

平成21年 6月 5日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560264  
 研究課題名 (和文) 人間-機械協調型ロボットのための人間の確率的行動モデル構築手法に関する研究  
 研究課題名 (英文) A Research of Probabilistic Human Behavior Model Constructing Technique for Man-machine Cooperative Robot  
 研究代表者  
 早川 聡一郎  
 豊田工業大学・工学部・助教  
 研究者番号:50288552

## 研究成果の概要：

人間-機械協調型ロボットのアシスト制御系設計において、人間行動のばらつきが問題となる。これに対し、隠れマルコフモデル(HMM)を用いた確率的行動モデル表現の人間行動モデルを用い、尤度より人間行動特性の類似度評価を行う手法を提案した。さらに、HMM に区分操作データを与え、リアルタイムにオンラインで行動特性を評価し、現在の操作特性に最適なアシスト制御系を選択する手法を提案した。実験により、HMM が最適なアシスト制御系を選択することを確認し、確率的行動モデルによるアシスト制御系の有効性を検証した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

## 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：知能ロボティクス、知能機械、制御工学、人間行動モデル、隠れマルコフモデル

## 1. 研究開始当初の背景

労働人口が減少する日本社会において、産業・福祉分野などで労働力不足を補う手段の確保は非常に重要な課題である。その解決策の一つとして、人間が自分の能力以上の作業を実現できる人間-機械協調型ロボットが必要とされてきている。1989年に Kazerooni によって提案され発達してきた人間-機械協調型ロボットは、近年では、山田らによってスキルアシストと呼ばれる所謂パワーアシ

トシステムが実用化され、生産現場の生産ラインへ導入された例もある。この人間-機械協調型ロボットは、理想的には人間とロボットがそれぞれ対等に存在し、互いが協調して与えられたタスクを遂行するべきである。しかし、現状ではロボットはパッシブに力支援を行うだけのスレーブでしか使用されていない。また、このロボット制御系設計は本来考慮すべき人間の存在を無視して設計が行われている。人間-機械協調型ロボットを

今後より発展させるには、ロボット側も状況判断を行い、状況に応じて適切な制御方式に切り替え、また、操作者である人間に対して適切な支援も行え、現状のスレーブの立場から人と対等な関係で作業を遂行できるようになる必要があると研究代表者は考えた。しかし、そのような新しい制御システムを構成しようとしても、人間行動モデルの同定手法が確立できておらず、現状では試行錯誤的にロボット制御系を設計する状況であった。他分野の研究において、人間の行動モデルをニューラルネットワーク、ファジーや GMDH などで同定する研究はあるが、それらのモデルは得られた人間モデルが複雑であり、制御戦略を読み解くことや制御系設計への応用は困難であった。こうしたことから、研究代表者は人間-機械協調型ロボットのために人間を離散事象的な判断と連続時間系の連続的な動作が混在するハイブリッドダイナミカルシステムの系として捕らえた、図1に示すような新しい人間行動モデルを提案し、確定的ハイブリッドダイナミカルシステム論的に人間のロボット操作情報や周辺環境情報から構造の把握が容易な形で人間の行動モデルの構築を行う手法を提案した。また、得られた人間行動モデルをロボットの制御システム設計に反映させ、制御システム論的に制御系設計を実現できる可能性を示した。このように人間の行動特性をモデル化し、人間-機械協調型ロボットの制御系設計に反映させる手段の確立を実現してきた。

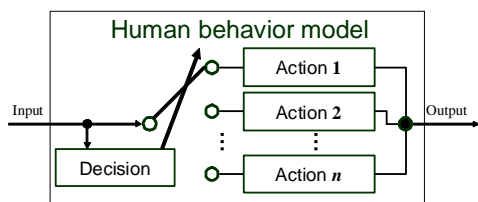


図1 ハイブリッドダイナミカルシステムに基づく人間行動モデル

## 2. 研究の目的

研究代表者らは前述のように、これまでハイブリッドダイナミカルシステムをベースとした人間行動モデルの同定手法および可変インピーダンス制御系設計手法を提案してきた。しかし、この手法は作業員毎に人間行動モデル同定を行う必要がある。事前に用意したアシスト制御系の中から作業員の行動（操作）特性に適したアシスト制御系を選択する方式が実際の使用に適している。また、実際には同じ作業員でも常に同じ操作を行うわけではなく、作業員の操作状態に応じてアシスト制御系を変更するのが望ましい。

