

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 10 月 2 日現在

機関番号：94301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820090

研究課題名(和文)筋特性を考慮した最適制御と筋電フィードバックによる外骨格型ロボットのアシスト制御

研究課題名(英文) Assist control using EMG based optimal control approach for exoskeleton robot

研究代表者

寺前 達也 (Teramae, Tatsuya)

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・研究員

研究者番号：60626828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：人とロボットが一体となっているシステムでは従来のアシスト制御手法では人の能動性がタスク中に変化する場合に適応できないという問題があった。そこで本研究では人の能動性の変化に対して頑強な外骨格ロボットのアシスト制御のために最適制御手法とEMGによるトルク推定を組み合わせた制御手法を開発した。

検証としてロボットが主導的に動く場合、人が主導的に動く場合、人とロボットが協調して動く場合の3条件において軌道追従タスクを行い、各条件で安定してタスクを達成でき、従来法に比べ追従精度が向上した。また人の状態が受動から能動へシームレスに移行した場合にも提案手法は適応できることを確認した。

研究成果の概要(英文)： Since, in human robot system, conventional assist control approach can not adapt to human activity change during task, we propose control method using EMG based optimal control approach to achieve controller that has robustness for change of human activity.

To verify control performance of proposed method, we set trajectory tracking task and 3 different conditions : Robot dominant, human dominant, human robot cooperation. In results, proposed method could stably achieve the task in 3 conditions , and tracking performance of proposed method was improved compared with conventional method. Moreover, proposed method could adapt to human activity when seamlessly changes during trial.

研究分野：ロボティクス

キーワード：最適制御 筋電位 外骨格ロボット Assist-as-needed control

1. 研究開始当初の背景

これまでのロボットによるアシスト制御手法は人の現状態に基づきアシスト力を算出している。たとえば一般的な筋電位 (ElectroMyoGraphy:EMG) のフィードバック制御では筋電から関節トルクや関節角などを推定し、推定値に基づきロボットトルクを決定する。マスタースレーブロボットや義手など人とロボットが独立している場合、従来手法は有用であり、多くの研究で用いられている。しかしながら、外骨格ロボットのような人とロボットが一体となるシステムでは、人はロボットのトルクによって影響を受けて動作を変え、ロボットもまた人のトルクによってトルクが変化するため、現状態に基づき一定のフィードバックゲインによってロボットトルクを決定する手法では必ずしも適切なロボットトルクは実現できない。たとえば、あるタスクを達成するために必要なトルクに対して試行中にヒトが出力するトルクが大きく変化する場合、一定のフィードバックゲインではロボットトルクが過剰になったり不足したりするという状態が発生する。

ここで、人とロボットが一体となったシステムにおいてロボットのトルクを人のトルクに合わせて適切に決定する制御戦略の1つに Assist-as-needed (AAN) 制御がある。制御則は

$$\tau^r = \tau^d - \tau^h$$

となり、人が出力しているトルクに対して不足したトルクをロボットが出力するという戦略である。 τ^r はロボットトルク、 τ^d は目標トルク、 τ^h は人のトルクである。従来法[1], [2], [3]では目標トルクをPD制御によって決定し、人のトルクは Gaussian radial basis functions やカルマンフィルターによって推定している。従来法では試行ごとに追従誤差に基づきPDゲインを調整することで人の状態が Passive と Active な場合でシステムが適応できることを示した。しかしながら、従来法の問題点は人のトルク推定がスナップショットである点とPDゲインの適応には5試行程度必要である点となる。したがって、試行中にヒトが受動から能動に変化する場合に従来法は適応できない。

2. 研究の目的

本研究では最適制御手法とEMGフィードバック制御を用いたアシスト制御手法を提案する(図1)。状態フィードバックゲインをある目的関数に基づき最適化する最適制御手法を用いることで人の状態に合わせてゲインを最適化することができる。さらに現時刻からある区間において最適化するモデル予測制御 (Model Predictive Control:MPC) を用いることで常に最適なゲインが調整されるため、従来法で問題であった試行中における人の能動性の変化に適応が可能となる。しかしながら、人-機械系における最適制御

