

中京大学博士審査学位論文
大学院スポーツ科学研究科

Fitts の実験からアプローチするスポーツにおける
運動パフォーマンス

Approaching human motor performance in sport from Fitts' experiment

2022年 9月 20日 学位授与

中京大学大学院スポーツ科学研究科スポーツ科学専攻

村上 宏樹

目次

第1章 緒言	1
1.1. 序論	1
1.1.1. 人間のパフォーマンス理論 (human performance theory)	3
1.2. 文献研究	5
1.2.1. 失敗やミスができない環境 (観点1)	5
A. Fitts の実験におけるエラーに関する問題	7
B. 情報処理の定量化に関する問題	8
軌道の冗長性と軌道の情報処理という概念の導入	10
1.2.2. 他者が影響する環境 (観点2)	11
A. 対人間の同期現象	12
B. 競争における対人間の同期現象	12
1.3. 検討すべき課題と研究目的	15
第2章 失敗ができない環境における Fitts の実験	18
2.1. 目的	18
2.2. 方法	20

2.2.1. 実験対象者	20
2.2.2. 実験内容	20
A. 実験装置	20
B. 実験デザイン	21
2.2.3. データ分析	22
A. 身体3点とスタイラス軌道のキネマティクス	22
B. エラー率	22
C. 運動時間 (MT)	22
D. Fitts の法則 (ID-MT 回帰直線)	22
E. 位置-加速度の位相図	23
F. 主成分分析による軌道の変動の定量化	24
2.2.4. 統計処理	26
2.3. 結果	26
2.3.1. 身体3点とスタイラス軌道のキネマティクス	26
2.3.2. エラー率と MT	27
2.3.3. Fitts の法則 (ID-MT 回帰直線)	28
2.3.4. 位置-加速度の位相図	29
2.3.5. 主成分分析による軌道の変動の定量化 (q_{VPCA})	30
2.4. 考察	31
2.4.1. 軌道の変動に基づく運動特性	33
2.4.2. エラー率が 0% の場合の Fitts の法則	35

2.4.3. 軌道の収束と情報処理の増加	37
2.5. 本章の結論	38
第3章 他者と競争する環境における Fitts の実験	39
3.1. 目的	39
3.2. 方法	41
3.2.1. 実験対象者	41
3.2.2. 実験方法	41
A. 実験設定	41
B. 実験手順	43
C. データ取得	44
3.2.3. 分析方法	45
A. エラー率	45
B. 運動時間 (MT)	45
C. 相対位相の算出	46
D. 統計処理	47
3.3. 結果	47
3.3.1. エラー率	47
3.3.2. 運動時間 (MT)	47
3.3.3. 競争中の2者の同期	50
3.4. 考察	51

3.4.1. 競争で生じる同期の検証と MT の変化	51
3.4.2. 相対位相と MT の変化パターン	53
3.5. 本章の結論	56
第4章 総括	57
4.1. 本研究が想定したスポーツ技能	57
4.2. スポーツの環境を取り入れたことによる Fitts の法則	58
4.3. 情報処理の観点からアプローチする	
スポーツの試合や本番で動きが変化するメカニズム	66
4.4. 本研究の限界と今後の課題	71
第5章 結論	74
論文の構成	75
謝辞	76
文献	78
付録	91

第1章 緒言

1. 1. 序論

Fitts (1954) は、目標の幅 (Width, 以下 W) と目標間の距離 (Amplitude, 以下 A) を変化させ、2つの目標を交互にタップする実験 (図 1-1) に基づいて人間の動きをモデル化した。この W と A を変化させることにより困難度指数 (Index of difficulty, 以下 ID) を $ID = \log_2 \frac{2A}{W}$ の式から決定することができ、この ID は Shannon and Weaver (1949) の情報理論に基づいた bit という情報の単位を持つ。定式化されたモデルは、単純明快な以下の式(1-1)であり、目標間を移動する運動に要する時間 (Movement Time, 以下 MT) が ID に依存することを表しており、 ID の値がより高くなる場合は、より多くの情報を処理するための MT が必要であることがわかる。これは Fitts の法則と呼ばれ、身体運動における最も重要な基本原理であると認められるに至っている (Schmidt, 1988)。

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

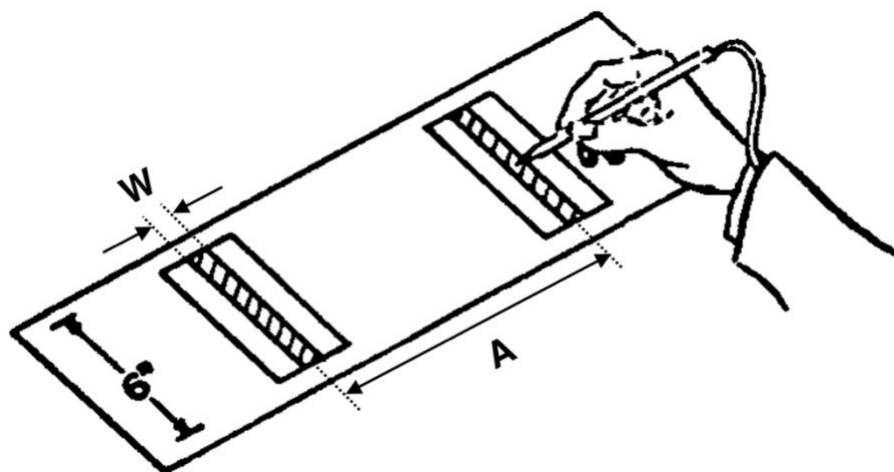


図 1-1 Fitts の実験 (reciprocal tapping) の概念図。Fitts (1954) の Figure 1 を一部改変。

また、 $(1 - 1)$ 式の W が運動の正確さ（精度）に直接関係していることから、Woodworth (1899) の実験結果である「speed – accuracy tradeoff」という特性を定式化した研究としても広く知られる (Fitts, 1964)。この用語は、「速さと正確さのトレードオフ」もしくは、「速さと正確性のトレードオフ」と和訳されている (手塚, 1996, 平田ほか, 2013)。なお、本文中では「速さと正確さのトレードオフ」という用語で統一する。この特性について Fitts は自身の研究 (Fitts and Peterson, 1964) を引用しながら、人間は速さと正確さを交換するかなり特徴的な能力を有すると説明している (Fitts, 1964)。そして、Fitts の法則はさまざまなデバイス（道具）や環境、条件の中で支持されていること (Fitts and Peterson, 1964; Kim et al., 2010; Bertuccio et al., 2013; Gorniak, 2019)、人間とコンピューターのインターフェイスを設計する研究にも役立っていること (Card, English and Burr, 1978; Accot and Zhai, 1997) を踏まえると、人類の歴史にとっても画期的な数式の 1 つであるといっても過言ではない。そして、Fitts の実験の利点には、課題の難易度が ID から厳密に統制されている点や、単純化された手部の反復運動が対象動作である点などが挙げられ、大変優れた実験タスクであることがわかる。また、環境や条件を変えて、対象者群の運動性能を比較する実験としても有効であることが明らかとなっている。例えば、年齢 (Walker et al., 1997; Stirling, 2013) や障害度 (Hwang, 2005; Bertuccio, 2015; Borish et al., 2021) による運動性能の差を比較した研究が挙げられる。

さて、人間の基本動作から導かれた Fitts の法則および「速さと正確さのトレードオフ」が、さまざまな分野、環境や条件に適用される中で、スポーツ中の動作にもあてはまるか否かという観点からも研究が行われている。例えば、中尾ほか (2018) は、バスケットボールのスリーポイントショットからこの法則を検討した。結果は、パスを受けてからショットを打つまでの運動時間を長く（運動の速度を低く）設定したからといってショット成功率が向

上しなかったことから、スポーツの動作では必ずしも速さと正確さがトレードオフの関係にあるとはいえないと結論付けられており、熟達したスポーツ選手には個々に最適な運動時間があることが考察されている。さらに、ボールには必要最低限の速度を与える必要があるといえ、ショットを行うための運動速度には下限があるという理由も考えられる。また、Beilock et al. (2008) は、ゴルフのパッティング動作の「速さ」と「正確さ」を言語指示によって操作して、熟練者と初心者のパッティングのパフォーマンス（標的の中心からの距離）を検討した。結果は、中尾ほか (2018) の研究結果と同様に、必ずしも速さと正確さがトレードオフの関係にならず、それは熟練者と初心者で異なることが明らかになった。また、スポーツでは速さと正確さのどちらかを犠牲にするのではなく、どちらも維持することが要求される場面がある。例えば、陸上競技の走り幅跳びでは、踏み切り板を超えて粘土板を踏んでしまうとファールになってしまうが、より良い記録をえるためには高い助走速度が必要であるとされ (荻山と小山, 2011)、選手たちは走速度を維持しながらも正確にファールせず踏み切る。これらを考慮すると、人間の基本動作によって導き出された Fitts の法則が競技スポーツにおける動作にも単純に適用されるとは考えにくい。これは、Fitts がスポーツの動作のような複雑な構成要素から成り立つ人間のさまざまな技能を単純な構成要素に分類して、人間の基本的機能のそれぞれにおいて人間の能力を量的に測定することを目指して、実験が行われたことが関係していると考えられる (Posner, 1966; Fitts and Posner, 1968)。そこで、Fitts が体系化した人間のパフォーマンス理論 (human performance theory) を概説して、Fitts の法則からスポーツの動作を検討するための課題を導出する。

1. 1. 1. 人間のパフォーマンス理論 (human performance theory)

Fitts and Posner (1967) は、人間がどれくらいの速さで正確に運動ができるかを前述した

Shannon and Weaver (1949) の情報理論に基づいて研究し、それを人間のパフォーマンス理論 (human performance theory) と名付けた。この理論では、技能 (skill) の分析を目的としており (Posner, 1966)、人間が技能を要するパフォーマンスを発揮する際の過程を分析し、技能の発達を研究して、技能を構成するさまざまな要素の説明を試みようとしたことが示されている (Fitts and Posner, 1967)。この技能には、人間が立ったり、座ったり、歩いたり、走ったり、ものを操作する技能から、自分の周りの世界を知覚する際に必要とされる技能におよぶ無数の普遍的技能や、社会的技能に該当する言語技能などがあると述べられている (Fitts and Posner, 1967)。特に、複雑な要素を単純な構成要素にして、基本的機能のそれぞれにおいて人間の能力を量的に測定することを目指していたと述べられている (Posner, 1966; Fitts and Posner, 1967)。このような目的のもと、単純化された手部の反復運動を対象動作として前述した Fitts の実験が行われたと考えられる。

しかし、これらの理論で体系化された研究結果は、人間の動きの一般的な特徴は非常に良く抽出できているものの、それがスポーツ動作にどの程度適応できるかは十分には検討されていないといえる。そこで、スポーツにおける動作の特徴は、Fitts and Posner (1967) の主張に基づき高度な技能を要すると考えると、それはスポーツの試合や本番のような特殊な環境に適応して実行されると考えられる。つまり、スポーツ動作などの高度な技能を要する動きを検討するためには、スポーツの本質的な特徴である環境や条件を Fitts の実験に取り入れて、Fitts の法則を検討する必要があるのではないかという問題提起である。さらに、そのような環境において、Fitts の法則が変化する場合、スポーツの試合や本番で動きが変化する問題を解決するための有効な手段となり得る可能性がある。

以上より、本研究では、スポーツ動作などの高度な技能を要する動きにおいて、Fitts の法則が成り立つかを検討するために、Fitts の実験を発展させる 2 つの観点—失敗やミスがで

できない環境と他者が影響する環境—に焦点をあて、それらの観点に関連する先行研究の現状を明らかにする。次に、それらの先行研究から明らかにされた問題点をもとに検討課題を導出し、第2章および第3章にて、それらの課題を実験的に検証する。そして第4章では、それらの実験結果をもとに、総括を行う。なお、本研究における「Fittsの実験」という用語の定義は、前述した Fitts (1954) が実験1で行なった目標の幅 (W) と目標間の距離 (A) から決定された困難度指数 (ID) に基づいて行われる交互タッピング課題を指す。

1. 2. 文献研究

Fitts の法則は、実験心理学における運動制御の分野で身体運動をモデル化するために最も重要な基本原理であると認められるに至っていることは前述したとおりであり、その法則を導くために使用された Fitts の実験は、実験室環境で厳密に定量化された実験条件から行われる大変優れた実験課題である。しかしながら、スポーツのような環境を想定した場合、Fitts の実験では考慮されていない点があるため、Fitts の実験をそのまま本研究の実験課題として適応させるには問題がある。したがって、本項では、Fitts の実験を発展させる2つの観点—失敗やミスができない環境と他者が影響する環境に焦点をあて、先行研究の現状を明らかにして問題点を挙げる。そして、その問題点にしたがって検討課題を導出する。

1. 2. 1. 失敗やミスができない環境（観点1）

失敗やミスができない環境における人間の動きを検討した研究は、数多く行われている。例えば、本研究の核となる Fitts の実験を行った Fitts (1912-1965) は、心理学者であるが航空安全の改善の先駆者としても知られる。彼は、戦時中アメリカの空軍に従事しており、その当時「パイロットエラー（ヒューマンエラー）」と考えられていた飛行機の墜落事故の原

困究明に取り組んだ。当時の心理学的な観点からの結論としては、事故を起こしたパイロットは、元々パイロットの適性が無い者であると捉えられていたという。しかし、Fitts は同僚の心理学者であり、人間工学の分野を発展させた人物である Alphonse Chapanis (1917-2002) とともに、コックピットの制御器の「デザイナーエラー（設計エラー）」が原因でパイロットが操縦をミスしてしまうことを発見した。このような人間が操作する機械の設計に目を向けた観点は、機械を操作する人間の能力には限界があることを前提として機械を構築しなければならないという考えの原点であり、現代を生きる我々がスマートフォンやコンピューターをあたり前のように操作することができるユーザーフレンドリーな（使用者にとって使い勝手が良い）デザインの設計に影響を与えたといわれている（Kuang and Fabricant, 2019）。また Fitts は、上述した人間の身体運動をモデル化した Fitts の法則を導く実験を行う以前から、機械を操作する人間の処理能力に興味を持っていたことが示されている（Fitts, 1947）。すなわち Fitts は、飛行機を操縦するパイロットのように、生死も関わるような環境においても、人間は失敗やミスすることなく行動しなければならない場面があるため、それを検討する重要性を理解していたといえる。

また、スポーツの試合や本番においても、失敗できない場面に着目した研究が行われている。例えば、実際の試合におけるサッカーの PK 戦を検討した研究 (Jordet and Hartman, 2008) では、この PK を決めれば試合に勝利する場面における PK の成功率は 92.0% に対して、この PK を外すと試合に敗北する場面における PK の成功率は 61.8% まで低下することが示されている。このような失敗ができないスポーツの試合や本番においてパフォーマンスが変化する問題の背後にある要因の一つとして、「失敗不安」という因子が関係していることが、質問紙法によって抽出されている（金本ほか, 2002）。この因子は、「失敗」という否定的な結果に対する不安感を表す因子と説明されており、試合や本番でより良いパフォーマンス

の発揮を目指しているアスリートたちにとって、失敗に関わるミスやエラーは切り離せない関係にあり、重要な問題であるといえる。また、ミスやエラーを非常に小さくしなければならないという高い精度が要求される場面において、動きが変化することが報告されている。例えば、ゴルフのパッティング動作を用いた研究 (Tanaka and Sekiya, 2011) では、対象者が失敗してはいけないと意識することで動作の変位や動作時間の変化が生じたことが報告されている。また、ピアニストの演奏を調べた研究 (Yoshie et al., 2008) では、失敗が許されない状況で腕の筋の共収縮が報告されている。しかし、これらの研究では、失敗ができない場合とそうではない場合の動作を比較し、その動作に由来する動きの変化の特徴を記述するにとどまっているといえる。

A. Fitts の実験におけるエラーに関する問題

それでは、人間の身体運動の基本的な特性を導いた Fitts の実験 (1954) において、課題中のミスやエラーはどのようにあつかわれているのだろうか。まず、Fitts の実験では、対象者が「Emphasize accuracy rather than speed. (速さよりも正確さを重視してタップしてください。)」という言語教示を受けたことが論文から読み取れる。Fitts の実験をあつかう他の先行研究でも、「正確になおかつ迅速にタップしてください」という教示が用いられている (e.g., Salmoni and McIlwain, 1979; MacKenzie et al., 1987)。そして、Fitts の実験を用いて行う研究では、タップに用いるスタイラス、指やマウスのカーソルなどが目標から逸脱する場合をエラーとしており、エラー率という変数から結果が表される (Fitts, 1954)。エラー率は、1 試技ごとに算出され、その後条件などで平均化される。例えば、Fitts のオリジナル論文では最も多いエラー率で 4% 程度のエラーが発生したことが示されている。また、他の先行研究の結果からは、エラーのあつかいが異なることがわかる。例えば、3 回以上のエラーが発生した試技を分析から除外する研究もあれば、20% 以上のエラーを記録した試技を使用した研究

もある (Salmoni and McIlwain, 1979; Ware and Mikaelian, 1987; Kantowitz and Elvers, 1988). しかし, 例えば同じ ID の条件で試技を行った場合, ある一定の値にエラー率が制限された試技とエラー率に制限を設けない試技から得られた MT を同様にあつかっているのかという問題が考えられる. これらのギャップを埋めるために, 発生したエラーを事後的に 4%のエラーを許容する目標の幅に正規化する方法が提案されている (Zhai et al., 2004). これは, 事前に決定している ID を事後的な ID (IDe と呼ばれる) に補完する方法であるが, Fitts の実験では 4%のエラーが生じることが指摘されている (MacKenzie, 1992). つまり, 人間の身体運動の基本原則と考えられている Fitts の法則は, エラーが 4%許容された環境の下で導き出された法則であると考えられる. また, Fitts (1954) は, 上記の実験の次に, Disc Transfer 課題 (ワッシャーをピンから別のピンに移動する課題) を用いた実験を行うことで, エラーの発生が許されない環境を考案して, その環境における人間の運動を検討することを試みているが, タップ課題ではそれが達成されていないことがわかる. したがって, Fitts の実験を 1 回のミスやエラーが勝敗や記録に直接影響するスポーツの試合や本番を想定した実験として行うには, 失敗やミスができない環境に改良する必要がある, その環境下でも Fitts の法則が成り立つかを検討する必要がある (課題 1).

B. 情報処理の定量化に関する問題

前述したように, Fitts の実験結果は, 目標から目標に移動する運動の実行に必要な時間 (MT) が情報で定量化された困難度指数 (ID) に依存することである. つまり, MT は A と W から決定される情報量 (ID) の要求水準によって決定されることを示しており (山田, 1998), ID が高ければ高いほど情報量が多くなり, 伝達すべき情報量の増加に対応するために MT が長くなるのである (Mottet et al., 2017). これは, IP と呼ばれる値で定量化されているが (Fitts, 1954), この定量化された値は, どのような情報処理のもと導かれたのかは明らか

かになっていない。これを解明するためには、Mottet et al. (2017) が、Fitts の法則の背景には、限られた情報の処理能力が軌道形成の制約となると考えられていると述べているように、試技中の軌道を分析することが有用であると考えられている。つまり、タップの軌道にこの情報処理の特徴が表れると考えることができる。

Fitts の実験の動きを軌道から分析した研究では、Mottet and Bootsma (1999) や Huys et al. (2009, 2015) が課題の難易度 (ID) と運動学的な変化の関係について報告している。これらの研究は、神経筋系が空間的な不確実性を解決し、可能性のある一連の解決策から適切な反応を選択し、initial impulse および current control という Woodworth (1899) が提唱した 2 つの制御方略を用いて ID が高い条件では MT が長くなるという Fitts の法則の古典的解釈 (Crossman and Goodeve, 1983) にしたがっているとされている。つまり、これらの研究は、実験中に得られた複数対象者のタップの軌道を、正規化して平均的なモデルにあてはめることで、各 ID 条件における運動学的な変化を説明しているといえる。しかし近年、Gorniak (2019) は、複数の研究 (Schmidt et al., 1979; Meyer et al., 1988) が人間の運動には確率過程を含んでいることを示し、上記の古典的解釈に反論したことを受けて、Fitts の法則を検討するためには、動きを目標の終点に対する変動性の検討だけではなく、全体的な運動や行動の変動性の考慮が必要であると述べた。彼女は非線形モデルを用いて、課題の難易度と周期的なタスク中の軌道の発散 (変動, ばらつき) には負の相関があることを示した。これは、上述した先行研究が行っている得られた軌道を平均的にあつかう方法とは異なり、複数の軌道の変動から Fitts が提唱した情報処理を検討した非常に画期的なアイデアであるといえる。しかしながら、この軌道の発散の分析は、最も軌道が発散した部分のみを比較しており、軌道の変動が目標に向けてどのように変化するのかが検討されていない。したがって、Fitts の実験中の軌道の変動性の変化を考慮して情報処理について検討する必要があるといえる。

軌道の冗長性と軌道の情報処理という概念の導入

前述した通り、目標に向けた軌道の変動がどのように変化するのは明らかにされておらず、依然として実験中の情報処理が具体的にどのようなものかは明らかにされていない。これを解決するためには、情報とは不確定なものが確定するときが必要であるという Shannon and Weaver (1949) の定義に着目して、軌道が時事刻々生成される時に必要な情報処理を、軌道の詳細な分析から明らかにしようと試みた山田 (2015) の研究が参考となる。彼は、直前には複数選択可能な軌道が事後には 1 つの軌道が決定されるという軌道生成の性質 (Matsuno, 1989) を Fitts の実験中の軌道に適応させて検討し、軌道の冗長性と情報処理に関する新たな問題を提起した。図 1-2 は、実験中のタップから得られた複数の軌道の間部を断面で示したものであり、軌道のばらつきを二次元の座標として表している。そして、低速度の軌道と高速度の軌道を比較すると、高速度より低速度の方が断面図の座標がばらついていることが示されており、この低速度で座標がばらついている結果は、それが軌道選択の余地、つまり軌道の冗長性を表しているといえる。言い換えると、これだけの断面積の軌道を選択可能であるが、この時点ではある一つを選んでいることが示されており、ここでは多くの情報処理が行われていると考えられている。そして、その逆が高速度の軌道であり、冗長性が減少し、ほぼ一定の軌道を連続して行き来するようになっている。つまり、彼の研究は、Matsuno (1989) の軌道生成の性質が Fitts の実験中の軌道にも現れることを定性的に示している。しかしながら、山田の軌道の分析は、軌道の間部分の断面図のみから評価されたものであり、Gorniak の研究と同様に軌道全体の分析を含めた、目標地点までの軌道の変動の変化が定量的に示されていない。したがって、軌道全体を分析対象として軌道の変動の変化を定量的に示し、情報処理の変化を検討する必要があるといえる (課題 2)。

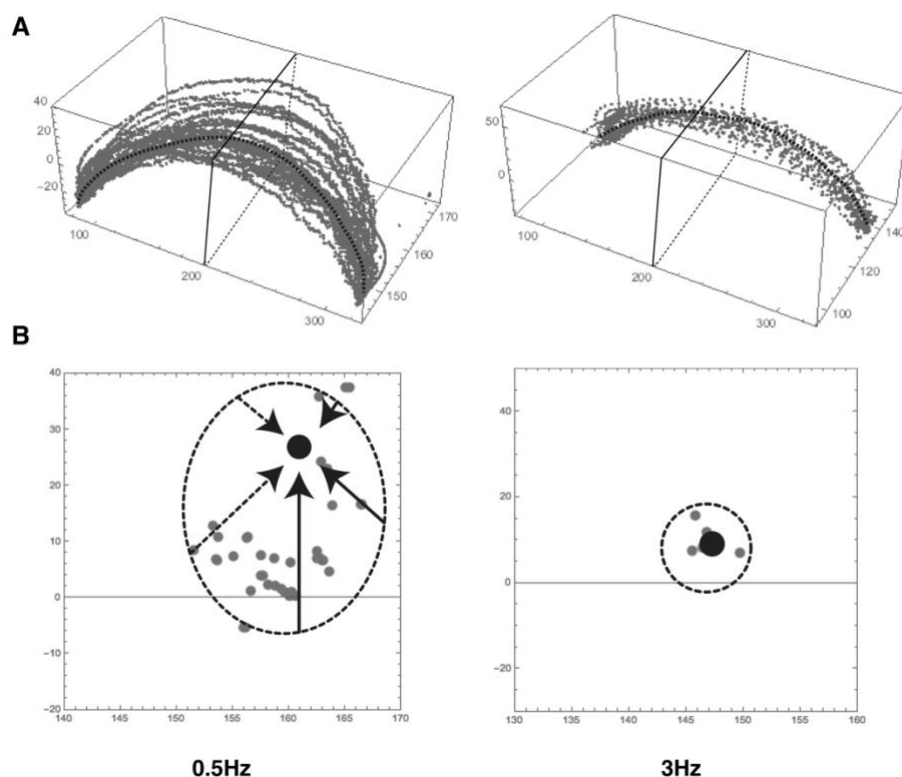


図 1-2 軌道の情報処理と軌道の冗長性の概念図. A) 低速度 (0.5Hz) の時 (左) と高速度 (3Hz) の時の軌道の典型例. B) 低速度 (0.5Hz) の時 (左) と高速度 (3Hz) の時の軌道の間中部を通過するときの断面図. 黒線と黒丸は、 n 回目の軌道であり、この軌道は、B の断面図の点線で示した面積 (軌道の可能性、軌道の冗長性) から一点が決まっている. つまり、不確定さが確定しており、ここに情報処理が必要となる (山田, 2015 を一部改変).

