安在大祐、田中元志
2. 発表標題 手を握る動作における脳波検出の基礎検討
3. 学会等名 第14回医用生体電磁気学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤育真、矢野佑典、王 建青、安在大祐
2. 発表標題 ウェアラブルロボット義手のワイヤレス化における生体信号検出電極と人体通信電極の共用化及び相互干渉対策
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井口太輔、王 建青、安在大祐
2. 発表標題 筋電義手への実装を想定したウェアラブル小型通信モジュールの設計と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 韓 忠逸、王 建青、田中元志、安在大祐
2. 発表標題 ウェアラブルロボット制御のための脳波測定の予備検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小池啓介、王 建青、安在大祐
2. 発表標題 ウェアラブル心電図信号におけるコモンモードノイズ低減に関する回路構成の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口耕平、田中元志、新山喜嗣、王 建青
2. 発表標題 右手動作時に生じる脳誘発電位の一計測
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村松宏軌、王 建青、安在大祐
2. 発表標題 ワイヤレス筋電義肢に適する広帯域人体通信型小型通信モジュールの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

名古屋工業大学 生体通信 & EMC 研究室 <a href="https://wlab.web.nitech.ac.jp/wp/">https://wlab.web.nitech.ac.jp/wp/</a>
---

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	田中 元志  (TANAKA MOTOSHI)  (50261649)	秋田大学・理工学研究科・准教授    (11401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	雨宮 不二雄  (Amemiya Fujio)		

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			
ドイツ	フリードリヒ・アレクサンダー 大学エアランゲン=ニュルンベルク			
中国	上海工程技術大学			