

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K12018

研究課題名（和文）非利き手の認知と運動を実現する計算モデルの解明

研究課題名（英文）Investigation of computational model to generate cognition and movement by nondominant hand

研究代表者

大山 剛史（Oyama, Takashi）

岡山県立大学・情報工学部・准教授

研究者番号：40462668

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は利き手と非利き手の運動の違いについて、手先に加える力の制御、運動中の外乱、運動のばらつきといった観点から調べた。固定した対象に力を加えるタスクにおいて、非利き手は利き手よりも一定の力を生成しやすいことが示唆された。運動中の外乱に関しては、手先に運動を助長する力を加える条件では非利き手の方が早く正確な運動を生成できることが明らかになった。運動のばらつきについて、利き手が生成する運動は運動全体のばらつきというよりはタスクの目的を達成しやすい運動を生成してい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

本研究は利き手と非利き手の運動の違いについて、力の制御における違いを明らかにできた。本研究の成果を人間工学的に応用することで、PCなどのポインティングデバイスとして使われているジョイスティックのたぐいのより良い設計に役立てられることが期待される。また、運動のばらつきに関して本研究が明らかにした成果は、ヒトが運動制御においてどのような評価基準を重視して運動を生成しているかを考える一助となるものであり、実用的な観点としても機器の操作などユーザーインタフェース分野への応用が考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research investigated the difference between dominant and non-dominant hands in motor control from the viewpoint of hand force control, perturbation during movement execution, and the variability of movement. The results of this research revealed some findings. The non-dominant hand can produce constant force applying to a fixed object more accurately than the dominant hand. The non-dominant hand can produce movements more accurately than the dominant hand when a participant was imposed to move one's hand in an unstable force field. The dominant hand can produce movements with less variability than non-dominant hand, and the dominant hand system emphasizes the variability directly related to the achievement of a task purpose rather than the variability over the whole movement and the smoothness of a movement.

研究分野：人間工学

キーワード：運動制御 利き手 計算モデル 運動のばらつき

1 . 研究開始当初の背景

本研究は開始当初において、利き手と非利き手の運動の違いに関する制御モデルに関する実験を予定していた。利き手と非利き手の制御の違いについてはさまざまな観点が予想されるが、本研究では運動中の手先位置の知覚や制御ならびに運動のばらつきに着目して実験を計画した。

本研究を計画した背景について先行研究の報告等をもとに述べる。利き手と非利き手は構造としての筋骨格系には違いがないが、機能としての運動の巧緻性などには差が表れる。旧来、利き手と非利き手の機能の違いは生活における使用頻度に起因する熟練度の違いと考えられてきていたが、近年では利き手と非利き手で得意とする運動を分業化したためであることが分かっている。実際、運動課題によっては利き手よりも非利き手の方が良い成績を示すものがあり、例えば姿勢の固定は非利き手が利き手よりも得意な運動課題の一つである。利き手と非利き手の運動の違いについて、実際の運動を計測したデータに基づく結果は報告されてきているが、それらの差がどのような制御に起因するかについての報告は僅少である。

このような背景のもと、本研究は利き手と非利き手の運動の違いを説明できる制御モデルを提案することを目的として実施された。ただし、研究期間内において諸要因のために被験者を確保することが困難となったため、研究の方針や進め方には若干の調整が施されている。

2 . 研究の目的

本研究の目的は利き手と非利き手の運動の違いを説明できる制御モデルを提案することであった。この目的を達成するために、いくつかの小目標を掲げて実験を行った。

(1) 固定した対象に加える力の制御における違い。ヒトの関節は拮抗する二つの筋で制御されており、これらの筋の力加減によって関節の見た目の硬さを変えることができる。利き手と非利き手で硬さの制御に差があることを予想して、両者を比較する実験を行った。

(2) 運動のばらつきに影響を与えるパラメータの調査。利き手と非利き手の運動では運動のばらつきに差がある。このような運動のばらつきに影響を与える上肢の物理パラメータについて、計算機シミュレーションを主とした実験を行った。さらに、運動中に手先に外乱を与える条件において利き手と非利き手の運動のばらつきについて計測実験を行った。

