

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：94301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700203

研究課題名(和文) ヒト-ロボット相互作用の局在性に注目したセンサトポロジに基づく特徴抽出

研究課題名(英文) Feature extraction based on sensor topology on localized Human Robot Interaction

## 研究代表者

野田 智之(Noda, Tomoyuki)

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・専任研究員

研究者番号：30588661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では外骨格型ロボットなどをはじめとしたアシスト機器の安心・安全な制御を実現するため、ヒト-ロボット間の相互作用を考慮した情報処理および制御手法の開発を行った。生体情報による人の運動意図推定を行う手法に、センサ構造の中間的な表現を用いたモデル化の手法を導入することで、センサの欠損などが起こっても頑健に運動意図を推定することが可能で、これまで安定化しなかったアシスト力を安定に出力することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this project, for assured safety in controlling an exoskeleton robot as an assistive device, machine learning methods based on hypocrisies involving a problem of human-robot-interaction were developed. The result of this research would provide exoskeleton assistive systems with assured safety or continuously functioning during assistive situations. For example, in the problem of joint torque estimation using electromyography, utilizing learned intermediate structures of distributed sensors, the estimation of the motor intention of the user can be continuously functioning, even one sensor channel or its wire is broken.

研究分野：外骨格型ロボット

キーワード：外骨格型ロボット 生体信号 ヒトロボットインタラクション

### 1. 研究開始当初の背景

日本を始めとして、高齢化社会の到来で労働人口の減少傾向が世界規模で予測されており、生産性の維持・向上のためには人共存型のロボット技術を活用することが有効な手段である。これまでのロボットは工場においてオートメーションを支えてきたが、要求される仕様は位置決め精度などの制御の正確さや繰り返し動作の再現性が主な技術的な課題であり、人とロボットは隔離された状態が前提とされていた。しかし、人とロボットの接触などの物理的相互作用によりもたらされる特有の基本課題があり、実用化に向けた大きな問題である。

高齢者・要介護者支援・リハビリテーション分野においても人共存型ロボットの活用が有効である。このような場面では人の傍らで活動・協働するロボットだけでなく、より人に近く接触の多いロボットである装着型のアシスト技術「外骨格型ロボット」の需要が広がりを見せている。外骨格型ロボットを制御するためには人の運動意図を抽出する必要があるため、関節角度情報だけでなく脳情報・生体信号といった多チャンネルの分布型センサに基づくアシスト制御の研究が盛んに行われている。また、その出力先となる外骨格型ロボットのプラットフォームの開発や内部で使われるアクチュエータ・センサの研究も多く見られるようになってきた。

しかし、日本および世界的にみても、それらセンサ・アクチュエータのコンポーネントおよび制御技術が開発された後に、人とロボットの相互作用を含む系において、人とロボットの接触・相互作用自体が情報処理における特徴抽出や、アシスト制御にどのような影響を与え、どのように考慮すべきかの課題は、ほとんど取り組まれていない現状がある。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究ではいわゆる外骨格型ロボットのように、人とロボットが一体もしくは物理的に密にカップリングされる状態で、接触などの相互作用自体、さらに脳・生体信号への影響を考慮した上で、外骨格型ロボットを安心・安全に制御もしくは駆動することが目的である。

そのために、これまで考慮されていなかったヒトロボット間の相互作用を考慮した特徴抽出を基本問題設定として、特に相互作用は局在していることに注目し、相互作用を考慮したアシスト力の制御課題に取り組む。

より具体的には、以下のとおりである。

- (1) 携帯型脳情報計測機器として脳波計測およびそのデコーディングを対象とし、ヒトロボット間の相互作用がある中で、脳情報に基づき運動意図が抽出できるかを検証
- (2) 生体信号に基づく人の運動意図の特徴抽出

出仮定において、外骨格型ロボットのアシスト力がヒトロボット間の相互作用もしくは運動意図抽出に与える影響もしくは影響を考慮した運動意図抽出とアシスト制御の実現

- (3) ヒトロボット間の物理的相互作用によって生体信号をはじめとした分布型多チャンネルセンサの破損・断線・不良・欠損などに頑健な特徴抽出と人の運動意図推定の手法の開発

の3点を目的とする。

### 3. 研究の方法

人と物理的に接触するようなロボットにおいては、ロボット側にも人に備わっているような、ある種の柔軟性が必要である。特に、本研究の実験系で使用する外骨格型ロボットプラットフォームは、関節に柔軟性がある点が特徴である。大きな力を出しつつも軽量で正確に力を制御することが可能で、柔軟性・バックドライバリティを失うことの無いアクチュエータ技術を採用する。より具体的な方法論として、柔軟アクチュエータである空気圧人工筋肉と小型低減速ギアモータとの組み合わせ(空電ハイブリッドアクチュエータ)によって駆動する外骨格型ロボット、およびその制御技術を基盤とした実験系により、本研究の実験系を開発・構築する。それぞれの研究項目における実験方法は以下のとおりである。

