

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760331

研究課題名(和文) ロボットによる人間の技術の抽出とその転写と教示アルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Development of Algorithm for Abstraction and Teaching of Human Skills by Using Robot

研究代表者

境野 翔 (SAKAINO, Sho)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：70610898

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：まず、外骨格型ロボットを用いることで、大掛かりな装置を必要としない容易かつ高精度な人間の慣性・摩擦・質量などのパラメータの同定に成功した。

次に、ハンマを用いた人間の打撃動作から人間の動特性を分離することで、加速度情報として運動技術を抽出した。これを他のロボットの動特性と再結合することにより、運動技術をロボットへの転写が可能になり、複雑な式を解くことなく人間のような各関節の干渉を陽に用いる複雑な運動を実現した。結果、モータが発揮できる最大速度を大きく上回る手先先端速度を実現した。

最後に、別の被験者の身体を外骨格型ロボットによって適切な運動へと誘導して運動技術を教示することに成功した。

研究成果の概要(英文)：First, by using an exoskeletal robot, physical parameters such as inertia, friction, and mass of humans can be identified without large equipment such as MRIs. Therefore, the identification is easy and low in cost.

Second, hitting skills of humans using hammers are extracted by subtracting the effect of the dynamics from the hitting motion. Then, the skills are unified to dynamics of a robot and the skills are transferred. Therefore, complicated motion that explicitly exploits interference of joints is obtained without solving difficult equations. As a result, the robot can produce faster end-effector speed than its maximum actuator speed.

Third, the skills are transferred to other subjects by using an exoskeletal robot. The skills are unified to the dynamics of the subjects, and arms of the subjects are guided to appropriate motion. Hence, the subjects can learn the skills. The way to teach the skills is very similar to the case of skill teaching of sports for the beginners.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：技術伝承 ハプティクス ロボティクス メカトロニクス 外骨格型ロボット 力制御 人間の同定  
技術の抽出

### 1. 研究開始当初の背景

人間の身体制御技術は、古くよりスポーツの分野で研究されてきた。しかし、近年では少子高齢化による労働力の減少とそれに伴う熟練技術の喪失を解決すべく、産業界からも技術の定量化と伝承が叫ばれるようになった。クレーン操作や溶接の技術伝承など、産業技術の伝承の先駆的な研究が報告されており、それらは概して二分できる。作業環境を再現し練習させる手法と、ビジュアルフィードバックを用いて作業軌道を教示する手法、である。しかし、前者は練習環境を用意するだけなので初学者に適切な技術が身につくはずもない。また、人間のモーションの多くは環境との接触動作に伴う力の制御が必要であるため、後者のビジュアルフィードバックによる教示では技術の教育としては不十分である。

研究代表者はこれまで、ロボットのモーションが適切な座標変換を施すことによって、位置制御と力制御を用いて完全に分離して記述可能であることを示した。位置(速度)制御は電気回路における電流制御に、力制御は電圧制御に相当するため、ロボットのモーションが双対な二つの物理量によって記述されていることを明らかにした。換言すれば、ロボットのモーションの再現が座標変換の選択問題と、位置と力の制御系設計論とに完全に分離され、複数のモーションの合成も、座標変換行列の代数的演算で実現できる。

これを応用し、人間のモーションを座標変換によって位置制御と力制御に分離できれば、人間の技術を抽出できるのではないかと、この着想に至った。ここで、外骨格型ロボットを用いることで、人間のモーションの位置応答と力応答をリアルタイムで計測できるため、ロボットを用いて技術を定量化することを目指した。抽出した技術をロボットへ転写すれば熟練技術者の代替となることができる。また、装着型ロボットによって初学者へと技術の教育も実現できる。よって、熟練技術の喪失の問題を解決できると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では1. 技術の抽象化、2. ロボットへの転写、3. 人間への教示、の三つを実現する。第一に、座標変換を用いて人間の環境操作技術抽出アルゴリズムを開発する。人間の身体は多くの冗長性を有するため、ある目的に対して一意にモーションを決定できない。しかし、熟練技術者は「流れるような一連の動作」を体得し適切なモーションを選択する。つまり、優れた技術は一連の経路に依存する。前述のとおり人間の技術は位置情報である「軌道」だけでは決定されず、軌道を抽出するだけでは技術は抽出できない。よって、本研究では、経路に依存するモーションを非ホロノミック拘束にて実現し、従来の座標変換による拘束をホロノミック拘束とし

て内包して、人間の技術の抽象化を拘束というより高位の概念で記述する。第二に、抽出した技術をロボットへと転写し、ロボットに人間のような巧みな技術を実現させる。技術を座標変換・拘束として抽出すればロボットの動特性と分離して設計できるので、これは容易に実現される。第三に、ロボットが教師として人間に技術を伝承するためのアルゴリズムを開発する。スポーツでは初学者が熟練者に手取り足取り適切なモーションを教わり習熟する手法が広く知られている。これと同様に、ロボットが熟練技術者の拘束を人間に直接触れて教示する。これも軌道だけを教示する手法と異なり、力情報をも教示可能な点に提案手法の優位性がある。

