

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

机上でコンピュータを使う作業中に、両手はキーボード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、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った問題点が存在する。本研究では、机裏に設置した距離センサアレイにより、膝の位置を認識し、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、マイコン、コンピュータ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性能を評価した。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

第1章	序論	1
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
第2章	関連研究	3
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を想定した足を用いた入力の研究	3
2.3	膝を入力手法として用いる研究	4
第3章	膝によるマウスカーソル操作手法	6
3.1	概要	6
3.2	膝の移動方法	7
3.3	利用イメージ	10
3.3.1	ワープロソフト利用時のマウスカーソル操作	10
3.3.2	画面に表示した回路図を見ながら電子工作をするときの画面操作	10
第4章	膝位置認識とカーソル座標計算を行う プロトタイプの実装	12
4.1	概要	12
4.2	ハードウェア	13
4.3	膝の位置の計算	14
4.3.1	指数移動平均フィルタ	14
4.3.2	膝位置認識	14
4.4	膝の位置からカーソル座標への変換	15
4.4.1	キャリブレーション	15
4.4.2	カーソル座標への適用	15
第5章	膝によるマウスカーソル操作の性能評価	17
5.1	目的	17
5.2	評価方法	17
5.3	実験手順	17

5.4	実験機器	19
5.5	収集データ	19
5.6	実験結果	20
5.7	考察	24
5.7.1	エラー率とキャリブレーション	24
5.7.2	操作性と疲労感の改善	24
第 6 章	今後の展望	25
第 7 章	結論	26
	謝辞	27
	参考文献	28
付 録 A	実験後アンケート用紙	30

図目次

2.1	English[1] らの膝操作手法	5
3.1	膝によるマウスカーソル操作のイメージ	6
3.2	膝の上下左右への移動イメージ	7
3.3	かかとを浮かせて膝を近づけ、足を引き膝を遠ざけるイメージ	8
3.4	かかとを浮かせるだけで、膝を近づけたり遠ざけたりするイメージ	9
3.5	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	10
3.6	画面を見ながら作業をするイメージ	11
4.1	プロトタイプ概念図	12
4.2	製作したプロトタイプの一部	13
4.3	移動物体に対する距離センサの設置方向	14
5.1	実験に使用したプログラム	18
5.2	実験の様子	19
5.3	左膝の選択時間とそのモデル	20
5.4	右膝の選択時間とそのモデル	21
5.5	両膝のエラー率	22
5.6	両膝のスループット	23
A.1	実験後アンケート用紙	31

表 目 次

5.1 アンケートの結果	23
------------------------	----

第1章 序論

1.1 背景

自動車のアクセルペダ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フェースの研究は，1960年代から存在している [1] が，現在は手による操作が中心である．しかし，Multitoe[2] のようなタッチ認識可能な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，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．

机上でコンピュータを用いる作業では両手をキーボードの操作に充てることが多い．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，マウスカーソル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．そのアプローチには，装置を足で動かす方法 [5, 6] や，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] を用いた手法などがあるが，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，ユーザの衣服などに制限が生じる，装置を持ち運ぶことができないといった制約が存在する．

1.2 目的・アプローチ

本研究の目的は，特別な装置を足に装着することなく，かつ小型な装置で，足を用いたコンピュータの操作を可能にし、前節で述べた問題を解決することである．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．膝を使う理由は2点ある．まず，膝は足先と比べてより自由な操作が行える可能性がある．さらに，先行研究には膝をコンピュータへの入力として用いる例は少ない [1] 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10個並べた距離センサアレイと，マイコン，膝の位置を計算するソフトウェアからなるプロトタイプを用いる．ユーザは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．

- ユーザの疲労感を考慮した膝の移動方法を提案した．
- 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ツの法則に基づく実験を行い、その結果から今後の設計に関する課題を明らかにした．

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、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と、膝位置認識システムの利用イメージについて述べる．第 4 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 5 章では、プロトタイプを用いて行なった、フィッツの法則に基づいた実験とその結果について述べる．第 6 章では、プロトタイプについて現在明らかになっている問題点とそれに対する改善の方針を述べる．第 7 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、机上のコンピュータの操作を想定した足を用いた入力の研究を示す。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

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。まず、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。

次に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[2] 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提案した。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。これらの調査やインタラクション技術は立った状態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を想定した足を用いた入力の研究

本節では、机上におけるコンピュータの操作に足を用いた入力手法を調査、提案した研究を紹介する。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調査した。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足の動きの特徴を調査した。机の下に配置したカメラから、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。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] が提案する手法では視線と足を組み合わせ、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、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 [1] は、テキスト選択において、膝を含めたいくつかの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、この装置は調査を行うために作られた原始的なものであった（図 2.1）。本研究では、距離センサを使うことで、設計の工夫を行なった。

