

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 23 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21680021

研究課題名（和文）直接教示とオンライン学習による作業技能伝達法の理論的・実験的検討

研究課題名（英文）Theory and experiment of skill transfer by direct teaching and online learning

研究代表者

玄 相昊（GEN SOUKOU）

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：30344691

研究成果の概要（和文）：

誰もが直感的かつ安全に作業技能をロボットに伝達する方法を確立するために、ロボット側の自動制御に直接教示という人間の自然な物理的介入を効果的に組み合わせる一手法を提案した。人がデモで示した作業意図と多様体として学習させ、類似の作業を少ない試行回数で達成するアルゴリズムを開発した。さらに、実証実験のために3関節の力制御可能な油圧ロボットを開発し、実際の教示実験により、アルゴリズムの有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

We proposed an intuitive and safe skill transfer method from human to robots. This is done by combining robotic controllers with direct motion teaching technique. The task demonstrated by human operators is represented as a manifold so that the similar task is automatically achieved in a small number of trials. The algorithm is validated on a three-joint force-controllable robot.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	8,900,000	2,670,000	11,157,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボット

1. 研究開始当初の背景

人間が日常生活や生産現場で行う作業（重量物のハンドリング、複数接触を伴う配線作業、2足歩行等）は、負荷や拘束の変動の激しい環境に対して発揮する力の様々な複合「技能」である。これをロボットに代行させ

るとき、想定される拘束条件や負荷変動をその都度考慮してロバスト制御を記述する従来のアプローチは柔軟性に欠き、性能が制御系設計者に左右されるため、熟練工の技能伝達が困難である。

ロボット側の自律制御としては、作業空間の転置ヤコビアンを用いた力制御（逆運動

学・動力学計算が不要)が冗長ロボットに対しても有効であることが最近明らかになりつつあり、申請者はこれに最適接触力分配を組み合わせ、動的に変化する接触状態や多自由度リンク機構の複雑極まりない動力学をいちいち計測・計算することなく、予測に基づいてロバストに複数の接触力を同時制御する手法を発明している。その結果、31自由度の全身の関節トルクを同時に実時間指令し、任意の外乱や不整地の下で動的かつしなやかにバランスするヒューマノイドのデモに世界に先駆けて成功している。本制御法は単独では複雑な作業に適用できるほど万能ではないが、申請者は関節空間の軌道追従制御を重畳するだけで、低速だが比較的複雑な運動も実現できることを実証済みである。

そこで、申請者はこの潜在的な発展性に着目し、力制御によって実時間生成された関節軌道に沿ってダイナミクスと関節剛性を学習することで逐次的に追従精度を上げる手法を考案し、ヒューマノイドの全身運動学習への応用に成功している。このことは、関節軌道を利用すれば、冗長問題を効果的に回避しつつ、類似のタスクを少ない学習回数で達成できる可能性を示唆している。さらに、人の技能学習が教師のアシストによって大幅に促進される事実に着目し、作業空間における教示力場の学習による歩行獲得を試みている。

以上の過程で、教示と自律的学習による技能伝達メカニズムを明らかにすることが学術的、産業応用的に極めて有益と考え、本申請に至った。

2. 研究の目的

ロボットに知能を与えることは難しいが、誰もが直感的かつ安全に作業技能をロボットに伝達する手段はあるはずで、その技術を確立することは学術的にも産業応用的にも極めて重要である。本研究「直接教示とオンライン学習による作業技能伝達法の理論的・実験的検討」は、作業空間における力制御に、直接教示という人間の自然な物理的介入を効果的に組み合わせることにより、複雑な環境においても、作業の詳細を予めプログラムすることなく難易度の高い作業技能「群」を人間からロボットに直接伝授する新しい理論的枠組みを提案し、それを実験的に検証するものである。基本的なアイデアは次の2点である。