そこで本研究では、従来のような確定的な人間行動モデル表現ではなく、確率型モデル

表現が可能な隠れマルコフモデル（Hidden Markov Model - HMM）を用いて作業員分類を行うことを提案し、HMMによる作業員分類の妥当性について、研究代表者らがこれまで提案してきた人間行動モデルに基づく可変インピーダンス制御系設計手法によって各作業員用に設計されたアシスト制御系との分類の類似性について比較検討し、HMMによりオンラインでリアルタイムに、現在の作業特性に適したアシスト制御系選択が可能か検討を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1)本研究では人間行動を表現する確率モデルとして、音声認識分野などで使用され成果をあげている HMM を用いる。HMM は系列データの類似度を尤度により評価することができる。人間の行動特性の類似性評価の指標としてこれを用いることを考えた。本研究では、作業開始時点から現作業時点までの区分系列データを用いてリアルタイムで作業員の行動特性を推定し、現在の作業状態に適したアシスト制御系をオンラインで選択することを目指す。このように提案する行動特性認識器を有するハイブリッド制御系を図2に示す。ハイブリッドシステム構造のアシスト制御系が複数用意されており、行動特性認識器によって現在の行動特性を認識して、適切なアシスト制御系に切り換えることが可能な構造となっている。

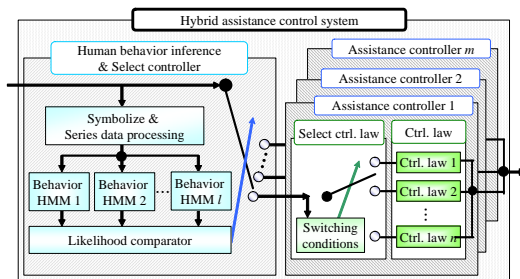


図2 複数のアシスト制御系を有するハイブリッドアシストコントロールシステム

(2) 人間-機械協調型ロボットにおける人間の行動モデル構築の対象として、本申請研究ではパワーアシストシステムを模したロボットを使用することにした。本ロボットは、パワーアシストシステムを用いた重量物搬送と組み付け作業を模したもので、搬送および位置決め作業を行うためのものである。一般に位置決め行動は多自由度の運動であるが、本研究では手法の確立に主眼を置くため、単純化して一次元の位置決め行動を対象とした。また、実際に産業界で実用化されている人間-機械協調型ロボットはいくつかの単軸ロボットを組み合わせたものが多く、多自由度への拡張は容易であると考えられる。図3に示されるようなインピーダンス制御された

単軸リニアロボットを本研究の実験で用いる。作業者はこのロボットに取り付けられた力センサのグリップを握って位置決め操作を行う。ロボットのインピーダンス制御系の制御周期は  $200\mu\text{s}$  である。インピーダンス制御の各パラメータは、仮想質量  $M=10\text{kg}$ 、仮想粘性  $D$  は実験に応じて  $20\sim 80\text{Ns/m}$  に変化し、弾性項  $K$  は使用しない。原点から  $0.3\text{m}$  離れた位置での停止状態から操作を開始し、目標地点への位置決め作業を行い、操作力  $f$ 、変位  $x$ 、速度  $v$  の操作情報を収集する実験を行う。本研究では 20 人の被験者に情報収集のための実験を行ってもらった。実験は、まず 10 回の練習操作を行い、操作に慣れた後に、実験試行を 10 回行った。

