

基礎論文

遠隔手術を想定した映像遅延が上肢の微細な位置決め および押し下しに与える影響

米田 巖根^{*1} 小木 哲朗^{*1} 当麻 哲哉^{*1,2}

Influence of visual delay on minute pointing and push down by upper limb assuming telesurgery application

Iwane Maida^{*1}, Tetsuro Ogi^{*1} and Tetsuya Toma^{*1,2}

Abstract --- Telesurgery by man-machine interaction is currently limited to experimental trials, partly because the visual delay during transmission interferes with the surgeon's hand-eye coordination. The purpose of this study is to examine effect of performance in minute pointing with visual delay. In this experiment, range of visual delay was decided based on previous telesurgery cases, and index of difficulty was prepared based on Fitts law. We conducted tests in which subjects performed pointing operations while visual delay interfered with their hand-eye coordination. The delay levels range from 131 ms to 598 ms by 67 ms. The results showed that Fitts law is able to be applied up to approximately 500 ms. In addition, it was suggested that another threshold existed between 331 ms and 398 ms. These two thresholds can be considered as changing points of motion strategies.

Keywords: visual delay, fitts law, perceptual motor coordination, telesurgery

1 はじめに

ICT の発達による高精細映像の伝送技術と、ロボット技術が可能にした微細な動きを組み合わせた遠隔手術は、社会的期待が高いものの、実験的な試みに留まっている[1-2]。この大きな原因の 1 つは、作業における映像遅延である。Papadakis らは、シミュレーションによって End-to-End 通信において遅延がゼロにならないことを指摘[3]している。

図 1 は、同室内における遅延のないロボット操作と、ネットワークを介した遠隔手術における遅延を伴ったロボット操作を比較したものである。遠隔手術における映像遅延の要因は、通信回線における「伝送遅延」および、映像の圧縮解凍処理に伴う「処理遅延」の 2 つが含まれている。

これまで実験的な遠隔手術の研究報告において最も映像遅延が小さい事例は、France TELECOM ATM 専用回線を用いた米・仏間における世界初の遠隔手術[1]であり、往復の伝送遅延が 1 パケットにつき 78-80ms、また映像の処理遅延は 70ms 発生していた。この事例では、執刀医のアームの動きをスレーブサイト側のロボットが反映させた映像が返ってくるまで合計で 155ms の映像遅延が発生したことが報告されている。

また、日・タイ間(JGN2 回線) や日本・韓国間(AP II 回線)の遠隔手術実験では、h.264 低遅延コーデックや

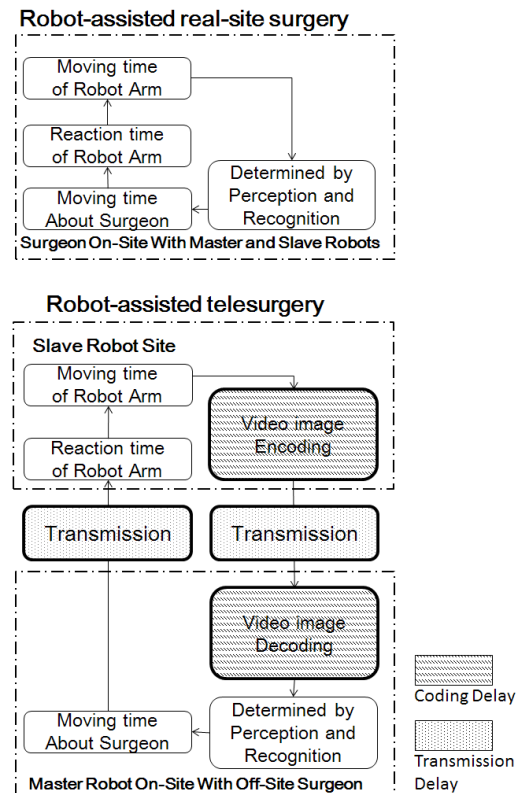


図1 システム構成と遅延要因

Fig.1 Configuration of system and delay causes

*1 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科

*2 慶應義塾大学フォトリソクス・リサーチ・インスティテュート

*1 Graduate School of System Design and Management, Keio University

*2 Keio Photonics Research Institute(KPRI)

非圧縮 3D 映像を用いた遠隔手術が行われており、術者が感じる合計の遅延量は、それぞれ 278ms および 592ms であることが報告[4-5]されている。

これらの報告[1,4-5]では、低遅延伝送や非圧縮 3D 映像などの観点で電気メスなどの用具が遠隔操作も可能であることや、胆のうなどの手術部位について切除可能であることが報告されている。ここから、遅延を伴う遠隔手術下にあっても高精細 3D 映像などの機能が作業性の向上に一定の効果があることは明らかである。

一方で、視覚的な遅延の増加は作業効率の低下[6]を起こすことが知られていることから、これらの研究において報告された遅延量 155ms、278ms および 592ms の作業環境は、均質な作業性を有していたとは考えにくい。