(1) 作業空間における力制御は複雑なタスクを単独で達成できるほど万能ではないが、信頼性は高い。そこで、力制御ループに人間の直接教示による介入を許し、その教示力が減る方向に学習することによって、難易度の高いタスク達成に必要なコツをロボットが

人間から抽出する。

(2) 拘束条件、力場、関節軌道群からなる技能ライブラリを自動的に構築し、その相空間的変形によって、新しいが類似の技能を少ない学習試行によって達成する。

3. 研究の方法

本研究では、ロボットと環境との相互作用力(力場)と関節軌道の時空間的發展が作業技能を規定すると考え、人間のアシストを効果的に利用してこれらを同時に学習し、最終段トルク指令において有機的に統合する手法を理論的・実験的に探求する。具体的には期間中に以下の課題を遂行する。



(1) 様々な作業技能を拘束条件、力場、関節軌道と剛性の変化として記述し、技能ライブラリとして実時間でコンパクトに記憶するための理論的枠組みを構築する。

(2) ある拘束条件を想定して計画された力場を主として生成しつつ、作業試行中に提示される実際の拘束条件および実時間生成される関節軌道群の双方を逐次的に最適化するオンライン学習アルゴリズムを開発する。さらに、負荷に応じて軌道追従剛性を適応的に調節する手法を確立する。

(3) 学習試行中に人間のアシスト(外力)によって追加教示を行い、教示力の減る方向に学習を加速する手法を提案し、学習の安定性と安全性の両面から多角的に研究する。

4. 研究成果

(1) 第一段階 (H21)

【理論】全体計画図で示したとおり、基本的な課題から段階的に進める正面ルートと、既存の手法をベースに全ての課題を一通り進めるバックアップルートの2本立てで研究を進めた。

前者の正面ルートにおいては、作業技能の表現方法に注力した。具体的に、3自由度マニピュレータの接触と非接触が混在する周期的作業の場合を例にとり、教示力場を関節トルクから同定するシミュレーションを行った結果、作業範囲に限定すれば全ての姿勢においてほぼ正確に力場を同定することができた。また、簡便な接触センサを併用す

ることで、接触力もほぼ正確に同定することが可能であることがわかった。

後者のバックアップルートにおいては、関節軌道に基づく簡易版学習アルゴリズムおよび教示方法の検討を行った。具体的には、教示される軌道群をそのままの形で記憶し、目標を通過する軌道を特定して、作業空間上の位置と力の繰り返し学習制御を適用することで、あらかじめ獲得した軌道まわりで学習が収束することを確認した。

【実験】理論検証のための堅牢な学習ロボットの開発に着手した。具体的には油圧式の3関節脚式ロボットを試作し、力制御等の基本的な性能を確認した。



(2) 第二段階 (H22)

【理論】

人間がロボットを直接教示する際の高次元力場を記憶するための技能ライブラリの構築方法について集中的な検討を行った。具体的には、非線形多様体の埋め込みアルゴリズムを作業力場に適用する方法を検討した。周期運動については指定経由点を指定速度で通過する軌道を生成させることをシミュレーションによって確認した。また、異なる経由点を通過する類似軌道を、教示の初動から瞬時に特定・再現することも可能となった。一方、接触力分布および関節トルクセンサからのトルク誤差によって、力場を抽出する方法を昨年度確立できたが、これを状態に含めた多様体を構成する作業が残されていた。力場の不連続性に対応するために状態軌道に明示的なジャンプを許容する方法を試みた。

【実験】

教示・学習用の3自由度ロボットを用いて、人がロボットに運動を教示するタスクを行い、空中における滑らかな運動についてはタスク抽出および類似タスクへの汎化に成功した。引き続き、アシストによって追加的にタスクを改善することを試みた。これに伴い、安全上の配慮を行いながら、人が学習に介入するための実験ソフトウェア環境を構築した。

(3) 第三段階 (H23)