3 . 研究の方法

研究の目的で掲げた実験について、実験の方法をそれぞれ示す。

(1) 固定した対象に加える力の制御における違い

4人の右利きの被験者が実験に参加した。被験者は触覚デバイス(Touch X, 3D Systems社製)のスタイラスに力を加えることで、モニタに表示されたカーソルを所定の位置に移動させるように指示された。スタイラスは触覚デバイスの機能によって位置を仮想的に固定されていた。スタイラスに加えた力に応じて、モニタ上にカーソルの位置、速度、または加速度が変化する様に条件を設定した(それぞれ、FP, FV, FA条件と定義)。FP, FV, FAの3条件を右手と左手でそれぞれ行った。カーソルの位置とスタイラスの加えられた力をサンプリング周波数60Hzで計測した。

(2) 運動のばらつきに影響を与えるパラメータの調査

<シミュレーション実験>

計算機シミュレーションによって上肢反復運動に信号依存ノイズ(信号の振幅によって強度が変わるノイズで、生体において運動指令に加わっていることが予想されている)が加わるときの運動のばらつきを調べた。水平面内で肩と肘の2関節だけを動かして手先を往復する運動を設定した。運動時間は手先を往復させるのにかかる時間と定義した。手先軌道の経路は前額軸に平行な直線とした。また、前額軸をx軸、矢状軸をy軸、原点を手先の経路と矢状面が交わる点とした。計算機シミュレーションによって上肢反復運動に信号依存ノイズ(信号の振幅によって強度が変わるノイズで、生体において運動指令に加わっていることが予想されている)が加わるときの運動のばらつきを調べた。水平面内で肩と肘の2関節だけを動かして手先を往復する運動を設定した。運動時間は手先を往復させるのにかかる時間と定義した。手先軌道の経路は前額軸に平行な直線とした。実験の条件として、腕の質量、関節の粘性、信号依存ノイズのパラメータ、計画軌道を変化させ、それによって運動のばらつきがどのような変化をするか調べた。

<計測実験>

5人の右利きの被験者が実験に参加した。被験者に触覚デバイス(Touch X, 3D Systems社製)のスタイラスを右手または左手で握って、手先の往復運動を生成するように指示した。その際、

被験者が生成する運動にバイアスがかかることを避けるために「直線の経路で往復するように」や「前額軸に平行になるように」のような、生成する運動に関する具体的な指示は一切与えなかった。被験者の手先位置と対応した小円が液晶モニタに提示された。モニタには二つの長方形の目標エリアが提示された。被験者は小円が目標エリア間を往復するように、なおかつ、運動の折り返し時に小円が目標エリアをはみ出さないように指示された。二つの目標エリア間の距離は 20.0 cm に、目標エリアの幅は 4.0 cm に設定した。

触覚デバイスの機能によって、スタイラスの移動速度に応じた力をスタイラスに発生させた。これにより、被験者の手先の速度に比例した力を被験者の手先に与えた。触覚デバイスが被験者の手先に与える力の向きとして、被験者の運動方向と同じ方向 (Assist 条件)、被験者の運動方向と逆の方向 (Resist 条件) を条件として設定した。さらに、Touch X から力を与えない条件 (Null 条件) も設定し、力場の条件として 3 条件を設定した。

4. 研究成果

各実験について、結果ならびに考察をそれぞれ示す。

(1) 固定した対象に加える力の制御における違い

【結果】

各条件で生成された運動を評価するために、運動の終点位置ならびに運動時間を調べた。終点位置は運動の終了位置の座標、運動時間は運動開始から終了までの時間と定義した。図 1 に終点位置の平均及び標準偏差を、図 2 に運動時間の平均及び標準偏差を示す。なお、図 1 において 100 mm の位置が目標の位置である。

