

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560308

研究課題名(和文)人の知覚運動特性を考慮した知能機械操縦系の操作支援技術

研究課題名(英文)On methods to assist manipulation of intelligent machines considering human sensory-motor characteristics

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットなどの知能機械を、非専門家が意のままに操作できる支援手法を目標とし、これまで機械システム分野ではあまり参照されていなかった人の認知知覚運動特性に注目して、人と親和性の高い知能機械実現のための基礎的な手法を検討した。具体的には、脳波や筋電、運動などの生体信号を利用した操作運動実験を通じて人・機械協調系における人の知覚運動特性を調べ、生体信号を用いた新たな操作系の可能性を探った。また、人の認知特性を模した知能機械の学習法について実験機を開発して検討を進めた。その結果、生体信号を用いた操作系の構築や評価、認知バイアスを模した学習アルゴリズムの有用性が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In order to establish foundations for the development of methods that enables non-professional persons to maneuver intelligent machines such as robots, human characteristics of cognitive and sensory-motor functions are analyzed. Basic assistive methods are examined which are expected to be effective in developing human-oriented, easily-operated intelligent machines. Specifically, relationships between machine properties and human sensory-motor characteristics are investigated through experiments employing measurements of bio-signals such as EEG, EMG, and motion variables. Results show feasibility of building and evaluating manipulation systems using such bio-signals and effectiveness of a learning algorithm inspired by human cognitive biases.

研究分野：制御工学，メカトロニクス，人間中心システム

 キーワード：人間機械協調 操作運動支援 知覚運動特性 生体信号計測 力操作 歩行運動 認知バイアス 学習  
 アルゴリズム

### 1. 研究開始当初の背景

少子・超高齢社会を迎えた先進諸国では、生活・作業支援を用途とするロボットなど、人が随意に行なう物理的作業を支援する知能機械の実用化と普及が期待されている。これには、パワーアシスト機器や電動車いす、パーソナルビークルなどが含まれる。また、東日本大震災の経験を通じて、災害支援ロボットの遠隔操縦において確実に速やかな作業を可能にする操作支援方法が望まれている。いずれも、家庭や社会で人と関わる知能運動機械システムであり、これらが有用であるためには、非専門家が意のままに操ることを可能にする操作支援技術の確立が重要である。

人がロボットなどの知能機械を直接操作して行なう作業形態は、物理的な相互作用をとまなう人間・機械系となる。さらには、制御された機械が人の運動能力を拡張して、人が主体的に行う行為を補助する、「人・機械協調系」の一種と見ることが出来る。しかし、従来の人・機械協調系研究の共通の問題として、人が機械のふるまいをどのように知覚し、それに基づいて自身がどのようにふるまうかについてはあまり検討されていない。随意で巧みな操作を可能にする情報提示・操作入力などの支援手法を確立するには、この点に注目することが重要である。

人・機械協調系におけるもう1つの重要な課題として、操作支援手法の効果を操作性の点から客観的に評価する方法が確立されていない点があげられる。従来は、操作結果そのものの評価か、被験者、使用者へのアンケートなどの間接的な形で行なうのが通例である。研究代表者らは、手動制御系の連続的な外乱抑制型の作業について、操作者の自己整形の成否を用いることを提案しているが、具体的な作業への応用や客観的な指標の確立はできていない。これに対して本研究では、近年普及している脳の活動状況の計測技術利用を検討する。操作支援技術の評価では、fMRIのように大掛かりなものは現場での利用が難しいが、多数電極を用いた脳波計測および事象関連電位測定法は有望である。

さらに、安価で信頼性の高い生体信号計測技術が確立されれば、操作支援への利用が期待できる。脳情報による機械の操作に関しては、現在いわゆるBMI、BCIと呼ばれる分野の研究が盛んである。これらの中で現在までに実現できている方式の多くは、予め示されたメニューやアイコンに対して脳波等を用いてポインタを移動させ選択する操作コマンド入力型で、本研究で目標とするような直観的・即時的な操作とはいえない。しかし、上記のような人の知覚運動特性と整合しこれを補助する利用形態が可能になれば、十分実用に耐えるものになると考えられる。