- (1) 脳波計測情報のみから、右手もしくは左手の運動をデコード(脳波を見て現在動かしているのが右手なのか左手なのかを言い当てる)課題において、被験者の膝がランダムに駆動することで、ヒトロボット間の物理的相互作用が発生している中でも、上記の問題が解けるのかを実験的に実証
- (2) 生体信号に基づくヒトの運動意図抽出として、筋の活動を計測するセンサ(表面筋電位計)の情報から人の関節トルクを推定し、推定した関節トルクからどのように運動意図を抽出し、外骨格型ロボットのアシスト力に反映・決定すべきかの仮説を立て、実際に運動アシストを行う実験を実施
- (3) 上記のような筋電位計測において身体の表面に分布するアクティブ電極が物理的相互作用(接触や圧迫)によって断線もしくは発汗によるショートする可能性がある中で、計測信号の異常を検出するとともに異常なセンサを特定し、その影響を取り除いた特徴抽出を行う手法を開発し、(b)と同様の関節トルク推定が少なくと

も1chが実際に異常状態になった場合も、外骨格型ロボットのアシスト制御が機能し続けるかを検証する実験を実施する。

以上の3つの実験系を開発・構築した。特徴としては、それぞれの実験プロトコルにおいて、実際にヒトロボット間の相互作用が発生する(もしくは想定した)状況での特徴抽出および制御の課題になっていることである。さらに、実装される手法はヒトロボット間の相互作用が局在するという仮説に基づく手法である。

本研究では、外骨格型ロボットの制御を上記のヒトロボット間の相互作用を考慮した特徴抽出の仮説に基づいて実施し、うまく制御もしくは認識課題が動作するかを検証することで、仮説の妥当性を実験的に示す。

#### 4. 研究成果

以下に、(1)~(3)のそれぞれの研究項目における主要な成果を以下に抜粋する。

- (1) 脳波に基づき実施した運動の種類を運動アシストが行われている状況で推定することが可能な機械学習手法およびその実験系を開発した。特に特徴量選択の際に、識別に有効な特徴量を選択する手法を組み込むことで、ヒトロボット間相互作用の影響が小さい特徴量を選択していることが特徴である。より具体的には、被験者の膝がロボットによって受動的に動かし続けられていても、被験者が行った運動の種類を脳波から確率的に判別可能であることを実証した。この成果は、例えば外骨格型ロボットによって、人が歩行アシストをされている時にでも、歩行を止めるなど運動意図抽出が可能であることを示唆しており、これまで脳波デコーディング技術のほとんどがアシスト状態において実施されていない点を鑑みると重要な研究成果である。この成果は国際学術雑誌1件などに採択された。
- (2) 筋電位計測信号に基づき関節トルクを推定し、推定トルクに基づいてロボットのアシスト量を定める場合、アシスト力の影響を考慮しなければならない。アシスト力によってタスクを遂行する力に対して、筋が発生する力は弱まっているはずである。従来研究では、この点が見落とされており、ロボットとヒトの間で振動的な挙動が観測される不安定化の要因となっていた。この仮説に基づき、アシスト量を調整する手法を実装することで、安定に外骨格型ロボットのアシスト力が発生可能となった。この成果は、最大級のロボット系国際会議に採択された。
- (3) 筋電位計測がヒトロボット間の相互作用

によって断線・ショートしてしまう情報欠損状態でも、機能しつづける推定手法の実現が可能となった。異常検出の機械学習の手法の特徴として、ヒトの脳に見られるホムンクルスのようなセンサ構造の中間表現を学習しており、筋の協調運動の構造パターンを学習していることに相当する。この構造パターンから検出のずれを異常検出として判定する手法である。異常状態においてもロボットが機能しつづけることを示しており、安心・安全な外骨格型ロボットの実現に向けた要素技術として重要な成果である。この成果は国際学術雑誌1件などに採択された。

さらに、上記の実験系および制御系の開発論文として、その他にも国際会議および国際学術雑誌に採択されている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

[1] Jun-ichiro Furukawa, Tomoyuki Noda, Tatsuya Teramae and Jun morimoto, "Fault Tolerant Approach for Biosignal-based Robot Control", *Advanced Robotics*, Vol. 29, No. 7, pp. 505-514, 2014, DOI: 10.1080/01691864.2014.996603, 査読有

[2] Jun-ichiro Furukawa, Tomoyuki Noda, Tatsuya Teramae, Jun Morimoto, An EMG-driven Weight Support System with Pneumatic Artificial Muscles, *IEEE Systems Journal*, pp.1-9, 2014, 10.1109/JSYST.2014.2330376, 査読有

[3] Giuseppe Lisi, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto, Decoding the ERD/ERS: influence of afferent input induced by a leg assistive robot, *Frontiers in Systems Neuroscience*, Vol.8, Article 85, pp1-12, May, 2014, 10.3389/fnsys.2014.00085, 査読有  
<http://dx.doi.org/10.3389/fnsys.2014.00085>

[学会発表](計 16件)

