

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03200

研究課題名（和文）3次元機能回復モデル規範型リハビリシステムの開発による麻痺手使用機会の向上

研究課題名（英文）Increasing the use of paralyzed arm by rehabilitation system based on the 3 dimensional motor recovery model

研究代表者

井澤 淳（Izawa, Jun）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：20582349

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,660,000円

研究成果の概要（和文）：日常生活において、麻痺によって低下した運動スキルは選択されない傾向にあるが、これは麻痺を受けたスキルの使用機会を奪い、学習性の不使用を導く。本研究では上肢運動を例に、運動機能の回復とスキル選択が相互作用を行うような計算論的モデルを提案しシミュレーションによる検証を行った。このモデルはHebbの学習則、内部モデル学習、強化学習の3つの要素から構成されており、機能回復を3つの軸で捉えることが可能である。また、上肢訓練用のロボットマニピュラムを構築し、学習機能の推定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は運動学習の計算論の最近の成果に基づいて運動機能回復に計算論の観点から光をあて、数理的な理解と理論に基づいた制御を可能とするものである。複雑で理解することが難しい機能回復の問題を、運動学習の計算論の観点から整理することで、ロボットによるリハビリテーションへ応用可能な形式で整理する。これにより、工学における設計論の問題に帰着させることが可能になる。本期間内に、計算論の提案や健常被験者による検証実験を行った。また、リハビリテーションに係る各研究会において、計算論の重要性に関して講演を行った。

研究成果の概要（英文）：An impaired motor skill as a result of damage in the brain tends to be unchosen in daily life, which potentially causes a decrease of use of the impaired motor skill and thus yields learned non-use, in the end. Here, we proposed a computational model to explain this process and simulated it for a limb motor control and grasping. This model is composed of Hebb's learning rule, internal model learning, and reinforcement learning, whereby we can capture the recovery process according to three independent axes. We also developed a robotic manipulandum, which may give an assistive force environment for people to identify how well the brain forms the requested motor skills.

研究分野：計算論的神経科学 運動制御 認知科学

キーワード：計算論的神経リハビリテーション 運動制御・学習

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高齢者の増加や療法士の負担軽減などの観点からリハビリテーション用ロボットが注目を浴びており、国外ではベンチャー企業が多数設立されている。しかし、全ての出版論文をまとめたメタ分析によれば、ロボリハは従来方法に比べてやや劣る成績しかあげておらず、その潜在能力を十分に引き出していない。それは何故か？我々は、この問題がリハ用ロボットそのものの問題では無く、むしろ「機能回復」が応用可能なレベルで十分に理解されていないからだと考えた。これまで療法士の「技能」に依存してきたリハビリテーションを「医工学」の領域へ拡張するためには、「機能回復」のシステム工学的理解が必要不可欠である。

代表者は「逆モデル」に代表される従来の運動学習モデルが、運動学習に伴う運動スキルの変化を説明出来ない事を突き止め、世界で初めて「運動学習の再最適化の原理」を提案し、行動実験によってエビデンスを蓄積してきた。これを発展させ、(A)小脳(B)大脳基底核(C)一次運動野の各脳機能部位を、それぞれ(A)教師あり学習(B)強化学習(C)Hebb 学習則に対応付けることで、各部位の損傷が再最適化を通じて運動障害を生成する3次元脳機能障害モデルを提案、疾患例による検証実験を通じエビデンスに基づく理論を確立した。

これを発展させ、機能回復のモデルを構築するという着想に至った。従来研究では、「機能回復」は損傷によってトリガーされた Hebb 学習の亢進による皮質脊髄路の神経ネットワークの再組織化として理解される。しかし、この従来モデルの最大の欠点は、脳損傷後の運動では「学習性不使用(Learned non-use)」に代表される「補償行動・代償行動」が顕著なので、皮質脊髄路の再編成と運動機能の回復は一对一の関係にはならないことである。一方、代表者は、脳機能障害が「再最適化」を通じて多様な運動障害を生成するメカニズムを明らかにする過程で、機能回復と運動学習の類似性に気付き、学習性不使用の理解にこそ「再最適化の原理」が必要不可欠であるという着想を得た。この新しい発想に基づく3次元機能回復モデルは、3つの学習則に基づく状態方程式で表現できるため、これら3変数のアンバランスとして「学習性不使用」を再現することが出来る。これにより Hebb 学習だけでは捉えられなかった「学習性不使用」のメカニズムを、システム論的にかつ応用可能なレベルで理解することができる。

