

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

膝入力による GUI 操作支援手法

市川 佑

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 高橋 伸

2021年3月

概要

ユーザが机上で PC を用いて作業をする時、両手はマウス、あるいはタッチパッドやキーボードを操作する一方で、足は入力に関与せず机の下で自由な状態である。足を入力に用いることで、手を用いた操作を止めることなく足で別の操作ができる他、手と足を組み合わせた操作の拡張も行うことができる。以前の研究ではこうした背景から、容易に設置可能な膝位置認識デバイスを開発し、膝をコンピュータの入力として用いることを提案した。しかしカーソルを用いた簡易的な評価にとどまっており、膝の移動方向による操作性の違い、ユーザの疲労感に加えて膝操作が適する PC 上の GUI 操作については調査を行っていなかった。本研究では膝入力の基本的な特性と膝操作が適する PC 上の GUI 操作を調査し、膝入力を手による GUI 操作の補助として用いることを提案する。そのアプローチとして、3 種類の実験を行った。第 1 の実験は膝入力を PC のカーソル操作に適用し、その性能と膝入力の操作感、疲労感を調査した。結果、ある程度疲労感を感じるが、意図した通りに操作できることがわかった。第 2 に単一のアプリケーション内の 3 種類の GUI 操作を膝入力で行い、膝入力が適している操作を調査した。結果、適する GUI 操作とそうでない GUI 操作を明らかにし、より補助的な操作に膝入力を適用する提案も得ることができた。第 3 に新たに膝によるジェスチャ入力を設計し、3 種類のアプリケーションの操作について調査した。結果、ジェスチャの種類や対象とする操作の検討、またジェスチャの認識精度については課題が残る結果となったが、一部のジェスチャやその対応については有用である可能性があった。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	本研究の目的とアプローチ	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	関連研究	3
2.1	足を用いたジェスチャ入力	3
2.2	机上での作業における足を用いた入力	3
2.3	膝を用いたコンピュータへの入力	4
第 3 章	膝による入力の設計と膝位置認識システム	5
3.1	膝による入力の設計	5
3.2	膝位置認識システム	5
3.2.1	膝位置認識デバイス	5
3.2.2	膝位置認識アルゴリズム	7
第 4 章	膝によるマウスカーソル操作の性能評価	9
4.1	膝の絶対座標からカーソル位置への変換	9
4.2	実験手順	10
4.3	評価方法	11
4.3.1	性能評価	13
4.3.2	疲労感・操作性の評価	13
4.4	実験結果	14
4.4.1	性能評価の結果	14
4.4.2	疲労感・操作性の評価の結果	17
4.5	考察	17
4.6	本章のまとめ	18
第 5 章	膝操作の GUI 適用時における使用感調査	19
5.1	調査対象とする GUI 操作	19
5.2	ベジェ曲線描画ツールの設計と実装	19
5.2.1	膝を用いた操作方法	21

カーソル操作	21
リスト操作	21
スライダ操作	21
5.2.2 膝操作の対象となる機能の切り替え	21
5.2.3 キャリブレーション	21
5.3 予備実験：膝によるリスト操作の性能調査	23
5.3.1 実験条件・タスク	23
5.3.2 収集データ	24
5.3.3 実験結果	25
5.4 膝による GUI 操作のユーザビリティ調査	28
5.4.1 参加者	30
5.4.2 実験タスク	30
5.4.3 実験手順	30
5.4.4 収集データ	30
5.4.5 実験結果	32
5.4.6 考察	33
5.5 本章のまとめ	33
第 6 章 膝入力の様々なアプリケーションへの適用	35
6.1 膝ジェスチャ	35
6.2 両膝の位置認識のための膝位置認識デバイスの変更	38
6.3 膝ジェスチャ認識とキーコマンドの送信を行うソフトウェア	38
6.4 認識アルゴリズム	40
6.5 調査対象とするアプリケーション	41
6.6 膝を上げる動作の閾値の決定	41
6.7 両膝ジェスチャおよび時間差ジェスチャの認識率調査	43
6.8 膝ジェスチャのユーザビリティ評価実験	43
6.8.1 実験手順	43
6.8.2 実験タスク	44
6.8.3 実験データと分析方法	47
6.8.4 結果	47
ジェスチャの実行回数	47
アンケートの結果	47
6.8.5 考察	50
6.9 本章のまとめ	51
第 7 章 結論と今後の課題	53
参考文献	55

目次

3.1	上下左右へのユーザの膝の移動方向のイメージ	6
3.2	膝位置認識システムの概念図	6
3.3	膝位置認識デバイスとその構成部品	7
4.1	大腿・下腿の計測範囲	10
4.2	大腿・下腿の長さの計測結果	11
4.3	実験において参加者が見る画面一例	12
4.4	全参加者のスループット	15
4.5	移動方向別（左膝）のスループット	15
4.6	移動方向別（右膝）のスループット	16
4.7	全参加者のエラー率	16
5.1	ベジェ曲線描画プログラムの画面一例	20
5.2	ベジェ曲線描画プログラム上の3つの操作と膝の移動方向との対応. (A) カーソル操作, (B) リスト操作, (C) スライダ操作.	22
5.3	膝によって切り替わる各操作の状態遷移図.	22
5.4	ユーザの膝と操作領域および切り替え領域の関係	23
5.5	予備実験にて使用したプログラムの画面一例（膝の操作方向：左右，セクション数：10，可視条件）.	24
5.6	可視条件の平均正解率，平均操作時間の結果.	26
5.7	不可視条件の平均正解率，平均操作時間の結果.	27
5.8	不可視条件における選択時の膝位置の平均誤差	28
5.9	追加条件における不可視条件の平均正解率，平均操作時間の結果とその比較.	29
5.10	アニメーション描画タスクで描かれるアニメーション一例.	31
5.11	参加者ごと描画できたアニメーションの枚数	32
6.1	片膝ジェスチャ	36
6.2	両膝ジェスチャ	36
6.3	時間差ジェスチャ	37
6.4	ユーザがジェスチャを行う時の流れ	37
6.5	実装を変更した距離センサアレイ	38
6.6	膝ジェスチャ認識とキーコマンドの送信を行うソフトウェアのウィンドウ	39

6.7	日毎の上下方向のキャリブレーション時の絶対位置と各フレームの絶対位置の差のヒストグラム	42
6.8	両膝ジェスチャおよび時間差ジェスチャの識別結果	44
6.9	ユーザが膝ジェスチャを実行した回数（棒）とシステムの認識率（折れ線）	48
6.10	各セッション終了後のアンケート結果（Q1-Q4のみ）	48
6.11	実験終了時アンケートの結果	50
A.1	膝位置認識デバイスの回路図	58

表目次

4.1	左膝・右膝のスループットと大腿・下腿の長さとの相関係数（絶対値）	14
4.2	アンケートの結果（Q1-4,6,7のみ）	17
5.1	1つのセクションの幅または高さの対応	24
5.2	各操作の実験時間に占める割合	32
6.1	日毎の距離データを記録した時間とフレーム数	43
6.2	ジェスチャとアプリケーションの操作との対応	45
6.3	膝ジェスチャごとの実行回数と認識率	47
6.4	セッション後アンケートの Q5 の回答者数	49
6.5	セッション後アンケートの Q6 の回答者数	49

第1章 序論

本章では本研究の背景、目的、アプローチを示す。また、本論文の全体構成について述べる。

1.1 研究背景

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、足による操作は一般的である。しかし PC やモバイル端末上のグラフィカルユーザインタフェース（以下、GUI）アプリケーションの操作においては、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。足に操作を割り当てることができれば、手が荷物で塞がっている状況 [FDS⁺17] や、電車内など手の動きが制限されてしまう状況 [FSI15] でも端末の操作を行うことができ、さらに手と足を組み合わせた操作の拡張も可能となる。

中でもユーザが椅子に座り、机に PC を置いて作業をする時、両手はマウスやキーボードを操作する一方で、足は入力に関与せず机の下で自由な状態である。足を PC の入力に用いることで、手を用いた操作を止めることなく足で別の操作ができる他、手と足を組み合わせた操作の拡張も行うことができる。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昔から行われており、膝でレバーを操作する方法 [EEB67]、机に取り付けた装置を足で動かす方法 [PW86, PW88] 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 [HC17] を用いる方法がある。このような方法は、大型な装置を用いる、あるいは身体の一部に装置を取り付けるものであるため、設置に時間がかかる、ユーザの衣服などに制限が生じるといった制約がある。

これらの問題を解決するために、我々は以前の研究 [市川 19a, 市川 19b] で膝をコンピュータの入力に用いることを提案した。膝による入力を実現するため、机の裏に取り付けることにより、距離センサアレイをはじめとした膝の位置を 2 次元的に認識できる膝位置認識デバイスを開発した。距離センサアレイは容易に設置が可能であり、またユーザの足に特別な装置を取り付ける必要がない。しかしこれらの研究では、PC 上のマウスカーソルを用いた簡易的な評価実験に留まっており、膝の左右の違いや上下左右方向のカーソルの移動方向によって操作性の違いや、ユーザが感じる疲労感については未調査であった。加えて一般的な GUI 操作に対して膝入力を適用した場合に、膝入力がどのような GUI 操作に適するかについても未検証であった。

1.2 本研究の目的とアプローチ

本研究は膝入力を手による GUI 操作の補助として用いることを提案することを目的とする。そのためのアプローチとして、膝入力の基本的な特性と膝入力に適する GUI 操作を調査のために3つの実験を行う。1つ目の実験では PC 上のマウスカーソル操作に膝入力を適用し、膝の左右の違いや上下左右方向のカーソルの移動方向の違いを含め、膝によるカーソル操作の性能、ユーザが感じる膝の操作の疲労感と難易度を調査する。2つ目の実験では膝入力を単一アプリケーションの3種類の GUI 操作に適用した時のユーザビリティを評価する。3つ目の実験では膝入力を様々なアプリケーションの操作の補助に用いるために膝ジェスチャを提案し、様々なアプリケーション操作の補助として用いる時のユーザビリティを評価する。

1.3 本論文の構成

本章では研究の背景と目的、アプローチについて述べた。第2章では関連する研究と本研究の位置付けについて述べる。第3章では本研究で想定するユーザの膝の操作方法と、ユーザの膝の位置を認識するシステムについて述べる。第4章では膝による入力をカーソル操作に適用した時の性能やユーザの疲労感、操作感を調査する。第5章では膝による入力を1つのアプリケーションの GUI 操作に適用することで、膝による入力に適した GUI 操作が何であるかを調査する。第6章では膝による入力を現在普及しているアプリケーションの操作に適用することで、膝による入力のユーザビリティや膝によって行うべき操作が何であるかを調査する。第7章では本論文の結論を述べる。

第2章 関連研究

関連する研究について、まず足によるジェスチャ入力を行った研究例を挙げる。次に、椅子に座り机の上で作業する状況において足を入力として用いている研究例を挙げる。最後に、膝を入力手法として用いた研究例を挙げる。

2.1 足を用いたジェスチャ入力

足で操作することが有用と考えられる状況の一つに、外出時に手が荷物で塞がっている状況や、電車内など手の動きが制限されてしまう状況におけるモバイル端末の操作が挙げられる。Fan ら [FDS⁺17] は、足のジェスチャによるモバイル端末の操作手法を提案し、実証研究を行った。荷物を持ったまま、ユーザ定義の足のジェスチャを用いて操作する方法と、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であった。Han らの Kick [HAK⁺11] では、キック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操作できるかを調査した。Fukahori ら [FSI15] は複数の圧力センサを靴下に搭載することで、足の荷重を認識し、電車内といった公共スペースにおける端末の制御に用いた。Crossan ら [CBN10] はモバイル端末をポケットに入れたまま操作する方法として、足先で地面をタップする方法を提案した。ポケット内で端末を手を持った条件と足のタップを使った条件を比較し、4回以下の選択操作では足のタップを使った操作が速く行えることを示した。

2.2 机上での作業における足を用いた入力

机上でPCなどを使う状況を想定した足による入力にはいくつかの手法が提案され、その性能面が評価されてきた。Pearson ら [PW86, PW88] は「mole」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。mole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 [HC17] 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ことで、足によるカーソル操作の補助を行う。田中ら [田中05] 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。今井ら [今井97, 井上98, 久米99, 久米00] は、両足を使って傾斜できるプレートをはじめとしたポインティングデバイスを開発した。ポ

インテュイティブ作業、ドローやペイントを行うアプリケーションの操作に必要ななぞり作業における実験の結果、キーボードとマウス間の手の移動時間を考慮すれば、ポインティング特性はマウスと同等であることを示した。また、GUI環境下でのコンピュータの操作を行った実験では、ポインタの移動速度やデバイスの傾斜感度を調整すれば、マウスより操作時間が短くできることを示した。Vellosoら[VABG15]は、座っている状態における机の下の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の位置を認識することでマウス操作やスライダ操作、2つのパラメータの同時操作、手と足の同時操作といった実験を行った。これらの研究では、設置に手間がかかったり、靴に装置を取り付けるために使用できる環境が限られてしまう。本研究では設置が簡単かつ足に装置を取り付けられないアプローチをとることで、問題の解決を図る。

性能だけでなく、実際のGUI操作に対し足を入力に組み込む研究も存在する。この場合操作モダリティの1つとして足が使われている。VellosoらのArcade+[VOS⁺15]は、手、視線、足を組み合わせて操作を行う筐体型ゲーム機である。筐体に埋め込まれたKinectを用いて足の動きを認識している。魔法使いをモチーフにした一人称視点ゲームでは、ユーザの足踏みをキャラクターの移動として割り当てている。Simeoneら[SVAG14]は3Dモデリングアプリケーションにおけるカメラ視点操作、オブジェクトの移動と回転、オブジェクトの選択を足先で行い、そのユーザビリティを評価した。Sangsuriyachotら[SMS11]は8×6の圧力センサマトリクスを実装した台に足を乗せ、足で台にかける圧力を調整してアプリケーションを操作するシステムを開発した。Göbelら[GKS⁺13]が提案する手法では視線認識と足の動きを組み合わせ、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[Raj16]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、膝と手を組み合わせた操作を実現する。さらに膝を用いることで、足による入力とも組み合わせることができると考えられる。

2.3 膝を用いたコンピュータへの入力

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[EEB67]は、テキスト選択において、いくつかの装置を用いたときの操作時間を調査した。装置の中には膝で動かすものも含まれている。調査の結果、膝による操作は最も短い時間でテキストを選択できることがわかった。この研究では、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った。しかし、レバーに膝を固定するために離着席の度に脱着の必要がある。またレバーを動かすために力がかかる必要がある。本研究では距離センサを用いており、ユーザが膝を距離センサアレイの範囲内に位置させ、キャリブレーションを行えば、比較的自由的な位置で操作することができる。さらにユーザは膝で装置を動かす必要がないので、疲労感を少なくすることができると思われる。

第3章 膝による入力的设计と膝位置認識システム

本章では、筆者が以前の研究 [市川 19a, 市川 19b] で設計した膝をコンピュータの操作に用いるための、ユーザの膝の入力方法、ならびにユーザの膝の位置を認識するための膝位置認識システムの設計と実装について述べる。

3.1 膝による入力的设计

椅子に座った状態では膝を左右に傾けることは容易に行うことができるが、マウスやタッチパッドの操作と異なり、前方や後方に動かすことは困難である。そこで、かかとを浮かせることで膝が上方に動くことを利用した。加えてユーザが足を後ろに引くことで膝は下方に動くので、この2つの移動方法を縦方向の動きとして認識することとした。この設計によって、一般的な着座姿勢が入力をしていない状態となるため、ユーザは楽な姿勢で操作することができる。図 3.1 は、ユーザが膝をどのように動かすかを表したイメージである。