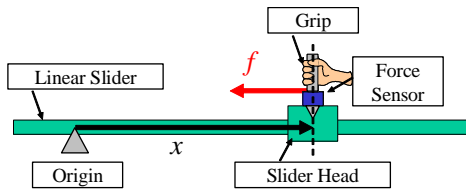


図3 実験用ロボットシステム概観

#### 4. 研究成果

(1)20人の被験者A~Tについて行動特性分類を行う。行動特性分類は、①類似した行動特性の組ごとにHMMを学習する操作、②被験者に対して最大尤度を持つ行動特性の組に分類する操作、の二つの操作を繰り返して行う。最終的に、同一の組に属する確率の高い被験者を同じグループに分類することとした。位置決め行動は基本的に作業開始から作業終了まで一方向にしか遷移しないと考えられるため、HMMは図4で示されるようなLeft-to-rightモデルを採用した。また、隠れ状態数は3とし、シンボル数は経験則的に20と決定した。隠れ状態数については、これ以前の研究代表者の研究において、類似した位置決め行動の人間行動モデルの操作モード数が3であることが確認されていることから3とした。順に遷移する3つの操作モードの中で、3つ目のモードであるモード3が位置決めモードである。本研究では位置決め操作性向上のため可変インピーダンス制御系を採用しており、位置決めモードの仮想粘性  $D_3$  を作業者にとって最適値に設定することで作業者に対してより適切な支援を実現することを目的としている。実験により収集した操作データを k-means を用いてクラスタリ

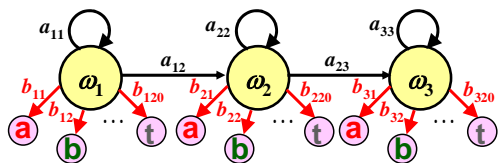


図4 Left-to-right モデル構造 HMM

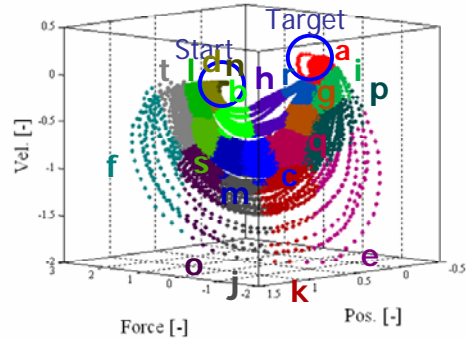


図5 取得データとシンボル化

ングし、コードブックを得て、それを基にシンボル化を行った。シンボル化した際の全操作データとシンボル化の結果を図5に示す。図中、縦軸は速度  $v$ 、左横軸は操作力  $f$  を、右横軸は位置  $x$  を示しており、全ての値は次元を揃えるために正規化した。図中のアルファベット  $a\sim t$  は 20 個のシンボルを示している。このシンボル化したデータを用いて、被験者毎に行動モデルを学習した。

作業開始からモード3直前までの区分操作データを用いたHMMによる被験者の分類結果を、ハイブリッドダイナミカルシステムに基づく区分PWXモデルを用いた確定的な人間行動モデルを用いて設計したアシスト制御系の仮想粘性  $D_3$  設計結果と比較し、HMMによる分類結果の評価を行う。各グループの仮想粘性  $D_3$  の分布を図6に示す。このグラフは各グループにどの被験者が所属しているかを示すと同時に、その被験者に最適とされた仮想粘性パラメータの値を示している。この図より、グループ2、3、7以外ではアシスト制御系のインピーダンスパラメータである仮想粘性  $D_3$  の設計結果が一致している。また、グループ2、7では  $D_3$  は類似した値であり、 $D_3$  の値が離散的に設定されていることを考えると分類結果は妥当である。グループ3のみ設計結果が類似していない。これは、 $D_3=40$  に対応する被験者Jは、実験時の操作のばらつきが大きく、正常なモデル化が行われていないためである。以上より、HMMを用いた分類で同じグループに属する作業者は、対応するアシスト制御系の仮想粘性係数が類似しており、HMMを用いて行動特性を

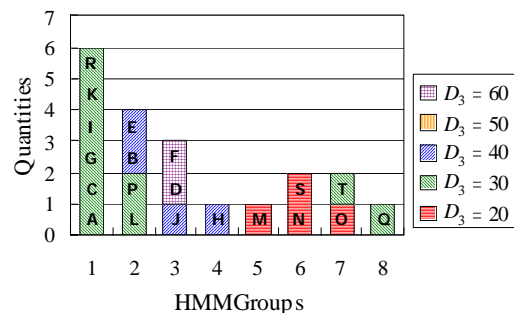


図6 各 HMM グループの分類結果

認識し、適切なアシスト制御系を選択することが可能であることを確認した。

(2)次に、オンラインでリアルタイムに行動特性認識器によってアシスト制御系選択が可能であることを検証するための実験を行った。HMMによる人間行動特性認識は、図6で示される8つのグループに対応してHMMモデルを用意し、行動特性認識を行う。10ms周期で認識を行うこととし、8つのグループの中で最大尤度を示したHMMのグループを現在の被験者の行動特性であるとしてインピーダンス制御系の仮想粘性 $D_3$ を決定する。認識した行動特性に応じて、対応するアシスト制御系を順次オンラインで選択していく。