### 2. 研究の目的

以上の背景をふまえて本研究では、ロボットなどの知能機械を、非専門家が意のままに操ることを可能にする操作支援手法の確立を目標として、これまで機械システム分野ではあまり参照されていなかった人の認知知覚運動特性に関する知見を活用することにより、人と親和性の高い知能機械実現に有用と思われる基礎的な手法についてその可能性を検討した。具体的には、脳波や筋電、運動などの生体信号を利用した実験を通じて、人・機械協調系における機械特性と人の知覚運動特性の関係について新たな知見を得ること、これらの生体信号を用いた新たな操作系の可能性を探ること、人の認知特性を模した人と親和性の高い知能機械の学習法を検討することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究の目的達成のため、脳波や筋電、運動センサ情報を用いた計測実験による操作運動の解析、人の知覚運動特性の分析、人と親和性の高い知能機械を目指して人の認知特性を模した知能機械の学習法の検討を行った。それぞれの具体的な内容・方法は以下の通りである。

(1) 直感的な操作系実現のための生体信号を用いた操作運動の解析

①操作系の解析のための脳波計測法の改善  
まず、本研究で新たに導入した脳波計による計測技術の習得をかねて、先行研究例の追試を行なった。具体的には、事象関連電位を利用した機器操作の誤り判定の例を参考に、単純化した実験を遂行した。

②力操作器を用いた人の操作特性の解析  
6軸加速度センサを用いた力操作型操作器と、その操作力・トルクを入力とする仮想操作対象の運動を液晶ディスプレイ上にリアルタイムで表示するシステムを開発した。操作入力に対する対象の運動特性として位置司令型、速度司令型、加速度司令型の3通り、操作目標パターンとして円軌道追従型とランダム移動型の2通りを用意し、脳波計を装着した被験者による操作実験を行った。

③リード型操作器と主観的操作におけるユーザー挙動の分析  
移動ロボットへの操作意図伝達を目的に、盲導犬のリード操作にならった操作器を提案し、その直感的な操作系実現の可能性について検討した。まず、人の主観的な操作を分析するために、6軸力覚センサを用いて実験装置を作成した。そして、通常盲導犬に与えられる指示語の一部をリードへの自由操作として入力する課題を設定して実験を行ない、操作力ベクトルの空間・時間的な変化を調べた。

④物体の操作における脳波の解析  
ロボットと人による物体の協調搬送作業や移動ロボットの遠隔操縦における協調支援を目的として、操作支援のための知見を求めて、人

がハンドルを操作する際の脳波を計測・分析した。今回は予備実験として、単独の被験者の操縦中にどのような情報を抽出できるか操作入力と脳計測情報の関係を調べた。

#### (2) 人の運動特性計測と支援機器のための検討

①足部アーチ構造の歩行運動への効果の分析 人の自然な歩行には足部のアーチ構造が役立つとされている。そこで、操作機器や運動支援機器に、人の感覚と親和性の高い特性を実装するための基礎的検討として、2脚步行運動における足のアーチ構造の効果を分析した。ODE を用いてシミュレーションプログラムを開発し、主に歩行時の重心や ZMP の移動をシミュレートして、人の足が備えている可変アーチ構造の弾性パラメータによる運動軌跡の違いを分析した。

②最適枕設定のための寝返り挙動の分析 快適な睡眠を与える寝具の条件を探るために、寝返り動作の特徴をモーションセンサによる簡単な計測から分析する手法を実験的に検討した。

#### (3) 人の認知特性を模した知能機械の学習法の検討

人の認知と親和性の高い知能機械を実現する手法として、人が経験に基づく判断において示す認知バイアスを模した強化学習アルゴリズムを構築し、大車輪ロボットの運動学習を例題として、従来の Q 学習や、論理的に厳密なアルゴリズムとの学習効率の違いを分析した。まず、動力学エンジン ODE を用いたシミュレータで学習特性を分析し、次に、シミュレーションで得られた結果を確認するための実験機を製作した。

