

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02236

研究課題名(和文) リニアモータを用いた脳機能障害診断を革新するハプティクス研究

研究課題名(英文) Research of Haptics for Innovating Diagnosis of Brain Dysfunction Using Linear Motors

研究代表者

桂 誠一郎 (Katsura, Seiichiro)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：00401779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、工学、神経心理学、神経内科学の密な連携の下で、高次脳機能障害の診断支援に寄与するハプティクス技術の研究を行った。力触覚の検出と呈示に関する技術は人間の動作の定量化をもたらし、状態把握に応用が可能になる。リニアモータ使用に基づくハプティック診断システム、上肢筋特性の定量計測システム等の開発を行い、精度の高い3次元ステイフネスや上肢筋特性のデータ取得を可能にするなど、電気工学と神経心理学をつなぐ基盤構築につながった。

研究成果の概要(英文)：In this research, haptic technology was applied to diagnosis support of higher brain dysfunction under collaboration of engineering, neuropsychology, and internal medicine. Since haptic technologies for sensing and reproducing force can quantify human motions, it is possible to recognize physical conditions. We developed a haptic diagnosis system and quantitative measurement system to obtain 3D stiffness and muscle characteristics of upper limb, etc. As a result, we constructed the fundamentals for integrating electrical engineering and neuropsychology.

研究分野：電気電子工学

キーワード：人間支援 抽象化理工学 モーションコントロール リニアモータ 脳機能障害

1. 研究開始当初の背景

脳外傷や脳血管障害によって高頻度で生じる失行(運動可能であるにもかかわらず目的に合った運動ができない)や失書(文字を書くことのみが選択的にできない)は、発症後時間が経過しても消えにくい症状であり、かつ他の神経心理学的症状と比較して有効なリハビリテーション方法が提案されていない。特に失書は識字率の高い我が国において患者の Quality of Life (QOL) を低下させる大きな要因となっている。さらにその診断は未だ医療従事者の経験に基づく主観的かつ定性的なものにとどまっているために、客観化や共有化も困難となっている。今後の高齢化社会における医療・福祉体制の充実化のためには、診断の定量化を早期に実現しなければならない。

一方、電気機器システムを使用したモーションコントロール分野においては、運動障害を回復させるためのリハビリテーションなどの実現に向けて多くの研究が進められている。これまでに、加速度制御により高精度に速度や力をロバストに制御するための基本学理が明らかにされ、複数の電気機器システムを用いて力触覚を双方向に伝送するハプティクス技術の応用が進んでいる。特に、作用反作用を再現する力制御と同時性確保のための速度制御を直交座標空間上で設計し、加速度で統合する方法論が確立されており、人間の力触覚の延伸が可能になった。

このハプティクス技術は「再現性」と「反復性」が求められるリハビリテーションに対して親和性が非常に高く、かつ速度と力という定量的なデータを取得可能であるという利点がある。したがって、この工学技術を応用することで、脳機能障害の診断の革新に寄与できるのではないかとこの着想に至った。

2. 研究の目的

モーションコントロールを基盤としたハプティクスは、電気機器システムを用いて人間の力触覚の延伸を可能にする革新的な技術である。本研究は、この力触覚の検出と呈示に関する技術を特に高次脳機能障害の診断支援に結びつける挑戦的な研究提案である。失行や失書をはじめとする高次脳機能障害は感覚系と運動系の複合的な損傷により発症するが、その診断は未だ医療従事者の経験に基づく定性的なものにとどまり、共有化も困難となっている。力触覚の検出と呈示の双方向性を有するハプティクス技術の特長は、まさに脳機能障害の診断に対して親和性が高く、感覚系と運動系の双方について症状の定量化をもたらす。

さらに本研究では、電気機器システムを直接人間の状態把握に応用するという方法論を一般化し、電気工学と神経心理学をつなぐための応用抽象化と総合デザインに関する学理を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 平成 27 年度