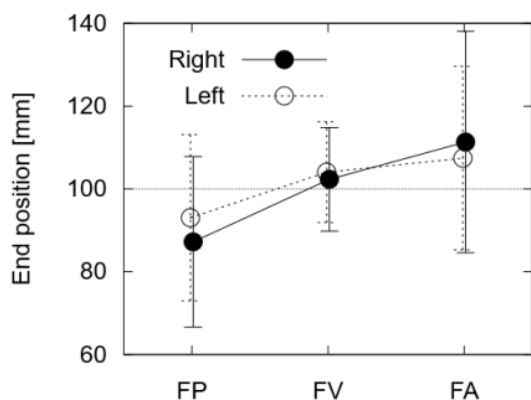


図 1 実験(1)における運動の終点位置。目標位置は 100 mm

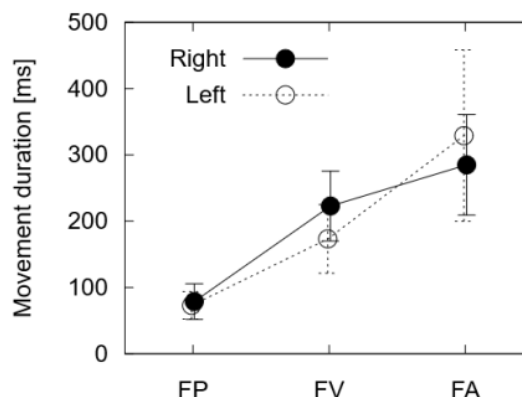


図 2 実験(1)における運動の運動時間

終点位置及び運動時間のそれぞれについて、カーソルが動く条件 (FP・FV・FA) 及び使用する手 (右手・左手) を要因とした二要因分散分析を行った。結果を表 1 に示す。Tukey ' s HSD テストによる多重比較を行ったところ、終点位置については FP, FV, FA の条件においても利き手と非利き手に有意差はなかったが、運動時間については、FV, FA 条件において有意差があった (ともに $p < .001$) 。

表 1 実験(1)における終点位置及び運動時間のカーソルが動く条件と手を要因とした二要因分散分析結果

	カーソルが動く条件	手	カーソルが動く条件 × 手
終点位置	$p < .001$	$p = .283$	$p < .05$
運動時間	$p < .001$	$p = .294$	$p < .001$

【考察】

本研究は固定した対象に加える力の制御において、利き手と非利き手に違いがあることを予想して実験を行った。運動の終点位置に関する結果によれば、カーソルが動く条件のいずれにおいても利き手と非利き手の間に有意差はなく、言い換えれば、力の制御の精度に左右差は認められなかった。しかしながら、運動時間に関して、FV 条件 (力がカーソルの速度に対応する) では非利き手の方が運動時間が有意に短く、FA 条件では利き手の方が運動時間が有意に短かった。

運動時間と精度の間にはトレードオフの関係があることが知られており、通常、運動時間が短くなるほど精度は低下する。この観点に基づけば、より短い運動時間で同程度の終点位置になっていたことは、より良い力の制御の精度を実現していたとみなせる。スタイラスに加えら

れた力の波形で見たとき、FV 条件においては力の波形が台形様になる傾向があった。このことは、被験者がスタイラスの一定の大きさの力を加え続けようとしていたことを示唆している。先行研究において、非利き手は姿勢の制御に優れていることが報告されており、そのような結果から推測するならば、固定した対象に一定の力を加え続ける制御は利き手よりも非利き手の方が優れており、そのような有意性が、FV 条件における非利き手のより良い力の制御の精度に現れたと考えられる。

本研究が明らかにした利き手と非利き手の力の制御の違いという成果は、ポインティングデバイスなどの機器類の設計などに貢献することが期待される。

(2) 運動のばらつきに影響を与えるパラメータの調査

腕の質量、計画軌道を変化させても、運動のばらつきの変化は現れても、速度と精度のトレードオフの関係には影響がなかった。とりわけ、計画軌道については滑らかさの規範に反した軌道であったにもかかわらず、運動のばらつきの傾向に影響はなかった。関節の粘性を変化させると、速度と精度のトレードオフの関係に変化があり、より具体的には、負の粘性係数を設定したとき、速度と精度のトレードオフの関係は通常時から反転したものとなった。また、信号依存ノイズのパラメータとして振幅の指数を変化させたとき、指数の値が 2 以上のときは速度と精度のトレードオフの関係に変化はなかったが、0 に近づけて小さくするにつれて（おおむね 1 以下で）速度と精度のトレードオフの関係に変化が表れた。

利き手・非利き手 × Assist・Null・Resist の 6 条件について、運動誤差、運動時間、折り返し位置の差を調べた。運動誤差は指定した目標エリア中心から軌道の折り返し地点までの距離として定義した。運動時間は軌道の折り返し間の時間として定義した。折り返し位置の差は軌道の折り返し位置の y 軸における差と定義した。なお、利き手と非利き手の軌道の比較を容易にするために、軌道の折り返し位置の解析では非利き手の運動を左右反転している。図 3 に運動誤差、図 4 に運動時間、図 5 に折り返し位置の差の平均及び標準偏差をそれぞれ示す。