1. 2. 2. 他者が影響する環境 (観点 2)

さて、Fitts の実験を発展させ、試合や本番で動きのパフォーマンスが変化する問題を検討する上で、考慮しなければならない他の問題点の 1 つとして、他者からの影響がある。Fitts の実験は、1 人の対象者が課題を行うものであり、他者との記録や順位を競い合う競技スポーツの要素を取り入れるためには、Fitts の実験を他者で行う環境に発展させることが必要であると考えられる。そこで本項では、他者からの影響により運動が変化する問題に関わ

る、他者との動きの同期現象の先行研究を概説することで問題点を導出する。

A. 対人間の同期現象

他者からの影響により運動が変化する問題は、生理学、心理学、そしてスポーツ科学などのさまざまな分野で、協調や協力の文脈における他者との同期現象による相互作用によるものとして示されてきた。同期現象は、ニューロンの集団から人間の集団まで、さまざまな生物システムのダイナミクスの根底にあると考えられており (Pikovsky et al., 2002; Strogatz, 2003), 2人以上の個人の動きは、視覚や聴覚などの知覚情報を介して結合すると、自然にもしくは意図せずに同期することが多いと説明されている (Schmidt et al., 1990; Schmidt and O'Brien, 1997; Néda et al., 2000; Tognoli et al., 2007; Schmidt and Richardson, 2008)。これまで、この同期現象は個人内の両手の動きの協調性や (Haken et al., 1985; Schmidt et al., 1990)、対人間における動きの協調性を検討する上で (Richardson et al., 2007; Okazaki et al., 2015; Okano et al., 2017)、積極的に調査されてきた。また、他者との協力も人間の運動や行動を変化させることが報告されている (Richardson et al., 2007; Peng and Hsieh, 2012; Ganesh et al., 2014; Ikegami and Ganesh, 2014)。つまり、対人間における人間の運動や行動の変化の検討は、その多くが他者との協調や協力といった文脈から検討されてきたといえる。

しかし、若月 (2021) は競技スポーツの検討には、協調や協力のみではなく、競争 (competition) の中で生まれる同期に着目しなければならないことを問題提起しており、協調や協力の文脈のみではなく、競争の中で生じる運動の変化も検討する必要性があるといえる。そこで、ここからは対人間の競争の文脈における運動の変化に関する研究を振り返り、そこから検討すべき課題を明らかにする。

B. 競争における対人間の同期現象

これまで、競争によるパフォーマンスの変化は、社会的促進や精神的な焦点、または他者

との競争による心理的側面によって部分的に説明されていることが知られてきた (Zajonc and Sales, 1966; Martens et al., 1990). また, 他者との競争下での反応課題を行い, 競争がモチベーションや緊張感の増加をもたらし, 反応時間の短縮につながったと報告した研究 (Church, 1962; 松本と佐久間, 2013) がある. しかしながら, ここでのパフォーマンスとは, 反応時間のような最終的な結果を指しており, 運動がどのように変化して最終的な結果が得られるかについて検証されていないといえる.

近年, Varlet and Richardson (2015) は, 陸上競技 100m 走のウサイン・ボルトが世界記録を出したレースを分析し, 驚異的な世界記録が誕生した背景には 2 位のタイソン・ゲイとボルトの間に対人間の動きの同期が生じたことが関係している可能性があることを報告した. Varlet and Richardson は, 2 人の選手のステップ発生時間 (地面に脚が接地した時間) から相対位相値を求めて, 2 人の選手の動きの同期発生について検討した. その結果, レース中の 2 人の選手のステップの発生時間が同時となる同相の同期が断続的に生じていることが明らかとなった (図 1-3). これは, もともと異なるテンポの 2 人の選手のステップが一緒にレースをした時に調整されたことを示している. これまで, このような競争中のスポーツにおける対人間の同期は, 駆け引きがあるようなオープンスキルに分類される対人スポーツの観点から検討されてきた (Kijima et al., 2012; Okumura et al., 2012). Varlet and Richardson の研究結果はこれらの研究と異なり, それぞれの競技者が他の競技者よりも良いパフォーマンス発揮をしようとしている 100m 走のようなクローズドスキルに分類される個人競技スポーツにおいても, 対人間の同期が生じて, それがパフォーマンスの変化に関連する可能性を示しており, 非常に興味深いといえる. しかし, Blikslager and de Poel (2017) は, Varlet and Richardson の研究に用いた映像のサンプル周波数が低いという問題点を指摘し再分析した. その結果, Varlet and Richardson が導いた同期頻度よりも同期頻度が高くなかったこと

を示し、同期が発生したと裏付ける根拠がないことを示した。しかしながら、競争中の2者の運動周波数（ステップの時間から算出された周波数）は大きく変動しており、2者の運動周波数が近づく瞬間があることが明らかとなったため、競争中の2者間の同期は理論的に適応可能であると結論付けた。以上の2つの研究結果から、競争における対人同期は、そもそも生じるのかは明確になっておらず、実際のレースの分析からでは前述した分解能の問題もあるため、厳密に統制された実験室環境で検証する必要があるといえる。つまり、Fittsの実験を2名の対象者が競争する環境で行い、競争中に他者との同期が生じるのかを実験的に厳密に検証し、そしてこの同期がパフォーマンスの変化とどのように関連するかを検討する必要がある（課題3）。Fittsの実験から競争下での対人間の同期を検討する利点は、前述した通り、課題の難易度がIDという指標から厳密に決定されるため、実験室環境で行う再現性の高い実験として行うことができる点である。

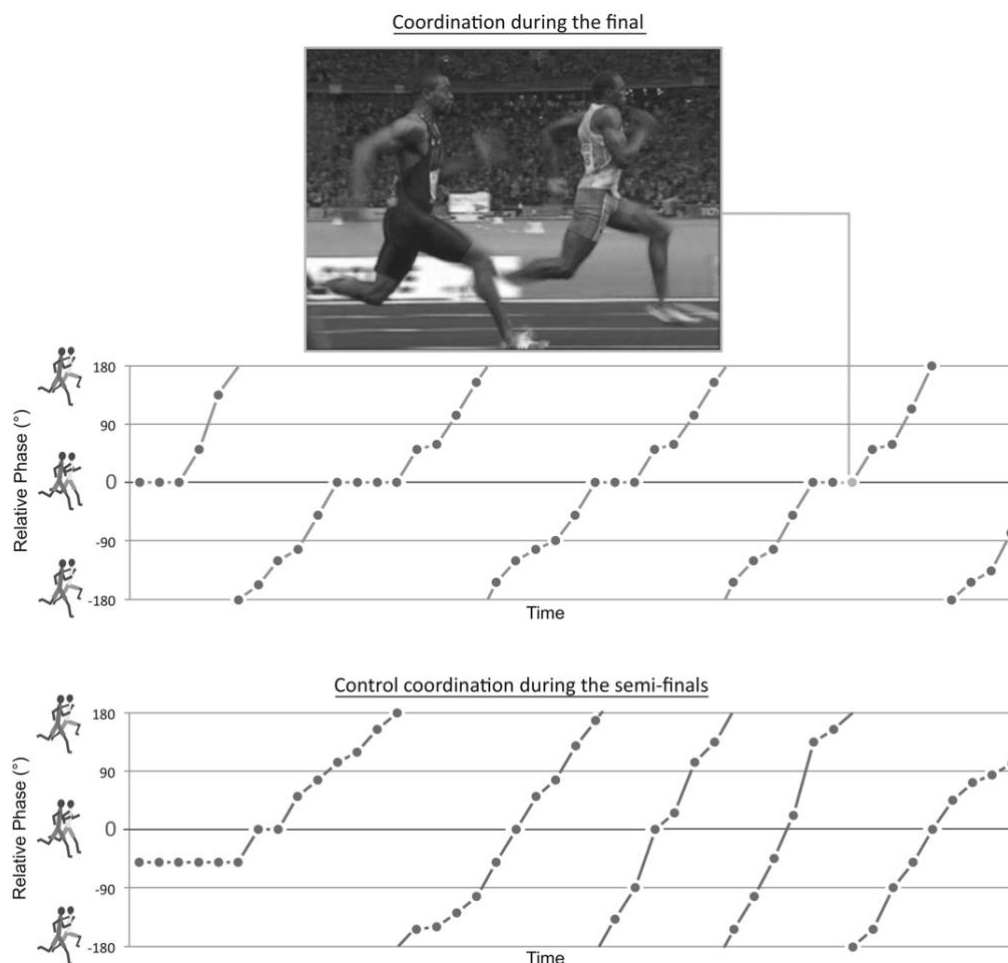


図 1-3 第 12 回 IAAF 世界陸上競技選手権大会（2009 年ベルリン）の 100m 走決勝（上）と準決勝（下）のウサイン・ボルトとタイソン・ゲイのステップ発生時間の相対位相。2 人が一緒にレースで走った決勝（上）では、ステップの発生時間が 0° 付近に集まり、同期が発生していたことが示される。しかし、2 人が別のレースで走った準決勝（下）では、同期は発生しなかったことが示される（Varlet and Richardson, 2015）。

1. 3. 検討すべき課題と研究目的

本研究の目的は、速さと正確さがトレードオフの関係になるという Fitts の実験結果からスポーツで観察される動作を単純に理解するのではなく、Fitts の実験を、失敗やミスができ

ない環境と他者が影響する環境である他者と競争する環境という 2 つの観点から発展させることで、スポーツ動作などの高度な技能を要する動きにおいて、Fitts の法則が成り立つかを検討することである。この目的にしたがって先行研究を概観した結果、以下に示す 3 つの課題が導かれた。

Fitts の実験を失敗やミスができない環境に改良する必要がある、その環境下でも Fitts の法則が成り立つかを検討する必要がある（課題 1）。

Fitts の実験中の軌道全体を分析対象として軌道の変動の変化を定量的に示し、情報処理の変化を検討する必要がある（課題 2）。

Fitts の実験を他者と競争する環境に発展させ、競争中に対人同期が生じるのかを実験的に厳密に検証し、そしてこの同期がパフォーマンスの変化とどのように関連するかを検討する必要がある（課題 3）。

以上の課題を検討するために、以下に示す 2 つの研究を行う。

研究 1. 失敗ができない環境における Fitts の実験 Fitts の法則と軌道の情報処理的特徴の検討（課題 1 と課題 2）

Fitts の実験に用いるタップの目標を、対象者に目標からエラーしてはいけないことを明確にする目的で、高さのある台に変更する条件を新たに追加することで、エラー率を 0% に制御することで失敗ができない環境を再現する。そして、パフォーマンス指標である MT と ID の関係を従来条件と比較し、エラー率が 0% に制御される場合に Fitts の法則が成り立つかを検討する（課題 1 に対応）。さらに、目標に向かう軌道に複数の区間を設け、その区間に該当する座標を算出し、その座標に主成分分析を用いてばらつきを定量化する。その定量

化した値の目標に向けての変化を両条件で比較することで、エラー率が0%に制御されるときの人間の動きを検討する（課題2に対応）。

研究2. 他者と競争する環境における Fitts の実験 対人同期の発生と対人同期と運動時間の変化の検討（課題3）

他者との競争による対人同期は、相互作用によって生じ、動きのパフォーマンスが変化する可能性が示唆されている。本研究では、Fitts の実験を2者で競争する条件で行い、ペン先の座標から相対位相を算出して対人同期が生じるかを検証し、その同期がパフォーマンス指標である運動時間（MT）とどのように関連するかを検討する（課題3に対応）。

以上の研究をもとに、Fitts の実験を、失敗やミスができない環境と他者と競争する環境という観点から発展させることで、スポーツ動作などの高度な技能を要する動きにおいて、Fitts の法則が成り立つかを包括的に検討する。

第2章 失敗ができない環境における Fitts の実験

2.1. 目的

Fitts の法則 ($MT = a + b ID$) は、目標の幅と目標間の距離に基づいた実験から人間の動きをモデル化したものであり、人間の運動に対する最も普遍的な表現である (Fitts, 1954; Fitts and Peterson, 1964). Fitts は、Shannon and Weaver (1949) の情報理論を人間の運動に取り入れ、人間の運動技能の基本的な特性を捉えたこの法則を確立した。Fitts は、運動時間、運動の距離、そして運動の正確さを調べた Woodworth の研究 (1899) にしたがって、目標の幅 (W) と目標間の距離 (A) を変化させた条件から、2つの目標を交互にタップする課題 (Fitts の実験) を行った (Fitts, 1954; Fitts and Peterson, 1964). その際の1回あたりの目標間を移動する運動に要する時間 (Movement time, 以下 MT) は、情報で定量化された課題の困難度指数 ID (Index of difficulty, $ID = \log_2 \frac{2A}{W}$) に依存することが知られている。Fitts の法則は、タップ課題や力生成課題など、幅広い課題から検証されている (Fitts, 1954; Fitts and Peterson, 1964; Kim et al., 2010; Bertucco et al., 2013; Gorniak, 2019). さらに、人間とコンピューターの関係を検討するヒューマンコンピューターインタラクション (HCI) の分野でも、この法則は多くの研究者によって研究されてきた (Card et al., 1978; Accot and Zhai, 1997; Dunagan and Schofield, 2016). そのため、コンピューターを使うことがあたり前となっている現代社会に関わる重要な理論法則であるといえる。このように、Fitts の法則を導く Fitts の実験は、実験室環境で厳密に定量化された条件から行われる大変優れた実験課題であるといえる。しかしながら、スポーツのような環境を想定した場合、Fitts の実験では考慮されていない点がある。そこで、前章では、Fitts の実験をあつかう先行研究に共通する問題点を2点明らかにした。

1つ目の問題点は、Fittsの実験をあつかう先行研究の実験中のエラー率は、研究によってそのあつかいが異なっており（Salmoni and McIlwain, 1979; Ware and Mikaelian, 1987; Kantowitz and Elvers, 1988）、実験後にエラー率を事後的に4%のエラーを許容する難易度（IDeと呼ばれる）に調整する方法（MacKenzie, 1992）が提案されているものの、Fittsの実験では4%のエラーが発生することが指摘されている点である（MacKenzie, 1992）。つまり、人間の動きをモデル化したFittsの法則は、エラー率の発生が4%許容された環境の下で導き出された法則であると考えられるため、1回のミスやエラーが勝敗や記録に直接影響するスポーツの試合や本番を想定した実験としてそのまま適応させるのは不適切であることを指摘した。つまり、エラー率が0%に制御される失敗ができない環境では、本法則が変化する可能性が考えられる。

2つ目の問題点は、Fittsの法則が変化する場合の運動の変化の定量化についてである。先行研究では、タップの正確さが重視された時、目標地点での軌道の変動（ばらつき）は小さくなることは報告されているが（Bertuccio et al., 2015）、軌道の変動を分析した他の研究（Gorniak, 2019; 山田, 2015）も軌道の一部分の変動の分析にとどまっており、目標地点に向けて軌道の変動性がどのように変化するかについて定量化されていない点を指摘した。また、先行研究ではFittsの実験中の軌道の運動制御について、位置と加速度の相関を用いて検討されているため（Buchanan et al. 2006; Fernandez and Bootsma, 2008; Silva et al. 2016）、これらの報告との関連性も合わせて検討する必要があると考えられる。

そこで本章では、従来の4%のエラーが許容されている条件（従来条件）に加え、エラーを0%に制御する新たな条件を用いて、失敗ができない環境における人間の運動特性を明らかにすることを目的とした。なお、新たな条件は、Fittsが用いた「Emphasize accuracy rather than speed. (速さよりも正確さを重視してタップを行ってください.)」という言語指示では、

エラー率 0%を達成できなかったため、別の方法が必要だと判断した。そのため、本犬級では目標から逸脱してはいけないことを対象者に明確にするため、タップする目標を高さ 1.5cm の台とする条件を設定する（table 条件）。そして、条件間で運動時間に関連する運動制御機構や目標に向けての軌道の変動を比較検討し、table 条件においても Fitts の法則が成り立つかどうかを検討する。

2. 2. 方法

2. 2. 1. 実験対象者

健康な成人 16 名（右利き男性 13 名，左利き男性 1 名，右利き女性 2 名，年齢：21.0±1.0 歳）が対象者として参加した。対象者は全員，視力が正常または正常に矯正され，運動機能に障害がないことを自己申告した。本実験は，中京大学の倫理委員会の承認を得て行われた（承認番号：2018-029）。実験前に全ての対象者に対して本研究の目的と内容を説明し，書面によるインフォームドコンセントを得た。

2. 2. 2. 実験内容

A. 実験装置

8 台のカメラを搭載したモーションキャプチャーシステム（MAC3D System, Motion Analysis Corporation, USA, 245Hz）を用いて，スタイラスの先端，対象者の肩，肘，手首の関節の 3 次元座標（x, y, z）を取得した。なお，身体 3 点（肩，肘，手首）の座標の取得は，剛体を安定させるための補助的な役割を担った。全ての座標値は，カットオフ周波数 5Hz の Butterworth ローパスフィルターで平滑化した。

B. 実験デザイン

全ての対象者は、図 2-1 に示す 2 つの目標（長さ 6 インチ）を交互に、できるだけ正確かつ迅速に 15 秒間タップすることを教示された。全ての対象者は、目標を高さ 1.5cm の台とした table 条件と、目標に高さが無い平面とした flat 条件の 2 つの条件で課題を行った（図 2-1）。また、全ての対象者は、課題中の身体の姿勢に関する指示を受けなかった。

課題の ID は、目標の幅（W : 0.25, 0.50, 1.00, 2.00 インチ）と目標間の距離（A : 2.00, 4.00, 8.00 インチ）を変更することで決定された。ID を決定するために使用した式は ($ID = \log_2 \frac{2A}{W}$) である。本実験では、この式から得られる ID は 6 つ（ID: 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00）であった。各 ID の A と W の組み合わせは 1 つであり、Fitts (1954) が用いた組み合わせの一部を使用して、ID の値が大きくなるにつれて W が徐々に減少し A が徐々に増加するように各 ID を決定した。組み合わせの詳細は p.26 の表 1-2 に示す。反射マーカーのサイズは直径 6.4mm であり、予備実験で最小幅 0.25inch (6.35mm) を問題なくタップできることを両条件で確認した。本実験では、A4 用紙 1 枚に収まる範囲で ID を設定したため、最も難易度が高い条件 (ID6) では、A が 8 インチ、W が 0.25 インチとなった。各対象者は、2 つの条件 (table 条件と flat 条件) で 6 つの難易度 (ID1-6) を 2 回ずつ行った。したがって、各対象者は 24 回の試技を行った (2 条件 × 6 難易度 × 2 = 24)。各条件の ID を行う順番は、各対象者で無作為に設定した。さらに、対象者は自己申告により、試技間に十分な休息をとることができた。

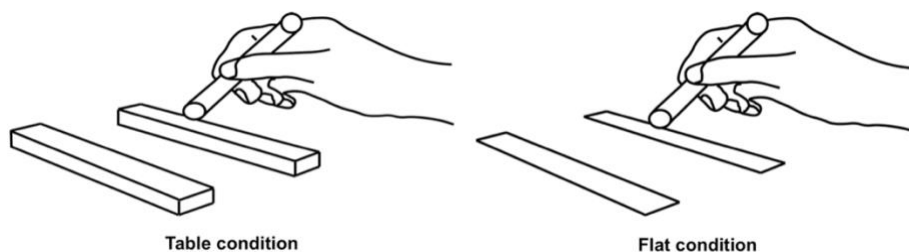


図 2-1 table 条件と flat 条件の実験概念図

2. 2. 3. データ分析

全ての数値計算は Mathematica（Version 11.1.1.0, Wolfram Research, IL, USA）を用いて行われた。

A. 身体3点とスタイラス軌道のキネマティクス

table 条件では、身体3点（肩、肘、手首）のいずれかの高さを自然に変えて調整することが予想された。これを確認するために、以下の2つの分析を行った。1つ目に、身体3点の垂直（z軸）方向の座標データの平均値を各試技で算出した。なお、全384回の試技のうち、マーカの座標が特定できなかったデータ（肩：24.5%、肘：17.4%、手首：9.1%）は分析から除外したが、条件間の比較には十分な試技数であると考えた。2つ目に、スタイラス先端の垂直（z軸）方向のピーク値とバレー値を差し引いた値の平均値を「垂直移動距離」（軌道の高さ）として各試技で算出した。

B. エラー率

モーションキャプチャーのトラッキングデータをもとに、総タップ数とエラー数を算出した。各試技におけるエラー率を求めるために、 $\left(\text{エラー率}(\%) = \frac{\text{エラー数}}{\text{総タップ数}} \times 100 \right)$ の式を利用し、各条件の各IDで平均値を算出した。

C. 運動時間（MT）

運動時間（MT）はタップ1回あたりの平均時間とし、Fitts（1954）と同様の方法（ $MT = \text{試技時間}(15s) / \text{総タップ数}$ ）を用い各試技で算出し、各条件の各IDで平均値を算出した。

D. Fittsの法則（ID-MT回帰直線）

Fittsの法則を表すモデル（ID-MT回帰直線）は、最小二乗法による線形回帰で、切片（a）と傾き（b）が求まる（Soukoreff and MacKenzie, 2004）。モデルの式は $MT = a + b ID$ である。

回帰直線は、適合度（MT と ID の間に線形関係があるかどうか）、および結果の妥当性を測定するテストの役割を果たす（Soukoreff and MacKenzie, 2004）。また、測定値（各 ID で得られた MT）から予測値（回帰直線上の各 ID の MT）を引いて、残差（RE）を算出した。RE の値が正であれば、測定値が予測値よりも大きいことを示し、負であれば、測定値が予測値よりも小さいことを示す。

E. 位置-加速度の位相図

各試技の加速度の時系列データは、位置の時系列データ（x 位置）を 2 次微分することで算出した。加速度の時系列データは、カットオフ周波数 5Hz のバターワースローパスフィルタを用いて平滑化した。図 2-5 の結果では、位置と加速度の時系列データを用いて位置-加速度の位相図を示した。各試技で算出した位置と加速度の時系列データは、試技間での比較を可能にするために標準化する必要がある（Silva et al., 2016）。そのため、本研究では、中央値を 0 に設定して標準化した。さらに、加速度の変化を定量的に分析するために、Wijnants et al. (2012) が行った分析を参考にして、局所的な極値（Local extrema: LE 点）を求めた。図 2-2 に LE 点の算出方法の概念図を示す。まず、目標をタップした瞬間の加速度を算出する（図 2-2, 黒色の四角）。なお、目標が右にタップされたときの加速度の LE 点は負の値、左にタップされたときの加速度は正の値となる。さらに、目標がタップされる少し前に現れるそれぞれの（正または負の）極値を算出した（図 2-2 の灰色の四角）。そして、この極値と目標を接触させたときの値との差の絶対値を求め、平均化することで、各試技における目標に向かう加速度の変化とした。

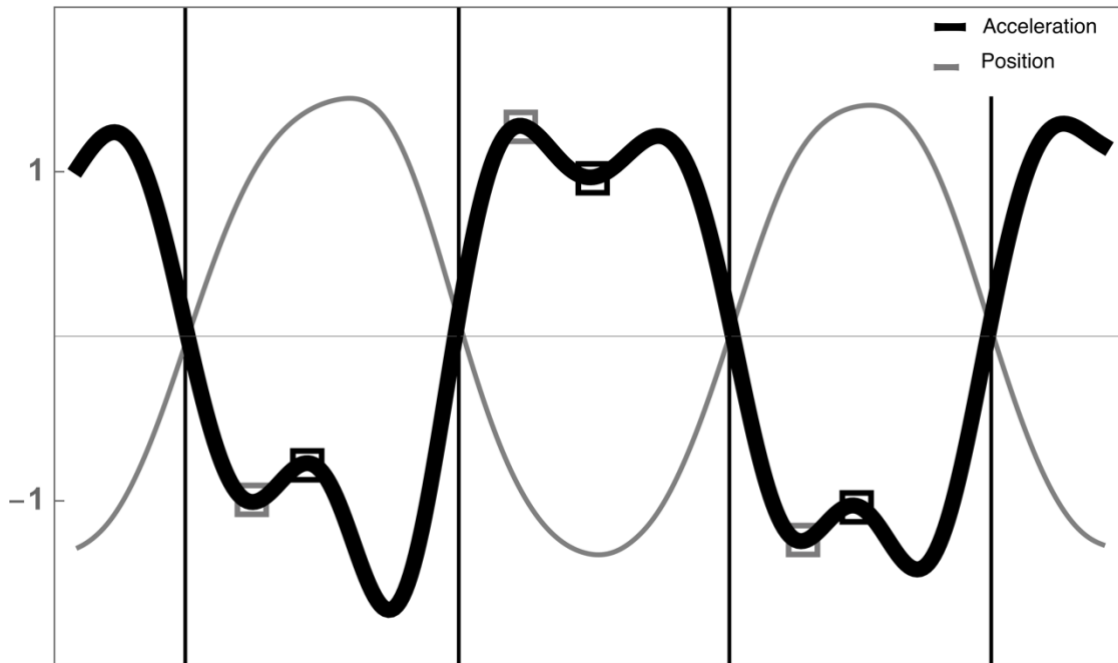


図 2-2 LE (Local extrema) 点の算出方法の概念図。4つの半周期の運動で観測された標準化された加速度と位置の系列を3つのセグメントに分けてプロットしている。動きの反転を含む3つのセグメント（位置の0交差点（動きの中間点）から次の0交差点までのセグメント）に分けて、4つの半サイクルの動きで観測された標準化された加速度と位置の系列を示している。各セグメントは、位置の0交差点（動きの中間点）から次の0交差点までの3つのセグメントに分かれており、それぞれに動きの反転が含まれている。各セグメントのLEは四角いマーカーで示されている。中間点は縦線で、時間はx軸で表している。

F. 主成分分析による軌道の変動の定量化

運動の変化は、取得したスタイラス先端の座標データを用いて分析した。まず、対象者が左右の目標をタップした時間と3次元座標を算出した。左の目標をタップした時を区間1、右の目標をタップした時を区間8とした。区間1と区間8の時間差を計算して、平均時間(t)を求めた。次に、tを7分割し(t/7)、区間1が発生した時間からt/7、2t/7、3t/7を

引くことで、区間 2, 3, 4 に対応する時間と 3 次元座標を求めた。同様に、区間 8 が発生した時点から区間 5, 6, 7 に対応する時間と 3 次元座標を求めた。図 2-3A は、軌道に区間 1-4 の位置を示した概念図であり、各区間には複数の 3 次元座標が存在した。

次に、主成分分析（Principal component analysis: PCA）を用いて、各試技の各区間内の座標変動を定量化した。PCA は分散共分散行列を用いて行われ、固有値と固有ベクトルが得られた。得られた各主成分の固有値を総和で割ることで寄与率を算出したところ、どの区間においても第一主成分ベクトルの寄与率が最も高く、70%以上であったため、このベクトルを基準に座標を変換した（図 2-3B, 2-3C）。変換した値を第一主成分スコアと呼び、このスコアの標準偏差を座標の変動とした。この操作を各区間で繰り返した。各条件において、各区間の第一主成分スコアの標準偏差の平均値を算出し、これを PCA による定量化した値（ $q_{V_{PCA}}$ ）とした。そして、軌道の間から目標までの $q_{V_{PCA}}$ の変化を条件間で比較するために、各試技の区間 1 と 8, 区間 2 と 7, 区間 3 と 6, 区間 4 と 5 に対応する値を平均し、これを区間 S1 - S4 とした。また、全ての試技において、S4 の値が他の S1 - S3 の値よりも大きいことを確認した。そこで、S1 - S4 の値を、各試技の S4 の値で割って標準化した（標準化された S4 の値は 1 となる）。

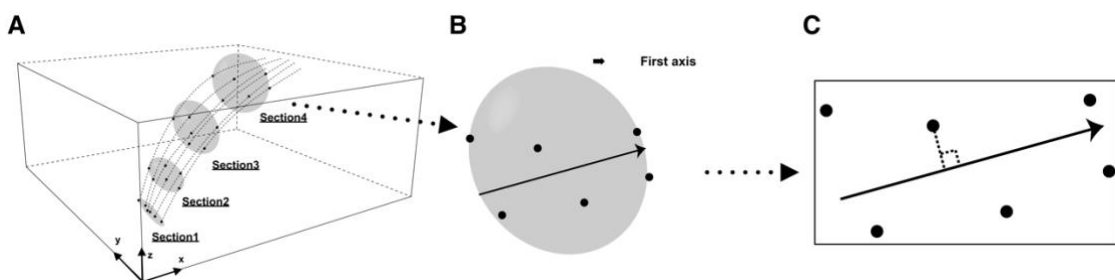


図 2-3 主成分分析（PCA）による軌道の変動の定量化。A) 区間 1 から 4 に該当する座標は、左の目標に向かう軌道から決定される。各軌道から決定されるため、各区間には複数の座標がある。B) 各区間の座標に対して PCA を行い、固有ベクトルを算出する。C) 第一主成分ベクトル

を基準にして座標を変換する。

2.2.4. 統計処理

身体3点（肩、肘、手首）の垂直方向（z軸）の位置とスタイラスの先端の移動距離を、各IDにおいて2条件（flatまたはtable）で t 検定を用いて比較した。6つのIDのそれぞれで、2条件のMTを比較するために対応のある t 検定を、2つの条件のエラー率を比較するためにウィルコクソンの符号順位検定を用いた。加速度値の変化は、同じIDの条件間で対応のある t 検定を用いて比較した。各条件におけるID-MTの回帰直線を図2-4に示す。各回帰直線の適合度は、決定係数 R^2 の値から検討した。さらに、flat条件に対応する回帰直線から求めた各条件のMTの残差（RE）の比較は、一元配置分散分析および多重比較検定（Bonferroni法）で比較した。qvPCAについては、条件（flatまたはtable）×区間（S1 - S4）の二元配置分散分析を用いた。交互作用や主効果に有意差が見られた場合は、Tukey法を用いて多重比較を行った。また、条件間で対応のある t 検定を用いて、軌道の間中部から目標部（軌道の終点）までのqvPCAの変化率を比較した。全ての統計検定において、有意水準を0.05とした。

2.3. 結果

2.3.1. 身体3点とスタイラス軌道のキネマティクス

各IDの肩、肘、手首の身体3点について、垂直方向（z軸）の座標の平均値を2つの条件で比較した。詳細な結果は、付録の表S1に示した。肩と肘の位置の平均値は、いずれのIDにおいても2つの条件間で有意差はなかった（ $p > 0.05$ ）。しかし、手首の位置の平均値は、全てのIDにおいて、table条件がflat条件よりも有意に大きくなった（ $p < 0.05$ ）。次に、

スタイラスの先端が垂直（z 軸）方向に移動した距離の平均値を各 ID の 2 つの条件で比較したところ、全ての ID で 2 つの条件間に有意差はなかった ($p > 0.05$)。詳細な結果は、付録の表 S2 に示した。

2. 3. 2. エラー率と MT

各条件のエラー率と運動時間 (MT) のデータを表 2-1 に示す。flat 条件におけるエラー率は、ID1 を除く全ての ID で発生した（例：ID1：0.00%，ID6：3.43%）。一方、table 条件のエラー率は全ての ID で 0%であった。ウィルコクソンの符号順位検定の結果、ID4、ID5、ID6 のエラー率が条件間で有意な差が示された (ID4： $t(31)=21$, $p=0.036$, ID5： $t(31)=105$, $p=0.001$, ID6： $t(31)=136$, $p<0.001$)。また、対応のある t 検定の結果、ID3 と ID6 の MT が条件間で有意な差が示された (ID3： $t(31)=2.648$, $p=0.013$, ID6： $t(31)=2.056$, $p=0.048$)。

表 2-1 ID と各条件のパフォーマンスデータ

Target width (W) and Amplitude (A) conditions			Flat condition		Table condition		P-value (MT)	p-value (error)
W (in)	A (in)	ID (bit)	MT (s)	Error (%)	MT (s)	Error (%)		
2.00	2.00	1.00	0.184 ± 0.015	0.00 ± 0.00	0.185 ± 0.015	0.00 ± 0.00	0.536	1
1.00	2.00	2.00	0.195 ± 0.020	0.04 ± 0.09	0.191 ± 0.016	0.00 ± 0.00	0.077	1
1.00	4.00	3.00	0.247 ± 0.039	0.15 ± 0.19	0.236 ± 0.037	0.00 ± 0.00	0.012	0.174
0.50	4.00	4.00	0.283 ± 0.053	0.41 ± 0.30	0.293 ± 0.041	0.00 ± 0.00	0.128	0.036
0.50	8.00	5.00	0.380 ± 0.069	2.46 ± 0.52	0.380 ± 0.039	0.00 ± 0.00	0.956	0.001
0.25	8.00	6.00	0.427 ± 0.085	3.43 ± 0.58	0.458 ± 0.065	0.00 ± 0.00	0.048	<0.001

2. 3. 3. Fitts の法則（ID-MT 回帰直線）

図 2-4A は、flat 条件と table 条件の各 ID における平均 MT と、両条件の ID-MT の回帰直線 ($MT = a + b ID$) を示したものである。線形相関係数 (R) は、MT と ID の間の線形関係の強さと方向性を測るものであり (Pino et al., 2013)、両条件において、ID と MT の間には高い正の相関が認められた (Table : $R=0.97$, Flat : $R=0.98$)。決定係数 R^2 は、table 条件では 0.926、flat 条件では 0.941 であった。flat 条件の回帰直線から得られた各条件の MT の残差 (RE) を、一元配置分散分析で比較した (図 2-4B)。その結果、12 種類の RE の間に有意な差があることが示された ($F(11, 341)=16.08, p<0.001$)。多重比較では、table 条件の ID6 の RE は、ID1 と ID5 を除く他の 7 種類の RE よりも有意に大きかった ($p<0.05$)。また、ID6 のみ、条件間で有意な差が示された ($t(31)=3.67, p=0.018$)。

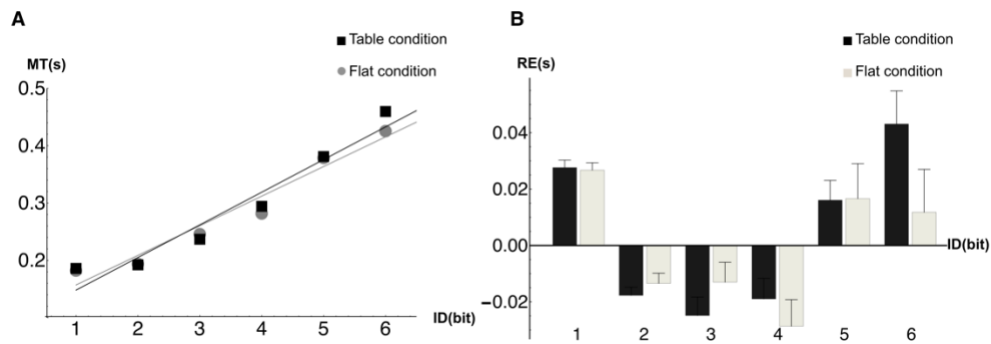


図 2-4 両条件の回帰直線と残差 (RE)。A) flat 条件の回帰直線を灰色で、table 条件の回帰直線を黒色で示す。table 条件の回帰直線は、 $MT = 0.091 + 0.057 ID$ ($R^2 = 0.926$) で、flat 条件の回帰直線は、 $MT = 0.105 + 0.052 ID$ ($R^2 = 0.941$) であった。B) flat 条件の回帰直線から得られた RE を両条件の各 ID で示す。

2. 3. 4. 位置-加速度の位相図

ID6 の両条件における位置-加速度位相差図の典型例を図 2-5 に示す。加速度の変化を定量化するために、タップ時前のピーク加速度値とタップ時の加速度値の差の絶対値を算出した。この差の絶対値は、table 条件の方が flat 条件よりも有意に大きいことが示された (table: $0.52 \pm 0.30 \text{ mm/s}^2$, flat : $0.33 \pm 0.24 \text{ mm/s}^2$, $t(31) = 3.32$, $p = 0.002$)。

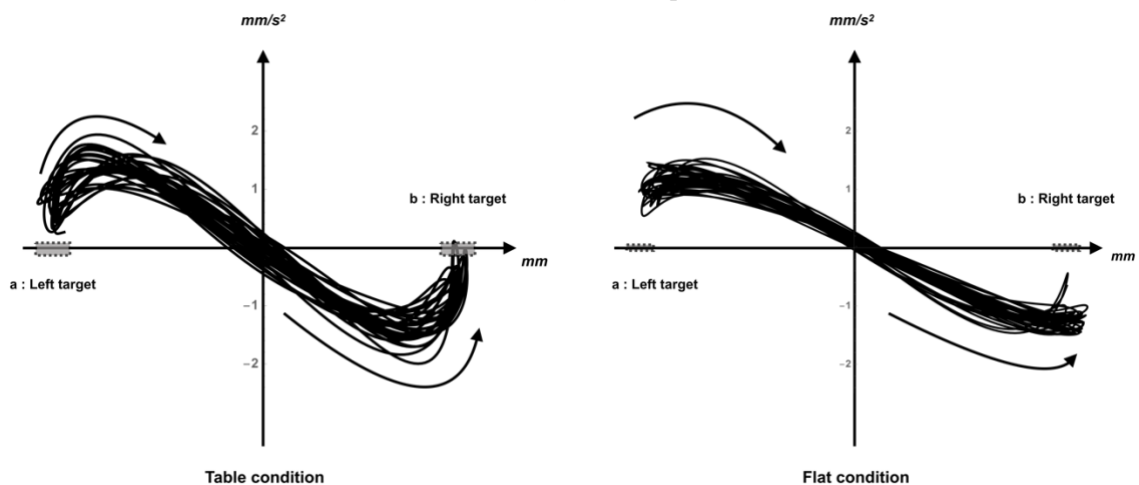


図 2-5 両条件の位置-加速度の位相図の典型例。矢印は、左の目標から右の目標に移動する際の

加速度の定性的な特徴を示している。

2.3.5. 主成分分析による軌道の変動の定量化（qVPCA）

主成分分析 (PCA) で得られた各主成分ベクトルに対するデータの寄与率を表 2-2 に示す。第一主成分ベクトルの寄与率は、どちらの条件においても、全区間で非常に高い値を示した（例：flat：S2 で最小 70.1%，S1 で最大 100%）。

表 2-2 各主成分ベクトルに対するデータの寄与率

Contribution ratio (%)						
Table conditions				Flat conditions		
Sections	First axis	Second axis	Third axis	First axis	Second axis	Third axis
S1	100.0	0	0	100.0	0	0
S2	70.1	23.0	6.9	70.7	23.7	5.6
S3	75.7	17.6	6.7	75.8	17.8	6.4
S4	85.9	10.6	3.5	84.2	12.0	3.8

図 2-6 は、各区間の座標の変動を PCA で定量化した qV_{PCA} である。二元配置分散分析の結果、条件×区間の交互作用が示された ($F(3, 248) = 3.17, p = 0.02$)。また、条件と区間ともに主効果があった（条件： $F(1, 248) = 26.32, p < 0.001$ ；区間： $F(3, 248) = 458.48, p < 0.001$ ）。多重比較を行うため、同じ区間の値を条件間で比較したところ、区間 S4 を除く全ての区間で有意な差が見られた ($p < 0.05$)。図 2-6B には、各条件の変化率の値を示した。その結果、 qV_{PCA} の減少率は、table 条件 (0.86 ± 0.05) の方が、flat 条件 (0.73 ± 0.14) よりも有意に大きいことが示された ($t(31) = 4.36, p < 0.001$)。

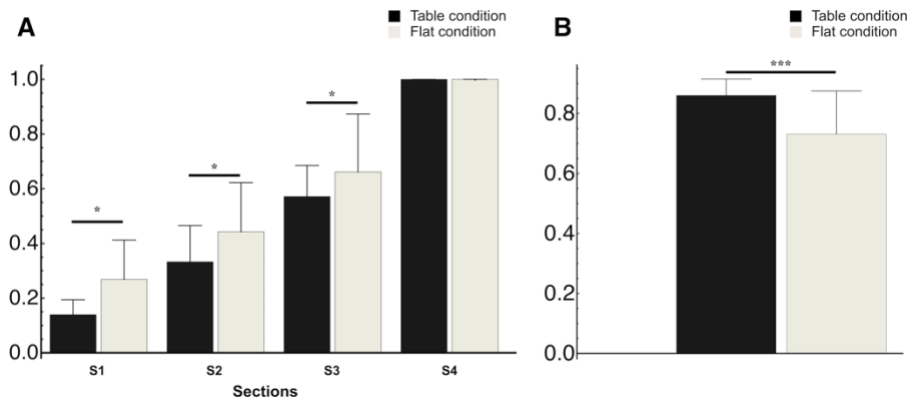


図 2-6 主成分分析によって定量化された軌道の変動値 (qv_{PCA})。A) 両条件の各区間の qv_{PCA} 。B) 区間 S4 から区間 S1 への変化率。* $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ 。

2. 4. 考察

本研究では、2つの目標を交互にタップする Fitts の実験を、従来の目標を平面とする条件 (flat 条件) と、目標に 1.5cm の高さを加えた台とする条件 (table 条件) の2つの条件で行った。そして、2つの条件のもとで運動時間 (MT) に対する運動制御機構と目標に向けての軌道の変動を調べるとともに、table 条件で Fitts の法則が適用されるかどうかを検討することを目的とした。

まず、対象者に姿勢に関する指示を一切与えなかったが、table 条件では従来とは異なる高さのある目標を使用するため、対象者は身体3点 (肩、肘、手首) のいずれかの位置を調整すると考えられた。この3点の座標を各 ID で比較したところ、肩と肘の位置は全ての ID で有意な差がなかったが ($p > 0.05$)、手首の位置は全ての ID で table 条件が flat 条件よりも有意に高かった ($p < 0.05$)。この結果は、対象者は姿勢に関する特別な指示を受けていないにもかかわらず、手首の位置を目標の高さに合わせて自然に調整されたことを示す。しか

し、スタイラスの先端の座標値から垂直方向の移動距離を算出したところ、全ての ID において2つの条件間で有意な差はなかった ($p > 0.05$)。つまり、table 条件では目標に台を使用したことで手首の位置が自然に調整されるが、スタイラスの垂直移動距離には変化がないことが明らかとなった。

次に、table 条件のエラー率は、全ての ID で 0%であったことが示された。一方、flat 条件ではエラーが発生した。したがって、Fitts が用いた言語指示に加えて、高さのある台を目標とすることで、エラー率 0%という結果を引き出すことができたと考えられる。Soukoreff and Mackenzie (2004) によると、ジョイスティックやマウスを使ってエラー率 0%を達成した先行研究はある (Jagacinski and Monk, 1985; Epps, 1986)。しかし、オリジナルの Fitts の研究 (Fitts, 1954) のように、スタイラスを使った人間の手部運動でエラー率 0%を達成した研究はない。したがって、この方法は、エラー率 0%の環境で人間の手の運動を研究するための有効な手段であることが示されたといえる。ただし、このエラー率 0%とは、軌道の終点が目標幅内にあるが目標幅内の変動はあるということである。また、速さと正確さの間にトレードオフの関係 (Fitts, 1964) があるため、エラー率が 0%の table 条件ではエラーが発生した flat 条件よりも MT が長くなると予想した。表 2-1 に示すように、同じ ID の条件間で MT を比較すると、ID3 と ID6 では有意な差があった。ID3 の場合、予想に反して table 条件の方が flat 条件よりも MT が短くなった。この結果については、本実験の分析結果から説明が困難であるため、ここでは議論の対象としない。ID6 では予想通り、table 条件の方が flat 条件よりも MT が有意に長くなり、これはタップの精度が高かったことが関連すると考えられる。以上、高さのある台を目標にした場合のエラー率と MT の関係をまとめると、ID4 以上では flat 条件よりも table 条件が高精度なタップが行われたが、ID6 のみにその精度の効果が MT の差異に表れたことが明らかとなった。

3 つ目に、ID6 の軌道を分析し、各条件の運動の変化を検討した。まず、table 条件では、flat 条件に比べて目標付近での加速度の減少が大きいことがわかった。この結果を位置-加速度位相図で見ると、目標付近で加速度が変化しており、N字型になっていることがわかる（図 2-5）。一方、flat 条件では、目標に到達する直前の加速度はほとんど変化せず、直線で示される。table 条件の加速度の変化として示されたこの N字型は、高い難易度の加速度の特徴として示される先行研究の結果と一致している（Elliott et al., 2001; Khan et al., 2006）。このような特徴（加速-減速段階）から、対象者はフィードバック制御を行っていると推察される（Elliott et al., 2001; Khan et al., 2006）。ここでのフィードバック制御とは、スタイラスの先端の運動が目標から逸脱しないように調整することである。したがって、table 条件では、目標を正確に捉えるために、目標の直前にフィードバック制御を行われたことが示唆される。Keele (1968) は、フィードバック理論によれば、MT の延長は目標周辺の運動の修正によって起こると説明している。つまり、有効な目標の幅（実験設定で決められた目標の幅）に合わせて動作が調整されエラー率が 0%であった table 条件では、このフィードバック制御がより大きな役割を果たしていると考えられる。このような場合には MT が延長することが予想され、実際に ID6 の table 条件では同じ ID6 の flat 条件よりも MT が長くなっていた。

2. 4. 1. 軌道の変動に基づく運動特性

先行研究では、エラー率が低い場合には目標の終点における座標の変動が小さいことが示されているが（Bertuccio et al., 2015）、目標終点に向かう軌道がどのように変化するのは明らかになっていない。そこで、本研究では、15 秒の試技時間で観測された全ての軌道を対象として、目標に向かう軌道の変動を定量化した。軌道を複数区間に分割し、各区間で得

られた座標に PCA を用いて定量化した（2.2.3.F 参照）。定量化した値は、 q_{VPCA} とした。結果は、いずれの条件においても、軌道の間部分（S4）で最大値を示し、目標部分（S1）で最小値を示した（図 2-6A）。また、目標に向かって、その値は徐々に減少した。さらに、table 条件は flat 条件に比べて、軌道の間部分から終点の目標部分までの減少率が有意に大きいことが示された（図 2-6B）。この軌道の収束の概念図を図 2-7 に示す。これは、"divergence or convergence in behavioral output can be assessed to detect differences among tasks that do not appear overtly different to an external observer（行動出力の発散または収束を評価することで、外部の観察者にはあからさまな違いには見えない課題間の差異を検出することができる）" という Gorniak（2019）の主張を支持している。本研究では、 q_{VPCA} の視点から目標に向かう軌道の変化を調べることで、条件間の違いを抽出することができた。また先行研究では、目標を正確に捉える精度を向上させるには目標付近の MT の延長が必要であることが報告されている（Elliott et al.2001; Novak et al.2000; Rieger, 2007）。したがって、table 条件下でより多くの収束した軌道は、目標終点の変動を抑えるための動作の特徴であり、これは MT の延長に関係していると考えられる。

これまでの結果をまとめると、エラー率が 0%となる table 条件での運動の特徴は、目標付近で観測されるフィードバック制御と、目標に向かっての軌道収束である。これらの運動の特徴は、目標を正確に捉えるための精度の向上に関係しているため、MT の延長にも関係していると考えられる。なお、スタイラスの垂直方向の移動距離は、MT の結果とは関係ないことがわかった。また、目標に向かう複数の軌道を q_{VPCA} で定量化し、軌道の収束を評価する方法は、位置-加速度図からは観察できない運動の特徴を抽出するのに有効であることも示された。さらにこの軌道の収束は、対象者が目標に対してミスなく（精度を上げようとして）運動を行ったかどうかを判断するのにも役立つ。

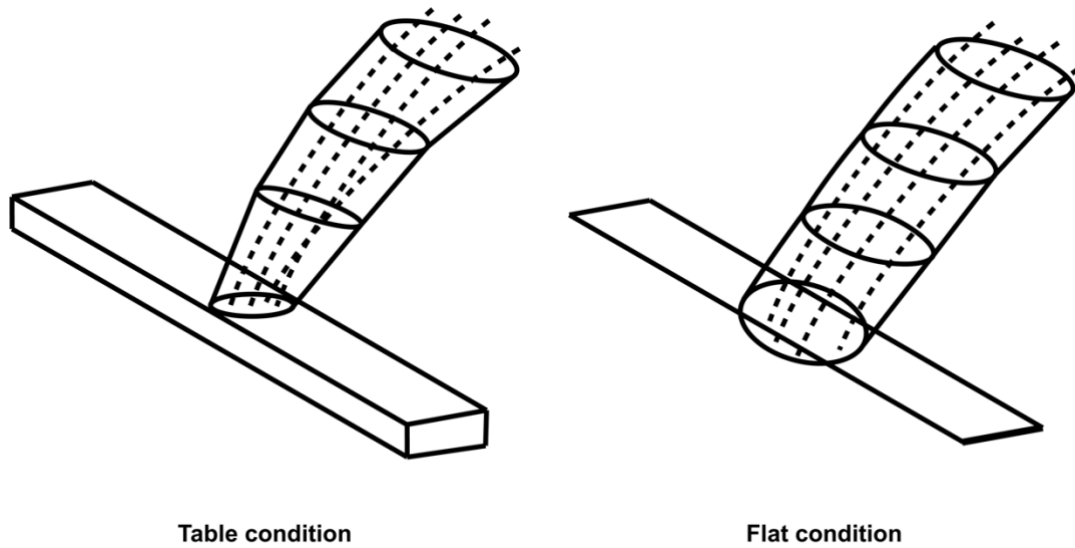


図 2-7 各条件における目標に向けての軌道の概念図。軌道を囲む円の大きさは、その部分の q_{VPCA} の値を反映しており、目標に向かって値が大きくなり減少すると、円の形状が収束する。table 条件は、flat 条件に比べて、目標に向かう軌道がより収束していることから、タップが正確に行われていることがわかる。

2.4.2. エラー率が0%の場合の Fitts の法則

Fitts の法則は、急速な照準運動を行う人間の MT、距離、精度の関係を記述したものである (Soukoreff and MacKenzie, 2004)。決定係数 R^2 は、Fitts の法則を表すモデル (ID-MT 回帰直線) の適合度を示す指標であり (Pino et al, 2013)、 R^2 が 1 であればモデルを用いた完全な適合を示す。本研究の両条件の回帰直線の適合度は 0.9 以上であり、非常に高いことが示された (図 2-4 の R^2)。しかし、table 条件の ID6 の MT のモデルの残差 (RE) は、両条件とも ID1 と ID5 を除く他の ID のモデルよりも有意に大きいことが示された。この結果について、オリジナルの Fitts の実験データとともに、追加の検証を行った。図 2-8 は、Fitts の研究 (Fitts, 1954) の表 1 のデータから得られた回帰直線に基づいて、各 ID (ID1~ID6) の RE を示し

たものである。なお、Fitts は ID7 までを行っているが、本研究の結果に合わせて ID6 までの RE を示している。図 2-8 より、ID1 の RE は正の値を示しており、本研究の ID1 の結果と同様であることがわかる。また、本研究における ID1 の RE は、2 つの条件間で有意な差はなかった。Fitts のモデルについて、Soukoreff and Mackenzie (2004) は、極端に低い ID 値（すなわち y 軸に近い）に対応するデータポイントは、回帰直線の上に位置する傾向があると述べている（本研究では正の RE を示す）。したがって、ID1 の RE の結果は Fitts のモデルの特性であることが示唆される。一方、ID5 と ID6 の RE は、オリジナルの Fitts の実験結果では負の値を示しているが、本研究では両条件で全て正の値を示している。しかし、ここでは値の符号には注目しない。ここで注目する重要な点は、ID5 の RE は 2 つの条件で有意差がなかったが、ID6 の RE は有意差があったことである。これは、ID が高いほど目標からのエラー率を 0% に制御した場合に、従来のモデルとの逸脱が大きくなることを示唆している。

また、Fitts のモデルの式($MT = a + b ID$)に MT を代入することで、ID を逆算することができる (Fitts, 1954; Fitts and Peterson, 2004)。そこで、flat 条件の回帰直線の式に、table 条件と flat 条件の ID6 の平均 MT (table : 0.458s, flat : 0.427s) を代入した。その結果、table 条件では $ID=6.79$ 、flat 条件では $ID=6.19$ となった。また、この結果と上記の残差の分析結果を合わせて考えると、table 条件の ID6 は、所定の難易度よりも高い難易度で行われたという可能性が考えられる。以上の結果から、エラー率が 4% 発生する従来条件の ID-MT 回帰直線から、エラー率が 0% の条件で得られた MT を従来条件の MT と同様に説明することは困難であると考えられる。なぜなら、ID6 のような難易度の高い条件の MT は、対象者が ID6 よりも高い難易度であるかのように行った、という評価が可能だからである。したがって、従来の Fitts のモデルは、エラーが 0% の条件で修正される可能性があるといえる。

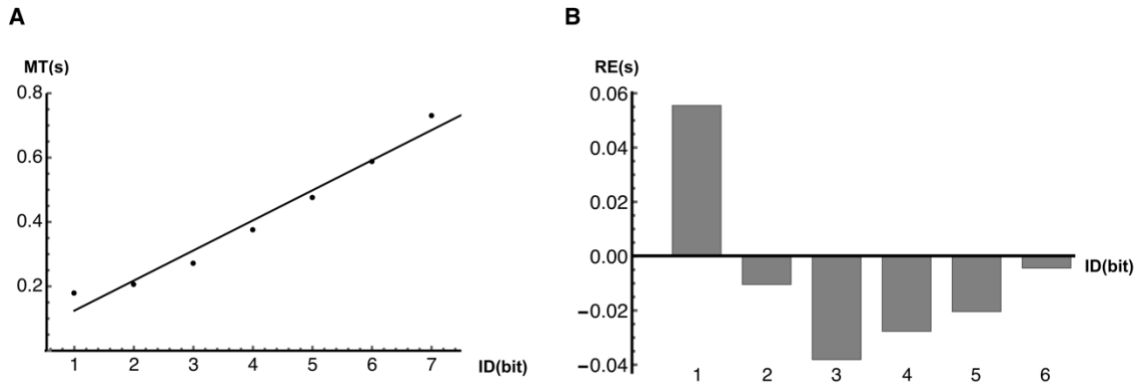


図 2-8 Fitts の実験データ. A) Fitts (1954) の表 1 のデータに基づく各 ID の平均 MT と回帰直線. B) 各 ID の回帰直線からの RE (残差).

2. 4. 3. 軌道の収束と情報処理の増加

table 条件で観察された軌道の収束の原因は、対象者の運動制御がより多くの情報を処理しなければならなかったためではないかと考えている。ここでいう情報とは、Shannon and Weaver (1949) が定義した不確実性が減少したときに得られる情報のことである。これは、不確実性の低減が大きいほど、より多くの情報が必要になると考えられている。Matsuno (1989) は、この情報の視点を軌道生成に応用し、軌道は人間の一瞬一瞬の情報処理の結果であると考えた。この点に関して Matsuno (1989) は、「the actualized trajectory is degenerate with the possible future trajectories whose degeneracy is constantly dissolved with time (実現された軌道は、未来の軌道に対して縮退しており、その縮退は時間とともに解けていく)」と述べている。これは、対象者があらかじめ複数の選択肢から選択できる軌道が、事後には決定されているということである。

本研究では、この「不確実性」を示す指標として、各区間の q_{VPCA} を用いた。その結果、いずれの条件においても、 q_{VPCA} は中間部分 (区間 S4) で最大となり、目標に向かって徐々に減少していった。さらに、table 条件は flat 条件に比べて、目標の中間から目標の終点まで

の減少率が有意に大きかった（図 2-6 参照）。このように、不確実性を低減することで、複数の軌道の観測に基づく軌道の変動を低減できる可能性がある。したがって、目標に向かう軌道の変動が小さくなる table 条件では、より多くの情報が処理されたと考えられる。これは Soukoreff and MacKenzie（2004）の説明と同様であると考えられる。

2. 5. 本章の結論

エラー率を 0% に制御した場合、人間の運動は、目標に向かって定量化された軌道の変化の度合いが大きく減少することが特徴であり、この場合の運動時間（MT）は延長した。さらに、この大きな減少は、軌道の位置-加速度位相図で観察される加速度の急激な変化と複数の軌道の分析に由来する情報処理の増加に関連していた。MT と困難度指数（ID）の関係を表す Fitts のモデル（ID-MT 回帰直線）は、いずれの条件でも高い適合度を示した。しかし、従来（flat）の条件で開発されたこのモデルでは、エラー率 0% の条件のときに最も難易度の高い時の MT を十分に説明できなかったため、従来のモデルが修正される可能性がある。

第3章 他者と競争する環境における Fitts の実験

3. 1. 目的

個人競技スポーツにおいて競技者たちは他の競技者よりも、より良いパフォーマンス発揮をしようと努めている。しかし、試合のような他者との競争環境では、パフォーマンスが変動することが知られており、そのパフォーマンスの変動は、社会的促進や精神的な焦点、または他者との競争による心理的側面によって部分的に説明されている（Zajonc and Sales, 1966; Martens et al., 1990）。また、他者との競争下での反応課題を行い、競争がモチベーションや緊張感の増加をもたらし、反応時間の短縮につながったと報告した研究（Church, 1962; 松本・佐久間, 2013）がある。しかしながら、ここでのパフォーマンスとは、反応時間のよるような最終的な結果を指しており、競争下においての動きがどのように変動して最終的な結果が得られるかについて検証されていないといえる。

近年、Varlet and Richardson (2015) は、陸上競技 100m 走のウサインボルトが世界記録を出したレースを分析し、驚異的な世界記録が誕生した背景には 2 位の選手とボルトの間に対人間の動きの同期が生じたことが関係している可能性があることを報告した。Varlet and Richardson (2015) は、2 人の選手のステップ発生時間（地面に脚が接地した時間）から相対相値を求めて、2 人の選手の動きの同期発生について検討した。その結果、レース中の 2 人の選手のステップの発生時間が同時になる同相の同期が断続的に生じていることが明らかとなった。これは、もともと異なるテンポの 2 人の選手のステップが一緒にレースをした時に調整されたことを示している。これまで、このようなスポーツにおける対人間の同期は、駆け引きがあるような対人スポーツの場面を再現した実験から検討されている（Kijima et al., 2012; Okumura et al., 2012）。つまり、Varlet and Richardson (2015) の研究は 100m 走の

実際のレースの分析から、それぞれの競技者が他の競技者よりも良いパフォーマンス発揮をしようとしている個人競技スポーツにおいても、対人間の同期が生じて、それがパフォーマンスの変化に関連する可能性を示しており、この結果は非常に興味深い。しかし、Blikslager and de Poel（2017）が、Varlet and Richardson（2015）の研究に用いた映像のサンプル周波数が低いという問題点を指摘し再分析した。その結果、Varlet and Richardson（2015）が導いた同期頻度よりも同期頻度が高くなかったことを示し、同期が発生したと裏付ける根拠がないことを示した。しかしながら、競争中の2者の運動周波数（ステップの時間から算出された周波数）は大きく変動しており、2者の運動周波数が近づく瞬間があることが明らかとなったため、競争中の2者間の同期は理論的に適応可能であると結論付けた。つまり、競争中に他者との同期が生じるのかを実験的に厳密に検証し、そしてこの同期がパフォーマンスの変化にどのように関連するかを検討する必要がある。

そこで、本研究では実験室環境にて再現可能な単純な身体の往復運動である、腕の周期運動を用いて、この問題を検討しようと考えた。周期運動は、課題の難易度が厳密に統一できる利点から Fitts（1954）の連続タップ課題（以下、Fitts の実験）を採用した。Fitts の実験は、15 秒間 2 つの目標 (Target) を連続でタップする課題であり、困難度指数 (Index of difficulty, 以下 ID) が 2 つの目標間の距離と目標の幅から厳密に決定されるため、実験室環境で行う再現性の高い実験として実験心理学、人間工学や情報の分野で幅広く知られている。この Fitts の実験を扱う多くの研究では、1 回あたりの目標間を移動する運動に要する時間 (Movement Time, 以下 MT) をパフォーマンス変数として用いる (Fitts, 1954; Fitts and Peterson, 1964; Fine and Amazeen, 2011; Gorniak, 2019)。オリジナルの Fitts の研究 (Fitts, 1954) では、試技が 15 秒の試技時間で行われ、各試技における総タップ回数を試技時間から割ることで平均値として MT が算出される。そのため、総タップ回数が多い場合の MT は短くなり、総

タップ回数が少ない場合の MT は長くなる。これとは別に、2つの目標を移動する方向の時系列座標から目標をタップした瞬間に対応するピーク値とバレー値に対応する時間を交互に算出し、その時間差を MT とする方法がある（Fine and Amazeen, 2011; Gorniak, 2019）。すなわち、前者の方法では1試技から平均値として1つの MT の値が算出されるが、後者の方法では1試技中の各タップ全ての MT を求めることができる。本研究では、MT の変動を詳細に分析することができる利点から、後者の方法を用いて MT を算出することとした。

以上を踏まえ本章では、実験室環境にて行う Fitts の実験を用いて競争中の2者間の動きに同期が生じるかを検証し、この同期によって MT がどのように変化するかを検討する。

3. 2. 方法

3. 2. 1. 実験対象者

研究対象者（以下、対象者）は、大学生男女16名（男性：14名、女性：2名、年齢：21.0±1.0歳）であった。男性1名が左利きで、残りの15名は右利きであった。本研究は中京大学大学院体育学研究科倫理審査委員会の承認を得て行われた（承認番号：2018-029）。全ての対象者に対して、本研究の実験内容及び実験参加に伴うリスクについての説明を行い、書面によるインフォームドコンセントを得た。

3. 2. 2. 実験方法

A. 実験設定

対象者は、課題実施に影響がない椅子に着席した姿勢で、利き手による15秒間2つの目標を交互にタップする Fitts の実験を、1人で行う個人条件と2人で競い合いながら行う競

争条件を各2試技行った（図3-1）。その際、タップの動きを速くすると目標からタップが逸脱することから定義されるエラーが発生し、エラー率が高くなるトレードオフ（Woodworth, 1899; Fitts, 1954; Zhai et al., 2004）が生じることが考えられた。そこで、山田（2015）によって考案され、Murakami and Yamada（2021）によって検証されたFittsの実験におけるタップエラー率を0%に制御する高さ1.5cmの台を目標とする方法を用いて、このトレードオフが生じない中で実験を行うこととした。

また、Fittsの実験では目標の幅（W）と目標間の距離（A）から課題の難易度であるID（ $ID = \log_2 \frac{2A}{W}$ ）が厳密に定義される（Fitts, 1954）。本実験では、 $W=6.35\text{ mm}$ （0.25インチ）、 $A=203.2\text{ mm}$ （8インチ）としたため、 $ID=6$ の課題の難易度で実験を行った。

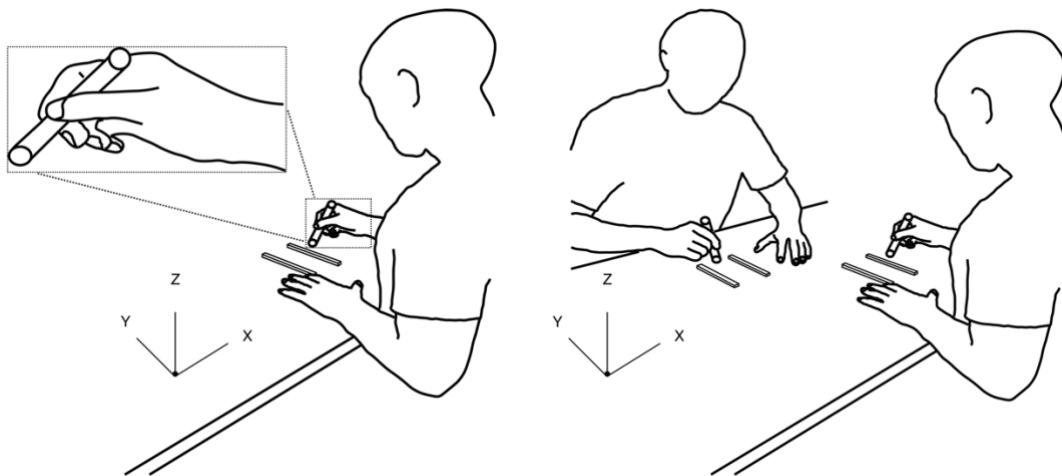


図3-1 実験概念図と実験で用いた座標系の定義。個人条件（左）と競争条件（右）。全ての試技で、ペン先端に貼付した反射マーカの座標値を取得した。

B. 実験手順

実験室に入室した同性の2名の対象者（1組）は、課題を実施する目標がある机の前の椅子に着席し、実験内容やリスクなどの説明を受けた。対象者には、2つの目標のうち指定した目標（図 3-2：グレーの目標）にペン先端を置いた状態から実験開始の合図を待つこと、正確にそして可能な限り速くタップを行うことを口頭で教示した。さらに、競争条件では上記に加えて、競争相手より多くタップを行うようにと口頭で教示した。課題の練習は行わず、各組で個人条件と競争条件を行った。個人条件を先に行い、その次に競争条件を行ったのが8名（4組）で、残りの8名（4組）は競争条件を先に行い、その次に個人条件を行った。個人条件は2名のうちの1名の対象者が試技を2回行った後にもう1名が2回行い、競争条件は2名1組となった対象者たちが2回行った。さらに、個人条件の時に試技を行わない対象者は、もう1名の試技を観察できないように、椅子に着席したまま課題を実施する机に対して背を向けて待機していた。なお、開始と終了の合図はモーションキャプチャーを制御するソフトウェア（Cortex version 3, Motion Analysis Corporation, USA）のキャプチャー開始時に鳴る開始音とキャプチャー終了時（開始から15秒後）に鳴る終了音とし、対象者にタップ回数のフィードバックは行わなかった。

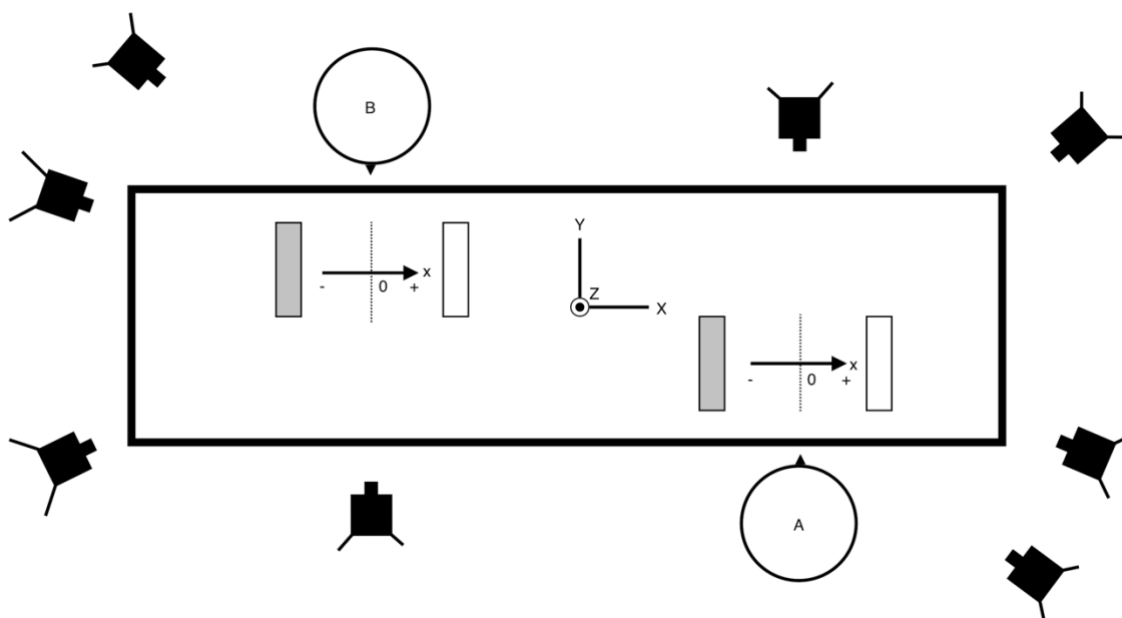


図 3-2 実験装置と座標系の定義. 8 台のカメラは、2 名の対象者を囲むように配置された。2 名の対象者は A, B それぞれの位置に向かい合う形式で着席し、個人条件と競争条件の試技を行った。対象者は、グレーで示した目標にペン先端を置いて試技の開始合図を待った。つまり、A に着席した対象者は、右の目標への移動から開始し、B に着席した対象者は、左の目標への移動から開始した。点線は、タップを行う 2 つの目標の中間位置であり、A の場合は 450mm で B の場合は -200mm であった。ペン先端の x 軸の時系列座標データを、これらの位置を 0 とする座標系に変換して相対位相を算出した。つまり、変換した座標では 2 者とも正の座標の目標に向かって運動が開始される。

C. データ取得

対象者を囲むように配置された 8 台のカメラを用いたモーションキャプチャーシステム (MAC3D System, Motion Analysis Corporation, USA, 245Hz) をソフトウェア (Cortex version 3, Motion Analysis Corporation, USA) によって制御して、ペン先端に反射マーカを貼付して 3 次元座標値を取得した (図 3-1 と 3-2)。3 次元の軸は、x 軸が目標間の距離の方向とな

るようにソフトウェア内で設定した（図 3-1 と 3-2）。なお、競争条件では、2 名の対象者が向かい合って行うが、正面に向かい合うとペン先端の反射マーカの取得が困難であったため、対象者は図 3-2 に示す位置で課題を行った。取得したペン先端のデータは、4 次の双方向の Butterworth ローパスフィルタによりカットオフ周波数 5Hz で平滑化した。

3. 2. 3. 分析方法

A. エラー率

実験実施者の 1 人が、実験実施中に対象者のタップに目標からのエラーがないかを目視で確認した。実験実施後にトラッキングしたデータをモーションキャプチャーの制御ソフトウェア（Cortex version 3, Motion Analysis Corporation, USA）で再生してペン先の座標を確認し、総タップ回数とエラータップ回数を数えた。そして、 $\left(\text{エラー率 (\%)} = \frac{\text{エラータップ回数}}{\text{総タップ回数}} \times 100 \right)$ の式より、エラー率を各試技で算出した。

B. 運動時間（MT）

先行研究（Fine and Amazeen, 2011; Gorniak, 2019）にしたがい、ペン先端の x 軸の時系列座標データを用いてピーク値とバレー値に対応する時間を交互に算出して、その時間差を各試技の運動時間（MT）として求めた。つまり、タップ回数分の MT が求めた。なお、ピーク値は A の位置で試技を行った対象者は、右側の目標のタップ時であり、バレー値は左側の目標のタップ時であった（図 3-2）。B の位置で試技を行った対象者は、ピーク値が左側の目標のタップ時で、バレー値は右側の目標のタップ時であった（図 3-2）。結果は、中央値および四分位偏差（第 3 四分位数から第 1 四分位数を引いた値を二等分した値）を示した。

C. 相対位相の算出

本実験の課題の制約上、競争条件を行う2者は同様の目標間の距離（203.2mm）を移動するが、2者が課題を行った図3-1で示した座標系（絶対座標系）は異なる（図3-1：目標の中間位置はそれぞれ450mmもしくは-200mm）。そこで、2者のペン先の移動方向（x軸方向）の時系列座標データを、それぞれの目標間の中間位置（図3-2：Aの場合は450mm、Bの場合は-200mm）を0とする座標系に変換して、先行研究にしたがい相対位相を求めた（Pikovsky et al., 2002）。分析の手順は、まず、座標系を変換した2つの時系列座標データ（元データ）をそれぞれヒルベルト変換し、虚数部の時系列データを算出した。次に、元データと変換したデータを極座標系で表すことで、2つのベクトルが時々刻々求まり、そのなす角を2者間の瞬間的な相対位相として求めた。相対位相は、競争条件の2者の動きの同期の指標として、 0° から 180° の範囲で算出した。2者間で発生した相対位相のパターンを特定するために、先行研究（Schmidt and O'Brien, 1997, Okumura et al., 2012）にしたがって 0° から 180° までを9つの領域（つまり、 $0^\circ \leq \theta < 20^\circ$, $20^\circ \leq \theta < 40^\circ$, ..., $160^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ）に分割し、その領域の割合を各試技で算出した。同相と逆相の同期は、それぞれ 0° 付近と 180° 付近の相対位相の値を示す時である（Schmidt and O'Brien, 1997）。ペン先端の座標をそれぞれの目標間の中間位置を0とした相対座標で表したことで、タップする目標の座標が正または負の値をとる。図3-2に示したように、Aの位置で試技を行った場合、対象者から見ると右側の目標が正の値で左側の目標が負の値となり、Bの位置で試技を行った対象者では左側の目標が正の値で右側の目標が負の値となる。つまり、2者がともに正の値の目標に移動する時は、Aは右側の目標にBは左側の目標に向かう動きとなる。2者が同時に課題を開始する本研究において、2者が同じタイミングで正負が同じ目標の方向に動くときは、同相の同期を示す 0° 付近の値となり、2者が同じタイミングで正負が異なる目標の方向に動

くときは、逆相の同期を示す 180° 付近の値となった。全ての数値計算は、Mathematica (Version 11.1.1.0, Wolfram Research, IL, USA) を用いて行われた。

D. 統計処理

Mann-Whitney の U 検定を用いて個人内で個人条件の MT と競争条件の各試技の MT の値を比較した。なお、各対象者の個人条件の MT には、2 試技全ての MT が含まれる。統計分析には、Mathematica (Version 11.1.1.0, Wolfram Research, IL, USA) を使用し、統計的有意水準は $p < 0.05$ とした。また、競争条件の各試技で、同期が生じたかどうかを決定するために Varlet and Richardson (2015) の分析方法にしたがい、統計閾値 ($p < 0.05$ に該当する値) を求めた。本研究における統計閾値は 18.37% と算出されたため、 $0^\circ \leq \theta < 20^\circ$ の領域がこの統計閾値を超えた場合もしくは $160^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の領域が統計閾値を超えた場合に試技中の 2 者が同相同期もしくは逆相同期であるとした。

3. 3. 結果

3. 3. 1. エラー率

まず、先行研究 (山田, 2015; Murakami and Yamada, 2021) と同様にタップをする目標に高さのある台を用いたことで、全試技のエラー率は 0% であった。これは、目標からの逸脱がなく、各対象者はタップの精度を維持しながら両条件の試技が行われたことを示している。

3. 3. 2. 運動時間 (MT)

各対象者の運動時間 (MT) を条件別に表 3-1 に示している。個人条件の MT より競争条

件の MT が 2 者とも有意に短くなった試技は 16 試技中 9 試技（表 3-1：AB₁, AB₂, EF₁, EF₂, KL₂, MN₁, MN₂, OP₁, OP₂）であり，これは全体の 56.25%であった．また，個人条件の MT より競争条件の MT が 2 者とも有意に長くなった試技は 16 試技中 1 試技（表 3-1：CD₁）であり，これは全体の 6.25%であった．そして，一方の対象者は個人条件の MT より競争条件の MT が有意に短くなり，もう一方の対象者は個人条件の MT より競争条件の MT が有意に長くなった試技は 16 試技 4 試技（表 3-1：GH₁, IJ₁, IJ₂, KL₁）であり，これは全体の 25.0%であった．

表 3-1 各対象者の運動時間（MT）

対象者	競争条件の 組み合わせ	MT [s]				U 値	
		個人条件		競争条件			
		中央値（四分位偏差）	回数	中央値（四分位偏差）	回数		
A	AB ₁	0.379 (0.036)	71	0.331 (0.030)	44	2635	***
	AB ₂			0.329 (0.025)	44	2679	***
B	AB ₁	0.327 (0.016)	89	0.302 (0.020)	48	2923	***
	AB ₂			0.298 (0.010)	47	2923	***
C	CD ₁	0.467 (0.041)	62	0.527 (0.049)	27	454	***
	CD ₂			0.453 (0.023)	31	1084	
D	CD ₁	0.364 (0.016)	79	0.404 (0.028)	35	587	***
	CD ₂			0.383 (0.016)	37	723	***
E	EF ₁	0.498 (0.018)	59	0.425 (0.018)	33	1851	***
	EF ₂			0.474 (0.019)	30	1293	***
F	EF ₁	0.510 (0.031)	55	0.436 (0.019)	33	1723	***
	EF ₂			0.424 (0.019)	34	1814	***
G	GH ₁	0.379 (0.017)	73	0.416 (0.029)	34	581	***
	GH ₂			0.457 (0.022)	31	183	***
H	GH ₁	0.478 (0.028)	60	0.433 (0.012)	32	1593	***
	GH ₂			0.478 (0.022)	29	914	
I	IJ ₁	0.372 (0.021)	78	0.342 (0.017)	43	2940	***
	IJ ₂			0.333 (0.018)	44	3038	***
J	IJ ₁	0.453 (0.028)	64	0.378 (0.013)	38	2322	***
	IJ ₂			0.379 (0.011)	38	2239	***
K	KL ₁	0.490 (0.028)	59	0.465 (0.047)	31	1245	**
	KL ₂			0.453 (0.024)	31	1436	***
L	KL ₁	0.408 (0.015)	69	0.445 (0.019)	32	451	***
	KL ₂			0.427 (0.014)	35	797	**
M	MN ₁	0.510 (0.035)	58	0.380 (0.015)	35	1969	***
	MN ₂			0.400 (0.027)	36	1982	***
N	MN ₁	0.427 (0.018)	68	0.341 (0.009)	40	2720	***
	MN ₂			0.351 (0.015)	41	2775	***
O	OP ₁	0.477 (0.026)	60	0.417 (0.034)	32	1571	***
	OP ₂			0.428 (0.019)	33	1706	***
P	OP ₁	0.472 (0.072)	60	0.420 (0.049)	32	1448	***
	OP ₂			0.419 (0.033)	34	1572	***

** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

注) 競争条件の組み合わせのアルファベット (A-P) は、対象者を示し、下付き数字はそれぞれ競争条件の何試技目かを示している。各対象者の個人条件の MT の結果は、2 試技の全ての MT から算出した。各対象者の競争条件の MT の結果は、1 試技ごとにその試技の全ての MT から算出した。表に示した回数は、その試技の MT の数である。各対象者で条件間の MT を比較した（個人条件と競争条件 1 試技目、個人条件と競争条件 2 試技目）。

3.3.3. 競争中の2者の同期

各試技の9つの相対位相の領域の割合を図3-3に示している。方法に示した通り、各領域の割合に統計閾値（18.37%）を設けて、同期の発生を検討した。各試技の最も割合が高い領域が統計閾値を超えている場合は、アスタリスク（*）を図中に示した。図3-3から、 $0^\circ \leq \theta < 20^\circ$ の割合が最も高く、その領域の割合が統計閾値を超えた試技は全体の18.75%の16試技のうち3試技（図3-3：EF₁, OP₁, OP₂）であり、これらの試技中の2者は同相同期をした。また、 $160^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の割合が最も高く、その領域の割合が統計閾値を超えた試技は全体の12.50%の16試技のうち2試技（図3-3：AB₁, EF₂）であり、これらの試技中の2者は逆相同期をした。さらに、残りの試技のうち全体の18.75%の3試技（図3-3：CD₁, KL₁, MN₂）が $20^\circ \leq \theta < 40^\circ$ の領域の割合が統計閾値を超えており、全体の6.25%の1試技（図3-3：AB₂）が $120^\circ \leq \theta < 140^\circ$ の領域の割合が統計閾値を超えているため、これらの試技ではそれぞれ同相同期傾向もしくは逆相同期傾向であった。どの領域の割合も統計閾値を超えなかった7試技（図3-3：CD₂, GH₁, GH₂, IJ₁, IJ₂, KL₂, MN₁）は、試技中の2者が継続的に同相同期もしくは逆相同期していた割合が低いため、同期が観察されなかった（非同期であった）。

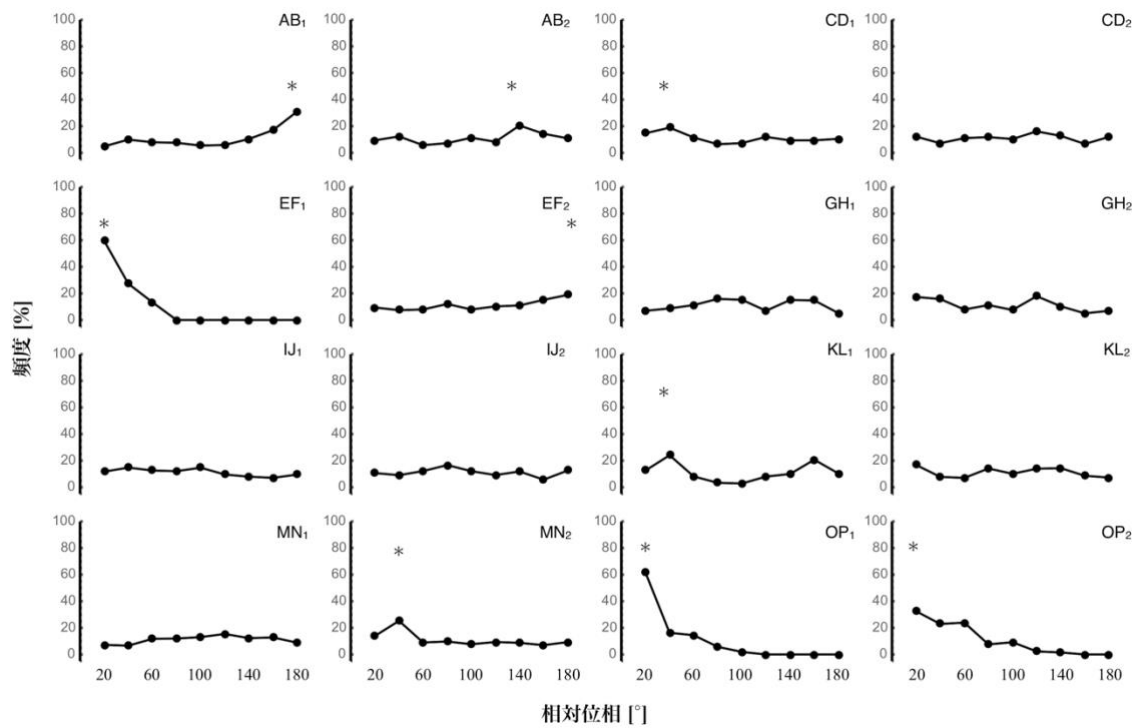


図 3-3 競争条件における各試技の相対位相。競争条件における各試技の相対位相を示した。各試技において統計閾値（18.37%）を超えた領域にアスタリスク（*）を示した。アルファベットは対象者を示し、下付き数字はそれぞれ競争条件の何試技目かを示しており、表 3-1 の結果と対応している。

3. 4. 考察

3. 4. 1. 競争で生じる同期の検証と MT の変化

本研究では、パフォーマンス変数に運動時間（MT）を用いて、競争によって各対象者の運動に変化が生じたかを検討した。その際、MT が短くなる時にエラー率が増加するトレードオフ効果 (Zhai et al., 2004) が生じないように、先行研究 (山田, 2015; Murakami and Yamada, 2021) にしたがって目標を 1.5cm の高さがある台に変更をした。すなわち、目標を台に変更

することでこのエラーが生じないように制御した。エラー率の結果は、先行研究（山田, 2015; Murakami and Yamada, 2021）の結果と同様に、個人条件と競争条件の全試技で 0%であった。したがって、一律にエラー率を 0%に制御した中で、条件間の運動の変化を検討することができる。MT は、各対象者で個人条件の MT（2 回の試技から算出された全ての MT）と競争条件の各試技の MT を比較した。競争条件の MT が個人条件の MT よりも 2 者ともに有意に短くなった試技が全体の 68.75%の 16 試技中 9 試技であり、競争条件の MT が個人条件の MT よりも 2 者ともに有意に長くなった試技が全体の 6.25%の 16 試技中 1 試技であった。そして、一方の対象者は個人条件の MT より競争条件の MT が有意に短くなり、もう一方の対象者は個人条件の MT より競争条件の MT が有意に長くなった対象者は、全体の 12.50%の 16 試技中 2 試技であった。対象者は、両条件ともにエラーが生じないように制御しながら可能な限り速い動きでタップをするようにしていたにも関わらず、競争条件の MT に短縮もしくは延長の変化が生じた結果が得られたことは興味深い。競争によって一様の MT の変化が生じたわけではないが、競争によって対象者の運動が変化して MT が変化したことを示唆している。

次に、この競争中の 2 者間に同期が生じたかを検討した。結果は、 $0^\circ \leq \theta < 20^\circ$ の相対位相領域の割合が有意に高い同相の同期をした試技が、全体の 18.75%の 16 試技中 3 試技であり、 $160^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ の相対位相領域の割合が有意に高い逆相の同期を示した試技が、全体の 12.50%の 16 試技中 2 試技であった。また、 $20^\circ \leq \theta < 40^\circ$ の相対位相領域の割合が有意に高い同相の同期傾向が全体の 18.75%の 16 試技中 3 試技で、 $120^\circ \leq \theta < 140^\circ$ の相対位相領域の割合が有意に高い逆相の同期傾向を示した試技が全体の 6.25%の 16 試技中 1 試技であった。さらに、全体の 43.75%の残りの 7 試技は、どの相対位相領域の割合も有意に高くなかったため、同期が観察されなかった（非同期であった）といえる。同相または逆相の同期を示し

た本実験のこの結果は、Varlet and Richardson（2015）と Blikslager and de Poel（2017）の先行研究が示唆した競争中の2者が同期する可能性を、厳密に統制された実験からはじめて示したといえる。Varlet and Richardson（2015）は、世界記録が誕生した100m走のレースを分析して1位と2位の選手の間と同相の同期が観察されたことから、競争中の2者間と同相の同期が2者の記録の短縮につながったと結論付けた。しかしながら、Varlet and Richardson（2015）と Blikslager and de Poel（2017）の先行研究では、1レースのみが分析対象なので、同期と記録の変化（本研究ではMTの変化）の関係のさまざまなパターンは明らかになっていないといえる。本実験からは、Varlet and Richardson（2015）と同様の結果である同相の同期が生じて2者のMTが短縮する試技は、全体の18.75%の16試技中3試技（図3-3と表3-1：EF₁, OP₁, OP₂）であった。しかし、他の13試技（全体の81.25%）では別のパターンの結果が得られた。例えば、表3-1に示した各対象者のMTをみると、一様に個人条件よりも競争条件でMTが短くなったわけではなく、MTが長くなった試技もあった。つまり、他者との競争が必ずしもMTの短縮をもたらすわけではないことがわかる。また、図3-3に示す各試技の相対位相をみると、逆相の同期をしている試技や非同期の試技もあった。すなわち、競争中の2者に必ずしも同期が生じたり、2者のMTが短縮したりするわけではないことがわかる。そこで、本実験から得られた各試技のMTと相対位相の結果を整理することで、MTと相対位相の関係を詳細に明らかにしようと考えた。

3.4.2. 相対位相とMTの変化パターン

まず同相同期と同相の同期傾向を示した6試技を見ていく。このうち、競争条件の2者のMTがともに自身の個人条件のMTよりも短くなった試技は、4試技（図3-3と表3-1：EF₁, MN₂, OP₁, OP₂）であった。また、競争条件の一方のMTが個人条件のMTよりも短く

なり、もう一方の MT が個人条件の MT よりも長くなった試技は、1 試技（図 3-3 と表 3-1：KL₁）であった。さらに、競争条件の 2 者の MT がともに自身の個人条件の MT よりも長くなった試技は、1 試技（図 3-3 と表 3-1：CD₁）であった。

次に、逆相同期と逆相の同期傾向を示した 3 試技を見ていく。この 3 試技（図 3-3 と表 3-1：AB₁, AB₂, EF₂）は全て、競争条件の 2 者の MT がともに自身の個人条件の MT よりも短くなった。そしてどの領域も統計閾値を超えず非同期であった 7 試技を見ていく。このうち、競争条件の 2 者の MT がともに自身の個人条件の MT よりも短くなった試技は、2 試技（図 3-3 と表 3-1：KL₂, MN₁）であった。また、競争条件の一方の MT が個人条件の MT よりも短くなり、もう一方の MT が個人条件の MT よりも長くなった試技は、3 試技（図 3-3 と表 3-1：GH₁, IJ₁, IJ₂）であった。

本実験では、同相の同期傾向を含む同相の同期が発生した試技で 2 者の MT が短縮したパターン、2 者の MT が延長したパターン、および一方の MT が短縮し、もう一方の MT が延長したパターンの 3 つのパターンの結果が示された。また、逆相の同期傾向を含む逆相の同期が発生した試技では、2 者の MT が短縮したパターンがあった。この競争中の 2 者の同期が、個人条件の MT として測定された可能な限り速く行われた運動をどのように変化させたのかを正確に判断することはできないが、2 者の組み合わせが異なる場合では、その同期頻度は異なることが考えられるため（van Ulzen et al., 2008; Nessler and Gilliland, 2009; Marmelat et al., 2014）、同期が生じた結果が得られたことは重要であるといえる。2 者間の同期は、相互作用によって生じると多くの研究で説明されており（Schmidt et al., 1990; Schmidt and O'Brien, 1997; Tognoli et al., 2007; Schmidt and Richardson, 2008）、この相互作用とは、人間のシステムという文脈においては情報の交換という意味が含まれる（Marsh et al., 2009）。つまり、個人が独立して運動を行っているような個人競技スポーツにおいても同期が生じ

る場合、何らかの情報の交換が2者間で行われている可能性があることが考えられる。この情報に関して Varlet and Richardson (2015) は、競争相手の接地リズムの聴覚情報や競争相手の動作の視覚情報が関係する可能性があるとして述べている。この観点を踏まえると、目標をタップした音による聴覚情報やタップ動作による視覚情報によって同相の同期が発生した可能性があるといえる。しかし、本研究の目的は、実験室環境にて行う Fitts の実験を用いて競争中の2者間の動きに同期が生じるかを検討することであり、その発生原因を特定することではない。したがって、そのような実験設定になっておらず、その検討は今後の課題である。しかしながら、競争中に2者の動きに同期が生じた結果は、競争中であっても少なくとも2者間で動きに関する何らかの情報の伝達が行われたことを示唆しているといえる。また、本研究では先行研究 (Varlet and Richardson, 2015) と異なり、逆相の同期の試技も示されたが、これは本実験に採用した Fitts の実験の制約によるものだと考えられる。まず、本研究の逆相の同期は、2者が同じタイミングで正負が異なる目標の方向に動くことである（例えば図 3-2 において、一方の対象者がグレーの目標に向かって動き、もう一方の対象者は白の目標に向かって動くことである）。したがって、慣性座標系では異なる方向へ向かう動きであっても、上記で述べた動きの情報伝達による同期が生じる可能性がある。すなわち、同相の同期が生じた試技と同様に逆相の同期が各対象者の運動を変化させて MT が変化したと考えられる。ただし、先で述べた同相の同期と同様に、この逆相の同期が発生する原因を特定するには、さらなる検討が必要である。

さらに、本研究では競争した2者が非同期であった試技においても、各対象者の MT が変化した。この結果は、競争による断続的な同期が生じなくとも、対象者の運動に変化が生じて MT の変化に現れたことを意味する。また、同期が生じた試技と同様に MT の変化パターンは3種類あったが、この非同期が対象者の運動をどのように変化させたかを判断す

るためにはさらなる検討が必要であり、その検討は重要である。なぜなら、非同期における MT の変化パターンを詳細に分析することは、Varlet and Richardson（2015）が述べている、競争中の対人運動の同期化が、どのような時に回避または利用されるかを明らかにするための要素となり得るからである。

以上をまとめると、本実験の結果から示された競争中の同期と MT の関係は一様ではないといえる。しかし、独立して運動が行われていると考えられてきた競争中の 2 者に同期が生じることが示されたことは、競争中における 2 者間の関係に一石を投じる可能性があるといえる。すなわち、今後、同期が生じる場合の 2 者間で伝達される動きの情報がどのようなものか、どのようなタイミングで伝達されるかなどを明らかにすることで、なぜ競争中に同期が生じるかを解明できると考えられるからである。

3. 5. 本章の結論

実験室内において厳密に統制されたタップ課題を用いることで、競争中の 2 者の同相または逆相の同期が発生する結果が得られた。同相の同期が発生した試技では、2 者がともに運動時間（MT）を短縮させた試技、2 者がともに MT を延長させた試技、および一方が MT を短縮、もう一方が MT を延長させた試技の 3 つのパターンが示された。また、逆相の同期が発生した試技では、2 者の MT が短縮した試技の 1 つのパターンが示された。さらに、この 3 つのパターンは非同期の試技でもみられた。競争中に 2 者の同期が生じる現象は、競争中であっても 2 者間で何らかの動きの情報伝達が行われている可能性を示唆する。

第4章 総括

本研究は、スポーツの試合や本番には、失敗やミスができない環境と他者が影響する環境である他者と競争する環境という2点の共通する本質的な特徴があると考え、Fittsの実験をこの2つの観点から発展させることで、スポーツ動作などの高度な技能を要する動きにおいて、Fittsの法則が成り立つかを検討することを目的とした。そこで総括である本章では、まず、本研究を構成する2つの研究で得られた結果を振り返り、Fittsの法則が変更される可能性について述べる。そして、それらを総合的に考察することで、スポーツの試合や本番でパフォーマンスが変化する問題を情報処理の観点から考察する。

4.1. 本研究が想定したスポーツ技能

まず、本研究では特定のスポーツ競技およびスポーツ動作を想定していない。本研究の序論では、人間の基本動作によって導き出されたFittsの法則がスポーツの動作に単純に適用されるとは安易ではないかと問題提起をして、Fittsが体系化した人間のパフォーマンス理論 (human performance theory) を概説した。Fitts and Posner (1967) は、人間がどれくらいの速さで正確に運動ができるかを Shannon and Weaver (1949) の情報理論に基づいて研究し、それを人間のパフォーマンス理論と名付けた。この理論では、技能 (skill) の分析を目的としており (Posner, 1966)、人間が技能を要するパフォーマンスを発揮する際の過程を分析し、技能の発達を研究して、技能を構成するさまざまな要素の説明を試みようとしたことが示されていた (Fitts and Posner, 1967)。彼らは、複雑な要素を単純な構成要素にして、人間の

能力を量的に測定することで人間の動きの一般的な特徴を非常に良く抽出したが、それがスポーツ動作にどの程度適応できるかは十分には検討されていないことを明らかにした。そして、スポーツ動作の特徴は Fitts and Posner (1967) の主張に基づき高度な身体的技能を要するものだと考えると、それはスポーツの試合や本番のような特殊な環境に適応して実行されると考えられた。そこで、高度な技能を要するスポーツ動作を検討するためには、スポーツの本質的な特徴である環境や条件を Fitts の実験に取り入れる必要があると問題提起をした。

4. 2. スポーツの環境を取り入れたことによる Fitts の法則

Fitts (1954) は、目標の幅 (Width, 以下 W) と目標間の距離 (Amplitude, 以下 A) を変化させ、2つの目標を交互にタップする実験に基づいて人間の動きをモデル化した。この W と A を変化させることにより困難度指数 (Index of difficulty, 以下 ID) が決定され、定式化されたモデル ($MT = a + b ID$) は、目標間を移動する運動に要する時間 (以下, MT) が ID に依存することを表している。これは、Fitts の法則と呼ばれ、身体運動における最も重要な基本原理であると認められるに至っている (Schmidt, 1988)。また、Fitts の実験結果は「速さと正確さのトレードオフ」としても広く知られている (Fitts, 1964)。そして、人間の基本動作から導かれた Fitts の法則および「速さと正確さのトレードオフ」が、さまざまな分野、環境や条件に適用される中で、スポーツ中の動作にもあてはまるか否かという観点からも研究が行われている。しかしながら、スポーツでは速さと正確さのどちらかを犠牲にするのではなく、どちらも維持することが要求される場面がある。この点に関して、スポーツのような特殊な環境に適応して実行される動作とは高度な技能を要すると考えられていること

に着目し (Fitts and Posner, 1967), Fitts の法則が競技スポーツにおける動作にも単純に適用されると考えるのは安易すぎではないかと問題提起した. そこで, 本研究では, スポーツ動作などの高度な技能を要する動きにおいて, Fitts の法則が成り立つかを失敗やミスができない環境と他者との競争する環境という2つの観点から検討した.

まず観点1では, Fitts の法則を検討してきた複数の先行研究から問題点を2点明らかにして, そこから検討すべき課題を導出した. まず1つ目の問題点として, Fitts の実験においてのタップのエラー率が4%発生することが指摘されていること (MacKenzie, 1992) に着目した. つまり, 人間の身体運動の基本原理と考えられている Fitts の法則は, エラー率の発生が4%許容された環境の下で導き出された法則であると考えられた. したがって, 1回のミスやエラーが勝敗や記録に直接影響するスポーツの試合や本番を想定した実験として行うには, Fitts の実験を失敗やミスができない環境に改良する必要がある, その環境下でも Fitts の法則が成り立つかを検討する必要があると考えられた (課題1). 続いて2つ目の問題点は, 課題1で検討する Fitts の法則が変化する場合の動きの変化の定量化に関する点である. その点を解決するためには, Fitts が示した情報処理とは具体的にどのような処理を行っているかを明らかにする必要があると考えられた. Fitts の実験では, 情報から定量化された ID が高ければ高いほど伝達すべき情報量の増加に対応するため, MT が長くなると考えられている (Fitts, 1954; Mottet et al., 2017). そして, タップの軌道にこの情報処理の特徴が表れると考えられており (Mottet et al., 2017), 先行研究では, 軌道を平均化して導かれた運動学的な特徴と軌道の変動性の変化を考慮した分析から軌道の情報処理が定性的に検討されているが (Mottet and Bootsma, 1999; Huys et al., 2015; 山田, 2015), この軌道の変動 (ばらつき) の変化を定量的に示し, 情報処理の変化を検討する必要があると考えられた (課題2). 以上の課題を踏まえ, 研究1 (第2章) では, Fitts の実験に用いるタップの目標を高さのあ

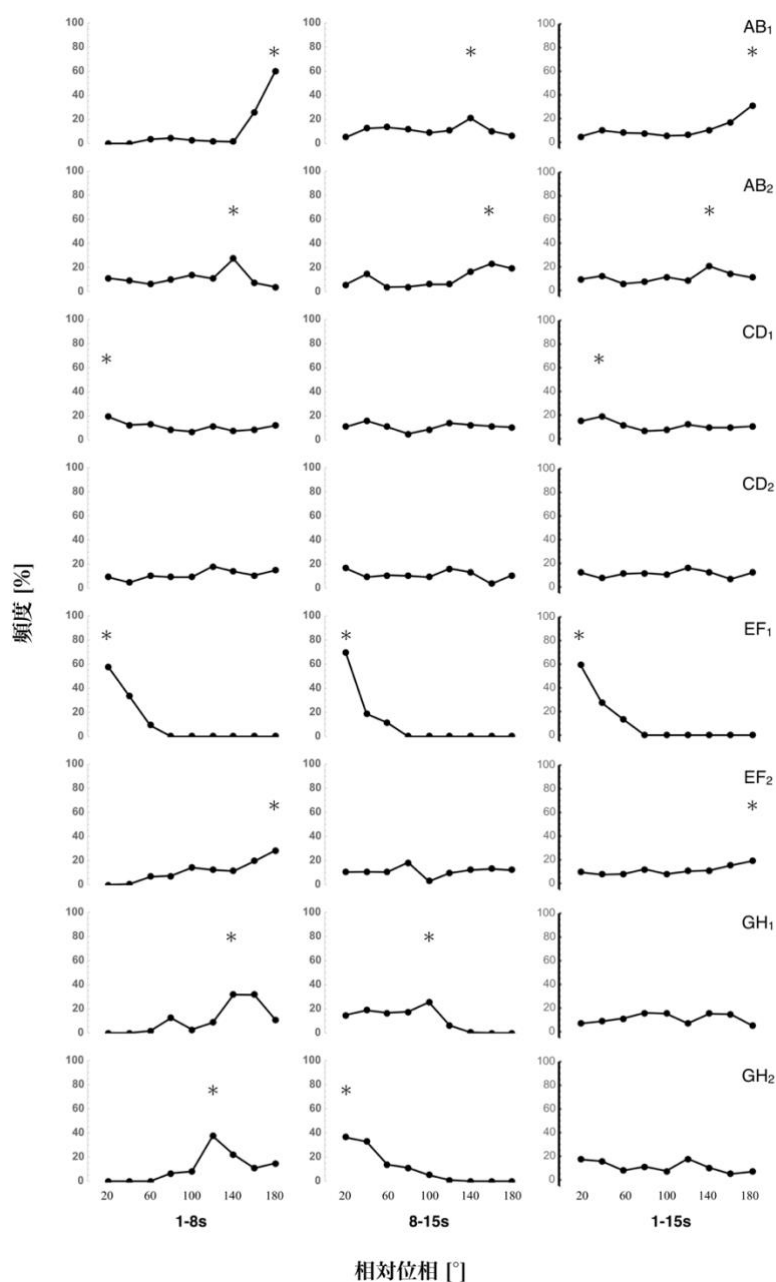
る台に変更する条件 (table 条件) を新たに追加することで失敗ができない環境を再現し、その環境下で Fitts の法則が適応されるかを検討した。さらに、目標に向かう軌道を複数の区間に分割し、主成分分析を用いて軌道のばらつきを定量化することにより、従来の条件 (flat 条件) との情報処理の変化を検討した。実験の結果、table 条件では全ての ID でエラー率が 0%を示したため、「目標を正確に、できるだけ早くタップする」という教示に加え、目標を高さのある台に変更したことで、エラー率が 0%に制御された失敗ができない環境を再現できた。なお、ここでのエラー率 0%というのは、Fitts (1954) の定義にしたがい、目標からの逸脱がなくタップの接地が全て目標幅内おさまっていることを意味する。また、Fitts の研究 (1954) のように、スタイラスを使用した人間の手部運動でエラー率が 0%を示した研究はないため、この目標を変更する方法は、失敗ができない環境を再現するための有効な手段であることが示された。次に、各 ID の MT を条件間で比較することで、エラー率が 0%に制御された場合の MT を検討した。ID6 における table 条件の MT は予想通り、flat 条件の MT より長いことが確認された。しかし、ID3 では table 条件の MT が flat 条件の MT より短いことが確認された。これは予想の反対の結果であり、条件間のエラー率、身体 3 点 (肩, 肘, 手首) とペン先端の z 軸方向の移動距離に有意差がなかったため、それ以外の理由に起因すると考えられた。一般的に、Fitts の実験の動きは ID3 から 4 にかけての間で、運動途中での修正を行わないフィードフォワード制御を行う弾道運動 (ballistic movement) からフィードバック制御を行う目標に向けて調整する運動へ移行することが報告されており (Gan and Hoffmann, 1988; Hoffmann, 2016)、従来条件での弾道運動ではペンの接地時間 (滞留時間) はほぼ一定とされている (Hoffmann, 2017)。本研究では、この滞留時間を MT の中に含んでおり、弾道運動が行われたと考えられる ID3 では目標に台を使用したことよって滞留時間が短くなり MT が短くなった可能性が考えられる。また、この他の影響とし

て、高さのある台を使用した table 条件では flat 条件より目標が視覚的に捉えやすく、それゆえ目標を狙いやすくなったことで、弾道運動である ID3 では MT が短くなった可能性が考えられる。続いて、エラー率が 0%に制御されたことで MT が延長した ID6 に着目すると、ID6 の条件間の MT の違いには、軌道の分析から以下の 2 点に関連していたことが明らかとなった。1 つ目は、ID6 の table 条件は flat 条件より、目標付近での加速度の減少が生じており、先行研究における W が減少し ID が高くなる時の運動制御様式 (Elliott et al., 2001; Khan et al., 2006) と類似していた点である。これは、table 条件では目標を正確に捉えるためのフィードバック制御が強まることにより MT を延長させ、その結果エラーが制御されたことを示唆している (Elliott et al., 2001; Khan et al., 2006)。2 つ目は、ID6 の table 条件は flat 条件より、軌道の間から目標に向けて主成分分析によって定量化した軌道のばらつきの値 (q_{VPCA}) が、より減少していた点である。これは、table 条件では目標に向けて軌道の情報処理が増加する、つまり複数の軌道が目標に向けてより収束するという軌道の特徴として示された。さらに、table 条件の ID6 の MT を flat 条件の回帰直線の式に代入して ID を再評価したところ、ID6.79 となった。これは、式から計算された難易度よりも困難な難易度として試技が行われた可能性があることが示された。つまり、この結果はエラー率 0%の条件の MT を従来の Fitts のモデルでは十分に説明することができないと考えられるため、失敗が許容された環境での動作を対象とした Fitts のモデルに対して、失敗ができない環境での動作を対象とした新たなモデルが提案できる可能性があることが示された。

次に観点 2 では、Fitts の実験で考慮されていない他者が影響する環境に着目して、他者からの影響により運動が変化する問題に関わる、他者との動きの同期現象の先行研究から検討すべき課題を導出した。これまでの多くの研究では、協調や協力の文脈で他者との対人同期が生じて運動を変化させることが報告されてきたが (e.g., Ikegami and Ganesh, 2014;

Okano et al., 2017), 競争の文脈でも対人同期が生じ得る可能性が報告された (Varlet & Richardson, 2015). しかし, その結果を否認した研究 (Blikslager & de Poel, 2017) もあり, 競争における対人同期はそもそも生じるのかが不明である. したがって, まずこの競争における対人同期が生じるかを厳密に統制された実験室環境で検証し, そしてこの同期がパフォーマンスの変化とどのように関連するかを検討する必要があると考えられた (課題 3). この課題を踏まえ, 研究 2 (第 3 章) では, Fitts の実験を 1 人で行う従来の条件 (個人条件), そして 2 者で競争する条件 (競争条件) を行い, 対象者ごとにパフォーマンス指標である MT が競争によってどのように変化するかを検討した. さらに, 競争条件ではペン先端の座標から相対位相を算出することで競争相手との同期が生じるかを検証し, その同期が MT とどのように関連するかを検討した. 実験の結果, MT の変化は, 競争条件を行った 2 名の MT が個人条件よりともに短縮した試技, 2 名の MT が個人条件よりともに延長した試技, 一方の MT が個人条件より短縮し, もう一方の MT が個人条件より延長した試技の 3 パターンが明らかとなった. さらに同期の分析からは, 2 者が同方向に同じタイミングで動く同位相の同期をした試技, 2 者が逆方向に同じタイミングで動く逆位相の同期をした試技, 2 者が方向もタイミングも異なる動きである非同期をした試技の 3 つのパターンが確認された. この結果は, Varlet & Richardson (2015) の先行研究が示唆した競争中の 2 者が同相の同期をする可能性を, 厳密に統制された実験環境ではじめて示したといえ, さらには本実験に採用した Fitts の実験の特性によって逆相の同期の試技も示された. この対人同期が生じた結果は, 競争中の 2 者間に動きに関する何らかの動きに関する情報伝達が行われたことを示唆しており, 独立して運動が行われていると考えられてきた競争中の 2 者間の関係に一石を投じる可能性があると考えられた. しかし, 全体の試技時間のうち同期が生じた時間の割合を算出し同期を定義した研究 2 の結果には, スタートのタイミングを同時にした

ことで、同期が発生する局面が増加する可能性の関与が考えられた。そこで、分析対象時間を15秒のうちの最初の1秒(0-1秒)を除く前半(1-8秒)と後半(8-15秒)に分けて、相対位相を同様に9つの領域に分割し、同期の発生を検討した。図3-3に示した全体の試技時間の結果とともに、図4-1に結果を示す。なお、研究2で使用したVarlet & Richardson (2015)の分析方法にしたがい統計閾値を算出したところ、19.71%となった。同様に、各試技の最も割合が高い領域が統計閾値を超えている場合は、アスタリスク(*)を図中に示した。



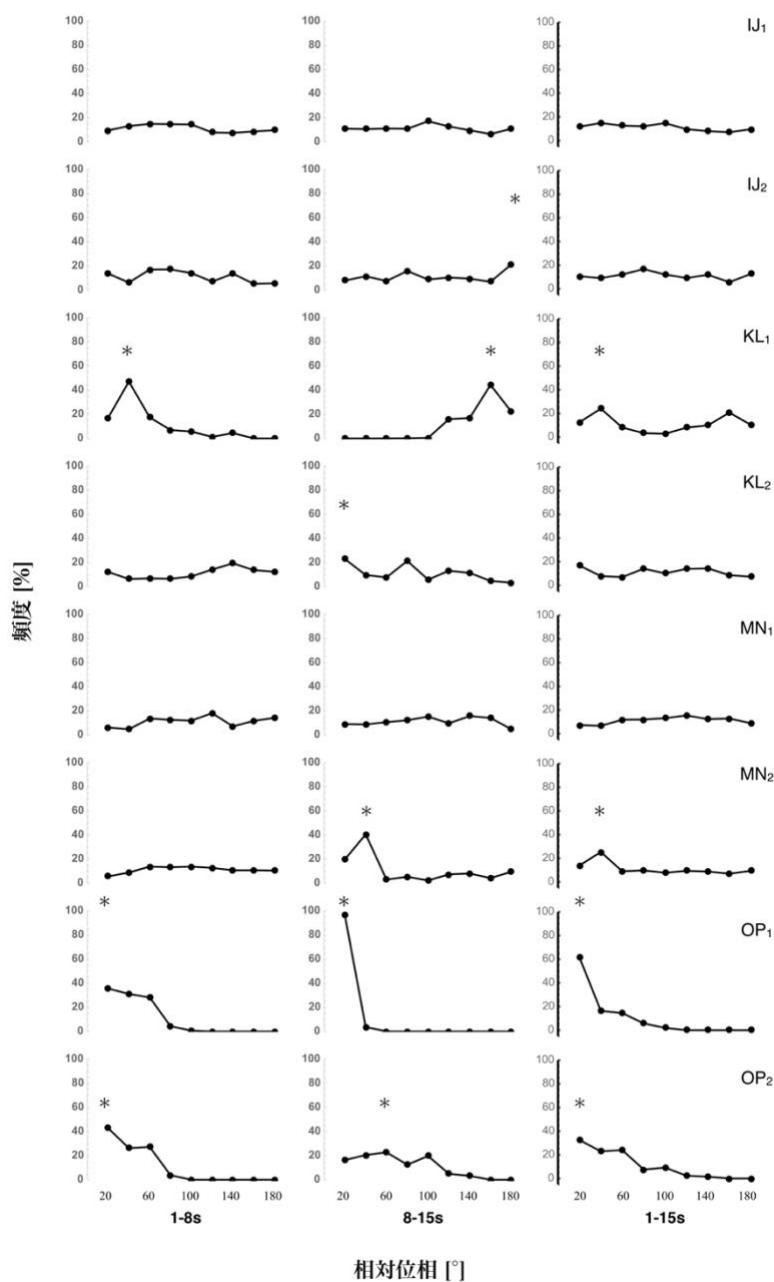


図 4-1 研究 2 の競争条件における各試技の相対位相. 試技の前半 (1-8s) および後半 (8-15s) そして, 図 3-3 の全体の試技時間 (1-15s) の相対位相を示した. なお, 前半・後半の統計閾値は 19.71%であり, この数値を超えた領域に*を示した. アルファベットは対象者を示し, 下付き数字はそれぞれ競争条件の何試技目かを示している.

この分析では、スタートから1秒までを分析対象から除外しているため、スタートを同時としたことによる同期が発生する割合を減らすことができると考えられる。まず、全体の時間から同期を検討した際に、同相同期もしくは同相同期傾向を示した6試技(CD₁, EF₁, KL₁, MN₂, OP₁, OP₂)を見ると、前半もしくは後半のどちらか一方は必ず、同相同期もしくは同相同期傾向を示す領域の割合が閾値を超えていることが分かる。また、逆相同期もしくは逆相同期傾向を示した3試技(AB₁, AB₂, EF₂)も同様に、前半もしくは後半のどちらか一方は必ず逆相もしくは逆相同期傾向を示す領域の割合が閾値を超えていることが分かる。この結果から、全体の試技時間の割合から同相同期もしくは逆相同期の発生として特徴付けられた試技を、より強く特徴付けることができる可能性が示されたといえる。なぜなら、同期が発生する割合が増えると考えられるスタートから1秒までを分析対象から除外しても試技の前半と後半のどちらでも同期が生じたことから、同期の発生は偶然ではなく、競争中に同期が発生した研究2の結果を支持したからである。また、全体の時間の分析ではどの領域にも有意差がなかった試技においても、前半もしくは後半のどちらか一方は必ず有意差があった試技(GH₁, IJ₂, KL₂)や、前半と後半で反対の領域(一方は0°でもう一方は180°の領域)に有意差があった試技(GH₂)もあった。これは、対象時間を分割した方法による利点であると考えられ、より詳細に競争で同期が発生する原因を特定するための重要な方法となる可能性があるといえる。

また、研究2で特に重要な結果といえるのは、両条件はともに物理的な難易度は同じID6を行ったにも関わらず、競争条件で測定されたMTは、全ての対象者が同じ変化をしたわけではないが、競争条件では個人条件より短縮もしくは延長したことである。この結果は、Fittsの実験結果が、IDが同様の場合のMTは一定の値を示すモデルであると考えられていることを踏まえると(Danion et al., 1999)、非常に興味深いといえる。なお、先行研究では、

異なる実験条件を比較する場合、MT を $IP \left(IP = \frac{ID}{MT} \right)$ という変数に置き換えているが (Fitts, 1954; Soukoreff and MacKenzie, 2004), 同様の A と W から決定された ID で得られる場合の値の意味は同じであるため、MT の値で条件間の変化を検討することは問題ないといえる。さらに、研究2のMTは研究1と同様に目標に台を用いたことで、エラー率が一律に0%に制御された環境で測定された値であるため、ここでは精度を意図的に下げてMTが短縮する可能性を議論する必要性がなく、競争による効果を議論できる。すなわち、競争条件のMTが個人条件のMTより変化した結果は、個人が1人で行う環境での動作を対象とした従来のFittsのモデルに対して、他者が影響する競争環境での動作を対象とした新たなモデルが提案できる可能性がある。

4.3. 情報処理の観点からアプローチするスポーツの試合や本番で動きが変化するメカニズム

本項では、2つの研究から得られた結果を、IDとMTの関係から検討されているFittsの法則を表すモデルに適用することで、スポーツの試合や本番で動きが変化するメカニズムを情報処理の観点から検討する。

まず、第2章(研究1)では、エラー率が0%に制御された失敗ができない環境におけるFittsの実験から、IDとMTの関係から示されるFittsの法則を表すモデルが変更される可能性を示し、エラーが制御される場合の動きの変化を軌道の運動制御と情報処理の観点から示した。これは、エラーが制御されたtable条件において、本実験の最も課題の難易度が高い条件(ID6)でMTが延長したこと、そしてそれはID6.79まで増加させた時間であることを示した。つまり、このMTの延長は、台を用いてエラー率が0%に制御されたことで、目

標の幅と距離から計算された物理的な難易度である ID は同様であっても、情報处理的難易度が増加することが明らかになったといえる。また、この情報处理的難易度の増加は、スポーツ心理学の分野で研究されている試合や本番におけるパフォーマンスが変化する問題にそのまま適応できる可能性がある。

スポーツ心理学の分野において、試合や本番でパフォーマンスが変化する問題は、心理的プレッシャーによってパフォーマンスが低下する現象である「あがり (choking under pressure)」(Baumeister, 1984) の研究として頻繁に扱われている。この心理的プレッシャーは、心理、生理そして運動の3側面に影響が出ると考えられており(村山ほか, 2009)、それらが相互に作用した結果として最終的な記録や結果であるパフォーマンスに影響を及ぼすと考えられている(田中, 2008)。これらの研究は、一般的に「あがり」を誘発する要因と考えられているプレッシャーが生じる場面をさまざまな方法から操作・再現し、そこでの心理面・生理面の測定結果をプレッシャーが生じたかどうかの指標として、その結果と運動面の測定結果ならびにパフォーマンスの結果が結び付けられている。例えば、このプレッシャーが生じる場面は、時間切迫によって運動時間を制限する方法(Beilock et al., 2004; 村山ほか, 2007)、観衆をつけた模擬的な試合環境を設定する方法(田中・関矢, 2006)、そして成功や失敗に対して報酬や罰を与える方法(田中・関矢, 2006)といったプレッシャーに関連すると考えられている心理面における認知系や生理面における情動系(Hatfield, 2005; 田中, 2008)を操作する方法が頻繁に用いられて再現されている。そして、上記の方法からプレッシャーが生じた場合と生じなかった場合の運動面の変化の比較が行われ、運動変位の増加や減少(Higuchi et al., 2002; 田中・関矢, 2006)や運動時間および速度の減少(田中・関矢, 2006)といった動きの特徴を捉えるパラメータの変化や、主動筋と拮抗筋の共収縮の増加による関節の硬さの増加(Van Loon et al., 2001; 松本, 2005; 田中ら, 2016)から動きの変化が

特徴づけられることが報告されている。しかし、Williams et al. (2002) が、実験室ではスポーツの試合場面のような高強度の心理的ストレスの喚起が困難であると指摘していることから、情動系と認知系の実験的な統制が難しいことが考えられる。さらに、運動面の変化は、時々刻々と変化する動きの変化が示されておらず、動きを制御する運動制御の観点が欠けているため、身体の動きの変化の検討は十分ではないといえる。

本研究では、上述した先行研究のように認知系や情動系の変化を示す指標を変数として測定してはいないが、タップの目標に台を使用したことで、距離と幅から計算される物理的な難易度が同様でも、目標から逸脱したら失敗であり高い精度が要求される状態を対象者自身が自ら生じさせた可能性がある。なぜなら、物理的には同様の難易度の課題を行ったにも関わらず、ID6のtable条件ではMTが延長し、その延長は情報を処理するための時間から推測される情報处理的難易度の変化（ID6からID6.79への増加）として定量的に示されたためである。山田（2015）は、認知系と情動系の関係を実験的に統制し評価することが難しいことを踏まえて、それらが相互に関与した情報处理的難易度の変化を検討することを提案しており、本研究の結果は、この山田の指摘を定量化した結果であるといえる。また、この時の動きの変化は、軌道の分析によってフィードバック制御の増加と、軌道の収束の特徴から考えられた情報処理の増加として示された。そしてこの動きの特徴は、エラー率を0%に制御しなければならないという難易度の変更によってもたらされたことが考えられる。したがって、研究1の結果から示されるスポーツの試合や本番で動きが変化する問題の背後にあるメカニズムの1つは、物理的な難易度が同様であっても、情報处理的難易度が精度を上げなければならないと変化することで、その結果動きも変化するということである。図4-2はその概念図であり、ID6のエラー率が0%に制御されるtable条件でMTが延長しており、その延長は、ID6から難易度が増加したことによる情報处理的難易度の変化によって生

じることを示している。

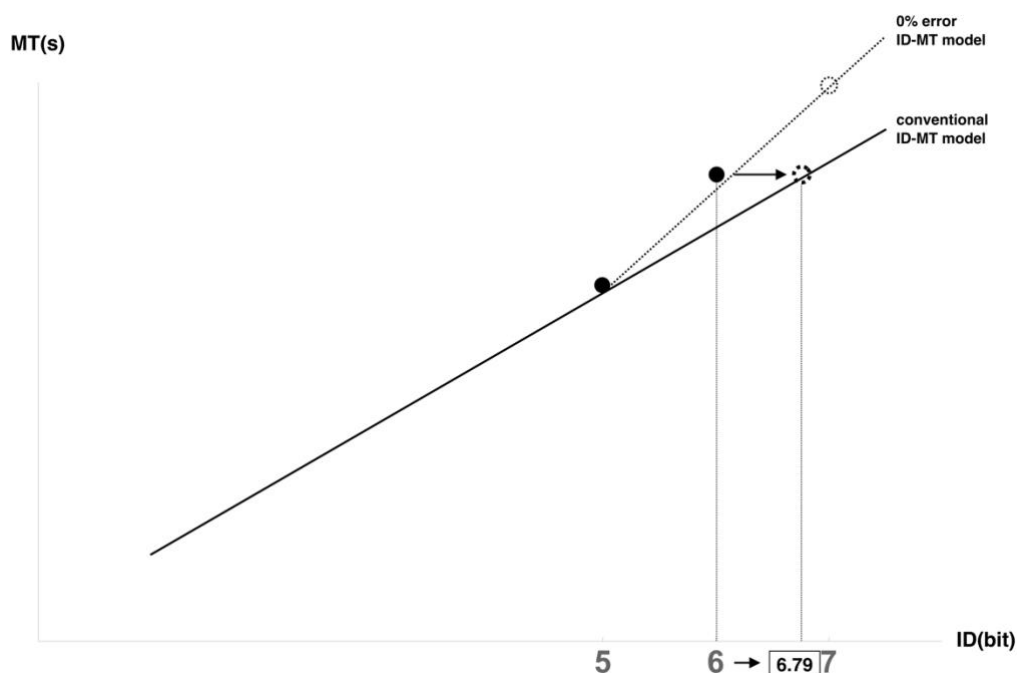


図 4-2 スポーツの試合や本番で動きが変化するメカニズムを情報处理的難易度の観点から検討した概念図。失敗ができない環境における Fitts の法則モデル (ID-MT 回帰直線) の変化。ID6 より難易度の高い ID7 の MT は、従来の Fitts のモデルよりさらに大きく逸脱することが予想される。

次に、Fitts の実験を他者との競争環境で行った研究 2 において特に重要な結果といえるのは、前項で記載したように個人条件と競争条件はともに物理的な難易度は同じ ID6 を行ったにも関わらず、競争条件では、MT が変化したことである。この結果からは、他者との競争する環境で試技を行うことで、個人が 1 人で行う環境での動作を対象とした従来の Fitts のモデルに対して、競争環境での動作を対象とした新たなモデルが提案できる可能性があり、他のアスリートと競うスポーツの試合や本番で動きのパフォーマンスが変化する現象そのものを捉えることができている。この MT の変化を研究 1 の結果と同様に情報処理の

観点から検討すると、他者との競争環境では、情報を処理するための時間から推測される情報処理的難易度が変更されることで、その結果動きが変化することが考えられる。さらに、同期が生じた試技に関していえば、競争中の情報処理的難易度が相互に伝達されたことで、動きが変化した可能性が考えられる。図 4-3 はその概念図であり、同様の ID6 を行った個人条件の MT が、競争によって短縮もしくは延長する変化が示されており、情報処理的難易度が他者との競争により変化する可能性を示している。



図 4-3 他者と競争する環境における MT の変化から情報処理的難易度を検討した概念図。各対象者の MT は、競争条件で個人条件と比較して短縮もしくは延長した。他者との競争環境では、同様の難易度の課題を行っても、情報処理的難易度が変化する可能性がある。

4.4. 本研究の限界と今後の課題

観点1では、主に2つの限界が挙げられる。1つ目は、ID6より上の課題の難易度で実験が行われていないことである。図4-2で示した失敗ができないエラー率が0%に制御される環境におけるモデルは、ID6までの結果を踏まえた上での仮説であり、今後は、このモデルが従来のFittsのモデルからどの程度変化するかを形式化するために、ID6より上の難易度を実施して、モデルの変化を検討する必要がある。続いて2つ目は、失敗ができないエラー率が0%に制御される場合の軌道の特徴である軌道の収束（図2-7）に関することである。この軌道の収束は、主成分分析によって得られた値（ q_{VPCA} ）が目標に向けて減少したことを概念的に示したものであり、この減少を不確実性が低減された情報処理の結果によると考察しているが、どの程度の情報が処理されたかを定量的に示すことができていないため、今後はこの情報処理の結果を定量化する必要がある。これを達成するための解決策として、目標に向かう軌道に任意の区間を設定し、その区間に該当する座標を「乱雑性」や「不規則性」の指標であり確率から定義されるエントロピー（Shannon & Weaver, 1949）の値として示すことが挙げられる。そうすれば、直接的に座標を情報の量として示すことができ、その変化量を情報処理の結果として示すことが可能になる。

観点2でも、主に2つの限界が挙げられる。1つ目は、同期が生じた要因の特定に関する点である。研究2のp.53で述べたとおり、目標をタップした音による聴覚情報やタップ動作による視覚情報によって同期が生じた可能性があるが、本研究ではその情報の特定には至っていない。これには、Varlet & Richardson (2015)が実際の100mのレースを分析して示した競争環境でも同期が生じる可能性を、まずは実験室環境にて行うFittsの実験を用いて競争中の2者間の動きに同期が生じるかを検討することを目的として、その発生要因を特定することが目的としなかったという理由がある。今後は、同期を生じさせる情報の特定を

行う必要があるが、競争ではモチベーションや緊張感の増加をもたらすという報告もあるため (Church, 1962; 松本・佐久間, 2013), 同じ競争でも同期が発生しやすい条件の特定も必要であるといえる。2つ目は、同期の検討方法に関連する点が挙げられる。研究2の同期が示された試技は、全体の半分程度の試技であり、非同期を示した試技でもパフォーマンス指標である MT の変化が見られた。また、同期または同期傾向を示した試技の中でも、MT の変化パターンは一様ではなく3種類示された。今後は、ペアの組み合わせを考慮し、2者の MT がどのように変化して同期が発生するかをさらに検討する必要がある。また、本研究での同期の定義は全体の試技時間で、同期している時間の割合が閾値を超えた場合としているため、非同期と判断された試技でも閾値を超えていないだけで同期をしている瞬間がある。総括では、試技時間の前半と後半に分けて追加の分析を行い、どちらの時間にも同期があること、そして全体の試技時間では非同期の試技でも同期の発生があることを示したが、瞬間的な同期の検出には至っていない。この点は、三浦ほか (2018) によっても同様の指摘がなされており、相対位相のダイナミクスそのものを評価していく方法が提案されている。よって、今後は、試技全体からの比較のみではなく同期が発生している瞬間を抽出し、MT の変化に関する情報处理的難易度の変化をより瞬間的に捉えることで、競争中の動きの変化を検討する必要がある。

最後に本研究結果をさまざまなスポーツ競技の動作に適応させる上での課題を述べる。本研究の総括で述べた情報处理的難易度の変化は、Fitts (1954) が定義した ID をもとにしている。この ID は、前述した通り手部による反復運動を、正確さを維持しながら可能な限り早い動作から検討されたものである。したがって、全身運動を要するスポーツの動作が一体どのくらいの ID であるのか、そして ID の下限や上限は動作に由来するため慎重に議論する必要がある。実験の扱いやすさからも本研究のような手部の反復運動から ID と MT の

関係を調べた研究が多く、手部に関して言えば、ID7 もしくは 8 が上限であることがわかっている (Soukoreff and MacKenzie, 2004)。これは、言い換えれば ID 7 もしくは 8 までの情報量であれば、MT が同様の傾きで増加していくことを示しているのである。また、連続的ではなく離散的な単発動作でも、ID と MT の関係は Fitts の研究結果と同様に適応されることがわかっている (Soukoreff and MacKenzie, 2004)。また、脚部の運動からも検討されており (Chan & Hoffmann, 2015)、ID の増加とともに MT が増加する結果を踏まえると、スポーツ動作のような全身運動でも要求される情報量が多いと運動時間が長くなることが考えられる。ただし、本研究のような手部の動作と比較して、全身運動のような複雑な動作になると、複数の次元で同時に情報を生成でき、処理できる情報量に変化する可能性が指摘されており (Fitts, 1954)、近年では Fitts が扱った照準運動から全身運動 (目標照準動作ではなく、複数の手足が連続的に寄与する運動) の単位時間あたりの情報量を測定する方法も提案されている (Oulasvirta et al., 2013)。このような方法を使用すれば、全身運動でも同じ動作が通常の練習時と比較して、情報处理的難易度に変化すると考えられるスポーツの試合や本番でどのような変化が生じるかを情報量という客観的な指標から検討できる可能性があるといえる。

第5章 結論

本研究は、Fittsの実験を、スポーツの本質ともいえる、失敗やミスができない環境と他者と競争する環境という観点から検討するため、1) Fittsの実験を失敗ができない環境に改良し、Fittsの法則と軌道の情報処理的特徴を検討した研究(第2章)、2) Fittsの実験を他者が影響する環境である他者と競争する環境に改良し、対人同期の発生と対人同期と運動時間の変化の関係を検討した研究(第3章)を行った。その結果、以下の結論が導かれた。

失敗ができない環境および他者と競争する環境におけるFittsの実験では、目標の幅と距離から決定される物理的難易度である困難度指数(ID)が高い場合の運動時間(MT)は、Fittsの法則を表すモデル(ID-MT回帰直線)から逸脱する。この逸脱は、IDのみでは決まらないMTを生じさせる情報処理的難易度を設定することで説明できると考えられる。

論文の構成

本論文は、以下の査読付き論文をもとに構成された。

Hiroki Murakami, and Norimasa Yamada. (2021). Fitts' law when errors are not allowed: Quantification of reciprocating trajectories and estimating information processing. *Acta Psychologica*, 220 (103418). doi: 10.1016/j.actpsy.2021.103418 (第2章を構成)

村上宏樹・山田憲政 (2022). 競争で2者間の同期は生じるか—高速タッピング課題の競争による検討—。スポーツ心理学研究, 49(1): 21-31. doi: 10.4146/jjpsopsy.2021-2104 (第3章を構成)

謝 辞

本学位論文は中京大学スポーツ科学研究科山田憲政教授のご指導のもとで作成されました。山田教授には、スポーツ科学部在籍時のスポーツ心理学ゼミナールを受講し卒業研究に取り組んだ時から考えると約7年もの間、ご指導していただきました。特に、修士課程に在籍し本格的に研究に取り組んでからは、たくさんのご教授を賜りました。その中でも、自分の得意な部分を探究し徹底的に極めること、という教えは常に思い出され、挫けそうな時に自分を奮い立たせてくれる言葉です。また、現在にいたるまでご指導いただいている数式処理システム **Mathematica** を使用しての実験データの分析を通しては、大変多くのことを学ばせていただきました。特に、高サンプリングレートで得た人間の動きを、時間をかけて丁寧に解析する根気や、筋道を立ててプログラムを組む論理的思考力など研究に必要な能力を培うことができたこと強く感じます。初めてこのソフトウェアを教えていただいた時の、人間の動きを見る視点が広がりワクワクしたのを今でも覚えています。本論文を構成する2つの論文もこのソフトウェアを使用しての解析無くしては完成できませんでした。山田先生に心より感謝申し上げます。

中京大学スポーツ科学研究科荒牧勇教授、大家利之准教授には、学位審査委員会の副査を引き受けて頂きました。先生方には、追加の考察をすべき部分と本論文がスポーツ科学分野に対して持つ意義についてのご指摘をしていただきました。これらのご指摘は、本論文をまとめるにあたり大変重要な観点であり、今後の研究について考える有意義な時間を与えていただきました。お二人の先生に感謝申し上げます。

修士課程在籍時の山梨大学大学院総合研究部木島章文教授、北海道大学大学院教育学研

究院阿部匡樹准教授のお二人の集中講義を受講したことは、研究に取り組み始めた私にとって大変貴重な時間となりました。特に、メインと異なるプログラミング言語を通してのデータ分析に取り組んだ経験は、複数のプログラミング言語の共通の概念を捉えてデータ分析を進めるヒントとなり、自身の研究を進めることができました。お二人の先生に感謝申し上げます。

そして、私にとって非常に大きな存在であり心の拠り所であったのは、スポーツ認知・行動科学系山田憲政研究室のメンバーでした。特に、学部と修士課程の同期である若月翼氏（現スポーツ認知行動科学系助手）と博士課程までの同期である中島健登氏（現博士課程在籍・スポーツ科学部実技嘱託講師）の二人とは、互いに刺激し合いそれぞれの研究についての議論を深めながら実験の実施や論文の作成に取り組みました。同研究室後輩の川部宰也氏（現博士課程在籍・スポーツ科学部任期制講師）の研究のデータ分析とともに議論し学びを深めた経験は、私の第3章を構成する研究のデータ分析と結果の解釈につながりました。また、ここに書ききれなかった全ての方々にも、この場を借りて感謝申し上げます。ありがとうございました。

最後に、長きにわたり学生生活を送る私を支えあたたかく応援してくれた両親と兄弟、そしてどんなときも相談に乗ってくれ、データ分析や論文の執筆がうまくいかず暗い気分になった時に心の支えになってくれている妻早紀に心から感謝いたします。

2022年9月

村上 宏樹

文 献

Accot, J., and Zhai, S. (1997). Beyond Fitts' law: Models for trajectory-based HCI tasks. In *Proceedings of the ACM SIGCHI conference on human factors in computing systems*, 295–302. doi: 10.1145/258549.258760

Baumeister, R. F. (1984). Choking under pressure: self-consciousness and paradoxical effects of incentives on skillful performance. *Journal of personality and social psychology*, 46(3), 610–620. doi: 10.1037//0022-3514.46.3.610

Beilock, S. L., Bertenthal, B. I., Hoerger, M., & Carr, T. H. (2008). When does haste make waste? Speed-accuracy tradeoff, skill level, and the tools of the trade. *Journal of Experimental Psychology*, 14(4), 340–352. doi: 10.1037/a0012859

Beilock, S. L., Bertenthal, B. I., McCoy, A. M., and Carr, T. H. (2004). Haste does not always make waste: Expertise, direction of attention, and speed versus accuracy in performing sensorimotor skills. *Psychonomic bulletin & review*, 11(2), 373–379. doi: 10.3758/BF03196585

Bertuccio, M., Bhanpuri, N. H., and Sanger, T. D. (2015). Perceived cost and intrinsic motor variability modulate the speed-accuracy trade-off. *PLoS One*, 10(10): e0139988. doi: 10.1371/journal.pone.0139988

Bertuccio, M., Cesari, P., and Latash, M. L. (2013). Fitts' law in early postural adjustments. *Neuroscience*, 231, 61–69. doi: 10.1016/j.neuroscience.2012.11.043

Blikslager, F., and de Poel, H. J. (2017). Sync or separate? No compelling evidence for unintentional interpersonal coordination between Usain Bolt and Tyson Gay on the 100-meter world record race. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(7), 1466-1471. doi: 10.1037/xhp0000315

Borish, C. N., Bertucco, M., Berger, D. J., d'Avella, A., and Sanger, T. D. (2021). Can spatial filtering separate voluntary and involuntary components in children with dyskinetic cerebral palsy?. *PLoS One*, 16(4): e0250001. doi: 10.1371/journal.pone.0250001

Buchanan, J. J., Park, J. H., and Shea, C. H. (2006). Target width scaling in a repetitive aiming task: Switching between cyclical and discrete units of action. *Experimental Brain Research*, 175(4), 710–725. doi: 10.1007/s00221-006-0589-1

Card, S. K., English, W. K., and Burr, B. J. (1978). Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT. *Ergonomics*, 21(8), 601–613. doi: 10.1080/00140137808931762

Chan, A. H., & Hoffmann, E. R. (2015). Effect of movement direction and sitting/standing on leg movement time. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 47, 30-36. doi: 10.1016/j.ergon.2015.02.003

Church, R. M. (1962). The effects of competition on reaction time and palmar skin conductance. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 65, 32–40. doi: 10.1037/h0041901

Crossman, E. R. F. W., and Goodeve, P. J. (1983). Feedback control of hand movement and Fitts' law. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35(2), 251–278. doi: 10.1080/14640748308402133

Danion, F., Duarte, M., and Grosjean, M. (1999). Fitts' law in human standing: the effect of scaling. *Neuroscience Letters*, 277(2), 131–133.

Dunagan, J., and Schofield, D. (2016). Creating Fitts' law predictions for a touchscreen tablet. *International Journal of Information and Communication Technology Research*, 6(11).

Elliott, D., Helsen, W. F., and Chua, R. (2001). A century later: Woodworth's (1899) two-component model of goal-directed aiming. *Psychological Bulletin*, 127(3), 342–357. doi: 10.1037//0033-2909.127.3.342

Epps, B. W. (1986). Comparison of six cursor control devices based on Fitts' law models. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 30(4), 327–331. doi: 10.1177/154193128603000403

Fernandez, L., and Bootsma, R. J. (2008). Non-linear gaining in precision aiming: Making Fitts' task a bit easier. *Acta Psychologica*, 129(2), 217–227. doi: 10.1016/j.actpsy.2008.06.001

Fine, J. M., and Amazeen, E. L. (2011). Interpersonal Fitts' law: When two perform as one. *Experimental Brain Research*, 211, 459–469. doi:10.1007/s00221-011-2707-y

Fitts, P. M. (1947). *Psychological Research on Equipment Design*. Army Air Forces Psychological Program Research Reports. Report 19. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381–391. doi: 10.1037/h0055392

Fitts, P. M. (1964). Perceptual-motor skill learning. In *Categories of human learning*. Academic Press. pp. 243–285.

Fitts, P. M., and Peterson, J. R. (1964). Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, 67(2), 103–112. doi: 10.1037/h0045689

Fitts, P. M., and Posner, M. I. (1967). *Basic concepts in psychology series: human performance*. Belmont, California: Brooks/Cole Company.

Gan, K. C., & Hoffmann, E. R. (1988). Geometrical conditions for ballistic and visually controlled movements. *Ergonomics*, *31*(5), 829–839. doi: 10.1080/00140138808966724

Ganesh, G., Takagi, A., Osu, R., Yoshioka, T., Kawato, M., and Burdet, E. (2014). Two is better than one: Physical interactions improve motor performance in humans. *Scientific reports*, *4*(1), 1–7. doi: 10.1038/srep03824

Gorniak, S. L. (2019). The relationship between task difficulty and motor performance complexity. *Attention Perception, & Psychophysics*, *81*, 12–19. doi: 10.3758/s13414-018-1634-4

Haken, H., Kelso, J. A. S., and Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, *51*, 347–356. doi: 10.1007/BF00336922

Hatfield, B. D. (2005). Cognitive neuroscience aspects of sport psychology: Brain mechanism underlying performance. In *International Society of Sport Psychology 11th World Congress of Sport Psychology*.

Higuchi, T., Imanaka, K., and Hatayama, T. (2002). Freezing degrees of freedom under stress: Kinematic evidence of constrained movement strategies. *Human movement science*, *21*(5-6), 831–846. doi: 10.1016/S0167-9457(02)00174-4

平田正吾・奥住秀之・北島善夫・細渕富夫・国分充 (2013). 知的障害児・者の運動研究小史：「Oseretsky test」と「速さと正確性のトレードオフ」を中心に東京学芸大学紀要総合教育科学系, *64*(2), 165-174.

Hoffmann, E. R. (2016). Critical index of difficulty for different body motions: A review. *Journal of motor behavior*, *48*(3), 277-288. doi: 10.1080/00222895.2015.1090389

Hoffmann, E. R. (2017). Movement integration and the one-target advantage. *Journal of Motor Behavior*, 49(5), 533-549. doi: 10.1080/00222895.2016.1241753

Huys, R., Fernandez, L., Bootsma, R. J., and Jirsa, V. K. (2009). Fitts' law is not continuous in reciprocal aiming. In *Proceeding of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1685), 1179–1184. doi: 10.1098/rspb.2009.1954

Huys, R., Knol, H., Sleimen-Malkoun, R., Temprado, J. J., and Jirsa, V. K. (2015). Does changing Fitts' index of difficulty evoke transitions in movement dynamics?. *EPJ Nonlinear Biomedical Physics*, 3: 8. doi: 10.1140/epjnbp/s40366-015-0022-4

Huys, R., Studenka, B. E., Rheaume, N. L., Zelaznik, H. N., and Jirsa, V. K. (2008). Distinct timing mechanisms produce discrete and continuous movements. *PLoS Computational Biology*, 4(4): e1000061. doi: 10.1371/journal.pcbi.1000061

Ikegami, T., and Ganesh, G. (2014). Watching novice action degrades expert motor performance: causation between action production and outcome prediction of observed actions by humans. *Scientific reports*, 4(1), 1–7. doi: 10.1038/srep06989

Jagacinski, R. J., and Monk, D. L. (1985). Fitts' law in two dimensions with hand and head movements. *Journal of motor behavior*, 17(1), 77–95. doi: 10.1080/00222895.1985.10735338

Jordet, G., and Hartman, E. (2008). Avoidance motivation and choking under pressure in soccer penalty shootouts. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 30, 450–457. doi: 10.1123/jsep.30.4.450

金本めぐみ・横沢民男・金本益男 (2002). 「あがり」の原因帰属に関する研究. 上智大学体育, 35, 33–40.

Kantowitz, B. H., and Elvers, G. C. (1988). Fitts' law with an isometric controller: Effects of order of control and control-display gain. *Journal of Motor Behavior*, 20(1), 53–66. doi: 10.1080/00222895.1988.10735432

荻山靖・小山宏之 (2011). 国内一流男子走幅跳選手における助走パターンの事例的分析. 陸上競技研究紀要, 7, 33–36.

Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70(6), 387–403. doi: 10.1037/h0026739

Khan, M. A., Franks, I. M., Elliott, D., Lawrence, G. P., Chua, R., Bernier, P. M., ... and Weeks, D. J. (2006). Inferring online and offline processing of visual feedback in target-directed movements from kinematic data. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30(8), 1106–1121. doi: 10.1016/j.neubiorev.2006.05.002

Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Okumura, M., Suzuki, H., Schmidt, R. C., and Yamamoto, Y. (2012). Switching dynamics in an interpersonal competition brings about 'Deadlock' synchronization of players. *PLoS One*, 7(11): e47911. doi: 10.1371/journal.pone.0047911

Kim, N. H., Winingar, M., and Craelius, W. (2010). Training grip control with a Fitts' paradigm: A pilot study in chronic stroke. *Journal of Hand Therapy*, 23(1), 63–72. doi: 10.1016/j.jht.2009.10.004

Kuang, C., and Fabricant, R. (2019). *User Friendly: How the hidden rules of design are changing the way we live, Work, and Play*. MCD.

MacKenzie, C. L., Marteniuk, R. G., Dugas, C., Liske, D., and Eickmeier, B. (1987). Three-dimensional movement trajectories in Fitts' task: Implications for control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 39(4), 629–647. doi: 10.1080/14640748708401806

MacKenzie, I. S. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7(1), 91–139. doi: 10.1207/s15327051hci0701_3

Marmelat, V., Delignières, D., Torre, K., Beek, P. J., and Daffertshofer, A. (2014). 'Human paced' walking: Followers adopt stride time dynamics of leaders. *Neuroscience Letters*, 564, 67–71. doi: 10.1016/j.neulet.2014.02.010

Marsh, K. L., Richardson, M. J., and Schmidt, R. C. (2009). Social connection through joint action and interpersonal coordination. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 320–339. doi: 10.1111/j.1756-8765.2009.01022.x

Martens, R., Vealey, R. S., and Burton, D. (1990). *Competitive anxiety in sport*. Human Kinetics Publishers, Champaign.

松本直子 (2005). 心理的プレッシャーが打球動作に及ぼす影響 (特集 Psycho-Neuro-Biomechanics のすすめ). *バイオメカニクス研究*, 9(3), 170–180.

松本清・佐久間春夫 (2013). 競争事態における α 波に及ぼす競争成績と時間の影響について. *バイオフィードバック研究*, 40(1), 11–19.

Matsuno, K. (1989). *Protobiology: Physical basis of biology*. Boca Raton Florida: CRC Press. doi: 10.1201/9781351076098

Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., and Smith, J. E. (1988). Optimality in human motor performance: Ideal control of rapid aimed movements. *Psychological Review*, 95(3), 340–370. doi: 10.1037/0033-295X.95.3.340

三浦哲都・紅林亘・岡野真裕・山本裕二・Marin, L.・Bardy, B. G. (2018). リズミカルな対人協調における視覚的結合, *日本生態心理学会抄録集*, 11(2), 20–21.

Mottet, D., and Bootsma, R. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics*, 80(4), 235–245. doi: 10.1007/s004220050521

Mottet, D., van Dokkum, L. E. H., Froger, J., Gouaïch, A., and Laffont, I. (2017). Trajectory formation principles are the same after mild or moderate stroke. *PLoS One*, 12(3): e0173674. doi: 10.1371/journal.pone.0173674

村山孝之・田中美吏・関矢寛史 (2009). 「あがり」の発現機序の質的研究. 体育学研究, 54(2), 263–277. doi: <https://doi.org/10.5432/jjpehss.a540202>

村山孝之・田中美吏・菅井若菜・関矢寛史 (2007). 時間切迫が運動スキルの遂行に及ぼす影響. 体育学研究, 52(6), 443–451. doi: 10.5432/jjpehss.0497

中尾綾・橋本泰裕・山田憲政 (2018). スポーツ動作における運動時間と正確性の関係: バスケットボール競技 3 ポイントショットによる検討. コーチング学研究, 32, 33–40. doi: 10.24776/jcoaching.32.1_33

Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T., and Barabási, A. L. (2000). Self-organizing processes: The sound of many hands clapping. *Nature*, 403, 849–850. doi: 10.1038/35002660

Nessler, J. A., and Gilliland, S. J. (2009). Interpersonal synchronization during side by side treadmill walking is influenced by leg length differential and altered sensory feedback. *Human Movement Science*, 28, 772–785. doi: 10.1016/j.humov.2009.04.007

Novak, K. E., Miller, L. E., and Houk, J. C. (2000). Kinematic properties of rapid hand movements in a knob turning task. *Experimental Brain Research*, 132(4), 419–433. doi: 10.1007/s002210000366

Okano, M., Shinya, M., and Kudo, K. (2017). Paired synchronous rhythmic finger tapping without an external timing cue shows greater speed increases relative to those for solo tapping. *Scientific Reports*, 7: 43987. doi: 10.1038/srep43987

Okazaki, S., Hirotsu, M., Koike, T., Bosch-Bayard, J., Takahashi, H. K., Hashiguchi, M., and Sadato, N. (2015). Unintentional interpersonal synchronization represented as a reciprocal visuo-postural feedback system: a multivariate autoregressive modeling approach. *PLoS One*, *10*: e0137126. doi: 10.1371/journal.pone.0137126

Okumura, M., Kijima, A., Kadota, K., Yokoyama, K., Suzuki, H., and Yamamoto, Y. (2012). A critical interpersonal distance switches between two coordination modes in kendo matches. *PLoS One*, *7*(12): e51877. doi: 10.1371/journal.pone.0051877

Oulasvirta, A., Roos, T., Modig, A., & Leppänen, L. (2013). Information capacity of full-body movements. In *Proceeding of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1289–1298. doi: 10.1145/2470654.2466169

Peng, W., and Hsieh, G. (2012). The influence of competition, cooperation, and player relationship in a motor performance centered computer game. *Computers in Human Behavior*, *28*(6), 2100–2106.

Pikovsky, A., Rosenblum, M., and Kurths, J. (2002). *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. New York: Cambridge University Press.

Pino, A., Tzemis, E., Ioannou, N., and Kouroupetroglou, G. (2013). Using kinect for 2D and 3D pointing tasks: performance evaluation. In *Human-Computer Interaction. Interaction Modalities and Techniques*, 358–367. doi: 10.1007/978-3-642-39330-3_38

Posner, M. I. (1966). Components of Skilled Performance: Human limitations of attention and memory are basic to the analysis of skilled performance. *Science*, *152*(3730), 1712–1718. doi: 10.1126/science.152.3730.1712

Rieger, M. (2007). The role of goal representations in moving to temporal and spatial targets. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *60*(2), 262–288. doi: 10.1080/17470210600760250

Salmoni, A. W., and Mellwain, J. S. (1979). Fitts' reciprocal tapping task: A measure of motor capacity? *Perceptual and Motor Skills*, 49(2), 403–413. doi: 10.2466/pms.1979.49.2.403

Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (2nd ed.). Champaign: Human Kinetics.

Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., and Quinn Jr. J. T. (1979). Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 47(5), 415–451. doi: 10.1037/0033-295X.86.5.415

Schmidt, R. C., Carello, C., and Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 227–247. doi: 10.1037//0096-1523.16.2.227

Schmidt, R. C., and O'Brien, B. A. (1997). Evaluating the dynamics of unintended interpersonal coordination. *Ecological Psychology*, 9(3), 189–206. doi: 10.1207/s15326969eco0903_2

Schmidt, R. C., and Richardson, M. J. (2008). Dynamics of interpersonal coordination. In A. Fuchs and V. K. Jirsa (Eds.), *Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics*, 281–308. doi: 10.1007/978-3-540-74479-5_14

Shannon, C. E., and Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. Urbana, IL: University of Illinois Press.

Silva, P. L., Bootsma, R. J., Figueiredo, P. R. P., Avelar, B. S., de Andrade, A. G. P., Fonseca, S. T., and Mancini, M. C. (2016). Task difficulty and inertial properties of hand-held tools: An assessment of their concurrent effects on precision aiming. *Human movement science*, 48, 161–170. doi: 10.1016/j.humov.2016.05.003

Soukoreff, R. W., and MacKenzie, I. S. (2004). Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(6), 751–789. doi: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.001

Strogatz, S. H. (2003). *Sync: The emerging science of spontaneous order*. New York: Hyperion Press.

田中美吏 (2008). プレッシャーが運動スキルに及ぼす影響. 広島大学大学院生物圏科学研究科博士論文.

田中美吏・関矢寛史 (2006). 一過性心理的ストレスがゴルフパッティングに及ぼす影響. *スポーツ心理学研究*, 33(2), 1–18.

Tanaka, Y., and Sekiya, H. (2011). The influence of monetary reward and punishment on psychological, physiological, behavioral, and performance aspects of a golf putting task. *Human Movement Science*, 30(6), 1115–1128. doi: 10.1016/j.humov.2011.04.008

田中美吏・霜辰徳・野坂祐介 (2016). 心理的プレッシャー下における不安定場での立位姿勢制御: 下肢筋活動と足圧中心からの評価. *体育学研究*, 61(1), 289–300.

手塚太郎 (1996). 技能学習における速さと正確さの関係についての心理学的研究. 東京: 杉山書店.

Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., and Kelso, J. A. S. (2007). The phi complex as neuromarker of human social coordination. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 8190–8195. doi: 10.1073/pnas.0611453104

van Loon, E. M., Masters, R. S. W., Ring, C., and McIntyre, D. B. (2001). Changes in limb stiffness under conditions of mental stress. *Journal of Motor Behavior*, 33(2), 153–164.

van Ulzen, N. R., Lamoth, C. J., Daffertshofer, A., Semin, G. R., and Beek, P. J. (2008). Characteristics of instructed and uninstructed interpersonal coordination while walking side-by-side. *Neuroscience Letters*, 432, 88–93. doi: 10.1016/j.neulet.2007.11.070

Varlet, M., and Richardson, M. J. (2015). What would be Usain Bolt's 100-meter sprint world record without Tyson Gay? Unintentional interpersonal synchronization between the two sprinters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41(1), 36–41. doi: 10.1037/a0038640

若月翼 (2021). 反応者の運動制御の背景にある動き出しと情報伝達の仕組み. 中京大学大学院体育学研究科博士論文.

Ware, C., and Mikaelian, H.H. (1987). An evaluation of an eye tracker as a device for computer input. In *Proceedings of the SIGCHI/GI conference on Human factors in computing systems and graphics interface*, 183–188. doi: 10.1145/29933.275627

Woodworth, R. S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review*, 3, 1–114. doi: 10.1037/h0092992

Wijnants, M., Cox, R., Hasselman, F., Bosman, A., and Van Orden, G. (2012). A trade-off study revealing nested timescales of constraint. *Frontiers in Physiology*, 3(116), 1–15. doi: 10.3389/fphys.2012.00116

Williams, A. M., Vickers, J., and Rodrigues, S. (2002). The effects of anxiety on visual search, movement kinematics, and performance in table tennis: A test of Eysenck and Calvo's processing efficiency theory. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 24(4), 438–455. doi: 10.1123/jsep.24.4.438

山田憲政 (1998). 身体運動研究における外部と内部の接合. 北海道大學教育學部紀要, 75, 83–111.

山田憲政 (2015). スポーツ情報論の試み (展望論文). 運動学習研究会報告集, 23, 42–49.

Yoshie, M., Kudo, K., and Ohtsuki, T. (2008). Effects of psychological stress on state anxiety, electromyographic activity, and arpeggio performance in pianists. *Medical Problems of Performing Artists*, 23(3), 120–132. doi: 10.21091/mppa.2008.3024

Zajonc, R. B., and Sales, S. M. (1966). Social facilitation of dominant and subordinate responses. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2(2), 160–168. doi: 10.1016/0022-1031(66)90077-1

Zhai, S., Kong, J., and Ren, X. (2004). Speed-accuracy tradeoff in Fitts' law tasks: on the equivalency of actual and nominal pointing precision. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(6), 823–856. doi: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.007

付 録

研究 1 (第 2 章) の身体の 3 点 (肩, 肘, 手首) のキネマティクス

身体3点 (肩, 肘, 手首) の垂直 (z軸) 方向の位置座標の平均値を, 各IDの条件間で比較した結果を表S1に示す. 手首は, 全てのIDの条件間で有意な差が示された ($p < 0.05$).

表S1 身体の3点 (肩, 肘, 手首) のキネマティクス

ID	Shoulder (mm)			Elbow (mm)			Wrist (mm)		
	table	flat	<i>p</i> -value	table	flat	<i>p</i> -value	table	flat	<i>p</i> -value
1	211.4	208.6	0.617	-36.0	-34.6	0.871	48.5	39.7	0.005
	±16.4	±23.7		±29.4	±31.6		±9.5	±13.8	
2	207.4	213.4	0.276	-32.7	-28.8	0.651	48.2	39.6	0.012
	±20.6	±17.2		±34.4	±28.4		±12.9	±13.7	
3	210.8	209.7	0.906	-27.0	-33.8	0.371	63.5	45.3	0.019
	±38.1	±22.4		±28.9	±26.3		±37.9	15.9	
4	212.5	214.2	0.814	-19.6	-26.0	0.437	67.93	48.7	0.003
	±34.5	±17.6		±29.6	±30.9		±30.8	±12.8	
5	225.2	223.1	0.696	-17.5	-23.1	0.417	63.7	51.3	0.003
	±16.0	±21.6		±25.5	±23.9		±14.8	±15.6	
6	222.0	222.3	0.964	-13.1	-20.1	0.483	68.2	50.3	<0.001
	±23.1	±16.2		±28.0	±31.9		±13.6	±15.5	

研究 1（第 2 章）のスタイラスの軌道のキネマティクス

スタイラス先端の垂直方向（z 軸方向）の平均移動距離を、各 ID の条件間で比較した結果を表 S2 に示す。全ての ID の条件間で有意な差は示されなかった ($p < 0.05$)。

表S2 スタイラスの軌道のキネマティクス

ID	Table condition (mm)	Flat condition (mm)	<i>p</i> -value
1	8.01 ± 2.84	6.86 ± 2.22	0.08
2	9.94 ± 3.07	10.54 ± 2.71	0.43
3	18.00 ± 5.53	18.24 ± 3.44	0.84
4	20.59 ± 5.48	19.50 ± 4.26	0.38
5	31.54 ± 8.67	31.97 ± 5.80	0.82
6	33.00 ± 4.98	32.48 ± 10.88	0.81