

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：33908

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18565

研究課題名（和文）失敗できない環境でのフィッツの法則

研究課題名（英文）Applying Fitts's Law in Error-Intolerant Settings

研究代表者

山田 憲政（Yamada, Norimasa）

中京大学・スポーツ科学部・教授

研究者番号：00210469

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：フィッツの法則は、速さと正確さのトレードオフを規定する人間の動きに関する普遍的な法則である。本研究では、失敗が許されない状況での法則の適用性を探るため、エントロピー分析による軌道の情報処理という新たな方法を考案し、タッピング実験において通常試技と失敗が許されない試技を比較してペン先の動きとエントロピーを計算した。失敗が許されない試技では、動作時間が延長され、速度を犠牲にして精度を保つ局面が確認された。これを垂直跳び実験で検証し精度要求時の力の調整局面を確認した。これにより、フィッツの法則が失敗が許されない状況においても、局面ごとの情報処理と心理的な制限を考慮することで有効であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究におけるフィッツの法則の検証は、学術的にも社会的にも重要な意義を持つ。学術的には、失敗が許されない状況での人間の動作制御のメカニズムを明らかにし、エントロピー分析を用いた情報処理の評価方法を提案している。これにより、人間工学や認知科学の分野において、より精度の高い予測モデルや設計指針が提供される可能性がある。社会的には、この研究成果は産業界においても応用されることが期待される。特に、高リスク作業を伴う職場での作業効率の向上や安全性の確保に役立つため、人間中心の安全対策の強化に寄与する。これらの点から、本研究は理論的枠組みの拡張だけでなく、実用的な応用においてもその価値が認められる。

研究成果の概要（英文）：Fitts's Law is a universal law of human movement that defines the trade-off between speed and accuracy. In this study, we explored the applicability of this law in situations where failure is not permissible by devising a new method of trajectory information processing through entropy analysis. In the tapping experiment, we compared normal trials with failure-not-permitted trials, calculating the movement of the pen tip and the entropy. In the failure-not-permitted trials, it was observed that the movement time was extended, and accuracy was maintained at the expense of speed. This was further verified in a vertical jump experiment, where adjustments in force during precision-demanding moments were observed. This demonstrates that Fitts's Law remains effective in situations where failure is not permitted, by considering information processing and psychological limitations specific to each scenario.

研究分野：認知科学

キーワード：フィッツの法則 運動制御 速さと正確さのトレードオフ

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フィッツの法則は人間の動きの速さと正確さのトレードオフを示すものとして広く知られている。この式は人間とコンピューターのインターフェースを設計する際にも用いられ、人類の歴史にとって画期的な数式の一つと言っても過言ではない。しかし、ほとんど知られていないのは、この式が対象に接触する際に数パーセントのミスが許される実験結果から導かれたということである。人間は、宇宙での作業、手術における医師の手の動き、スポーツ動作など、失敗が許されない環境で動きを制御しなければならない場合がある。にもかかわらず、これまで、フィッツの法則がミスを0%に統制しても成立するかを検討する研究は行われてこなかった。それは、ミスを0%に統制するアイデアが考案されてこなかったことと、失敗できない環境における動作・行為が日常動作の特殊な例と見なされ、その重要性が十分に認識されていなかったためであると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の3つのステップを通じて、フィッツの法則が失敗が許されない環境でも適用できるかを検討し、必要な改良を提案することである。

1) ミスを0%にする方法の開発と適用

まず、フィッツの実験においてミスを0%にする方法を開発する。この方法を用いて実験を行い、失敗が許されない環境においてもフィッツの法則が適用できるかを検討する。

2) 異なる環境での動きの軌道の比較検討

次に、フィッツの法則が導かれた環境（数%のミスが許される環境）と失敗が許されない環境におけるペン先の動きの軌道を情報処理の観点を用いて比較する。この比較を通じて、失敗が許されない環境における動きの特徴と情報処理の特徴を実験的に明らかにする。

3) 動きの入出力関係の検討と式の改良

最終的に、動きの入出力関係（力と動きの関係）を時系列で詳細に検討する。具体的には、正確さを意識する場合にどのように速度調整が行われるかを分析する。この結果を基に、フィッツの法則をミス0%の環境に適用するための式の改良方法を提案する。

3. 研究の方法

本研究は、上記目的を達成するために、以下の2つの実験的研究を行った。

1) 実験1 ミスを0%にする方法の開発と軌道からの情報処理の推定

図1 (A左) が、フィッツが用いた2つのプレートを交互にできるだけ早くタップする実験である。この試技では約4%の逸脱率が報告されている。これに対して右に示すように標的を立体に変え、ペンを標的にタップする際にペンが標的から逸脱したらその動作が自ずと失敗と認知できる環境でフィッツ試技を行った。この際、両試技とも、標的の幅と距離を変化させ運動難易度IDを1から6まで変化させた。分析は、フィッツの研究において分析対象とされていたタッピング運動にかかる平均時間と標的からの逸脱率に加え、ペン先の動きを高速度カメラで撮影して時々刻々（200Hz）の座標値をコンピュータに取り込み、情報処理の観点から分析した。この比較を通じて、失敗が許されない環境における動きの特徴を明らかにした。

分析方法の概念図が図2である。図中のAの太い線に示すように、ペンの軌道は時々刻々（人間の運動の時間精度毎に）実現可能な複数の軌道の中から1つの点が選択され、それらが補間されることで一つの軌道が生成されると考えることができる。これは、Bのb1に示すように、軌道の断面で見ると、選択可能な複数点から一つの軌道が生成されると考えることができる。これは、Bのb1に示すように、軌道の断面で見ると、選択可能な複数点から一つを選択しているとみなせる。

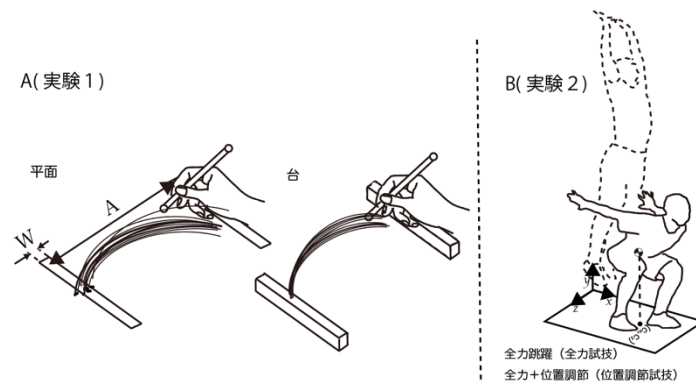


図 1. 実験 1 と実験 2 の概念図

つまりここでの情報処理はb2に示すように定量的に計算することができる。まず、実験が行われた空間を、ペン先がタップされる位置精度（15mm×15mm×15mm）の仮想的な立方体で分割し、その中に入る確率からシャノンの情報エントロピーの式 $H_i = p_i \log_2(1/p_i)$ を用いて情報処理量を計算することができる。この例では、等確率の32個の格子から1つが選択されているので8ビット処理が行われている。

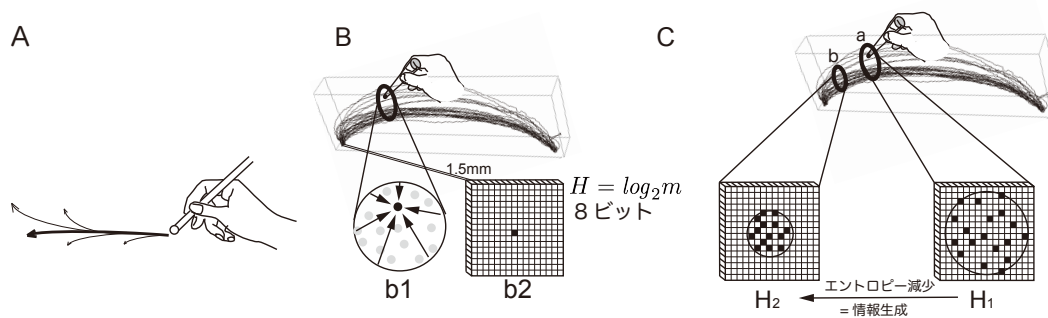


図 2. 軌道の情報処理の考え方

さらにこの軌道の情報処理の考え方は、Cのように複数の軌道からなる軌道群が収束する際の情報処理量の推定に拡張できる。図中の a から b に移行するにつれて軌道群の乱雑さ（エントロピー）が減少しており、その間に情報が生成していると考えられる。この情報処理量を右接地（0%）から左接地（100%）として、その間を9分割し、その分割された格子の中に入るペン先の座標の数をカウントして各格子の確率 p_i を求め、次にエントロピー H_i を求め、そのエントロピーの差から情報量 I_i を求めた。

1) 実験 2

実験 1 の結果から、運動の正確さを増すための情報処理が運動のある局面で行われることが明らかになった。これにより、フィッツの法則は、これまでのように運動の全局面を運動時間で平均的に捉える方法では限界があることが示された。さらに、運動を生じさせるのは力であり、動きの正確さが増す際には、そのときの力の制御を検討しなければ、動きの変化の原因を解明することは困難である。

そのため、運動中の力を電氣的に抽出できるフォースプレート上での動きを分析対象とする。具体的には、図 1（B）に示すように、フォースプレート上で垂直跳びを行い、その際に正確さを意識すると垂直跳びの力生成と重心軌道や跳躍高がどのように変化するかを明らかにする。

4. 研究結果

1) IDと運動時間の関係

表 1 に実験 1 における平面試技と立体試技の両試技の各 ID における平均タップ時間 (MT) とエラー率を示す。平面条件では、フィッツの研究結果と同様に、ID が増加するにつれてエラー率が増加し、ID6 では約 3.5% であった。それに対して立体条件においては、すべての ID においてエラー率が 0% であった。この結果から、本研究が考案した立体条件は、「失敗できない」フィッツの実験として用いることができることが確認された。

表 1. 運動時間とエラー率

Flat condition		Table condition	
MT (s)	Error (%)	MT (s)	Error (%)
0.184 ± 0.015	0.00 ± 0.00	0.185 ± 0.015	0.00 ± 0.00
0.195 ± 0.020	0.04 ± 0.09	0.191 ± 0.016	0.00 ± 0.00
0.247 ± 0.039	0.15 ± 0.19	0.236 ± 0.037	0.00 ± 0.00
0.283 ± 0.053	0.41 ± 0.30	0.293 ± 0.041	0.00 ± 0.00
0.380 ± 0.069	2.46 ± 0.52	0.380 ± 0.039	0.00 ± 0.00
0.427 ± 0.085	3.43 ± 0.58	0.458 ± 0.065	0.00 ± 0.00

2) 異なる環境での動きの軌道の比較検討

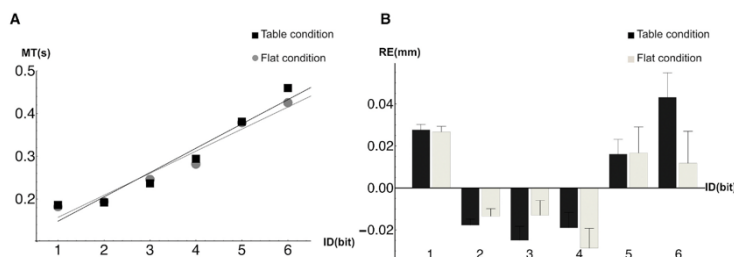


図 3. 運動難易度と運動時間

図 3(A) は、平面条件と立体条件における ID が 1 から 6 までの平均運動時間 (MT) のデータと、これらのデータから求めた ID-MT 関係の回帰直線を示す。両条件において、ID と MT の間には高い正の相関が得られた。次に、平面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 ANOVA で比較した (図 3B)。その結果、12 種類の残差の間には有意な差があった。さらに、テーブル条件における ID6 の残差は他の残差よりも有意に大きいことが判明した。また、ID6 においてのみ、2 つの条件間の比較で有意差が見られた。

この結果から、高い ID (ID=6) の立体条件で、失敗できない動きの特徴が観察されると考えられた。そこで、図 2 に示した軌道の情報処理分析を用いて、立体試技 ID=6 における動きを立体試技 ID=3 における動きと比較することで、失敗できない動きの特徴を詳細に分析した。図 4 は、ID=6 における各局面のエントロピーを位置—速度グラフと共に示した図である。この図に示すように、ID6 の方が全軌道において ID3 よりエントロピーが高く、動き出し (0%) からエントロピーが増加し、中間 (30%-60%) ではほぼ同じエントロピー値であり、接触 (100%) に向かい急激にエントロピーが減少するというベル型を示した。また、このエントロピーの変化の形は、上に示した速度変化の形と類似していることがわかる。つまり、難易度が高い場合、動きには大きく 3 つの局面があり、動き出し時は精度が荒く速度を上げていき、中間ではその荒さが維持されて高い速度が維持され、接触に向かい正確さを増加させながら速度が減少していくことがわかる。

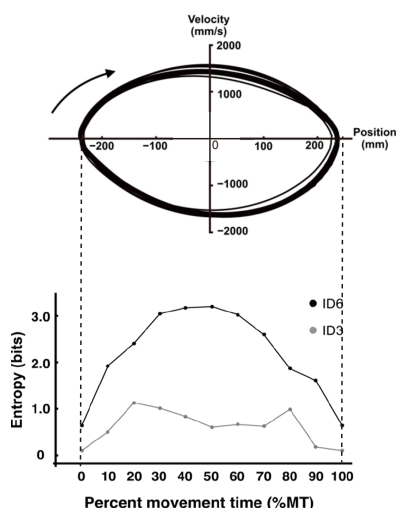


図 4 軌道群のエントロピーと速度変化

3) 動きの入出力関係の検討と式の改良

図 5 に全力で垂直跳を行った試技 (全力試技) と全力かつ離地位置に着地することを意識して全力で垂直跳びを行った試技 (位置調節試技) の地面反力を 3 次元にプロットした図 (右) と跳躍高と重心の着地位置の分布 (左) を示す。この力波形の図に示すように、

動き出しから膝を屈曲して伸展へ移行する局面で垂直方向への力ベクトルの方向が調節され、その時の力ベクトルの大きさが減少して、跳躍高が減少していることがわかった。つまり、1秒程度で無意識で終了する垂直跳びの全力試技においても動きを調整する局面があり、その局面で速さと正確さのトレードオフが発生してパフォーマンスが落ちることがわかった。

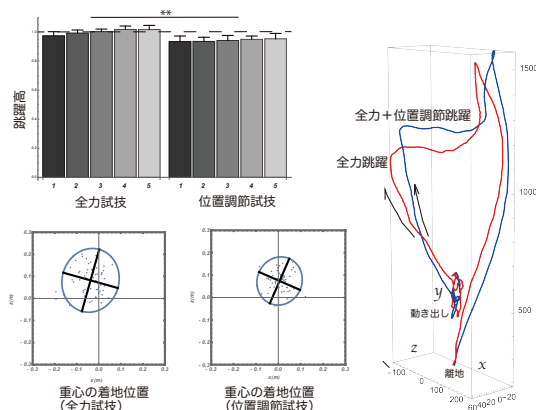


図 5. 全力試技と位置調節試技の垂直跳

これらのことから、フィッツが導いた全体の運動時間を平均して求める方法を、失敗できない状態においては心理的に難易度を向上する局面があり、その局面で正確さの向上に対して速さが減少するというフィッツ法則が成り立つことから、次のようにフィッツ法則が改定されると考えられる。まず、標的の物理的な大きさに対して失敗できない心理状況で設定される W_{eff} を次のように定義する。ここで、 k は $0 < k \leq 1$ の範囲で変化する補正係数で、通常は 1 であるが失敗ができない状況において k は 1 より小さい値をとる。

$$W_{eff} = kW \quad (1)$$

この値を用いて、運動局面を n 個に分割し、フィッツの法則を表すと、

$$MT = \sum_{i=1}^n (a_i + \log_2(2D_i/W_{eff,i})) \quad (2)$$

この式に (1) を代入して、

$$MT = \sum_{i=1}^n (a_i + \log_2(2D_i/k_i W_i)) \quad (3)$$

と表される。この (3) 式が本研究が導いた失敗が許されない場合のフィッツの法則であり、今後、様々な動きで検証していく必要がある。

文献

- Murakami H, Yamada N. (2021). Fitts' law when errors are not allowed: Quantification of reciprocating trajectories and estimating information processing. *Acta Psychol.* doi: 10.1016/j.actpsy.2021.103418.
- Murakami H, Yamada N. (2022). Estimating Information Processing of Human Fast Continuous Tapping from Trajectories. *Entropy*, 4;24(6):788. doi: 10.3390/e24060788.
- Murakami H, Yamada N. (2023). Human Information Processing of the Speed of Various Movements Estimated Based on Trajectory Change. *Entropy*, 20;25(4):695. doi: 10.3390/e25040695.
- Murakami H, Yamada N. (2024). Mechanism for High-Precision Control of Movement at Maximum Output in the Vertical Jump Task. *Entropy*, 28;26(4):300. doi: 10.3390/e26040300.
- 山田憲政, 南部珠璃, 若月翼 (2021). 全力発揮時の動きを高精度に制御する仕組み, 第 29 回運動学習研究会.
- 山田憲政 (2023). スポーツ心理学の独自性: 失敗できないときのフィッツの法則, 第 30 回運動学習研究会.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Murakami, H., Yamada, N.	4. 巻 220
2. 論文標題 Fitts' law when errors are not allowed: Quantification of reciprocating trajectories and estimating information processing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Psychologica	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actpsy.2021.103418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 山田憲政、南部珠璃、若月翼	4. 巻 29
2. 論文標題 全力発揮時の動きを高精度に制御する仕組み	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 運動学習研究会報告集	6. 最初と最後の頁 33-41
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 村上宏樹、山田憲政	4. 巻 49
2. 論文標題 競争で2者間の同期は生じるか	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 スポーツ心理学研究	6. 最初と最後の頁 21-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4146/jjpsopsy.2021-2104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Murakami, H., Yamada, N.	4. 巻 24
2. 論文標題 Estimating Information Processing of Human Fast Continuous Tapping from Trajectories	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Entoropy	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/e24060788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Murakami, H., Yamada, N.	4. 巻 25
2. 論文標題 Human Information Processing of the Speed of Various Movements Estimated Based on Trajectory Change	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Entoropy	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e25040695	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Murakami, H., Yamada, N.	4. 巻 26
2. 論文標題 Mechanism for High-Precision Control of Movement at Maximum Output in the Vertical Jump Task	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Entoropy	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e26040300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山田憲政	4. 巻 30
2. 論文標題 スポーツ心理学の独自性: 失敗できないときのフィッツの法則	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 運動学習研究会報告集	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 山田憲政、南部琉璃、若月翼
2. 発表標題 全力発揮時の動きを高精度に制御する仕組み
3. 学会等名 第29回運動学習研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上宏樹、山田憲政
2. 発表標題 軌道の変化過程から推定する速度変化に伴う情報処理量
3. 学会等名 日本スポーツ心理学会第49回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田憲政
2. 発表標題 スポーツ心理学の独自性: 失敗できないときのフィッツの法則
3. 学会等名 第30回運動学習研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Murakami ,H, Yamada,N.
2. 発表標題 Trade-off relationship between speed and accuracy at a specific time examined using a vertical jump task
3. 学会等名 European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------