高精細化による作業面に関する詳細情報および両眼視による奥行き情報の提示は、作業者の身体的な機能を補ってはいるものの、視覚的な遅れによる妨害効果を十分に抑制しているとは言い難い。また、これまでの報告において示された効果の検証には、動作を構成要素に分解した上で、遠隔手術における根本的な問題となる視覚的な遅延が作業性に対して与える影響を明らかにする必要がある。

手技は、切開・剥離・結紮・縫合の4つの動作があり、これらは大別して「ターゲットまでの位置決め動作」、および「位置決め後の反応や押し下し」といった2つの要素に分解することができる。

つまり、同じ難易度と定量的に作成された課題を用いながら、先行研究のような異なる遅延量を提示した際の結果を見ることで、遠隔手術において本質的な問題である視覚的な遅延が、ターゲットに対する位置決め、およびそれ以後の反応時間や押し下しプロセスに対する作業性への影響が検討できる。

本研究で対象とする微細な位置決め作業は、ターゲット幅が狭くフィードバック制御に対する認知的な負荷が高いため、位置決めのみならず、位置決め後の反応時間および押し下しプロセスへの影響が大きい。

これまでの先行研究でも、映像遅延と作業時間の関係からその効率性について議論されているが、微細度合い、遅延水準の細かさ、提示する遅延量の幅の3つが、これまで、背景として整理してきた遠隔手術における作業性におけるベースラインの提示という意味では十分ではない。

遠隔手術は原理上、視覚的な遅延が避けられないため手と目の協調が阻害されることにより位置決め難易度が上昇するため作業効率が低下する。作業効率の低下は、安全性の観点から微細な位置決めを行う執刀医に対して心理的な負荷を与える。

また、位置決め後の反応や押し下し動作における作業時間は、手術の正確性に関係する。

これらの影響について、作業時間に基づいた作業効率の低下からだけではなく、位置決め動作における構成要素からアプローチすることで、遠隔手術などで作業者が漠然と感じる視覚的な遅延の増加による作業の違和感を定量的に示す必要がある。

以上から本研究では、視覚的な遅延が、作業パフォーマンスの構成要素となる位置決め難しさ、および位置決め後の反応や押し下しに対する影響を定量的に明らかにすることを研究の目的とする。

2 関連研究

第1章において、遠隔手術における映像遅延は構造的に発生することについて整理を行った。第2章では、視覚的な遅延が位置決め等における作業性に与える影響について整理を行う。

2.1 位置決め難しさに関する研究

位置決めに関する研究は、Paul Fitts が Shannon-Hartley の情報理論から公式化して以来、多くの公式が提案[7-9]されてきた。

本研究では、位置決め難易度を定量化できる Fitts の法則を用いて課題の難しさを設定した。本研究では、一般的に用いられることが多い MacKenzie[9]の公式を用いる。

$$MT=b(ID)+a \quad (1)$$

$$ID=\log_2(D/W+1) \quad (2)$$

ここで、移動時間 MT (Moving Time) は2つのターゲット間の平均移動時間を示し、困難度 ID (Index of Difficulty) は作業課題の難しさを示す指標である。また、D (Distance) はターゲット間の距離、W (Width) はターゲット自体の幅を示している。

式(1)におけるb値およびa値は、実験データのプロットを近似した実験式によって得られるパラメータであり、b値は困難度 ID の係数である。また、a値は ID=0 における MT 軸の切片であり、位置決め後の反応時間や押し下し成分が含まれている。

2.2 視覚的な遅延と作業効率

視覚的な遅延は、手と目の協調、特にフィードバック制御を用いた修正運動に影響を及ぼす。位置決め運動をはじめとしたポインティング動作の速さは、ベル型のカーブになっており、古くからピーク速度を境に計画時間と、調整時間に分けるモデルが提案[10]されている。これは、フィードフォワード制御とフィードバック制御による運動における段階と言い換えることができる。

また、ピーク速度までのフィードフォワード制御に基づく運動が動作開始前に計画され、同制御開始後に変化した外的な環境については、調整時間期において視認されたターゲットまでの距離とターゲットサイズに基づいて調整時間における運動計画が修正されることが指

摘[11]されている。

このことから、視覚的な遅延が提示された場合も、被験者はポインティング運動の前半に感じた運動の誤差を、後半部分においてターゲットサイズなどの視覚的な物理量を判断基準に修正を行う必要がある。しかし、遅延量といった時間的な遅れによって手元の位置が定まらないため、この仕組みがうまく働かない。

藤崎は遅延量とペグ打ちの成績から、視覚的な関係から視覚的な遅延がもたらす作業性への影響について分析を行い、遅延約 500ms 前後で作業成績に違いが見られることや、課題の成績曲線における接線の交点から遅延に順応するための 2 つの運動メカニズム[6]があることを示唆している。同様に Hoffmann は Fitts の法則式に基づいて作成された作業課題を用いて、遅延量が 700ms 程度になると運動の方略が変化[12]することを指摘している。

