



Fitts' Law に基づく頭部姿勢による固定画面視野制御時の 制御性能評価

Evaluation of Control Performance in Fixed-Viewpoint Display Navigation Using Head Posture Based on Fitts' Law

加藤巧己¹⁾, 小木曾直輝²⁾, 木島竜吾³⁾
Takumi KATO, Naoki OGISO, and Ryugo KIJIMA

- 1) 岐阜大学 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kato.takumi.e6@s.gifu-u.ac.jp)
2) 株式会社コナミデジタルエンタテインメント (〒104-0061 東京都中央区銀座 1-11-1)
3) 岐阜大学 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima.ryugo.n4@f.gifu-u.ac.jp)

概要: 研究は、頭部の動きで視野を操作するシステムにおいて、フィッツの法則が成立することを示し、最適な C-D 比を検討することを目的とする。ユーザの顔の動きを Web カメラでトラッキングし、仮想空間内のカメラが回転し、ターゲットを中央に合わせることでポインティングを行う。実験の結果、視野操作型のポインティングにもフィッツの法則が適用できることが示唆され、C-D 比が 3 倍では操作性が大幅に低下することが明らかとなった。

キーワード: HMD, プロジェクタ, Head Coupled Display, フィッツの法則

1. 頭部運動による視野の制御システム

人間とコンピュータをつなぐインターフェース技術には、マウスやキーボードに加え、視線追跡や顔の動きを検出するフェイストラッキング技術などが容易に利用できるようになってきている。

図 1.1 に本稿でとりあげるシステムの概念図を示す。

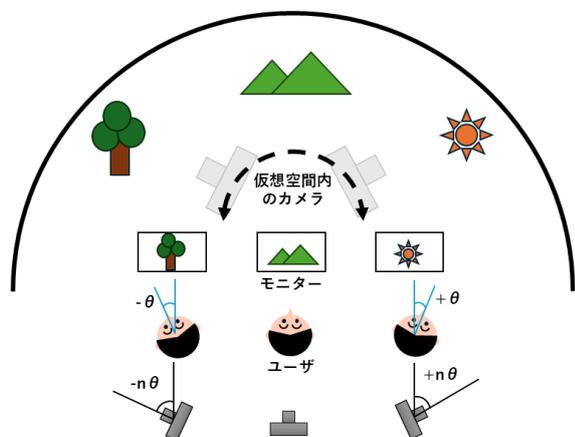


図 1.1: システム概念図

示されている。モニターに設置した Web カメラと既存のフェイストラッキングアプリ VSeeFace[1]によりユーザの顔の動きをトラッキングし、顔の回転に一定の倍率をかけて仮想空間のレンダリングに用いるカメラを回転させる。ユーザは例えば、モニターに映し出された風景の左を見ようとするなら、顔を左に回すことで、その何倍か左の風景を見る。

この方式は、ゲーム分野を中心として利用が試みられており、マイクロソフトのフライトシミュレータの視野を拡張するために、Natural Point 社のヘッドトラッキングカメラ[2]が利用されていた例[3]などが有名であろう。この方式には経験的な有用性があるのかもしれないが、今まで定量的な分析が行われておらず、筆者らは特に、利用可能な操作感度の範囲や、他の方式と比較するためのモデルが不足していると考えている。

そこで本論文では、フェイストラッキングにより、固定モニター上の視野を運動させるシステムを対象に、被験者実験を用いて、基本の性能であるポインティング性能がフィッツの法則に概ね従うことを示し、操作入力とその効果の比率である C-D 比の適用範囲を探る。

固定された通常のモニターには、仮想空間の様子が表

2. フィッツの法則

2.1 フィッツの法則

フィッツの法則は、人間が目標物を指し示す、あるいは到達する際の操作性をモデル化した法則であり、移動時間(MT)が目標までの距離(D)と目標幅(W)の比率に基づいて予測されることを示している[4].

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (1)$$



図 2.1: フィッツの法則における D と W の定義

また、タスクの難易度の指標 ID、パフォーマンス指数 IP は以下の式で定義される[4].

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (2)$$

$$IP = \frac{ID}{MT} \quad (3)$$

タスクの難易度 ID は、タスクを定義した時点で決まり、フィッツの法則では難易度 ID に比例(b)してタスク完了時間 MT が伸びるとされている。他方、パフォーマンス指数 IP はその比例係数 b の逆数に近い値であり、タスク難易度が実際ユーザにとってどの程度困難か容易であったかを示し、異なるシステムを比較するときに用いられる場合がある。

2.2 既存のバリエーション

フィッツの法則は、物理空間での指によるポインティングだけでなく、2次元平面上でのマウスなどによるカーソル操作の分析のために用いられ、多くのポインティング操作がこの法則を満たすことが示されている。

本研究でとりあげる方法がやや特殊なのは、画面上の固定されたターゲットをポイントするのではなく、画面視野全体を動かすことでターゲットも動く状態で、視野中心に固定されたカーソルでポイントすることである。最も近いのは、VR ヘッドセットの視野中央に固定したレチクルで仮想物体をポイントすることであり、これもフィッツの法則に概ね乗るのであるが、本システムでは画面は空間固定であることが異なる。

3. 実験

3.1 方法と手順

ゲームエンジンである Unity 上に実験のための仮想空間を構築した。そこには円周上に7つの候補球を等間隔に配置し、そのうちのひとつを赤くしてターゲットであることを示した。被験者は頭を回転させてディスプレイ中央の十字マークにターゲット球を合わせるポインティング

タスクを行った。ターゲット球の内側にレチクルが入っている状態でスペースキーを押すことでポインティングが完了と判定する。

また、レチクルがターゲット球の外側にある状態でスペースキーを押すことをミスポインティングと定義する。

ターゲット間の角度距離(D)[deg]を 20, 30, 40, 50 の4種類、ターゲット視角幅(w)[deg]を 2.5, 5.0, 10.0 の3種類、C-D比を 1, 2, 3 倍として 36 種類のテスト条件を設定した。

実験の様子を図 3.1、ポインティングの順番を図 3.2 に示す。

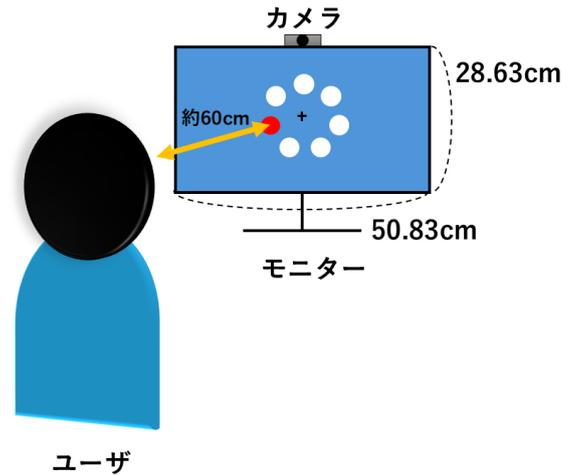


図 3.1: 実験の様子

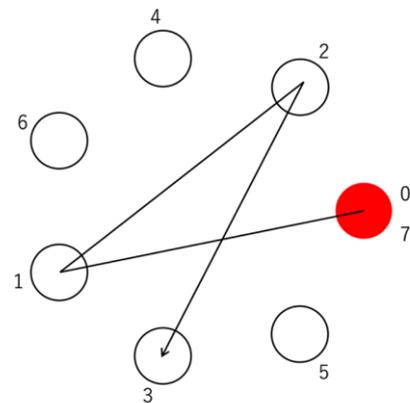


図 3.2: ターゲットの配置と選択する順番

モニターは Lenovo ThinkVision L2321x Wide を使用。解像度 1920x1080、画面サイズ 23 型(横幅 50.83cm、縦幅 28.63cm)。Web カメラは cMeetC960 を使用。解像度は 1080P(30fps)、視野角 90[deg]。公式スペックは参考文献の URL を参照[5]。仮想空間内のカメラモデルの画角は Unity の初期設定通り、垂直画角 60[deg]、水平画角 91.49[deg]である。

実験参加者は、日頃から PC 操作に慣れており、首の可動や視力に異常のない 19~24 歳の男女 14 名であった。実験開始前には、全ての参加者に対して口頭で実験内容の説明を行い、同意を得た上で実験を行った。

3.2 実験結果：フィッツの法則との適合度

図 3.3~3.5 に、移動時間(MT)と難易度指標(ID)の関係を示す。各点は同じ条件の全試行の平均である。いずれの C-D 比(1~3 倍)においても、両者には高い線形関係があり、このポインティングシステムはフィッツの法則に添うものであることが示された。

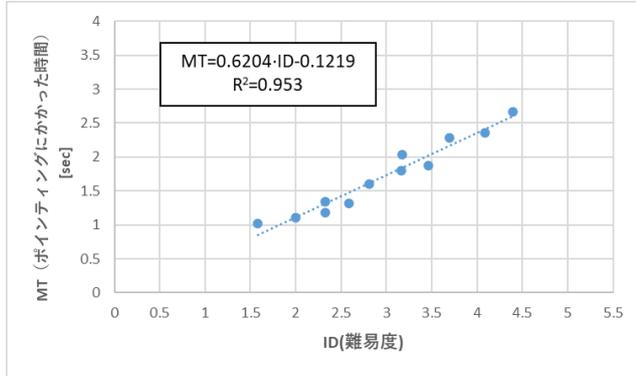


図 3.3: MT と ID の関係 (C-D 比 1 倍)

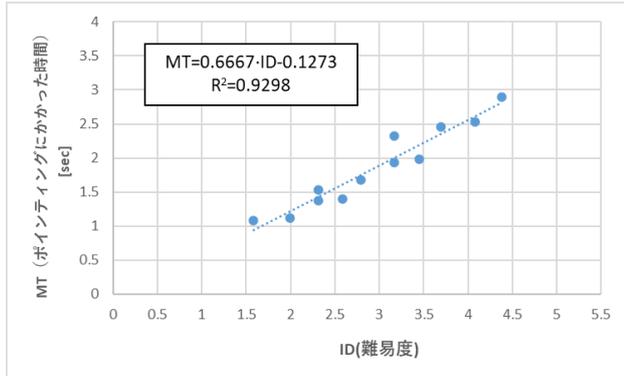


図 3.4: MT と ID の関係 (C-D 比 2 倍)

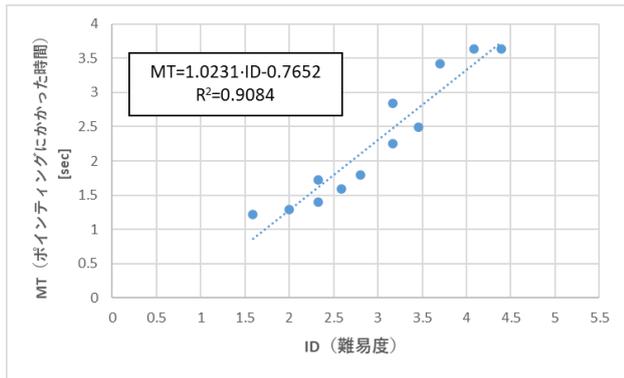


図 3.5: MT と ID の関係 (C-D 比 3 倍)

C-D 比 1 倍の条件では、回帰線は $MT=0.6204 \cdot ID - 0.1219$ であり、決定係数は $R^2=0.953$ であった。

C-D 比 2 倍の条件では、回帰線は $MT=0.6667 \cdot ID - 0.1273$ であり、決定係数は $R^2=0.9298$ であった。

C-D 比 3 倍の条件では、回帰線は $MT=1.0231 \cdot ID - 0.7652$ であり、決定係数は $R^2=0.9084$ であった。

3.3 操作ノイズを考慮した補正

本実験では、被験者の頭部運動データがブレ、これが実験結果に影響を及ぼしていた。その原因は、そもそも頭部が安定していないこと、フェイストラッキング性能の両面があると考えられる。このことは、特にターゲット幅の小さい条件での難易度を上げ、操作時間が伸びてしまうことで、フィッツの法則の適合度を低下させているように思われた。そこで、ターゲット幅(W)を補正して再度フィットさせた。被験者がターゲットを画面中央レチクルに重ねポインティングを成功させた状態でのターゲット-レチクル間距離を記録し、その平均距離をブレ幅とした。このブレ幅分だけターゲット半径が小さくなったとみなして難易度指数(ID)を再計算した。

補正後の結果を図 3.6~3.8 に示す。決定係数はいずれも補正前に比べて向上した。したがってこちらの a, b の値の方が実際のポインティング性能をよく反映していると考えられる。

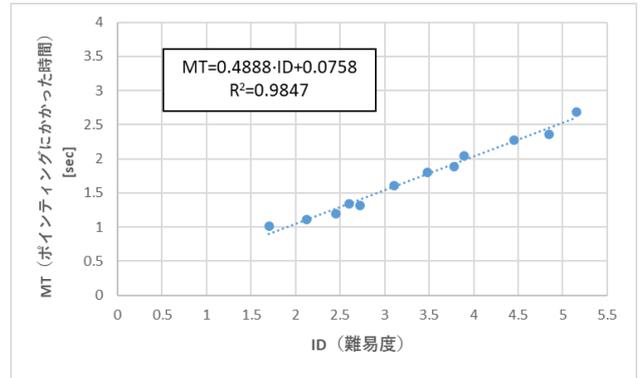


図 3.6: MT と ID の関係-ブレ補正 (C-D 比 1 倍)

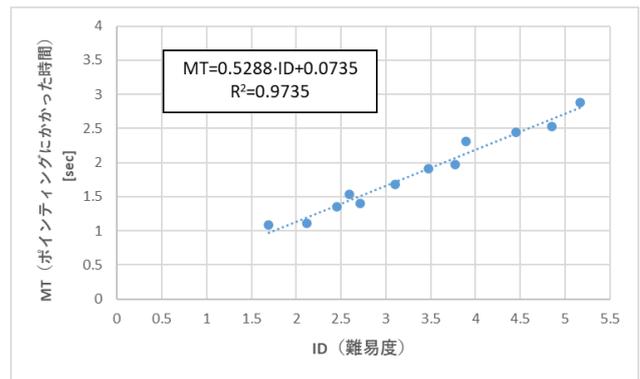


図 3.7: MT と ID の関係-ブレ補正 (C-D 比 2 倍)

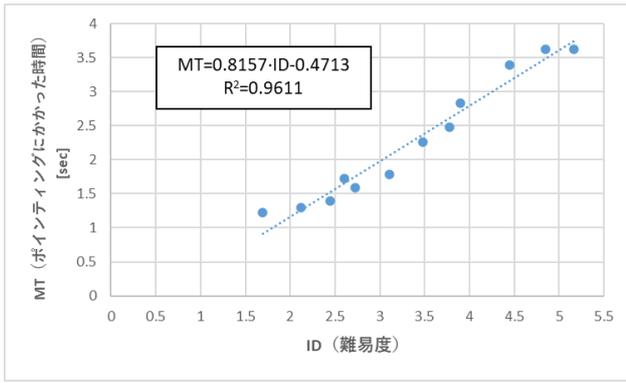


図 3.8: MT と ID の関係-ブレ補正 (C-D 比 3 倍)

3.4 C-D 比が操作性に及ぼす影響

C-D 比に対する、タスク完了時間(MT), エラー率, および IP(操作性)の平均を表 3.9 に示す. MT は, C-D 比 1 倍と 2 倍では 8%の悪化に対し, 3 倍では 32%も悪化していた. IP は 1 倍, 2 倍に比べ 3 倍では大きく悪化していた. エラー率は漸増であった. C-D 比を大きくすると操作性は全般に悪化するが, 特に 2 倍と 3 倍の差が大きいことから, 本システム条件では 2 倍までが利用すべき範囲であろう.

表 3.9: C-D 比ごとの MT とエラー率と IP(性能)

C-D比	MT[sec]	エラー率[%]	IP
1倍	1.719	17.22	1.947
2倍	1.851	21.72	1.837
3倍	2.270	24.18	1.597

3.5 ポインティング動作の軌跡

異なる C-D 比条件下でのポインティング動作の軌跡を比較した. 図 3.10 に, ターゲット球中心とレチクル間の残存距離の推移を示す. C-D 比 1 倍, 2 倍とは異なり, 3 倍では, 0.5 秒付近から傾斜が緩やかになっていた. つまり, 被験者は高感度条件では早めに速度を落として慎重に操作を行っていた.

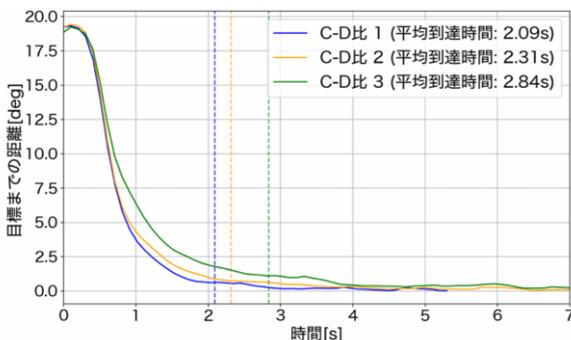


図 3.10: C-D 比ごとの目標までの距離と到達時間

図 3.11 は角速度である, すべての C-D 比条件で角速度のピークは 0.5 秒付近にあり, 0.5 秒までが加速フェーズ,

以降が減速フェーズであった. C-D 比が 3 倍の条件では, ピーク時の角速度が他条件よりも小さく, 感度の高さが動作速度を抑制していた.

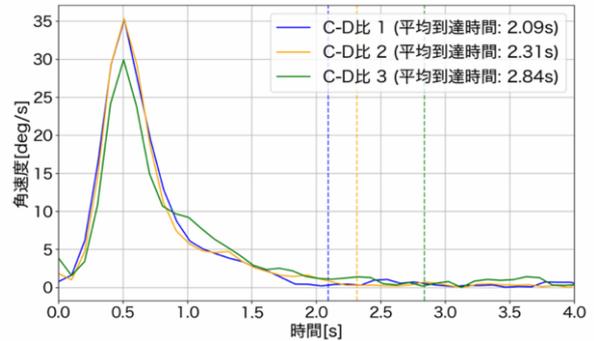


図 3.11: C-D 比ごとの角速度と到達時間

4. 結論

本研究では, フェイストラッキングにより検出された顔の回転運動により, 表示する仮想空間の視野を動かすシステムを取り上げ, そのポインティング操作性を, 被験者実験により調べた.

実験結果は, フィッツの法則によりターゲットまでの距離と大きさからポインティング時間を推測でき, さらに雑音の幅によりターゲットサイズを補正すればフィッツの法則により適合することを示した.

利用に適した C-D 比は 2 倍程度が上限であろう. なぜなら 3.4 節で議論したように, システムの使いやすさを示す IP(操作性)が 3 倍では顕著に減少し, タスク完了時間も 3 倍では顕著に増大するからである. 3.5 節で示したように, ポインティング軌跡を直接観察すると, C-D 比 1 倍, 2 倍と比べ 3 倍の条件ではユーザはより慎重な操作を行っており, このことが上記結果につながったと考えられる.

参考文献

[1] VSeeFace ホームページ
<https://www.vseeface.icu/>, 2025 年 7 月取得

[2] Natural Point - TrackIR 5 Gamer Set
<https://www.aerosoft.com/en/shop/flight/hardware/virtual-reality-motion/1058/natural-point-trackir-5-gamer-set>, 2025 年 7 月取得

[3] Microsoft Flight Simulator 2020: How to – TrackIR
https://www.youtube.com/watch?v=QP-o_TvCAIU, 2025 年 7 月取得

[4] 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.

[5] cMeetC960 商品ページ
https://www.tjc-jp.com/product/emeet_c960/index.html, 2025 年 7 月取得