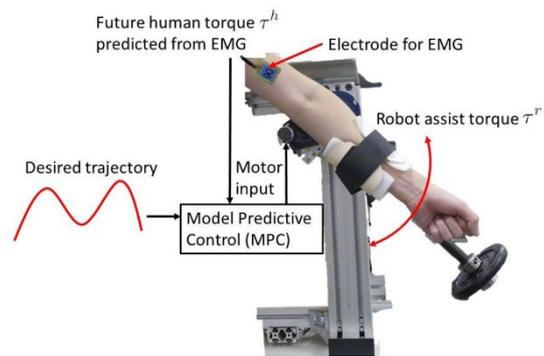


図1: 提案手法の概要

手法では人とロボットのモデル構築に、使用者各人がロボットを着用した状態で多くの訓練データを計測する必要があり、実用的ではない。そこで、本研究では人の出力トルクを線形のEMGモデルによって推定することで、使用者の個人差に関するパラメータをEMGモデルのキャリブレーションによって考慮する。EMGモデルは線形であることからキャリブレーションに必要な訓練データは少量となる。また、従来EMG信号はアーチファクトや人の意思による不確実性を含むため、EMGのフィードバックゲインが高い場合、システムが不安定になる可能性があるが、最適制御手法の高いロバスト性によってシステムの安定性を確保する。したがって、本研究では最適制御手法とEMGを組み合わせることによって、人の能動性を自由に変化できるアシスト制御手法を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究で対象とするシステムを図2に示す。1自由度の外骨格ロボットを用いる。ロボットの逆動力学モデルは

$$I\dot{\theta} + h(\dot{\theta}) + g(\theta) = \tau^d$$

となり、 I は慣性項、摩擦項は

$$h(\dot{\theta}) = D\dot{\theta} + \Gamma_1 \tanh(\Gamma_2 \dot{\theta})$$

で、動摩擦と静摩擦を含んでいる。 $g(\theta)$ は重力項である。EMGから推定した $\hat{\tau}^h$ を加え、ロボットトルク τ^r について解くと

$$I\dot{\theta} + h(\dot{\theta}) + g(\theta) - \hat{\tau}^h = \tau^r$$

となり、上式からMPCによって τ^r を最適化する。MPCにおける目的関数は

$$r(x_t, u_t) = w_x \|x_t - x_t^d\|^2 + w_m u_t^2$$

となる。 x は $[\theta \ \dot{\theta}]^T$ で、 x_t^d は目標の状態を示す。

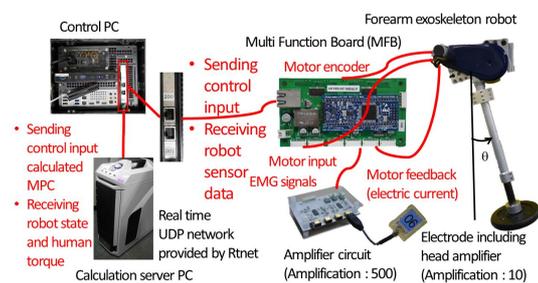


図2: ロボットシステムの概要

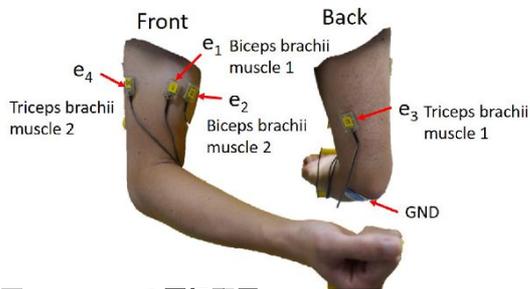


図 3 : EMG の電極配置

w_x と w_u は目的関数の重み係数である。推定区間は $0.2s$ でこれは EMG が実際の人の動作より近似値で $0.2s$ 早く観測されるためである [4]。