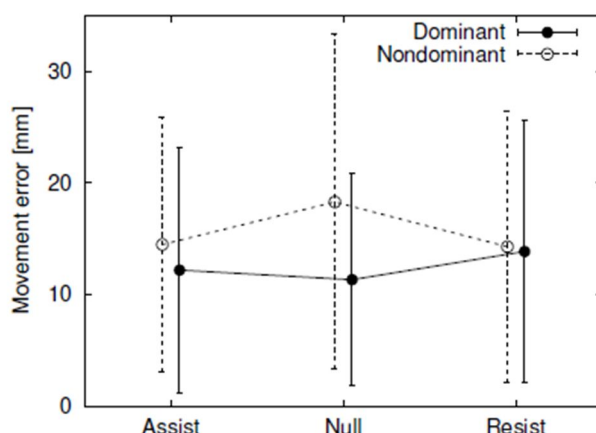


図 3 実験(2)の計測実験における運動誤差

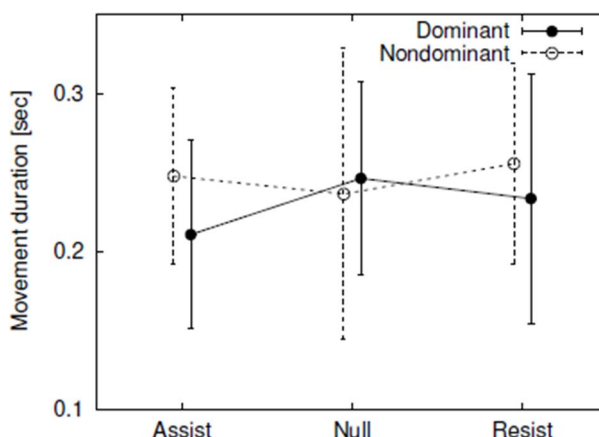


図 4 実験(2)の計測実験における運動時間

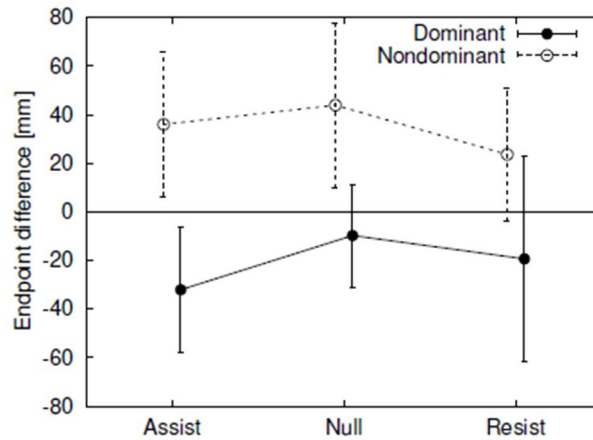


図5 実験(2)の計測実験における折り返し位置の差

運動誤差, 運動時間, 折り返し位置の差のそれぞれについて, 手(利き手・非利き手)と力場(Assist・Null・Resist)を要因とした二要因分散分析を行った結果を表2に示す。

表2 運動誤差, 運動時間, 折り返し位置の差に関する手(利き手・非利き手)と力場(Assist・Null・Resist)を要因とした二要因分散分析

	手	力場	手×力場
運動誤差	$p < .001$	$p < .001$	$p < .001$
運動時間	$p < .001$	$p < .001$	$p < .001$
折り返し位置の差	$p < .001$	$p < .001$	$p < .001$

【考察】

計算機シミュレーション実験によれば関節の粘性係数が負の値の場合は運動の誤差が大きくなる傾向があったが, 計測実験の結果によれば, 正の粘性力場(Assist条件)を設定しても必ずしも誤差が大きくなるとは限らず, むしろ非利き手ではAssist条件の方がNull条件よりも運動誤差は有意に小さかった(Tukey's HSDテストによる比較, $p < .001$)。さらに, 軌道の折り返し位置の差の解析によれば, 利き手が生成する運動は「\」の向きで傾いており, 非利き手で生成する運動は「/」の向きで傾いていることが明らかになった。ボンフェローニ法による補正済み有意水準を5%に設定して, 折り返し位置の差を値ゼロとt検定で比較した結果, すべての条件において有意差があった。なお, 非利き手の運動は左右反転して解析していることに注意が必要である。実際の運動としては, 利き手は肩を屈曲・肘を伸展/肩を伸展・肘を屈曲, 非利き手は肩を伸展・肘を伸展/肩を屈曲・肘を屈曲を繰り返すような運動になりやすかったことを示唆している。

右手について, Resist条件はNull条件よりも運動誤差が大きくなっていったが, これによって直ちに正の粘性力場によって運動の精度が悪くなったとはいえない。運動時間で見ると, Assist条件及びResist条件はNull条件よりも運動時間が短くなっている。ヒトの運動において, 速度と精度との間にはトレードオフの関係があるため, Resist条件での運動誤差の増大はその代わりに運動時間の短縮に反映されていたとも解釈できる。一方, 左手では運動誤差はNull条件がほかの2条件よりも大きかったり, 運動時間はNull条件がほかの2条件よりも長くなる傾向があるなど, 力場が与える影響は右手とは異なっていた。

