

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03287

研究課題名（和文）健康寿命を延ばすための脳の計算論的モデルによる運動機能変化の予測

研究課題名（英文）The Computational Model of the Brain for Predicting Changes in Motor Function to Extend Healthy Life Expectancy

研究代表者

和田 安弘（Wada, Yasuhiro）

長岡技術科学大学・工学研究科・理事・副学長

研究者番号：70293248

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：腕モデルに粘性力項や重力項を考慮し、単関節腕ダイナミクスにおける手先終端分散が運動時間と関節粘性に単調減少することを確認した。モデルの妥当性は数値・行動実験で検証し、加齢が運動パフォーマンスに与える影響も検討している。VR環境で異なる腕のダイナミクスを制御し、慣性モーメントと粘性の変更による変化を解析し、粘性が運動適応に影響を与えることが示唆された。粘性が小さいと運動速度が遅くなり、運動時間が増加し、筋活動解析で指運動の判別の可能性が示唆された。歩行実験では、加齢による転倒増加が下肢制御の衰えではなく、股関節や体幹部の不安定さに起因することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加齢による運動の変化は明らかであり、その原因を探ることは、加齢の状態を推定する手がかりになる。運動時間変化は、加齢推定のための簡単な指標となるかもしれない。本研究では、腕モデルに粘性力項や重力項を考慮し、手先終端分散が運動時間と関節粘性に単調減少することを確認した。また、数値・行動実験でモデルの妥当性を検証し、VR環境で腕のダイナミクスを制御し、粘性が運動適応に与える影響を示唆した。歩行実験では、加齢による転倒増加が下肢制御の衰えではなく、股関節や体幹部の不安定さに起因することが示唆された。これら加齢が運動パフォーマンスに与える影響を検討し、運動モデルからの加齢推定に発展する可能性を得た。

研究成果の概要（英文）：The arm model considered viscous and gravitational forces, confirming that the terminal variability of the hand in single-joint arm dynamics monotonically decreases with movement time and joint viscosity. The validity of the model is being verified through numerical and behavioral experiments, and the impact of aging on movement performance is also being examined. In a VR environment, changes in inertial moment and viscosity were analyzed by controlling arms with different dynamics, suggesting that viscosity affects movement adaptation. When viscosity is low, movement speed decreases, and movement time increases, and muscle activity analysis suggests the possibility of distinguishing finger movements. Walking experiments indicated that the increase in falls due to aging is not caused by a decline in lower limb control but by instability in the hip and trunk.

研究分野：計算論的脳科学

キーワード：運動時間計画 運動計画 計算論モデル 脳

1. 研究開始当初の背景

現在の長寿社会における問題は、如何に健康寿命を延ばすことにあると言っても過言ではない。我々は脳からの運動指令および腕のダイナミクスに基づいたヒト腕運動軌道の計算論モデルを発展させ、軌道計画において最も重要な運動時間の決定機構を内包する運動軌道計画のための計算論モデルの構築を進めており、ヒトの運動制御を理解するために、到達運動時の運動規範や学習・適応を調べる研究を行ってきた。その一つとして、運動の特性を調べる研究がある。例えば、Fitts' Law や 2/3 乗則などはヒトの運動に対して当てはまる法則である。これらの特性を持つ運動がどのようにして生成されているかを調べるため、ヒトの関節モデルを用いた解析的なアプローチを用いて調べた研究がある。そのうちのひとつ研究(Takeda et al., 2019)から、腕のダイナミクスパラメータが運動精度に影響している可能性が示唆されている。また、このようなダイナミクスパラメータは年齢と共に変化し、高齢者等で異なるパラメータを持つ可能性も考えられる。そのため、もしダイナミクスパラメータを変更したときに、運動精度がどのようになるかを調べることでモデルの妥当性や運動特性への理解に貢献すると考えられる。

また、高齢者に関しては、歩行中の足先軌道に着目すると、遊脚中期における一歩ごとのばらつきが若年者に比べて大きいという報告がある。遊脚中期はつまずきが生じやすいタイミングであり、加齢による転倒の増加はこのばらつきの増大に起因している可能性がある。このような加齢による歩行中の運動軌道の変化が生じる要因を明らかにすることができれば、運動機能変化の予測に寄与できると考えられる。