### 4. 研究成果

以上の各サブテーマについて、次のような成果と今後への展望・課題を得た。

#### (1) 直感的な操作系実現のための生体信号を用いた操作運動の解析

①操作系の解析のための脳波計測法の改善 定性的には先行研究と同様の結果が得られたが、環境電磁波や被験者の動きの影響を抑える計測手法が必須であることも再認識された。そこで、知能機械システムの操作支援に利用できるような脳計測技術の確立を目的として、日常的な環境下での環境電磁波や被験者の動作などによるノイズを抑えて安定に実験を行なうための計測手段の改善を検討した。具体的には、脳波計を覆う東部装着型の電磁シールドを作成し、伝送路へのノイズ混入抑制を達成した。現実の操作支援システムへの利用も可能な器具のプロトタイプが開発できた。これらは実際の操作支援に利用できる計測機器の開発につながることで期待できる。

②力操作器を用いた人の操作特性の解析

操作性が高い設定ほど  $\alpha$  波 /  $\beta$  波比率が高まるという、従来のソフトウェアのユーザビリティ評価での報告と同様の傾向が確認された。脳波に基づくユーザビリティの評価については、ウェブデザインやソフトウェアの使い勝手などを対象に検討された例は多いが、手動操作器の操作性についての検討例はあまり見当たらず、今後より詳細な検討によって、直感的な操作系の実現に有用な知見が得られるものと期待できる。

③リード型操作器と主観的操作におけるユーザー挙動の分析 主観的な操作パターンを用いて意図を推定できる可能性が明らかになったが、指示語によっては個人差や、異なる指示語間の類似性も見られた。今後は、リード型操作器の直感的な操作を実現する脳計測情報の分析と応用として、初年度に作成したシミュレータに、操作結果を実時間で示すアニメーションを加えることで、意図した操作が実現できているかどうかを被験者に提示できるようにすることが考えられる。これを使用して脳計測実験を行なうことにより、意図の達成の程度による脳計測情報の違いを分析し、誤り入力の判定・修正支援など、意図した操作を実現しやすくする操作支援法への指針が明らかにできるものと期待できる。なお、同様の検討は他に類を見ず、新しい視覚障害者への支援装置の開発につながることで期待できる。

④物体の操作における脳波の解析 操作と脳波の定性的な関係性はある程度確認できたが、より精密な分析には実験条件やタスク設定の絞り込みなどが必要性であることが明らかになった。さらに、今後は2名による協調作業も対象に、円滑に行なわれた場合と協調が阻害された場合の脳計測情報の違いについて検討したい。その最終目標は、作業者の脳計測情報を利用した協調的支援である。なお、ハンドル操作の脳波による検討は、主に自動車運転時の操縦者の挙動解析として行われていて、機器の協調操作の観点から扱われた例は見当たらない。これによって操作の個人差や相性についての知見が得られ、人と協調作業するロボットの制御に活用できるものと期待される。

#### (2) 人の運動特性計測と支援機器のための検討

①足部アーチ構造の歩行運動への効果の分析 シミュレーション結果から、倒れ込み軌道の安定性、運動効率の点で違いが明らかになった。今後は、運動センサや筋電センサを用いた人の歩行実験による確認が必要と考えられる。なお、足部アーチ構造については、これまでは人の歩行の観点から解剖学的・機構学的な検討はされているが、シミュレーションや実験による運動の分析はあまり行われておらず、本研究のように歩行機械への応用を目指した検討は類を見ない。

②最適枕設定のための寝返り挙動の分析

ジャイロセンサを用いて医師が判定した特徴の一部を自動的に検出できることを示した。今後は別途行っている共同研究テーマに追加して検討を進める予定である。

(3) 人の認知特性を模した知能機械の学習法の検討 実機での予備的実験において、報酬授与に回転速度を用いることにより、報酬と運動性能の対応性を改善できることがわかった。そこで現在、アルゴリズム間の学習特性の違いを明らかにする実験の準備を進めている。大車輪ロボットを例題とする学習アルゴリズムの検討はよく行われているが、実機での検討例はあまり多くない。また、従来は報酬を回転角度や姿勢によって与える場合が多く、回転角速度を基準とする例は見当たらない。学習アルゴリズムを正当に評価する上では、目標とするパフォーマンスと報酬の整合は重要であり、大車輪ロボットを用いた同種の研究において極めて有用な結果である。

以上を要するに、これまで機械システム分野ではあまり参照されていなかった人の認知知覚運動特性に関する知見を活用することにより、人と親和性の高い知能機械実現に有用と思われる基礎的な手法への新たな糸口が明らかになった。今後は、それぞれのサブテーマにおいて検討を深めるとともに、直感的な操作支援手法の構築・評価へ向けての試みに着手する予定である。