3.2 膝位置認識システム

3.1 節で述べた、上下左右方向の2次元的な膝の位置を認識するための膝位置認識システムの設計と実装を述べる。図 3.2 はユーザの膝の位置から、後述する膝の絶対位置を出力するシステム概念図である。本システムのハードウェアは、三角法を用いた光学式距離センサ 10 個を一行に並べた距離センサアレイ、マイクロコンピュータからなる膝位置認識デバイスと PC で構成される。マイクロコンピュータ内のソフトウェアによって、各距離センサと膝との距離を収集し、後述する距離データを作成し PC へと送信する。PC 内のソフトウェアは距離データを受け取り、膝位置認識アルゴリズムによって膝の絶対位置を計算する。

3.2.1 膝位置認識デバイス

距離センサは、SHARP 社製 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。センサが計測できる距離の範囲は、4 cm から 50 cm であ

¹<https://jp.sharp/products/device/lineup/selection/opto/haca/diagram2.html> (2020 年 12 月閲覧)

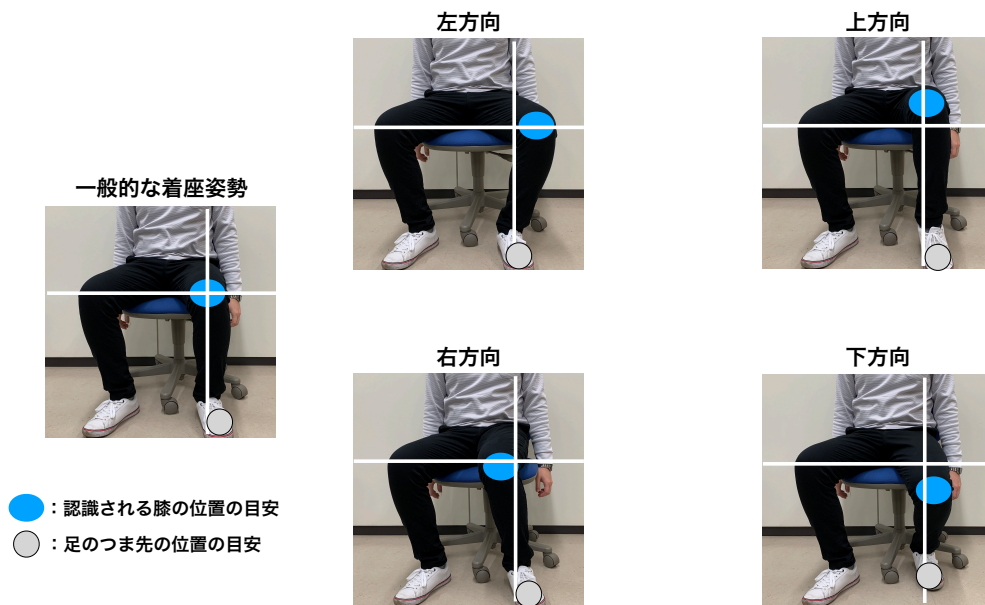


図 3.1 上下左右へのユーザの膝の移動方向のイメージ

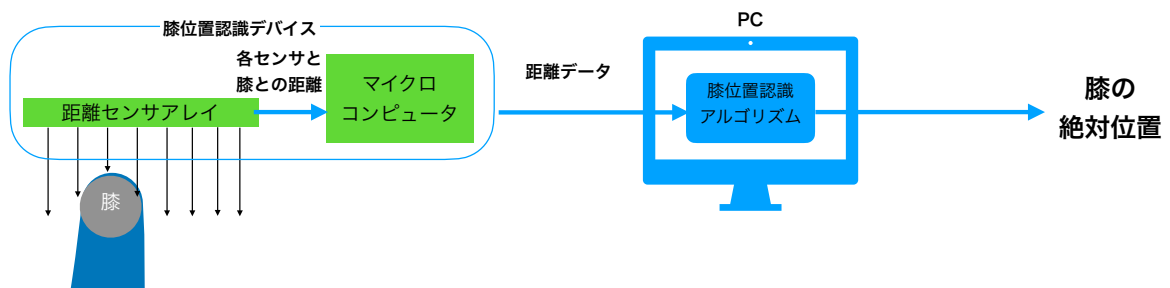


図 3.2 膝位置認識システムの概念図

る。長さ約 30 cm のプラスチック製の定規に、センサ本体を 3.0 cm 間隔で接着剤を使って固定した。図 3.3 に作成した膝位置認識デバイスと、その構成部品を示す。

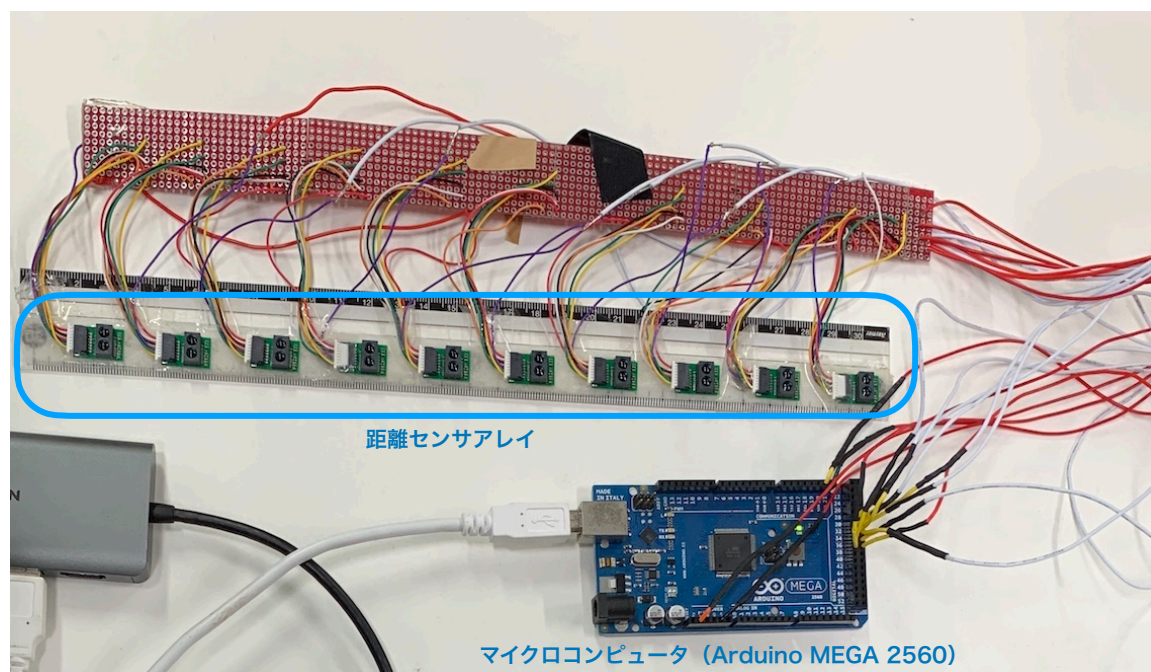


図 3.3 膝位置認識デバイスとその構成部品

各距離センサは I²C 通信にてマイクロコンピュータ (Arduino MEGA 2560) に接続する。マイクロコンピュータのプログラムは、まず各距離センサからセンサと膝との距離を取得する。次に 10 個の距離の値をそれぞれカンマによって区切られた距離データを作成する。さらに距離データを USB シリアル通信によって PC 上に送信する。PC 上のプログラムでは、シリアル通信から距離データを読み込み、3.2.2 項の処理を行う。

3.2.2 膝位置認識アルゴリズム

Xiao[XCG⁺18] らの方法を参考に、取得した距離データから膝の位置を計算する方法を述べる。時刻 t において取得した距離データを D^t として、以下の手順で膝の絶対座標 $K^t = (K_x^t, K_y^t)$ を計算する。まず、仮の座標として $k^t = (k_x^t, k_y^t)$ を求め、最後に k^t を指数移動平均フィルタにかけて K^t を求める。なお本章以降の各実験では、キャリブレーションによって各ユーザが着座した時の膝の位置の記録を行い、絶対座標 K^t と合わせて相対座標を計算する。

1. 上下方向の膝の絶対位置 k_y^t を D^t の最小値とする。
2. i 番目の距離センサについて、重み w_i を式 3.1 のように計算する。 d は重みを調整する

ための定数であり，本システムでは調整の結果 $d = 2$ としている．

$$w_i = \frac{1}{D_i^t - k_y^t + d} \quad (3.1)$$

3. w_i から左右方向の膝の絶対位置 k_x^t を式 3.2 のように計算する．

$$k_x^t = \frac{\sum_i i w_i}{\sum_i w_i} \quad (3.2)$$

4. k^t に指数移動平均フィルタをかけたものを膝の座標 K^t とする（ただし α の値は実験によって異なる）．

$$K^t = \alpha(k^t - K^{t-1}) + K^{t-1} \quad (3.3)$$

第4章 膝によるマウスカーソル操作の性能評価

3.2節のシステムを用いて、膝の位置をPC上のマウスカーソル操作に適用するアプリケーションを作成した。本章ではそのアプリケーションを用いて、膝によるカーソル操作の性能、ユーザが感じる膝の操作の疲労感と難易度を調査する。実験にはアプリケーション ISO9241-411 [Int12]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実装した。

4.1 膝の絶対座標からカーソル位置への変換

カーソル位置への変換を行うためには、ユーザが膝を動かす範囲の記録（キャリブレーション）を必要とする。本実験におけるキャリブレーションは、膝の上下左右の可動域と中心位置に対して行う。可動域はユーザごと膝を動かしやすい範囲に設定するように指示を行い、操作が簡単になるようにした。左右の可動域における左右方向の膝の位置 K_x^t の記録を C^L, C^R 、上下の可動域における上下方向の膝の位置 K_y^t を C^T, C^B と表す。さらに、一般的な着座姿勢での上下方向と左右方向の膝の位置 (K_x^t, K_y^t) を記録する。これを C_x^C, C_y^C と表す。これによって、よりユーザが膝を動かしやすい範囲を反映することができる。以上の記録から、画面サイズ $((W_x, W_y)[\text{pixel}])$ のPC画面上のカーソル位置 (P_x, P_y) を次のように計算する。

$$P_x^t = \begin{cases} \frac{(K_x^t - C^L) \left(\frac{W_x}{2}\right)}{C_x^C - C^L} & (K_x^t < C_x^C) \\ \frac{(K_x^t - C_x^C) \left(\frac{W_x}{2}\right)}{C^R - C_x^C} & (C_x^C \leq K_x^t) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$P_y^t = \begin{cases} \frac{(K_y^t - C^T) \left(\frac{W_y}{2}\right)}{C_y^C - C^T} & (K_y^t < C_y^C) \\ \frac{(K_y^t - C_y^C) \left(\frac{W_y}{2}\right)}{C^B - C_y^C} & (C_y^C \leq K_y^t) \end{cases} \quad (4.2)$$

4.2 実験手順

参加者はまず椅子に座り、実験実施者が足の大腿と下腿の長さの計測を行った。下腿の長さは床から大腿の先端までの距離、大腿の長さは腰から大腿の先端までの距離とした。大腿、下腿の計測範囲を図 4.1、計測結果を図 4.2 に示す。

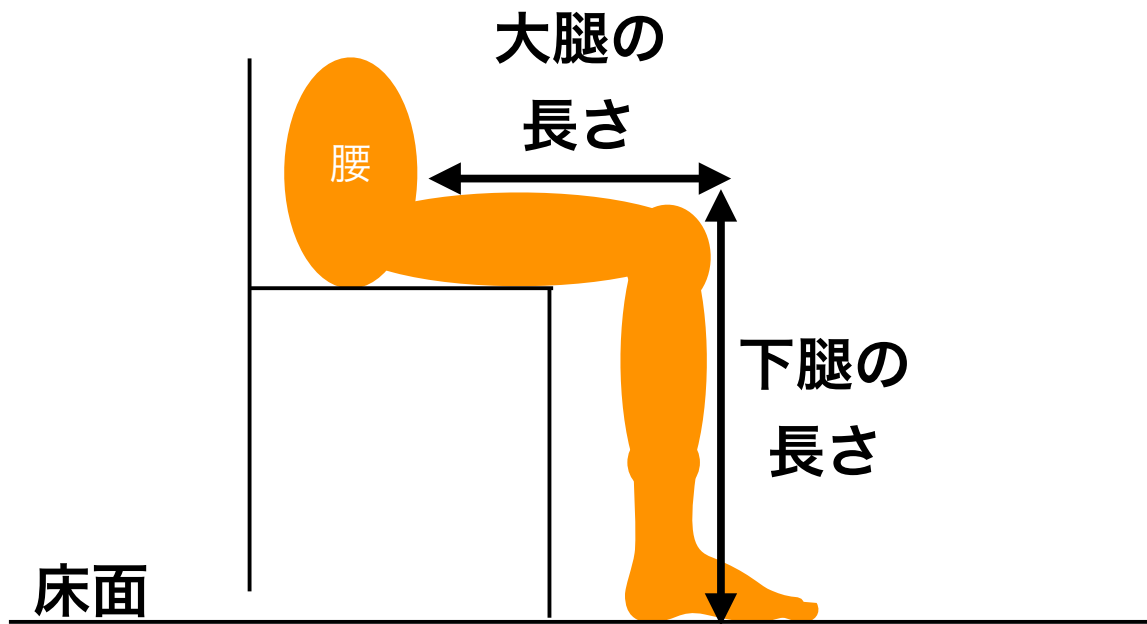


図 4.1 大腿・下腿の計測範囲

次に参加者はキャリブレーションを行い、上下左右の膝の移動範囲を記録した。キャリブレーションの後、参加者は膝を移動させた方向にカーソルが追従するかを実験実施者と確認した。追従に問題がある場合は再度キャリブレーションを行った。問題がない場合、実験を開始した。

図 4.3 は、実験プログラムの画面の例であり、実験参加者はこの画面に従い操作を行う。参加者は赤色の小円で示される「カーソル」を膝で操作する。カーソルを水色の円で示される「ターゲット」に重なるように操作し、2つが重なったときにキーボードの Enter キーを押す。これを「選択操作」と呼び、1 回の選択操作を 1 試行と数える。ターゲットは図 4.3 に示されている番号 0, 1, ..., 13 番の順に遷移し、ユーザはこの順に選択操作を行う。ただし 1, 2, ..., 13 番の選択操作のみ実験データとして記録を行い、0 番の選択操作は記録しなかった。

本実験ではターゲット間距離 (D)、ターゲットサイズ (W) は以下の大きさに設定した。

- D : 3.0, 15.0, 26.0 cm
- W : 0.8, 1.8, 2.4 cm

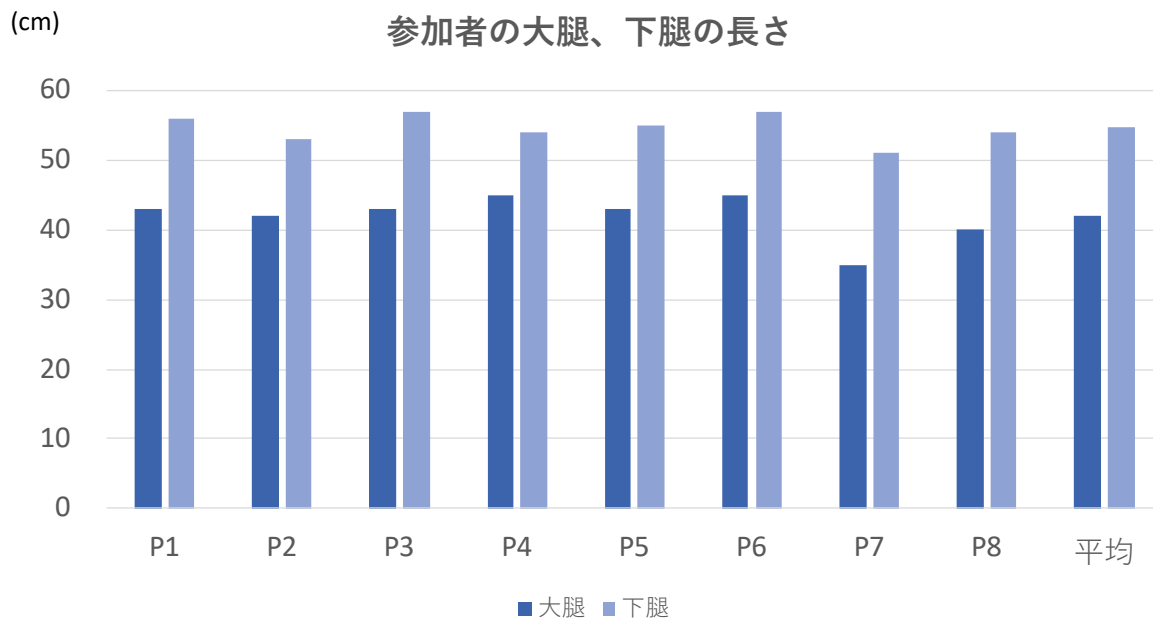


図 4.2 大腿・下腿の長さの計測結果

13 個全てのターゲットの選択を、 D と W の全ての組み合わせ 9 条件について行うことを 1 セッションと数える。1 セッションの中で条件はランダムな順番で切り替わる。実験は左膝、右膝について 5 セッションずつ行う。各膝について 5 セッション行うことを 1 ペリオドと数える。参加者はペリオド間で 5 分間の休憩をとり、第 2 ペリオドの終了後、後述するアンケートに回答する。