【理論】

引き続き、作業空間における力場を含めた多様体への埋め込みアルゴリズム導出を行った。不連続性が存在する場合の取り扱いに関しては課題を残したままとなったが、追加学習については、作業中に人が介入することで、運転を停止することなく他の軌道を学習することができることをシミュレーションで確認した。理論の証明にはいたらなかったが、当初計画していたアルゴリズムの7割は完成した。これで本課題は終了となったが、引き続き理論の整備と論文発表を行う予定である。

【実験】

油圧シヨベルを用いた作業教示アルゴリズム実証実験を行ってきた。既に昨年度に導出したアルゴリズムを用いて、人が行う操作を学習し、類似の動作を自動的に行うデモに成功し、教示アルゴリズムの有効性を確認した。現在、実際の掘削作業への応用を検討している。

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7件)

Matsubara, T., Hyon, S. and Morimoto, J., Real-time stylistic prediction for whole-body human motions, Neural Networks, vol.25, pp.191-199, 2012 (査読有り).

Matsubara, T., Hyon, S. and Morimoto, J., Learning parametric dynamic movement primitives from multiple demonstrations, Neural Networks, vol. 24, issue 5, pp.493-500, 2011 (査読有り).

松原崇充, 玄相昊, 森本淳, 個性を考慮した周期的全身運動の予測, 電子情報通信学会論文誌, vol.J94-D, no.1, pp.344-355, 2011 (査読有り).

Matsubara, T., Noda, T., Hyon, S. and Morimoto, J., An optimal control approach for hybrid actuator system, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.300-3005, 2011 (査読有り).

Hyon, S., Morimoto, J., Matsubara, T., Noda, T. and Kawato, M., XoR: Hybrid drive exoskeleton robot that can balance, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and

Systems, pp.3975-3981, 2011 (査読有り) .

Matsubara, T., Hyon, S., Morimoto, J., Learning parametric dynamic movement primitives from multiple demonstrations, 17th International Conference on Neural Information Processing, vol.6443, pp.347-354, 2010 (査読有り) .

Matsubara, T., Hyon, S., Morimoto, J., Learning stylistic dynamic movement primitives from multiple demonstrations, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp1277-1283,2010 (査読有り) .

[学会発表](計6件)

Hyon, S., Hybrid drive exoskeleton robot: Compliant control and system identification, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Workshop, 2011.10.26-28.

松原崇充, 玄相昊, 森本淳, 規範軌道の多様性を考慮した非線形力学系による運動記述の学習法: ロボットによる見まね学習への応用, 第13回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS 2010), 信学技法, 東京大学生産技術研究所(東京都), 2010.11.5.

森本淳, 野田智之, 玄相昊, ヒトと運動アシストロボットにおける共通の状態空間の抽出: 外骨格ロボット制御への応用, 第13回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS 2010), 信学技法, 東京大学生産技術研究所(東京都), 2010.11.4.

松原崇充, 玄相昊, 森本淳, パラメトリック運動学習プリミティブ: 規範軌道の多様性を考慮した見まね学習, 第28回日本ロボット学会学術講演会(RSJ 2010), 名古屋工業大学(愛知県), 2010.9.22.

有木由香, 森本淳, 玄相昊, 模倣学習のための明確なラベル付けのない運動プリミティブの抽出, 第33回日本神経科学会(Neuroscience 2010), 神戸コンベンションセンター(兵庫県), 2010.9.3.

Matsubara, T., Hyon, S., Morimoto, J., On-line stylistic prediction for human periodic motions, 第33回日本神経科学会(Neuroscience 2010), 神戸コンベンションセンター(兵庫県), 2010.9.2

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玄 相昊 (GEN SOUKOU)
立命館大学・理工学部・准教授
研究者番号: 30344691

(4) 研究協力者

森本 淳 (MORIMOTO ATSUSHI)
ATR 脳情報研究所・主任研究員
研究者番号: 10505986

松原 崇充 (MATSUBARA TAKAMITSU)
奈良先端科学技術大学院大学・情報技術科学研究科・助教
研究者番号: 20508056