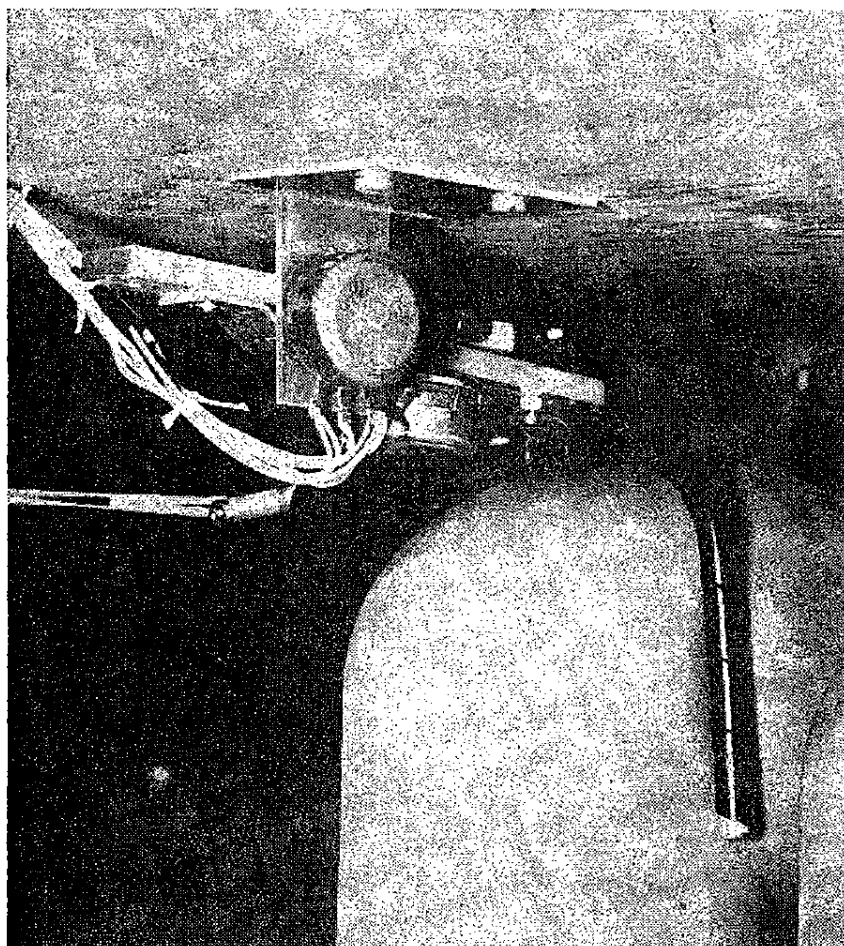


図 2.1: English[1] らの膝操作手法

第3章 膝によるマウスカーソル操作手法

3.1 概要

本研究では膝の位置を認識し，マウスカーソル操作への応用を行う．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 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．

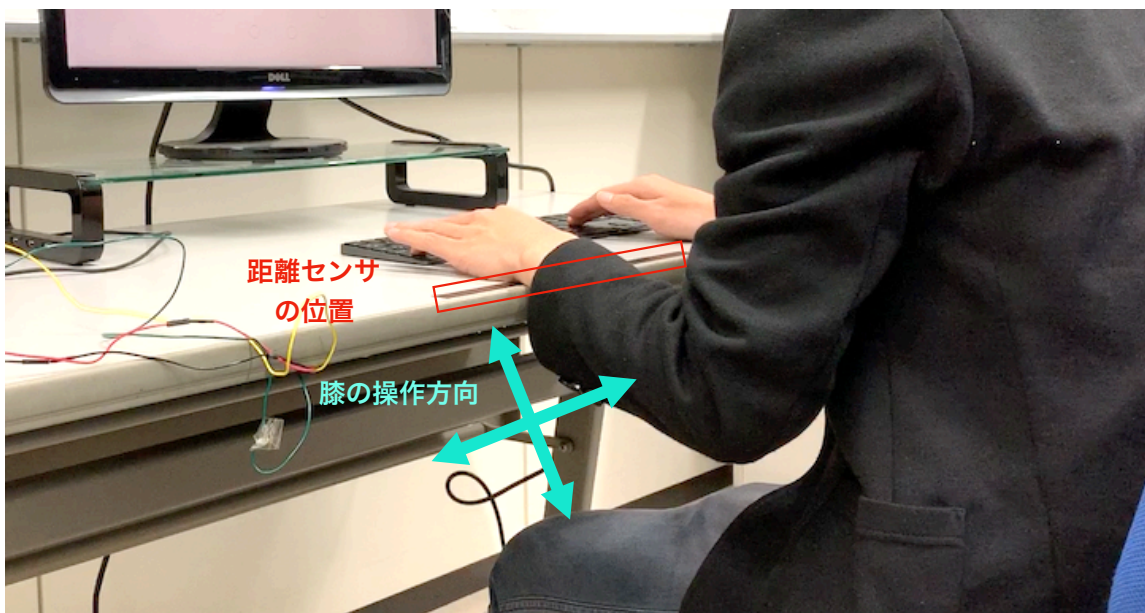


図 3.1: 膝によるマウスカーソル操作のイメージ

3.2 膝の移動方法

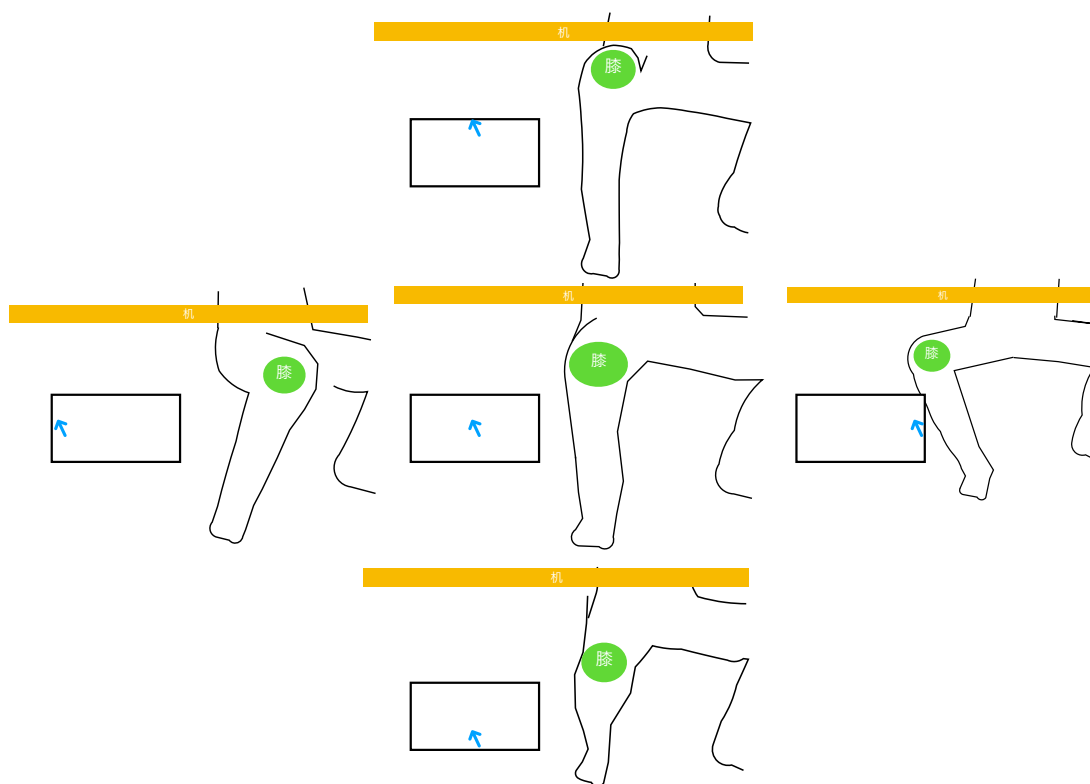


図 3.2: 膝の上下左右への移動イメージ

図 3.2 は、膝を正面から見たときの上下左右への移動イメージである。マウスカーソルを左右に移動する時には、膝を左右に傾ける。上方向に移動する時は、かかとを浮かせて膝を机に近づける。逆に下方向に移動する時は、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 3.3、図 3.4 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 3.4 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 3.3 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。