ここから視覚的な遅延が発生する場合、ある遅延量を境に運動の効率を高めるために位置決め動作の変化が、運動の方略変化およびメカニズムの切り替えによって発生していることが分かる。

しかし、先行研究[6]および[12]では、運動方略が変化する遅延量について示唆しているものの、その推定は作業成績から推定したものであり、位置決め成績を低下させる要因について、位置決めや押し下しといったポインティング動作を構成する要素の値の変化から明らかにされたものではない。

また、Fitts の法則に基づいた微細な位置決め課題と遅延の関係について報告したものとして、MacKenzie による研究[13]があるものの、この先行研究では、遅延量 75ms と 225ms の水準間において作業性に関する有意差が確認されたものの、マウスを用いた課題のため Fitts の法則式から得られる実験パラメータ b 値が本実験で想定したスタイラスに相当する手術器具とは異なること、また遅延水準が 4 つと荒く、またその設定された水準の間隔が一定ではないなどの問題がある。

ここから、位置決め困難度の係数である式(1)の b 値、および位置決め後の反応や押し下し時間である同式の a 値の変化を明らかにするため、以下のような実験を行った。

3 研究の方法

3.1 実験機材の配置

本研究における実験機材の配置は図 2 の通りである。実験では、この手元映像をカメラで取得させ、遅延発生器を中継してモニタに伝送した。これらの機材を用いて、原理的に発生するマスタースレーブ間の視覚的な遅延をモニタ上に再現し、手元の微細な位置決め運動を行った。

手元映像を取得するビデオカムは、拡大率の調整を行い、モニタに投影されるターゲットを実物大に再現した。くわえて、眼からモニタ投影面までの距離と、眼から手元までの距離が同じとなるよう統制を行った。ここから視覚的な遅延が作業性の低下に与える影響について外乱となる表示スケーリングによる位置決め難易度のばらつきを排除した。

また、被験者は、視線と水平に設置したモニタを見て手元の位置決め作業を行う。その際、被験者は、机に接近して座るものとし、モニタ注視時に手元が見えないように液晶ペンタブレットを配置した。

以上の機材構成の配置から、視覚的な遅延を伴った際におけるターゲット間のポインティングにおける位置決めについての実験条件を設定した。

3.2 位置決めパフォーマンス測定および映像機材

映像機材および測定機材は、表 1 の通りである。カメラやモニタなどの映像機器については業務用のものを用いて実験で設定する以外の遅延量を少なくするよう留意した。本構成における最低遅延量は、遅延発生器[14]について 1 フレーム(約 33ms)を追加した遅延量を固定遅延量とした。このベースライン遅延量は 131ms であった。

課題の作業時間については、液晶ペンタブレットを用いて 1 打点に要する作業時間について測定した。

3.3 提示する遅延刺激

提示した遅延水準は表 2 の通りである。遅延発生器を用いて 131ms から 598ms までの区間について 2 フレーム(約 67ms)毎に 8 分割して遅延水準を設定した。

作成した 8 水準の遅延刺激は、被験者には伝えずに徐々に遅延が大きくなる群と小さくなる群を組み合わせ提示された。これにより、試行回数の増加による遅延への慣れに関する効果を平均化するよう留意した。

3.4 位置決めに関する困難度の設定

本研究では、式(1)に示される Fitts の法則式を用いて課題の難しさを設定した。

課題の困難度は、式(2)に基づいて作成した。組み合わせは表 3 の通りである。遠隔手術ロボットにおける微細度合いの限界から、最も小さいターゲット幅を 2.03mm として設定し、Fitts の法則式に基づいて課題の困難度 ID を作成した。困難度は表 1 にあるペンタブレットの画素サイズを偶数倍した距離に基づいて作成し、計算から算出された困難度の値を小数点 2 位で四捨五入して端数処理を行った。実験課題は、表 3 にある位置決め困難度の設定に従って 2 点の円形ターゲットをモニタ面と平行に配置した。また、位置決めターゲットはこれら 2 点を結ぶ中点とタブレット画面における対角線の交点とが一致するように配置した。

3.5 被験者および教示

実験では、視覚的な遅延が位置決め作業性へ与える影響について明らかにするため、その他の外乱要因を抑制する必要がある。本研究では、視覚に異常のない 20 代右利き男性で統制した 18 名の被験者を用いた。

課題に対する動作の統制として実験の開始前に教示に基づいて課題を行うよう指示した。内容およびその優先順位は以下の通りである。

- ①できるだけ正確に打点すること
- ②できるだけ早く作業を行うこと

以上の、視覚的な遅延の影響が微細な位置決め運動と押し下し運動に与える影響について実験を行った。

3.6 実験の手続き

試行間の条件を一定に保つために、被験者が試行前に置くべき手のホームポジションは、ペン先が右側のターゲットにくる位置とした。

各試行は左右 2 つのターゲットに対して交互に合計 20 回の打点によって構成され、実験者の合図によって開始される。計測の開始は、左側のターゲットの打点を起点として、自動的に計測が開始される設定とした。

