

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	身体運動適応性の原理解に基づいた運動スキル・調節能の評価法と訓練方略の開発
研究機関・部局・職名	東京大学・大学院教育学研究科・教授
氏名	野崎 大地

【研究目的】

計画どおりの動作が実行できたかどうかという情報は、脳によって絶えず我々の意識下で処理され、以降の運動指令の修正に活かされる。このような自動的な運動学習能力は、滑らかな動作の遂行、多様な環境への動作の適応、楽器や道具の操作など、我々人間の日常生活および文化的活動を支える基盤となるものであるが、その作動機序は十分に理解されていない。本研究ではロボティクスやバーチャルリアリティ (VR) 技術によって創り出した新奇な物理的・視覚的環境下で手を伸ばす、立つ、歩くなどの身体運動を行ってもらう。その環境への適応過程で生じる行動・脳活動変化を計測することによって、脳神経系が、身体の様々な部位から時々刻々流れこんでくる多様な感覚情報をどのように統合・処理し、運動指令の修正に活用しているのかを明らかにする。研究の特色は、ロボティクス・VR 技術を活用した比較的大規模な心理物理学の実験、fMRI や経頭蓋磁気刺激法を用いた脳活動評価、数学的モデルを用いた理論的研究、などの多角的な視点を組み合わせて、脳神経系が複雑な身体運動制御能を獲得する運動学習の仕組みにアプローチすることにある。この結果は、運動学習メカニズムの科学的理解に基づき、最適な運動スキル獲得・リハビリテーション方略の開発、加齢や発育に伴う運動機能低下・発達の評価法の開発、適応能力の破綻として顕れるヒューマンエラーやスランプを回避する方法などの応用が期待できる。

【総合評価】

<input type="checkbox"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="checkbox"/>	一定の成果が得られている
<input type="checkbox"/>	十分な成果が得られていない

【所見】

① 総合所見

総合的に判断して、所期の目的の全てが達成されていないが、多くの示唆に富む結果が得られたと判断する。

本研究課題は、ヒトの身体運動制御機構の予測的制御系（内部モデル）とその特質である適応性を解明することによって、直立姿勢や歩行運動を含んだ身体運動の制御・学習を包括的に理解し、さらにその理解したことを基に高齢者や障害者の運動スキル・調整能の評価法と訓練法を開発し、健康で安全な社会を創生しようとするものである。多くの研究目標が示されており、上肢運動制御に関する研究や、数学的モデルに関する研究では一定の成果が得られている。一方 fMRI の結果がうまく出なかったこと（しかし TMS を用いた実験は成功した）、高齢者や片麻痺患者のデータの集積が不十分なこと、は、一部のデータの解析が完全とはいえないこと、などが指摘される。

研究実施体制、マネジメントも適切であり、助成金の執行状況は問題ない。

② 目的の達成状況

・ 所期の目的が

(全て達成された ・ 一部達成された ・ 達成されなかった)

本研究課題は、身体運動適応原理の包括的理解、適応の観点からみた運動機能の評価と訓練方略の開発という、2つの大目標を設定し、さらに、それを実現するために、小目標を設定して研究が展開されている。

(1) 適応原理の包括的理解に向けて

① **運動計画—内部モデル—運動誤差の対応づけ**：運動学習においては運動誤差と制御器がいかに正確に対応付けられるかが重要となる。両腕運動の誤差と制御器が存在する両腕運動時や、運動実行にともなうフィードバック情報が時間遅れをもって与えられるとき、この対応付けが曖昧になってしまうという弱点を持つことが示された。その一方、複数の誤差情報が与えられる複雑な場合でも、制御器は、その加算平均を計算して状態修正を行なうという高いインテリジェンスを持つことも明らかとなった。

② **他の身体部位からの干渉を補償するメカニズム**：両腕を巧みに操るには、各腕の制御器は反対側の腕運動によって生じる力学的影響に対応する必要がある。自らの腕運動と反対側の腕運動の情報を乗算的に統合する記憶素子が存在し、この記憶素子を用いた運動学習が行われることでそのような対処が可能になることが明らかになった。さらに、反対側の腕運動を取り込む能力は、従来、機能的に劣っていると思われる左腕の方が優れていることを示した。