ハプティック診断システムのための多自由度リニアモータドライブの設計と試作

開発するハプティック診断システムは、研究代表者が開発に成功している書字動作を再現可能なモーションコピーシステムのコンセプトを応用したものである。筆を持つ部分と筆先の部分それぞれにリンクを連結し、その根元に軌道と力加減を抽出するためのアクチュエータが取り付けられる。動作を抽出する際に操作に違和感が生じないように機構部に格段の配慮をし、軽量かつ機械的損失が少なくなるようにする。さらに、非線形性の強い摩擦等の外乱については極力機構面で排除するよう、駆動を支持する案内部にボールスライダを採用する。動作の再現における力加減はアクチュエータの電気的特性により決定されるため、力分解能・周波数応答が良く、かつ線形性が高いコアレス・コギングレスのリニアモータをアクチュエータとする。リニアモータについては磁石配置、巻線配置、推力特性等を含め、設計ならびに試作を行う。以上のように機械的・電気的な総合デザインにより、スムーズな書字動作のデータ取得を可能にする。

ハプティック診断システムの力制御系の開発

本研究では、モーションコントロールにおいて確立されている外乱オブザーバを援用し、力覚センサレスで高精度かつ広帯域な力触覚情報の取得を実現する。本研究ではリニアモータを駆動する電流制御系を周波数帯域の観点から新たに設計し直し、力覚検出周波数帯域の向上を目指す。

制御系構築後、健常者および非健常者による予備試験を実施し、動作データの抽出を行う。予備試験では、点から点への到達運動や円運動から動作データ(軌道・力加減)をそれぞれ取得し、ヒューマンインタフェースとしての評価を行い、設計にフィードバックする。

(2) 平成 28 年度

零距离バイラテラル制御系の開発

零距离バイラテラル制御とは従来遠隔操作に用いられてきたマスタ・スレーブ構造に基づいたバイラテラル制御を一つの道具内(筆など)に構成する概念であり、手先からみてマスタとスレーブが常に一体化するための制御が実現される。したがって、マスタとスレーブに対してアクチュエータ座標系において同時性を確保するという従来のバイラテラル制御の概念を拡張し、手先から道具先端までマスタとスレーブが一直線に並ぶような座標系を定義する必要がある。その上で作用・反作用の力制御と速度の同期を図るという新しい制御手法の実装に関して検討を行う。