性能評価のために収集した項目は次の通りである。

- 実験参加者が 1 回の試行に要した時間
- その試行においてミスをしたかどうか
- 1 試行における操作の始点
- 1 試行における操作の終点
- ターゲットの中心座標

参加者 1 人あたりのデータ数は、 $13_{\text{試行}} \times 9_{\text{ターゲットサイズ条件}} \times 5_{\text{セッション}} \times 2_{\text{ペリオド}} = 1170$ である。

4.3 評価方法

本実験の評価は、実験データから算出される、膝によるカーソル操作の性能の結果と、アンケート調査によって得られる疲労感または操作性の結果の 2 つの側面から行う。

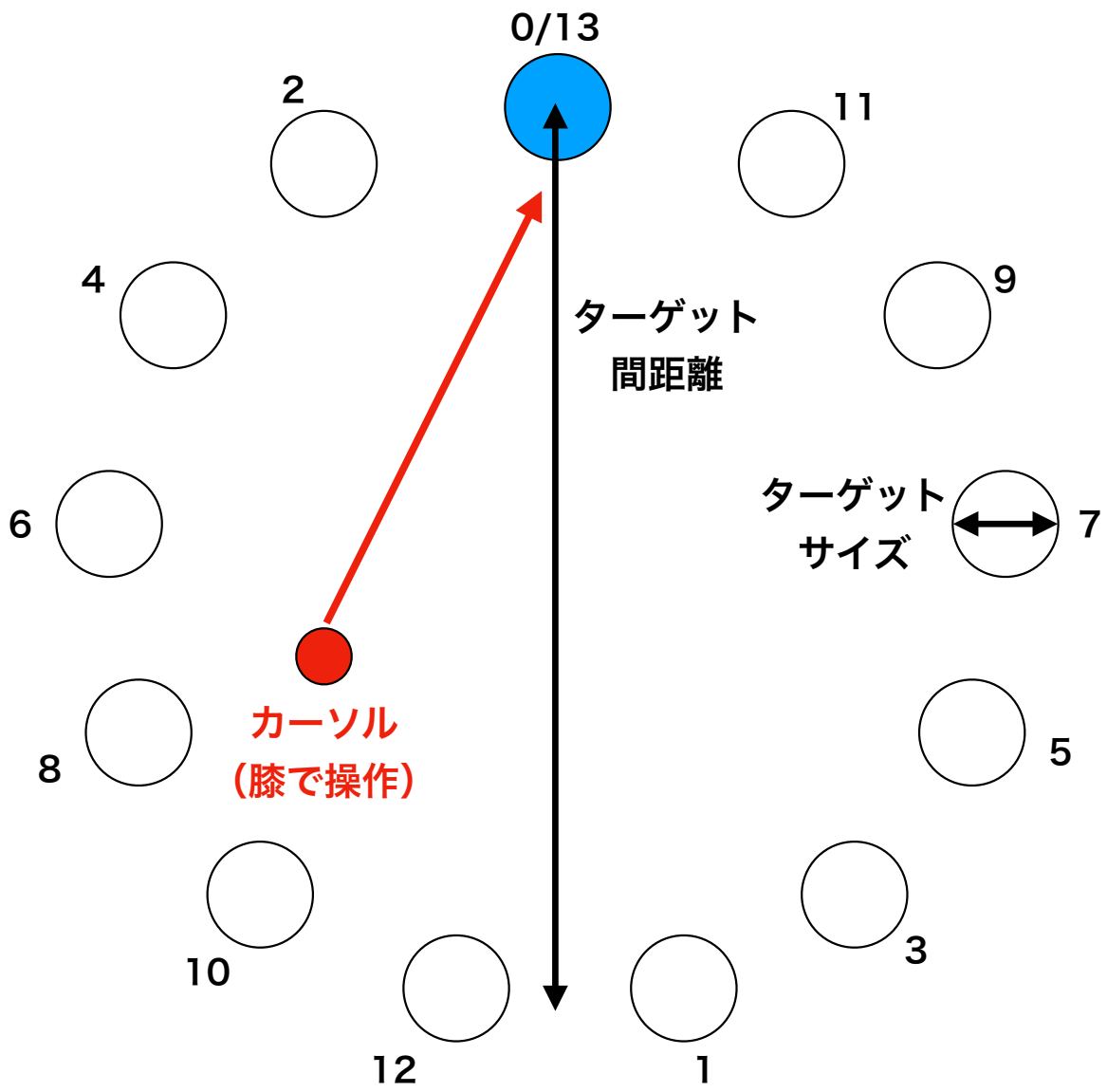


図 4.3 実験において参加者が見る画面一例

4.3.1 性能評価

性能における評価は、Soukoreff ら [SM04] によって示されているスループットを用いる。スループットとは、単位時間あたりどれほどの難易度のタスクを行うことができるかを表し、入力デバイスの性能評価に広く用いられている。スループット (TP) は次の式で表される。

$$TP = \frac{1}{n} \sum_{(D,W)} \frac{ID_e}{MT} \quad (4.3)$$

MT とは実験によって得られる、ある D, W において選択操作に要した時間の平均である。 n は D, W の組み合わせの総数である。 ID_e とは、ある選択操作において、選択操作の始点と終点から計算される、その条件の難易度を表す指標である。 ID_e は式 4.4 で表される。

$$ID_e = \log_2(D_e/W_e + 1) \quad (4.4)$$

D_e は各選択操作における始点と終点の間の直線距離の平均である。 W_e は各選択操作における終点と選択すべきターゲットの中心位置との距離の標準偏差である。

スループットを用いて、左膝と右膝の間に性能の差があるかを調査する。さらにカーソルの操作方向が左右方向か上下方向かで、性能が異なるかについても調査する。図 4.3 において、左右方向の操作は選択すべきターゲットが 6,7,8 の時、上下方向の操作は 1,2,12,13 の時と定義した。

4.3.2 疲労感・操作性の評価

疲労感・操作性の評価を行うため、実験の最後にアンケートを行った。疲労感の評価では、以下の 4 項目を 5 段階リッカート尺度で評価してもらう (1-全く疲れていない, 5-とても疲れている)。

- Q1: 太ももの疲労感
- Q2: ふくらはぎの疲労感
- Q3: 足先の疲労感
- Q4: 精神的な疲労感

さらに、項目になかった体の部位で疲れている箇所を自由記述形式で記述してもらった (Q5)。また操作性の評価では、以下の 2 項目を 5 段階リッカート尺度で評価してもらった。

- Q6: 膝による操作は意図した通りに行うことができたか (1: 全く行うことができなかった-5: とても行うことができた)。
- Q7: 膝を無理に動かさなければならない操作があったか (1: 全く当てはまらなかった-5: 全て当てはまる)。

加えて、膝による操作で簡単であった点、難しかった点を自由記述形式で記述してもらった (Q8)。

4.4 実験結果

フィッツの法則によるプロトタイプシステムの性能評価の結果とそれに対する考察，アンケートによるユーザの疲労感や操作性に関する評価結果を示す。

4.4.1 性能評価の結果

図 4.4 は，参加者ごとと，全参加者の平均のスループットを表している．全参加者の平均のスループットは，左膝が 1.65 (SD=0.34)，右膝が 1.65 (SD=0.28) であった．また，ジョイスティックによる操作ではスループットが 1.6 から 2.5 [SM04]，タッチ패드による操作ではスループットは 0.99 から 2.9 [SM04] であり，膝によるカーソル操作はこれらと同程度のスループットであるといえる．左右の膝のスループットに関して，大腿と下腿の長さとの相関があるかを調べた結果，表 4.1 のような結果になり，ほとんど相関は見られなかった。

表 4.1 左膝・右膝のスループットと大腿・下腿の長さとの相関係数（絶対値）

	左膝	右膝
大腿	0.28	0.05
下腿	0.21	0.19

図 4.5，図 4.6 は左右の膝で上下方向と左右方向のみの操作を抽出したものである．上下方向の平均スループットは左膝が 1.83 (SD=0.39)，右膝が 1.82 (SD=0.30) であった．また，左右方向の平均スループットは左膝が 1.70 (SD=0.24) 右膝が 1.70 (SD=0.38) であった．左膝，右膝の各参加者のスループットについて F 検定を行ったところ，等分散性が確認された（左膝： $F(7,7) = 3.78, p = 0.26 > 0.05$ ，右膝： $F(7,7) = 3.78, p = 0.44 > 0.05$ ）ため，平均値についてスチューデントの t 検定を行ったところ，有意差は認められなかった（左膝： $p = 0.44 > 0.05$ ，右膝： $p = 0.50 > 0.05$ ）。