将来的には、筋電や軌道等の身体運動計測と、脳波等による脳のイメージング計測の両方を組み合わせて、ヒトの加齢等による運動機能変化の評価・推定の可能性を目指した。

2. 研究の目的

我々は、ヒト腕のダイナミクスモデルから運動司令依存ノイズを仮定した上で、Fitts' Law と同様の運動時間と運動精度の関係を理論的に導いている。ある意味、Fitts' Law が示す実験的な知見の妥当性を理論的に示していると同時に、Fitts' Law が実験データの回帰パラメータで単に精度と運動時間の関係を表すのに対して、我々のモデルは運動ダイナミクスパラメータ、軌道と脳からの運動指令によって表現され、このパラメータによって計算される運動指令によって精度と運動時間の関係が予測される。必要精度によって運動時間が予測され、逆に運動時間によって精度が予測される。

Isochrony principle は、大きな円運動と小さな円運動を周期的に描画するような場合、大きな円運動の運動時間と小さな円運動の運動時間が等しくなる現象を指す。つまり、小さな円運動(短い運動距離)に比して大きな円運動(長い運動距離)は速度を上げるような運動を行うことになる。これは、Fitts' Law 等で示される運動速度(運動時間)と運動精度の関係から考えると、大きな運動を小さな運動より速い速度で運動することで、運動精度が少なくとも小さな運動よりも悪化することになる。大きな運動と小さな運動を運動精度に関して異なる基準で運動することをヒト脳は選択することになり不合理な選択と言える。我々の計算論的運動モデルでは、運動時間ではなく運動司令によって、この Isochrony principle の説明を試みており、運動時間が本質ではなく、運動指令の計算に原理の本質があることを示している。本研究では、腕のダイナミクスパラメータが運動に与える影響を調べるため、仮想現実(VR: Virtual Reality)による実験環境を構築し、VR 環境下で自身のダイナミクスと異なる腕を制御する VR 環境での実験を行うことで、ダイナミクスパラメータの影響を調べることを目的とした。また、このような環境で腕の軌道だけでなく筋活動を計測して解析を行うことや、脳波と組み合わせて実験を行い、脳活動解析を行うことを目指した。

また、本研究では、加齢による運動軌道の変化が筋骨格系の衰えによって生じるものなのか、神経系に起因するものなのかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

【課題1】運動時間決定を内包した運動軌道生成モデルの複雑な運動への拡張

我々は、複雑な運動軌道を再現するモデルを提案し、実際のロボット制御にも適用し、見まねロボット制御を実現したが、始点～終点までの運動時間の意思決定は課題として残った。Fitts' Law のように運動時間が精度によって推定されるとすれば、運動司令ノイズ(Harris & Wolpert[Nature, 1998])を仮定することで、タスク要求精度の意思決定により、運動時間を定めることが可能である。

【課題2】運動時間と精度、腕ダイナミクスの関係の実験的検討

(1) 計算機シミュレーションによるパラメータの感度解析

運動ダイナミクス、軌道及び運動時間等が複雑に絡みあって精度が決定される。従来、

あまり影響が考慮されていないが、精度に対して運動軌道（パターン）による影響も大きいと考えられ、運動軌道（パターン）・運動時間・運動精度・ダイナミクスパラメータの関係を計算機シミュレーションによって詳細に検討する。