### 3. 研究の方法

本研究課題は、ロボットを用いた人間の技術の抽象化、技術のロボットへの転写、人間への技術の教示を目指し、次の4つの計画を遂行した。それぞれ、多自由度ロボットの開発、人間の技術抽象化アルゴリズムの開発、人間の技術のロボットへの転写手法の開発、ロボットを用いた人間の技術の伝承手法の開発、である。

平成24年度の第一の目標が多自由度ロボットの開発である。本研究ではハンマの打撃動作を解析し、人間の打撃技術を抽出することを目指す。打撃動作のように、各関節軸の連動が必要な動作、衝撃力を発生させる動作は、どちらも現在の産業ロボット制御において最も困難な動作であるため、打撃動作を解析することは、人間の運動技術の究明に迫る好例である。

打撃動作の解析のために、肩・肘・手首の平面3自由度を有する外骨格型ロボットを製作した。外骨格型とすることで、人間の動作を阻害することなく、動作中の位置情報と力情報をリアルタイムに計測することが可能になる。ここで、モータは電流情報からセンサレスで力応答値を推定可能であるため、センサとしては関節位置センサのみが必要である。

まず人間の物理パラメータを同定した。次に、外骨格型ロボットを用いて計測した、打撃動作の位置・力情報の時系列データから、同定した物理パラメータによって生じる力を減算することにより、打撃動作のための操作力のみを抽出した。最終的に、抽出した操作力を拘束によって抽象化した。

抽象化された打撃技術に、ロボットの動特性を加算することによって、打撃動作をロボットへと転写した。研究代表者はこれまですでに、他のロボットのために設計した位置・力制御系を、座標変換を用いて抽象化することで容易に転写することができることをあらかじめしている。よって、の研究が達成

に伴い はすみやかに実現された。

抽出した打撃技術に、被教示者の動特性を加算することにより、被教示者に適した打撃技術とすることができる。よって、被教示者に適した打撃技術へと、外骨格型ロボットを用いて被教示者の腕を誘導することにより、技術を教育した。

#### 4. 研究成果

本研究では大別すると、4つの成果を上げることができた。それぞれ、外骨格型ロボットを用いた人間の動特性同定、人間の技術抽象化アルゴリズムの開発、人間の技術のロボットへの転写手法の開発、ロボットを用いた人間の技術の伝承手法の開発、である。

人間の慣性・摩擦・質量などの物理パラメータを同定する方法は、MRIを用いた医学的なアプローチと、画像情報を用いて同定する手法の二つがしばしば用いられている。しかし、前者は大掛かりな装置が必要であるため、測定のための労力が多く、また装置自体が非常に高コストとなる問題がある。後者の手法では、体内の情報を見た目からだけでは完全には判断することができないため、測定誤差が大きいことが問題となっている。体重計と組み合わせることで、測定精度を向上させる手法も提案されているが、性能は限られている。

一方、本研究では外骨格型ロボットを用いて人間の物理パラメータを同定する手法を提案した。ロボット自体の物理パラメータを同定する手法は既に多岐にわたって提案されている。本手法ではそれを応用し、外骨格型ロボット単体での物理パラメータと、人間が外骨格型ロボットを装着した状態での物理パラメータを同定し、差分を取ることで人間の物理パラメータを同定する。本手法は、従来提案済みの産業用ロボットの高精度同定手法をそのまま応用できるため新たなアルゴリズムを開発する必要のないにもかかわらず、短時間に高精度な同定ができることに優位性がある。また、ロボットの価格はMRIよりはるかに安いと、同定の低コスト化を実現できた。さらに、ロボットより制御入力を与えて人間の物理パラメータを同定するため、PE性を満足する制御入力を確実に与えることが可能であり、複雑な物理モデルで人間をモデル化したとしても、その同定を非常に容易に実現できる。

まず、ハンマを用いた人間の打撃動作時の位置応答と力応答を外骨格型ロボットによって測定した。このとき、外骨格型ロボットが検出する力情報には、慣性力や重力による影響が含まれている。よって、人間の打撃制御の操作力のみを抽出するために、において同定したパラメータを用いて、慣性力や重

力を減算した。得られた操作力に慣性行列の逆行列を乗算することによって、最終的に操作に必要な加速度情報へと抽象化した。ここで、慣性行列は、位置の関数であるため、軌道によって変更されるパラメータであることに留意されたい。すなわち、軌道のパラメータである慣性行列を座標変換行列として操作力を抽象化することで、軌道に依存する非ホロノミックな拘束として人間の打撃動作の抽象化に成功した。また、最終的に得られた加速度情報は、位置情報と力情報を統一的に記述できる物理量であるため、位置制御と力制御の双方が必要な人間のモーションの記述に適した物理量であるといえる。