図 4.7 は，参加者ごとと全参加者の平均のエラー率を表している．全参加者の平均のエラー率は，左膝で 8.2%，右膝で 9.4% であった。

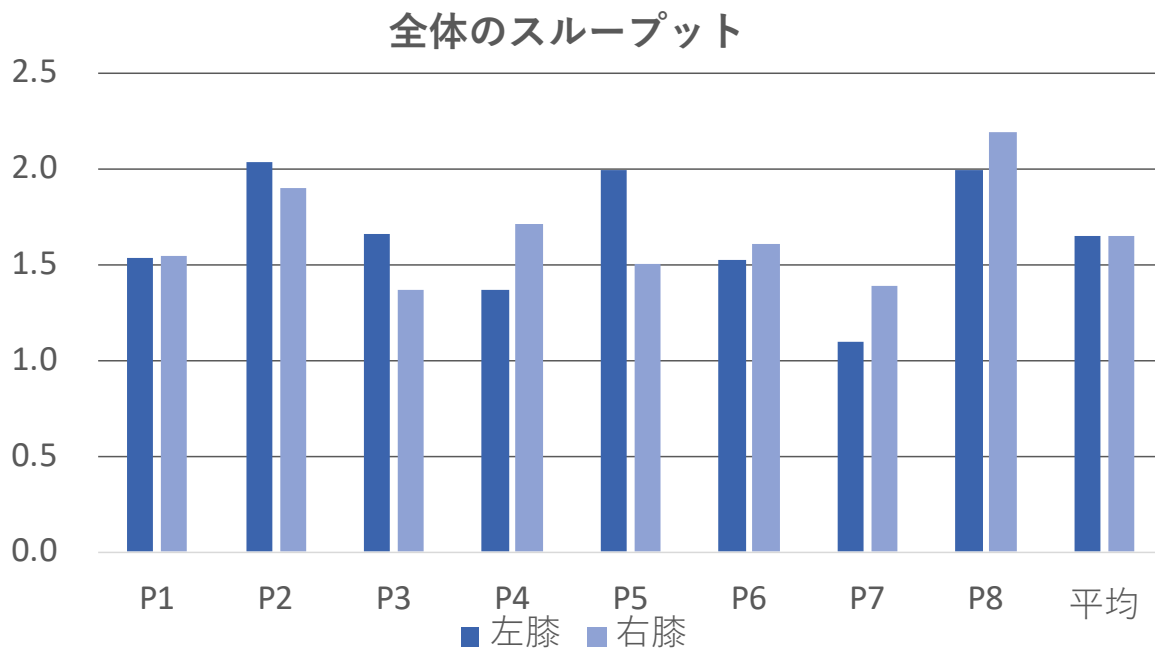


図 4.4 全参加者のスループット

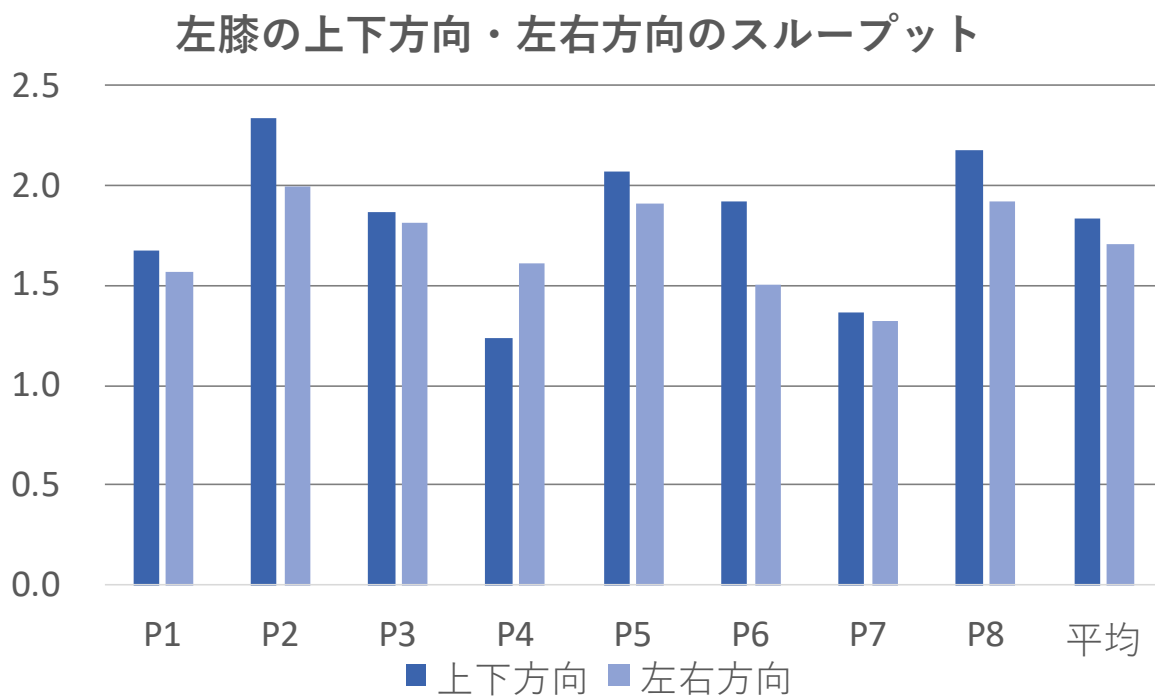


図 4.5 移動方向別（左膝）のスループット

右膝の上下方向・左右方向のスループット

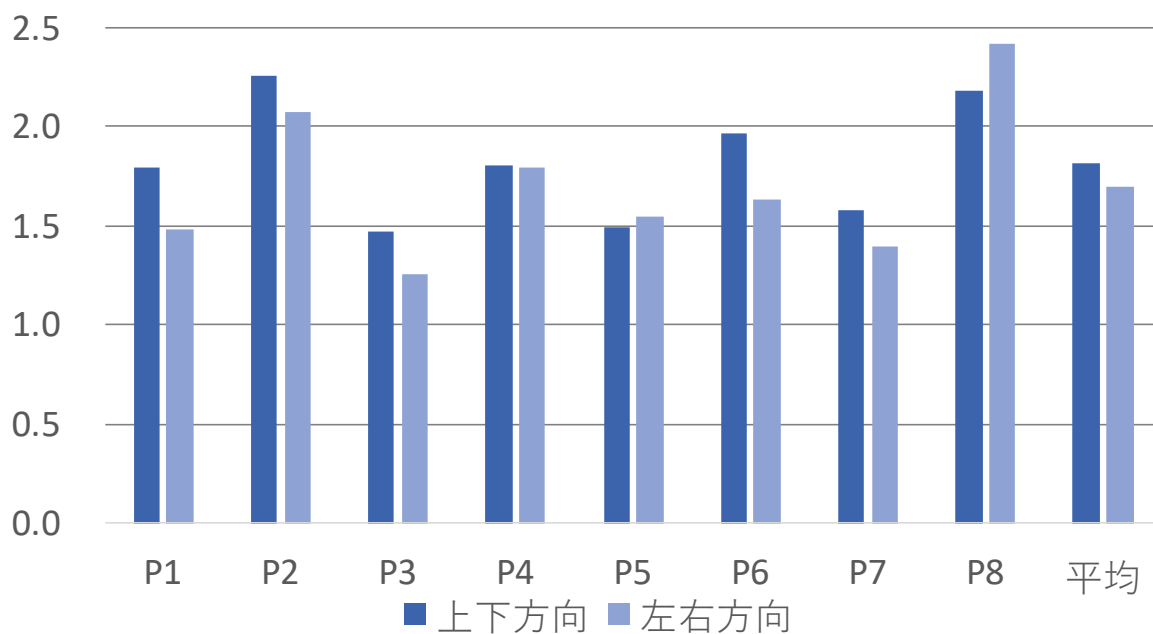


図 4.6 移動方向別（右膝）のスループット

エラー率

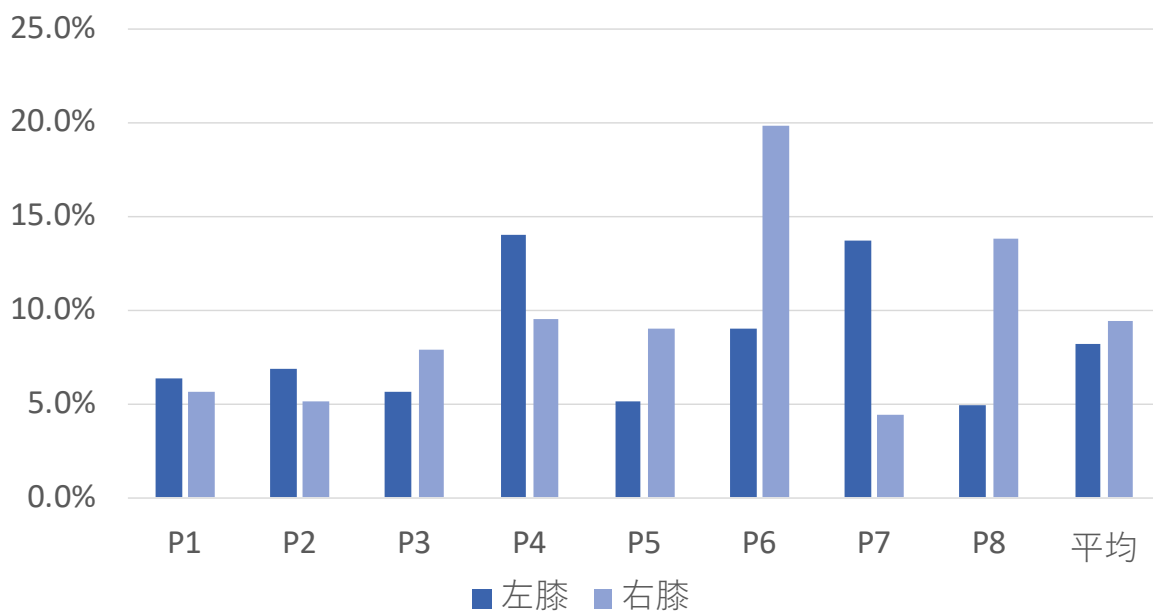


図 4.7 全参加者のエラー率

4.4.2 疲労感・操作性の評価の結果

表 4.2 はアンケートの内リッカート尺度で評価した Q1,2,3,4,6,7 の結果である。アンケートの結果、疲労感に関する質問では、Q1,Q2 で「疲れている」と回答した参加者が 3 名、Q3,Q4 で「疲れている」または「とても疲れている」と回答した参加者が 2 名であった。Q5 においては、目に疲労感を感じたという意見があった (P1,P7)。これは、1 ピリオドあたり 20-25 分間の長い間、画面を見続けたことが原因であると考えられる。

また操作性に関する質問では、Q6 で「行うことができた」または「とても行うことができた」と回答した参加者が 7 名、Q7 で「当てはまらない」または「全く当てはまらない」と回答した参加者が 6 名であった。Q8 においては、引くとき (下方向の膝の移動) の摩擦が少し重い (P1)、細かい修正が難しかった (P3) という意見があった。

表 4.2 アンケートの結果 (Q1-4,6,7 のみ)

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q6	Q7
P1	4	4	2	2	5	1
P2	4	2	3	3	4	2
P3	1	2	1	2	4	1
P4	4	4	3	3	4	1
P5	2	1	1	4	4	2
P6	3	3	5	4	4	2
P7	2	1	1	3	3	1
P8	3	4	4	3	3	3
平均	2.88	2.63	2.50	3.00	3.88	1.63

4.5 考察

全参加者の平均のスループットは、左膝が 1.65、右膝が 1.65 であり、これは Velloso ら [VABG15] の足先を用いたカーソル操作 (左足: 1.16, 右足: 1.14) より高いものである。したがって、膝によるカーソル操作は足によるカーソル操作より高速に行える可能性がある。また Soukoreff らによれば [SM04] マウスによる操作のスループットは 3.7 から 4.9 であることから、マウスほどの高速な操作は行えないと考えられる。しかし、ジョイスティックによる操作ではスループットが 1.6 から 2.5、タッチパッドによる操作ではスループットは 0.99 から 2.9 であり、膝によるカーソル操作はこれらと同等の速度で操作することができると考えられる。さらにスループットと大腿、下腿の長さとはほとんど相関がないことから、ユーザの足の長さに関係なく使用できる可能性がある。

左右の膝ではほとんど差はなかったものの、左右方向より上下方向の方がスループットが若干高い結果であった。これには次のような原因が考えられる。上下方向の位置の計算は膝と一番距離が近いセンサの値が使われるが、左右方向の計算は 10 個全ての距離データが使わ

れている。したがってキャリブレーション時の位置と実験中の位置のずれが、上下方向より左右方向の方が大きく現れたと考える。

アンケートからは、ユーザは意図した通り無理な動きも少なく操作を行うことができたと読み取れる。したがって、膝によるカーソル操作は直感的で、簡単に行うことができる。一方で太ももやふくらはぎには疲労が溜まりやすく、特に上下方向の操作ではかかたを浮かせる、足の位置を後ろにずらすことが疲労の原因と答えた参加者もいた。手による入力と組み合わせる時には、これらへの負担が少なくなるような操作方法の設計が必要となる。

4.6 本章のまとめ

本章では膝の位置をPCの画面上のカーソル位置に適用し、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た実験により膝によるカーソル操作の性能、ユーザが感じる膝の操作の疲労感と難易度を調査した。調査の結果、膝による2次元のカーソル操作は意図した通り無理なく行うことができるといえる。またアンケート結果からも、意図した通りの操作ができたことが読み取れる。しかしキャリブレーションによって、ユーザごとに左右方向の膝の位置のズレが比較的大きくなってしまふことから、第5章の実験はキャリブレーション方法を見直した上で行うこととした。

第5章 膝操作のGUI適用時における使用感調査

第4章では膝による入力をカーソル操作に適用することで、膝による入力の基本的な特性を調査した。しかし、カーソル操作を含んだ一般的なGUI操作に対して膝による入力を適用した場合のユーザビリティについては検証を行っていない。本章では一般的なGUIの操作の中で膝操作が適合する操作、アプリケーション実装上での指針を明らかにすることを目的とした調査を行う。そのアプローチとして、ベジェ曲線描画ツールをGUIアプリケーション例にとり、各機能に膝操作を適用し、ユーザスタディを行う。

5.1 調査対象とするGUI操作

対象とするGUI操作について、GUI操作に必須の機能であり、膝操作単体または膝とマウスを組み合わせることで、ユーザビリティの向上が期待できるものを選定した。検討の結果、以下の3つのGUI操作を調査対象することとした。

- カーソル操作
- リスト操作
- スライダー操作

まず、カーソル操作は第4章において特性が確認できているため、今回は一般的なアプリケーションへ適用した時の使用感に焦点を当て調査を行う。次に、リスト操作はカーソル操作とは特性が異なると考えられるため、まず5.3節にて基本的な操作が行えるかを調査する。その後、アプリケーション上の使用感について調査を行う。最後に、スライダー操作はカーソル操作を1次元としたものと見なすことができるので、同様の特性を持つと考えられる。したがって、カーソル操作同様の調査を行う。

5.2 ベジェ曲線描画ツールの設計と実装

5.1節にて述べた3つのGUI操作を、Adobe Illustratorなどに代表されるグラフィックソフトウェアの操作に当てはめた、ベジェ曲線描画ツールを作成した。実装にはPythonとPyQt5を使用した。図5.1は作成したプログラムの画面一例である。

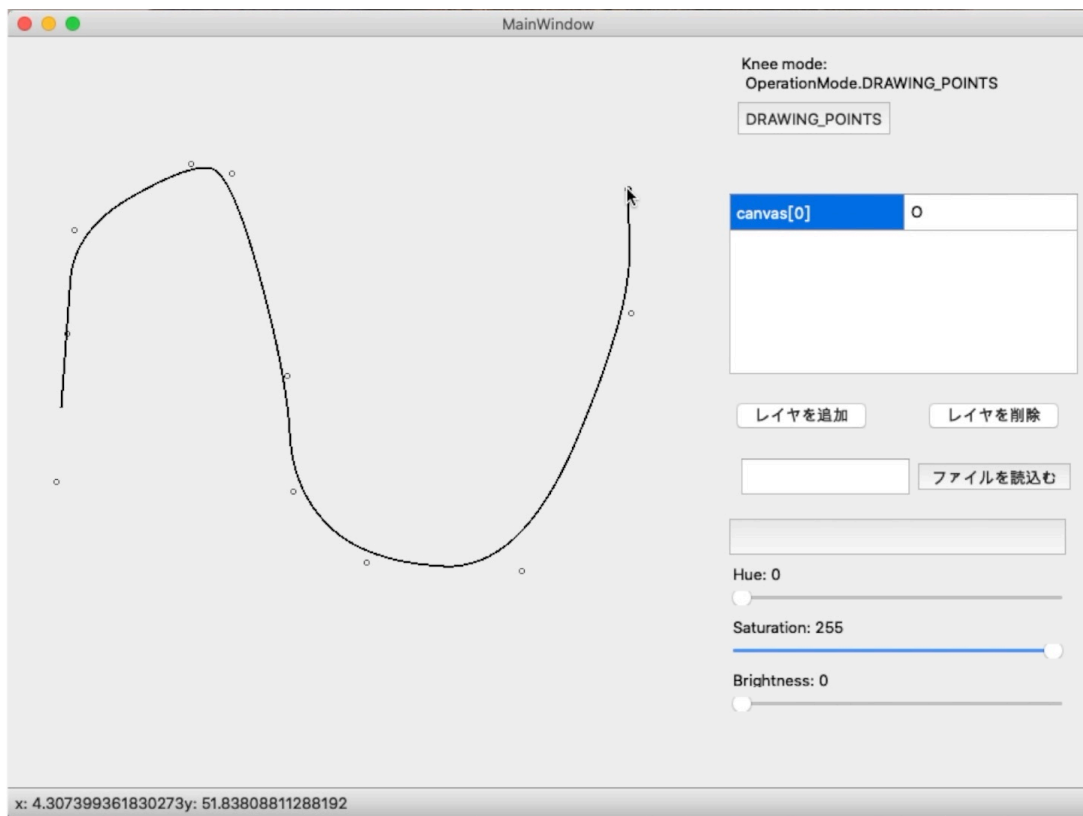


図 5.1 ベジエ曲線描画プログラムの画面一例

5.2.1 膝を用いた操作方法

対象となる3つのGUI操作とベジェ曲線描画ツール上の対応と、その膝での操作方法を述べる。

カーソル操作

カーソル操作は、「ベジェ曲線の制御点の移動」として実装した。図5.2 (A)は、「ベジェ曲線の制御点の移動」における膝操作とプログラム上の動作との対応である。ユーザはマウスによって、すでに描画されている曲線の制御点を1つ選択し、ドラッグすることができる。このとき、膝を上下左右に動かすことで、制御点を対応する方向に移動することができる。

リスト操作

リスト操作は、「レイヤの切り替え」として実装した。図5.2 (B)は、「レイヤの切り替え」における膝操作とプログラム上の動作との対応である。ユーザは膝を左に動かすとリストのより上に表示されているレイヤに、右に動かすとリストのより下に表示されているレイヤに、描画する対象を切り替えることができる。

スライダ操作

スライダ操作は、「ペンの色の変更」として実装した。図5.2 (C)は、「ペンの色の選択」における膝操作とプログラム上の動作との対応である。ユーザは膝を左右に動かすことで色相を、膝を上下に動かすことで明度を調整することができる。

5.2.2 膝操作の対象となる機能の切り替え

膝によってどの機能を操作するかを選択できるようにするため、膝による操作の切り替えを実装した。図5.3は、ベジェ曲線描画プログラムにおける操作の状態遷移図を表す。ユーザは前述の3つの操作を、図5.4の「操作領域」の範囲で膝を動かすことで行う。操作を切り替えたい時は、「切替領域」まで膝を大きく上に動かす。

5.2.3 キャリブレーション

本プログラムはユーザが簡単に膝操作を使えるように、起動時に膝位置のキャリブレーションを行う。4.1節にて述べたものとは異なり、一般的な着座姿勢での上下方向と左右方向の膝の絶対位置 (K_x^t, K_y^t) のみを記録する。キャリブレーションに際して、ユーザは膝が直角になるように座り、距離センサアレイの範囲内に膝を合わせる。プログラムを起動すると自動で記録が行われる。記録は20回行われ、上下方向と左右方向それぞれの平均値を算出を保存

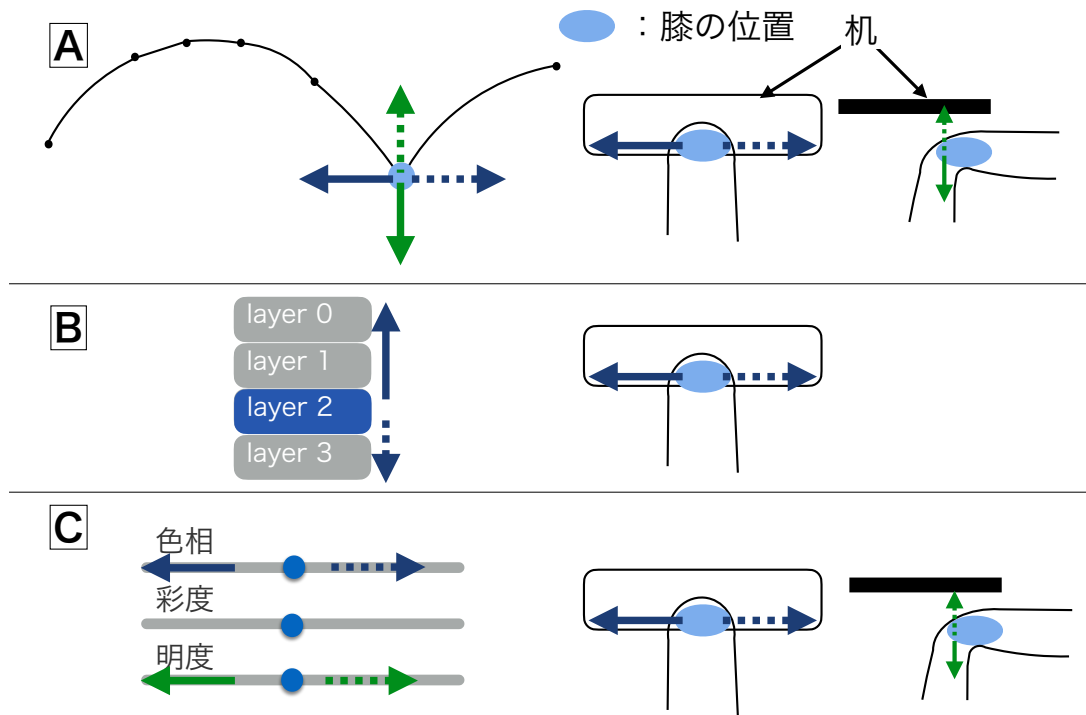


図 5.2 ベジエ曲線描画プログラム上の3つの操作と膝の移動方向との対応. (A) カーソル操作, (B) リスト操作, (C) スライダー操作.

