

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420208

研究課題名(和文) 作業者の姿勢と作業方向を考慮した動特性変化のモデル化とパワーアシスト制御

研究課題名(英文) Modeling of the characteristics of the human operator and control of power assist systems considering task direction and operator's posture

研究代表者

稲葉 毅 (Inaba, Takeshi)

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号：90242271

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、重量物の運搬・組み付けや加工作業などを支援するパワーアシストシステムを、作業者にとって使いやすくするための新しい制御手法を開発することを目的とした。まず、機械側から見た作業者の特性である手先インピーダンスが、作業者の姿勢と作業方向によって大きく変化することと、それに応じて機械側の特性を適切に変化することで操作性が向上することを明らかにした。さらに、上腕の表面筋電位に基づき、機械側特性を自動調整するアルゴリズムを考案し、その有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：This study is focusing on developing new design method of the control system for power assist systems considering operability. It is confirmed that the operator's hand impedance varies according to his posture and that the operability can be improved by adjusting the parameters of the system. Moreover, the iterative method for adjusting the parameters based on the surface electromyogram is developed and its effectiveness is verified.

研究分野：制御工学，人間 - 機械協調システム

キーワード：パワーアシスト 手先インピーダンス 表面筋電位

1. 研究開始当初の背景

工場での自動車組み立てラインなどにおいて、タイヤやドア、フロントウィンドウなど重量物の運搬や組み付けは重労働であると同時に作業精度を要求される。図1は簡単なパワーアシストシステムの例であり、タイヤを目標位置まで移動させて組み付ける作業を想定している。このような作業においては、目標位置まで軽快に素早く移動させるだけでなく、目標位置付近で精度よく位置決め作業ができることが要求される。単に小さな操作力で済むように（軽く感じるように）パワーアシストするだけでは、移動は楽になるが位置決め作業時にかえって手先が震えて安定せず、作業性が損なわれることがある。このような問題に対しては、人間から見た機械側の動特性を変化させる手法が効果的である。特に機械側の粘性特性の大きさが作業性に大きく影響することが知られており、手先を目標位置まで近づける過程では粘性を小さめに、目標位置の近辺では粘性を大きめにすることで作業性を高められる。現在、この粘性変化パターンをどのように決定すべきかについて、多くの研究者が取り組んでいる。

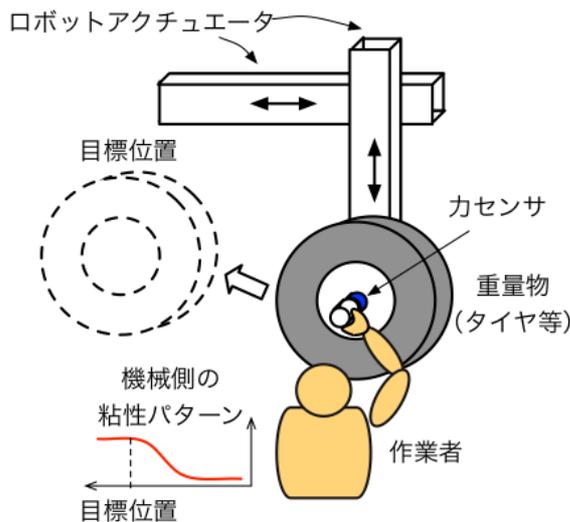
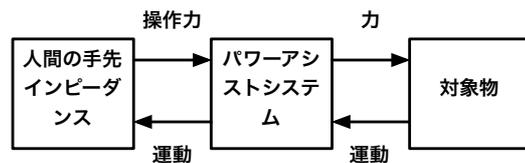


図1：パワーアシストシステムの例

申請者らはこの問題に対し、パワーアシストシステムによる作業を人間と機械からなる手動制御系とみなした検討を続けてきた。

図2にあるように、人間と機械、対象物を含んだ閉ループ系と考えると、人間の機械的動特性（手先インピーダンス）が操作性や安定性に大きく影響することは明らかである。さらに、位置決め作業時（手動制御系がフィードバック動作を特に強めている状態と考えられる）は、安定性の確保のため閉ループ系のどこかにエネルギーを消散するための粘性成分が必要であり、前述したような、目標位置付近で機械側の粘性を大きめにすることの妥当性が説明できる。すなわち、もし機械側に粘性が足りないと、それを補うために人間側が粘性を高める必要があり、それが無駄な力