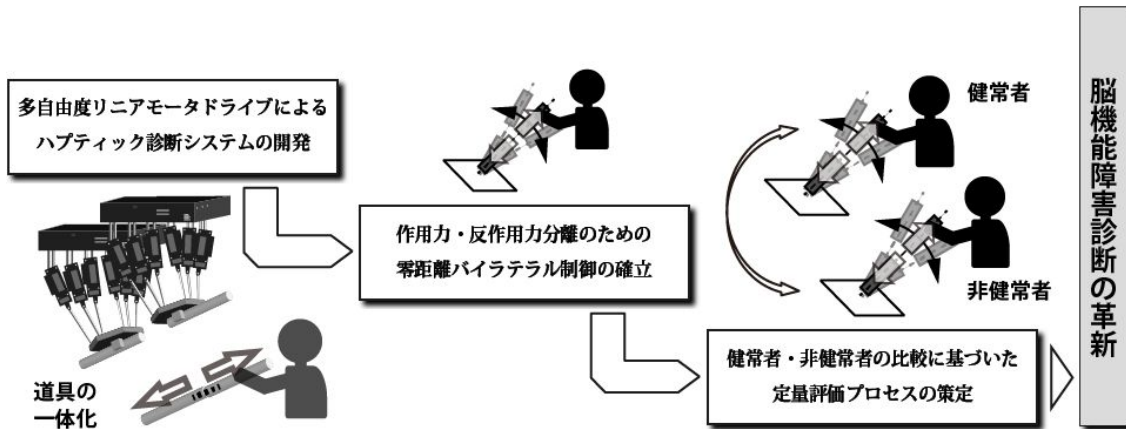


図1 研究計画・方法

健全者群のデータベース化，特徴量の抽出

ハプティック診断システムの零距离バイラテラル制御の実装後、特徴量の抽出方法について検討する。本研究では動作中の力触覚が取得できるため、動作データからキネマティクス（位置・速度・加速度・躍度）に加えてダイナミクス（力触覚）の観点より評価手法の開発を行う。従来は筆記された書字の形状のみや、キネマティクスまでの評価までは行われていたが、あくまで結果論の追究に限られていた。本研究により、動作を発現させる根本の原因となる力触覚に基づいたダイナミクスが把握可能となる。脳の頭頂葉に損傷がある患者は動作における躍度が増加するという知見が得られており、躍度と力触覚の相関を周波数解析等により明らかにすることで、従来のキネマティクス空間の評価指標の多次元化も図る。

(3) 平成 29 年度

健全者群のデータベースの充実化

開発したシステムを用いて健全者を対象とした試験を重点的に実施することで、健全者群のモデルを構築する。まず、健全者の上肢の状態をスティフネスにより評価することで、3次元の楕円体モデルを構築する。さらに、到達運動、往復・円運動に加えて、かなや記号などの複雑な形状の書字動作の抽出も行い、静的・動的なモデルの構築を目指す。

特徴量の差異の導出

動作データから、動作の特徴を表現する抽象化手法について検討を進める。これにより、これまで医療従事者の定性的判断にとどまっていた脳機能障害診断を定量的するための指針の提案につなげる。さらに、健全者群と患者群の特徴量の差異から、逆に動作において差異が生じやすい動作要素を抽出する。得られた知見を検査におけるベンチマークとすることで、診断の効率化を目指す。また、このことは脳機能障害患者向けのリハビリテーションの実施可能性を広げることにもつながる。

4. 研究成果

(1) ハプティック診断システム

ハプティック診断システムは、感覚系と運動系の定量評価を行うためのものであり、本研究では特に上肢による書字動作の抽出を目的として開発された。開発したシステムはアクチュエータに力分解能・周波数応答が良く、かつコアレス・コギングレスのリニアモータを採用した。さらに、多自由度駆動を実現するための機構についてもパラレル型、およびガントリー型から構成される複数の異なるタイプのシステムを開発し、操作性や精度に関する基本性能の比較を行った。

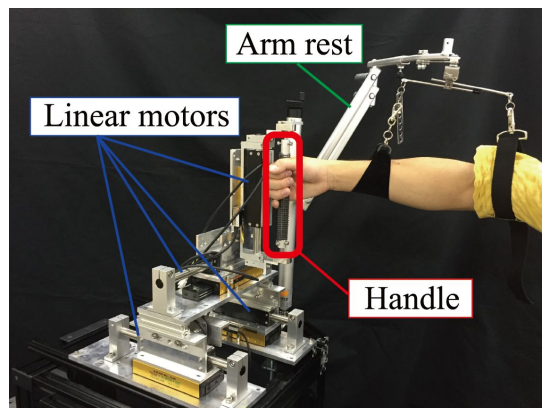


図2 ガントリー型ハプティック診断システム

(2) ハプティック診断システムの力制御系の開発

本研究では、外乱オブザーバによる力覚センサレスな力触覚情報の取得を行った。また、リニアモータの電流制御系を周波数帯域の観点から設計し直し、力覚検出帯域の向上を実現した。制御系構築後、健全者および非健全者による予備試験を実施し、動作データの抽出を行った。予備試験では、点から点への到達運動や円運動から動作データ（軌道・力加減）をそれぞれ取得し、ヒューマンインタフェースとしての評価を行い、設計にフィードバックすることで操作性向上を図った。さらに、人間の腕の筋骨格特性である手先スティフネスについて三次元計測を実施し、健全者群のデータベース作成に着手した。