2. 研究の目的

脳卒中片麻痺に対するリハビリテーションでは学習性不使用などの代償行動が顕著なため目標となる運動の訓練が困難になる。皮質脊髄路の再編成に着目した従来型神経リハビリテーション研究では、この学習性不使用の神経基盤を明らかにすることは出来なかった。そこで本研究では、代表者が確立した「運動学習の再最適化原理」に基づいて、運動野・小脳・基底核が担う異なる3種類の学習アルゴリズムのバランスに着目した新しい機能回復モデルを構築し、学習性不使用のメカニズムをシステム工学の立場から解明する。この工学的モデルを用いれば、行動から潜在的な不使用を推定し、それをロボットリハビリテーションに反映させることで不使用を克服・予防することが可能である。この新しいアプローチに基づいて、代償行動の統制を目的とする「計算論規範型ロボットリハビリテーション」の研究基盤を確立する

3. 研究の方法

この研究では「学習性不使用」が発生するメカニズムをシステム工学の立場から解明し、その統制(克服・抑制)手法を開発する。これをロボットリハビリテーションに適用し、患者を対象とした検証実験を行う。

大別して次の3段階に分けて研究計画を立てる

- (1)「学習性不使用」の計算理論と健常被験者による「不使用」の再現
- (2)「不使用変数の推定技術」「不使用の統制技術」の開発と健常被験者による検証実験
- (3) 開発した手法をロボリハへ適用し、脳卒中片麻痺疾患例を対象とした効果の検証

全体を通じ、モデルと実験結果の整合性を吟味することでロボリハ効果の脳内基盤を明らかにする。

4. 研究成果

脳卒中による麻痺からの運動機能回復に関するモデル化を行った。モデル化の対象とするのは以下のような状況である：指による把握運動を対象とする。ちいさな対象物を掴む際、健常時では人差し指と親指を用いた対立運動による把握を行う。このような対立運動による精密把握に対して、親指を屈曲させたまま人差し指と親指の付け根により対象物を把握する運動を代償把握と呼ぶ。脳卒中によって運動関連領域にダメージを受けた場合、手指の筋に麻痺が生じ把握運動に障害を受けるが、訓練を繰り返すことにより運動が回復する。この際、学習の初期には、代償把握に頼った把握を行う。しかし、最終的には訓練によって手指に関する脳内表現が回復し、目標とする把握運動が回復する。

