

平成 23 年 3 月 1 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2009
課題番号：19560253
研究課題名 (和文) 人-人協調手動制御系における操作者の自己整形特性の解析に基づく対人協調制御
研究課題名 (英文) On Human Cooperative Control based on Analysis of Self-shaping Characteristics of Human Operator in a Human-human Cooperative Manual Control System
研究代表者 松尾 芳樹 (MATSUO YOSHIKI) 東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・教授 研究者番号：90173806

研究成果の概要 (和文)：運動をともなう人の作業を補助・支援するロボットや機械の、効果的な制御方法を開発するために、まず、2名の人同士が行なう簡単な協調手動制御作業において、各作業者が相手や対象に合わせて自分のふるまいを調整する性質を、新たに開発したシミュレータを用いた実験によって解析した。その結果、作業者の個性とその組の相性のよさ（作業性能の高さ）との関係を明らかにする手法の基礎を確立できた。次に、時間とともに性質の変わる人のふるまいを実験結果に基づいて解析するために有用な、時変モデルの同定手法を提案し、シミュレーションや実験でその有用性を確認した。さらに、具体的な協調作業支援法を検討する上で有用と思われる3種類の作業課題を提案し、それらの妥当性をシミュレータ実験によって示した。

研究成果の概要 (英文)： For the purpose of developing effective control methods for robotic or mechanical systems which assist human physical tasks, a simplified cooperative manual control task performed by two human workers is analyzed by experiments using a newly developed simulator. Thereby, a basis of a method to analyze relationships between personal characteristics of each worker and performance of pairs is established. Then, a method to identify time-varying systems is proposed, which is useful in investigating time-varying behavior of human workers and whose validity is confirmed through simulations and experiments. Finally, three types of new model tasks are proposed and verified their feasibility by simulation, which are expected to be effective in future studies on cooperative task assist schemes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：人間機械システム，手動制御系，人-機械協調制御

1. 研究開始当初の背景

少子化・高齢化を背景として，生産現場，オフィス，福祉，家庭用などさまざまな場面で，人と協調するロボットや機械への期待が高まっている。特に，人主体の協調運動を補助するシステムについては，人の動作モードを推定して大型部品の位置決めをアシストする装置や，点から点への搬送作業におけるインピーダンス変化に注目した協調制御，ダンス・パートナーロボット，随意軌道生成作業の補助など，用途を限定した形では検討が進んでいる。しかし，このようなシステムの一般的な協調制御系設計の枠組みは，まだ確立されているとはいえない。このためには，まず，人同士の協調作業における人の特性，特に，作業・対象や相手に応じて人が自分自身の動特性を調整する性質を調べ，協調制御のための知見を得ることが必要であろう。

一方，実際の生産現場における人対人の協調作業では，熟練作業者同士であっても作業者の組に相性が存在し，相性の良くないパートナーに代えると作業性能や効率が大きく損なわれることが知られている。したがって，人と協調作業するロボットや機械システムでも実装すべき特性は一樣ではなく，作業条件や使用する人に応じて相性がよくなるように制御を行なうことが望ましい。これを実現するためには，やはり人同士の協調作業を解析し，相性の善し悪しの理由を探ることが有用と考えられる。しかし，人同士の相性のメカニズムはまだ明らかになっておらず，これを考慮した協調制御の検討例も見当たらない。

以上より，人に合わせて効果的にロボットや機械システムを協調させる対人協調制御を実現するためには，まず人同士の協調作業に着目して，対象・作業条件・作業の相手に合わせて人が自身の動特性を自己整形する性質と相性の良さの関係を解析し，これを利用して状況や作業者個人に適応する新たな制御手法を検討すべきである。

2. 研究の目的

このような背景から，本研究では以下を目的とした。まず，人同士の協調作業のモデルとして2人の操作者が1つの対象を協調的に扱う手動制御系を取り上げ，そのシミュレータを開発して，操作対象や操作者の組による自己整形特性の違いを実験的に明らかにする。同時に，操作性・効率を解析して相

性のメカニズムを探り，相性の良さの指標を確立する。次に，人-人協調作業系において，さまざまな作業条件においてふるまいを変える作業者の時変モデルを解析するための手法を開発する。さらに，人同士の協調作業として実験的検討に適した種々の例題作業を考案し，それらの有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 2者協調手動制御作業における人-人協調制御の解析 (2007年度)

