

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

机上で PC を使う作業中に、両手はキーボードなどの操作を行ったまま、足でマウスカーソルを操作する研究が行われている。しかし、先行研究では足に装置を取りつけなければならない、あるいは足先を用いた操作が多く、他の足を使ったインタラクションと組み合わせることができないという問題点が存在する。本研究では、机裏に設置した距離センサアレイにより、机の下の膝の位置を認識し、PC のマウスカーソル操作に応用することを提案する。距離センサ、Arduino、PC からなるハードウェアと、距離データのフィルタ処理、膝の位置認識、キャリブレーション、膝の位置からマウスカーソル座標への変換を行うソフトウェアからなるプロトタイプを実装した。また、プロトタイプを用いて実験を行い、膝によるマウスカーソル操作のフィットの法則モデルを示した。実験結果からプロトタイプの設計や、ユーザの操作性と疲労度に関する今後の課題を示す。

# 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 . . . . .	2
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 机上のコンピュータの操作という環境を想定した足による入力の研究 . . . . .	4
2.3 膝を入力手法として用いる研究 . . . . .	5
<b>第 3 章 膝位置認識システム</b>	<b>6</b>
3.1 概要 . . . . .	6
3.2 利用イメージ . . . . .	6
3.2.1 ワープロソフト利用時のマウスカーソル操作 . . . . .	6
3.2.2 画面を見ながら作業するときの画面操作 . . . . .	6
3.3 本研究で行う操作 . . . . .	9
<b>第 4 章 ユーザの膝の動作</b>	<b>10</b>
4.1 概要 . . . . .	10
4.2 膝の移動方法 . . . . .	11
4.2.1 左右方向 . . . . .	11
4.2.2 上下方向 . . . . .	12
<b>第 5 章 膝位置認識プロトタイプの実装</b>	<b>15</b>
5.1 ハードウェア . . . . .	15
5.2 ソフトウェア . . . . .	16
5.2.1 指数移動平均フィルタ . . . . .	16
5.2.2 膝の位置の計算 . . . . .	16
5.2.3 キャリブレーション . . . . .	17
5.2.4 カーソル座標への適用 . . . . .	17
<b>第 6 章 実験:膝によるマウスカーソル操作の性能評価</b>	<b>20</b>

6.1	目的	20
6.2	評価方法	20
6.3	実験手順	21
6.4	収集データ	22
6.5	実験結果	22
<b>第7章 議論と今後の展望</b>		<b>28</b>
7.1	ハードウェア設計	28
7.1.1	膝の運動の特徴	28
7.1.2	距離センサの個数	28
7.2	エラー率とキャリブレーション	28
7.3	操作性と疲労感の改善	29
<b>第8章 結論</b>		<b>30</b>
謝辞		31
参考文献		32

# 図 目 次

2.1 Multitoe[1] . . . . .	3
3.1 ワープロソフトの利用時に膝でマウスカーソルを操作するイメージ . . . . .	7
3.2 画面を見ながら作業をするイメージ . . . . .	8
4.1 膝によるマウスカーソル操作のイメージ . . . . .	10
4.2 左右方向の操作イメージ 1 . . . . .	11
4.3 左右方向の操作イメージ 2 . . . . .	12
4.4 上下方向の操作イメージ 1 . . . . .	13
4.5 上下方向の操作イメージ 2 . . . . .	14
5.1 プロトタイプの概念図 . . . . .	15
5.2 製作したプロトタイプの一部 . . . . .	18
5.3 移動物体に対する距離センサの設置方向概念図 . . . . .	19
6.1 使用したプログラム . . . . .	21
6.2 左膝の選択時間とそのモデル . . . . .	23
6.3 右膝の選択時間とそのモデル . . . . .	24
6.4 両膝のエラー率 . . . . .	25
6.5 両膝のスループット . . . . .	27

# 表 目 次

6.1 アンケートの結果 . . . . .	26
------------------------	----

# 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、パソコン用コンピュータやスマートフォンを操作する際、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ーフェースの研究は、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、机上で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。しかし、足によってマウスカーソルの操作を行うことで、両手はキーボード操作を行ったまま、マウスポインタの制御が可能になる。そのため、足を使ってマウスカーソル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]、足の位置によって摩擦力を変えることができる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の操作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。膝は足と比べて動かす時に動作が大きくなりにくく、足元よりも動かせる範囲が大きいと考える。また、先行研究では足先を用いる操作が多いのに対し、膝を使うものは少ない[2]ため、膝と足による操作の組み合わせによりさらなるインタラクションの拡張が可能である。

本研究では膝の位置を認識し、マウスカーソルの操作に適用する。膝の位置の認識には市販の距離センサを用い、これを10個並べた距離センサアレイと、Arduino、ソフトウェアからなるプロトタイプを製作する。ユーザは距離センサアレイを机の裏に設置し、机の下で膝を上下左右に動かすことでマウスカーソルの操作を行うことができる。

## 1.3 貢献

本研究の貢献を以下に述べる。

- 特別な装置を装着することがない膝の位置認識の提案と、膝によるマウスポインタ操作への応用を示した。
- 距離センサ 10 個を用いたプロトタイプを製作し、膝の位置を認識し、マウスカーソル操作へ応用した。
- プロトタイプを用いて、フィットの法則に基づく実験を行なった。

## 1.4 本論文の構成

第 1 章では、本研究の背景、目的とそれに対するアプローチについて述べた。第 2 章では、本研究に関連する研究について述べる。第 3 章では、膝位置認識システムの概要と利用イメージについて述べる。第 4 章では、本研究で提案する膝の認識におけるユーザの膝の動かし方について述べる。第 5 章では、膝の位置を認識し、マウスカーソルの座標に反映するためのプロトタイプの実装について述べる。第 6 章では、プロトタイプを用いて行なった、フィットの法則に基づいた実験とその結果について述べる。第 7 章では、プロトタイプについて現在わかっている問題点とそれに対する改善の方針を述べる。第 8 章では、本研究の結論を述べる。

## 第2章 関連研究

本章では、関連する研究について述べる。まず、現在広く行われている、足によるジェスチャ入力を行う研究について示す。次に本研究で想定する、机上におけるコンピュータの操作という環境を想定した足の入力の研究を示す。最後に、膝による入力を用いた研究を示す。