各被験者が行う試行数は、表 2 で示された 8 つの遅延水準について遅延が上昇する群と低下する群を 2 セットずつ計 16 試行組み合わせたものを 1 ブロックとし、3 回行われた。各ブロックには、困難度 3 水準をランダムに配置した。各被験者は計 48 試行(960 打点)を行った。

また、各試行の合間に 1 分間の休憩を取らせることとし、被験者の疲労の要素について留意した。実験倫理の観点から、実験において気分が悪くなった場合には作業を中止するなどの説明を行い、同意を得た上で実験開始を行った。

3.7 実験デザイン

本研究では、視覚的な遅延が作業効率に与える影響を明らかにするため、以下のような分析を行った。まず、Fitts の法則に基づき、各遅延量の困難度と移動平均時間の関係から実験式を求める。この Fitts の実験式から、同法則の当てはまり度合いにあたる決定係数 R^2 を見ることで遅延状況下における Fitts の法則式の当てはまり、困難度 ID の係数にあたる式(1)b 値を見ることで位置決め後の反応時間や押し下しの作業効率の 3 変数について遅延量との関係をプロットする。これにより、視覚的な遅延が増加した際における作業効率および運動方略の変化に与える影響を明らかにする。

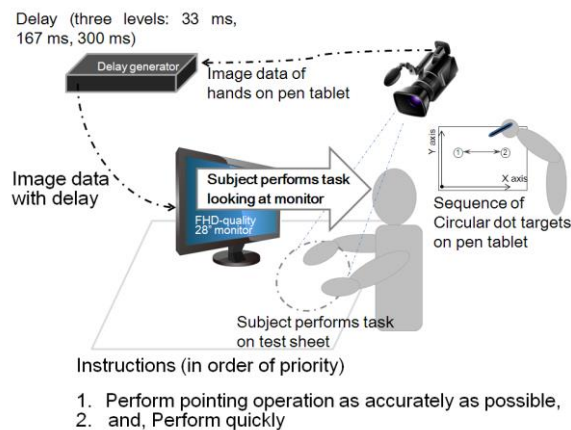


図2 実験機器の配置

Fig.2 Test apparatus configuration

表1 実験機材の一覧

Table 1 Test and measurement equipment

	機器名 Item	型番 Manufacturer and model	備考 Comments
映像提示装置 Equipment Tools	ビデオカム Video Cam	Astro AH-4410-A	FHD 60i output
	液晶モニタ Monitor	IBM T221	22.2-inch FHD monitor
	遅延発生器 Delay Generator	[Developed by Keisoku Giken Co., Ltd]	Max 500ms, By 67ms
課題測定装置 Measurement tool	液晶ペンタブ レット Graphics tablet	Wacom DTU-1031	10.1 型 (216.96× 135.6mm) 1280×800 ドット

表2 提示した遅延水準

Table 2 Visual delay levels

Delay levels: 提示刺激の水準(ms)							
131	198	265	331	398	465	531	598

表3 位置決め困難度の設定

Table 3 Setting levels of Index of difficulty based on Fitts law

困難度 ID: Index of Difficulty	距離 D:Distance (mm)	サイズ W:Width (mm)
3.0	60.0	8.48
4.0	60.0	4.07
4.9	60.0	2.03

4 分析の結果

分析の結果として、まず、実験の結果について遅延量ごとに Fitts の法則式に基づく実験式として表現し、次に視覚的な遅延量の影響を以下の観点から分析した。

- ・ Fitts 近似式の当てはまり度合いに与える影響
- ・ 位置決め作業効率に与える影響
- ・ 反応時間を含めた押し下し動作の作業効率に与える影響

ここから、視覚的な遅延により発生する協調運動の乱れが Fitts の法則式における位置決め困難度を与える影響、および位置決め後の反応や押し下しに関する作業効率に与える影響を明らかにする。

4.1 遅延水準ごとの近似式の変化

視覚的な遅延の増加が、手と目の協調に与える影響を確認するために、表 3 で分けられた困難度指数 3 条件に対して、提示した遅延量 8 水準ごとにプロットした。プロットは、Fitts の法則に基づき、困難度指数を横軸とし、平均作業時間を縦軸とした。

図 3 から、困難度 ID が増加するほど平均作業時間 MT は上昇することが分かる。

4.2 視覚的な遅延量の増加が Fitts の法則式に与える影響

本節では、遠隔手術で問題となる視覚的な遅延量の増加が上肢の位置決め動作の基本となる Fitts 式について、式(1)と同じ形の近似式から、遅延量の増加が同式における決定係数および b 値および、a 値に与える影響について結果を示す。

