

# Fitts の法則の三次元動作への適用に関する基礎的検討

古川 慎一・奥 英久\*

岡山理科大学大学院工学研究科修士課程情報工学専攻

\*岡山理科大学工学部情報工学科

(1997年10月6日 受理)

## 1. 緒 言

上肢障害者が有する身体機能は多様であり、どのような動作や行為が可能で、何ができないかを明らかにすることは容易ではない。このことが治療方針の決定を難しくすることもあり、結果として上肢障害者の退院や社会復帰を遅らせることも少なくない。一方、リハビリテーション及び福祉の概念が普及するに従い、上肢障害者を支援する種々の機器が開発されている。しかし、これらの機器が上肢障害者に適するかどうかの判定は、実際に上肢障害者が当該機器の操作を行い、その結果による主観的な判断が多く、科学的な観点からのインタフェースの最適化に関する検討はほとんど行われていない。

これらの課題を解決するためには、上肢運動を客観的に評価する工学的手法が必要である。本研究では、多様な上肢運動の中から、情報機器への入力操作の基本動作の1つであるポインティング動作に着目した。ポインティング動作とは打鍵動作のように、ある点に狙いを定めてその点への移動の終端を正確に決定する動作である。

ポインティング動作の評価方法の一つに Fitts の法則がある。これは、手指などのポインタがターゲットまで移動する際の所要時間とターゲットの大きさ及び移動距離の関係、即ち動作のスピードと正確さの関係を表す法則である<sup>1)</sup>。この Fitts の法則に関するこれまでの研究では、一次元及び二次元動作についての基礎的検討が行われてきた<sup>1)2)</sup>。しかし、実際に情報機器等を操作する際の動作は三次元動作になることが多い。また、上肢障害者が機器を効率良く操作できるかどうかの評価には、ポインティング動作における動作時間と移動距離だけでなく、実際の空間移動経路を考慮に入れることも重要と考えられる。

本論文では、三次元のポインティング動作の評価という観点から、健常者を対象としたポインティング動作の計測実験を行い、Fitts の法則の三次元動作への適用及び Fitts の法則と空間移動経路の関係について検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 上肢動作計測システム

ポインティング動作の計測を行うために、Fig. 1 に示す計測システムを構築した。本シス

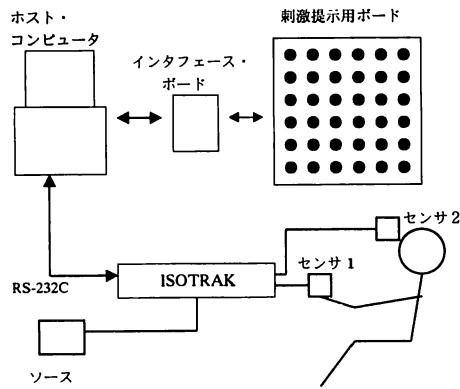


Fig. 1 計測システムの構成

テムは視覚刺激提示装置と空間移動経路計測システムより構成され、上肢のポインティング動作の所要時間と空間移動経路を計測する。各システムの制御と動作時間の計測にはホスト・コンピュータとして PC-9801 NS/A を使用し、制御プログラムは C 言語で開発した。以下に視覚刺激提示装置と空間移動経路計測システムの概要を述べる。

## 2.2 視覚刺激提示装置

視覚刺激提示装置として緑色発光ダイオード付き押しボタンスイッチを36個使用し、10cm 間隔で 6 行× 6 列の格子状に配した評価ボードを製作した。各発光ダイオードの位置は後の評価で必要となるため盤面左上から右上に 1 から 6 の番号を付し、以下同様の順序で番号を付した(最下段左端が31で右端が36となる)。本システムは、パラレル入出力回路とタイマー用回路から構成されたインタフェース・ボードを介してホスト・コンピュータと接続し、ダイオードの点灯、スイッチ押下による消灯、点灯から消灯まで時間計測の制御を行う。

## 2.3 空間移動経路計測システム

動作の計測には磁気式三次元位置計測装置 3 SPACE ISOTRAK SYSTEM (㈱日商エレクトロニクス製、以下 ISOTRAK と略記)を使用した。ISOTRAK は磁界を発生するソース、磁界を検出するためのセンサ、磁界を測定し位置や角度を計算するためのシステム・エレクトロニクス・ユニットから構成され、磁気変換技術を用いてソースに対するセンサの位置、角度のデータを RS-232C 仕様のシリアル・データとして、ホスト・コンピュータへ転送するシステムである。センサは 2 組装備されており、サンプリング・レートはセンサ 2 組で 50msec まで設定できる。また、ISOTRAK は磁気変換技術を利用しているため、近くに金属を有する環境下での計測では誤差を伴うので、本計測システムにおける誤差を計測したところ、100cm の距離で約 3 cm の誤差であった。今回の計測では、10cm 間隔でスイッチを配置しているので、押下スイッチ判別への誤差による影響は少ないものと考えられる。

## 2.4 計測方法

発光ダイオードの点灯により視覚刺激を提示し、点灯直後からスイッチ押下による消灯までの所要時間を応答時間として、その間の頭部と手首の空間移動経路を応答動作として計測した。ISOTRAK のサンプリング・レートはセンサ 2 組で 50msec で、センサ 1 組に対する 1 秒あたりのデータ量は 20 ポイントである。被験者は、右利きの健常男子学生 40 名 (21~24 歳) で、利き腕と非利き腕の 2 回に分けて計測した。Fig. 2 に示す配置で被験者を刺激提示用ボード正面の約 40cm に着座させ、センサは被験者の前額部と手首にマジックテープで装着した。計測は Fig. 3 のフローチャートに示す手順で行う。刺激提示用ボードのダイオードをランダムに順次点灯させ、その発光ダイオードをセンサを取り付けた側の人差し指で押下させた。スイッチの点灯及び押下はすべてのスイッチに対して行う。スイッチ押下の際は、最初に手は大腿部の上で構え、スイッチを押した後、再び大腿部の上に戻すようにした。計測によって得られた応答時間及び応答動作のデータはそれぞれファイルに保存する。

## 3. 結 果

今回の計測では利き腕と非利き腕の違いによる応答時間及び応答動作の有意な差は見られなかったため、非利き腕のデータは省略した。Table 1 に、右腕での押下における各スイッチ別平均応答時間を示す。

次に、Table 2 に右腕での押下における、各スイッチの最短移動経路からの実際の移動経路の偏差率を示す。ここで、偏差率は以下の式で計算した。

$$\text{最短経路からの偏差率} = \frac{\text{押下動作における実空間移動距離}}{\text{押下する指先と点灯スイッチとの直線距離}} \quad (1)$$

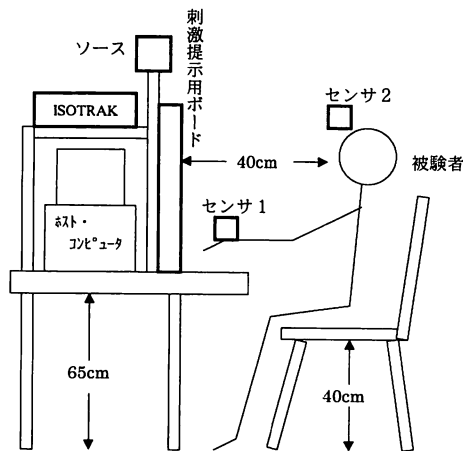


Fig. 2 実験装置の配置

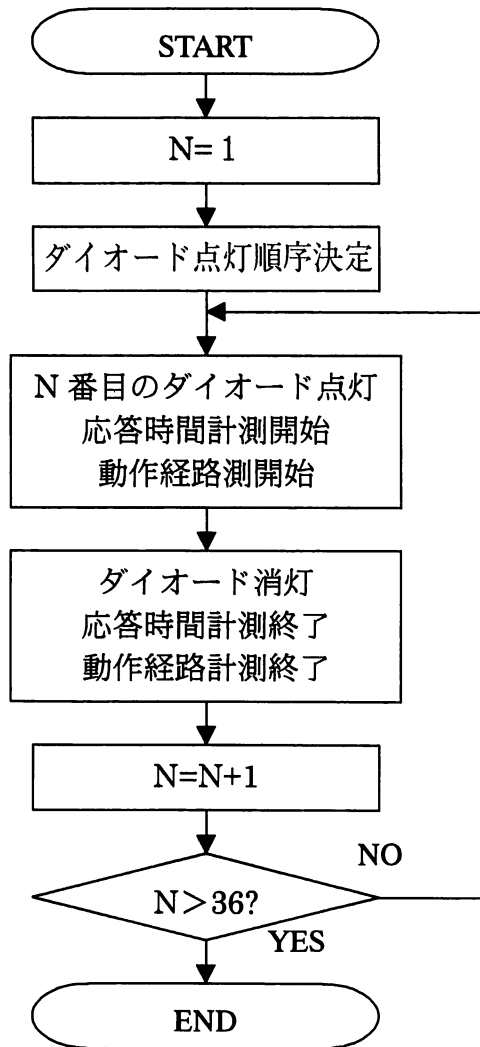


Fig. 3 計測手順

#### 4. 考 察

移動距離を  $A$ 、ターゲットの大きさを  $W$  とすると、Fitts の定めたポインティングの困難度  $ID$  (Index of Difficulty) が次式で示される<sup>3)</sup>。

$$ID = \log_2 (2A/W) \quad (2)$$

今回の実験装置では、スイッチの大きさはすべて同じなので、(2)式において  $W$  が一定となり、動作開始地点からスイッチまでの距離で困難度が決定される。Table 3 に、今回の実

Table 1 右腕押下におけるスイッチ別平均応答時間 (msec)

	1列	2列	3列	4列	5列	6列
1行	1115	1127	1050	1033	1102	1077
2行	1112	1005	964	963	997	1031
3行	1037	1006	986	944	973	995
4行	1011	933	919	978	895	988
5行	1057	974	941	913	949	975
6行	1001	1033	947	904	916	931

Table 2 右腕押下におけるスイッチ別最短経路からの偏差率

	1列	2列	3列	4列	5列	6列
1行	1.229	1.191	1.209	1.198	1.206	1.175
2行	1.234	1.203	1.225	1.193	1.224	1.190
3行	1.208	1.231	1.219	1.272	1.206	1.223
4行	1.275	1.220	1.214	1.254	1.216	1.247
5行	1.253	1.235	1.264	1.253	1.279	1.299
6行	1.303	1.307	1.339	1.327	1.365	1.346

Table 3 各スイッチ押下における Fitts の困難度 (右腕)

	1列	2列	3列	4列	5列	6列
1行	6.194	6.112	6.052	6.021	6.024	6.060
2行	6.091	5.913	5.833	5.791	5.795	5.843
3行	5.831	5.689	5.578	5.517	5.523	5.592
4行	5.635	5.443	5.281	5.186	5.196	5.302
5行	5.448	5.189	4.946	4.790	4.806	4.980
6行	5.295	4.958	4.597	4.322	4.353	4.651

験装置における右腕で押下時のスイッチ別の困難度を示す。2.2で各スイッチに1から36までの番号を付したが、この Fitts の困難度より、34番スイッチが最もポインティングが容易で、1番スイッチが最もポインティングが困難だと考えられる。

#### 4.1 応答時間

Table 1に示すように、右腕で押下した時の応答時間は視覚刺激提示盤の上段及び左側のスイッチで長くなる傾向が見られた。これらのスイッチはいずれも手部の移動距離が長く、これより移動距離が応答時間に大きく影響しているものと考えられる。

Table 3の Fitts の困難度を X 軸に、Table 1の平均応答時間を Y 軸に取ってグラフ化したものが Fig. 4である。これによると困難度が増すほど応答時間が長くなるという傾向が見られる。そこで困難度と応答時間の相関を調べたところ、危険率 5%で有意な正の相

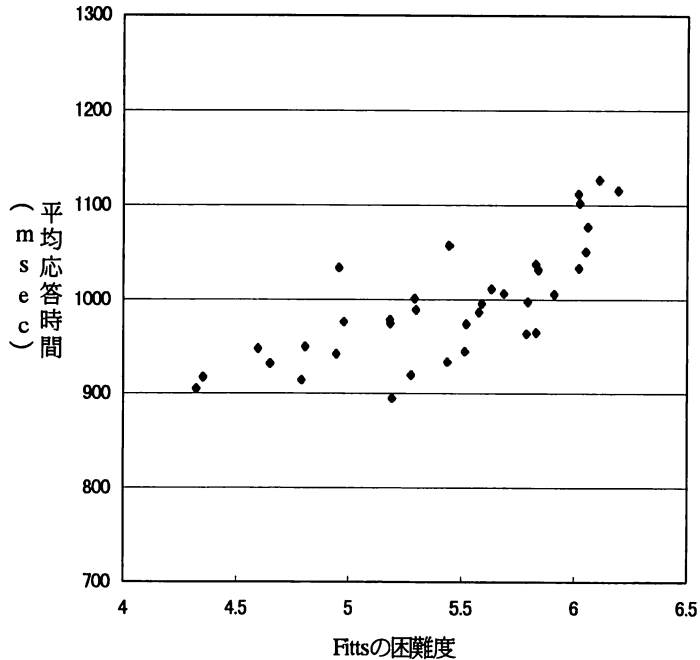


Fig. 4 Fitts の困難度と平均応答時間の関係

関が認められた (相関係数=0.75)。一方、23番スイッチ (困難度=5.196) と26番スイッチ (困難度=5.189) や、27番スイッチ (困難度=4.946) と32番スイッチ (困難度=4.958) のように困難度の値が近くても、平均応答時間に80msecから90msecの差が見られる箇所があった。このことより、三次元動作の決定には、移動距離とターゲットの大きさだけでなく、ターゲットの位置も関係している可能性があると考えられる。

#### 4.2 Fitts の法則と最短経路からの偏差率の関係

Table 3 に示す Fitts の困難度を X 軸に、Table 2 に示す最短経路からの偏差率を Y 軸に取ってグラフ化したものが Fig. 5 である。こちらは応答時間とは逆に、困難度が小さくなるほど偏差率は大きくなるという結果を得た。同様に、困難度と偏差率の相関を調べたところ、危険率 5% で有意な負の相関が認められた (相関係数=-0.84)。これより、この困難度と最短経路からの偏差率の関係は健常者の上肢動作の特徴を示すものと考えられる。

また、応答時間と同様に、14番スイッチ (困難度=5.689) と19番スイッチ (困難度=5.635) や、24番スイッチ (困難度=5.302) と31番スイッチ (困難度=5.295) のように困難度の値が近くても、偏差率に0.04から0.06の差が見られる箇所があった。このことより、偏差率にも困難度以外にターゲットの位置が影響を与えていると考えられる。

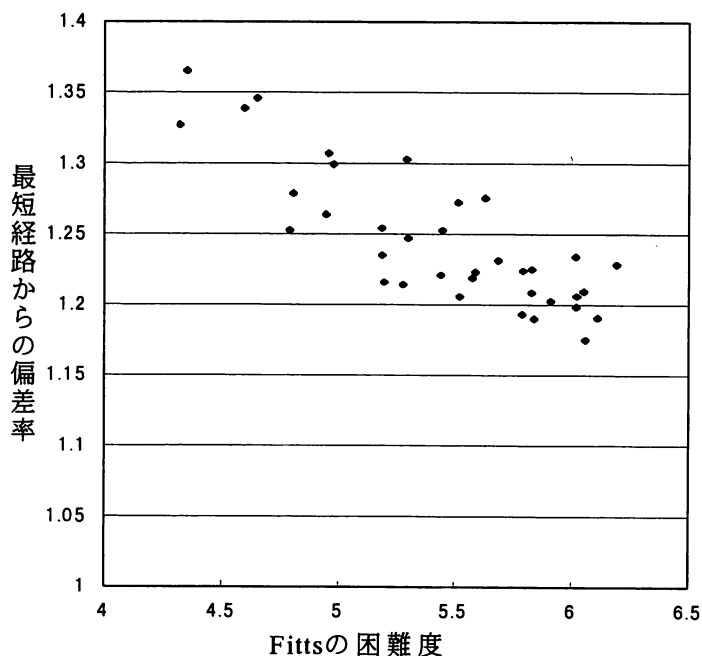


Fig. 5 Fitts の困難度と最短経路からの偏差率の関係

### 4.3 Fitts の法則の三次元動作への適用

4.1 で述べたように、今回の三次元のポインティング動作の実験では、困難度が大きくなるにつれて応答時間も長くなることが確認された。Fitts の困難度とポインティング動作の移動時間は概ね直線的に比例することが報告されている<sup>3)</sup>。このことより、Fitts の法則の三次元動作への適用の可能性が示されたものと考えられる。従って、三次元動作を伴う操作インターフェースの関与や上肢の運動機能の評価などにおいて、Fitts の法則が1つの指標となり得る可能性が示されたものと考えられる。また、困難度が高くなるにつれて最短移動距離からの実際の移動経路の偏差率が小さくなる傾向も確認された。これは三次元動作の特徴の1つと考えられる。また、困難度の値が近いにもかかわらず応答時間や偏差率に差が見られる箇所があることから、三次元動作の決定には移動距離とターゲットの大きさだけでなくターゲットの位置も関係していると推測される。今後、ターゲットの位置が三次元動作にどのような影響を与えているかを検討していくことが必要と考えられる。

## 5. 結 言

本研究では、スイッチ付き発光ダイオードを使用した刺激応答時間計測システムと三次元位置計測装置を併用した上肢動作計測システムを作成し、健常者を対象としてポインティング動作を計測し、Fitts の法則の三次元動作への適用について検討した。この結果、Fitts の困難度とポインティング動作の関係に以下の結論を得た。

- 1) 困難度が大きくなるにつれて応答時間は長くなる (危険率 5%)。
- 2) 困難度が大きくなるにつれて最短経路からの実際の移動経路の偏差率は小さくなる (危険率 5%)。
- 3) 困難度の値が近くてもターゲットの位置によっては応答時間及び最短経路からの偏差率に差が生じることがある。

以上より, 三次元動作への Fitts の法則の適用可能性及び Fitts の法則に関連した三次元動作の特徴が示されたものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) Richard J. Jagacinski, Donald L. Monk : 「Fitts' Law in Two Dimensions with Hand and Head Movements」, Journal of Motor Behavior, Vol. 17, No. 1, pp. 77-95 (1985).
- 2) 山科徹也, 山本敏泰, 大島淳一 : 「上肢運動機能障害者におけるキーボード等の操作特性(III)」, 第9回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp. 449-452 (1994).
- 3) 佐藤方彦監修 : 「人間工学基準数値数式便覧」, 技報堂出版(株) (1992).
- 4) 福意武志, 井上桂子, 東嶋美佐子, 水野雅康 : 「半側無視評価・訓練器の試作」, 第9回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp. 117-120 (1994).
- 5) 山科徹也, 山本敏泰, 大島淳一 : 「上肢運動機能障害者におけるキーボード等の操作特性(4)」, 第10回リハ工学カンファレンス講演論文集, pp. 249-252 (1995).
- 6) 尾澤 新 : 「肢体不自由者の上肢運動機能評価に関する基礎的研究」, 岡山理科大学大学院工学研究科電子工学専攻1995年度修士論文 (1996).
- 7) 市原清志 : 「バイオサイエンスの統計学」, (株)南江堂 (1990)



# The Application of Fitts' Law to Three Dimensional Pointing Movement Caused by Human Extremities

Shinichi FURUKAWA and Hidehisa OKU\*

*Graduate School of Engineering,*

*\*Department of Information and Computer Engineering,*

*Faculty of Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*Ridai-cho 1-1, Okayama 700-0005, Japan*

(Received October 6, 1997)

Fitts' Law has been developed to indicate difficulties of pointing movements, caused by upper extremities such as hands and fingers, for the one dimensional and two dimensional targets. Elements of Fitts' Law are size of targets, distance between a target and a client's upper extremities used for pointing, and requisite time during the pointing movement. Then, the Fitts' Law indicates  $ID$  (Index of Difficulty) as follows,

$$ID = \log_2 (2A/W)$$

Where,  $A$  is the length of the upper extremities used for the pointing and  $W$  is the size of a target.

The purpose of this study is to consider the possibility on application of the Fitts' Law to three dimensional pointing movements. In this study, a measurement system has been developed. The system are composed of a three dimensional optical simulator with LEDs, three dimensional position measurement system (ISOTRAK), and a personal computer for the control and measurement. Forty non-disabled students were employed as the clients for the clinical testing. Their physical movements of reaction to the optical stimulation were electrically recorded. From the analysis of these records indicates following characteristics.

- (1) The requisite time of each pointing movement becomes longer when the  $ID$  would be bigger ( $p < 5\%$ ).
- (2) The ratio between the length of the direct path from the target to the client and locus of the pointing movement becomes smaller when  $ID$  would be smaller ( $p < 5\%$ ).
- (3) Requisite time and the ratio may depend on not the  $ID$  but the position of the target.

These results indicate the possibility of application of the Fitts' Law for analysis of the three dimensional physical movements of the human upper extremities.