(2) 仮想現実(VR : Virtual Reality)による実験環境の構築・加齢模擬体験

被験者実験としてVRを使った実験を行う。VR環境下で自身のダイナミクスと異なる腕を制御する環境を構築する。自身ではダイナミクスパラメータは変更出来ないため被験者は脳内での運動計画を修正して、運動精度を確保するように適応するはずである。若年者と高齢者を被験者とする事で、この比較により相違が明らかに出来る可能性がある。ダイナミクス等の変更前と変更後の変化を検討することで加齢による脳の適応の様子も解析出来る可能性があり、モデルと脳イメージングの変化との対応の解析も可能となる。実際の腕ダイナミクスを変更する加齢模擬体験装具をつけての追実験も行いVR実験結果の検証を行い、VR実験の妥当性を担保し、VR実験を推進する。腕のダイナミクスパラメータのうち、慣性モーメントおよび粘性を変更したときに、変更前と変更後の変化を解析した。腕の慣性モーメントについては、被験者自身の腕よりも短い腕のとき、長い腕のとき、そして極端に大きいときの慣性モーメントの3つの条件で検証を行った。また、粘性を変化させる条件でも、粘性を小さくした条件（0.5倍）と大きくした条件（5倍）について、実験を実施し、腕の終端誤差や速度波形などを調べた。また、筋活動解析として腕運動時や指運動時の筋電を計測し、個人に依存しない特徴を抽出するためのデータ解析手法や筋活動からの判別分析を行った。

(3) 若年及び高齢者の被験者実験

実際の若年者と高齢者の実験によって、精度と運動時間の関係について調査、検討を行う。幅広い年齢層の被験者の実験ができる環境の整備を計画した。高齢者については、多くの被験者は望めなかったが、特徴的な被験者を選択し実験を実施している。

歩行に影響のある疾患のない高齢者5名（ 76.2 ± 4.5 才）と若年者5名（ 20.2 ± 0.4 才）を被験者とし、平地における自然歩行実験を実施した。下肢の各関節軌道および下肢および体幹部の筋活動の計測を実施した。また、研究開始前に高齢者6名（ 72.2 ± 5.3 才）、若年者6名（ 19.4 ± 1.2 才）の同様の運動計測実験を行っており、それらのデータ解析を実施した。解析についてはつまずきが生じやすい遊脚中期において股関節に対する足先位置の一步ごとのばらつきを抑える関節間の相補的連携について uncontrolled Manifold (UCM) 解析を用いて解析を行った。また、筋骨格系の変化による歩行軌道への影響を明らかにするために受動歩行ロボットを作成し、歩行軌道の解析を行った。

【課題3】VR環境下での生体計測

VR環境と脳波および筋活動も計測できる環境を構築し、各運動課題に対する脳活動、筋活動、運動軌道計測データの解析を実施し、計算論的モデルとの対応を検討する。

4. 研究成果

【課題1】運動時間決定を内包した運動軌道生成モデルの複雑な運動への拡張

運動軌道生成の始点から終点までの運動時間は、Fitts' Law のように精度によって決定されるとすれば、運動司令ノイズによる終端精度のばらつきを前提とすることで、運動時間を定めることが可能である。既に提案しているモデルに軌道予測のための内部モデルを組み込むことで、2点間運動における運動時間・運動軌道生成モデルを開発した。

腕モデルの粘性力項や重力項を考慮したモデル化を推進した。結果、単関節腕ダイナミクスにおける手先終端分散は運動時間・関節粘性に対して単調減少であることが分かった。今後はこのモデルの妥当性を数値実験、行動実験により確認する。また、関節粘性や関節周りの慣性モーメントなどのパラメータは加齢によって影響を受けると考えられるため、加齢が運動速度や空間精度などの運動パフォーマンスに与える影響の検討を進める。

矢状面での二点間到達運動における速度と精度の関係について検討した。重力項を考慮した腕ダイナミクスモデルに基づく理論的な検討および計算機シミュレーションによる検討を行った。計算機シミュレーションによる結果では、重力項を考慮しなかった場合は速度と精度の関係にトレード・オフがみられ、重力項を考慮した場合は運動の遅いところで手先終端のばらつきが大きくなり、速度と精度の関係に明確なトレード・オフはみられなかった。また、計算論モデルによる理論的な検討の結果、手先終端誤差は運動時間の関数として定式化され、重力項は運動時間とともに線形に増加する成分として終端誤差に寄与する可能性があることが示唆された。

【課題2】運動時間と精度、腕ダイナミクスの関係の実験的検討

(1) 計算機シミュレーションによるパラメータの感度解析

腕ダイナミクスモデルのパラメータが速度と精度の関係にどのような影響を与えるかを調

査するため、速度と精度の計算論モデルを用いた感度解析シミュレーションを行った。具体的には、腕ダイナミクスパラメータである上腕と前腕の質量および運動軌道が変化した場合に速度と精度の関係がどのように変化するかを調査した。その結果、同じ速度条件でも、質量が増加するに伴い手先終端誤差が大きくなること、運動方向によって手先終端のばらつき方が大きく異なることを示した。運動精度は、運動ダイナミクス、軌道及び運動時間等が複雑に絡みあって決定されると考えられる。運動軌道・運動時間・運動精度・ダイナミクスパラメータの関係を計算機シミュレーションによる詳細な検討をしている。