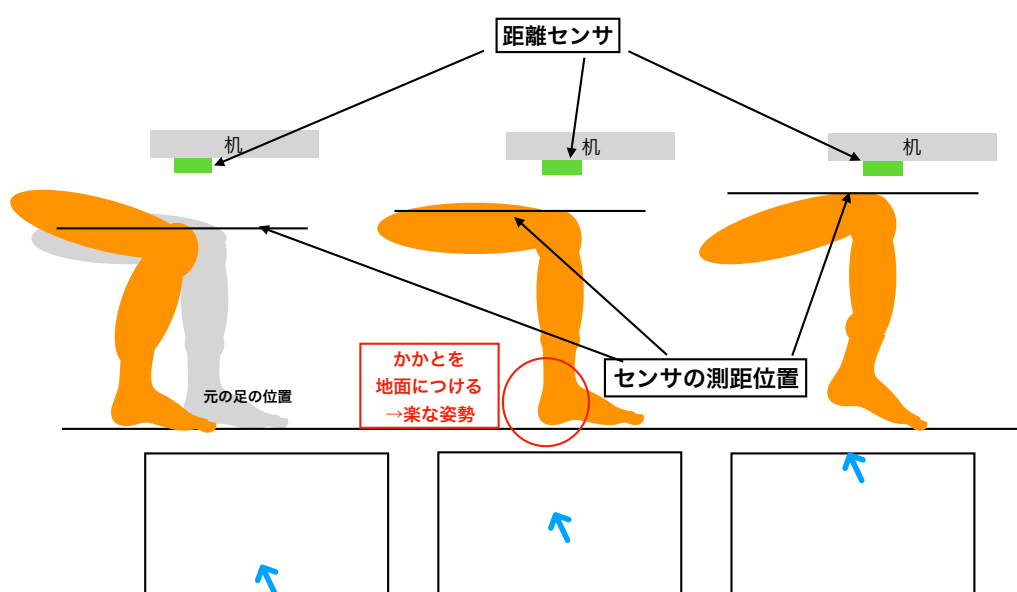


図 3.3: かかとを浮かせて膝を近づけ，足を引き膝を遠ざけるイメージ

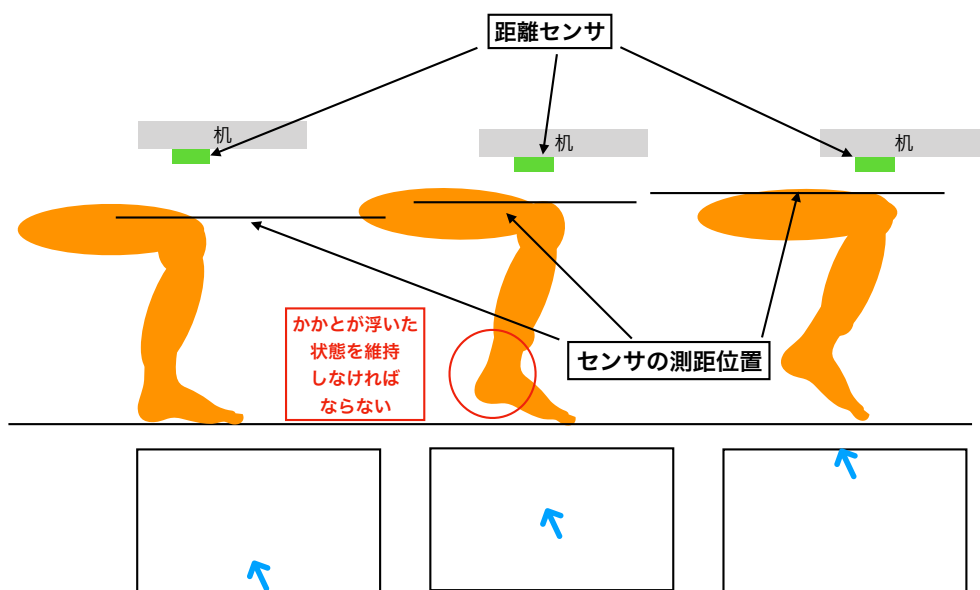


図 3.4: かかとを浮かせるだけで，膝を近づけたり遠ざけたりするイメージ

3.3 利用イメージ

3.3.1 ワープロソフト利用時のマウスカーソル操作

図 3.5 にイメージ図を示す。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、ユーザはマウスやタッチパッドに手を移動しなければならない。本手法を用いて、膝によってマウスカーソルを操作し、フットスイッチなどでクリック操作を行うことで、ユーザは手の移動を削減することができる。