左手は自己受容感覚を頼りにした制御が右手よりも巧みであり, それゆえ, 本研究における短い運動時間の運動タスクにおいても運動中のオンラインの修正を積極的に用いることができ, そのような運動中のオンラインの修正が運動時間の延伸をもたらした。結果としてAssist条件及びResist条件における運動時間の延伸として現れたと本研究は推測する。

軌道の折り返し位置の差について, 信号依存ノイズを仮定した追加の計算機シミュレーション実験を行い, 軌道の傾きを条件として, 「\」「/」「\」の3通りで運動の滑らかさと運動のばらつきを比較した。その結果, 「\」の運動は運動の滑らかさの規範には従わず, また, 運動全体のばらつきは大きくなるが, 運動タスクの目的を達成するためのばらつきにおいてはほかの二つの軌道よりも小さくなることが明らかになった。

総括すると, 粘性力場の影響には左右差があることが明らかになり, この要因は利き手と非利き手の制御システムの違いによるものと考えられる。また, 正の粘性力場と負の粘性力場との間に運動誤差への影響における違いはなく, さらに, 被験者らが生成した軌道の傾きには一貫した傾向があることが明らかになった。被験者らが生成した軌道の傾きは信号依存ノイズの仮定の下で運動タスクを達成するための誤差の分散を最小とする目的のためであると本研究は結論付ける。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 大山剛史, 伊藤照明	4. 巻 87
2. 論文標題 上肢反復運動におけるフィッツの法則に影響を与えるパラメータ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 21-00218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00218	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 Takashi Oyama, Teruaki Ito	4. 巻 13
2. 論文標題 Analysis of the Interaction Torque on the Arm Based on Via-Point Movement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mechanical Engineering and Technology	6. 最初と最後の頁 10-24
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 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 大山 剛史, エフェンディ モハマド, 伊藤 照明	4. 巻 88
2. 論文標題 上肢往復運動における信号依存ノイズ仮説の下での運動誤差の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 22-00149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00149	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12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田中 武蔵, 大山 剛史, 伊藤 照明
2. 発表標題 両側性回転運動の矢状面における困難性解析
3. 学会等名 第32回 設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大山剛史, エフエンディ・モハマド, 伊藤照明
2. 発表標題 粘性力場における反復運動の速度と精度の左右差
3. 学会等名 第31回 設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大山剛史, 伊藤照明
2. 発表標題 言語負荷が連続タイミングタスクに与える影響
3. 学会等名 ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大山剛史, 伊藤照明
2. 発表標題 反復タッピング運動においてフィッツの法則に影響を与えるパラメータ
3. 学会等名 第30回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大山剛史, 中川千怜, 伊藤照明
2. 発表標題 触覚デバイスによる粘性力場がフィッツの法則に与える影響
3. 学会等名 第71回 電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Oyama Takashi, Ito Teruaki
2. 発表標題 Motor Control of Hand Force for Visual Indicator without Hand Displacement
3. 学会等名 International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大山剛史, 伊藤照明
2. 発表標題 上肢運動における相互作用トルクに着目した運動軌道の解析
3. 学会等名 日本機械学会第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 難波裕昌, 大山剛史, 伊藤照明
2. 発表標題 上肢運動における順ダイナミクスモデルの学習
3. 学会等名 第21回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曾根海斗, 大山剛史, 伊藤照明
2. 発表標題 運動制御における相互作用トルクの影響
3. 学会等名 第21回IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Oyama, M. Ayabe, Y. Inukai, S. Saito, J. Takato, and A. Sako
2. 発表標題 Stimulus-response compatibility effects in foot responses to visual motion stimuli along the vertical and sagittal axes
3. 学会等名 IEEE SMC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大山剛史
2. 発表標題 人にやさしいインタフェースのための視覚と左右の手との対応に関する研究
3. 学会等名 岡山県立研究機関協議会第11回研究交流発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大山剛史, 伊藤照明
2. 発表標題 上肢運動における相互作用トルクに着目した運動軌道の解析
3. 学会等名 日本機械学会 第29回設計工学・システム部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大山 剛史 | 岡山県立大学 教員活動実績データ管理システム
<https://gdata.oka-pu.ac.jp/profile/ja.9d88b511aab73c7988098bf34185996d.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
--	---------------------------	-----------------------	----

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