

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：32629

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26702023

研究課題名(和文)筋の至適方向に基づく上肢リハビリテーション手法の開発：ロボットによる支援と定量化

研究課題名(英文)Development of an Upper Limb Rehabilitation Method Based on the Preferred Direction of Muscle: Support and Quantification by Robotics

研究代表者

植山 祐樹 (Ueyama, Yuki)

成蹊大学・理工学部・助教

研究者番号：30710800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、脳卒中による片麻痺等の運動障害を対象とし、筋の至適方向(PD: Preferred direction)に基づいた上肢運動機能のリハビリテーション手法の開発を目的とした。本研究により、筋骨格系の影響を考慮した脳卒中片麻痺患者の運動機能障害モデルを構築し、それにより筋のPDに着目した新たなリハビリテーション手法を提案した。さらに、提案手法を適用することで上肢の運動機能を回復を実現するリハビリテーション支援ロボットを開発した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to construct a robotic rehabilitation method to restore motor function in stroke survivors. Thus, a motor dysfunction model that considered the musculoskeletal system of individuals with hemiplegia was developed. This model was used to create a rehabilitation method based on the preferred direction of muscle, and a robotic system was constructed to execute a protocol applying it to restore upper limb motor function.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：ロボティクス リハビリテーション 生体工学 神経科学 筋肉生理 至適方向 作業療法 脳卒中片麻痺

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで、サルおよびヒトを対象に、ロボット技術を利用した計測実験、および数値実験に基づいた計算論の両面から、生体が脳内で行っている運動制御のメカニズムについて研究を行ってきた。その中で、上肢の筋の活動が手先の運動方向に関係した特徴的な時空間パターンとなり、それが最適制御則によって再現されることを明らかにした(図1)(参考文献、)。また、このような運動方向に依存した活動選択性は、大脳皮質の一次運動野における神経活動でも見られることが知られており、至適方向(PD: Preferred direction)と呼ばれ(参考文献)、近年ではブレイン・マシン・インタフェース(BMI)技術を用いたロボットアームの操作にも利用されている(参考文献)。一方で、脳卒中等によって脳が損傷を受けることで運動機能が損なわれたとしても、リハビリテーションによってある程度の機能回復を臨むことができる。これは、脳の可塑性の性質により、損傷した一次運動野のPDの影響を補償するために、残存する神経細胞がリハビリテーションによって学習した結果として捉えることができる。その際、筋活動のPDは、筋の配置等によって決定される機械的なPDに従わず、一次運動野のPDに強く依存していることが知られているため(図2)(参考文献、)。この関係性を利用し、筋活動のPDを直接的に学習させることで一次運動野のPDの学習を促進し、運動機能の早期回復が実現できると考えられる。

本研究では、以上の考えに基づき、PDを手がかりとしたリハビリテーション手法を提案し、その実現に必要なリハビリテーション支援ロボットを開発することを目指した。

<参考文献>

Ueyama Y. Effects of Cost Structure in Optimal Control on Biological Arm Movement: A Simulation Study, **Lecture Notes in Computer Science**, vol. 8226, pp.

241-248, 2013.

Ueyama Y, Miyashita E. Optimal Feedback Control for Predicting Dynamic Stiffness during Arm Movement, **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, vol. 61(2), pp. 1044-1052, 2014.

Georgopoulos AP, et al. On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex, **Journal of Neuroscience**, vol. 2(11), pp. 1527-1537, 1982.

Velliste M, et al. Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding, **Nature**, vol. 453, pp. 1098-1101, 2008.

Herter T, et al. Characterization of Torque-Related Activity in Primary Motor Cortex During a Multijoint Postural Task, **Journal of Neurophysiology**, vol. 97, pp. 2887-1899, 2007.

Kurtzer I, et al. Primate Upper Limb Muscles Exhibit Activity Patterns That Differ From Their Anatomical Action During a Postural Task, **Journal of Neurophysiology**, vol. 95, pp. 493-504, 2006.