Fitts 近似式の当てはまり度合いに与える影響として図 4 は、図 3 から得られた近似式の決定係数についてプロットしたものである。

その結果、遅延水準 465ms までは Fitts の法則式は高い決定係数を伴っているものの、531ms 以降の水準では決定係数が急激に落ちていることが分かる。

4.2.1 遅延量の増加が位置決め作業効率に与える影響

図 5 は、Fitts の法則に基づいて導かれた実験式の b 値を、遅延量に対してプロットしたものである。ここから、遅延水準が 131ms から 331ms について、視覚的な遅延水準の増加によって b 値が高い決定係数を伴って線形に増加することが分かる ($R > 0.98$)。つまり、遅延量が増加するほど、位置合わせの困難度 ID の係数が増加していることが見て取れる。

また、残りの 4 水準については、前項における Fitts 式当てはまりによる結果から、遅延量 398ms から 465ms 間、および遅延量 531ms から 598ms 間の組み合わせを選択した。これら 2 群について傾向を見るために、近似をとった。ここから、b 値は上昇後、一度低下に転じてか

ら再度増加するといった連続した山型を示した。

4.2.2 反応時間を含めた押し下し動作の作業効率に与える影響

図 6 は、実験値により導かれた式(1)の a 値を、遅延量に対してプロットしたものである。図 3 から、遅延水準 531ms 以上の 2 水準については、Fitts の法則式の当てはまりが悪いため、それ以外の 6 水準について遅延の増加に対する同じような傾向を持つ組み合わせを選ぶために、遅延水準の変化から a 値の増加量が同じ傾向を示し、かつ比較的当てはまりの良い組み合わせを選択した。その結果、遅延水準 131ms から 331ms の 4 水準が遅延水準の増加による a 値の増加が少なく、かつ比較的当てはまりの良い組み合わせが得られた ($R^2 > 0.69$)。

また、前節と同様、残りの 4 水準については Fitts 式の当てはまりから、2 つの遅延水準群に分けることとし、その傾向を見るために近似を行った。

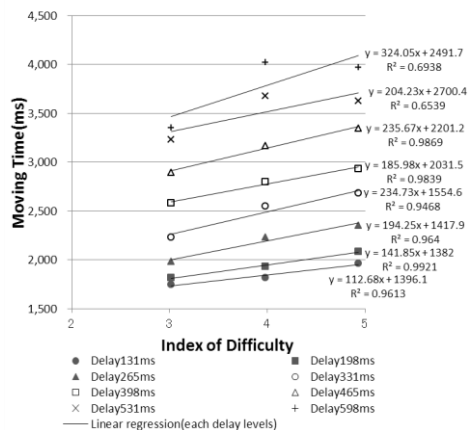


図3 遅延水準の増加に伴う Fitts 実験式の変化

Fig.3 Experimental formula based on Fitts' law with increasing delay levels

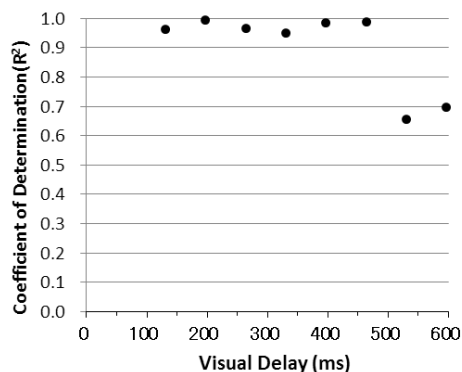


図4 遅延水準の増加に伴う Fitts の法則に関する当てはまりの変化

Fig.4 R^2 value of empirical formula based on Fitts' law with increasing delay levels

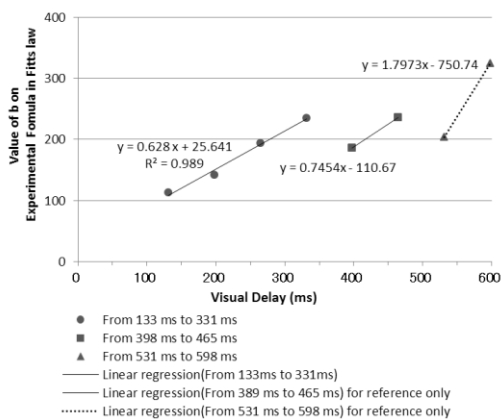


図5 遅延水準の増加に伴う Fitts 式 b 値の推移

Fig.5 b value of empirical formula based on Fitts law with increasing delay levels