### 2.1 足をジェスチャ入力として用いる研究

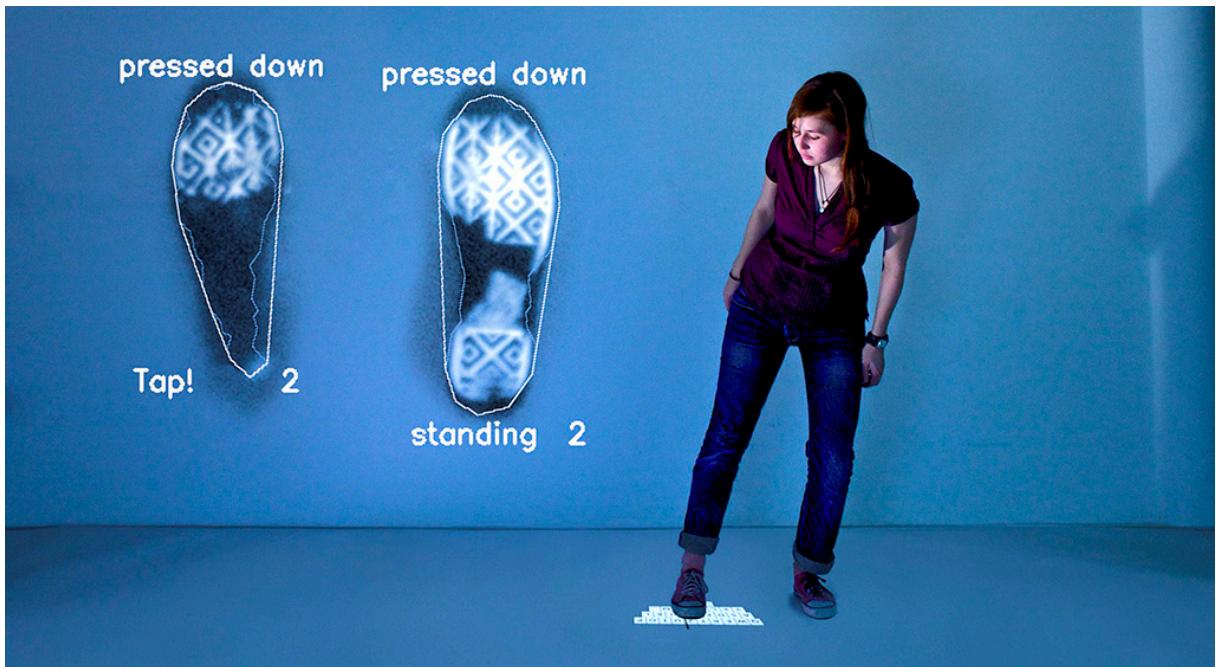


図 2.1: Multitoe[1]

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、外出時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、デスクトップ上で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 机上のコンピュータの操作という環境を想定した足による入力の研究

本節では、机上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。Felberbaum 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、本研究は足先では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事がわかった。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 膝位置認識システム

## 3.1 概要

本研究では、机の下の片方の膝の位置を認識する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. ユーザは机の裏に距離センサアレイを設置し、自分のPCと接続する。その後机の前に座り、膝を上下左右に動かす。
2. 距離センサアレイが、それぞれセンサと膝との距離を計測する。
3. 全ての距離センサの計測値は膝位置計算ソフトウェアに送信される。
4. ソフトウェアは、机に垂直な面において膝がどの位置にあるかを計算する。
5. 膝の位置に応じてアプリケーションを実行する。

この時ユーザは机の裏に距離センサアレイを設置し、PCと接続することのみを行い、膝には何も装着しない。

## 3.2 利用イメージ

### 3.2.1 ワープロソフト利用時のマウスカーソル操作

ワープロソフトを利用する時、手はキーボード上にあることが多い。しかし、文字色や文字サイズの変更、図の挿入など、コマンド入力で行うことができない操作を行う時、マウスやタッチパッドに手を移動させ、操作する場面が多い。そこで、膝によってマウスカーソルを操作することで手の移動を削減することができる。

### 3.2.2 画面を見ながら作業するときの画面操作

PCの画面を見ながら作業をする、例えば画面では回路図を写しながら、その回路図に従って電子回路を製作するときに、回路図をズームしたり別の回路図を見ようとすると、作業から手を離さなければいけない。そこで、膝を動かすことで手は作業に集中したまま画面の操作を行うことができる。図3.2は