研究を開始するにあたって，本研究では人-人協調作業の単純化モデルとして，2名の人による仮想対象物の手動制御を取り上げることを決めた。初年度は，この作業の模擬を可能にする作業シミュレータを開発し，人同士の協調作業の系統的な実験を行なって，各作業者の基本的な手動制御特性と協調作業性能の関係について検討した。

(2) 手動制御系における人の制御動作の準線形時変モデリング (2008年度)

初年度の，質点運動における力外乱抑制を作業課題とする協調作業実験において，被験者の組のふるまいが安定するまでに，お互いの動特性が変化して整形し合う挙動が観察された。

人-人協調作業では，このように各作業者が相手と対象の挙動に応じて自身の動特性を適応させる調整過程の特性が，作業性能や操作の相性に深く関連する可能性がある。しかし，動作点の変化が大きい一般の作業では，このような調整過程において人のふるまいが時間によって大きく変化する時変システムとなるので，従来よく用いられている準線形モデルを用いた定常的な解析法では正確に分析することが難しい。

そこで本研究の2年目には，人が自身の動特性を変化させる過程を解析するための時変システムの同定と解析の新たな手法について検討した。

(3) 協調作業支援法検討のための作業課題の検討 (2009年度)

最終年度には，前年度までの結果を活かして，今後の研究展開で有用と思われる新しい作業実験を複数考案し，それぞれの作業を模擬するシミュレータのプロトタイプを作成して，簡単な実験によって有用性を調べた。

4. 研究成果

(1) 2者協調手動制御作業における人-人協調制御の解析 (2007年度)

作業シミュレータを開発し、人同士の協調作業の系統的な実験を行なって、各作業者の基本的な手動制御特性と協調作業性能の関係について検討した。

まず、2名の被験者がそれぞれの操作器に加えた力の合力によって質点オブジェクトを平面内で運動させて、その挙動を各人のディスプレイに表現するような作業シミュレータを完成した。そして、大学院生10名の被験者を学内で公募し、仮想対象物の運動の視覚情報だけをフィードバックした状況で、被験者2名が1つの対象を制御する協調外乱抑制実験を行なった(図1)。

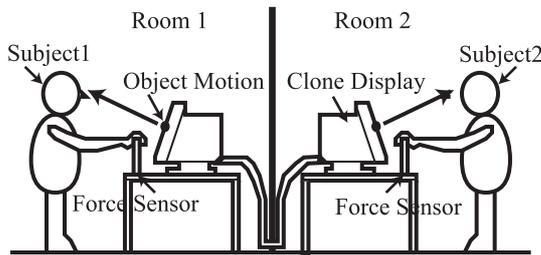


図1 2者協調手動制御作業実験システム

準備として、被験者の単独作業時の特性を調べたところ、異なる対象特性に対する自己整形の傾向によって、被験者が4つのタイプに分類できることが分かった。そこで、各タイプの代表的な者を主被験者として選び、それらを他の被験者と組み合わせた多様なペアを構成して、2者による協調外乱抑制実験を行なった。

その結果、両被験者の操作特性が十分に定常的になった状況では、各被験者および両者を合わせた偏差補償の伝達特性は、いずれもほぼ1次補償要素とむだ時間の積としてモデル化できること、各人や組の特徴は、ゲイン補償量・位相補償量・むだ時間の3つのパラメータによって表わせることが分かった。

さらに、ペアの各被験者の単独作業時の補償特性のタイプと作業結果の関係を分析すると、相手のタイプによる特性変化や作業性能の違いが、自身のタイプに応じた特徴を持つことも明らかになった。

以上の結果は、人の主体的作業をロボットが支援する形態の協調作業系において、作業者のタイプに合わせてロボットの制御系を設計する際の指針を与えるものと期待できる。

(2) 手動制御系における人の制御動作の準線形時変モデリング (2008年度)

人が自身の動特性を変化させる過程を解析するための時変システムの同定と解析の新たな手法について検討した。

具体的には、再現可能な実験設定で多数回の作業実験を行ない、その作業データをすべて用いることによって、被験者のふるまいの事象平均的な特性を線形時変モデルとして同定する手法を提案し、理想データについてシミュレーションで機能を確認した(図2)。

