

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：23304  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2020～2023  
課題番号：20K11235  
研究課題名(和文) 予測制御とフィードバック制御の評価に基づいた子供の運動発達ナビゲーターシステム  
  
研究課題名(英文) A child motor development navigator system based on evaluation of predictive control and feedback control  
  
研究代表者  
李 鍾昊 (Lee, Jongho)  
  
公立小松大学・保健医療学部・教授  
  
研究者番号：40425682  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：予測制御とフィードバック制御の評価に基づいて子供の運動機能と運動学習能力を運動制御の観点から定量的に分析・可視化できる「子供の運動発達ナビゲーターシステム」を構築した。そして、6歳児から小学生までを対象に「各年齢に応じた運動機能と運動学習能力の把握」や「子供の運動発達と小脳の役割」を運動制御の観点から分析した結果、小学校低学年の時期には位置制御の発達と小学校高学年には速度制御の発達時期であることが確認できる。特に本研究は子供の運動発達と小脳の役割についてフィードバック誤差学習理論(Kawato and Gomi 1992)に基づいて実験的に検証できる方法論を示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
人間の運動制御メカニズムにおいて「人間の運動は予測制御とフィードバック制御によって行われるし、運動学習によってこの2つの運動制御器の精度や割合が変わって行く」というフィードバック誤差学習理論(Kawato and Gomi 1992)がある。本研究では、「フィードバック誤差学習理論が子供の感覚運動機能の発達や発達障害によってどのように成立されるのか」を本研究を通してこの学習理論の成立過程も実験的に検証できることに学術的意義や社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We developed the "Children's Motor Development Navigator System," which enables quantitative analysis and visualization of children's motor function and motor learning ability based on the evaluation of outputs from predictive and feedback (FB) controllers. By using this system, we evaluated the change in motor function with aging from children from 6 years old to elementary school students. The results confirm that the early elementary school years are a period of positional control development and the upper elementary school years a period of velocity control development. Overall, this study presents a methodology that allows experimental testing of the role of the cerebellum in children's motor development based on feedback error learning theory (Kawato and Gomi 1992).

研究分野：人間医工学

キーワード：運動発達 予測制御とフィードバック制御

## 1. 研究開始当初の背景

現在日本は、65歳以上の高齢者が総人口の28.1%であり、15歳未満の子供人口の2.3倍以上となる、深刻な少子高齢者社会となっている（：内閣府の「令和元年版高齢社会白書」）。それに、残念ながら元気な子供だけが生まれ、育てられているわけではない。現在、通級による指導を受けている発達障害児の生徒だけでも全国で41,986人（：文部科学省の「通級による指導実施状況調査」）にもなるなど、近年発達障害児の数が増えているのが社会問題となっている。最近厚生労働省は、発達障害児の早期発見のために、従来の手法(問診、行動観察等)以外の運動発達アセスメントツール(例、M-CHATやPARS<sup>+</sup>)を開発・普及している。これらの運動発達検査は、主に乳幼児から就学前の子供を対象とした簡単な行動の指示と観察、さらに子供本人ではなく保護者への設問などにより、これまでに発達障害児の早期発見には貢献しているが、就学後の子供に対する運動機能の発達と障害の経過的な観察には適用できない限界があった。特に、我々の日常生活動作には上肢による正確な制御が多く占めており、子供の脳の発達において知覚運動統合の発達が観察できる6歳以降の子供に対しては、上肢の運動機能と運動学習能力を脳の運動制御理論に基づいてより正確に評価できるシステムや方法論の確立が必要であると考えられる。

本研究の申請者は、これまでに上肢の一部である手首による指標追跡運動において予測制御器とフィードバック制御器の出力を分離してそれぞれの精度を分析する方法を世界初めて確立(2014年度国内及び米国特許登録)し、高齢者の加齢に伴う運動機能の衰退と、高齢者の好発する脳卒中や神経疾患の治療効果を評価する方法論を確立してきた(Lee et al. 2012, 2015; Shimoda, Lee et al. 2017; Kakei, Lee et al. 2019)。そして本研究では、これまでの成果を発展させ、子供の各年齢に応じた運動機能や運動制御能力の発達と異常を分析できるシステムと方法論の確立を目指す。

## 2. 研究の目的

本研究では、子供の運動機能と運動学習能力を脳の運動制御観点から定量的に分析・可視化できる「子供の運動発達ナビゲーターシステム」を構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 知覚運動統合の発達が観察できる6歳児から小学生までの子供を対象に2自由度の手首運動による指標追跡運動を行い、異なる周波数領域から予測制御とフィードバック制御の精度を定量化し、子供の知覚運動機能の経時的変化を運動制御の観点から分析する。

(2) これまでの連携病院の協力を得て、自閉症、アスペルガー症候群などの広汎性発達障害、学習障害、注意欠陥多動性障害の発達障害の子供に対して同じ課題や分析を行い、重症度に応じた運動機能の障害を2つの並列制御器に基づいて分析する。

(3) 収集されたデータに基づいて現在の運動制御能力の把握や、成長に伴う制御能力の短期及び長期的変化、さらにシミュレーションによる発達障害児の予備群が特定できる「子供の運動発達ナビゲーターシステム」を完成する。

## 4. 研究成果

これまでの共同研究先であるハンドン大学（韓国）の付属小学校と小松市にある子供の交流施設の協力を得て知覚運動統合の発達が観察できる6歳児から小学生までを対象に「各年齢に応じた運動機能と運動学習能力の把握」や「子供の運動発達と小脳の役割」を運動制御の観点から分析した結果、小学校4年生以上になると大人と同じぐらいの予測制御の精度になることが明らかになり、その研究内容を英語論文としてまとめて投稿中である(図1参照)。また、子供の運動発達と運動学習メカニ