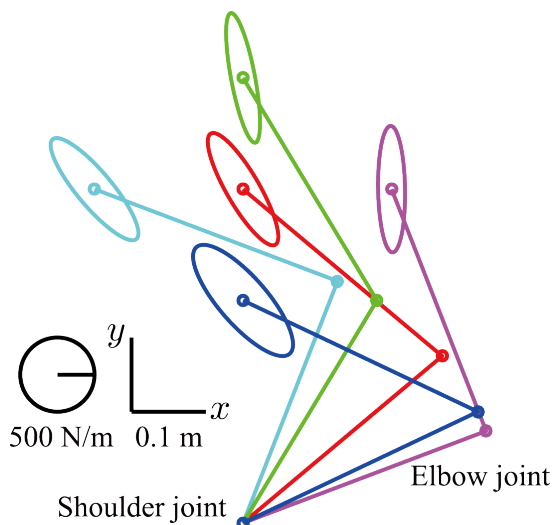


図3 スティフネス計測結果

(3) 零距离バイラテラル制御系の開発

零距离バイラテラル制御とは、従来遠隔操作に用いられてきたマスタ・スレーブ構造に基づいたバイラテラル制御を一つの道具内（筆など）に構成する新しい概念であり、手先からみてマスタとスレーブが常に一体化するための制御が実現される。手先から道具先端までマスタとスレーブが一直線に並ぶような座標系を定義し、その上で作用・反作用の力制御と速度の同期を図るための制御手法の実装に関して検討を行った。

(4) 上肢筋特性の定量計測システムの開発

本研究で得られた知見に基づき、上肢筋特性を定量的に計測するシステムの開発を行った。アクチュエータ駆動により肘関節を動作させることで、力覚を時々刻々計測することを可能にしている。従来は Modified Ashworth Scale として、脳障害に起因する痙縮や固縮度合いを評価する手法が取り入れられているが、これは検者の主観的かつ定性的評価にとどまっていた。本システムの使用により、症状の客観化をもたらし、診断補助、診断訓練等への応用が期待できる。



図4 上肢筋特性の定量計測システム

(5) 健常者群のデータベース化、特徴量の抽出

「ハプティック診断システム」で得られた動作データから特徴量を抽出する方法について検討を行った。本研究では動作中の力触覚が取得できるため、動作データからキネマティクス（位置・速度・加速度・躍度）に加えてダイナミクス（力触覚）の観点より評価することが可能になる。本年度は、特に時間や空間に拘束をかけた状態において筆記動作を行い、学習過程を観察する試験を実施した。動作の基本要素である力触覚に基づいたダイナミクスが把握できるため、健常者群を対象とした動作データベースを拡充することで、患者の動作データとの相違を定量化することが期待できる。

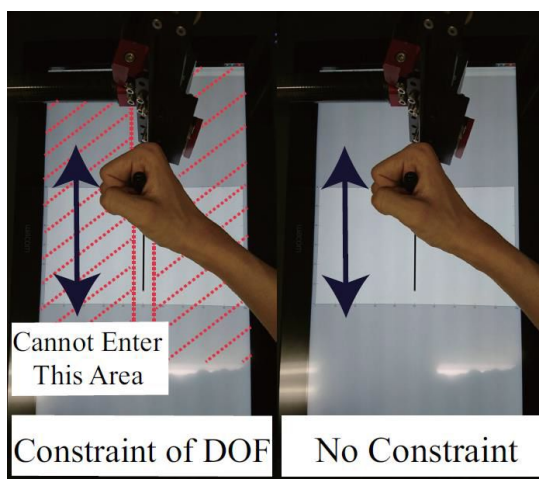


図5 自由度拘束と動作学習に関する試験

データベース構築にあたっては、将来的に患者のデータベースとも親和性があることが求められるため、研究分担者、平塚共済病院、多摩川病院の言語聴覚士らとともに検討を行った。ここで収集する動作の種類や速さ、大きさ等は、可変オートエンコーダの利用に基づいて解析することで、低次元化された特徴量を得ることを可能にしている。動作の軌道および力情報を位相空間等により統一的に抽象化することで、動作の数理科学的な意味理解につながることを期待される。したがって、動作の持つ特徴を可視化することができ、動作機能回復のためのリハビリテーションの効率化やモチベーション向上につながる。