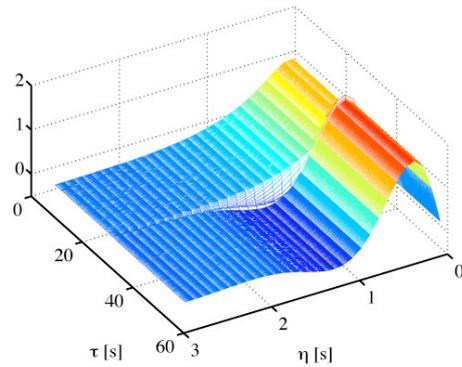


図2 時変システムの同定結果(理想データ)

また、実験データに含まれる雑音の影響を抑制するために、前置・後置形のフィルタを導入し、その係数を決定するための指針を、実験データの例を用いて示した。

さらに、モデルとして時変荷重関数を用いた表現と、出力側から見た構造を規定した時変状態空間表現を導き、解析目的によってそれぞれの長所を活用する方法を示した。

そして、動特性が時間とともに階段状に変化する対象を被験者1名が扱う外乱抑制実験を行ない、その結果をもとに被験者や実験系の時変線形システムモデルを同定することにより、提案手法の有効性を確認した(図3, 4)。

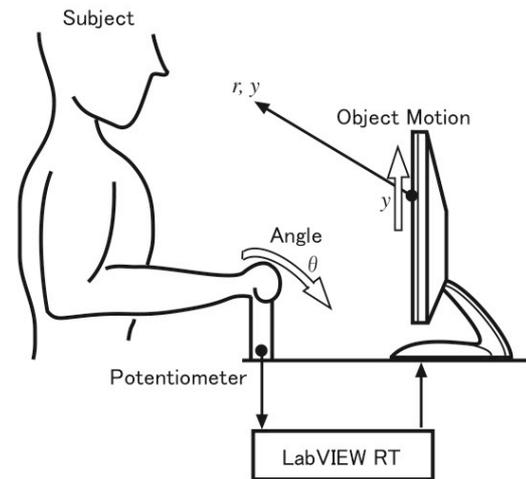


図3 外乱抑制実験システム

本手法は、人の手動制御特性だけでなく、さまざまな動的システムに対して、対象のふるまいを同じ条件で繰り返し観測できるような場合に、時間とともに変わる動特性の解析を可能にするという点で、今後、さまざまな

応用や、理論的な展開が期待できる。

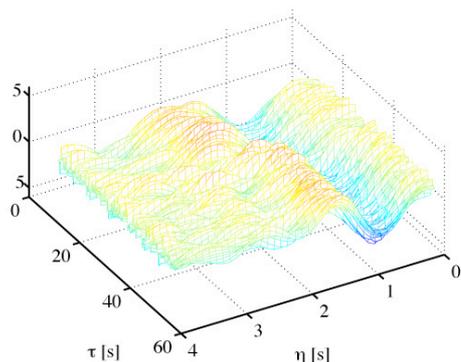


図4 時変システムとしての同定結果（実験系）

(3) 協調作業支援法検討のための作業課題の検討（2009年度）

まず、手動制御系の操作系の効果を改善する手法として予測表示と非線形操作器ゲインに注目し、基礎的な実験を実施した。

前者の検討には、ビーム上に球を転がし、傾斜によって変位を制御する「ボール&ビームタスク」を採用した。実験の結果、ボールの位置偏差に加えて0.5~2.0秒後の位置・速度を予測して画面上に表示することにより、通常では偏差を0に保つような安定化はできないとされている3重積分特性の制御対象でも、連続的な操作で安定化できることが示せた（図5）。

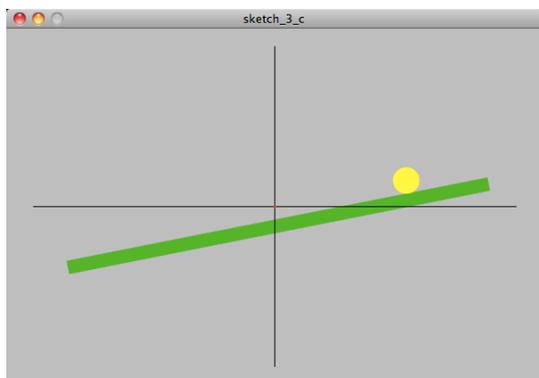


図5 ボール&ビーム実験シミュレータの画面

非線形操作器ゲインについては、差動2輪型移動体を初期位置から目標位置まで移動させる操縦を取り上げた。操作入力が大きくなる移動モードでは操作ゲインを大きくし、微調整のために操作量が小さくなる位置決めモードでは操作ゲインを小さくするように、非線形ゲイン特性を操作器にもたせることによって作業時間・精度とも向上できることを示した。