2. 研究の目的

本研究では、脳卒中片麻痺等の運動機能障害を対象とし、筋のPDに基づいた上肢運動機能のリハビリテーション手法、およびそのための支援ロボットの開発を目的とする。前述のように、筋活動のPDは、関節の機械的なPDには従わず、一次運動野の神経細胞のPDの分布と類似した特性を示すことから、筋のPDは神経細胞のPDの分布と密接な関係性があると考えられる(図2)。そのため、脳の損傷を伴う運動機能障害において、筋への運動指令を生成する一次運動野内の神経活動のPDが変調することで筋のPDも変化し、正常な運動機能が損なわれると推測される。このことから、ロボットによって筋活動に基づいた外力を上肢に加えることで筋のPDを任意の状態へと誘導され、脳内におけ

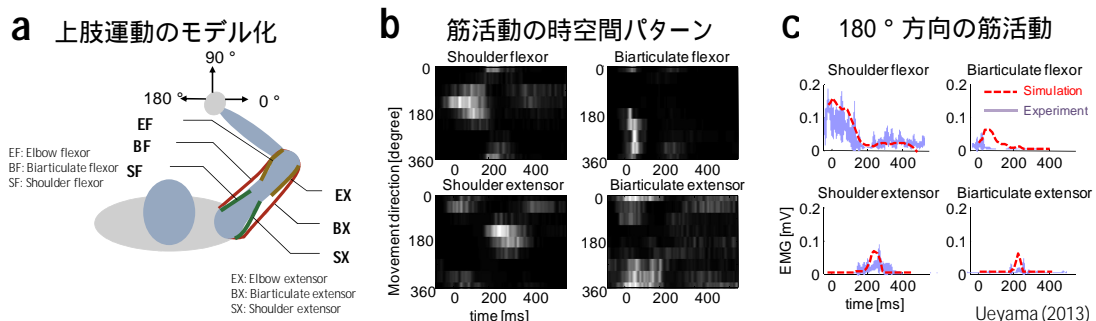


図1. 運動方向に対する筋活動の変化。(a) 上肢のモデル化。(b) サル上肢の筋における活動電位(EMG)の時空間パターン。運動方向に依存した活動パターンを示す。(c) 180°方向に対するEMGとシミュレーションによる予測値。最適制御即により、筋の運動方向に依存した活動パターンが再現可能。

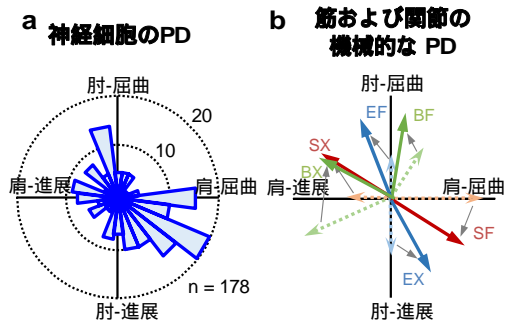


図 2. 運動における各段階での至適方向 (PD: Preferred direction)。 (各データについては参考文献、を参照。) (a) 一次運動野の神経細胞における PD の分布。(b) 筋および関節の機械的な PD。実践および点線が、それぞれ筋および関節の PD を示す。筋と関節の機械的な PD は一致しないため、筋の PD は神経細胞の PD の分布の影響を強く受けていることが推測される。

る PD の学習および回復が促進されることが期待できる。

本研究は、以上の仮説に基づき、正常な運動機能を回復するための効率的および定量的なリハビリテーションの実現を目指し、実施されたものである。

3. 研究の方法

本研究では、脳の障害によって筋の PD が変調されるという仮定に基づき、筋活動を入力とする上肢のリハビリテーション支援ロボットを開発し、それによって外力を加えることで筋活動の PD を任意の状態へと誘導し、脳に対して正常な運動機能の再学習を促進させることを目指した。

まず、脳卒中片麻痺患者に対するリハビリテーション効果について理論的に検証するために、神経細胞の PD および筋活動に着目することで、運動機能障害に関する計算モデルを構築した。続いて、その計算モデルに基づき、効果的なリハビリテーション手法について提案する。最後に、上肢に対して、筋活動の PD を補正可能な外力を印加できる外骨格型の支援ロボットを開発し、基本的なヨボ実験を通して、提案するリハビリテーション手法の有効性について検討した。

4. 研究成果

本研究課題における成果として、(1)脳卒中片麻痺による運動機能障害モデルの構築およびリハビリテーションの効果の理論的検討、および(2)新たなリハビリテーション手法の提案ならびにそれを実現することのできるロボット装置の開発の2点がある。以下にそれぞれの研究成果について示す。

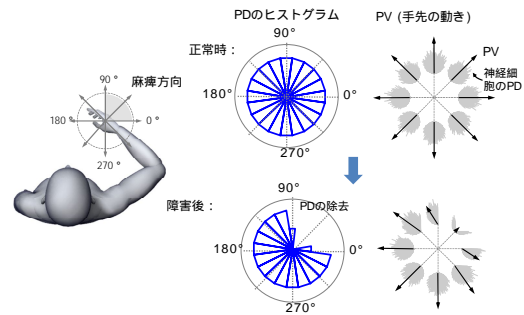


図 3. 手先座標系での運動機能障害モデル。脳卒中による片麻痺によって右斜め上 (45° 方向) への運動が障害されたと仮定すると、その方向に PD を有する神経細胞を取り除くことで手先運動の麻痺を PV で表現することができる。