(6) まとめ

3年間の研究期間において計31回の研究ミーティングを実施し、研究代表者、分担者、協力者間での成果の共有、逐次確認を行い、工学、神経心理学、神経内科学の密な連携の下で研究を推進した。

本研究で得られた成果については、研究代表者が国際シンポジウム International Symposium on Applied Abstraction and

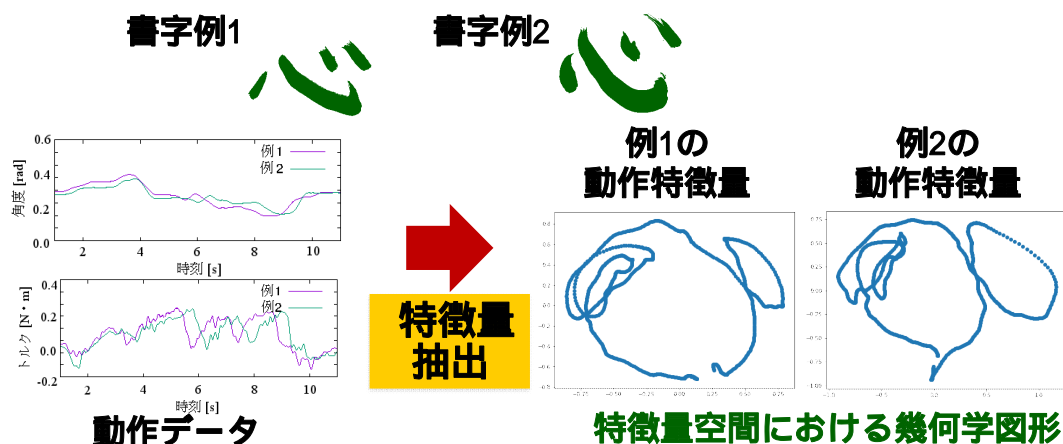


図 6 オートエンコーダの利用に基づく動作における特徴量の抽出

Integrated Design, AAID2017 を主宰し、発表を行った。また、工学関連の国際会議のみならず、Neuroscience や Society for the Neural Control of Movement をはじめとする神経心理系の国際会議にて発表を行った。さらに、システム コントロール フェアへの出展を行い、得られた研究成果を広く公表した。

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 13 件)

- (1) Kazumasa Miura, Ayaka Matsui, Seiichiro Katsura:
 “Synthesis of Motion-Reproduction Systems Based on Motion-Copying System Considering Control Stiffness,”
 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, No. 2, pp. 1015-1023, April, 2016.
 (査読有り)
 DOI: 10.1109/TMECH.2015.2478897
- (2) Masaki Takeya, Yusuke Kawamura, Seiichiro Katsura:
 “Data Reduction Design Based on Delta-Sigma Modulator in Quantized Scaling-Bilateral Control for Realizing of Haptic Broadcasting,”
 IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 3, pp. 1962-1972, March, 2016.
 (査読有り)
 DOI: 10.1109/TIE.2015.2512233

- (3) Kazumasa Miura, Ayaka Matsui, Seiichiro Katsura:
 “High-Stiff Motion Reproduction Using Position-Based Motion-Copying System with Acceleration-Based Bilateral Control,”
 IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 12, pp. 7631-7642, December, 2015.
 (査読有り)
 DOI: 10.1109/TIE.2015.2458957
- (4) Seiichiro Katsura, Hiroki Onoyama:
 “Mixed Reproduction of Physical Human Operation and Data-Based Motions by Frequency Filtering,”
 IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 9, pp. 5799-5806, September, 2015.
 (査読有り)
 DOI: 10.1109/TIE.2015.2450737
- (5) Yuki Nagatsu, Seiichiro Katsura:
 “Design Strategies for Motion Reproduction Based on Environmental Disturbance Compensation,”
 IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 9, pp. 5786-5798, September, 2015.
 (査読有り)
 DOI: 10.1109/TIE.2015.2448062

[学会発表](計 59 件)

- (1) Kazutaka Takemoto, Yoshihiro Itaguchi, Seiichiro Katsura:
 “Influence of Robots with Constraint on Degree of Freedom in Motor Learning,”
 Society for the Neural Control of Movement, NCM2017-DUBLIN, 1page, May 2-5, 2017.