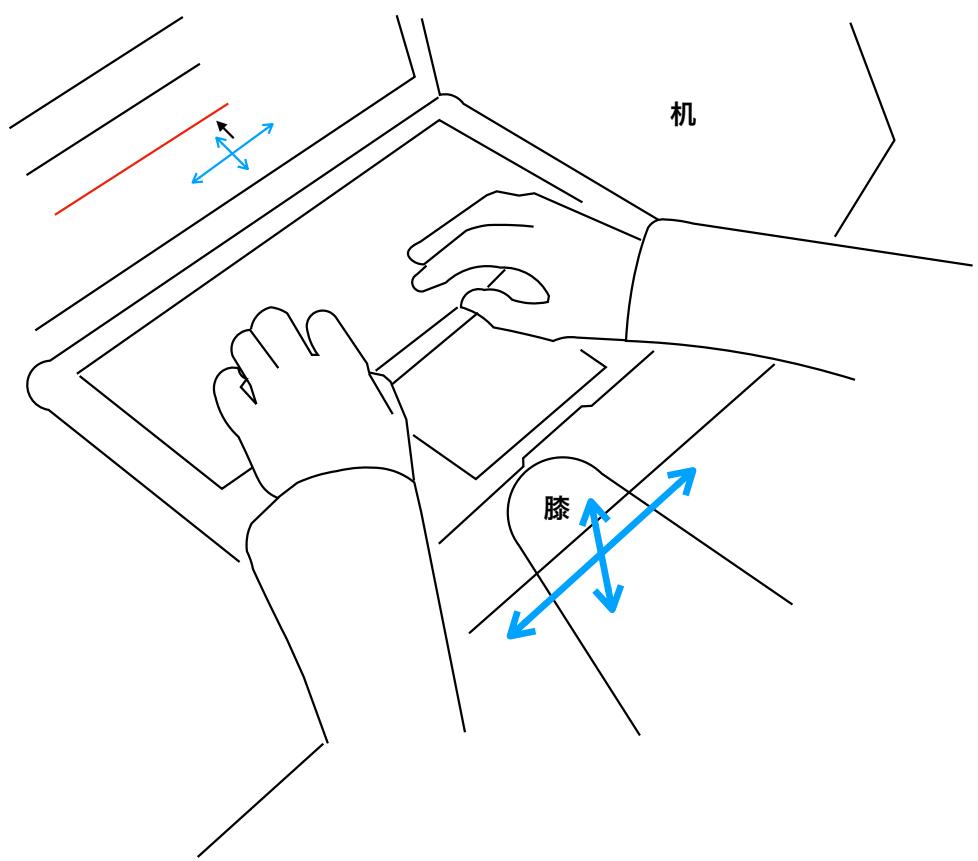


図 3.1: ワープロソフトの利用時に膝でマウスカーソルを操作するイメージ

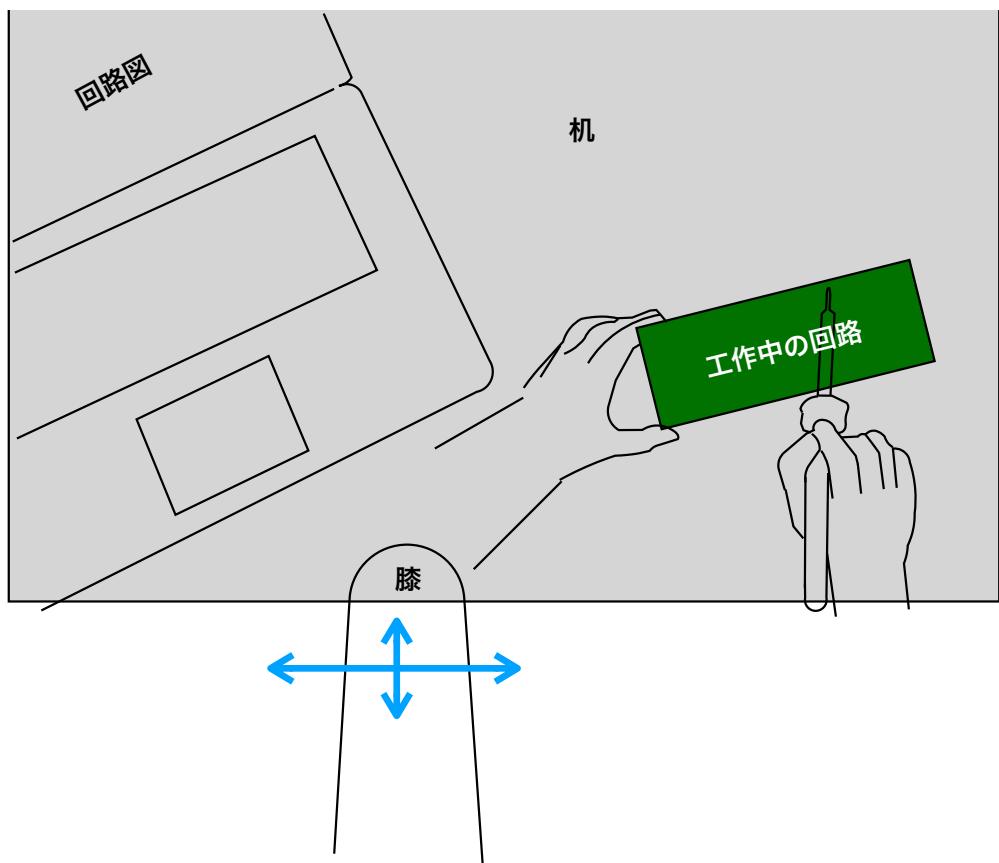


図 3.2: 画面を見ながら作業をするイメージ

### 3.3 本研究で行う操作

本研究では膝の位置を認識することで、3.2.1項で述べたようなマウスカーソル操作への応用を行う。これは、マウスカーソルのような繊細な操作を膝で行ったときの操作性や疲労感を明らかにし、膝による操作全体の改良を図るためである。

# 第4章 ユーザの膝の動作

## 4.1 概要

マウスやタッチパッドの操作と異なり、膝は前方や後方に動かすことはできない。そのため、本研究で想定する膝の移動は、膝を傾けることによる左右方向と、かかとを浮かせたり床につけたりすることによる上下方向の移動である。図4.1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。ユーザは水色の矢印で示される方向に膝を動かし、システムは鉛直面における膝の2次元座標を計算する。

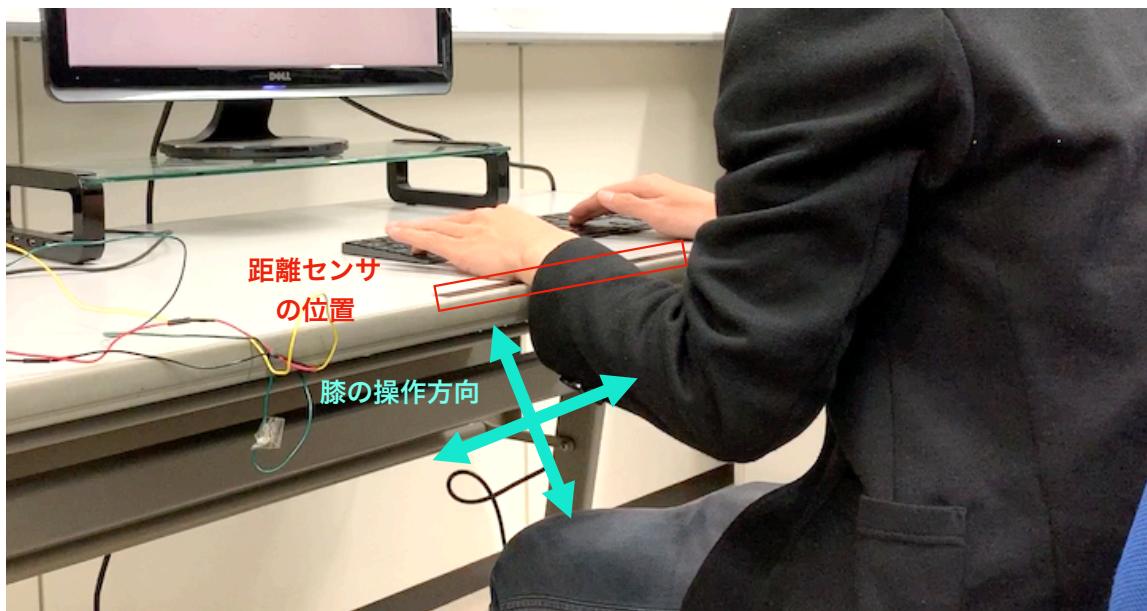


図4.1: 膝によるマウスカーソル操作のイメージ

## 4.2 膝の移動方法

### 4.2.1 左右方向

ユーザはマウスカーソルを左右に移動させたい時には、膝を左右に移動する。図4.2、図4.3は足を正面から見たときの左右方向の移動のイメージである。図4.2のように、このとき足先も同時に移動させ、足全体を移動させると、太ももに疲労が生じる。また、足に装置を取り付け、摩擦力を小さくするということも目的に反する。そこで図4.3のように、左右方向に移動する時に限っては、足の位置をなるべく固定し、膝を左右に傾けることで移動することとした。

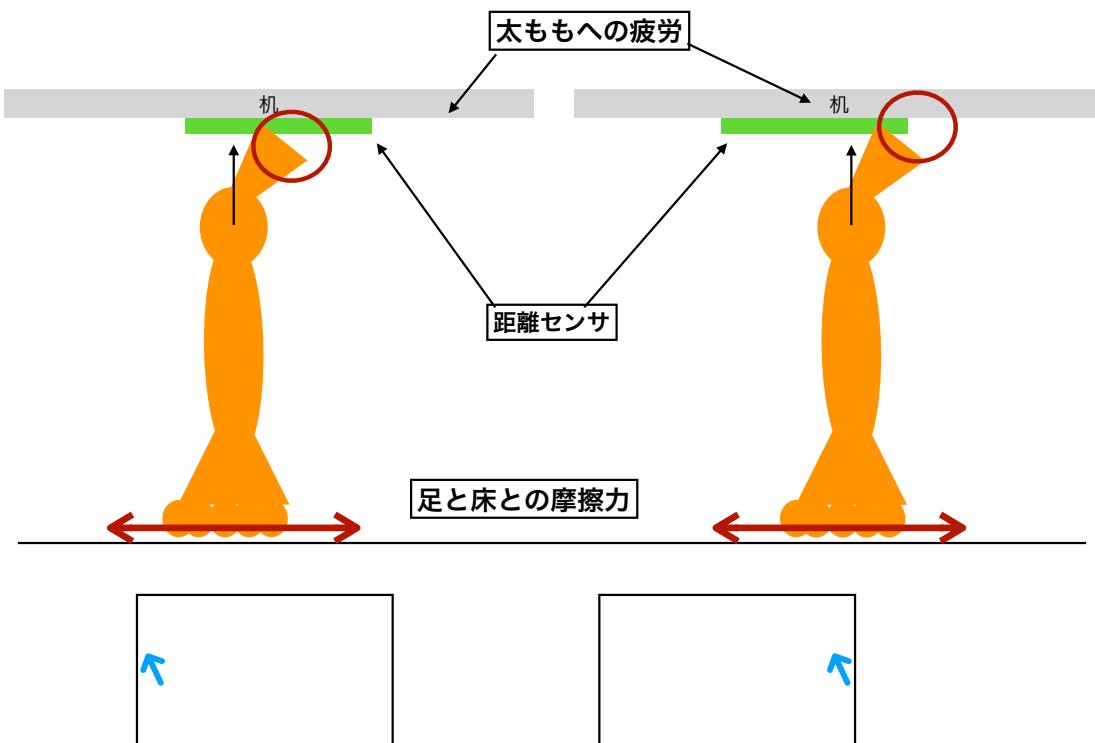


図4.2: 左右方向の操作イメージ1

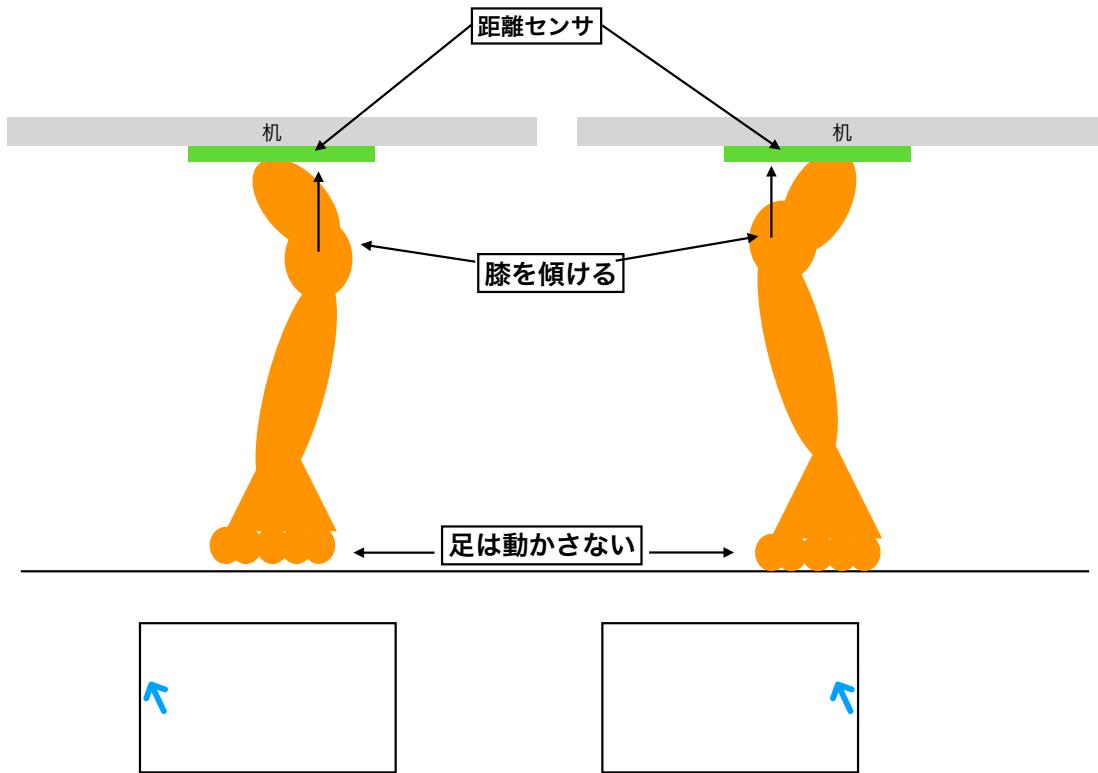


図 4.3: 左右方向の操作イメージ 2

#### 4.2.2 上下方向

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 4.4, 図 4.5 は、足を横から見たときの上下方向の移動のイメージである。

図 4.4 に示されているような移動方法は、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カーソルを移動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、疲労が生じてしまう。そこで図 4.5 のように移動することで、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。

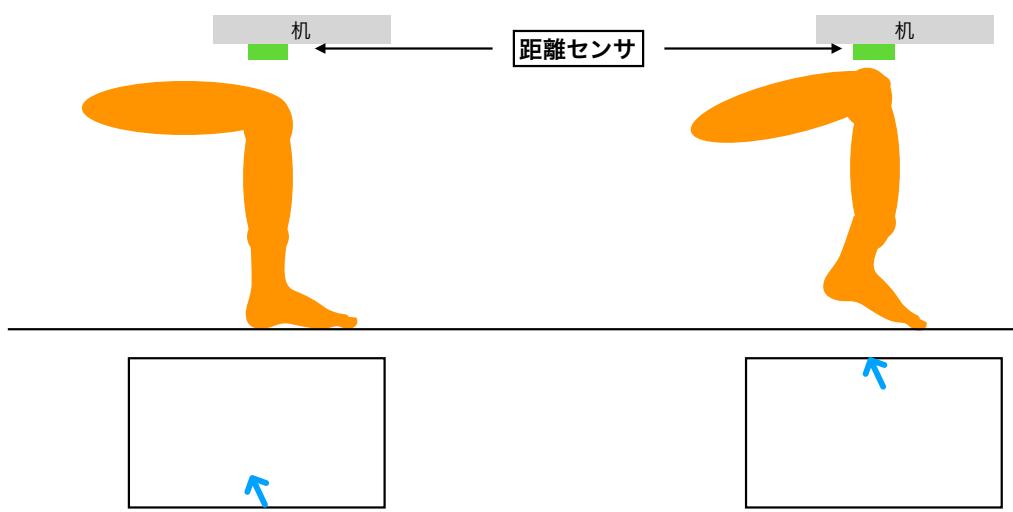


図 4.4: 上下方向の操作イメージ 1

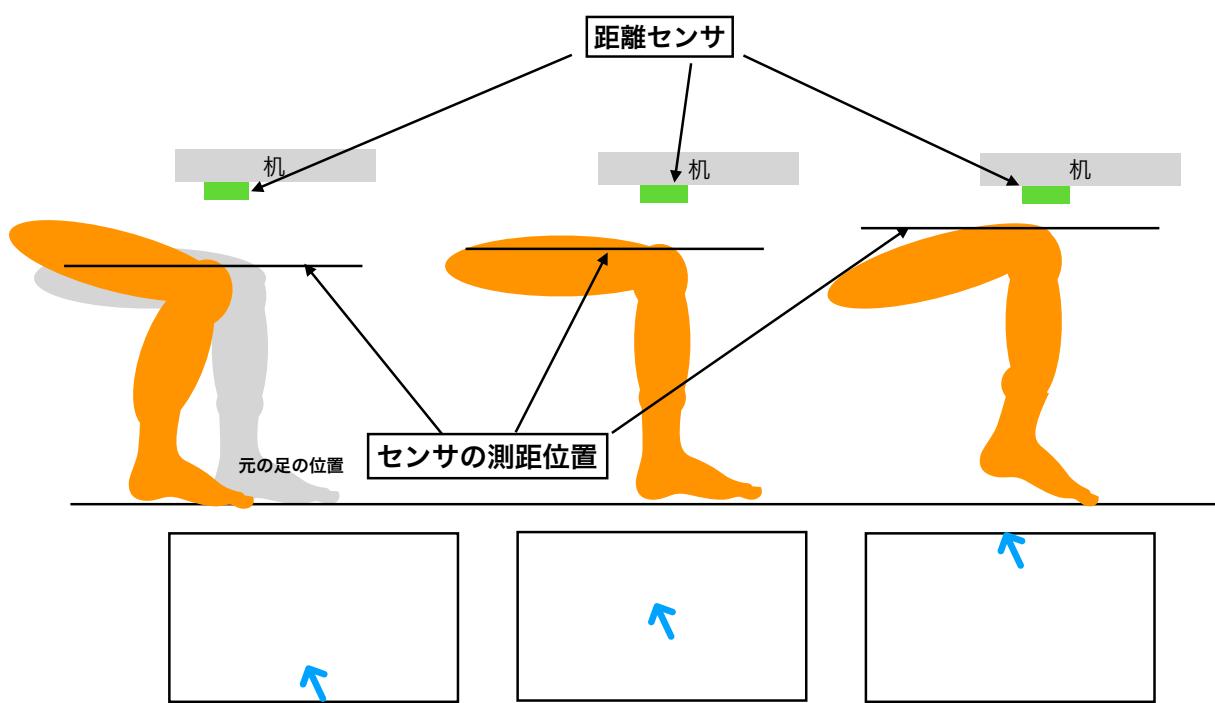


図 4.5: 上下方向の操作イメージ 2

# 第5章 膝位置認識プロトタイプの実装

本章では、第4章で述べた膝の位置を認識し、マウスカーソルに適用するプロトタイプの実装について述べる。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、Arduino、パーソナルコンピュータからなる。ソフトウェアではセンサから距離データを取得し、フィルタ処理、膝の位置の計算を行う。図5.1に、プロトタイプの概要を示す。



図 5.1: プロトタイプの概念図

## 5.1 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5.2

<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)

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5.3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。

## 5.2 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。膝の位置の計算には、Xiaoら[17]の方法を参考にした。PC上のプログラムでは、以下の4点を行う。

- シリアル通信で受信した距離データを指数移動平均フィルタにかける。
- 膝の位置を計算する。
- キャリブレーションを行う。
- 膝の位置をマウスカーソルの座標に変換する。

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。

### 5.2.1 指数移動平均フィルタ

指数移動平均フィルタは、時間の経過とともに重みを指数関数的に減少させるフィルタである。現在の時刻のデータを最も重視する一方で、とても古いデータについても重みを完全に0とせず、考慮に入れるという特徴を持つ。重みの減少度合いは平滑化係数 $\alpha$ を用いて表される。本プロトタイプでは、調整の結果 $\alpha = 0.1, 0.65$ の2つを使用している。時間 $t$ の距離データ $s_t$ に対しフィルタリング後の値 $D^t$ を以下のように計算し、フィルタを実装した。

$$D^t = \alpha(s^t - D^{t-1}) + D^{t-1} \quad (5.1)$$

### 5.2.2 膝の位置の計算

時間 $t$ における膝の位置 $(K_x^t, K_y^t)$ を次のように計算する。

1. 各距離センサの値を $\alpha = 0.1$ の指数移動平均フィルタにかける。これを $D_i^t$ と表す。ただし、 $i$ は距離センサの番号を表し、図5.2の一番左の距離センサから順に $i = 0, 1, \dots, 9$ と番号を振ることとする。

2.  $K_y^t$  を  $D_i^t$  の最小値とする.

$$K_y^t = \min_i(D_i^t) \quad (5.2)$$

3.  $i$  番目の距離センサについて, 重み  $w_i$  を式 5.3 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.

$$w_i = \frac{1}{D_i^t - K_y^t + d} \quad (5.3)$$

4.  $w_i$  から,  $K_x^t$  を計算する.

$$K_x^t = \frac{\sum_i i w_i}{\sum_i w_i} \quad (5.4)$$

5. 得られた  $(K_x^t, K_y^t)$  を  $\alpha = 0.65$  の指数移動平均フィルタにかける.

### 5.2.3 キャリブレーション

5.2.2 項で行なった, 時間  $t$  の膝の位置をマウスカーソルの座標に変換するために, キャリブレーションとしてユーザの膝の位置を記録する. キャリブレーションは, ユーザが膝を動かしたい上下左右の限界点と, マウスカーソルがディスプレイのちょうど真ん中になる時の膝の位置の 5 点で行う. 膝の位置の計算には指平均平滑フィルタを使っているため, 最初の数フレームは実際とは異なる値が出力されてしまう. そのため, 膝の位置を 100 フレーム取得し, 最後のフレームをその位置の限界点と定める. こうして得た上下左右および真ん中の点を  $(C_{upper}, C_{lower}, C_{left}, C_{right}, (C_{center_x}, C_{center_y}))$  と表す.

### 5.2.4 カーソル座標への適用

5.2.2 項で計算された時間  $t$  における膝の位置  $(K_x^t, K_y^t)$  を, 5.2.3 項で得たキャリブレーションをもとに, コンピュータのディスプレイ上のカーソル座標  $(P_x^t, P_y^t)$  へと次のように変換する. なお, ここではサイズが  $(W_x, W_y)$  のディスプレイを想定している.

$$P_x^t = \begin{cases} \frac{(K_x^t - C_{left}) \left( \frac{W_x}{2} \right)}{C_{center_x} - C_{left}} & (K_x^t < C_{center_x}) \\ \frac{(K_x^t - C_{center_x}) \left( \frac{W_x}{2} \right)}{C_{right} - C_{center_x}} & (C_{center_x} \leq K_x^t) \end{cases} \quad (5.5)$$

$$P_y^t = \begin{cases} (K_y^t - C_{upper}) \left( \frac{W_x}{2} \right) & (K_y^t < C_{center_y}) \\ \frac{C_{center_y} - C_{upper}}{C_{lower} - C_{center_y}} & (C_{center_y} \leq K_y^t) \\ (K_x^t - C_{center_y}) \left( \frac{W_x}{2} \right) & \end{cases} \quad (5.6)$$

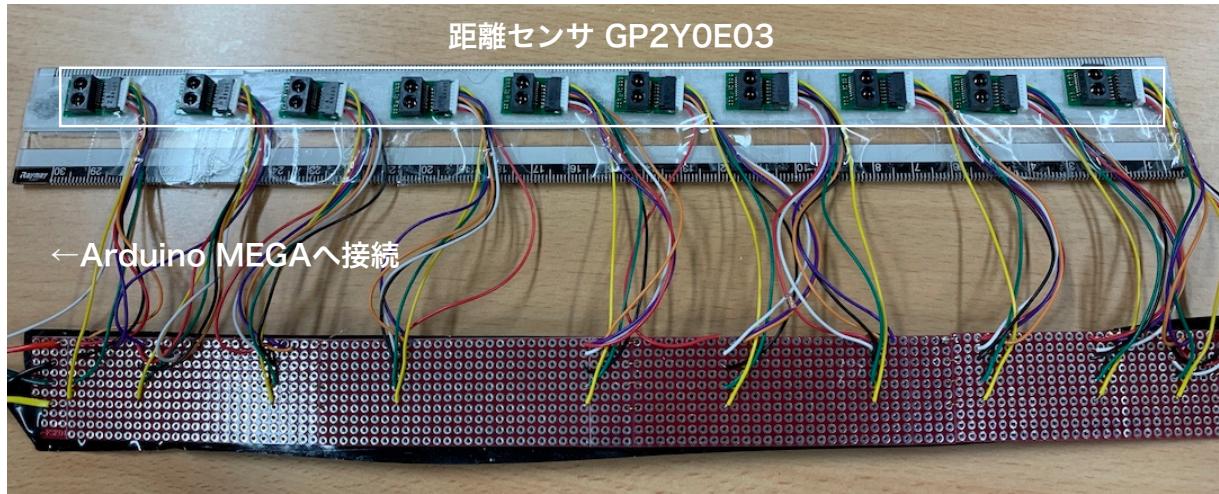


図 5.2: 製作したプロトタイプの一部

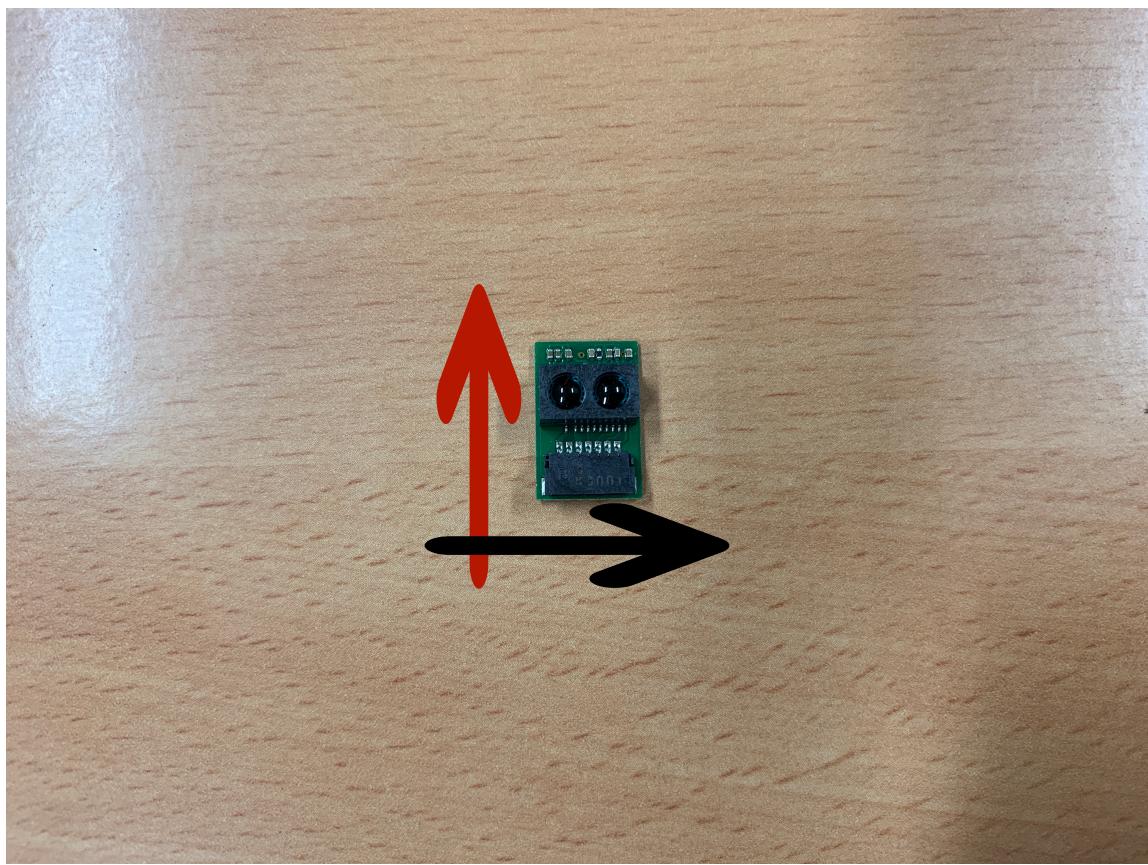


図 5.3: 移動物体に対する距離センサの設置方向概念図

# 第6章 実験:膝によるマウスカーソル操作の性能評価

本章では、製作したプロトタイプを用いて膝によるマウスカーソル操作の特徴について実験を行う。

## 6.1 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する。

## 6.2 評価方法

実験の評価は、フィットの法則 [18] を用いて行う。フィットの法則は、式 6.2 によって表される。

$$MT = a + b \log_2 (D/W + 1) \quad (6.1)$$

式 6.2 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。

$$TP = \frac{ID}{MT} \quad (6.2)$$

### 6.3 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6.1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。

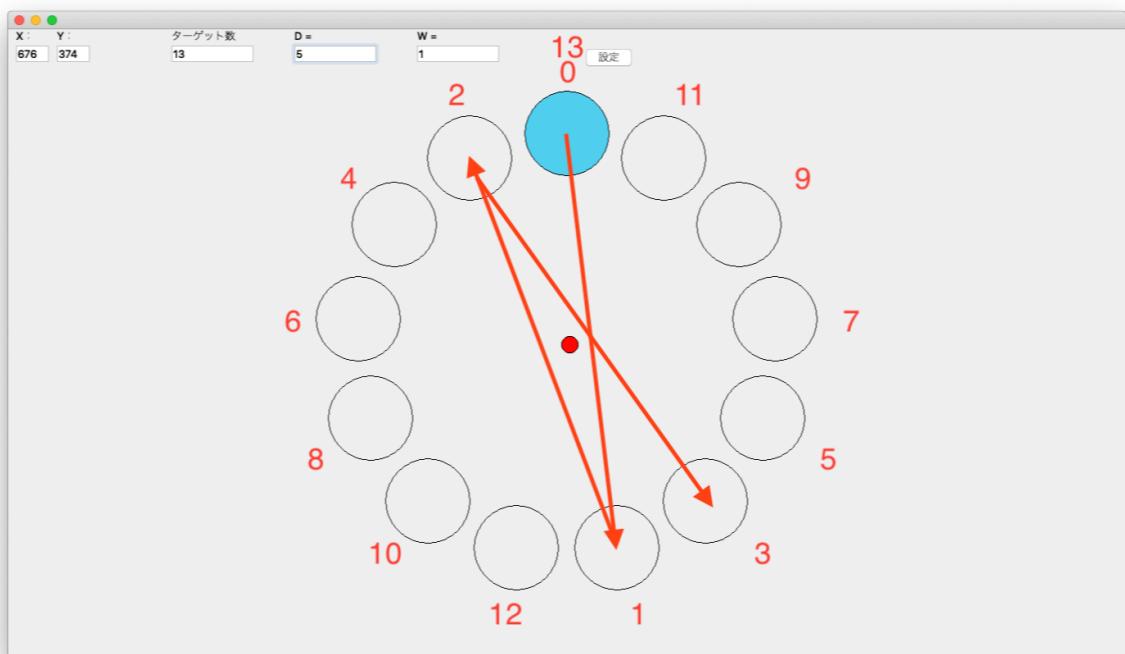


図 6.1: 使用したプログラム

- $D: 2.0, 5.0, 8.0$  (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。

## 6.4 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

## 6.5 実験結果

図6.2は左膝の、図6.3は右膝の実験結果を表す。横軸は式6.2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6.4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。全参加者のエラー率の平均は、左膝で1.14%、右膝で1.71%であった。

図6.5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( $t = -0.151, df = 4$ )。表6.1にアンケートの結果を示す。

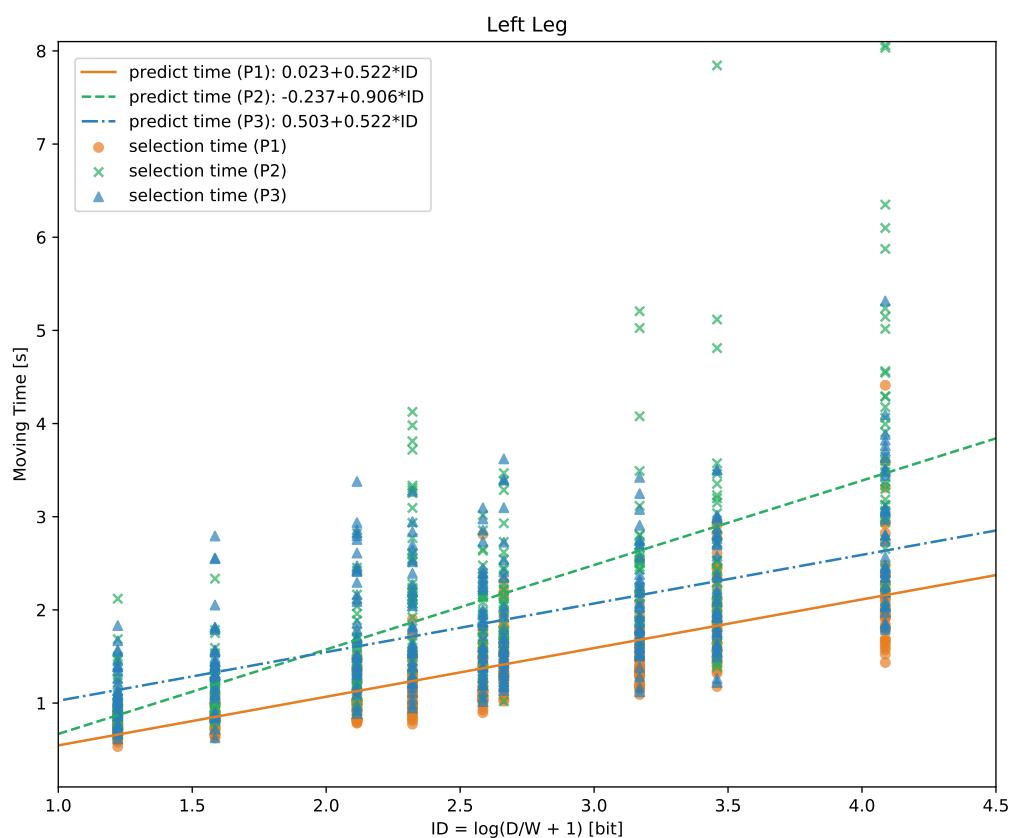


図 6.2: 左膝の選択時間とそのモデル

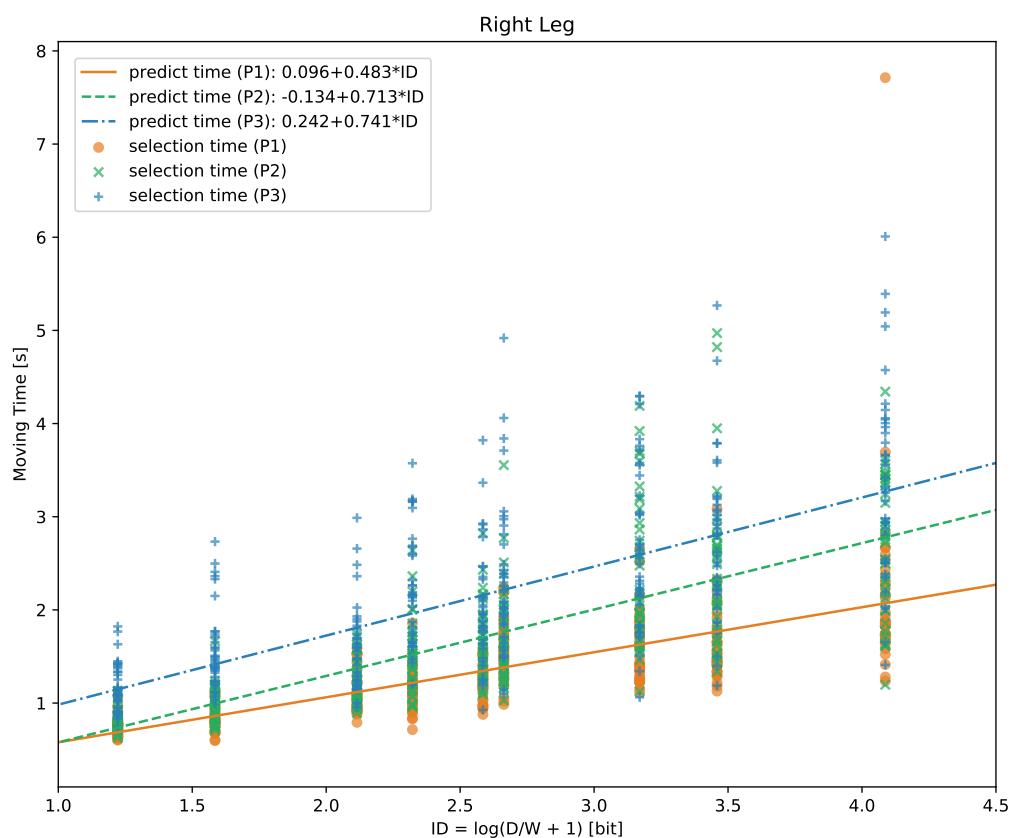


図 6.3: 右膝の選択時間とそのモデル

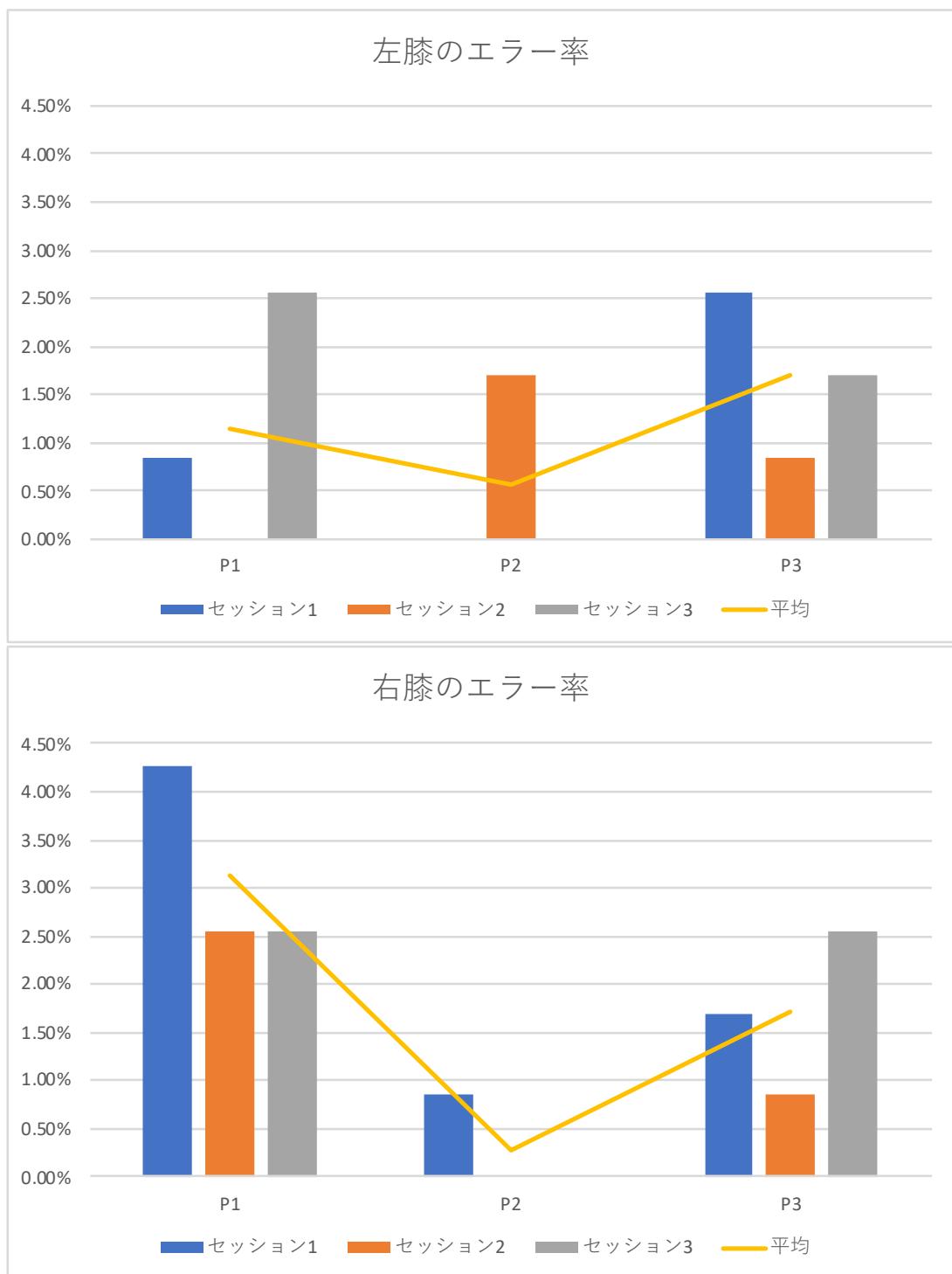


図 6.4: 両膝のエラー率

表 6.1: アンケートの結果

	P1	P2	P3	平均
操作の使いやすさ (1: 使いにくい - 5:使いやすい)	4	4	3	3.67
操作の快適さ (1: 快適でない - 5:快適である)	4	3	3	3.33
操作のスムーズさ (1: スムーズでない - 5:スムーズである)	4	3	3	3.33
肉体的な難しさ (1: 簡単である - 5:難しい)	3	1	4	2.67
精神的な難しさ (1: 簡単である - 5:難しい)	2	1	2	1.67
腹部の疲労感 (1: 疲れていない - 5:疲れている)	1	1	1	1.00
太ももの疲労感 (1: 疲れていない - 5:疲れている)	4	1	3	2.67
ふくらはぎの疲労感 (1: 疲れていない - 5:疲れている)	3	1	2	2.00
足の疲労感 (1: 疲れていない - 5:疲れている)	4	1	3	2.67

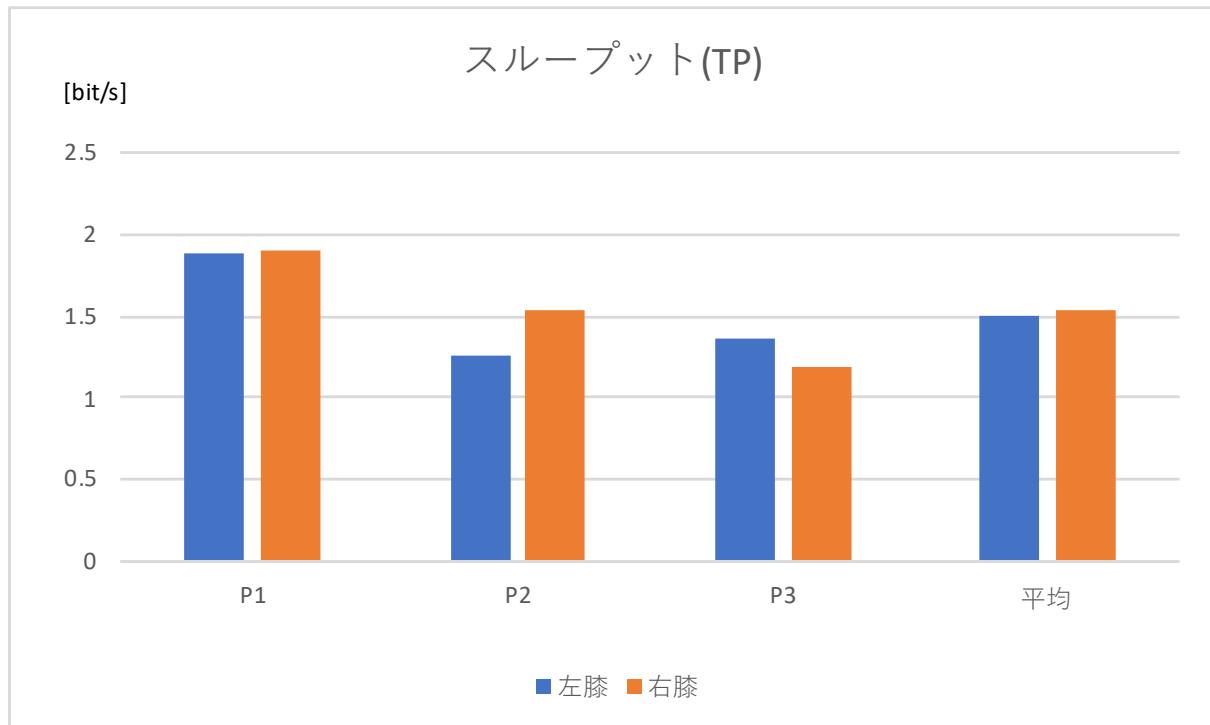


図 6.5: 両膝のスループット

# 第7章 議論と今後の展望

本章では、現在分かっているプロトタイプの問題点と、実験の結果を受けて明らかになった膝の操作やプロトタイプの問題点について議論を行い、今後の展望について示す。

## 7.1 ハードウェア設計

### 7.1.1 膝の運動の特徴

今回のプロトタイプの設計は、直定規に距離センサを貼り付けたため、直線的な形状となった。しかし、膝を左右に傾ける時、膝の運動は直線運動ではなく円弧に近い運動をする。そのため膝がハードウェアの両端付近にある場合と中心付近にある場合とでは、ユーザが水平にカーソルを移動したいと思っても、上下にカーソルがずれてしまう問題が発生する。加えて、ユーザの足の長さによって描く円弧の半径は異なると考える。このことから、ハードウェアは直線形状ではなく円弧に近い形にする必要があり、さらにその形状も、ユーザによって簡単に変えることができるような設計が求められる。そのために、膝の運動のユーザ間での違いについてより詳細な分析も必要となる。

### 7.1.2 距離センサの個数

今回のプロトタイプでは距離センサを10個をそれぞれ30mmの間隔で配置した。この設計について、距離センサの数や配置の間隔を増減させた時にも同様なマルチディレクショナルポインティングタスクの実験を行うことで、最適な設計を導きたい。

## 7.2 エラー率とキャリブレーション

第6章で行なった実験の結果、膝による操作での選択ミス率は左膝で1.14%、右膝で1.71%であり、Horodniczyら[7]やVellosoら[13]の手法の結果よりも低い値であった。原因として以下の3点が考えられる。

1点目はキャリブレーションを1セッションごと、計6回と多く行なっていたことである。このため、キャリブレーションの回数を減らすことでエラー率やスループットにどのような影響を与えるかを調査する必要がある。2点目は膝はカーソル操作のみを行い、選択操作はキーボードのEnterキーで行なっていたことである。したがって、マウスの機能をすべて膝と足のみを使って実現した場合、エラー率が変化する可能性がある。3点目はポインティングタスクの難易度である。

今回の実験では、ID の最大は 4.09[bit] であったが、最大 5.67[bit] で行う実験も存在した [7, 13]. したがって、より ID の高い条件での実験を行う必要がある。

### 7.3 操作性と疲労感の改善

第 3 章にて、上下方向の膝の動かし方を疲労感を考慮したものとした。しかしアンケートでは、P1 は太ももと足に疲労を感じると回答しており、今後動かし方をさらに見直し、足の操作の疲労感を改善する工夫が必要である。アンケートからはさらに、操作の使いやすさ、快適さ、スムーズさにも改善の余地があるとわかる。7.1 節で述べたハードウェアの改善を行うことで、操作性についても改善を図る。

## 第8章 結論

本研究では特別な装置を足に装着することなく、かつ簡単な設置方法で足によるコンピュータの操作を可能にすることを目的とし、アプローチとして机の裏に設置した距離センサアレイと Arduino からなるハードウェアと、膝の位置を認識するソフトウェアからなるプロトタイプを製作し、膝の位置を認識するためのプログラムを実装した。また、膝の位置をコンピュータ上のマウスカーソルの位置に反映させ、膝を用いたマウスカーソル操作に適用した。特徴や性能を調査するために、ISO9241-411 に準拠したマルチディレクショナルポインティングタスクを用いた実験を行い、フィットの法則モデルを示した。

今後は膝の運動の調査とそれに合わせたハードウェアの設計、条件やキャリブレーションの回数を変化させた実験などを行い、さらなる操作性の向上を目指す。

## 謝辞

本論文の執筆に際し、指導教員である高橋伸准教授と志築文太郎准教授には多大なご助力を賜り、深く感謝を申し上げます。特に高橋伸准教授には研究の方針や内容について多くの指針やアドバイスを頂きました。心より御礼申し上げます。また、インタラクティブプログラミング研究室の皆様には、研究や研究室生活において様々なご助言をいただきました。特にUBIQUITOUSチームの皆様にはチームゼミをはじめ、設計や論文執筆時の添削など多くの点でご支援をいただき、深く感謝を申し上げます。最後に、研究室生活を支えてくださった家族、友人、研究においてお世話になった方々に感謝を申し上げます。

## 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, 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.
- [18] P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, Vol. 47, No. 6, pp. 381–391, 1954.