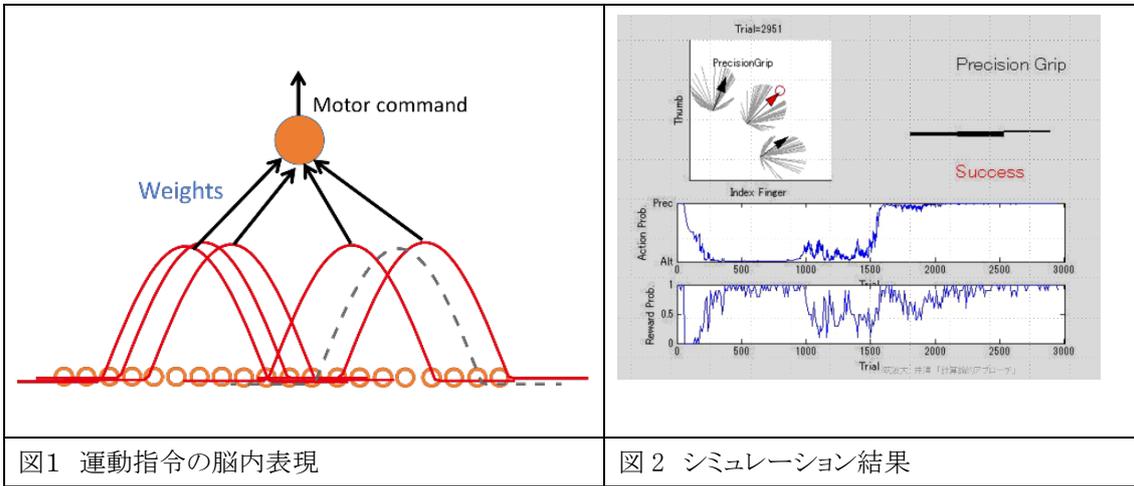
このような問題設定において、機能回復のメカニズムをモデル化するために、大脳皮質の各神経細胞の平均発火頻度の特性を cosine tuning function によってモデル化する。図1に各神経細胞が cosine tuning function を持ち、入力空間に対して receptive field を形成していることを示す。各神経細胞は近傍の入力を受け付けるが、それぞれ至適方向を持つ。この平均発火頻度は運動出力に影響を与えるが、それぞれ神経伝達の効率によって調整される。すなわち、運動指令は神経細胞集団の発火頻度の重み付けの総和によって集団符号化されている。モデル上では各神経細胞の出力に重みを掛けて、この総和をとることにより運動指令が出力される。至適方向は、入力を受けるときにその頻度に従って更新される。また、運動誤差により重み行列が更新される。この学習則は Hebb 学習則と教師あり学習によって行われる。

また、代償把握と精密把握の選択は、TD 誤差を最小化する強化学習モデルによって行われる。報酬はタスクの成功・失敗に従って与えられる。最適行動方策はソフトマックス関数によって与えられる。したがって、代償把握と精密把握は学習した価値関数に従って確率的に選択される。

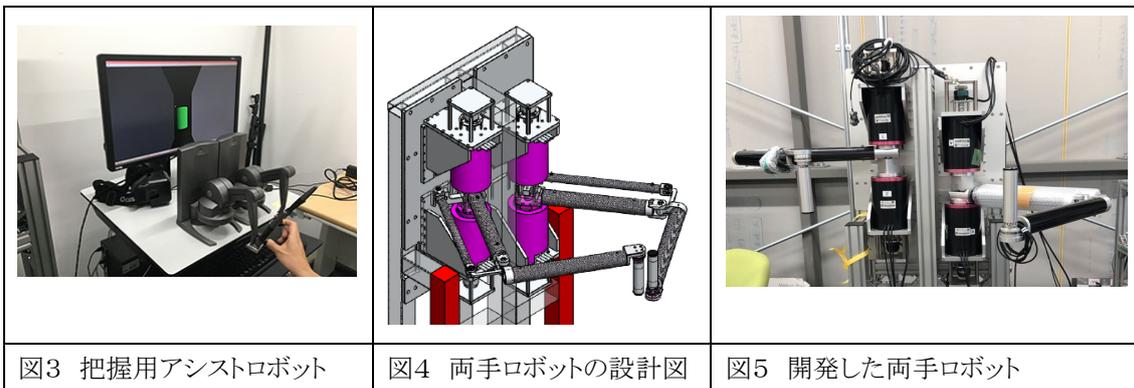
手指運動の脳内表現に関するモデルにおいて、特定の運動方向を至適方向にもつ神経細胞を強制的に取り除くことにより、脳卒中による皮質のダメージを模擬する。本シミュレーションにおいては、人差し指に関連する神経細胞を、人差し指方向を中心として90度の範囲で削除した。

図2にシミュレーション結果を示す。左上の図は神経細胞の発火頻度を示している。赤い矢印は集団符号化による運動指令を示している。グラフ上段は精密把握の選択確率を示している。グラフ下段は報酬獲得確率を示している。皮質のダメージを 50 試行目に導入する。その後、報酬確率が下がるとともに、徐々に代償把握が選択されるようになる。しかし、訓練と共に、報酬確率が上昇し、精密把握を選択するようになることが示された。