③ **内部モデルの冗長性**：被験者自らは全く異なる運動を実行していると信じていながら、実際に行われている運動が物理的に同一になってしまう極めて奇妙な状況を実現する視覚運動変換課題を開発し、さらに、この同一の運動が異なる脳内プロセス（内部モデルもしくは運動記憶）によって制御されていることを実証した。このことは、脳は同じ運動を別々の神経回路を使って実行できる冗長性を有していることを意味する。研究者らはこの考え方を一歩進め、逆に、経頭蓋直流刺激 (tDCS) を用いて異なる脳状態を設定した上で運動学習を行わせると、同じ運動に対し異なる運動記憶を埋め込めること、つまり運動記憶の外部操作可能性を示唆する高いインパクトを持つ現象が生じることを実証している。

- ④ **脳内過程の解明**: 運動学習にともなう運動記憶の形成が少なくとも大脳皮質一次運動野で生じ、さらにその記憶の想起が、視覚的情報が与えられた動作計画段階で起こることを、経頭蓋磁気刺激装置(TMS)とロボットアームを用いた運動学習実験を組み合わせることによって明らかにした。こうした運動記憶の形成やモチベーションの向上は無意識のうちに起こるとともに、報酬回路の作動が重要な役割を演じていることをプライミング刺激や催眠暗示の方法を用いて明らかにした。
- ⑤ **直立姿勢制御**: モーションキャプチャ、ダブルトレッドミル、ヘッドマウントディスプレイを相互に通信・制御し、腕などの各身体部位の動きに応じて、支持面のベルトや視覚情報に様々な外乱を加える姿勢制御系を調べるための新しいシステムを構築した。このシステムを用い、腕運動に伴って生じる予測的な姿勢調節が非常に高い適応性を持つこと、運動指令と視覚情報・体性感覚情報のマッチングが姿勢の安定化に大きな重要性を持つことなどが示された。
- ⑥ **歩行制御**: ダブルトレッドミルの左右のベルト速度差を被験者に気づかれない程度の振幅で変動させたときに生じる歩行調節を床反力から評価する手法を開発した。この方法により、意識下で起こる自動的な歩行調節能を定量的に評価することが可能となった。

(2) 適応の観点からみた運動機能の評価と訓練方略の開発

- ① **運動学習過程の数学的モデル化**: 周期的に到達運動を実行するときの、運動学習過程を数学的にモデル化し実験結果と照らし合わせることで、絶え間なく視覚的な運動誤差情報が運動学習系にもたらされることは却って運動学習に阻害的な効果を及ぼすこと、視覚情報を間引いた方が成績がよくなるという逆説的な結果を示した。また運動誤差を予測するという仕組みを、数学的なモデルに組み込むと、従来個別にモデルを必要としていた様々な現象が包括的に説明できることを明らかにした。
- ② **ミスとスランプ**: ロボットアームを用いた到達運動学習パラダイムと脳波、皮膚電気抵抗、心拍、血圧、眼球運動を同時に測定するシステムを構築した。運動学習中にごくたまに生じる突発的な運動誤差の増加(ミス)やミスの連続(スランプ)現象と、これら同時に測定した膨大なデータの間に関連を探る分析は未達成となっている。
- ③ **適応過程の個人差と運動能力**: 従来の運動学習能力を評価する方法は、運動課題に対する戦略的な対処のような要素を含んでしまうという欠点を持っていた。外乱の大きさを気づかない程度の振幅で正弦波状に変化させたときに、無意識のうちにおこる運動修正の大きさと正弦波状変化への追随性を調べ、真の運動学習能力を定量化する方法を開発した。高齢者では運動修正の大きさ、追随性ともに低下することが明らかとなった。
- ④ **脳の冗長性とリハビリテーション**: 片麻痺患者を対象とし、患側、健側、両腕での腕到達運動、および視覚変換外乱に対する患側腕の学習能力を調べた。両腕運動による患側の腕運動の成績向上の証拠は得られなかった。しかし、到達運動は十分に遂行できるものの学習能力が非常に低い被験者、逆に到達運動の成績は低いものの学習能力が残存している被験者など、患側腕の到達運動の成績と学習能力が必ず