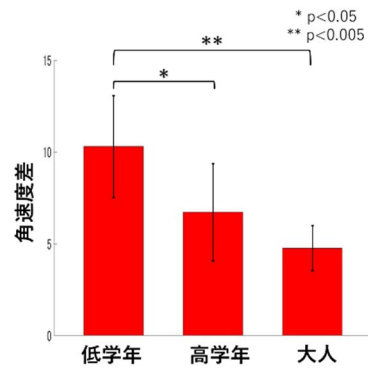


図 1. こどもの発達と予測制御能力の変化

ズムの解明に重要な練習と経験を通して運動技能を学ぶフィードバックゲイン信号駆動のチューニングモデルを新たに提案する研究内容を共同研究者が英文雑誌 (Frontiers in Computational Neuroscience (2020)) に掲載するのに2番目の著者として貢献した。そして、子供の運動発達と小脳との関係を、大脳と小脳の生理学的かつ形態学的根拠に基づいて分析する基礎研究を共同研究として行い、その研究内容を共同研究者が英文雑誌 (Frontiers in Systems Neuroscience (2020)) に掲載するのに3番目の著者として貢献した。さらに、子供向けの仮想空間でゲーム形式の上肢運動を3次元仮想現実空間で直接評価できるシステムと分析方法を提案し、その研究内容を英文雑誌 (PLoS ONE (2021), Scientific reports (2023)) に掲載するのに責任著者として貢献した。そして、手首による指標追跡運動において予測制御器とフィードバック制御器の出力を分離してそれぞれの精度を分析する方法に基づいて子供の各年齢に応じた運動機能や運動制御能力の発達と異常を分析できる新しい分析方法や、子供の3次元空間上の上肢運動を3次元仮想現実空間で直接評価できるシステムと分析方法を国際学会 (2021 1st International Conference of the Brain Korea21 FOUR Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System) の招待講演で紹介した。最後に、指標追跡運動を子供や発達障害児にも楽しくできるように、指標追跡運動を子供の大好きな「タブレット PC 用のゲーム形式」として改良し、画面上のカーソルを指で直接追跡できる「タブレット PC を用いた簡便・安価な運動機能検査システム」を構築し、その研究開発内容を国際会議 (ITC-CSCC2023) で発表した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 李 鍾昊	4. 巻 Vol.37, No.1
2. 論文標題 脳科学に基づいた運動機能評価システムの研究開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 在日韓国科学技術者協会会報(KSEAJ JOURNAL)特集	6. 最初と最後の頁 101-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Sakura Narumi, Xiansong Huang, Jongho Lee, Hiroyuki Kambara, Yousun Kang, Duk Shin	4. 巻 11(6)
2. 論文標題 A Design of Biomimetic Prosthetic Hand	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 act11060167
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act11060167	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Woong Choi, Naoki Yanagihara, Liang Li, Jaehyo Kim, and Jongho Lee	4. 巻 16(5)
2. 論文標題 Visuomotor control of intermittent circular tracking movements with visually guided orbits in 3D VR environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 e0251371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0251371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Tanaka Hirokazu, Ishikawa Takahiro, Lee Jongho, Kakei Shinji	4. 巻 14
2. 論文標題 The Cerebro-Cerebellum as a Locus of Forward Model: A Review	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Systems Neuroscience	6. 最初と最後の頁 511301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnsys.2020.00019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Min Kyuengbo, Lee Jongho, Kakei Shinji	4. 巻 14
2. 論文標題 Dynamic Modulation of a Learned Motor Skill for Its Recruitment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 457682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2020.457682	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Choi Woong, Lee Jongho, Li Liang	4. 巻 10
2. 論文標題 Analysis of Three-Dimensional Circular Tracking Movements Based on Temporo-Spatial Parameters in Polar Coordinates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 621 ~ 621
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10020621	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kim Samyoung, Min Kyuengbo, Kim Yeongdae, Igarashi Shigeyuki, Kim Daeyoung, Kim Hyeonseok, Lee Jongho	4. 巻 23
2. 論文標題 Analysis of Differences in Single-Joint Movement of Dominant and Non-Dominant Hands for Human-like Robotic Control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 9443 ~ 9443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23239443	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim Hyeonseok, Koike Yasuharu, Choi Woong, Lee Jongho	4. 巻 13
2. 論文標題 The effect of different depth planes during a manual tracking task in three-dimensional virtual reality space	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-48869-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 李 鍾昊	4. 巻 9・10月合併号
2. 論文標題 脳の運動制御能力の分析に基づいた定量的運動機能評価システムの開発と臨床応用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 北陸経済研究	6. 最初と最後の頁 38-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Shigeyuki Igarashi, Ayami Kondo, Daeyoung Kim, and Jongho Lee
2. 発表標題 Development of a quantitative evaluation system for the motor function of the brain using a tablet PC
3. 学会等名 The 38th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李 鍾昊, 金 智勳, 金 載然
2. 発表標題 PC視覚誘導性運動を利用した子供の運動能力の分析
3. 学会等名 第46回日本神経科学大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李 鍾昊, 小池 康晴
2. 発表標題 非対面計測技術による運動関連疾患の診断補助に関する研究
3. 学会等名 生体医歯工学共同研究拠点：令和3年度成果報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jongho Lee
2. 発表標題 Development of a novel system to make quantitative evaluation of motor function and clinical applications
3. 学会等名 2021 1st International Conference of the Brain Korea21 FOUR Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	崔 雄  (Choi woong)  (30411242)	群馬工業高等専門学校・電子情報工学科・准教授    (52301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------