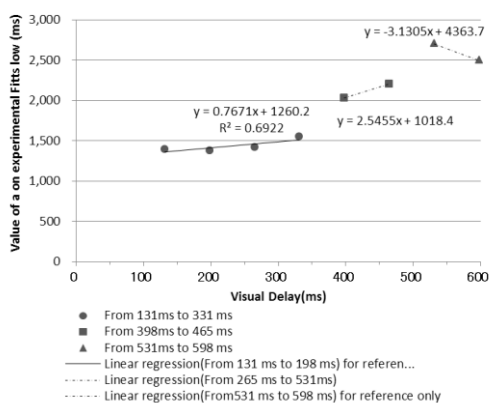


図6 遅延水準の増加に伴う Fitts 式 a 値の推移

Fig.6 a value of empirical formula based on Fitts law with increasing delay levels

その結果、遅延量の増加が一定量増加すると、a 値が約 500ms ずつ階段状に上昇するといった傾向を示した。また、531ms から 598ms の間については遅延量の増加に対して a 値の傾きが負に転じ、かつその切片が大幅に上昇している傾向が見られた。

5 考察

5.1 視覚的な遅延の増加に伴う Fitts の法則の当てはまりの変化

図 4 は各遅延水準において得られた Fitts の法則式の決定係数について、遅延水準を横軸にプロットしたものである。ここから、遅延水準 465ms までは各遅延水準において高い決定係数を伴っている($R^2 > 0.98$)ことが分かる。

しかし、遅延水準 531ms 以降については、決定係数が急激に落ち込む結果が得られた。この結果から、遅

延量 466ms から 530ms の水準間において連続動作における手と目の協調が崩れるポイントがあることが確認された。

視覚的な遅れがある場合、約 500ms まで課題成績が急峻に低下することが報告されている。課題のパフォーマンスを一定水準に保つためには、手と目の協調が欠かせない。これまでの報告でも、視覚的な遅延の増加によって作業パフォーマンスの低下が[6,12]が報告されている。これらの結果から、同法則式について遅延量 500ms 周辺より大きい遅延に対する新しい修正モデルの存在が示唆される。

5.2 遅延量と上肢の動きを伴う作業効率 b 値について

図 5 から、式(1)の係数である b 値は遅延量 331ms まで高い決定係数を伴って一致していることが分かる ($R^2 > 0.98$)。

遅延量の増加における b 値の変化から、遅延量の増加によって 331ms まで徐々に増加した後、減少してからまた増加するといった連続した山型となっており、大きな傾向として 3 つの群に分かれることが見て取れる。

この 3 群における b 値の推移を見ると、遅延量の増加とともに b 値も増加した後、低下する傾向が見えることから、これら山形の傾向の境に運動モデルを変化させる転換点の存在が示唆される。

b 値は、図 3 において示されたとおり、実験式から得られた困難度 ID の係数である。困難度 ID 値の組み合わせは、実験計画により設定されているため、定数項以外では、作業時間 MT に与える増加要因は b 値だけである。

このため、運動の方略が同じであれば、手と目の協調を乱す遅延量が水準 331ms から 398ms へと 67ms 増加しているにもかかわらず、困難度の係数値が低下することは考えにくい。

視覚的な遅延の増加は、手と目の協調を乱しフィードバック制御に対して妨害効果を与えるため、運動のパフォーマンスを低下させる。この問題を抑制するためには、被験者が作業性低下の原因である遅延に対して適応する必要がある。ここに運動メカニズムの変化ポイントの存在が示唆される。

参考値ではあるが、398ms から 465ms の区間の回帰式について、遅延量の増加と b 値のとの関係から、その傾きはほぼ一定があるが、切片が負に転じていることが分かる。

同一の運動方略である場合、b 値は、遅延の増加という刺激に対する反応として、131ms から 331ms の遅延水準区間と同様に係数の増加および、切片は正の値となるはずである。

しかし、遅延量 398ms から 465ms の区間については、切片が負に転じていることから、遅延量の増加に対する

式(1)の作業時間 MT を抑制するために、第 1 の運動方略の変化があると考えられる。

この切片の変化を伴った運動方略の変化は、定数項による作業時間の減少効果となるため、図 5 における傾きのように遅延量の増加を直接的に抑制するものではなく、間接的に遅延の影響を抑制する方略変更であると言える。ここから、遅延水準 331ms から 398ms 間のどこかに初期的な運動方略の変更を促す第 1 の閾値があることが示唆された。

また、遅延量 531ms から 598ms の区間では、遅延量の増加に対する b 値の傾きが、他の区間と比較して 2 倍以上の増加、および切片について大幅な値の低下が見られた。ここから、遅延水準 465ms から 531ms の区間のどこかに b 値の切片である定数項を大幅に低下させる第 2 の運動方略を変更する閾値があることが示唆された。

これまでの報告でも、視覚的な遅れがある場合、約 500ms を境に 2 つの運動メカニズムの切り替わり[6]や、遅延量が 700ms を超えると運動の方略が変化[12]することが示唆されており、第 2 の運動方略の変更ポイントと一致する。