さらに、より具体的な協調作業の例として、2名の人が1台の移動体を協調操縦する例題を取り上げ、実験を行なった（図6）。2

台のレバー式操作器によって左右の車輪の速度を制御する差動型と、旋回および進行方向の速度を制御する操舵型の2種類を採用し、複数の被験者による複数のペアの間で大きくふるまいが変わることを確認し、人同士の協調の性質を探る新たな例題実験としての有効性を明らかにした。

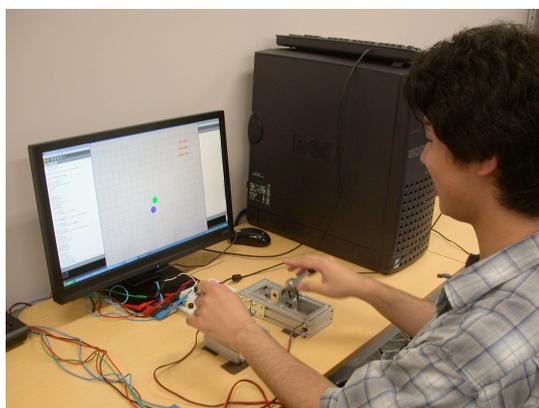


図6 操縦実験システム（単独作業中）

(4) まとめ

以上を要するに、本研究では次のような成果を得た。

まず、人同士の協調作業における人の特性を探るために、2名の人による仮想対象物の手動制御を取り上げ、シミュレータを構築した。そして、人が作業パートナーに応じてふるまいを変える適応特性について、シミュレーション実験を通じて検討して適切なモデルのクラスを明らかにした。さらに、そのモデルを利用して、被験者同士の相性の良さを分類する手法を示した。

次に、人同士がお互いの動特性を調整し合う状況など、人がそのふるまいを時間とともに大きく変える状況での解析を可能にするために、複数回の実験結果を使って時变的なふるまいをモデル化する、準線形時変モデルの同定・解析法を考案した。そして、提案手法の有用性を、実験と数値計算に基づいて明らかにした。

最後に、今後さらに人同士の協調の性質を探り、協調制御方式の検証を行なうために有用と思われる、新たな例題実験と作業課題を複数考案し、基礎的な実験によってそれらの妥当性を示した。

これらは、人の協調作業におけるふるまいを、ロボットや機械による作業支援のための制御方法構築に活用しようとする点で、国内外にまだあまり例を見ない試みである。その成果は、今後の研究を通じて作業主体の人間-機械協調作業系を実現する上で、きわめて有用と考えられる。

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)

[学会発表] (計8件)

- ① 福田遼, 松尾芳樹, 浦上大輔, 関口暁宣: 制動作業における予測到達時間微分値の視覚提示効果, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, 仙台 (2010/12/23)
- ② 本多弘樹, 川島慧太, 関口暁宣, 松尾芳樹: 2名の人による差動二輪移動体の協調操縦特性の解析, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 旭川 (2010/6/15)
- ③ 福田遼, 伊藤良行, 関口暁宣, 松尾芳樹: 3重積分系の手動制御における予測表示による安定化と表示および操作器ゲインの影響, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 旭川 (2010/6/15)
- ④ 今西裕人, 松尾芳樹: 手動制御系におけるヒトの準線形時変モデルの推定, 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, 岐阜 (2008/12/5)
- ⑤ 今西裕人, 松尾芳樹: 手動制御系におけるヒトの準線形時変モデルの推定の提案, 創発システムシンポジウム 2008, 富山 (2008/8/20)
- ⑥ 古賀敏幹, 松尾芳樹: 経皮電気刺激を用いた筋力生成の力覚提示としての有効性に関する検討, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, 広島 (2007/12/20)
- ⑦ 浅羽佑介, 松尾芳樹: 2者協調手動制御実験における自己整形特性の個人差と作業性能の関係, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, 広島 (2007/12/20)
- ⑧ 州崎大輔, 松尾芳樹: 随意運動制御を考慮した人体の実効インピーダンス特性の解析, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, 広島 (2007/12/20)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 芳樹 (MATSUO YOSHIKI)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・教授

研究者番号: 90173806

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし