

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00235

研究課題名(和文) 視線計測に基づく随意運動の視覚運動変換メカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Visual-motor transformation mechanism of voluntary arm movement using gaze measurement.

研究代表者

福村 直博 (Fukumura, Naohiro)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90293753

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトが線を描く運動では、視覚フィードバックの遅れに対処するために、視線位置を適切に制御して腕運動制御に必要な情報を得ている。この腕と視線の協調制御メカニズムを調べるために、線描画時のペンの位置と視線の同時計測実験を行った。その結果、描画開始前の運動計画によるフィードフォワード制御と、オンラインでの視覚情報に基づく制御での視線制御法の違いを明らかにした。また、白紙に線を描く場合には、描画前に通過すべき経由点をいくつか視覚で確認し、その点を通るように描くことが確認できた。さらに、移動する目標を追って描く場合には、視線のサッケードがペン運動の不連続性の原因になっている可能性を示唆する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトが線描画運動においては、運動開始前の運動計画に基づくフィードフォワード制御と、運動中に得た視覚情報による予測に基づくフィードバック制御の組み合わせにより、視覚フィードバックの遅れを補償して、正確に線を描いていると考えられているが、その制御スキームはまだ解明されていない。本研究における視線との同時計測実験の結果、制御スキームの違いによる視線運動の相違を見出したことは、両方の制御スキームを組み合わせた制御モデルの構築に寄与し、ヒトの運動制御のメカニズムの解明につながると期待できる。また、ここで得た視線運動の傾向が、描画の正確性と相関があることが示され、書字運動の練習などにも役立つ可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In human line-drawing movement, in order to cope with the delay of visual feedback, we properly control the gaze position and obtain the information necessary for arm movement control. In order to investigate such eye-hand coordination control mechanism, a simultaneous measurement experiment of the position of the pen and the gaze during line-drawing was performed. As a result, we clarified the difference of gaze pattern between the feed-forward control based on the motion planning before the start of drawing and feedback control based on the online visual information when tracing the line. In addition, when drawing a line, it was confirmed that we confirm several points on the desired curve line that should be passed before drawing, and draw so as to pass through that point. Furthermore, when tracking a moving target, we suggest that the saccade may cause discontinuity in pen movement.

研究分野：生体情報工学

キーワード：アイ・ハンド コーディネーション 線描画運動 視線計測 腕運動制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトの上肢は様々な運動を巧みに行う事ができるが、これらの運動を正確に行う上では、視覚から得た目標軌跡や、自分の手先位置に関する情報が重要な役割をなす。運動の計画、制御において、視覚を通してどのような情報を得て、それをどのように使っているかを検討することは随意運動の計算理論を明らかにする事につながり、ヒトの高次の認知・運動機能をより深く理解できることが期待できる。

腕の運動を実現するには、運動計画、座標変換、制御の3つの問題を解かなければならない。運動の目標は視覚的に提示されることが多く、したがって視覚を通して運動開始前に運動を計画するためと、さらに運動中に腕を正確に制御するために必要な情報を得なければならぬ。運動が複雑になった場合、軌道全体の誤差を小さくするように制御することは難しく、書字運動などを例にして、軌道の途中に複数の経由点を設定して、その点を通るような滑らかな軌道をヒトは生成している、という仮説が提案されている。この経由点がどのように定まっているかはまだ明らかでないが、運動開始前にお手本が提示されてそれを真似るような場合には、この経由点情報を認識することが必要であると考えられ、それを詳細に検証するには、運動開始前に手本軌道が提示されたときに、どこを重点的に見ているか、あるいは運動中に見ている点との一致点を調べるなどの視線情報の解析が有効である。

また、運動中の制御においては、視覚情報が運動にフィードバックされるまでに100ミリ秒以上の時間がかかるため、視覚情報を基にフィードバック制御を行っても正確な制御は難しい。そのため、運動中に得られた視覚情報をどのように制御に用いているかは完全に解明されていない。2点間到達運動などの腕運動においては、運動の開始前に運動指令を計算するフィードフォワード制御を行うという仮説と、自分の手先が少し後に通る位置を予測することでセンサフィードバックの遅れを補償し、制御を行うという最適フィードバックモデル仮説があるが、この両者は相反するものではなく、並列に機能することで、正確な制御を実現していると考えられる。しかし、フィードフォワード制御が主である場合とフィードバック制御が主である場合とでは、運動を行うにあたって必要な情報が異なる。従って、この場合も運動中の視線情報を計測・解析することによって、タスク毎にどのような制御戦略を取っているのかを推測することが可能になると期待できる。

これまでペンで線をなぞる運動 (Tracing) においては、視線が手の位置より先行することが知られているが、我々はこの視線先行量に注目して解析した結果、先行量の多い被験者と少ない被験者がいることがわかった。先行量の少ない被験者は、実際のペン先位置と目標軌跡との誤差に注目していると考えられるが、感覚フィードバックの時間遅れがあることを考えると、この誤差をそのまま利用する事は難しいと考えられる。運動中に視覚が得ている情報がいったい何であり、どのように使われているかを調べる事は、フィードフォワード制御モデルと最適フィードバック制御モデルの組み合わせからなると思われるヒトの制御戦略スキームを明らかにする上で、重要なアプローチであると考えられる。

すなわち、ヒトが様々な運動を行う上で必要な情報を得るために視線を制御していることから、運動前と運動中の視線位置を解析することで、運動を計画、制御するための必要となっている情報の同定や、ヒト腕の随意運動の制御スキーム、そして巧みな上肢の運動の計算原理の解明につながることを期待できる。

### 2. 研究の目的

上述したような線描画時のペンの位置と視線の同時計測実験によって、次の3つの研究課題に取り組んだ。

(1) ヒトが線を描くときの視覚情報が腕運動に反映されるには遅れがあるため、運動前の事前計画によるフィードフォワード制御と、オンラインで得る視線情報を用いて腕の位置を予測しながら制御する最適フィードバック制御を併用し、かつ使い分けられていると考えられているが、この制御戦略の違いが視線制御にどのように現れているかを検証する。

(2) ヒトが線を描くとき、フィードフォワード制御を行うためには、運動開始前に描く軌跡に関する情報を視覚で確認して運動計画を立てる必要がある。これまで、運動中の視線計測実験は多く行われているが、運動開始前に目標軌跡のどこを確認しているのか、そしてその情報をどのように利用しているのかについては、実験例は少ない。そのため、描かれている目標軌跡をなぞる Tracing タスクと、目標軌跡を先に提示し、描画時には目標軌跡を消す Drawing タスクにおいて、目標軌跡を表示したタイミングから視線計測を行い、運動開始前に確認した情報が運動中にどのように使われているかを調べる。

(3) 先行研究より、手本の線をなぞる線描画運動 (Tracing) の場合に視線がペンの位置より先行する被験者と、ペンの位置をずっと見ながら描く被験者がいることがわかっている。この両者の制御戦略の違いを明らかにするため、視野制限をして、先行する被験者がどの程度の視野制限で視線を先行させるかを調べる。

(4) 動くターゲットを手で追う Manual Tracking において、ターゲットの動きの周波数成分よりも低い周波数成分が手の運動に現れる運動間欠性と呼ばれる現象があり、これが視線情報の遅れと関係しているという仮説を検証する。

### 3. 研究の方法

実験はすべて暗室で行い、タッチモニタにタッチペンで線を描く時のペンの動きを測定し、同時に視線計測装置 (Tobii Pro X3-120) を用いて視線を計測した (図 1)。サンプリング周波数は 120Hz である。Tracing 運動を計測するときには、手本の曲線、または直線をタッチモニタ上に表示し、指示にしたがってタッチペンでその線をなぞってもらった。手本が表示されていない線を描く Drawing の場合には、運動開始前に手本の線がタッチモニタに表示され、一定時間後に線が消されてその後その手本通りに線を描いた。動くターゲットを手で追う Manual Tracking の場合には、移動するターゲットのみが表示され、そのターゲットの軌跡を追う、というタスクを計測した。