5.3 遅延量の変化が押し下し運動 a の時間に与える影響

視覚的な遅延がポインティングに与える影響として、視覚的な遅延が増加することにより、運動の方略が、連続的に修正を行う方法から"wait-and-move 戦略"に変わることが報告[12]されている。この戦略は、修正運動による位置決め後において、提示されている水準以上の停止時間を設けることで、フィードバック制御を遅延に対して順応させていると考えられる。

図 6 から、遅延水準 131ms から 331ms の 4 水準について、遅延量の増加による a 値の増加が少なく、かつ比較的当てはまりの良い組み合わせとして選択した ($R^2 > 0.69$)。また残りの水準については、遅延量 398ms と 468ms の区間および、遅延量 531ms から 598ms の区間の 3 群に分けることができた。本節では、これらの傾向について考察を行う。

Fitts 式は、困難度と作業時間の関係を一次式で近似するものであり、式(1)の a 値は位置決め後の反応時間と押し下し時間に分解することができる。

視覚的な遅延量は、自分の手元の映像が位置決め後に遅れて認識されるため、位置決めがターゲット内にあったとしても、その位置決めが正しいと分かるまで提示した遅延量だけ待つ必要がある。また、逆に遅延による時間的なずれが手と目の協調を妨げて正しい位置決めがなされなかった場合、ターゲットに対する自らの位置決めがずれていることを判断するまでに、設定遅延量と次の位置決めに移るための認知的な反応時間が必要

である。

つまり、遅延の水準間で見た場合、1 水準にあたる 67ms 分だけ増加した際、遅延量が低水準の場合、協調に追加的な大きな乱れは発生しておらず位置決めが一度で成立して打点する。しかし、水準間において a 値が大きく増加している場合は、位置決めの際のやり直しに伴う時間が加算されていると考えられる。

同図から、遅延水準 131ms から 331ms の 4 水準については、遅延量の増加に対する作業時間の関係式の傾きが正の値をとっており、切片を除くと、遅延水準が 67ms 増加するごとに、追加的な作業時間が約 50ms 増えており、遅延量の増加分をやや吸収した形で推移しているが、次の区間をつなぐ、遅延量 331ms から 398ms においては、a 値が大幅に増加(約 500ms)している。

この a 値について大幅な増加があった次の遅延水準区間では、同図における遅延量の増加に対する a 値の傾きが、遅延水準 131ms から 331ms と比較して 3 倍以上になっており、位置決めの際のやり直しによる次のモーションまでの反応時間が累積されていることが示唆された。

また、次の区間をつなぐ遅延量 465ms から 531ms の水準区間においては、先ほどと同様、a 値について約 500ms の大幅な増加が見られた後、傾きなどのパラメータに対して大きな変化が見られた。

これまでの説明した 2 区間との大きな違いは、遅延量 531ms から 598ms の水準区間においては、遅延量と作業時間の関係式の傾きが負の値を取っており、切片を除くと、その作業時間は 531ms の水準と比較して約 200ms 減少していることである。くわえて、その反応時間を含む a 値の切片が、遅延水準 498ms における値と比較すると 4 倍以上増加している。

このことから、被験者は、先行研究で指摘されている"wait-and-move 戦略"[12]の特徴である、位置決め後に提示された遅延量以上のポーズを入れることによって視覚的な遅延によるフィードバック制御の破たんを抑制し、すくない回数で正確に位置決めを試行錯誤を繰り返して運動方略の変化が示唆された。

5.4 遠隔手術を想定した Fitts の法則の応用

本研究では、微細な位置決め課題に対して Fitts の法則式を用いることにより、同式の成り立つ遅延量や、遅延の増加が作業パフォーマンスを決定する位置決め困難度計数である b 値および位置決め後の動作に關係する a 値の変化について明らかにし、位置決め動作における基本的な要素から遅延の増加を伴う運動方略には 3 段階の変化があることが示唆された。

これまでの遠隔手術によって遠隔手術の安全性についての議論が進まない原因の 1 つは、遠隔における胆のう摘出手術という課題は同じであるものの、特定の機材構成が手術可能であったか否かといった事例におけ

る実現可能性を検証している点にある。

しかし、ミスが事故に直結する手術のような課題ではリスクコントロールの視点で、視覚的な遅延によって執刀医が何となく感じるであろう難しさを定量的に明らかにする必要はある。

本研究は、上肢を用いた動作における要素となる位置決め課題を通じて Fitts の法則式において定数であるはずの位置決め困難度係数 b 値、および位置決め後の反応や押し下しにあたる a 値が遅延量の増加によって、これまで報告されていたような作業時間の変化から見ていた遅延における作業性の低下だけではなく、動作の構成要素における値の変化から定量的に示した。

6 結論

本研究の結果、視覚的な遅延を伴うポインティング動作において、手と目の協調動作を前提としている Fitts の法則式が、遅延量 500ms 周辺まで当てはまることを見出した。また、遅延の方略の変化について、遅延水準 331ms から 398ms 間に運動方略の変更を促す第 1 の閾値および、遅延量水準 465ms から 531ms 間に運動方略の変更を促す第 2 の閾値があることが示唆した。