本研究では提案手法の制御性能を検証するため、従来法として [1] のカルマンフィルターを用いた AAN 制御手法と比較実験を行う。

EMG の測定箇所を図 3 に示す。EMG から人のトルクを推定する線形式は

$$\tau_{t+k}^h = Ae_t + b$$

である。A と b は係数で 40 秒間の軌道追従タスク時の逆動力学モデルから得られた τ^d と EMG 信号 e から最小二乗法によって同定される。e は

$$e = [e^1 \ e^2 \ e^3 \ e^4]$$

である。

検証実験では図 1 に示すように肘関節を対象に軌道追従タスクを行う。タスクは振幅 20 度、周波数 0.1Hz の正弦波で、被験者はモニターに映し出された目標軌道と現在の関節角を見ながらトラッキングを行う。

ここで、AAN 制御における制御性能を検証するため、人の能動性が異なる 3 条件を設定した。

1) Robot dominant (RD) : 被験者は力を抜いた状態でロボットが主導で追従を行う。

2) Robot-human cooperation (CO) : 被験者はロボットと協調して追従を行う。

3) Human dominant (HD) : 被験者が可能な限り主導的に追従を行う。

まず、1 名の被験者で 1) ~ 3) の条件でタスクを 5 試行実施し、提案法が人の能動性の変化に適応できることを検証する。また、1) 3) の条件を 6 名の被験者で実施し、制御性能が個人に依存しないことを検証する (検証 1)。

つぎに、従来のカルマンフィルターを用いた AAN 制御手法との比較を行い、提案法の制御性能を検証する (検証 2)。

最後に、0.5, 1.0, 1.5Hz を混合した正弦波を用いた軌道追従タスクを行い、複雑かつ高周波な軌道においてロボットの有り無しで追従誤差を比較し提案法の制御性能を検証する (検証 3)。

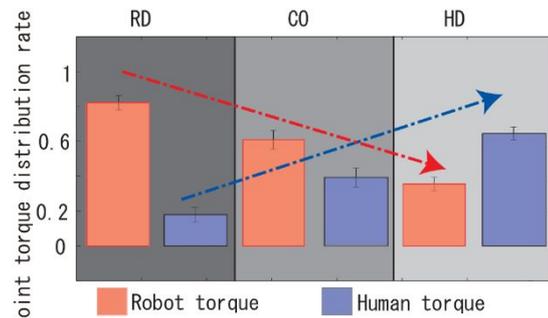


図 4 : RD, CO, HD におけるロボットトルクと人のトルクのトルク配分

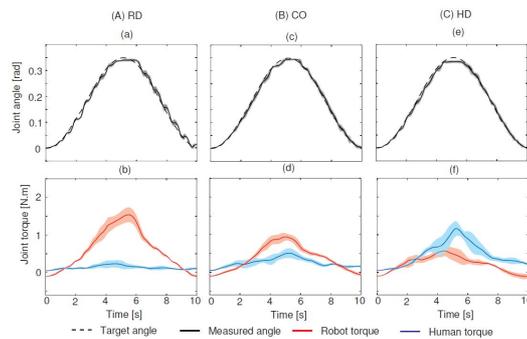


図 5 : 3 条件における軌道追従結果 (関節角およびトルク)

4. 研究成果

検証 1 の結果を図 4, 5 に示す。図 4 は 3 つの条件におけるロボットトルク (赤棒) と人のトルク (青棒) のトルク配分を示している。各棒とエラーバーは各条件の 5 試行分の平均値と標準偏差を示している。図 4 より RD, CO, HD の順にロボットトルクは減少し、人のトルクは増加していることがわかる。これはロボット主導から人主導へと変化できていることを示している。また、図 5 に各条件における関節角とトルクを示す。各線が 5 試行の平均値、色付けしたエリアは標準偏差を示す。各条件で目標軌道に追従ができていることがわかる。また、6 名の被験者における追従誤差は RD が 3.1×10^{-2} 、HD が 1.5×10^{-2} となり、両状態において追従タスクができていることを検証できた。