図 1 実験環境

### 4. 研究成果

(1) Tracing 課題において、手本軌跡を直線から S 字型の曲線まで様々な難易度の線を設定して描かせたところ、軌跡が複雑になり、曲率変化が大きくなるにつれて、Fixation の回数は増加し、Saccade の移動距離は減少するが、Saccade の時間間隔には変化が見られなかった。また、S 字のような曲率変化が大きい軌跡では、ペン先が手本軌跡上の曲率が大きくなる部分を通り終えたタイミングで Saccade の発生頻度が高くなること分かった。特に、S 字型の軌跡では、2 つ目の曲率ピークの付近で、曲率ピークの位置を超えた後に Saccade が多く発生している傾向が見られた (図 2)。

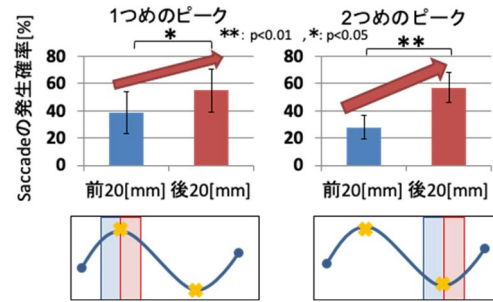


図 2 曲率ピーク点付近の Saccade

(2) これは、曲率が高いような複雑な軌跡をなぞる場合には、Tracing タスクであっても運動の前半は運動開始前に立てた運動計画を用いてフィードフォワード制御をメインに行なっているため、あまり軌跡を見なくても良いのに対し、運動の後半になると、運動中にオンラインで得ている視覚情報を基に、フィードバック制御が優勢な制御に移行している可能性が考えられた。これを詳細に調べるため、より長い曲線軌道を用い、軌跡を表示してから運動を開始するまでの時間や、描画にかかる時間などの時間統制が異なる様々な条件で Tracing 課題時の計測実験を行った。実験の結果、制御戦略が運動の途中で変化しやすいであろう、事前計画の時間が短く描画時間が長い時間統制条件で Saccade 頻度が変化する傾向が多く見られた。これは運動開始前の運動計画を正確に作るできないため、よりオンラインの視覚情報に頼ったフィードバック制御を行っていることを示していると考えられる。また、手本軌跡と描いた軌跡の誤差が小さい被験者はここで調べた曲率付近の Saccade 間隔がより長くなる傾向が見られたため、このような視線制御戦略は Tracing 運動の精度向上に寄与している可能性が示唆された。このように、フィードフォワード制御で行われているであろう運動前半と、フィードバック制御が主になっているであろう運動後半においては、曲率が高い部分において Saccade の特性が変わることを見出した。これにより、描画運動における視線を解析することで、フィードフォワード制御とフィードバック制御のどちらが主になっているかを見出すことができる可能性があり、制御スキームの切り替えのメカニズムを解明する手掛かりになると期待できる。また、Saccade の特性とペンの誤差との相関関係があることから、書字などの練習に視線位置計測を取り入れることで上達のコツをより早く獲得できる練習方法につながる可能性もある。

(2) 描画運動を行う時には、事前に目的の手本軌跡を視覚で確認して運動計画を立てた後に運動を開始し、運動中も視覚により必要な情報を取得しながら制御している。そこで、目標軌跡が運動中にすべて見えている Tracing タスクと、運動開始後には目標軌跡を消す Drawing タスクを被験者に行わせて、運動開始前と運動中の固視点を注視点として解析した。Drawing タスクでは運動開始前の注視点は軌跡全体に広く分布しているのに対し、Tracing タスクでは始点終点付近を主に見ているだけであった (図 3)。

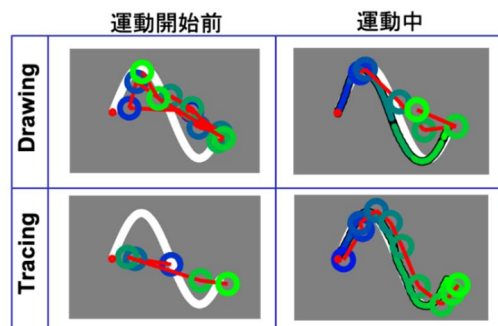


図 3 Drawing と Tracing タスクの固視点

さらに Tracing タスクと比較して Drawing タスクでは、運動前に注視した点を再度運動中に見直している率が高い上に、手本軌跡とペンの位置の誤差を比較したところ、Drawing では運動開始前に見た点を再度見た注視点でのペンと目標軌跡の誤差が、他の注視点における誤差よりも小さいのに対し、Tracing ではその両者の誤差に有意差は見られなかった (図 4)。すなわち、Drawing の場合には 事前に軌跡上に運動を行うために重要な特徴点を探し、それらの点を通るように制御を行っているのに対し、Tracing ではオンライ