(1) 脳卒中による運動障害モデルの構築

一次運動野は、運動の生成において主要な役割を担っていることは古くから知られており、特に手先の運動は複数の神経細胞の PD から計算される細胞集団ベクトル (Population vector: PV) で表現することが可能である (参考文献)。このことから、これまでに脳卒中後における片麻痺の運動機能障害モデルとして、PD および PV に基づいたモデルが提案されている (参考文献)。

そのモデルでは、脳卒中片麻痺により、ある運動方向への手先運動の麻痺が生じているときには、その運動方向に PD を有する神経細胞が死滅していると仮定する (図 3)。これにより、麻痺方向への運動障害、およびその近傍の運動方向に対する手先運動の偏軌を残された神経細胞集団の PV として再現することができる。しかし、脳卒中片麻痺患者で見られるような筋活動の特異的な活動をこのモデルでは再現することができない。

しかし、これは一次運動野の神経細胞の PD が手先座標系において均等に分布しているとの仮定に基づいているが、近年の報告から、実際には PD に偏りがあり、PV が必ずしも実際の手先の運動を表現していないことが指摘されている (参考文献)。加えて、一次運動野では手先の情報のみではなく、肩・肘等の関節の感覚情報のフィードバックに基づき、運動指令が生成されていると考えられる (参考文献)。

そこで、PV による手先座標系での運動機能障害モデルを改良し、単純な人工神経回路モデルを用いた脳卒中片麻痺の運動機能障害モデルを提案した (図 4)。提案モデルでは、関節空間での一次運動野神経細胞の PD の分布に基づいた神経細胞モデルを構築し、目標トルクから神経細胞を介して、筋指令および出力トルクへと変換する。さらに、阻害される運動方向への PD を有する神経細胞を取り除くことで、上肢の麻痺を再現した。

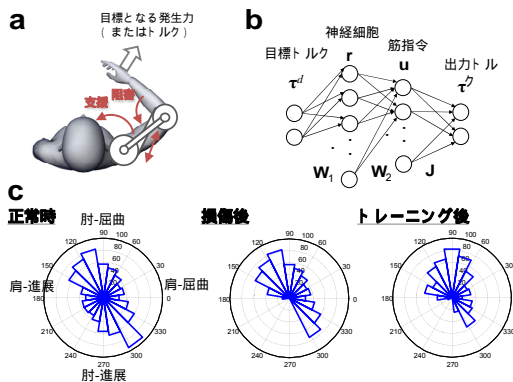


図 4. 筋骨格系における運動機能障害モデル。(a) 関節運動訓練によるリハビリテーション。(b) 神経回路モデル。(c) 神経細胞のPDの関節トルク平面における極座標ヒストグラム。左からそれぞれ、正常時、障害後、および訓練後におけるPDの分布の変化を示す。

さらに、目標トルクに出力トルクを一致させるように神経回路を再学習させたところ、出力トルクの再学習は可能であったものの(図5) PDの分布は正常時と全く異なる形状を示した。その際、筋の活動パターンも正常時とは異なることから(図6) トルクに着目したリハビリテーションのみでは、正常な運動機能を回復するには不十分である可能性が示唆された。

以上の成果により、提案モデルでは、既存のモデルで考慮されていなかった筋骨格系の影響が組み込まれており、それによって、障害による幾何学的な運動の変化に加え、筋活動の変調も検討することが可能となる。したがって、提案モデルは、今後、リハビリテーション手法の検討や理論的な検証を行う上で、非常に有益なモデルとなると考えられる。

(2) 新たなリハビリテーション手法の提案

(1)の成果より、上肢のリハビリテーションにおいて、既存のロボット療法等で実施されていたような関節トルクの補助だけでは筋の活動パターン、および神経細胞のPDを正常時に回復するのが困難であると考えられる。そこで、筋電位(EMG)信号を利用し、筋のPDを介して、神経細胞に作用させることを目指した新たなリハビリテーション手