検証 2 の結果として図 6 にある HD コンディションにおいてチューニングしたパラメータを RD コンディションに適用した際の従来法の追従結果および RD でチューニングしたパラメータを HD に適用した結果を (a), (b) に示す。また (c) に提案手法との追従誤差の比較を示す。この結果より、適切なゲインを使用しない場合、従来法は追従誤差が大きくなり、システムが不安定となる場合があることが

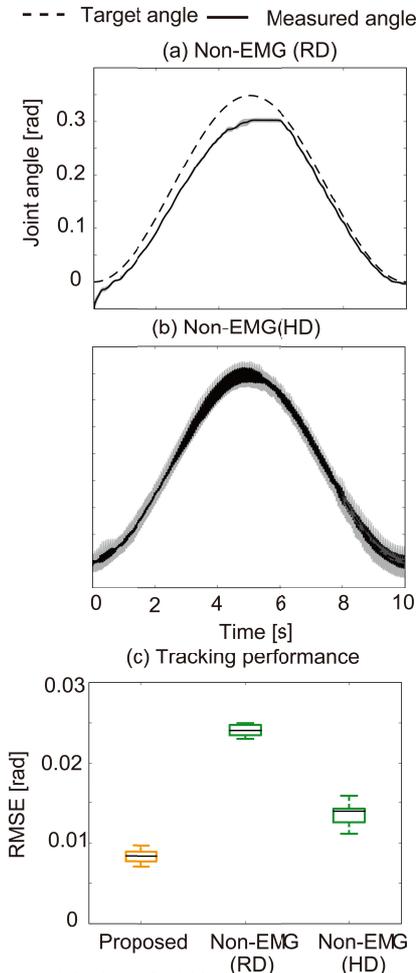


図 6：従来法の追従結果および提案手法との追従誤差比較。

わかる。一方、提案手法は同一の目的関数によって各コンディションで目標軌道に追従が可能である。

次に検証3の結果を図7に示す。ロボットアシスト有り無しの関節角とロボットアシスト有りのトルク、ロボットアシスト有り無しの追従誤差のバースプロットを示している。図7よりロボットのアシストがない場合には軌道追従が十分にできないタスクにおいて、提案手法でアシストすることによって追従誤差を有意に改善できている。また(b)より3秒で人とロボットのトルク配分が逆転しており、人の能動性が1試行中に変化していることがわかる。この結果は提案手法が人の能動性に対してオンラインで適応できていることを示している。

以上の結果より、本提案手法による AAN 制御は各条件下において正しく機能しており、従来法に比べ制御性能が向上していることを確認できた。

参考文献

[1] A. U. Pehlivan, D. P. Losey and M. K. O'Malley, Minimal Assist-as-Needed Controller for Upper Limb Robotic Rehabilitation, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 32, NO. 1, pp. 113-124, 2016.

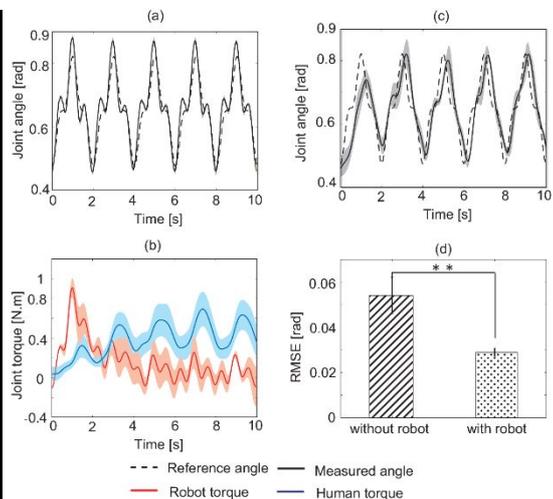


図 7：複雑な軌道における提案手法の追従結果およびアシスト無しの場合との比較

[2] A. U. Pehlivan, F. Sergi and M. K. O'Malley, A Subject-Adaptive Controller for Wrist Robotic Rehabilitation, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 20, Issue:3, pp. 1338-1350, 2014.