- (2) Kazutaka Takemoto, Seiichiro Katsura, Yoshihiro Itaguchi, Hiroshi Yoshizawa, Kazuyoshi Fukuzawa:
 “Consideration of Effective Element about Motion Training with Robot,”
 The 1st International Symposium on Applied Abstraction and Integrated Design, AAID2017-YOKOHAMA, No. RS-1-2, pp. 1-3, March 9-10, 2017.
- (3) Yukako Tani, Ko Igarashi, Seiichiro Katsura, Fumiya Nakai, Chiharu Yamada, Yoshihiro Itaguchi, Hiroshi Yoshizawa, Kazuyoshi Fukuzawa:
 “New Measurement System of Human Arm Stiffness for Clinical Evaluation,”
 Neuroscience 2016-SAN DIEGO, No. 441, November 12-16, 2016.
- (4) Yukako Tani, Seiichiro Katsura, Chiharu Yamada, Yoshihiro Itaguchi, Kazuyoshi Fukuzawa:
 “3-Dimension Analysis of Human Arm Stiffness in Reaching Movement Using Arm Robot,”
 The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON '15-YOKOHAMA, pp. 4591-4596, November 9-12, 2015.
- (5) Seiichiro Katsura:
 “Motion-Copying System for Perfect Reproduction of Human Motion,”
 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM2015-BUSAN, Invited Talk, July 7-11, 2015.

〔図書〕(計2件)

- (1) 中村 雅一 監修, 桂 誠一郎 ほか著:
 “フレキシブル熱電変換材料の開発と応用”,
 シーエムシー出版, 2017, 254 ページ.
- (2) 暦本 純一 監修, 桂 誠一郎 ほか著:
 “オーグメンテッド・ヒューマン”,
 エヌ・ティー・エス, 2017, 512 ページ.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: アクチュエータ及びアクチュエータの
 動作制御方法
 発明者: 桂 誠一郎, 三浦 一将
 権利者: 学校法人 慶應義塾
 種類: 特許
 番号: 特願 2016-162097
 出願年月日: 2016 年 8 月 22 日
 国内外の別: 国内

〔その他〕

アウトリーチ活動情報

- (1) 平成 27 年度 日本学術振興会 ひらめき
 ときめきサイエンス～ようこそ大学
 の研究室へ～ KAKENHI (研究成果の社会
 還元・普及事業)
 「モーションコピーロボットであな
 たも書道の達人に！」
- (2) 平成 28 年度 日本学術振興会 ひらめき
 ときめきサイエンス～ようこそ大学
 の研究室へ～ KAKENHI (研究成果の社会
 還元・普及事業)
 「夢のある未来のロボット社会をデザ
 インしよう！」
- (3) 平成 29 年度 日本学術振興会 ひらめき
 ときめきサイエンス～ようこそ大学
 の研究室へ～ KAKENHI (研究成果の社会
 還元・普及事業)
 「夢のある未来のロボット社会をデザ
 インしよう！」

ホームページ

慶應義塾大学 理工学部 桂研究室

<http://www.katsura.sd.keio.ac.jp/>

研究者情報データベース

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/172/0017141/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桂 誠一郎 (KATSURA, Seiichiro)
 慶應義塾大学・理工学部・准教授
 研究者番号: 00401779

(2) 研究分担者

福澤 一吉 (FUKUZAWA, Kazuyoshi)
 早稲田大学・文学学術院・教授
 研究者番号: 00156762

吉澤 浩志 (YOSHIZAWA, Hiroshi)
 東京女子医科大学・医学部・講師
 研究者番号: 70318070

板口 典弘 (ITAGUCHI, Yoshihiro)
 慶應義塾大学・理工学部・訪問研究員
 研究者番号: 50706637