ンで視線位置を先行させて手が通る目標点を設定して制御していることが示唆された。この結果は予測された通りの結果ではあるが、実際に明確に計測した研究例はなく、運動前や運動中の視線位置、特に注視点が手先位置の目標とする経路点になっている可能性を示唆しており、特に目標軌跡が表示されていない Drawing での制御戦略を明らかにする上で重要である。今後はこの視線位置を目標位置とし、フィードバックループの時間遅れを考慮した制御シミュレーションを行うことで、Drawing と Tracing の両方の軌道の特徴を再現できるかを調べる予定である。

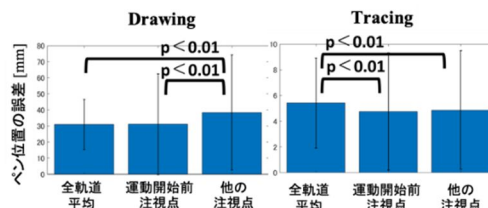


図 4 注視点での描画誤差

(3) Tracing タスク時の視線先行量の傾向が被験者によって異なることを調べるため、ペンの位置を中心に視野を制限した環境で Tracing タスクを行う実験を行った。視野角で直径 5, 10, 30 度に視野制限した条件と、視野制限がない条件で視線がペンの位置より先行する量を比較した。その結果、一部の被験者は視野が狭い条件から一貫して先行量が少なく、常にペンの位置を見ながら

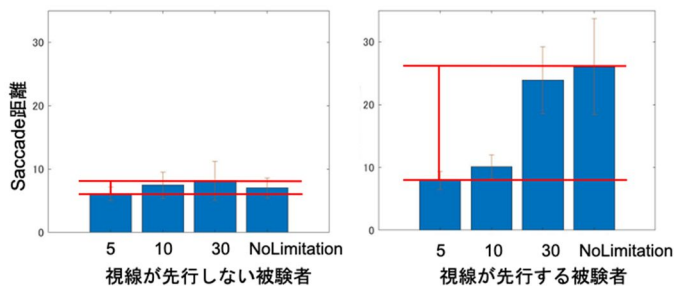


図 5 視野制限に伴う視線先行量の変化

線を描いているのに対し、他の被験者は視野制限が 30 度になると視線が先行するようになる(図 5)と共に、1 回の Saccade による視線移動距離が大きくなることがわかった。これはある程度の視野が確保される場合には制御戦略に個人差があることを示している。今後はこの違いが描画の誤差と関係しているか、つまり線を描く技能との関係性を調べるとともに、視野制限する範囲をより細かく変化させて調べ、視線が先行する被験者がどれくらいの視野制限において先行するようになるかを調べて、移動する目標を追う時に Saccade が生じる目標の速度の個人差などとの関係を考察することで、この制御戦略の差が生じる原因について調べる。