[1] Jun-ichiro FURUKAWA, Tomoyuki NODA, Tatsuya Teramae, Jun MORIMOTO, Estimating Joint Movements from Observed EMG Signals with Multiple Electrodes under Sensor Failure Situations toward Safe Assistive Robot Control, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2015)*, Seattle (USA), May 26-30th,

2015. 査読あり

[2] Corinne Doppmann, Barkan Ugurlu, Masashi Hamaya, Tatsuya Teramae, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto, Towards Balance Recovery Control for Lower Body Exoskeleton Robots with Variable Stiffness Actuators: Spring-Loaded Flywheel Model, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2015), Seattle (USA), May 26-30th, 2015. 査読あり

[3] Tomoyuki Noda, et al., Development of an Upper Limb Exoskeleton Powered via Pneumatic Electric Hybrid Actuators with Bowden Cable, in Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2014), Chicago, USA, Sept, 2014. 査読有

[4] Tomoyuki Noda and Jun Morimoto, Nested Chamber Design for Modularized Pneumatic Artificial Muscle Transmitted via Bowden Cable, IEEE/RSJ IROS2014 Actuator Workshop, Chicago, USA, Sept, 2014. 査読有

[5] Y Nakata, T Noda, J. Morimoto, H. Ishiguro, Design of an Integrated Pneumatic-Electromagnetic Hybrid Linear Actuator, IEEE/RSJ IROS2014 Actuator Workshop, Chicago(USA), Sept, 2014. 査読有

[6] 石原弘二, 寺前達也, 野田智之, 森本淳, “特性の異なるアクチュエータを持つロボットのためのモデル予測制御”, 第32回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 九州産業大学(福岡県), 2014. 査読なし

[7] T TERAMAE, T NODA, J MORIMOTO, Optimal control approach for pneumatic artificial muscle with using pressure-force conversion model, IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2014) Proceedings, pp.4792-4797, Hong Kong(China). 査読有

[8] Tomoyuki Noda, Jun-ichiro Furukawa, Tatsuya Teramae, Sang-Ho Hyon, Jun Morimoto, “An Electromyogram based Force Control Coordinated in Assistive Interaction”, IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2013), WeC6.4, Karlsruhe, Germany, May, 5th-10th, 2013 査読有

[9] Sang-Ho Hyon, Takuya Hayashi, Atsutoshi Yagi, Tomoyuki Noda, Jun

Morimoto, Design of hybrid drive exoskeleton robot XoR2, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), pp.4642-4648, 東京ビッグサイト(東京都), Nov. 3rd-8th, 2013. 査読有

[10] T.Noda et al., Brain exoskeleton-robot interface for rehabilitation assistance, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), 東京ビッグサイト(東京都), Nov. 3rd-8th, 2013. (Invited talk)

[11] T.Teramae, T.Noda, S. Hyon, J. Morimoto, Modeling and control of a pneumatic-electric hybrid system, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 東京ビッグサイト(東京都), Nov. 3rd-8th, 2013.

[12] 古川 淳一郎, 野田 智之, 森本 淳, 表面筋電図の冗長性を利用した口バスタな力フィードバックのためのトルク推定, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 9月4日~6日, 首都大学東京(東京), 2013.

[13] Tomoyuki Noda, Norikazu Sugimoto, Junichiro Furukawa, Masa-aki Sato, Sang-Ho Hyon, Jun Morimoto, “Brain-Controlled Exoskeleton Robot for BMI Rehabilitation”, IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robotics(Humanoids2012), pp.21-27, 大阪産業創造館(大阪), Nov 29th- Dec 1st, 2012 査読有 (IEEE-Humanoids2012 Award for best paper Nomination finalist 受賞, Dec 1<sup>st</sup>, 2012.)

[14] Tomoyuki Noda, Sang-Ho Hyon, Jun Morimoto, Tendon-spring model of pneumatic-electric hybrid actuator for exoskeleton robot, 第30回日本ロボット学会学術講演会 国際セッション, 札幌コンベンションセンター(北海道), 9月18日, 2012.

[15] 野田智之, 古川淳一郎, 寺前達也(, 玄相昊, 森本 淳, アシストロボットのインタラクションを考慮した筋電位に基づく力制御, 第18回ロボティクスシンポジウム, 古窯(山形) 3月15日, 2013. 査読有り

[16] 古川 淳一郎, 野田 智之, 寺前 達也, 森本 淳, EMGを用いたヒト運動中の関節トルク推定, 第18回ロボティクスシンポジウム, 古窯(山形) 3月15日, 2013. 査読有り

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

[1] 特願 2014-109213、野田智之、仲田 佳弘、石黒浩、森本 淳、権利者：(株)国際電気通信基礎技術研究所・国立大学法人大阪大学、“アクチュエータ装置、ヒューマノイド型ロボットおよびパワーアシスト装置”，2014 年 5 月 27 日出願、国内

取得状況（計 0 件）

6．研究組織

(1)研究代表者

野田智之（NODA, Tomoyuki）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・専任研究員

研究者番号：30588661