みを発生させ、作業性を損なう結果となる。このような観点から、申請者は作業中の手先インピーダンスの変化を解析し、それをパワーアシストシステムのパラメータ調整に利用する手法を開発してきた。しかし実際の作業を考えると、作業は全身を使った広範囲にわたるものであり、また、作業方向も空間上のあらゆる方向となる。作業位置（作業者の姿勢）や作業方向に応じて作業者の機械力学的な特性が大きく変化するため、それを考慮したパラメータ調整が必要である。逆に、高度な熟練作業者は、姿勢や作業方向を作業内容に応じて適宜変化させることで作業しやすいインピーダンスを達成しているとも考えられる。その性質を利用すれば、熟練が必要な作業を機械がアシストすることで容易化するこ



ともできる可能性がある。

図2：人間-機械系の考え方

2. 研究の目的

本研究の目的は、重量物の運搬・組み付けや加工作業などを支援するパワーアシストシステムを、作業者にとって使いやすくするための新しい制御手法を開発することにある。パワーアシストシステムを用いた作業は、人間と機械からなる人間-機械系である。人間-機械系においては、機械側の特性だけでなく機械側から見た人間の機械的動特性（手先インピーダンス）も重要になる。手先インピーダンスは作業者の姿勢と作業方向によって大きく変化するため、機械側の特性もそれに合わせて適切に変化させるべきである。そこで本研究では、姿勢と作業方向による手先インピーダンス変化の性質を明らかにし、操作しやすいアシストシステムの制御手法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

操作者の手先インピーダンスが姿勢と作業方向に応じて大きく変化し、それに合わせて機械側の特性を調整することで操作性が高まることを確認した研究(1)と、機械側の特性を操作者の表面筋電位を利用して自動調整する研究(2)をおこなった。以下にそれぞれの方法について述べる。

(1) 鉛直平面内でリニアアクチュエータを2本交差させた図3のような実験システムを構築した。その上で、手先運動制御系を図4のように考える。操作者は手先位置 x を目標位置 x_r に近づけるよう補償特性 $HM(s)$ を操作対象特性 $G(s)$ に応じて変化させながら操作力 f_h を発生する。ここで、操作者の手先インピ

ーダンスは $HE(s) = HM(s) + HD(s)$ であり、補償特性と受動特性 $HD(s)$ の和となる。受動特性は操作者の姿勢や作業方向で大きく変化することが知られており、そのため、操作しやすい操作対象特性は姿勢や作業方向によって異なることが考えられる。そこで、操作者の体正面（中央位置）と右に 400 [mm] ずらした位置（右位置）において、それぞれ水平方向と鉛直方向について測定実験を行う。実験は、ランダム外乱に対して手先位置を初期位置に保持するよう補償動作を行わせるもので、操作力と手先位置の測定データをスペクトル解析することで伝達特性を推定する。



図 3：2次元実験装置

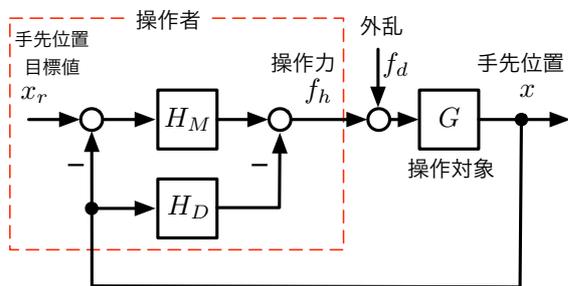


図 4：手先運動制御系

(2) 図 5 のような 1 軸のリニアアクチュエータに力センサを介して操作レバーを取り付けた実験装置を用いる。ディスプレイには目標位置と現在の手先位置を実寸および拡大表示し、操作者はそれを見て目標位置まで手先を移動して位置決めする実験を行う。操作力 f_h に対して慣性・粘性・弾性系となるように PC でコンプライアンス制御する。粘性 D が $D=D_0 * A / (f_h + A)$ の形で操作力に依存するように変化させる。このとき、パラメータ D_0 と A によって操作のしやすさが変化する。従来研究ではこれらのパラメータを試行錯誤で決定していたが、最適値は個人や作業方向・姿勢で変化するので、自動調整の必要がある。そこで本研究では前腕の表面筋電位の情報を元にパラメータ A (感度係数) を自動調整する手法を検討する。