被験者A~C、HMM構築に加わっていない被験者 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ について行動特性認識器を用いてアシスト制御系選択実験を行った。例として被験者Aの1試行目の各HMMの尤度の時間変化を図7に示す。縦軸は対数尤度、横軸は時間である。8つ全てのHMMグループの対数尤度計算結果を示してある。アシスト制御系のモード3の仮想粘性 $D_3$ を選択する必要がある時点（この試行の場合は、縦線が引かれている0.8秒時点）までに、グループ1、4、7、8の4つの尤度値が高く維持されているのが分かる。最終的に、尤度の一番大きいグループ1が選択され、この場合には仮想粘性 $D_3=30$ と決定し、それに従いインピーダンス制御が行われた。

さらに、アシスト制御を行わない作業データよりオフラインで最適仮想粘性 $D_3$ を設計し、この設計した $D_3$ とオンラインで選択し

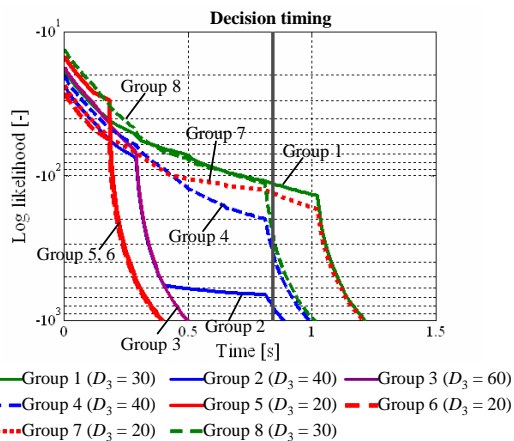


図7 被験者Aの初回試行の各HMMモデルの尤度推移結果

表1 オンライン選択の $D_3$ と設計値の比較

Exam.	On-line selected $D_3$ (HMM group)	Off-line designed $D_3$
A	30(1), 30(8), 30(8), 30(8), 30(8)	30
B	40(4), 40(4), 60(3), 40(4), 40(2)	50
C	30(1), 20(7), 20(7), 30(1), 20(7)	30
$\alpha$	30(1), 30(1), 30(1), 40(2), 40(2)	30
$\beta$	20(5), 30(1), 30(1), 30(1), 30(8)	30
$\gamma$	20(7), 30(1), 30(8), 30(8), 30(8)	30

た $D_3$ を比較する。比較結果を表1にまとめる。括弧内の数字はその試行において選択されたHMMのグループ名である。これより、オンラインで選択した $D_3$ は、オフラインで設計した $D_3$ とほぼ一致することが確認できる。しかし、同じ $D_3$ の値が選択されていても、最大対数尤度を出力したHMMモデルが異なる場合もあり、人間の作業特性のばらつきも確認できる。このように、同様の操作が行われない場合や、作業員 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ のようにHMMの学習に含まれない作業員に対しても、予め用意した複数のアシスト制御系からオンラインで選択することで、適切なアシストが可能である。

このように人間-機械協調型ロボットの可変インピーダンス制御において、確率型行動モデルであるHMMモデルを用いたオンラインでのリアルタイムな人間行動特性認識手法は有効に機能することが確認された。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

①南場友里、奥田裕之、打田正樹、早川聡一郎、土田縫夫、人間-機械協調位置決めシステムにおける隠れマルコフモデルを用いた人間行動モデルの分類、平成19年度電気学会全国大会講演論文集、p.312、4-187 (2008)

②南場友里、打田正樹、早川聡一郎、奥田裕之、鈴木達也、土田縫夫、人間-機械協調型ロボットにおける人間行動モデルと隠れマルコフモデルを用いた支援制御、ロボティクス・メカトロニクス講演会2008、pp.1A1-D13(1)-1A1-D13(2) (2008)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 聡一郎

豊田工業大学・工学部・助教

研究者番号:50288552

(2) 研究分担者

土田 縫夫

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号:40023246

(3) 連携研究者

なし