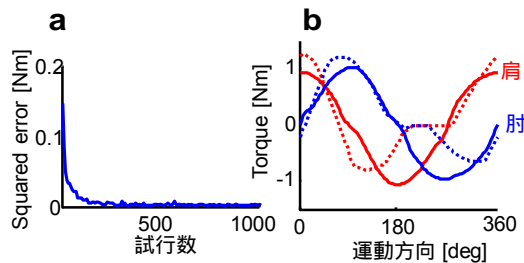


図 5. 運動機能障害モデルに対する関節運動訓練の効果。(a) 目標トルクと生成トルクとの誤差の二乗平方和。(b) 訓練終了後における肩および肘の関節トルク。赤線および青線はそれぞれ、肩および肘の関節トルクを示す。また、点線および実線はそれぞれ、障害後および訓練終了後の関節トルクを示す。

法を提案した(図7)。

提案する方法では、EMG信号をフィードバックとし、筋のPDを補正する外力をロボット装置によって各関節に与えることで、神経細胞のPDの回復をさせることが可能になると考えられる。これは、筋活動のPDが神経細胞のPDと強く結び付いているという仮定から導き出されるものである。

さらに、提案手法を実現するために、本研究では上肢リハビリテーション支援ロボットを開発した(図8)。開発したロボットは3つのモータを有し、肩、肘および手首関節に独立したトルクを生成することで、運動の支援、または運動負荷を与える事が可能である。その際に各関節はモータに接続されたワイヤによって駆動され、ロボットに内蔵された組み込み型のコンピュータによって制御される。さらに、肘および肩関節をハードウェア的に連動させ、協調動作を実現する二関節筋機構を有しており、筋活動に基づいたリハビリテーション手法に関するアイデアを検証することができると考えている。

若干名の健常被験者に対して、予備実験を実施した。その結果、ロボットによる肩および肘関節への外的な作用により、筋のPDを変調することが可能であった。今後、被験者対象を増やすことで、十分なデータを取得するとともに、早急に論文にまとめ、国際学術論文誌に投稿する予定である。さらに、当該研究で提案したリハビリテーション手法の実用化に向け、今後もエビデンスを蓄積するために様々な異なる条件下での実験、および

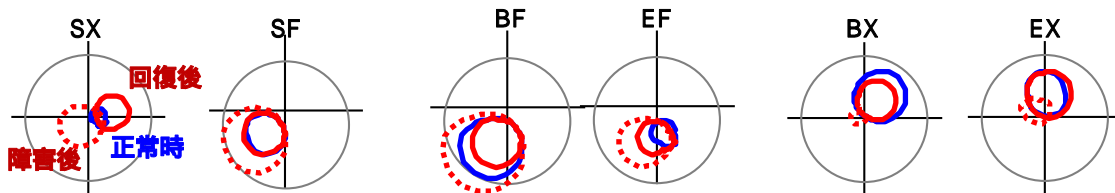


図 6. 関節の運動方向に対する筋活動パターンの変化。青実線、赤点線、および赤実線はそれぞれ、正常時、障害後、およびリハビリテーション訓練後を示す。

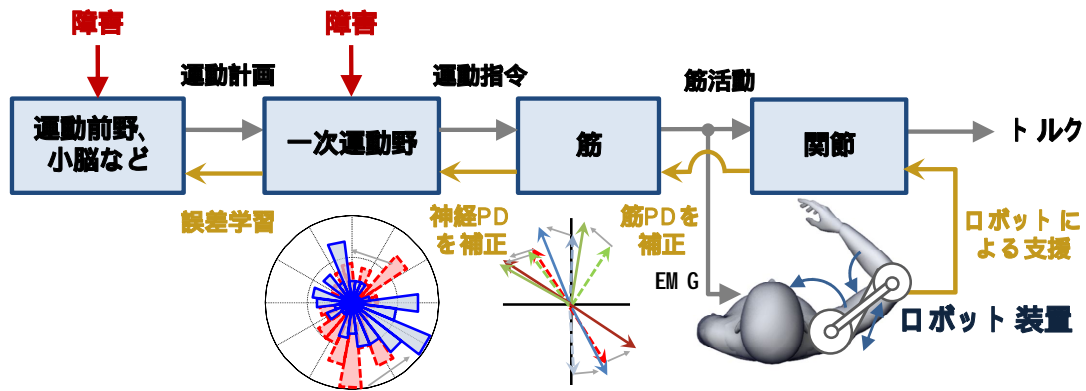


図 7. 筋活動の PD を使用したリハビリテーション。脳卒中等による脳神経の死滅により、神経細胞集団の PD の分布が変調され、正常な筋活動が阻害されると仮定。筋活動 (EMG) に基づき、患者の上肢関節に対して、変調された筋の PD を補正するような外力をロボットによって加える。それにより、筋の PD を介し、神経細胞の PD が正常な状態の分布に補正される。