腕運動の研究と並行して、タイピング中の手指動作のパフォーマンスに関する研究も推進してきた。小型のハンドトラッキングデバイスを導入し、タイピング中の手指動作をマーカーレスで計測できる環境を構築した。この計測環境を用いてタイピング動作の速度と精度、各指の移動量などを評価できるアプリケーションを開発した。

(2) 仮想現実(VR: Virtual Reality)による実験環境の構築・加齢模擬体験

VR環境下で自身のダイナミクスと異なる腕を制御するVR環境を構築し、被験者実験を実施した。今回、腕のダイナミクスパラメータのうち、慣性モーメントおよび粘性を変更したときに、変更前と変更後の変化を解析した。腕の慣性モーメントについては、被験者自身の腕よりも短い腕のとき、長い腕のとき、そして極端に大きいときの慣性モーメントの3つの条件で検証を行った。3名の被験者にて到達運動実験を行ったところ、どの条件でも終点の運動誤差は非常に小さいものとなり、運動適応が確認された。一方で、粘性を小さくした場合(0.5倍)と大きくした場合(5倍)について被験者7名で同様の実験を行ったところ、粘性を大きくした条件では学習ができず、適応が確認されなかった。このことから、ダイナミクスパラメータのうち、粘性が運動適応や運動機能の変化に影響を与える可能性が示唆された。

粘性の大きさと運動速度についての関係を調査した結果、粘性が小さいと運動速度が遅くなり、粘性が大きいと速度が速くなる傾向があることを明らかにした(論文投稿準備中)。今回、慣性モーメントを変更した条件で到達運動実験を行ったところ、どの条件でも終点の運動誤差は非常に小さいものとなり、運動適応が確認された。一方で、粘性を小さくした場合(0.5倍)と大きくした場合(5倍)について被験者7名で同様の実験を行ったところ、試行を繰り返すごとに誤差は減少していき、粘性が大きい条件では学習後の効果(Washout)も見られ、適応効果が確認された。粘性を小さくした条件では誤差は減少したが、適応が確認されなかった。このことから、ダイナミクスパラメータのうち、粘性が運動適応や運動機能の変化に影響を与える可能性が示唆された。また、運動の速度波形と運動時間についても調べたところ、粘性を小さくした条件では感度がよいためか最大速度が低下し、運動時間も増加している傾向が見られた。一方、粘性を大きくした条件では速度は低下しているが運動時間はほぼ同じであった。このことから、粘性が小さい条件では少しの運動でも大きな軌道変化があるため、速度を遅くし、運動時間を伸ばして視覚フィードバックに基づく注意深い運動を行っていると考えられる。一方で、粘性が大きい条件では大きな運動が必要となり、フィードフォワード的に運動を制御している可能性があることが示唆された。筋活動解析においては、筋活動を短時間の時間窓で区切るスライディングウィンドウ解析とz-scoreによる正規化を用いることで簡便に精度を向上させる可能性を示唆した。また、指の筋活動解析から、異なる指運動の判別が可能であることを示唆した。

(3) 若年及び高齢者の被験者実験

平地での自然歩行実験と膝関節の動きを制限したトレッドミル歩行実験の2種の実験を実施し、関節軌道と下肢および体幹部の筋活動の計測を行った。自然歩行実験では若年者と高齢者各5名を被験者とし、トレッドミル歩行実験では若年者12名を被験者として計測し、現在解析中である。今後は若年者および高齢者、関節拘束下における軌道や筋活動の比較によって、高齢者の転倒増加が単に加齢による身体機能の衰えに起因するものか神経系による制御に起因するものかを推定していく。