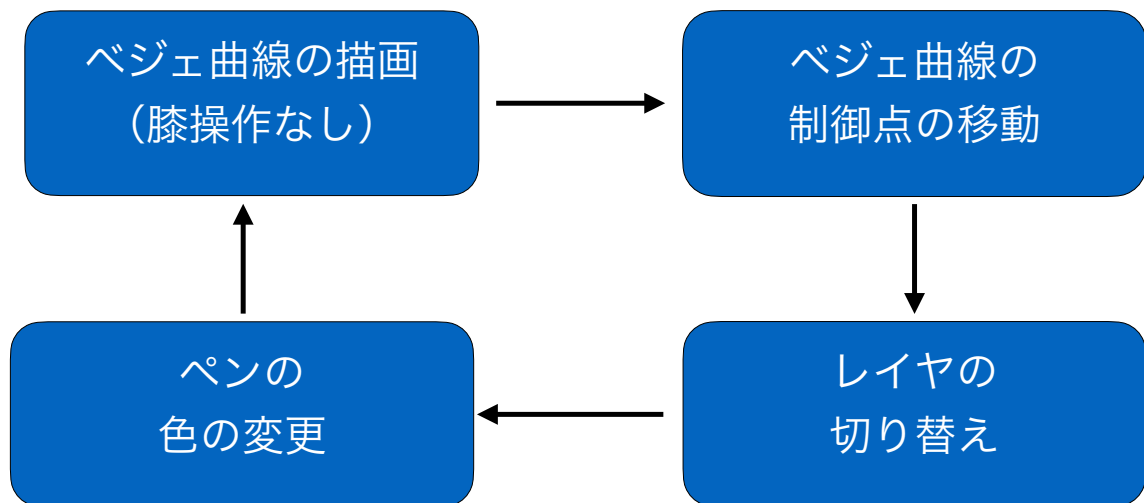


図 5.3 膝によって切り替わる各操作の状態遷移図.

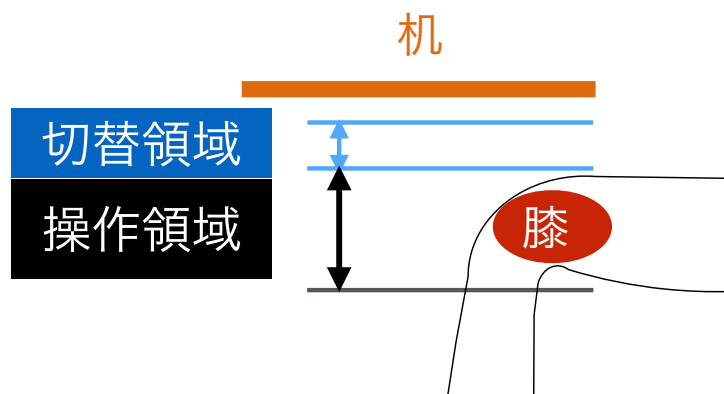


図 5.4 ユーザの膝と操作領域および切り替え領域の関係

する。この時ユーザは動かないように注意する。キャリブレーションが終了すると自動で開始画面が表示される。キャリブレーションを行うことで、図 5.4 の操作領域が決定する。操作領域はキャリブレーション時のユーザの膝の位置を中心として、左右方向に約 1.5 cm，上方向に約 2.0 cm，下方向に約 1.0 cm の範囲となる。

5.3 予備実験：膝によるリスト操作の性能調査

ベジェ曲線描画ツールにおける「レイヤの切り替え」は、膝の操作領域をレイヤの個数に分割することで実装される。この時、ユーザが操作することができる領域数はいくつであるかを調査するために予備実験を行った。実験参加者は 3 名（男性 1 名，女性 2 名）であり，うち 1 名は第 4 章の実験にも参加していた。

5.3.1 実験条件・タスク

図 5.5 は本実験にて使用したプログラムの画面一例である。参加者にはいくつかの長方形（セクション）が表示される。参加者は膝を上下または左右に動かすことで、緑色のセクション（ポインタ）の位置を移動することができる。ポインタを移動させて青色のセクション（ターゲット）に重ね，Enter キーを押す。これを 1 回の選択操作と数える。実験は以下の条件について行った。

- 膝の操作方向：左右，上下
- セクションの数：5，10，15，20
- 現在のポインタの位置：見える（可視条件），見えない（不可視条件）

1 条件につき選択操作は 20 回ずつ行った。セクション数 5 の時は 4 回，セクション数 10 の時は 2 回同じセクションがターゲットとなり，セクション数 15 の時はランダムに 5 つのセク

ションが2回ターゲットとなる。また、セクション数によって1つのセクションの幅（左右方向の時）と高さ（上下方向の時）は表5.1のように変化する。

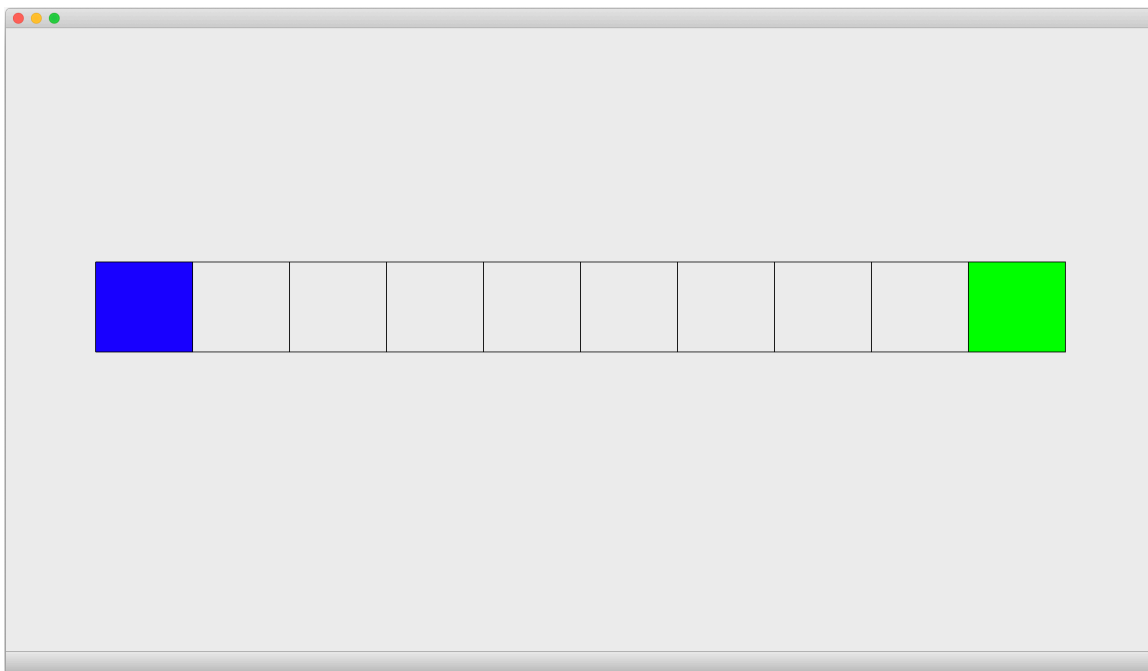


図 5.5 予備実験にて使用したプログラムの画面一例（膝の操作方向：左右，セクション数：10，可視条件）。

表 5.1 1つのセクションの幅または高さの対応

セクション数	左右方向の時の幅 (ピクセル)	上下方向の時の高さ (ピクセル)
5	216.0	124.0
10	108.0	62.0
15	72.0	41.3
20	54.0	31.0

5.3.2 収集データ

データ数の合計は、2（操作方向）×4（セクション数）×2（可視/不可視条件）×20（操作回数）×3（参加者）= 960であった。1データにつき、選択操作の正誤，操作に要した時間を収集した。実験全体では参加者1人あたり30分程度で終了した。

5.3.3 実験結果

図 5.6 は可視条件の平均正解率，平均操作時間のグラフである．縦軸は，平均正解率のグラフでは正解率（％），平均操作時間のグラフでは操作時間（秒）を表す．横軸はセクション数を表す．平均操作時間のグラフのエラーバーは標準誤差を表す．可視条件では，セクション数 5 または 10 においては，平均 90%以上の正解率であった．セクション数 15 または 20 でも 80%以上の正解率であった．したがって，セクション数 20 程度であれば問題なく操作可能であることがわかる．また平均操作時間はセクション数 5 または 10 では 2 秒以内，セクション数 15 または 20 でも 3 秒以内であった．後述する膝操作の GUI への適用実験では，特に操作時間，正解数共にセクション数 10 程度で実験を行うこととした．

不可視条件では，平均正解数は 8 条件中 7 条件で 50%に満たなかった．一方，平均操作時間は操作方向ごとに同程度で，かつ可視条件でのセクション数 5 または 10 と同程度であった．原因を調査するために，各ターゲットの中央の座標を基準とした時の膝の位置の平均誤差を調査した（図 5.8）．グラフの縦軸は，選択操作をした時のターゲットとのずれをピクセル（上段）とセクション数（下段）を表している．横軸はセクション数を表す．エラーバーは標準誤差を表す．不可視条件の場合のピクセルでの誤差は，平均して左右方向で 100 ピクセル以上，上下方向で 150 ピクセル以上の誤差があった．しかしセクション数ごとに大きく差はなかった．またセクション数では，各セクション数において左右方向では最小 0.3 セクション（セクション数 5），最大 4.4 セクション（セクション数 20），上下方向では最小 0.5 セクション（セクション数 5），最大 9.9 セクション（セクション数 20）の誤差があった．

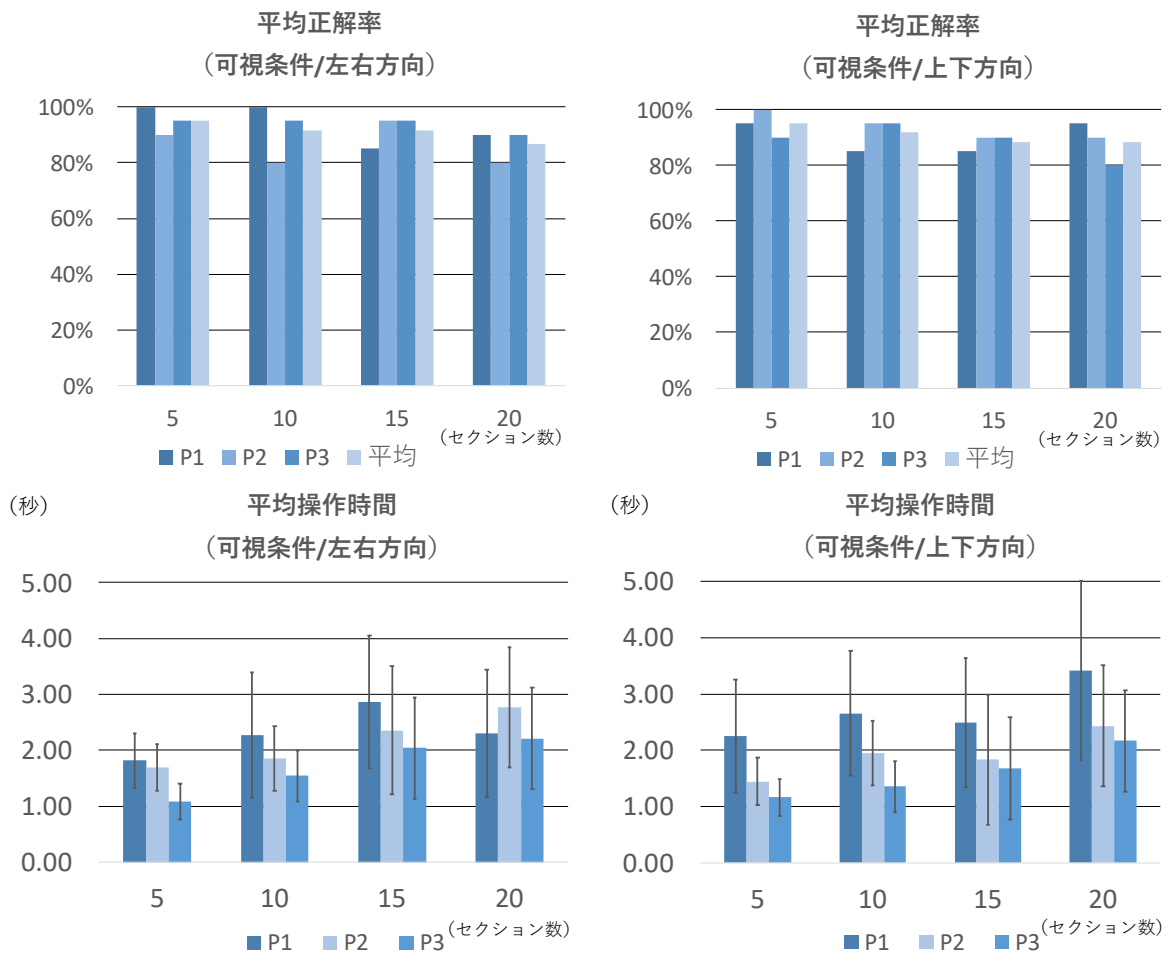


図 5.6 可視条件の平均正解率, 平均操作時間の結果.

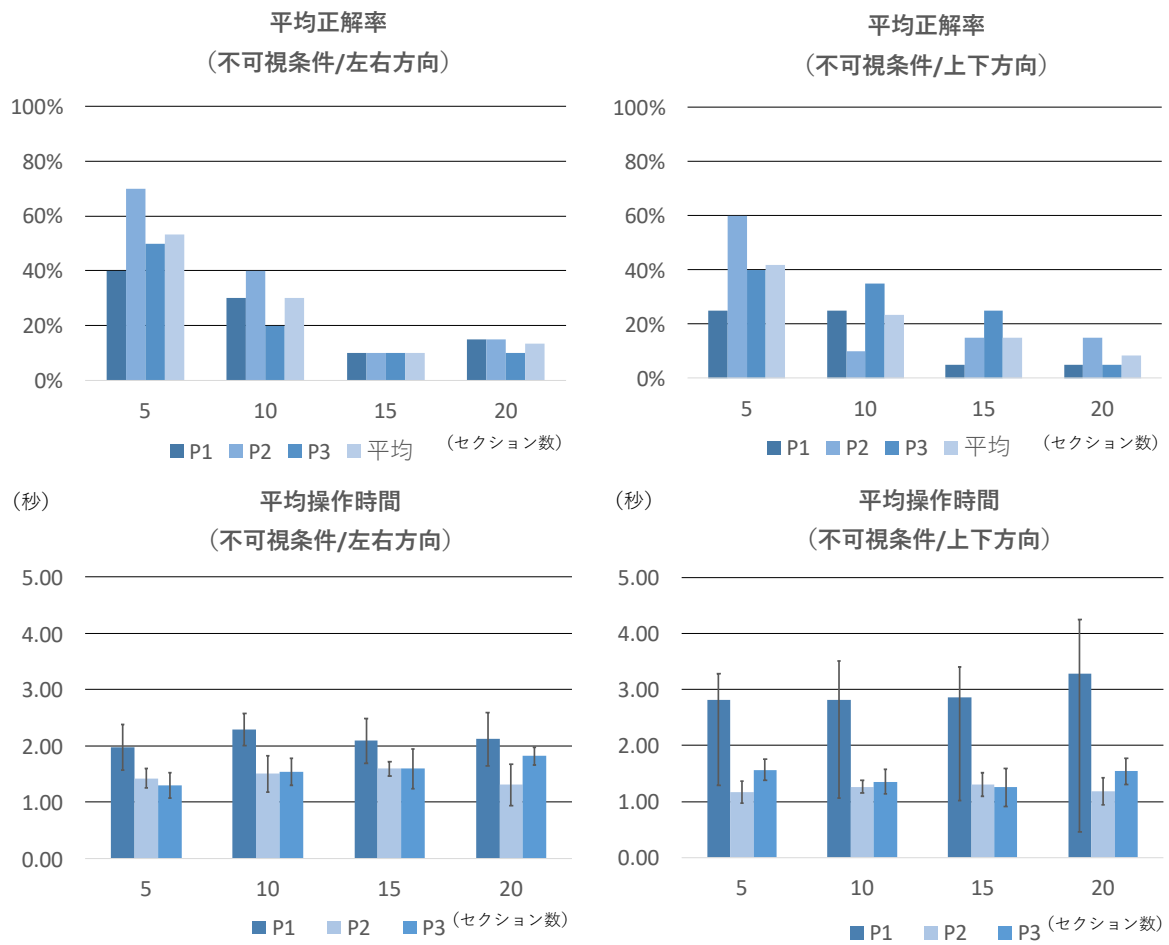


図 5.7 不可視条件の平均正解率，平均操作時間の結果。

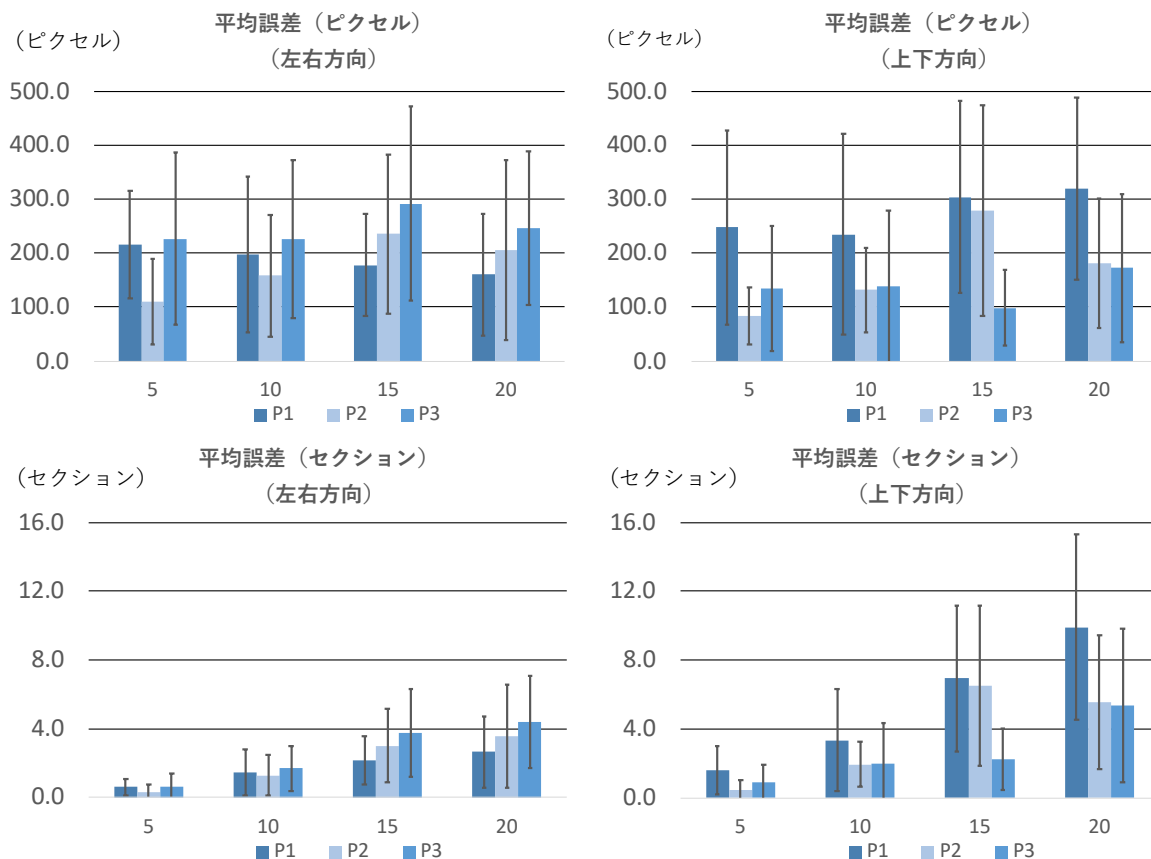


図 5.8 不可視条件における選択時の膝位置の平均誤差

不可視条件について、セクション数を少なくした時に正解率が向上するかを調べるため、セクション数 2,3,4 の場合について追加で調査を行った (図 5.9)。セクション数 2,3 の時では、正解率が平均で 80% を超えた。セクション数 4 の時でも、正解率は左右方向で 70%、上下方向で 60% と、セクション数 5 の時と比べると向上した。したがって、不可視条件の場合はセクション数 3 以下にすることが望ましいと考えられる。

5.4 膝による GUI 操作のユーザビリティ調査

実装したベジェ曲線描画プログラムを通して、膝操作を GUI へ適用した時の使用感を調査する目的で実験を行った。この実験によって膝操作が適合する操作、およびアプリケーション実装上での指針を明らかにする。

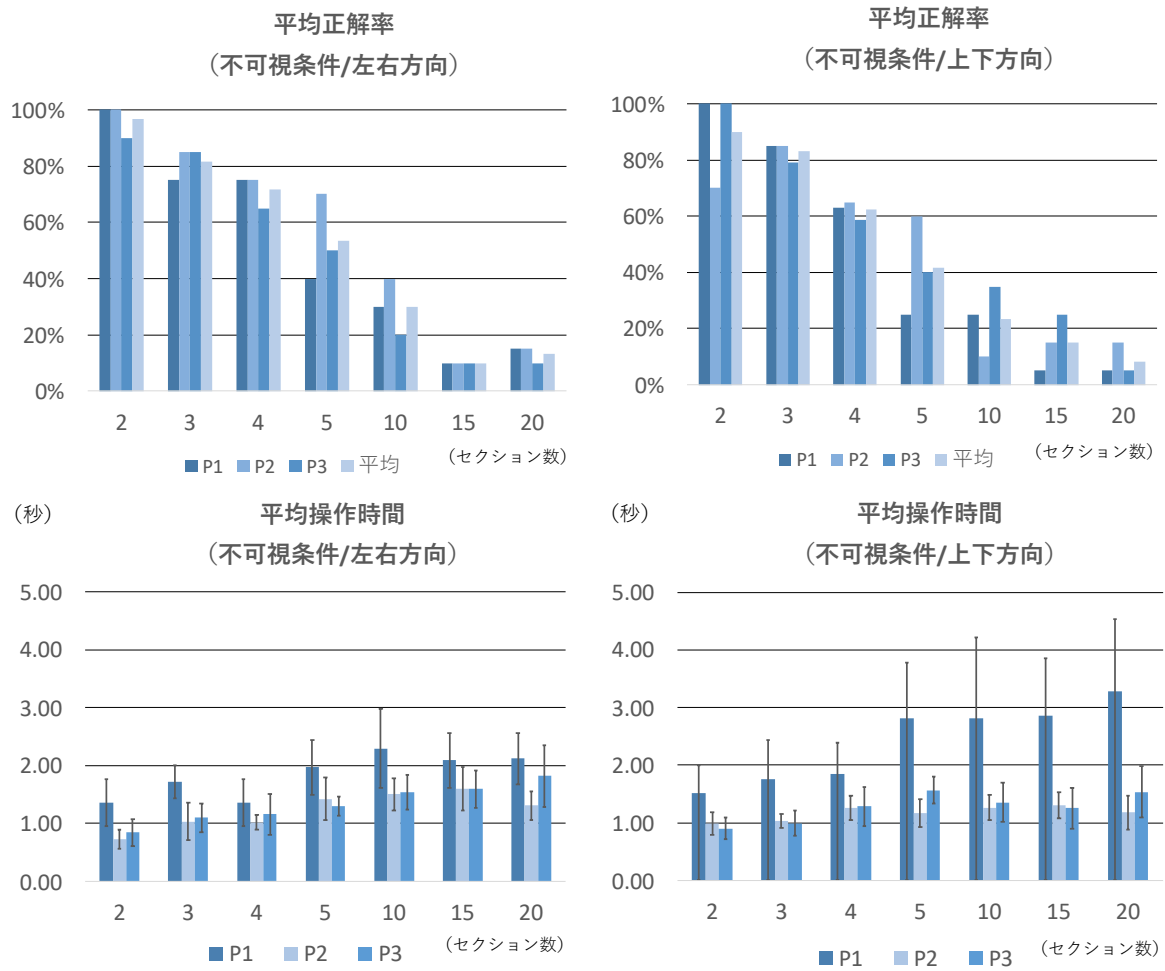


図 5.9 追加条件における不可視条件の平均正解率，平均操作時間の結果とその比較

5.4.1 参加者

参加者は合計6名（男性5名，女性1名）であった。うち3名は過去の実験に参加しており，2名は第4章の実験のみに，1名は第4章と5.3節の実験に参加していた。まず2名に対し実験を行ったところ，レイヤ切替とペンの色変更において，操作を切り替える瞬間にレイヤやペンの色が変わってしまうという問題があることがわかった。対策として，Shiftキーを押している間は2つの操作においてレイヤや色の変更を停止し，操作の切り替えのみを行うことができるように実装を変更した。

5.4.2 実験タスク

実験に際して，「アニメーション描画タスク」を設計した。参加者には10フレームの「夕陽が沈む」アニメーションを作成してもらう。図5.10はアニメーションの一例であり，各フレームの丸が太陽，波線が波を表している。1フレームごとに太陽の位置が徐々に波に沈むように変化させ，同時に線の色も黄色から赤に変化させる。1レイヤに対し1フレームを描く。また，参加者にはあらかじめ著者が用意した1フレーム目の見本をトレースまたは書き写し，10フレーム目には波だけ（図5.10右下）を描くように指示した。加えて参加者には絵の優劣は実験とは関係ないことを注意した。

5.4.3 実験手順

まず参加者は椅子に座り，左右どちらの膝を使うかを選択した。実験者は参加者の着座位置と膝の左右に応じて，参加者の膝が距離センサアレイの真ん中になるように位置を調整した。次に，実験者がプログラムを実際に操作しながら，参加者にプログラムの操作と，アニメーション描画タスクについて説明を行った。その後5分間の練習タスクを行った。練習タスクでは，アニメーション描画タスクを2，3フレーム程度行い，プログラムの操作や膝での操作に慣れてもらった。その後本番タスクを行った。本番タスクは次の2通りにおいてアニメーションの作成を行った。

1. マウス操作のみで行う
2. マウス操作と膝操作を組み合わせて行う

参加者間で1，2のタスクの順番はランダムとした。1回のタスクの制限時間は15分程度としたが，参加者が自分の作品に満足であれば，15分より早く終了することを許可した。本番タスク終了後に自由記述によるアンケートを実施した。またタスク間では5分間の休憩をとった。

5.4.4 収集データ

本番タスク中のマウスカーソル座標，膝の座標，ベジェ曲線描画ツール上の操作を，いずれかが変化した時のイベントを用いてタイムスタンプ付きで記録した。これらを組み合わせた

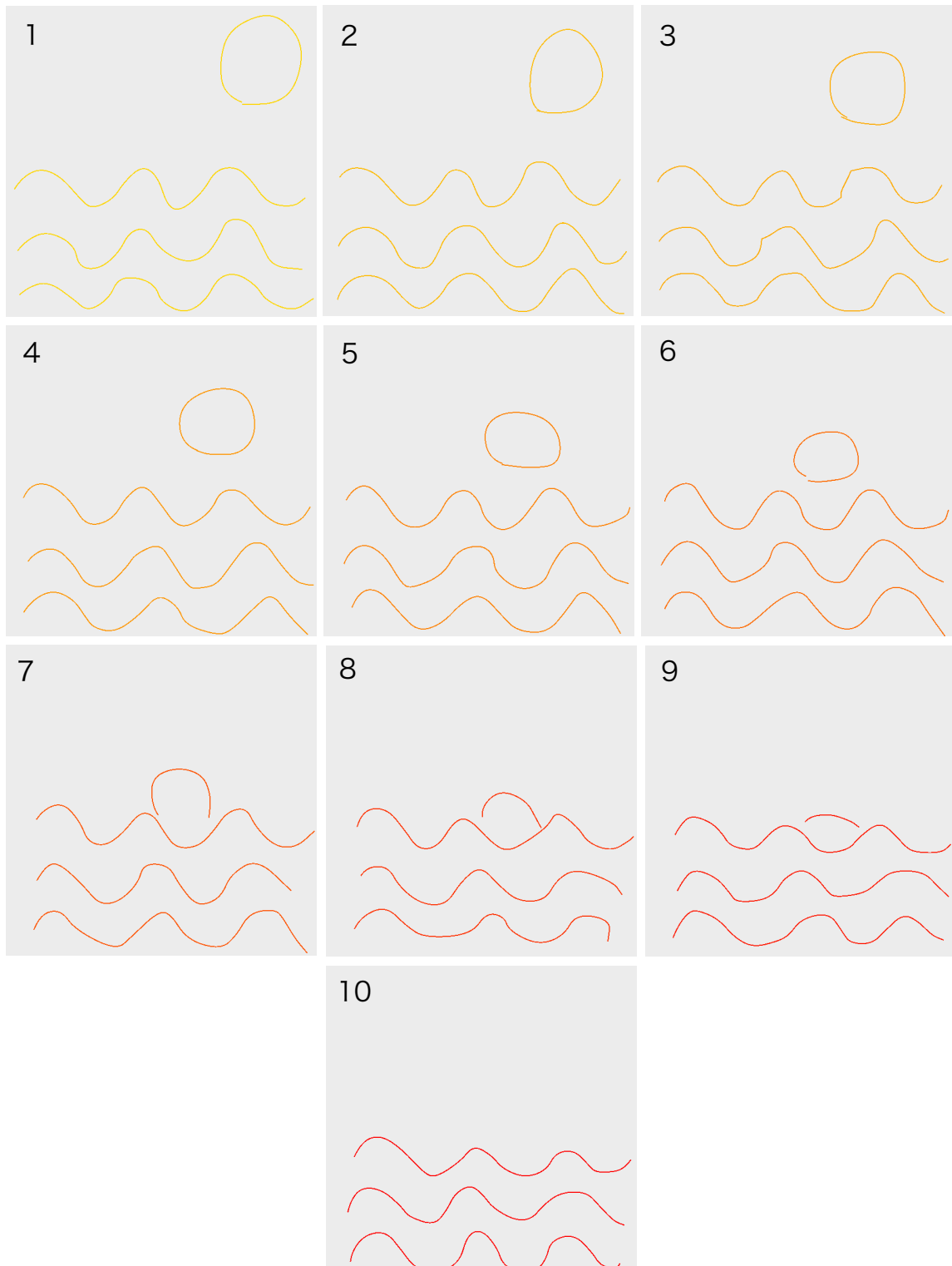


図 5.10 アニメーション描画タスクで描かれるアニメーション一例.

データ1つを1レコードと呼ぶ。参加者1人あたり約20000-50000レコードを収集した。また、参加者の後方からビデオ撮影し、膝操作の様子を記録した。さらに自由記述によるアンケートを行い、どのような操作が好ましいかなどの意見を募った。

5.4.5 実験結果

表 5.2 各操作の実験時間に占める割合。

ベジェ曲線描画ツール上の操作	実験時間に占める割合
ベジェ曲線の制御点の移動	1.4%
レイヤの切り替え	8.4%
ペンの色の変更	34.2%

表 5.2 は3つの操作モードが使用された時間の、実験時間に占める割合を表している。3つの操作モードの中では、「ペンの色の変更」が最も使われた時間が長かった。対して、「ベジェ曲線の制御点の移動」はほとんど使われていなかった。また2つのタスクにおける平均の実験時間は、マウス操作のみで行った場合は12分02秒、マウス操作と膝操作を組み合わせで行った場合は14分06秒であった。

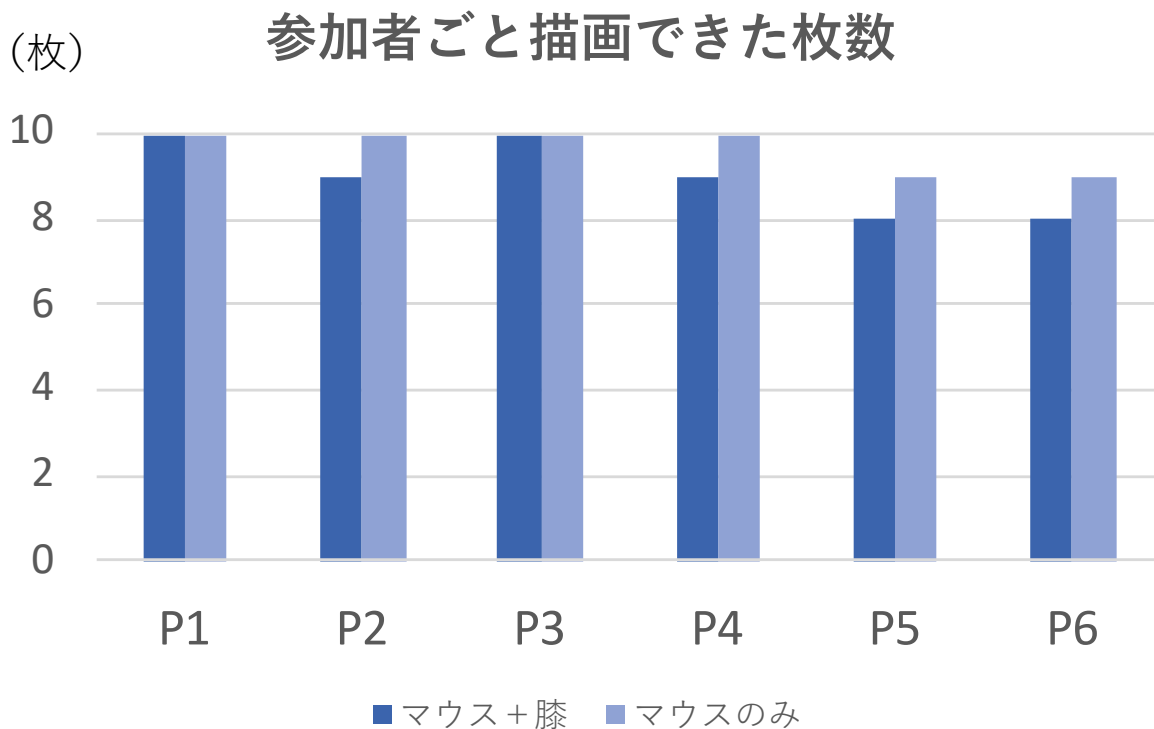


図 5.11 参加者ごと描画できたアニメーションの枚数

アンケートでは、レイヤ切り替え操作については「レイヤの変更を膝で行うのは便利だった」と好意的な意見も得られた。一方で、「選択ではなく、表示のスクロールだけを変更できた方が良いと感じた」という、膝をマウスの補助に用いたいという意見も得られた。ペンの色の選択についても、「レイヤの変更を膝で行うのは便利だった」と好意的な意見があった一方で、「色の細かいところを膝で選ぶのが難しかった」、「色の調整はマウスの方がしやすいと思った」と、膝で操作することが難しいと感じる意見も得られた。また、「ベジェ曲線の制御点の移動」では「点を動かすのにはどうなんだろう」と疑問符を浮かべる意見があった。さらに膝による操作に切り替えに関して、「モード切り替えが1つずつしか進まないのが難しかった」といった意見も得られた。

5.4.6 考察

実験結果より、「レイヤの切り替え」と「ペンの色の変更」については好意的な意見も得られたことから、「リスト選択」と「スライダ操作」は膝操作に適合する可能性があると考えられる。しかし膝操作が難しいという意見や、選択ではない操作に使いたいという意見もあることから、膝操作をマウスの補助あるいはマウスを膝操作の補助に用いることが適する可能性もある。これに対して、「ベジェ曲線の制御点の移動」はあまり使われず印象も悪かった。これは、今回行ったアニメーション描画タスクでは単純な絵であったために必要がないと判断されたこと、絵のクオリティを不問としていたため精密に調整する必要がなかったことが原因として挙げられる。また、実験時間がマウス操作のみで行った場合より、マウス操作と膝操作を組み合わせた場合の方が平均2分程度長くなった。原因の1つとしては練習タスクの長さが不十分であり、参加者が十分に膝操作やプログラムに慣れることができていなかったことが考えられる。さらに、レコードやビデオを確認すると膝での操作の切り替えの誤発火があり、目的の操作に修正するのに時間を取られていたことから、操作の切り替えがうまくいかなかったことも原因であると考えられる。

5.5 本章のまとめ

本章では、第4章で未検証であった、膝操作の一般的なGUI操作への適用可能性を探った。5.3節では、膝によってリスト操作を行った時の特性について調査した。調査の結果、「可視条件」のように視覚的なフィードバックがある状態ではリストが20個以下であれば問題なく操作できるとわかった。しかし「不可視条件」のように視覚的なフィードバックがない状態では、リストが5個以下であることが望ましいと考えられる。また5.4節では、実装したベジェ曲線描画ツールを用いて、膝によるGUI操作の使用感を、マウスのみまたはマウスと膝を組み合わせて使用した時の2通りで調査した。実験の結果、リスト操作やスライダ操作が好意的な印象が得られ、膝操作に適合する可能性が高いことがわかった。しかしカーソル操作については、あまり好意的でない印象が得られた。加えてスクロール操作へ適用する提案

も得られた。これらの結果から，GUI への入力の主体は膝ではなく手とし，膝はその補助として用いることがより適しているのではないかと考える。

第6章 膝入力の様々なアプリケーションへの適用

本章では膝入力の様々なアプリケーションへの適用例，およびそのユーザビリティについて調査する．第5章の結果を踏まえて，次のような指針で操作の設計を行う．

- カーソル操作を行わないが，リスト操作やスライダ操作は行っても良い．
- 疲労感が比較的小さい左右方向の膝の移動を中心とする．
- 疲労感が比較的大きい上下方向の膝の移動が，長い時間行われないように注意する．

指針を元に膝によるジェスチャを設計し，それらを広く普及しているアプリケーションの操作の補助として用いることを提案，検証する．

6.1 膝ジェスチャ

第4章，第5章はいずれも片膝のみを使った操作であった．2つの実験の結果をもとに，まず片膝ジェスチャ（図6.1）を設計した．しかし片膝で行えるジェスチャには，種類に限界が生じると考えた．そこで左右どちらか，あるいは両方の膝が上がっているかで，両膝ジェスチャ（図6.2），時間差ジェスチャ（図6.3）をそれぞれ追加で設計した．

また，一般的な着座姿勢から膝を左右に動かすようにジェスチャを設計すると，ユーザが膝でのジェスチャを行いたくない場合でもジェスチャが認識されてしまう．これを防止するため，膝を上げる動作をトリガーにしてジェスチャを認識する．ユーザは左右どちらかの膝を上げて行う片膝ジェスチャ（図6.1）両膝を同時に上げてから行う両膝ジェスチャ（図6.2），両膝を時間差をつけて上げることで行う時間差ジェスチャ（図6.3），のいずれかを行う．片膝ジェスチャの場合は，膝を上げている間対応する操作を行うことができる．両膝ジェスチャ，片膝ジェスチャの場合は，ジェスチャ実行後膝を下ろすとジェスチャに対応した操作が実行される．ユーザが1つの膝ジェスチャを実行するまでの流れを図6.4に示す．

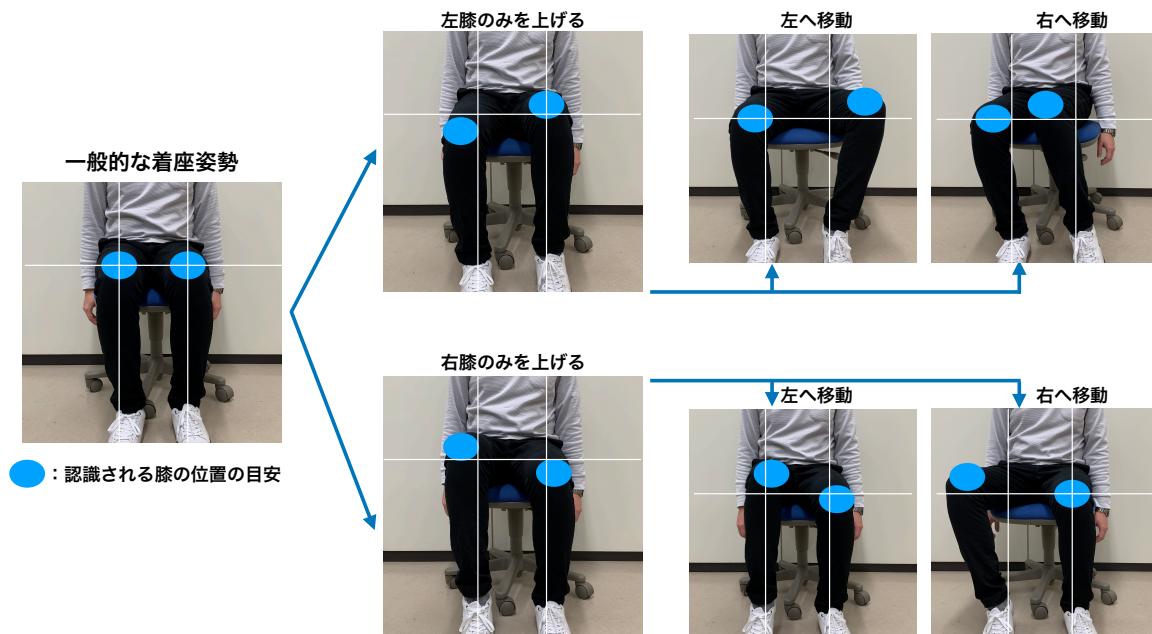


図 6.1 片膝ジェスチャ

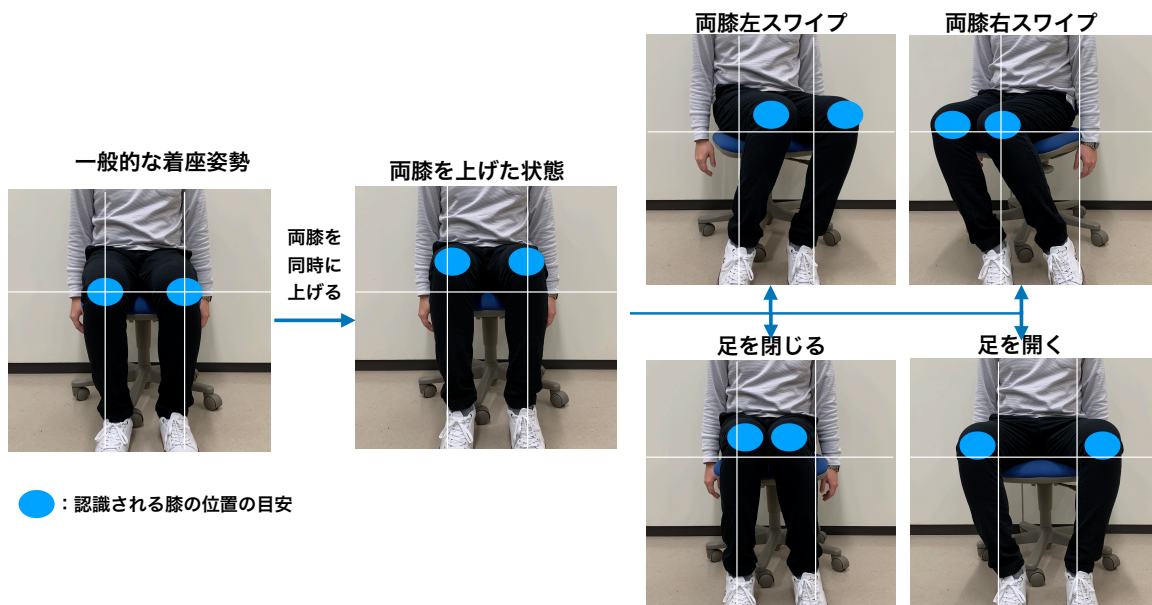


図 6.2 両膝ジェスチャ

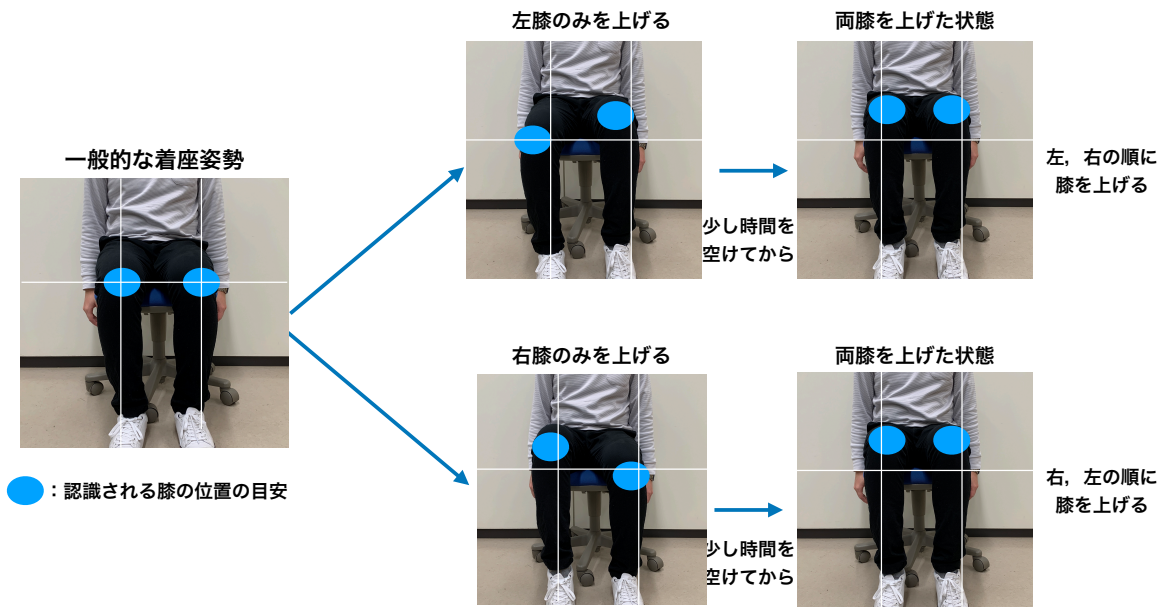


図 6.3 時間差ジェスチャ

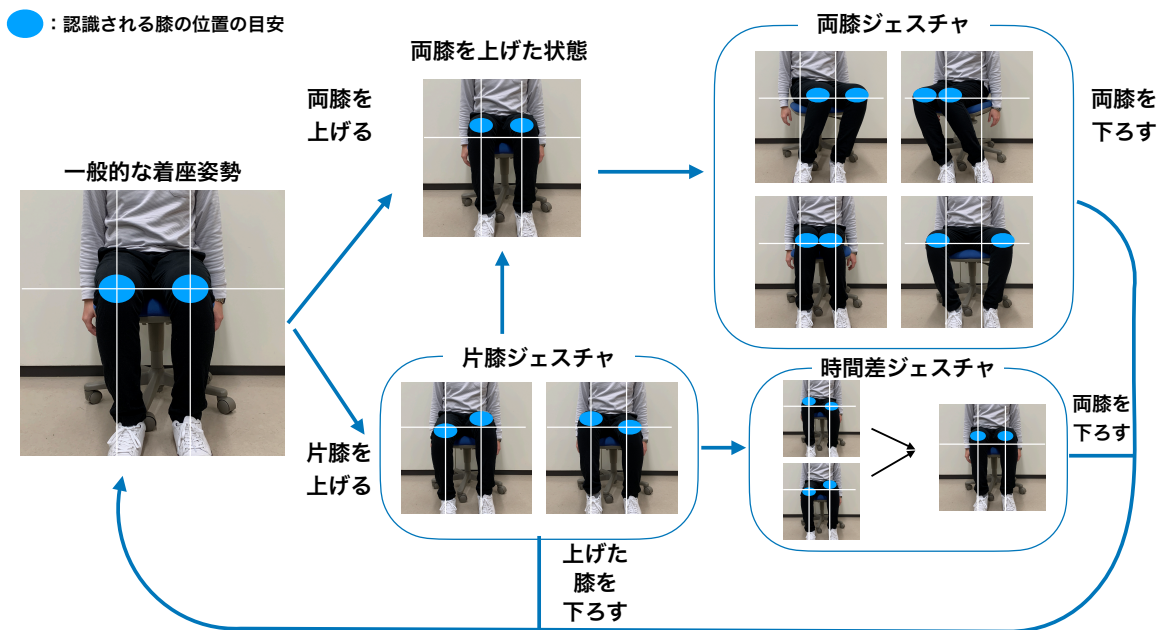


図 6.4 ユーザがジェスチャを行う時の流れ

6.2 両膝の位置認識のための膝位置認識デバイスの変更

両膝の位置を同時に認識するために、10個のセンサを使った距離センサアレイ1つから、センサが5個並んだ距離センサアレイ2つに変更した(図6.5)。外枠を3Dプリンタで作成し、距離センサアレイ1つにおけるセンサ間の距離は以前と同様に3.0cm間隔である。また、本章の調査では2つの距離センサアレイ同士を約15cm離して設置することにする。これはどちらの膝も左右に自由に動かすことができるようにするためである。