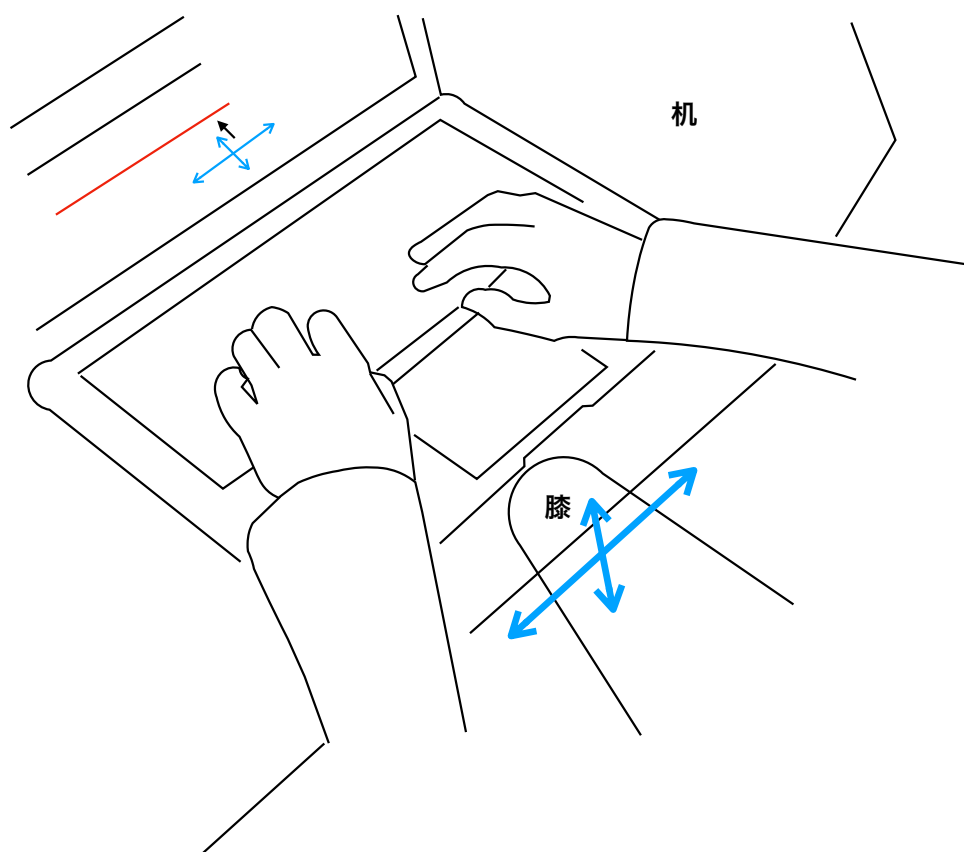


図 3.5: ワープロソフトの利用時に膝でマウスカーソルを操作するイメージ

3.3.2 画面に表示した回路図を見ながら電子工作をするときの画面操作

図 3.6 にイメージ図を示す。ユーザは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。ユーザは回路図をズームするとき、作業を一時中断して、マウスやタッチパッドを手で操作しなくてはならない。本手法を用いて、膝でマウスカーソルを操作し、足を用いてペ

ダルを操作しズームを行う。これによりユーザは作業に集中したままズーム操作を行うことができる。

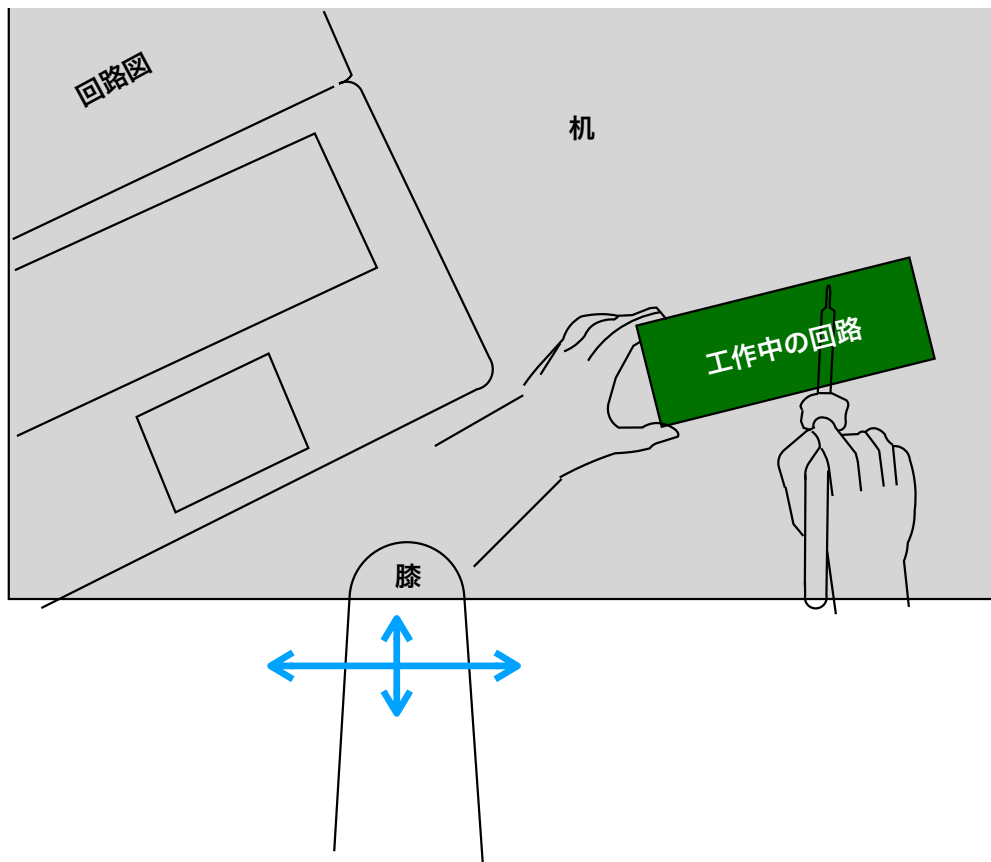


図 3.6: 画面を見ながら作業をするイメージ

第4章 膝位置認識とカーソル座標計算を行う プロトタイプの実装

4.1 概要

本章では、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、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、マイコン、パーソナルコンピュータからなるハードウェアと、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ソフトウェアからなる。図 4.1 に、プロトタイプの概要を示す。

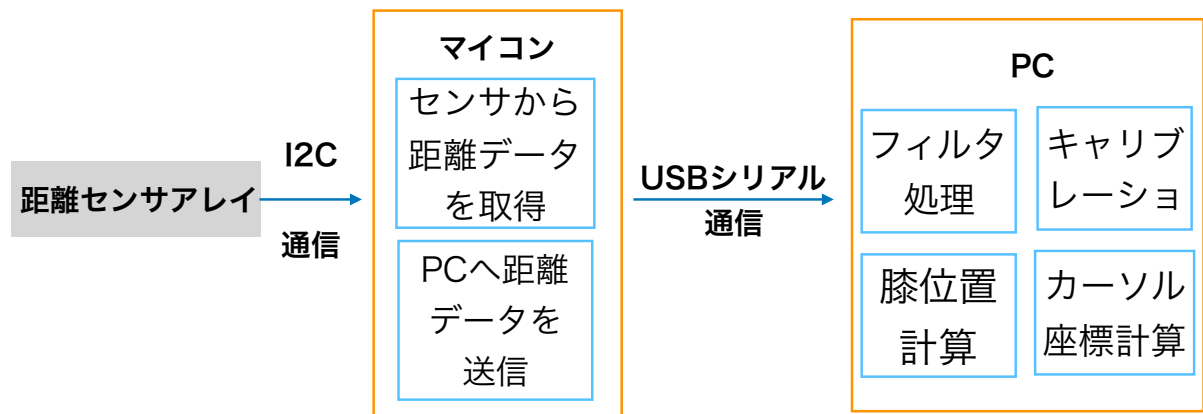


図 4.1: プロトタイプの概念図

プロトタイプによる膝の位置認識と、カーソル座標への変換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、パーソナルコンピュータと接続する。そして、膝を上下左右に動かす。
2. 距離センサアレイが、各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、膝の位置を計算し、カーソル座標を計算する。
ソフトウェアの詳細な流れを以下に示す。
 - (a) 計測値を指数移動平均フィルタにかける。

- (b) 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。
- (c) キャリブレーションにより、ユーザの膝が移動できる範囲を記録する。
- (d) キャリブレーション時の値とマウスカーソルを描画するディスプレイの解像度からカーソル座標を計算する。

この時ユーザは机の裏に距離センサアレイを設置し、パーソナルコンピュータとの接続のみを行い、膝には何も装着しない。

4.2 ハードウェア

距離センサは SHARP GP2Y0E03¹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²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た。本プロトタイプでは、長さ約 30cm のプラスチック製の定規に、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 4.2 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²には、センサを物体の移動方向が図 4.3 の黒い矢印の方向ではなく、赤い矢印の方向になるように設置する方が、誤差が少ないためである。

個々の距離センサは Arduino MEGA 2560 (Arduino) ユニバーサル基板を介して接続される。I²C 通信を用いて、Arduino が距離センサの値を読み取る。Arduino はパーソナルコンピュータと USB で接続され、シリアル通信を用いて、10 個の距離データをひとまとめたものを 1 フレームとして、Arduino からパーソナルコンピュータへ送信する。

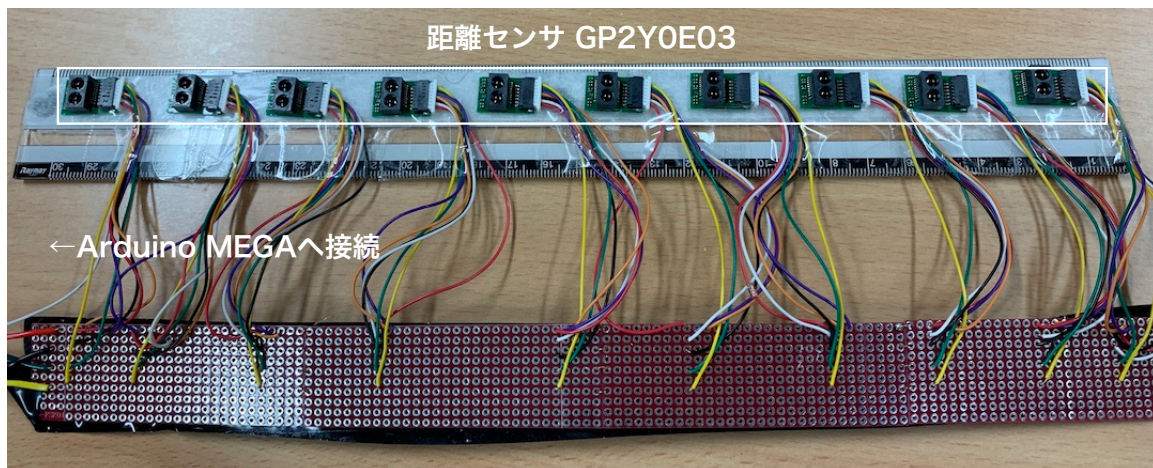


図 4.2: 製作したプロトタイプの一部

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

²http://www.sharp.co.jp/products/device/doc/opto/gp2y0e02_03_appl-j.pdf

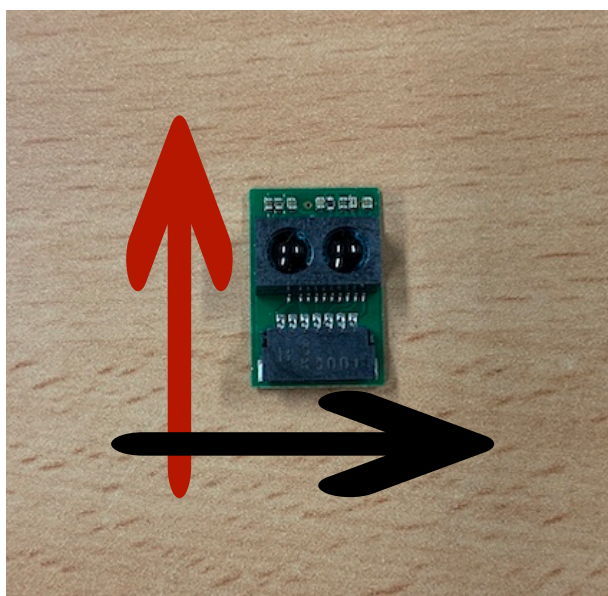


図 4.3: 移動物体に対する距離センサの設置方向

4.3 膝の位置の計算

膝の位置の計算には，Xiao ら [17] の方法を参考にした．膝の位置の計算では，以下の 2 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．

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 を用いた．

4.3.1 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．最新のデータを重視する一方で，古いデータについても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 α 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．

$$D^t = \alpha(s^t - D^{t-1}) + D^{t-1} \quad (4.1)$$

4.3.2 膝位置認識

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 4.2 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．

$$K_y^t = \min_i(D_i^t) \quad (4.2)$$

3. i 番目の距離センサについて，重み w_i を式 4.3 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．

$$w_i = \frac{1}{D_i^t - K_y^t + d} \quad (4.3)$$

4. w_i から， K_x^t を計算する．

$$K_x^t = \frac{\sum_i i w_i}{\sum_i w_i} \quad (4.4)$$

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．

4.4 膝の位置からカーソル座標への変換

4.3 節で求めた膝の位置をカーソル座標へ変換する．変換は以下の手順で行う．

- 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．

4.4.1 キャリブレーション

4.3.2 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，ユーザが膝を動かす上下左右の限界点と，マウスカーソルがディスプレイの中心にある時の膝の位置の 5 点で行う．得られ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．

4.4.2 カーソル座標への適用

4.3.2 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，4.4.1 項で得たキャリブレーションをもとに，パーソナル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，ここでは解像度が (W_x, W_y) のディスプレイを想定している．

$$P_x^t = \begin{cases} \frac{(K_x^t - C_{left}) \left(\frac{W_x}{2} \right)}{C_{center_x} - C_{left}} & (K_x^t < C_{center_x}) \\ \frac{(K_x^t - C_{center_x}) \left(\frac{W_x}{2} \right)}{C_{right} - C_{center_x}} & (C_{center_x} \leq K_x^t) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$P_y^t = \begin{cases} \frac{(K_y^t - C_{upper}) \left(\frac{W_y}{2} \right)}{C_{center_y} - C_{upper}} & (K_y^t < C_{center_y}) \\ \frac{(K_y^t - C_{center_y}) \left(\frac{W_y}{2} \right)}{C_{lower} - C_{center_y}} & (C_{center_y} \leq K_y^t) \end{cases} \quad (4.6)$$

第5章 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を用いたマウスカーソル操作の特徴を実験を通して調査する．

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ツの法則 [18] に当てはめて，その性能を明らかにする．またアンケートから，ユーザの操作性，疲労感を明らかにする．

5.2 評価方法

実験の評価は，フィッツの法則を用いて行う．フィッツの法則は，式 5.1 によって表される．

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

式 5.1 に用いられている各係数は以下の通りである．

- MT (Moving Time): 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）
- W : 選択するべきターゲットの幅
- $\log_2 (D/W + 1)$ [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，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 (Throuput, TP) が用いられる．

5.3 実験手順

実験には，ISO9241-411[19] 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 は実験に使用したプログラムの動作イメージである．

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，はじめの 0 番のターゲットの選択を除いた 13 試行を 1 タスクと数える．膝を動かしてカーソルを移動させ，ターゲットとポインタが重なった時に選択操作を行う．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．

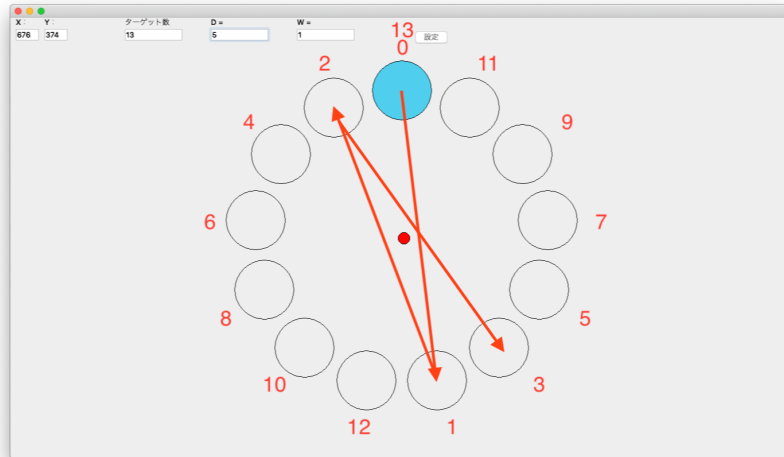


図 5.1: 実験に使用したプログラム

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．

- 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 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．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．また，2 ピリオド終了後にアンケートを行った．本実験には 3 名が参加した．全員が男性であり，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．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，椅子の高さ，ディスプレイからの距離を参加者の好みに合わせて調節した (机の高さは固定である)．椅子の位置は，プロトタイプが設置されている机の位置を表す黒色テープを基準に調整した．その後，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．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．

5.4 実験機器

実験には、プロトタイプ、ディスプレイ（解像度：1920*1080 ピクセル，21.5 インチ，DELL 社製 ST2220Lb），ディスプレイを設置する台座，キーボード（Apple 社製，Magic Keyboard），を使用した．実験条件の D と W の数値は，実験プログラムの中で自動的にディスプレイのピクセル密度（102.42[ppi]）を元にインチからピクセルに変換している．実験プログラムはディスプレイに映し出され、参加者はディスプレイを見てキーボードとプロトタイプを操作する．図 5.2 は，実際の実験の様子である．



図 5.2: 実験の様子

5.5 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

5.6 実験結果

図 5.3 は左膝の、図 5.4 は右膝の実験結果を表す。横軸は式 5.1 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 5.5 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 5.6 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 5.1 にアンケートの結果を示す。操作の使いやすさ、精神的な難しさ、腹部の疲労感、ふくらはぎの疲労感で比較的良好な結果を得た。

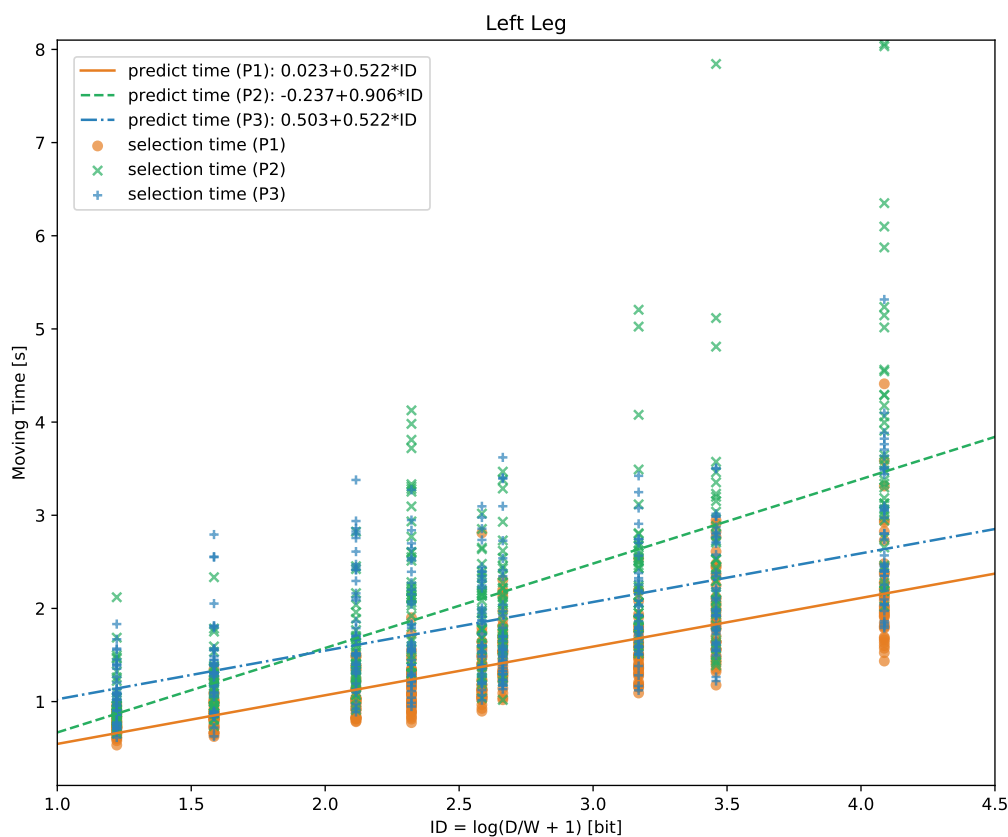


図 5.3: 左膝の選択時間とそのモデル

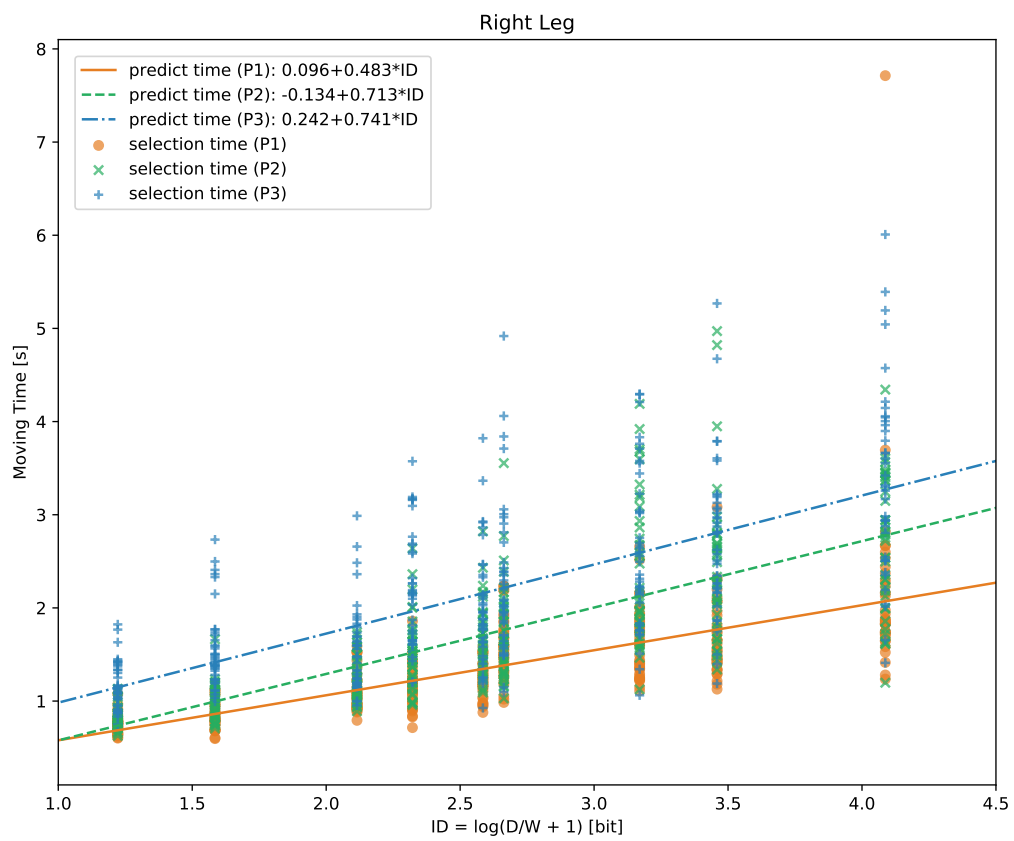


図 5.4: 右膝の選択時間とそのモデル

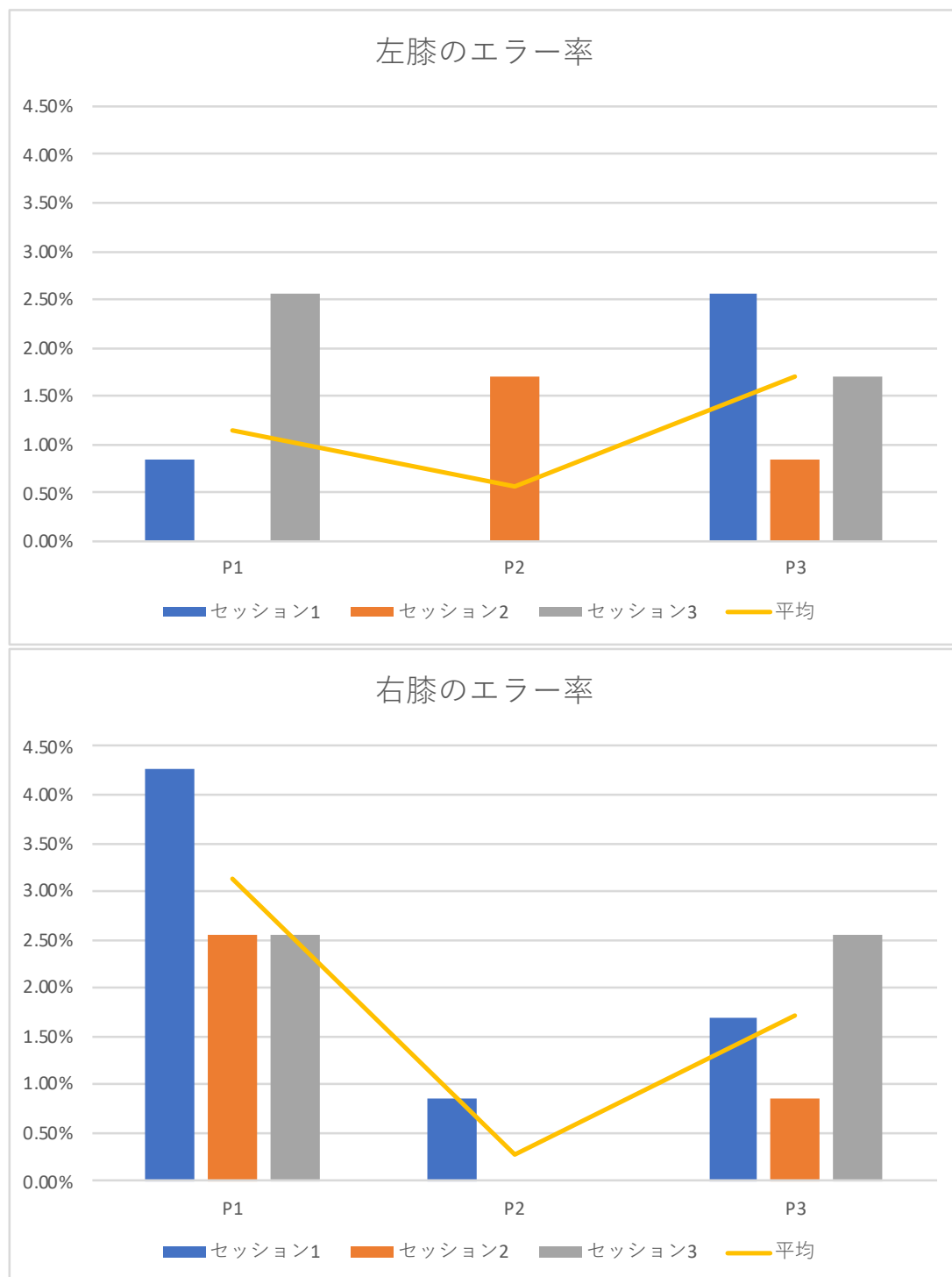


図 5.5: 両膝のエラー率

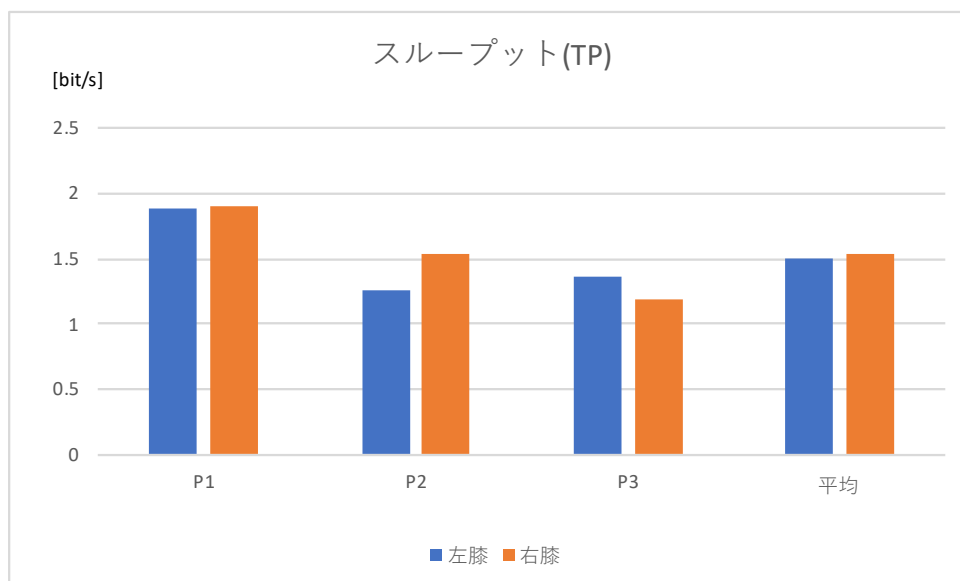


図 5.6: 両膝のスループット

表 5.1: 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

5.7 考察

5.7.1 エラー率とキャリブレーション

第5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．

5.7.2 操作性と疲労感の改善

第3章にて，疲労感を考慮して膝の移動方法を設計した．しかし太ももと足の疲労は比較的疲労感が高い．今後膝の移動方法をさらに見直し，疲労感を改善する工夫が必要である．さらに，操作の快適さ，スムーズさにも改善の余地があるとわかる．ハードウェア設計の改善を行うことで，操作性についても改善を図る．

第6章 今後の展望

本章では，プロトタイプ of 既知の問題点に対する今後の展望について述べる．

今回のプロトタイプ of 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するとき，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，膝の運動のユーザ間での違いについてより詳細な分析を行い，その結果からハードウェアの形状を再設計する必要がある．

また，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，最適な設計を導く．

第7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、フィッツ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] 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, 1967.
- [2] Thomas Augsten, Konstantin Kaefer, René Meusel, Caroline Fetzner, 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 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pp. 209–218, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [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フェースの研究. Master's thesis, 筑波大学, 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, 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. Master's thesis, 筑波大学, 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, 瀬瀬和美. 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 Dachsel. 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.
- [19] International Organization for Standardization. Ergonomics of human-system interaction — Part 411: Evaluation methods for the design of physical input devices, 2012.

付 録 A 実験後アンケート用紙

実験後のアンケートに用いた用紙を以下に示す.

実験に関するアンケート

1. この操作方法是使いやすかったですか。
(使いにくかった) 1 2 3 4 5 (使いやすかった)
2. この操作方法是快適でしたか。
(快適ではなかった) 1 2 3 4 5 (快適であった)
3. 操作はスムーズに行えましたか。
(スムーズに行えなかった) 1 2 3 4 5 (スムーズに行えた)
4. 操作は肉体的に難しかったですか。
(簡単であった) 1 2 3 4 5 (難しかったです)
5. 操作は精神的に難しかったですか。
(簡単であった) 1 2 3 4 5 (難しかったです)
6. 腹部は疲れていますか。
(疲れていない) 1 2 3 4 5 (とても疲れた)
7. 太ももは疲れていますか。
(疲れていない) 1 2 3 4 5 (とても疲れた)
8. ふくらはぎは疲れていますか。
(疲れていない) 1 2 3 4 5 (とても疲れた)
9. 足は疲れていますか。
(疲れていない) 1 2 3 4 5 (とても疲れた)

アンケートは以上です。ありがとうございました。

図 A.1: 実験後アンケート用紙