また、追加のシミュレーションでは、ロボットによるアシストを模擬することにより、アシスト力を適切に調整することにより、機能回復による報酬の獲得が安定することが示された。



このようなシミュレーションに基づく機能回復訓練を実現するために、把握動作と上肢到達運動を対象としたアシストロボットを開発した。図3に、市販のハプティックインターフェイスをくみあわせることで実現した、把握用アシストロボットの外観を示す。また、図4と図5に新たに開発した上肢到達運動を対象としたアシストロボットの設計図と外観を示す。



アシストロボットは単に運動方向と同じ方向の力を出力するだけではなく、それぞれの運動に対して干渉する力を生成することが可能である。例えば指運動の例では、人差し指の運動を計測し、その運動状態を推定し、この推定した状態に相関するように、親指の運動をサポートすることができる。これにより、図1に示す入力空間において、代償行動中に失った入力を強制的に経験させることができる。このような強制的な感覚経験の入力によって、至適方向の Hebb 学習則による学習を賦活させ、至適方向を適切な方向に配置することができる。また両手運動においては、麻痺を受け不使用を生じている手に、健常側の手の運動に同期するように運動経験を与えることができる。

このように、本研究では、計算論的モデルによって導かれた、最適な感覚経験の導入方法を、ロボットによって実現する方法と、これを実現するロボットを開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 J Izawa, T Asai, H Imamizu	4. 巻 104
2. 論文標題 Computational motor control as a window to understanding schizophrenia	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Neuroscience Research	6. 最初と最後の頁 44-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neures.2015.11.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujiwara Yusuke, Lee Jongho, Ishikawa Takahiro, Kakei Shinji, Izawa Jun	4. 巻 7
2. 論文標題 Diverse coordinate frames on sensorimotor areas in visuomotor transformation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1038/s41598-017-14579-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Lee Kangwoo, Oh Youngmin, Izawa Jun, Schweighofer Nicolas	4. 巻 8
2. 論文標題 Sensory prediction errors, not performance errors, update memories in visuomotor adaptation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1038/s41598-018-34598-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yokoyama Hiroshi, Nambu Isao, Izawa Jun, Wada Yasuhiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Alpha Phase Synchronization of Parietal Areas Reflects Switch-Specific Activity During Mental Rotation: An EEG Study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kita Kahori, Osu Rieko, Hosoda Chihiro, Honda Manabu, Hanakawa Takashi, Izawa Jun	4. 巻 13
2. 論文標題 Neuroanatomical Basis of Individuality in Muscle Tuning Function: Neural Correlates of Muscle Tuning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Behavioral Neuroscience	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnbeh.2019.00028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 井澤淳 村田弓
2. 発表標題 ロボットリハビリテーションの戦略に関する計算論的考察
3. 学会等名 計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 井澤淳
2. 発表標題 脳の計算理論からリハビリテーションロボットへの応用
3. 学会等名 日本リハビリテーション医学会 学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Izawa Jun
2. 発表標題 Application of computational neuroscience to robotic rehabilitation: a conceptual study
3. 学会等名 Conference: 2018 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS) (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 井澤淳	4. 発行年 2018年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 10
3. 書名 身体性システムとリハビリテーションの科学1 運動制御 (3章、6章)	

1. 著者名 井澤淳	4. 発行年 2017年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 5
3. 書名 手の百科事典 第 編 6章	

〔産業財産権〕

〔その他〕

MBR プロジェクト http://izawa.emp.tsukuba.ac.jp/MBRProject.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	羽田 康司 (Hada Yasushi) (80317700)	筑波大学・医学医療系・准教授 (12102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	村田 弓 (Yumi Murata) (80512178)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	上野 友之 (Tomoyuki Ueno) (10390931)	筑波大学・医学医療系・講師 (12102)	
研究分担者	大槻 麻衣 (Otsuki Mai) (30609095)	筑波大学・システム情報系・助教 (12102)	