(4) 動く描画面上のターゲットを手で追う運動において、ターゲットの動きの周波数成分よりも低い周波数成分が手の運動に現れる、運動間欠性と呼ばれる現象が起きる要因について、まず以下の仮説を立てた。すなわち、予測が困難な移動をする目標を視線で追う場合、目標から視線が遅れた際に視線が目標に追いつくように Saccade が発生すると考えられる。視線位置は上述の結果のように手が通る目標位置であるため、Saccade が起きると手先を動かすための目標位置も大きく修正される。それに伴って運動指令を急激に変更する必要が生じるため、運動間欠性が発生すると予測した。この仮説を検証するために、動くターゲットを追う Manual Tracking タスク(タスク 1)と、ターゲットの動く軌跡も表示される Tracking & Tracing タスク(タスク 2)、軌跡のみが表示されている Tracing タスク(タスク 3)のそれぞれのタスクにおける手と視線の動きを解析した。Wavelet 解析を用いてペンの運動の不連続点を求めて、運動の間欠性が生じている点やタイミングを抽出し、視線データから求めた Saccade が生じている点やタイミングと比較した。まず図 6 に示すように、手の動きにおける間欠成分のパワーがタスク 1, 2, 3 の順で減ることに加え、この順序で Saccade の距離が長くなり、頻度が少なくなること、視線位置と手の位置の差である先行量が大きくなることわかった。これは軌跡が見えるタスク 2, 3 においては、軌跡上の目標点に対して Saccade によって視線を先行させることで一定区間毎に先の運動指令を計算できるため、より滑らかな軌道を生成できるのに対し、ターゲットが常時移動するタスク 1 では小刻みな Saccade でターゲットを追うために目標位置が不連続に変化し、間欠成分が現れやすくなるという可能性が示唆された。さらに、タスク 1 においてはタスク 3 と比較して、運動間欠性が生じたタイミングに近いタイミングで Saccade が生じていることがわかり(図 7)、我々の仮説が運動間欠性を発生させる要因の一つになっている可能性を示せた。今後は、Saccade と腕運動の不連続性が生じた点の対応方法を検討してこの仮説の検証を進め、視線運動が腕運動に与える影響について詳細に調べる。また逆に Tracing などでは運動の不連続性が生じない理由も調べることで、ヒトが滑らかな腕運動を生成できるメカニズムについて明らかにしたい。

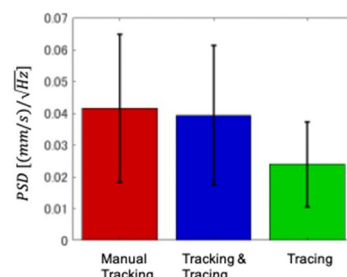


図 6 運動間欠性のパワーの比較

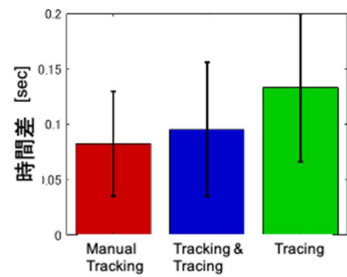


図 7 運動間欠性と Saccade の時間差

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Naohiro Fukumura, Ikuma Sunabe
2. 発表標題 Analysis of fixation points before and during writing a line
3. 学会等名 29th Annual Neural Control of Movement Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山智也, 福村直博
2. 発表標題 視野を制限した際のなぞり書き時の視線解析
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長田大和, 福村直博
2. 発表標題 ウェーブレット解析を用いた線描画時における運動間欠性と眼球運動 の関連性の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長田大和, 福村直博
2. 発表標題 目標追従運動となぞり描き運動における運動間欠性の解析
3. 学会等名 第12回 Motor Control 研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Emiko Shishido, Norio Ozaki, Keiji Imoto, Norihiro Sadato, Naohiro Fukumura
2. 発表標題 Eye movement as action prediction when humans trace a line
3. 学会等名 第11回Motor Control研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村 晋之介, 宍戸 恵美子, 福村 直博
2. 発表標題 サッカー発生パターンに基づくなぞり運動中の手と眼球の協調制御の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Emiko SHISHIDO, Shuntaro OKAZAKI, Keiji IMOTO, Norihiro SADATO, Naohiro FUKUMURA, Norio OZAKI
2. 発表標題 Analysis of eye-movement when drawing a line
3. 学会等名 第39回日本神経科学大会（国際学会）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中村晋之介, 尾崎紀夫, 定藤規弘, 井本敬二, 宍戸恵美子, 福村直博
2. 発表標題 曲線をなぞる運動におけるサッカー位置の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊橋技術科学大学 情報・知能工学系 生体運動制御システム研究室  
<http://www.bmcs.cs.tut.ac.jp>

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
連携研究者	東島 恵美子  (Higashijima Emiko)  (40723101)	名古屋大学・医学系研究科・客員研究員    (13901)	