また、遠隔手術におけるリスクコントロールという視点で、高精細や立体視などといった視覚のプロセス後に存在する上肢を用いた動作において前提となる手と目の時間的な一致が遅延によって乱れた際の影響について、位置決めという極めて単純な課題成績から算出された実験式から動作の構成要素の変化を見ることで遠隔手術において何となく感じる違和感や難しさなどの心理的な負荷について定量的に示した。

謝辞

本研究は慶應義塾大学博士支援プログラム(全塾選抜枠)の助成を受けたものである。研究を進めるため様々な意見を頂いた慶應義塾大学 SDM 研究科 日比谷孟俊 SDM 研究所顧問および前野隆司教授、慶應義塾大学医学部 今西宣晶准教授、および鼻のクリニック 東京 荒木康智診療副部長に感謝申し上げたい。なお、本研究は慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科の倫理委員会の承認を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] Marescaux Jacques, Leroy Joel, Gagner Michel, Rubino Francesco, Mutter Didier, Vix Michel, Butner Steven E., Smith Michelle K.: Transatlantic robot-assisted telesurgery; *Nature*, 413(6854), 379-380 (2001)
- [2] The University of Texas MD Anderson Cancer Center: AT&T's \$1 Million Contribution to Seed Telesurgery Program, MD Anderson News Release, 2012, <http://www.mdanderson.org/newsroom/news-releases/201>

2/at-t-s-1-million-contribution-to-seed-telesurgery-program.html.

- [3] Papadakis Giorgos, Mania Katerina, Koutroulis Eftichios: A system to measure, control and minimize end-to-end head tracking latency in immersive simulations; *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry - VRCAI '11*, 581-584 (2011)
- [4] 荒田 純平, 高橋 弘樹, 割澤 伸一, 田上 知夫, 小西 晃造: 低侵襲手術支援システムによる日本-タイ遠隔手術実験; *Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery: J.JSCAS*, 8(3), 174-175 (2006)
- [5] 荒田 純平, 高橋 弘樹, 割澤 伸一, 小西 晃造, 田上 和夫, 家入 里志, 清水 周次, 中島 直樹, 岡村 耕二, Kim Young Soo: 低侵襲手術支援システムによる日本-韓国間遠隔手術実験; *日本コンピュータ外科学会誌*, 8(4), 401-407 (2007)
- [6] Fujisaki Waka: Effects of delayed visual feedback on grooved pegboard test performance; *Frontiers in psychology*, 3, 61 (2012)
- [7] Fitts Paul M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J.Exp.Psychol.*, 47(6), 381 (1954)
- [8] Welford Alan Travis: *Fundamentals of skill*, Methuen Publishing Ltd, London (1968)
- [9] MacKenzie I. Scott, Sellen Abigail, Buxton William AS: A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks; *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '91*, 161-166 (1991)
- [10] Woodworth Robert Sessions: Accuracy of voluntary movement. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 3(3), (1899)
- [11] Elliott Digby, Helsen Werner F., Chua Romeo: A century later: Woodworth's (1899) two-component model of goal-directed aiming. *Psychol.Bull.*, 127(3), 342 (2001)
- [12] Hoffmann Errol R.: Fitts' law with transmission delay; *Ergonomics*, 35(1), 37-48 (1992)
- [13] MacKenzie I. Scott, Ware Colin: Lag as a determinant of human performance in interactive systems; *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - INTERCHI '93*, 488-493 (1993)
- [14] Maida Iwane, Sato Hisashi, Toma Tetsuya: Evaluating the Impact of Image Delays on the Rise of MMI-Driven Telemanipulation Applications: Hand-Eye Coordination Interference from Visual Delays during Minute Pointing Operations; *Advances in Computer Science: an International Journal*, 5(1), 151-160 (2016)

(2016年10月4日受付)

[著者紹介]

米田 巖根 (学生会員)



2011年慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科修了。現在、慶應義塾大学研究科研究奨励助教。同研究科博士課程。修士(システムデザイン・マネジメント学)。視覚的な遅れを伴う知覚運動協応の乱れに関する問題や遠隔医療に関する研究に従事。

小木 哲朗 (正会員)



1986年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年三菱総合研究所入社。1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。1996年東京大学大学院工学系研究科助教授、2004年筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授、2008年より慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授。没入型ディスプレイ技術、臨場感通信等の研究に従事

当麻 哲哉 (非会員)



1988年、慶應義塾大学大学院理工学研究科修了、同年住友スリーエム(株)入社。2001年米国3M社に転籍。2008年、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科准教授、2016年より教授。2014年に博士(SDM学)学位取得。高精細映像を用いた遠隔伝送システムの研究開発に従事。