平面の打撃動作は2自由度の制御であるため、3自由度ロボットは冗長系である。よって、目標位置への打撃を実現する制御入力は無数に存在し、最適な打撃制御をロボットに実現させることは困難である。これまでの産業用ロボットでは、システムを線形化することで各関節軸を非干渉化して制御を容易にしたうえで、制御則を導出していった。一方、人間は学習によって、各関節の干渉を陽に用いる複雑な運動制御の準最適解を運動技術として取得している。よって、本研究では加速度情報の拘束として抽出された人間の運動技術を、ロボットの動特性と再結合することによりそのロボット固有の運動技術とし、複雑な式を解くことなく各関節軸の干渉を陽に用いた非線形制御則を実現した。結果として、提案技術を用いることで、モータが発揮できる最大速度を大きく上回る手先先端速度を実現することに成功した。すなわち、従来の線形制御では不可能な大きさの衝撃力をハンマで発生させることに成功した。

加速度情報として抽出したある人間の打撃技術を、他者(初学者)の慣性行列と再結合することで、個人の身体機能に適した操作力へと変換した。次に、初学者に外骨格型ロボットを装着させ、外骨格型ロボットにこの操作力を発揮させることで適切な打撃動作へと初学者の腕を誘導させた。これはまさに、スポーツにおける初学者への教示と同等の教育であり、外骨格型ロボットを用いた技術教育システムの確立に成功した。

今後は、さらに外骨格型ロボットを多自由度化し、一般的な三次元運動の抽出とそのロボットへの転写と人への教示を実現すること、習熟度に応じた誘導力の調整、などより現実的なアルゴリズムの開発が求められる。

#### 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)

[雑誌論文](計 6 件)

1. Sho Sakaino, Tomoya Sato, Kouhei

- Ohnishi: " Position Constrained Bilateral Control by Oblique Coordinate Control Considering Priority of Tasks, " IEEJ Journal of Industry Applications, vol.2, No. 6, pp. 298-305, 2013.
2. **Sho Sakaino**, Tomoya Sato, Kouhei Ohnishi: " Force Based Disturbance Observer for Dynamic Force Control and a Position/Force Hybrid Controller, " IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol.8, No. 5, pp. 505-514, 2013.
  3. **Sho Sakaino**, Tomoya Sato, Kouhei Ohnishi: " A Novel Motion Equation for General Task Description and Analysis of Mobile-Hapto, " IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, No. 7, pp. 2673-2680, 2013.

[学会発表](計 24 件)

1. **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: " Position/Force Decoupled Bilateral Communication without Force Control in Slave Side by Using Multirate Control, " in Proc. of the 13rd IEEE AMC, pp. 717-722, 2014.
2. Takeshi Kaneko, Shota Ito, Toshiaki Tsuji, **Sho Sakaino**: " Haptic Data Compression for Rehabilitation Databases, " in Proc. of the 13rd IEEE AMC, pp. 657-662, 2014.
3. Daiki Takahashi, Takayuki Furuya, **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: " Experimental Evaluation of Bilateral Control of Velocity Control System Using Electric and Hydraulic Actuators, " in Proc. of the 39<sup>th</sup> IECON, pp. 4118-4123, 2013.
4. **Sho Sakaino**, Toshiaki Tsuji: " An Extended Jacobian Matrix and Multirate Control for Bilateral Control between Different Time Resolution Systems, " in Proc. of the 38<sup>th</sup> IECON, pp. 2656-2661, 2012.
5. 川尻皓之, **境野翔**, 辻俊明, " 画像と機能的電気刺激を組み合わせた運動技能教示システムの開発, " 平成 26 年産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-110, MEC-14-098, 東京, 3月 10-11 日, 2014.
6. 山崎貴大, **境野翔**, 辻俊明, " 外骨格ロボットアームを用いた人のモーションのロボットへの転写及び人への教示, " 平成 26 年産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-121, MEC-14-109, 東京, 3月 10-11 日, 2014.
7. 山崎貴大, **境野翔**, 辻俊明, " 外骨格ロボットアームを用いた水平方向と重力方向における複数人の打撃動作の検証, " 平

成 25 年度電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2-25, 山口, 8月 28-30 日, 2013.

8. **境野翔**, 辻俊明, " 可動範囲の制限された多自由度マニピュレータの外乱積分値を用いた動特性同定, " 平成 25 年産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-13-034, 千葉, 3月 7-8 日, 2013.
9. 古谷峻千, **境野翔**, 辻俊明, " 多自由度ロボットアームを用いた電気-油圧アクチュエータ間のバイラテラル制御, " 平成 25 年産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-13-045, 千葉, 3月 7-8 日, 2013.
10. 山崎貴大, **境野翔**, 辻俊明, 橋本卓弥, " 人の接触動作時の動特性の抽出と解析, " 平成 25 年産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-13-067, 千葉, 3月 7-8 日, 2013.
11. **境野翔**, 辻俊明, " 可動範囲を考慮した多自由度マニピュレータの動特性同定法, " 第 30 回日本ロボット学会学術講演集, 403-4, 札幌, 9月 17-20 日, 2012.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

名称: 位置・力制御装置、位置・力制御方法及びプログラム

発明者: 大西公平, **境野翔**, 野崎貴裕

権利者: 大西公平, **境野翔**, 野崎貴裕

種類: 特許

番号: 2013-194704

出願年月日: 2013 年 9 月 19 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://sakainolab.ees.saitama-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

境野翔 (SAKAINO, Sho)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 70610898

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: