

平成30年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

## 題目

机の裏に設置した距離センサアレイによる

膝位置認識とカーソル操作への応用

主専攻 情報システム主専攻

著者 市川 佑

指導教員 高橋伸 志築文太郎

## 要　旨

本研究では、デスクトップ環境下において

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景 . . . . .	1
1.2 目的・アプローチ . . . . .	1
1.3 貢献 . . . . .	1
1.4 本論文の構成 . . . . .	2
<b>第 2 章 関連研究</b>	<b>3</b>
2.1 足をジェスチャ入力として用いる研究 . . . . .	3
2.2 デスクトップ環境を想定した足による入力の研究 . . . . .	3
2.3 膝を入力手法として用いる研究 . . . . .	5
<b>第 3 章 システム</b>	<b>6</b>
3.1 概要 . . . . .	6
3.2 膝の操作 . . . . .	6
<b>第 4 章 実装</b>	<b>10</b>
4.1 概要 . . . . .	10
4.2 プロトタイプ . . . . .	10
4.2.1 ハードウェア . . . . .	10
4.2.2 ソフトウェア . . . . .	10
<b>第 5 章 実験:膝によるマウスカーソル操作の性能評価</b>	<b>13</b>
5.1 目的 . . . . .	13
5.2 評価方法 . . . . .	13
5.3 実験手順 . . . . .	14
5.4 収集データ . . . . .	15
5.5 実験結果 . . . . .	15
<b>第 6 章 議論</b>	<b>20</b>
<b>第 7 章 結論</b>	<b>21</b>
謝辞	22



# 図 目 次

2.1 Multitoe[1] . . . . .	4
3.1 膝によるマウスカーソル操作のイメージ . . . . .	7
3.2 上下方向の操作イメージ 1 . . . . .	8
3.3 上下方向の操作イメージ 2 . . . . .	9
4.1 製作したプロトタイプの一部 . . . . .	11
4.2 移動物体に対する距離センサの設置方向概念図 . . . . .	12
5.1 使用したプログラム . . . . .	14
5.2 左膝の選択時間とそのモデル . . . . .	16
5.3 右膝の選択時間とそのモデル . . . . .	17
5.4 両膝のエラー率 . . . . .	18
5.5 両膝のスループット . . . . .	19

# 表 目 次

# 第1章 序論

## 1.1 背景

自動車のアクセルやブレーキペダル、ピアノやオルガンのペダルに代表されるように、我々は日常的に足による操作を行なっている。しかし、パーソナルコンピュータをデスクトップ上で作業をする際、我々は手を中心に操作を行い、足に操作が割り当てられることはない。足による操作を用いたコンピュータ向けインタフェースの研究は、1960年代から存在している[2]が、現在は手による操作が中心である。しかし、Multitoe[1]のようなタッチ認識を可能にした床面とのインタラクションや、手がふさがった状態におけるモバイル機器の操作[3, 4]など、新たに足によるインタラクションの研究は関心が高まっている。

その中でも、デスクトップでの特にコンピュータを使った作業中は両手をキーボードの操作に充てることが多い。そのため、足によるマウスのようなカーソルやポインタの操作を行う研究が盛んである。そのアプローチは、装置を足で動かす方法[5, 6]、可変摩擦機構を取り付けた靴[7]があるが、これらは体の一部に装置を取り付けるあるいは大型な装置を用いるものであるため、衣服などに制限が生じたり持ち運びができないなどの制約が加わってしまう。

## 1.2 目的・アプローチ

前節で述べた問題を解決するために、本研究の目的は、特別な装置を足に装着することなく、かつ簡単に、足を用いたコンピュータとのインタラクションを可能にすることである。そのアプローチとして、机下に取り付けた装置から膝の動作を読み取るシステムを製作する。[足から突然膝になっているのでつながりを設けたい](#)

## 1.3 貢献

本研究の貢献を以下に述べる。

- 安易に設置可能かつ安価な装置で膝によるマウスポインタ操作を実現した。
- 距離センサを使い、読み取ったデータから画面上の座標にマウスポインタをマップするプロトタイプを開発した。
- プロトタイプを用いて、膝によるマウスポインタ操作をフィットの法則に当てはめて評価し、[\[結果\]](#)

## 1.4 本論文の構成

- 本研究では膝によるマウスカーソル操作を調査する？
- 足を使ってみたい
- 足先の研究しかない、膝と組み合わせることで様々なインタラクションが可能になる
- 膝使ったものは少なく問題がある
- 膝を使ったことの理由→足の既存手法と組み合わせることができる、膝の可動域が広い（が先行研究が少ない
- いずれにせよ、関連研究が終わるまでに「膝によるマウスカーソル操作」という話に落とし込む

## 第2章 関連研究

### 2.1 足をジェスチャ入力として用いる研究

足を用いたコンピュータへの入力の目的はいくつか存在する。その1つに、屋外でスマートフォンなどを操作する時に荷物を持っている、手が汚れているというすぐに手を用いることができない状況を想定したものがある。Alexander ら [8] は、モバイル端末で頻繁に用いられる操作に対し、足ジェスチャを割り当てるための調査を行なった。Fan ら [3] は、足のジェスチャによりモバイル端末を操作することに対する実証研究を行なった。ユーザ定義の足のジェスチャを用いた方法と、荷物を降ろして手で端末を持ち操作する方法を比較したところ、前者の方が 70% 高速な操作が可能であるという結果となった。Han らの Kick[9] では、蹴り出すジェスチャを端末操作に用いるために、ユーザがキックの方向と速度をどの程度制御できるかを調査した。奥村 [4] は、靴に加速度と角速度を取得することができるセンサを取り付け、外出におけるモバイル端末の操作を行うシステムを開発した。本研究は、屋内での利用のみを想定した環境設置型の装置を用いるという点と、ラップトップコンピュータやデスクトップコンピュータへの利用を想定しているという点から、インタラクションの目的は異なる。

こうした屋内環境に設置する装置を用いた研究事例を紹介する。Augsten らによる Multitoe[1] (図 2.1) では、巨大なタッチパネルを床面に設置し、複数の足の認識や足の重心位置の認識を可能にした。これにより、床面に表示されたメニュー やキーボードを足で操作することを可能にした。鈴木 [10] は、測域センサによって足の動きをセンシングし、床面におけるインタラクション手法を提案している。しかし、これらの調査やインタラクション技術は主に立った状態などを想定しているものである。本研究では、デスクトップ上の作業中という限定された環境におけるインタラクション手法の提案を目指す。

### 2.2 デスクトップ環境を想定した足による入力の研究

本節では、デスクトップにおけるコンピュータの操作という環境における研究を紹介する。Fellerbaum ら [11] は、立った状態、座った状態、投影された画面の上にいる状態の 3 条件で、GUI に関する操作、仮想空間に関する操作の 2 種類に対して、どの足ジェスチャを用いるのが好ましいかを、ユーザに対する調査で明らかにした。Saunders ら [12] は、立った状態でのデスクトップアプリケーションの制御に足を用いた。Pearson ら [5, 6] は「モル」という装置を開発し、ポインタの操作などに手の代わりに足を使用する方法を探査した。モルを用いた場合でも、訓練によって小さなターゲットを選択することが可能になることを示した。Horodniczy ら [7] は、ユーザの靴に可変摩擦式の装置を取り付け、足によるカーソル操作の補助装置として用いた。靴底には低摩

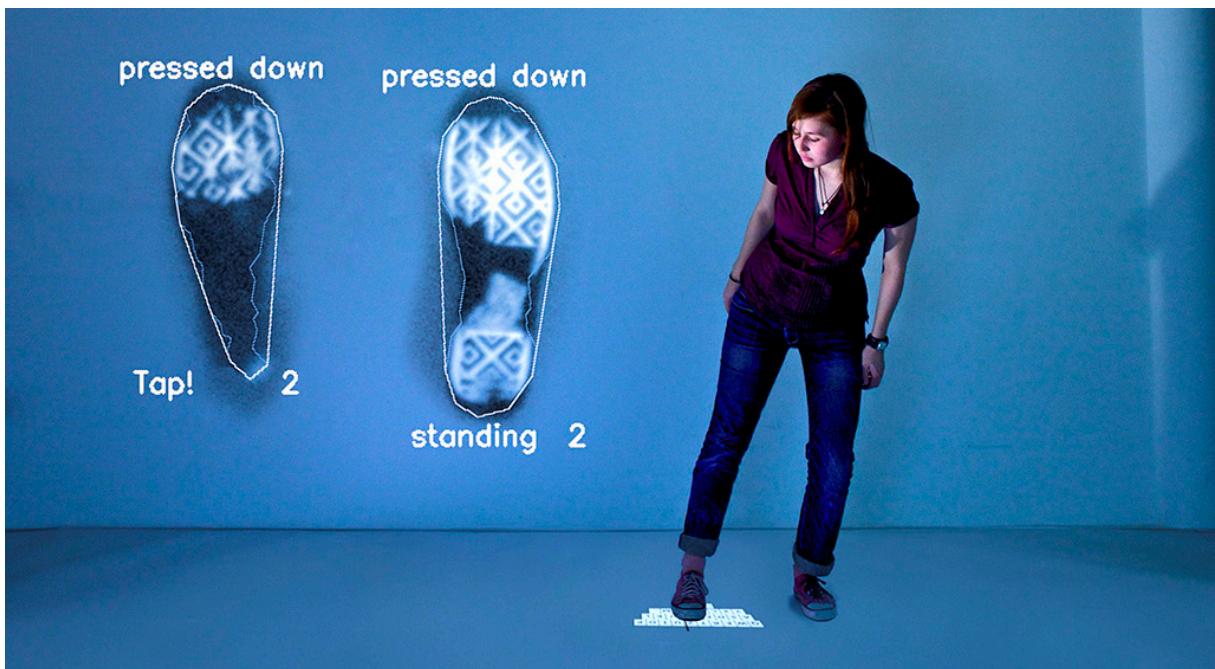


図 2.1: Multitoe[1]

擦材と高摩擦材の 2 つを取り付け、高摩擦材の接地圧力をステッピングモータで制御する。足の位置をカメラにより取得し、ターゲットに近づくにつれ圧力を高める。Velloso ら [13] は、座っている状態の机の下の足の動きの特徴を調査した。この論文の中で、机の下に配置したトラッキングシステムから、片方の足のつま先をマウス操作に割り当て、1 次元と 2 次元におけるポインティング作業により、パフォーマンスのテストを行なっている。田中ら [14] は、足の指をマウス操作に用いるために、母指の力制御と運動特性を調査した。これらの研究では、大型の装置を用いているために持ち運びや設置が困難であったり、靴に対して装置を取り付けるためにユーザに身体上の制約を強いてしまう。また、これらの研究で用いられているのは足先であり、本研究では小型で設置が簡単かつ足に装置を取り付けないアプローチで、問題の解決を図る。また、本研究は足先でなく膝に焦点を当てることで、既存手法との組み合わせによってさらなるインタラクションの拡張を図ることも可能である。

足と他の入力モダリティとの組み合わせを行なった研究という点では、次のようなものが存在する。Göbel ら [15] は、視線と足の組み合わせであり、視線位置におけるパンとズームの操作を足によるペダル操作で行なうことを提案した。Rajanna[16] はデスクトップ環境における正確なポインティングとクリックを目指し、視線によるポインティングと足によるクリックコマンドで構成されるシステムを構築した。本研究では膝による入力操作を行うことで、足を用いた他の手法との組み合わせの可能性を探る。

## 2.3 膝を入力手法として用いる研究

膝に関する研究の中で、コンピュータへの入力を想定したものは少ない。English ら [2] は、テキスト選択においていくつかの膝を含めた装置やデバイスを用いた時の操作時間を調査した。調査の結果、膝による操作は最も短い時間で選択することができることがわかった。この論文では、机の下に取り付けた装置のレバーを膝で動かすことで入力を行なったが、装置が複雑であるという欠点がある。我々は単純な構造のプロトタイプを開発することで、この研究に貢献する。

# 第3章 システム

## 3.1 概要

本研究では、机の下の片方の膝の動きを認識することでマウスカーソルの操作を行うシステムを提案する。システムの流れは以下のようになっている。

1. ユーザはシステムを設置した机の前に座る。
2. ユーザが膝を動かすことができる範囲を記録するため、キャリブレーションを行う。
3. ユーザは膝を上下左右に動かすことで、画面上のマウスカーソルが移動する。

## 3.2 膝の操作

マウスの操作と異なり、前方や後方に動かすことはできない。したがって膝によるマウスカーソルの操作は、ユーザが膝を上下左右に動かすことによって行われる。図3.1は膝でマウスカーソルを操作するときのイメージである。ユーザはマウスカーソルを左右に移動させたい時には、膝を左右に傾ける。上方向に移動させたい時は、かかとを浮かせて膝を机に近づける。逆に下方向に移動させたい時は、足を手前に引き、その時に浮いたかかとを床に近づけることで、膝を机から遠ざける。図3.2は、上下方向にマウスカーソルを操作する時の、膝の操作のイメージである。

同じ操作は図3.3に示されているような操作を行うことでも可能である。しかし、足が完全に地面についている時に、マウスカーソルは画面の一番下の位置になってしまう。そのため、ユーザが画面の真ん中付近にあるコンテンツを選択する時にかかとを浮かせた状態を維持しなければならず、疲労感が高くなってしまう。対して図3.2では、足が完全に地面についている時にカーソルが真ん中にあるため、ユーザは比較的楽な姿勢で操作することができる。

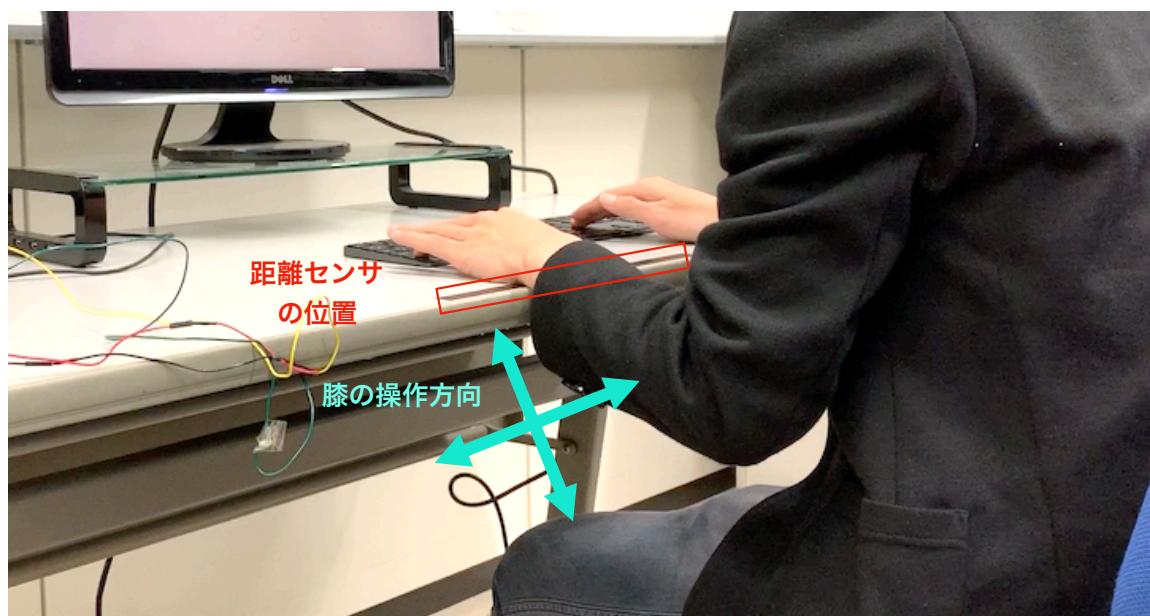


図 3.1: 膝によるマウスカーソル操作のイメージ

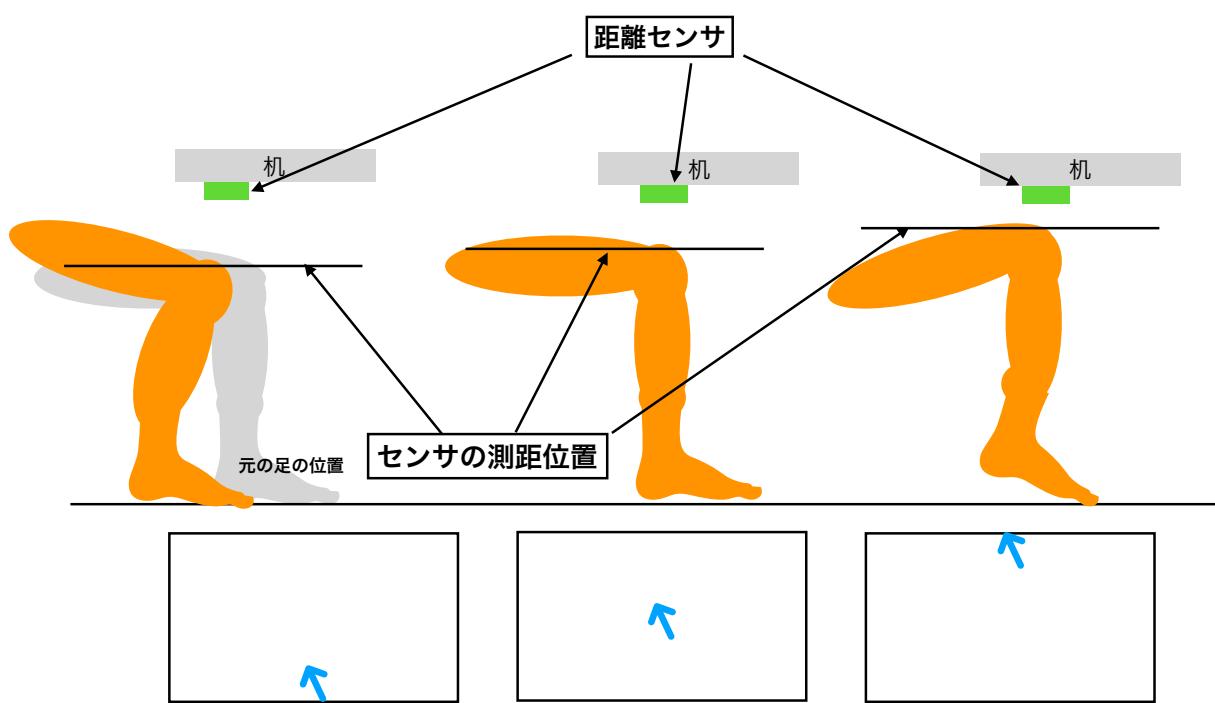


図 3.2: 上下方向の操作イメージ 1

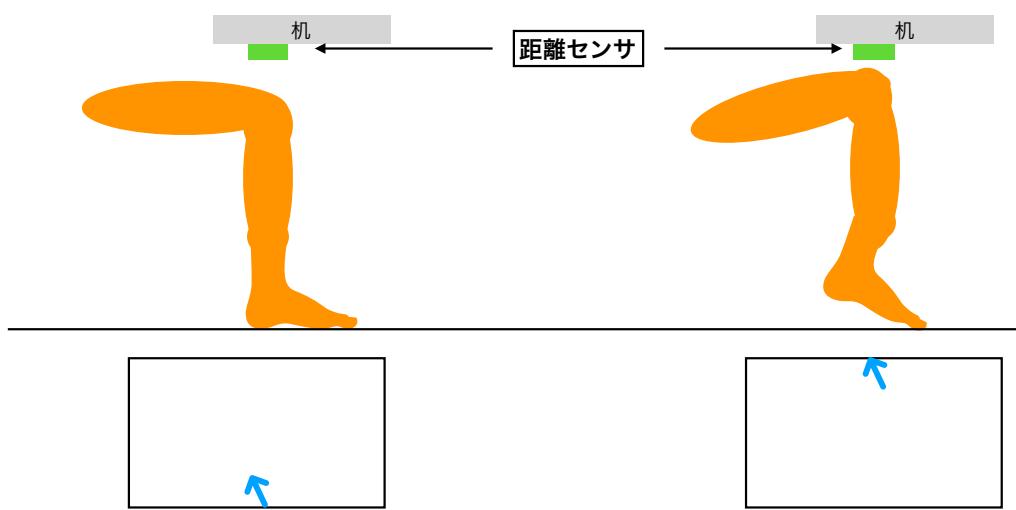


図 3.3: 上下方向の操作イメージ 2

# 第4章 実装

## 4.1 概要

本プロトタイプは、ハードウェアとして三角法を用いた光学式距離センサ 10 個を一列に並べたセンサアレイと、センサから取得した値の処理と値を元に座標を計算するソフトウェアからなる。

## 4.2 プロトタイプ

### 4.2.1 ハードウェア

距離センサは SHARP GP2Y0E03<sup>1</sup>を使用した。この距離センサは三角測量の原理を用い、対象までの距離を計測する。個々のセンサは、スレーブアドレスが初期値(0x40)で統一されているために、アプリケーションノート<sup>2</sup>に記載されている e-fuse プログラミングの手順で、スレーブアドレスの変更を行なっている。本プロトタイプでは、長さ約 30cm のプラスティック製の定規に、両面テープでセンサ本体を 30mm 間隔で定規に固定し、配線類はセロハンテープで固定した。図 4.1 は実際に製作したプロトタイプの一部である。距離センサは横向きにして 1 列に並べた。これは、GP2Y0E03 のアプリケーションノートには、センサの設置方向は、移動物体の距離を測定する時、図 4.2 の黒い矢印の方向ではなく、赤い矢印の方向で移動した方が、誤差が少ないとあるためである。

個々の距離センサは Arduino MEGA 2560 と I<sup>2</sup>C で接続される。接続はユニバーサル基板上で行う。各センサの電源、グランド、I<sup>2</sup>C のクロック線、I<sup>2</sup>C のデータ線同士を、それぞれ基板の裏側の導線と接続する。Arduino MEGA 2560 は、PC と USB シリアル通信で接続される。

### 4.2.2 ソフトウェア

Arduino では、I<sup>2</sup>C 通信でセンサからそれぞれの膝との距離を取得し、USB シリアル通信で 10 個を 1 フレームとした距離データを送信する。PC 上のプログラムでは、受信した距離データからカーソルの座標を計算し、マウスカーソルを描画する。プログラム言語は Python を用いた。シリアル通信のためのライブラリとして PySerial、ポインタを描画する GUI のためのライブラリとして PyQt を用いた。膝の位置の計算には、Xiao ら [17] の方法を参考にし、時間  $t$  におけるカーソルの座標 ( $C_x^t, C_y^t$ ) を次のように計算する。

<sup>1</sup><http://www.sharp.co.jp/products/device/lineup/selecion/opto/haca/diagram2.html>

<sup>2</sup>[http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y0e02\\_03\\_appl\\_j.pdf](http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y0e02_03_appl_j.pdf)

1. 各距離センサの値を指数平均平滑フィルタを用いて平滑化する。これを  $D_i^t$  ( $0 \leq i \leq 9$ ) と表す。
2.  $C_y^t$  を  $D_i^t$  の最小値とする。

$$C_y^t = \min_i(D_i^t) \quad (4.1)$$

3.  $i$  番目の距離センサについて、重み  $w_i$  を式 4.2 のように計算する。ここで、 $d$  は重み調整の定数である。本プロトタイプでは調整の結果  $d = 2$  としている。

$$w_i = \frac{1}{D_i^t - C_y^t + d} \quad (4.2)$$

4.  $w_i$  から、 $C_x^t$  を計算する。

$$C_x^t = \frac{\sum_i i w_i}{\sum_i w_i} \quad (4.3)$$

5.  $(C_x^t, C_y^t)$  を指数平均平滑フィルタを用いて平滑化する。

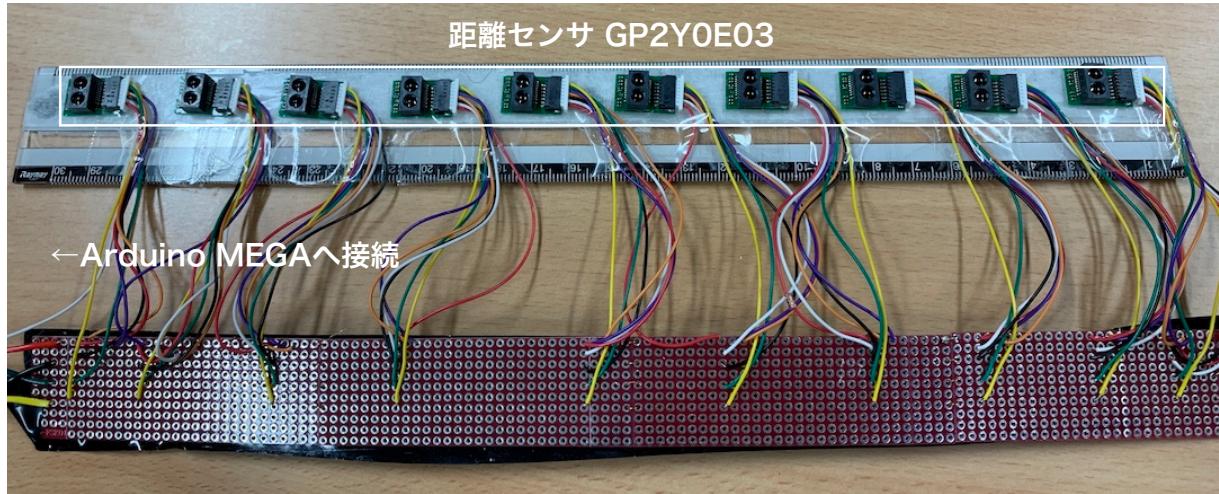


図 4.1: 製作したプロトタイプの一部

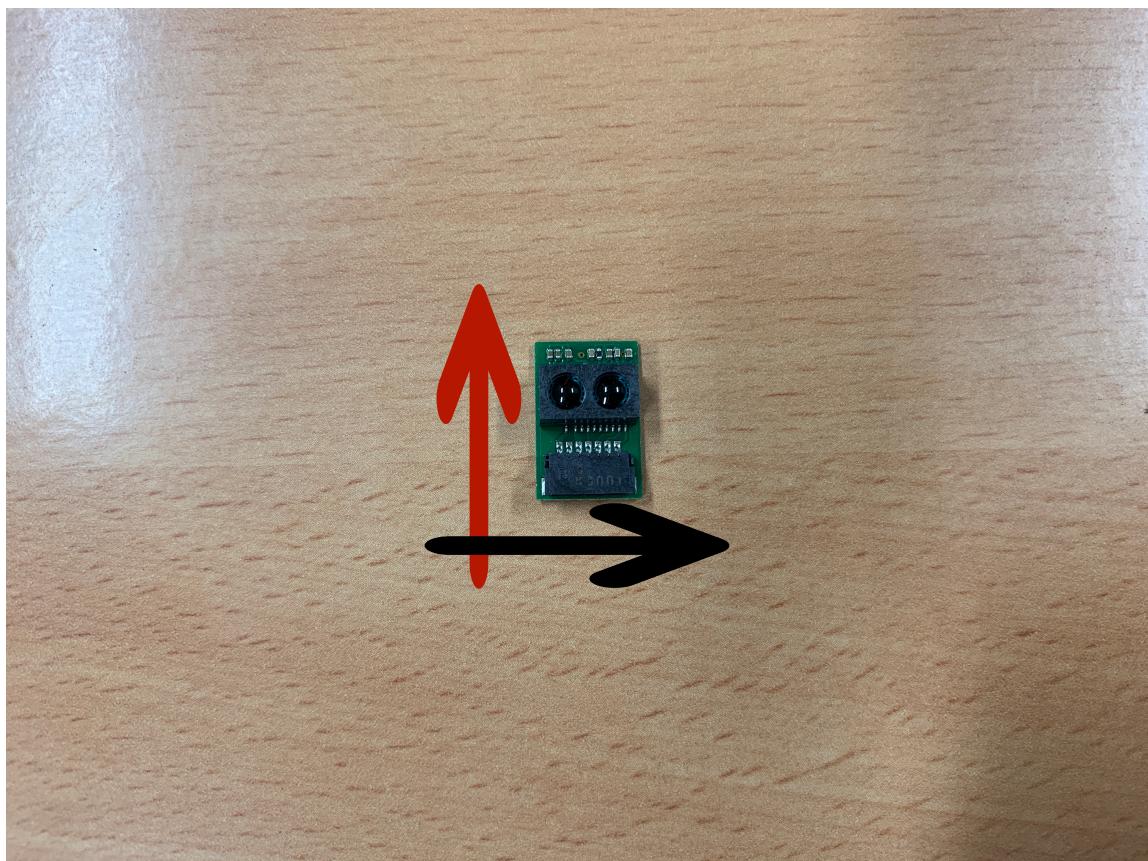


図 4.2: 移動物体に対する距離センサの設置方向概念図

# 第5章 実験:膝によるマウスカーソル操作の性能評価

## 5.1 目的

本実験では、膝によるマウスカーソル操作をフィットの法則に当てはめて、その特徴を明らかにし、性能を評価することである。

## 5.2 評価方法

実験の評価は、フィットの法則を用いて行う。フィットの法則は、式 5.2 によって表される。

$$MT = a + b \log_2 (D/W + 1) \quad (5.1)$$

式 5.2 に用いられている各係数は以下の通りである。

- $MT$ (Moving Time): フィットの法則から推定される、ポインティングするターゲットを選択するまでにかかる時間
- $a, b$ : ユーザと装置に依存する定数
- $D$ : ポインタがある場所からポインティングするターゲットまでの距離（ターゲット間距離）  
ここではターゲットが配置されている円の直径に近似する
- $W$ : 選択するポインティングするターゲットの幅
- $\log_2 (D/W + 1)$  [bit]: 課題の困難度を表す数値 Index of Difficulty(ID) と呼ばれる

ID が高くなればなるほど、それだけポインティングが難しくなり、MT も大きくなる。性能の評価には ID から課題を達成するのに要した時間を割った値 (Throughput, TP) が用いられる。TP は以下の式で表される。

$$TP = \frac{ID}{MT} \quad (5.2)$$

### 5.3 実験手順

実験には、ISO9241-411に記載されている、マルチディレクショナルポインティングタスクに基づいて製作したプログラムを使用した。図5.1はそのプログラムである。参加者は円周上に配置された13個のターゲットを、0から13の順に選択する。選択するべきターゲットは水色で示され、それ以外のターゲットは背景と同じ色で表される。ターゲットを1回選択することを1試行と数え、はじめに0番のターゲットを選択することを除いた13試行を1タスクと数える。膝を動かしてポインタを操作し、ターゲットとポインタが重なった時に選択を行う。本プログラムでは、選択操作は足ではなくキーボード上のEnterキーで行うようプログラムされている。実験条件として、ターゲット幅( $W$ )とターゲット間距離( $D$ )を次のように変化させた。

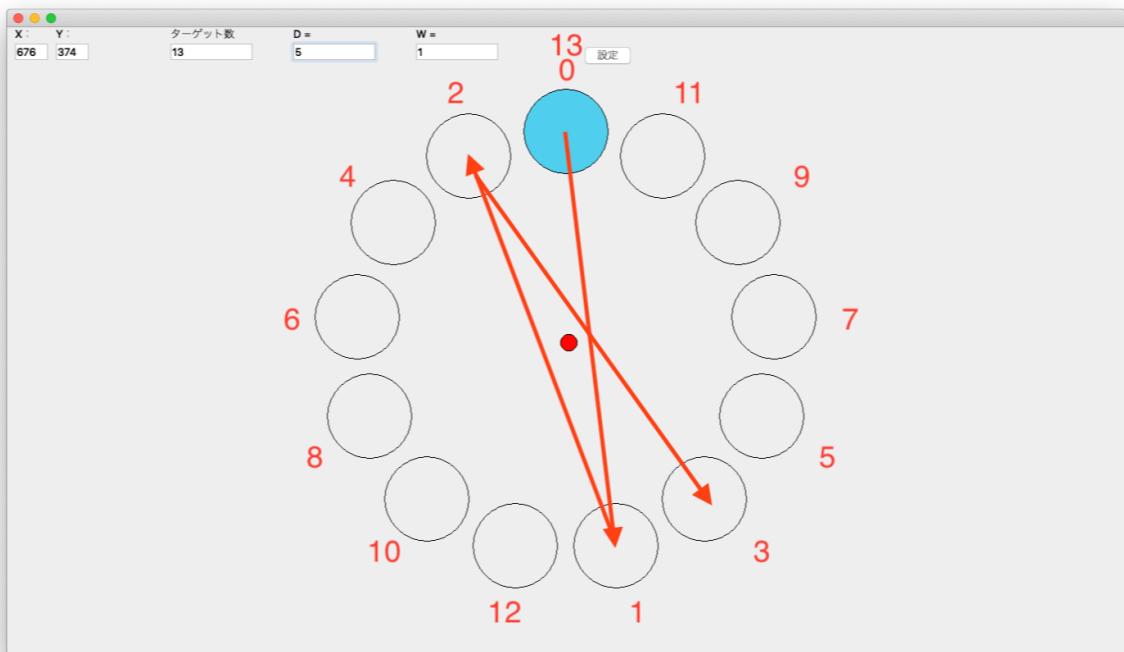


図5.1: 使用したプログラム

- $D: 2.0, 5.0, 8.0$  (インチ)
- $W: 0.5, 1.0, 1.5$  (インチ)

これにより得られる、以下の9つのIDの条件を1タスクずつ行う。これを1セッションと数える。

- $ID =: \{1.22, 1.59, 2.12, 2.32, 2.59, 2.66, 3.17, 3.46, 4.09\}$

実験は両膝について3セッションずつ行うものとし、片膝について行うことを行いうことを1ピリオドと数える。したがって、参加者1人につき、2ピリオド(左右の膝)  $\times$  13(ターゲット数)  $\times$  9(条件)  $\times$  3

(セッション) =702 試行を行う。試行ごとに、ターゲット選択に要した時間を収集した。1セッション終了ごとに3分間、1ピリオド終了後に10分間の休憩時間を設けた。参加者はセッションの開始前にプロトタイプを設置した机の前に座り、膝を動かすことができる範囲を決定するためのキャリブレーションを行う。したがって、実験全体では6回キャリブレーションを行う。ピリオドの最初のセッションでは、キャリブレーション後に練習時間を5分設けた。

2ピリオド終了後にアンケートを行った。アンケートは操作の使いやすさ、快適さ、スムーズさ、肉体的難しさ、精神的難しさと腹部、太もも、ふくらはぎ、足の疲労感を5点リッカート尺度で評価するものとした。

本実験には3名が参加した。全て男性であり、年齢はそれぞれP1:22歳、P2:24歳、P3:22歳である。P1,P3は左膝・右膝、P2は右膝・左膝の順でそれぞれ実験を行なった。

## 5.4 収集データ

解析のために収集したデータは次のとおりである。

- 試行ごとのターゲットの選択に要した時間
- その試行でターゲット選択が正しくできたかを表すフラグ

## 5.5 実験結果

図5.2は左膝の、図5.3は右膝の実験結果を表す。横軸は式5.2におけるID、縦軸は選択時間であり、グラフには各参加者の選択時間と、選択時間を元に線形回帰で求めた直線が描かれている。

図5.4は両膝のエラー率を表す。横軸は参加者であり、縦軸はエラー率が百分率で表される。グラフには参加者ごとにセッション1,2,3のエラー率が棒グラフで表され、全セッションの平均エラー率が折れ線グラフで表されている。

図5.5は参加者ごとに左膝、右膝のスループットを計算した結果である。縦軸はスループットの値で、横軸は3人の参加者と平均を表している。スループットの平均は、左膝で1.497[bit/s]、右膝で1.540[bit/s]であった。t検定を行なったところ、左右の膝のスループットに有意な差はなかった( $t = -0.151, df = 4$ )。

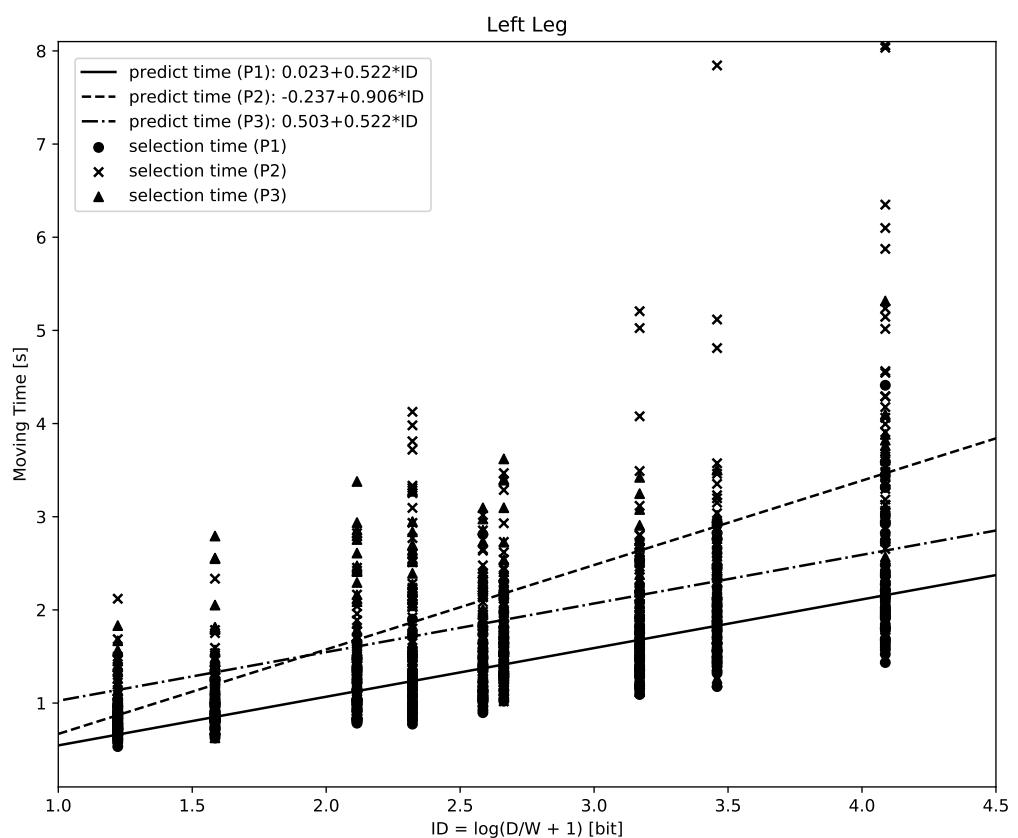


図 5.2: 左膝の選択時間とそのモデル

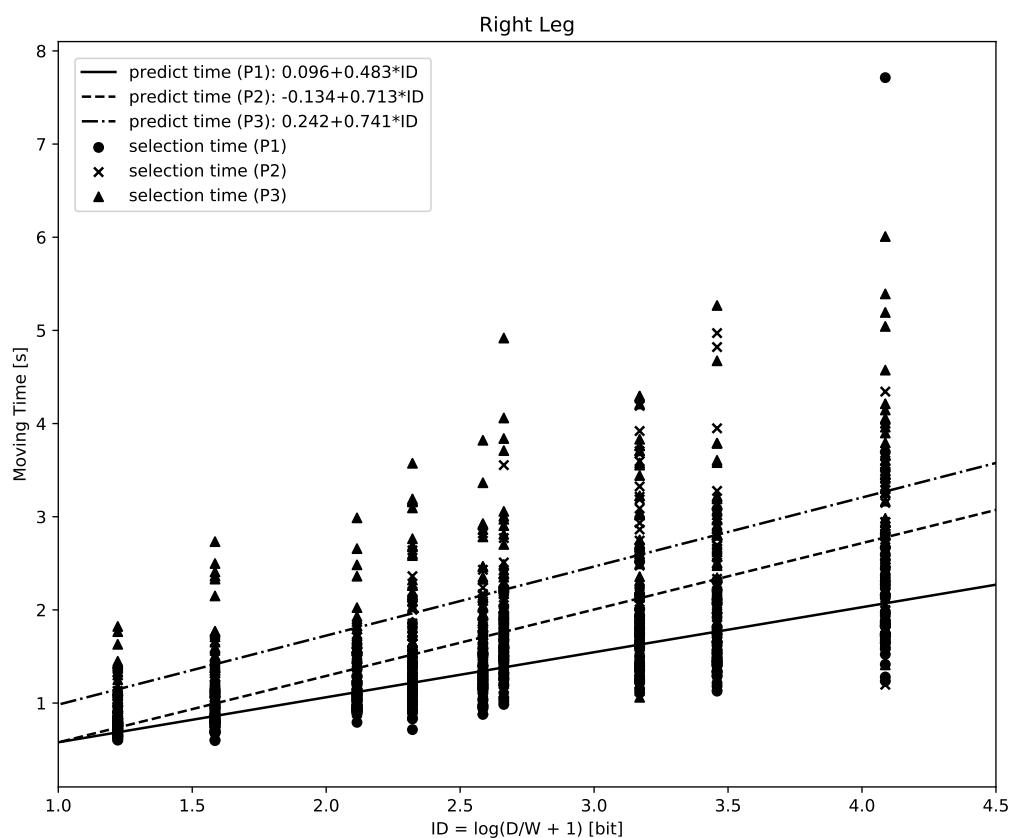


図 5.3: 右膝の選択時間とそのモデル

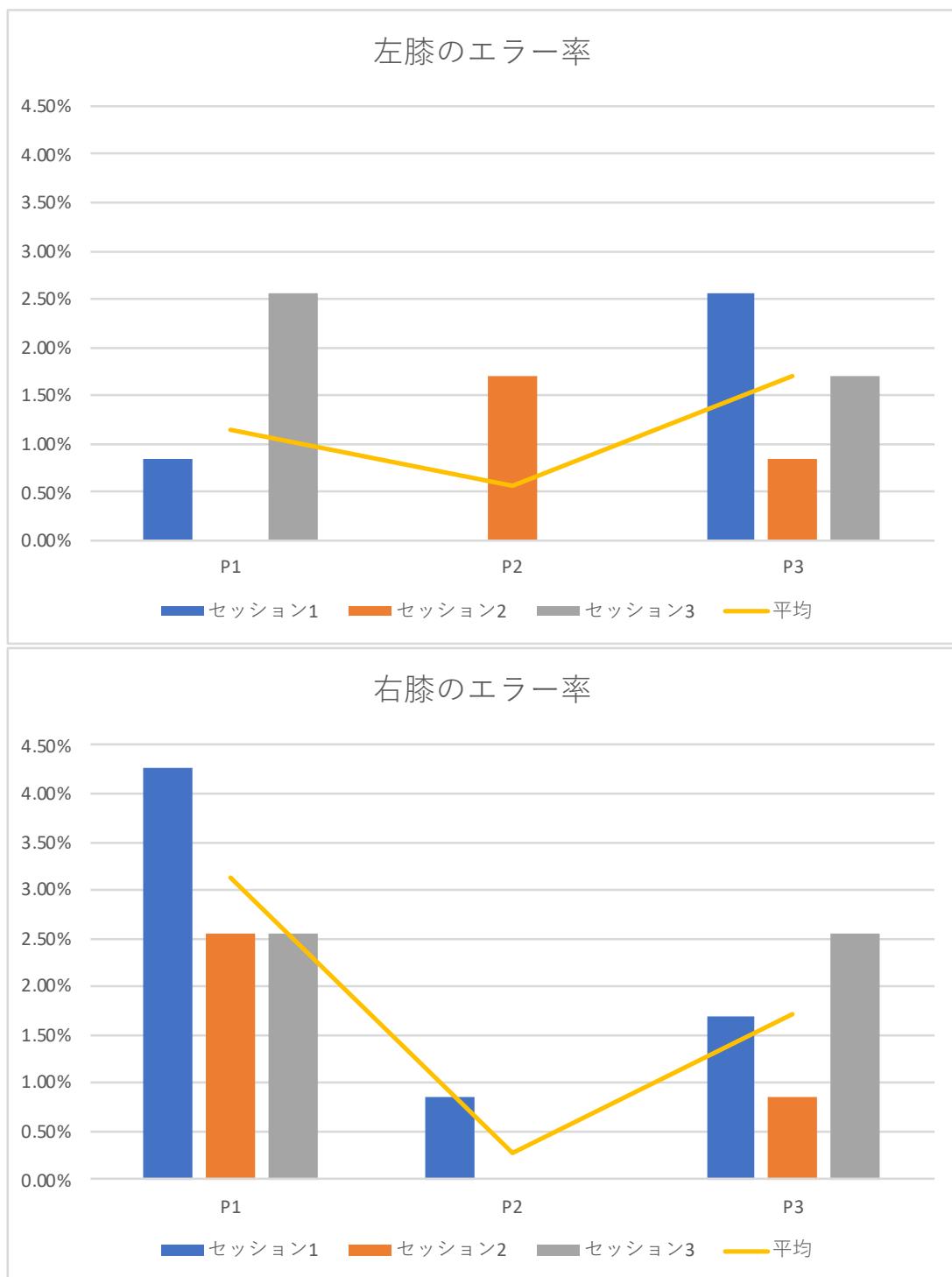


図 5.4: 両膝のエラー率

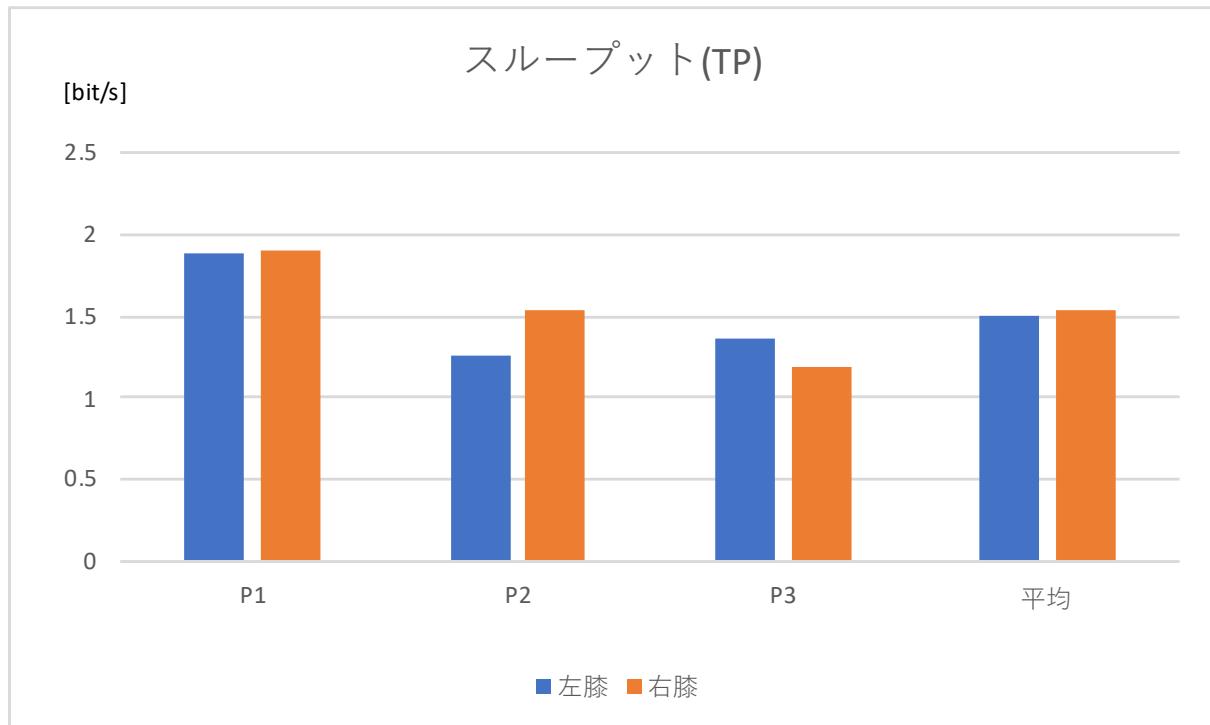


図 5.5: 両膝のスループット

## **第6章 議論**

## 第7章 結論

# 謝辞

## 参考文献

- [1] Thomas Augsten, Konstantin Kaefer, René Meusel, Caroline Fetzer, Dorian Kanitz, Thomas Stoff, Torsten Becker, Christian Holz, and Patrick Baudisch. Multitoe: High-precision interaction with back-projected floors based on high-resolution multi-touch input. In *Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pp. 209–218, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [2] W. K. English, D. C. Engelbart, and M. L. Berman. Display-selection techniques for text manipulation. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol. HFE-8, No. 1, pp. 5–15, March 1967.
- [3] Mingming Fan, Yizheng Ding, Fang Shen, Yuhui You, and Zhi Yu. An empirical study of foot gestures for hands-occupied mobile interaction. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '17, pp. 172–173, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [4] 奥村典明. モバイル環境における足入力インターフェースの研究, 2011.
- [5] G. Pearson and M. Weiser. Of moles and men: The design of foot controls for workstations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '86, pp. 333–339, New York, NY, USA, 1986. ACM.
- [6] Glenn Pearson and Mark Weiser. Exploratory evaluations of two versions of a foot-operated cursor-positioning device in a target-selection task. *SIGCHI Bull.*, Vol. 19, No. 3, pp. 70–75, January 1988.
- [7] Daniel Horodniczy and Jeremy R. Cooperstock. Free the hands! enhanced target selection via a variable-friction shoe. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 255–259, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [8] Jason Alexander, Teng Han, William Judd, Pourang Irani, and Sriram Subramanian. Putting your best foot forward: Investigating real-world mappings for foot-based gestures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 1229–1238, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [9] Teng Han, Jason Alexander, Abhijit Karnik, Pourang Irani, and Sriram Subramanian. Kick: Investigating the use of kick gestures for mobile interactions. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, pp. 29–32, New York, NY, USA, 2011. ACM.

- [10] 鈴木茂徳. フットワークインタラクションのための測域センサによる足の位置・動作の認識手法, 2009.
- [11] Yasmin Felberbaum and Joel Lanir. Better understanding of foot gestures: An elicitation study. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 334:1–334:12, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [12] William Saunders and Daniel Vogel. Tap-kick-click: Foot interaction for a standing desk. In *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '16, pp. 323–333, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [13] Eduardo Velloso, Jason Alexander, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Interactions Under the Desk: A Characterisation of Foot Movements for Input in a Seated Position. In *15th Human-Computer Interaction (INTERACT)*, Vol. LNCS-9296 of *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*, pp. 384–401, Bamberg, Germany, September 2015.
- [14] 田中則子, 上田知生, 中尾恵, 佐藤哲大, 湊小太郎, 吉田正樹, 繁縁和美. 足指マウス開発にむけての基礎的検討：母指の運動特性. 生体医工学：日本エム・イー学会誌, Vol. 43, No. 4, pp. 790–794, dec 2005.
- [15] Fabian Göbel, Konstantin Klamka, Andreas Siegel, Stefan Vogt, Sophie Stellmach, and Raimund Dachselt. Gaze-supported foot interaction in zoomable information spaces. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, pp. 3059–3062, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [16] Vijay Dandur Rajanna. Gaze and foot input: Toward a rich and assistive interaction modality. In *Companion Publication of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '16 Companion, pp. 126–129, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [17] Robert Xiao, Teng Cao, Ning Guo, Jun Zhuo, Yang Zhang, and Chris Harrison. Lumiwatch: On-arm projected graphics and touch input. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 95:1–95:11, New York, NY, USA, 2018. ACM.