遊脚中期における足先高さのばらつきを抑える関節間の相補的連携については加齢による変化がなかった。つまり、若年者も高齢者も同瞬間において一歩ごとの足先高さのばらつきを抑えるよう関節間での協調的な運動を実施していた。一方で、床面に対する足先高さの一歩ごとのばらつきは若年者群に比べて高齢者群の方が有意に大きいという先行研究と同様の結果を得た。したがって、加齢によるJHつまずきの増加は下肢制御の衰えではなく、股関節や体幹部の不安定さに起因するものであることが示唆された。

【課題3】脳イメージングデータを含めた生体計測

VR環境と脳波および筋活動も計測できる環境を構築した。構築した環境下で、筋活動によるタイピング時の指運動判別を実施し、繰り返し運動では筋活動からでも予測精度が高いが、タイピングでは予測が難しくなる可能性を示唆した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Taichi Tanaka, Isao Nambu, Yoshiko Maruyama, Yasuhiro Wada	4. 巻 22(13)
2. 論文標題 Sliding-Window Normalization to Improve the Performance of Machine-Learning Models for Real-Time Motion Prediction Using Electromyography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 5005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22135005	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 Yoshimitsu Hashizume, Shoko Kaichida, Kotaro Takeda, Jun Nishii	4. 巻 12(7)
2. 論文標題 Age-related changes in leg control at minimum toe clearance during walking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ICIC Express Letters Part B: Applications	6. 最初と最後の頁 595-601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24507/icicelb.12.07.595	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10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 田中太一, 南部功夫, 圓山由子, 和田安弘
2. 発表標題 Sliding Window normalization による筋電を用いる他人のデータで学習した分類器の予測精度向上
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋爪善光
2. 発表標題 関節間の協調運動に着目した歩行動作解析
3. 学会等名 姿勢足部医科学会第2回学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keisuke Saitoh, Isao Nambu, Yasuhiro Wada
2. 発表標題 The Effect of the Coefficient of Viscosity on the Reaching Movement in Virtual Space Using VR
3. 学会等名 IEEE international symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Sciences (MHS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Saitoh, Isao Nambu, Yasuhiro Wada
2. 発表標題 The Effect of the Rotary Inertia on the Reaching Movement in Virtual Space Using VR
3. 学会等名 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Misaki Takeda
2. 発表標題 Extension of the Speed-Accuracy Trade-Off Model Based on Human Arm Dynamics to a Three-Dimensional Space
3. 学会等名 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Ohmi and Misaki Takeda
2. 発表標題 Motor Learning in Aiming Movements Using Computer Mouse
3. 学会等名 6th STI-Gigaku 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusei Minowa, Keisuke Saito, Isao Nambu, Yasuhiro Wada and Misaki Takeda
2. 発表標題 Revealing the cause of motor performance decline leads to extension of healthy life span
3. 学会等名 6th STI-Gigaku 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Isao Nambu, Tatsuya Hoshino, Yoshiko Maruyama, and Yasuhiro Wada
2. 発表標題 Classification of finger typing movements from muscle activity
3. 学会等名 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 磯崎竜一, 橋爪善光, 池田将晃, 垣内田翔子
2. 発表標題 受動歩行ロボットの仰角軌道分布の考察
3. 学会等名 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 姫田 柊優, 武田 美咲
2. 発表標題 4.手指動作データを用いたタイピングパフォーマンスの評価手法の提案
3. 学会等名 映像情報メディア学会, 放送技術研究会, (国際学会)
4. 発表年 2023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	武田 美咲 (Takeda Misaki) (10879828)	東京工業高等専門学校・電気工学科・講師 (52601)	
研究分担者	橋爪 善光 (Hashizume Yoshimitsu) (20779847)	徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・准教授 (55503)	
研究分担者	大石 潔 (Ohishi Kiyoshi) (40185187)	長岡技術科学大学・工学研究科・産学官連携研究員 (13102)	
研究分担者	南部 功夫 (Nambu Isao) (40553235)	長岡技術科学大学・工学研究科・准教授 (13102)	
研究分担者	佐藤 貴紀 (Sato Takanori) (60840759)	秋田工業高等専門学校・その他部局等・講師 (51401)	
研究分担者	垣内田 翔子 (Kaichida Shouko) (90638537)	徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・准教授 (55503)	

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
---------	---------