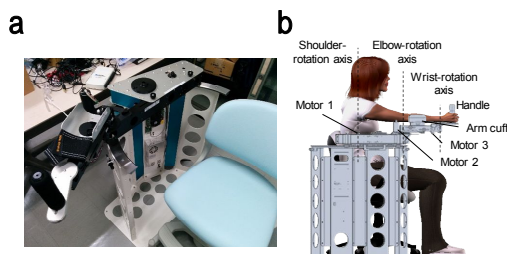


図 8. 開発した上肢リハビリテーション支援ロボット。(a) 実機写真。(b) 側面図。肩、肘および手首の 3 関節に対して、独立した外的トルクが印加可能。

検証を進めていく予定である。

<参考文献>

Georgopoulos AP, et al. Primate motor cortex and free arm movements to visual targets in three-dimensional space. II. Coding of the direction of movement by a neuronal population, **Journal of Neuroscience**, vol. 8(8), pp. 2928-2937, 1988.

Reinkensmeyer DJ, et al. Modeling reaching impairment after stroke using a population vector model of movement control that incorporates neural firing-rate variability, **Neural Computation**, vol. 15(11), pp. 1619-2642, 2003.

Scott SH, et al. Dissociation between hand motion and population vectors from neural activity in motor cortex, **Nature**, vol. 413(6852), pp. 161-165, 2001.

Pruszynski JA, et al. D Primary motor cortex underlies multi-joint integration for fast feedback control, **Nature**, vol. 478(7369), pp. 387-390, 2011.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

Ueyama Y. Optimal feedback control to

describe multiple representations of primary motor cortex neurons, **Journal of Computational Neuroscience**, 2017 (印刷中).

DOI: 10.1007/s10827-017-0650-z

(査読有り)

Ueyama Y. System identification of neural mechanisms from trial-by-trial motor behaviour: modelling of learning, impairment and recovery, **Advanced Robotics**, vol. 31(3), pp. 107-117, 2017.

DOI: 10.1080/01691864.2016.1266966

(査読有り)

植山祐樹. 範囲:リハビリテーションを計算理論で理解する, **地域ケアリング**, vol. 18(4), pp. 94-98, 2016.

(査読無し)

植山祐樹. リハビリテーションの計算理論, **Bio Clinica**, vol. 30(12), pp. 96-100, 2015.

(査読無し)

Ueyama Y. A Bayesian Model of the Uncanny Valley Effects for Explaining the Effects of Therapeutic Robots in Autism Spectrum Disorder, **PLOS ONE**, vol. 10(9):e0138642, pp. 1-12, 2015.

DOI: 10.1371/journal.pone.0138642

(査読有り)

Ueyama Y. Mini-max feedback control as a computational theory of sensorimotor control in the presence of structural uncertainty, **Frontiers in Computational Neuroscience**, vol. 8(119), pp. 1-14, 2014.

DOI: 10.3389/fncom.2014.00119

(査読有り)

[学会発表](計 4 件)

Ueyama Y. A Model of Motor Impairment after Stroke for Predicting Muscle Activation Patterns, **The 22nd International Conference on Neural**

Information Processing (ICONIP2015), Part II, Lecture Notes in Computer Science, vol. 9490, pp. 432-439, Istanbul (Turkey), November 2015.

DOI: 10.1007/978-3-319-26535-3_49

(査読有り)

Ueyama Y. A Computational Model of Anti-Bayesian Sensory Integration in the Size-Weight Illusion, **The 21st International Conference on Neural Information Processing (ICONIP2014), Part.II, Lecture Notes in Computer Science**, vol. 8835, pp. 76-83, Kuching (Malaysia), November 2014.

DOI: 10.1007/978-3-319-12640-1_10

(査読有り)

Ueyama Y. Optimal feedback gain indicating the preferred direction, **The 37th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society**, P2-119, Yokohama (Kanagawa), September 2014.

(査読無し)

Ueyama Y. A Computational Study of Robotic Therapy for Stroke Rehabilitation Based on Population Coding, **The 2014 International Conference on Brain Informatics and Health (BIH2014), Lecture Notes in Artificial Intelligence**, vol. 8609, pp. 290-300, Warsaw (Poland), August 2014.

DOI: 10.1007/978-3-319-09891-3_27

(査読有り)

[その他]

オンラインデータベース (ModelDB)

<http://modeldb.yale.edu/185338>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

植山 祐樹 (UEYAMA, Yuki)

成蹊大学・理工学部

システムデザイン学科・助教

研究者番号 : 30710800