[3] C. Bower, H. Taheri and E. Wolbrecht, Adaptive Control with State-Dependent Modeling of Patient Impairment for Robotic Movement Therapy, IEEE Int Conf Rehabil Robot. 2013 June, pp. 1-17, 2013.

[4] D. A. Winter, Biomechanics and Motor Control of Human Movement Second Edition, A Wiley-Interscience Publication John Wiley and Sons, Inc., 1990.

5. 主な発表論文等

(〔雑誌論文〕(計 1 件))

[1] Jun-ichiro FURUKAWA, Tomoyuki NODA, Tatsuya TERAMAE, Jun MORIMOTO Human movement modeling to detect bio-signal sensor failure for myoelectric assistive robot control IEEE Transactions on Robotics 査読あり 10.1109/TRO.2017.2683522 2017

[2] Tatsuya Teramae, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto EMG-based Model Predictive Control for Physical Human-Robot Interaction: Application for Assist-as-Needed Control, IEEE Robotics and Automation Letters 査読あり 10.1109/LRA.2017.2737478

(〔学会発表〕(計 5 件))

[1] Jan Oskar BRINKER, Takamitsu MATSUBARA, Tatsuya TERAMAE, Tomoyuki NODA, Tamin ASFOUR, Jun MORIMOTO Walking pattern prediction

with partial observation for partial walking assistance by using an exoskeleton system IEEE/RAS-EMBS International Conference on Rehabilitation Robotics(ICORR2015) 2015/8/11~8/14 Nanyang Technological Univ.(Singapore)

[2] Tatsuya TERAMAE, Hiroshi IMAMIZU, Ayumu YAMASHITA, Robert HASCHKE, Risto KOIVA, Helge RITTER, Florentin WOREGOTTER, Jun MORIMOTO Prediction of learning score from resting-state fMRI in a task requiring combination of the extrinsic and intrinsic coordinates 第 38 回日本神経科学大会 (Neuroscience2015) 2015/7/28~7/31 神戸国際会議場、神戸国際展示場 (兵庫県・神戸市)

[3] Jun-ichiro FURUKAWA, Tomoyuki NODA, Tatsuya TERAMAE, Jun MORIMOTO Estimating joint movements from observed EMG signals with multiple electrodes under sensor failure situations towards safe assistive robot control IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2015) 2015/5/26~5/30 Seattle (USA)

[4] 野田智之、寺前達也、森本淳 入れ子構造を有する空気圧人工筋モジュールによるワイヤ引き駆動装置 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI2015) 2015/5/20~5/22 中央電気倶楽部 (大阪府・大阪市)

[5] 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 2014/9/4~9/6 九州産業大学 (福岡県・福岡市)

[6] Tatsuya Teramae, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto EMG-based Model Predictive Control for Physical Human-Robot Interaction:Application for Assist-as-Needed IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System 2017/9/24~9/28 (Vancouver, BC, Canada)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：運動学習支援装置および運動学習支援方法

発明者：寺前達也、森本淳、野田智之

権利者：株式会社国際電気通信基礎技術研究所

種類：特許

番号：特願 2017-148882

出願年月日：平成 29 年 8 月 1 日

国内外の別：国内

取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

アウトリーチング活動

[1] 野田智之、寺前達也、高井飛鳥、古川淳一郎、森本淳、岩根史明、沼田椋太郎 BMI リハビリテーションおよび日常生活支援のための上肢・下肢外骨格ロボットの展示およびデモンストレーション 第 53 回日本リハビリテーション医学会学術集会・第 2 回リハビリテーション先端機器研究会 2016/6/9~6/12 国立京都国際会館 (京都府・京都市)

[2] 森本淳、野田智之、寺前達也 脳情報に基づく上下肢用動作支援アクチュエータの展示およびデモンストレーション 第 29 回日本医学会総会 2015 関西 2015/4/11~4/13 国立京都国際会館 (京都府・京都市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺前 達也 (TERAMAE, Tatsuya)

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：60626828

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

該当なし