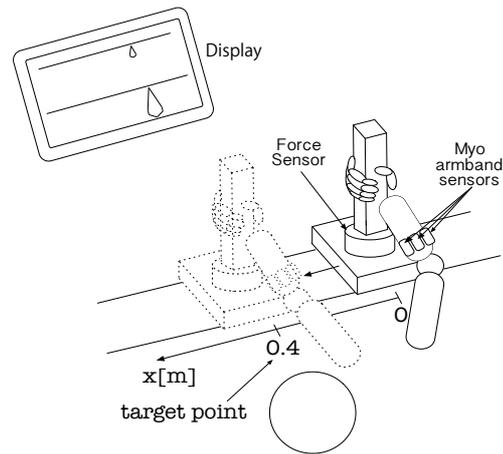


図 5：位置決め操作実験装置

4. 研究成果

前節の研究 (1), (2) の成果について以下に述べる。

(1) 操作対象特性を変化させながら実験を繰り返し、手動制御系の安定性が維持される範囲内でクロスオーバー周波数が最大になるような操作対象特性を最良なものとして選定する。図 6 に結果の一例を示す。操作対象特性を $G_5(s) \sim G_7(s)$ と変化（この場合は徐々に操作対象特性の慣性、粘性係数を小さくする、すなわち軽くしている）させると、開ループ特性 $HE(s)G(s)$ のクロスオーバー周波数は徐々に高くなるが、 $G_7(s)$ ではクロスオーバー周波数付近での開ループ特性の傾きが急になるため（これは安定性が損なわれていることを意味する）、 $G_6(s)$ を最良なものとして選定する。このような実験を手先位置と方向を変えながら、(A から G) の 7 名の被験者で実施した。

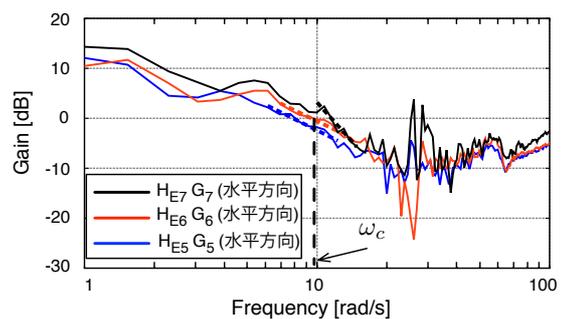


図 6：開ループ特性の変化
(右位置水平方向，被験者 B)

次に操作対象特性の粘性係数が作業方向によってどのように異なるかに注目し、すべての被験者の結果についてグラフ上にプロットしたものが図 7 である。この図から、中央位置においては水平方向と鉛直方向の粘性係数は同一の値でよいが、右位置の場合は鉛直方向を水平方向の 0.4 倍に設定する必要があることがわかる。

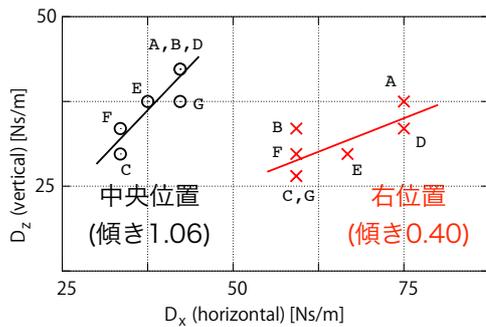


図7：操作しやすい対象の粘性係数の作業方向による違い

同様な違いが、上位置や下位置でも存在することが予想されるが、これらをすべて個別に測定実験で確認することは容易ではない。また、実際には作業位置は中間的な値をとることもある。これらに対応するためには、姿勢と作業方向による操作者の特性を数式モデル化することが必要になる。そのため現在、操作者の姿勢を実時間でキャプチャしながら操作実験を行うシステムの構築を行っている。その上で、操作者特性のモデルを利用した操作しやすい作業対象特性のパラメータを自動調整する手法の開発を目指している。

(2) 粘性の操作力依存のパラメータ A を変化させて測定実験を繰り返し、その際に表面筋電位の大きさがどのように変化するかを解析した結果が図8である。この結果から、表面筋電位が極小になる感度係数が存在し、その時に操作感が最良になることがわかった。