#### 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 2 件)

- ① URAGAMI, Daisuke; TAKAHASHI, Tatsuji; MATSUO, Yoshiki, Cognitively inspired reinforcement learning architecture and its application to giant-swing motion control, *Bio Systems*, 査読有, vol. 116, 2014, 1-9
- ② Akinori Sekiguchi, Toshiaki Ishizawa, Shuori Yamada, Koji Mikami, Akifumi Inoue, Hiroshi Igaki, Satoshi Horiguchi, Yoshiki Matsuo, Daisuke Uragami, Tohru Suguro, Tohru Hoshi, Feature Analysis of Turn Over Motion for Adjustment of Pillow Height, 8th International Conference on Humanized Systems, 査読有, 2012, CD-ROM

[学会発表] (計 10 件)

- ① 永園 幸司, 松尾 芳樹, 力入力操作機器の操作時における脳波の分析, 平成 26 年電気学会 電子・情報・システム部門大会予稿集, 2014 年 9 月 3 日, 島根大学(島

根県松江市)

- ② 須藤 達哉, 関口 暁宣, 大久保 拓也, 浦上 大輔, 松尾 芳樹, 脳波を用いた人とロボットの協調に向けた基礎的検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 予稿集, 2014 年 5 月 28 日, 富山国際会議場 (富山県富山市)
- ③ 浦上 大輔, 高橋 達二, 高橋 優太, アルアルワンアリー, 松尾 芳樹, LS-Q 学習による探索と停滞ループの回避, 2014 年度人工知能学会全国大会 (第 28 回) 予稿集, 2014 年 5 月 12 日, ひめぎんホール (愛媛県松江市)
- ④ 浦上 大輔, 高橋 達二, アルスビヒーシヤム, アルアルワンアリー, 関口 暁宣, 松尾 芳樹, 対称性推論と運動学習の分節化: LS モデルを応用した Q 学習による大車輪ロボットの実現, 2013 年度人工知能学会全国大会, 2013 年 6 月 4 日, 富山国際会議場 (富山県富山市)
- ⑤ アルアルワンアリー, アルスビヒーシヤム, 浦上 大輔, 関口 暁宣, 松尾 芳樹, 大車輪ロボットにおける LS モデルを用いた Q 学習の効果 一実験による検証一, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2013 年 5 月 24 日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ⑥ 森本 達也, 関口 暁宣, 松尾 芳樹, 浦上 大輔, 2 足歩行ロボットの足部 2 アーチ構造の効果, 第 13 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, 2012 年 12 月 18 日, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市)
- ⑦ 小野田 行也, 松尾 芳樹, 浦上 大輔, 関口 暁宣, ウェアラブルサードアームのための速度指令出力ヘッドマウント操作器におけるゲイン特性の検討, 平成 24 年度日本人間工学会関東支部大会, 2012 年 12 月 1 日, 埼玉県立大学 (埼玉県越谷市)
- ⑧ 森本 達也, 関口 暁宣, 松尾 芳樹, 浦上 大輔, 中台 久和巨, 2 足歩行ロボットにおける足部アーチ構造の効果 -CPG 制御を用いた動力学シミュレーション-, 平成 24 年度電気学会電子・情報・システム部門大会, 2012 年 9 月 5 日, 弘前大学 (青森県弘前市)
- ⑨ 小淵 直哉, 関口 暁宣, 三上 浩司, 松島 渉, 石澤 利晃, 松尾 芳樹, ほか 7 名, モーションセンサを利用した寝返り動作解析, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012 年 5 月 27 日, アクトシティ浜松 (静岡県浜松市)

- ⑩ 小野田 行也, 浦上 大輔, 松尾 芳樹, 関口 暁宣, サードアームのためのヘッドマウント型操作器の入出力特性の検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2012年5月27日, アクトシティ浜松(静岡県浜松市)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/mylabteu/>

## 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

浦上 大輔 (URAGAMI, Daisuke)

日本大学・生産工学部・助教

研究者番号：40458196

関口 暁宣 (SEKIGUCHI, Akinori)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・講師

研究者番号：80344612