しも一致しないという意外な結果が得られた。本研究課題は、身体運動適応原理の包括的理解、適応の観点からみた運動機能の評価と訓練方略の開発という、2つの大目標を設定し、さらに、それを実現するために、小目標を設定して研究が展開されている。多くの研究目標が示されており、上肢運動制御に関する研究や、数学的モデルに関する研究では一定の成果が得られている。一方 fMRI の結果がうまく出なかったこと（しかし、TMS を用いた実験は成功した。）、高齢者や片麻痺患者のデータの集積が不十分なことから、一部のデータの解析が完全とはいえないことなどが指摘される。

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

本研究により、ヒトの運動制御系が、どのように運動実行の結果の情報を取り込み、以降の動作の修正に活用するか、また脳のどこで、どのように運動記憶が構築・想起されるか、両腕運動制御などにおける機能的役割、などについての理解が大きく深まった。これらの研究結果をまとめた論文は、すでに高インパクトファクターの雑誌に掲載（あるいは改訂中）されているように重要な基礎的知見である。また、こうした基礎的な知見に立脚して、各種の運動学習能力評価方法を開発し、さらに効果的なトレーニングスケジュールを理論的に導く可能性も示された。さらに、DCS を用いた人為的な運動記憶の操作可能性や、動作の無意識的な変容をもたらすマジックミラーのような革新的な運動学習手法がもたらされた。基礎的な知見から、応用への道筋が開かれたことが本研究の先進性・優位性である。

上記研究目標には直接掲げていなかったが、研究遂行の過程で派生的に生じた項目もある。まず、運動学習における大脳皮質間の連結性の強さを評価する方法として TMS コイルを高速に動かし近接領域の二点を短時間間隔で刺激する世界初のシステムを開発した。また、モーションキャプチャシステムで取得した身体動作に関節角度を変えて鏡のように呈示する世界初のシステムを開発し、この鏡（マジックミラー）の前で運動を繰り返すと、知らず知らずのうちに本来の動作が変容してしまうという興味深い現象を観察している。さらに、研究者らが開発した方法を用いることによって、フィードフォワード制御とフィードバック制御間の相互作用の存在が示されるなどの成果も得られてきた。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が

(見込まれる ・ 見込まれない)

脳が試行錯誤を重ねて、どのように内部モデルを獲得しているのかは、運動制御研究の分野では未解決の重大問題の一つである。マクロなレベルの結果ではあるが、運動の出来栄え（あるいは誤差）の情報を脳が適切に内部モデルの修正へと結びつける機序、獲得した運動記憶が一次運動野に形成され必要に応じて想起される機序、様々な文脈に応じて異なる運動記憶が形成される機序、そしてその機能的意義について大きく理解を深めたという点において本研究は重要性を有している。また、運動学習における忘却の効果、運動誤差予測の効果を理論的研究により明らかにした点、運動適応性が腕到達運動のみならず歩行運動や直立姿勢制御においても重要な役割を演じていることを明らかにした点でも意義が大きい。

また、このような基礎的な知見に立脚し、外部からの運動記憶操作可能性、視覚的フィードバック情報に細工することによる運動学習の効率化、エラーやスランプ現象との関連、加齢と障害の運動適応性への影響など、応用的な研究にもシームレスにつながる結果を得たことも、身体教育科学やスポーツ心理学、リハビリテーション医科学、老年医科学に寄与すると考えられる。

本研究により、身体運動の適応能力の基礎的な知見に基づいて、視覚的フィードバックを操作するなど、方法論を工夫すれば、効率的な運動スキル獲得が可能であることが示された。もちろん、本研究で扱った運動課題は一般的なものであり、個々の運動課題に応用するためにはさらに工夫が必要であるが、科学的知見に立脚した効率的な運動スキル獲得の方法論を提示することができたことの意義は大きい。また、運動適応能力には個人差があり、加齢によって低下することや、一口に片麻痺といってもその症状により影響の受け方が異なることなどが明らかになった。さらに多くの被験者からデータを取得することにより、運動習慣や脳の障害部位との関連等が明らかになり、定期的な運動の効果、リハビリテーションの効果、リハビリテーションの予後の予測などができるようになると期待される。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

研究実施マネジメントはおおむね適切である。指摘事項に対しても適切に対応されている。

助成金の活用にも問題はない。指摘事項に対し適切に対応している。論文発表 18 件、会議発表 69 件、新聞や一般雑誌などの掲載に、積極的に取り組んでいる。

一般市民および医療専門職に対する講演において研究成果を解説している。また、所属大学内において、ポスター展示、研究室見学、対話の場の提供などの活動を実施しており、評価される。