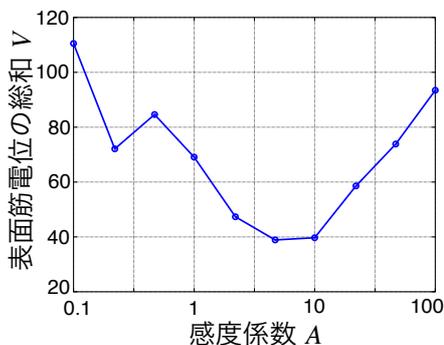


図8：感度係数による表面筋電位の変化

さらに、表面筋電位の値をもとに感度係数を調整する学習アルゴリズムを考案し、実験を行なった。その結果、感度係数は図9のように自動調整され、それに伴い、表面筋電位は図10のように小さい値へと変化した。ただし、図10のように被験者によって収束性に違いがあり、学習アルゴリズムの検討の余地がある。

これら本研究で得られた成果は、人間とロボットなどの機械が協調して作業するシステムにおいて共通の課題である「人間にとって望ましいロボット側の機械的動特性の設定」に

有用な知見と解決の道筋を与えるものと考ええる。本研究では工場での組み立て工程を念頭に置いたが、パワーアシストシステムは自立支援や介護補助など日常生活での応用が期待されており、それらへの展開も考えられる。

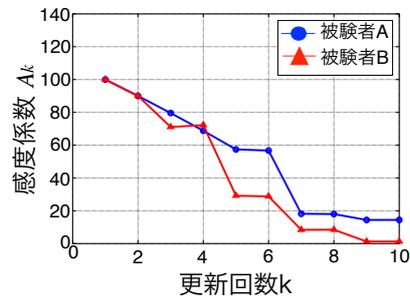


図9：感度係数の学習結果

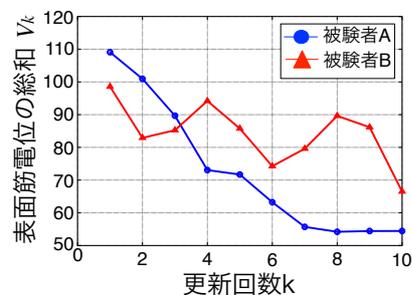


図10：学習による表面筋電位の変化

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1件)

- ① 稲葉 毅, 周 宇航: 位置決めしやすいパワーアシストシステムの制御～作業方向と姿勢に注目した操作性の検討～, 電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), 査読あり, Vol.134 No.8 pp.1130-1137 (2014)

[学会発表] (計8件)

- ① 稲葉 毅, 佐藤喬仁: 位置決めしやすいパワーアシストシステムの制御～作業方向と姿勢に注目した操作性の解析～, 平成26年度 神奈川県ものづくり技術交流会, (2014)
- ② 稲葉 毅, 佐藤喬仁: 位置決めしやすいパワーアシストシステムの制御～作業方向と姿勢に応じたパラメータ調整の効果～, 第15回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), (2014)
- ③ 佐々木 駿昂, 稲葉 毅: 操作力の能動成分に着目した表面筋電位によるパワーアシスト制御, 第33回日本ロボット学会学

- 術講演会 (RSJ2015) , 3D3-06 (2015)
- ④ 佐々木 駿昂, 稲葉 毅 :操作力の能動成分に着目した表面筋電位によるパワーアシスト制御 -制御方式による操作性の違い-, 平成 27 年度 神奈川県ものづくり技術交流会 (2015)
 - ⑤ 稲葉 毅, 西田健人, 山下敦士, 片野圭一 :位置決めしやすいパワーアシストシステムの制御 -目標位置に応じた操作対象特性の調整-, 平成 27 年度 神奈川県ものづくり技術交流会 (2015)
 - ⑥ Abdullah Almasary, Takeshi Inaba: Parameter Adjustment For Power Assist Devices Using EMG, 平成 28 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, PS6-8 (2016)
 - ⑦ 吉越 舟, 稲葉 毅 :位置決めしやすいパワーアシストシステムの制御 -表面筋電位による操作性評価とパラメータ調整-, 第 17 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), (2016)
 - ⑧ 吉越 舟, 稲葉 毅, 位置決めしやすいパワーアシストシステムの制御 -前腕部の表面筋電位による操作性評価とパラメータ調整-, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (Robomech2017), 2P1-I04 (2017)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

研究室ホームページ : <http://www.inaba-lab.org>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲葉 毅 (INABA, Takeshi)
東海大学・情報理工学部・教授
研究者番号 : 90242271