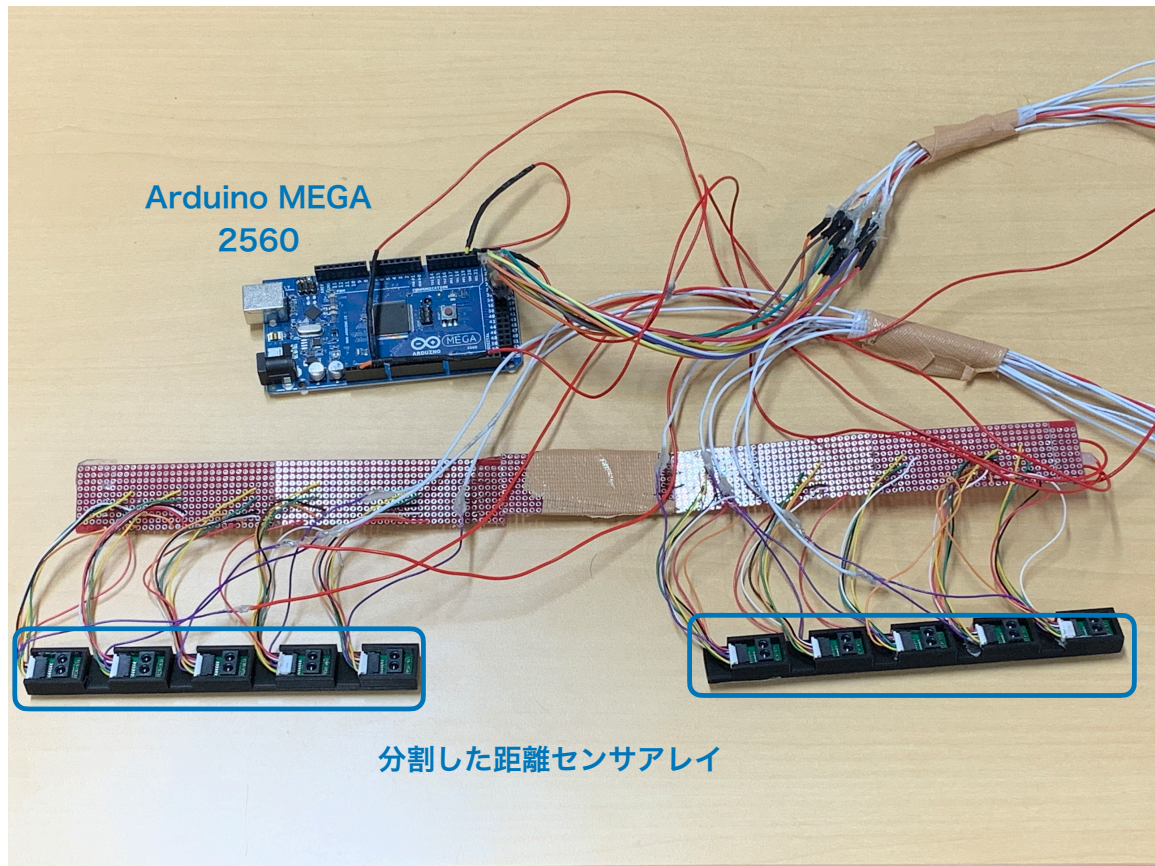


図 6.5 実装を変更した距離センサアレイ

6.3 膝ジェスチャ認識とキーコマンドの送信を行うソフトウェア

膝ジェスチャを認識し、それに対応するキーコマンドの送信を行うソフトウェアを、Swiftアプリケーションとして実装した。ユーザが操作する画面を図6.6に示す。

アプリケーションには図中1, 2の位置に左膝の絶対位置, 3, 4に右膝の絶対位置が表示されている。ユーザはアプリケーション起動後, 図中の5のボタンを押してキャリブレーション

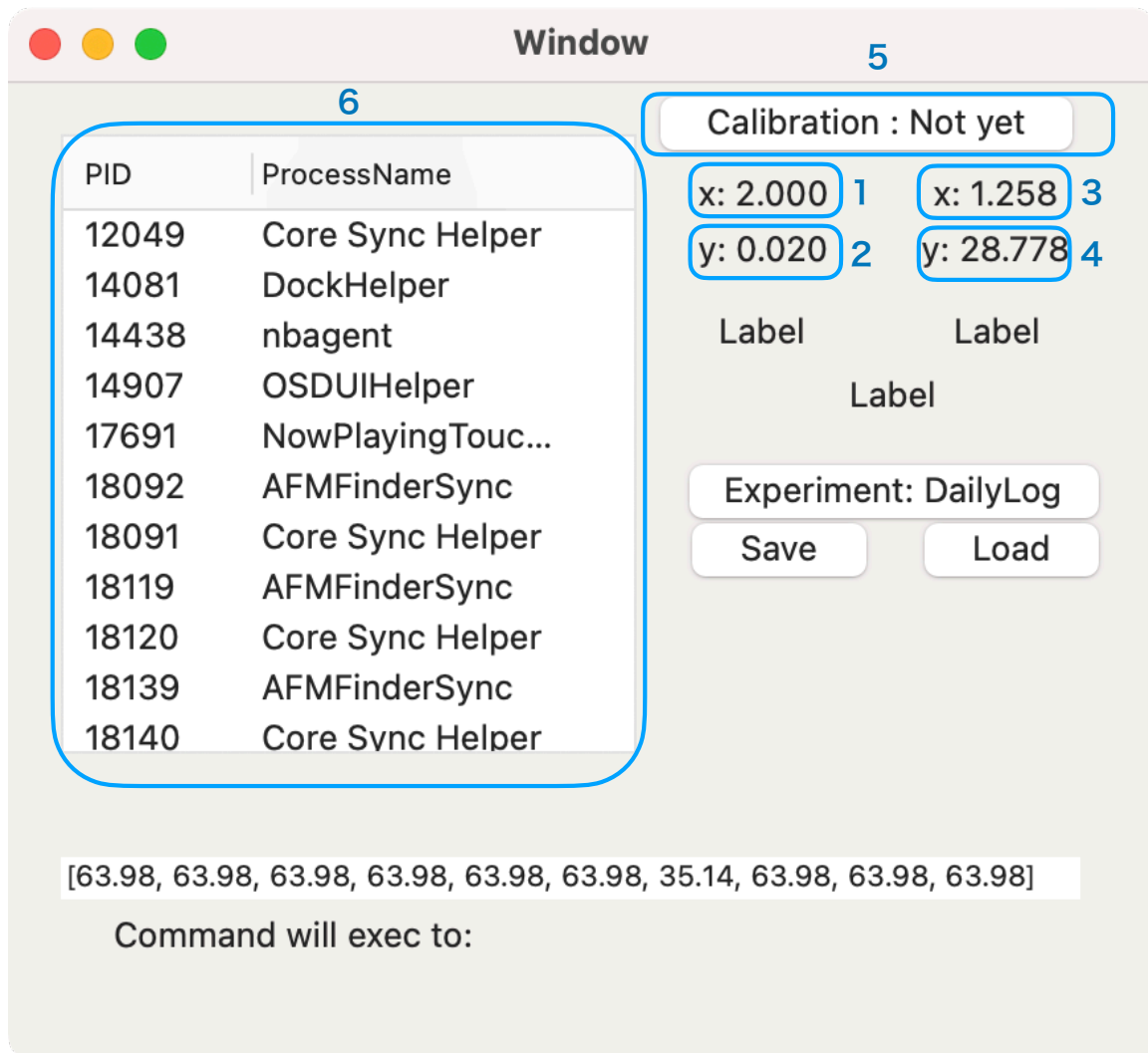


図 6.6 膝ジェスチャ認識とキーコマンドの送信を行うソフトウェアのウィンドウ

ンを行う。キャリブレーションではボタンを押した時の膝の絶対位置を記録する。ただし第5章の実験とは異なり、記録は1回のみ行われる。キャリブレーションによって、操作領域は左右1.5 cmの範囲内となる。キャリブレーションが終了すると、図中の1, 3の表示が変わる。これは操作領域を5分割した時に、膝がどの領域（セクション）にあるかを示している。膝ジェスチャはキャリブレーションが行われており、キャリブレーション時の位置を基準として膝が後述する閾値より上にある時に認識される。ジェスチャが認識されると、ショートカットに対応するキーコマンドがアプリケーションに送信される。キーコマンドの送信先は図中の6のテーブルから決定する。このテーブルには現在起動しているアプリケーションのプロセスIDとプロセス名が表示されている。ユーザは図6.4のフローに従ってジェスチャを行うと、後述する認識アルゴリズムによってジェスチャが認識され、対応するキーコマンドが指定されたアプリケーションへ送信される。

6.4 認識アルゴリズム

片膝ジェスチャはユーザのどちらかの膝が上がっている時に認識される。なお両膝ジェスチャと異なり、片膝ジェスチャはユーザが膝を上げている間は、システムはジェスチャが行われていると認識し続ける。システムはユーザの膝が上がった時、上がった方の膝がどのセクションに位置するかを記録する。そのセクションを基準として、膝がどちらかの方向に1セクション以上移動するとそれに対応した操作が行われる。例えば、プレゼンテーションソフトのスライド移動を左膝の片膝ジェスチャで行う時、ユーザが左膝を右に1セクション移動すればスライドを1枚、2セクション以上移動すれば2枚次のスライドへ移動することができる。また、対応する操作によっては膝の移動を無視することができる。この場合、ユーザはどちらかの膝を上げてから下ろすだけでシステムはジェスチャを行ったと認識する。

各膝ジェスチャは、左右の膝が上がっているか、および左右の膝が操作領域の中で何セクション移動したかで識別される。両膝ジェスチャは、ユーザの両方の膝が上がった状態で認識される。システムは膝が上がった時に、それぞれの膝がどのセクションに位置するかを記録する。そのセクションを基準として、両方の膝が同時にどちらかの方向に1セクション以上移動した時に、両膝ジェスチャが行われたと認識する。左右の膝が同時に左に1セクション以上移動した場合は「両膝左スワイプ」、右に1セクション以上移動した場合は「両膝右スワイプ」として認識する。また左の膝が右に1セクション以上移動し、かつ右の膝が左に1セクション以上移動した場合は「足を閉じる」として認識する。逆に左の膝が左に1セクション以上移動し、かつ右の膝が右に1セクション以上移動した場合は「足を開く」として認識する。なお、システムは膝が上がってから下ろすまでの間に最初に行われたジェスチャを優先する。したがってユーザは図6.5に示すサイクルの中で、1種類のみ両膝ジェスチャを行うことができる。

時間差ジェスチャはユーザが片方の膝を上げ、一定時間後にもう片方の膝を上げた場合に認識される。ユーザが一方の膝を上げた時を基準として、時間内にもう一方の膝が上がった時に、システムは時間差ジェスチャと認識する。今回の実装では、時間差ジェスチャと認識

される時間差は約 400–2000 ms の間とした。ただし 2 つの膝が上がった時の時間差がこの範囲外の時は、両膝ジェスチャを認識する。

6.5 調査対象とするアプリケーション

今日広く普及しており、机上で PC を用いて作業をするユーザが使う機会の多いアプリケーション例として、Keynote²、Microsoft Excel³（以下 Excel）、Visual Studio Code⁴（以下 VSCode）の 3 つを対象とした。

まず、Keynote に代表されるプレゼンテーションアプリでは、スライドの移動や選択、文字フォントやサイズなどの変更のためにマウスカーソルを移動する機会が多いと考える。これらの操作の一部を膝入力に置き換え、マウスと併用できるようにすることで、ユーザビリティの向上を狙う。

Excel に代表される表計算ソフトも同様に、機能の利用のためにマウスカーソルの移動が多用されると考える。様々な機能へのアクセスを簡単にするためにショートカットキーも多数実装されているが、完全に覚えるためには長期にわたって使用する必要がある [Wes97]。これらマウスカーソルを使った操作やショートカットキーを置き換えることで、ユーザビリティの向上を図る。

VSCode に代表されるエディタアプリは、キーボードによる入力が大半であり、ショートカットキーも多数実装されている。しかし中にはショートカットキーを 2 段階で入力するといった複雑なキー入力も存在する。こうした機能を膝入力へ置き換えることで、頻繁に使う機能へのアクセスが容易になると考える。

6.6 膝を上げる動作の閾値の決定

膝ジェスチャを用いない日常的な動作の中で、膝ジェスチャが認識されることを防ぐため、日常的な姿勢の中で膝の高さがどう変化するかを調査した。調査は筆者 1 名で行った。調査には図 6.6 のプログラムを使用して、6 日間（D1–D6）に分けて距離データを記録した。記録した時間と距離データのフレーム数を表 6.1 に示す。各日の距離データの第 1 フレームを上下方向のキャリブレーションとして、キャリブレーション時の絶対位置と各フレームの上下方向の絶対位置の差を計算する。膝が近づくと上下方向の絶対位置は減少するので差は正に、遠ざかると上下方向の絶対位置は増加するので差は負になる。差を区間の長さ 0.5 のヒストグラムにまとめ（図 6.7）、度数が十分に小さくなる階級を求めた。

図 6.7 からは、全体として差が +2.0 より大きい階級の度数がとても小さいことがわかる。ヒストグラムを詳細に調べると、差が +2.0 より大きい階級における度数の合計は、D1 では 49 (0.29%)、D2 では 26 (0.16%)、D3 では 0 (0.00%)、D4 では 581 (0.63%)、D5 では 82 (0.10%)、

²<https://www.apple.com/jp/keynote/>

³<https://www.microsoft.com/ja-jp/microsoft-365/excel>

⁴<https://code.visualstudio.com>

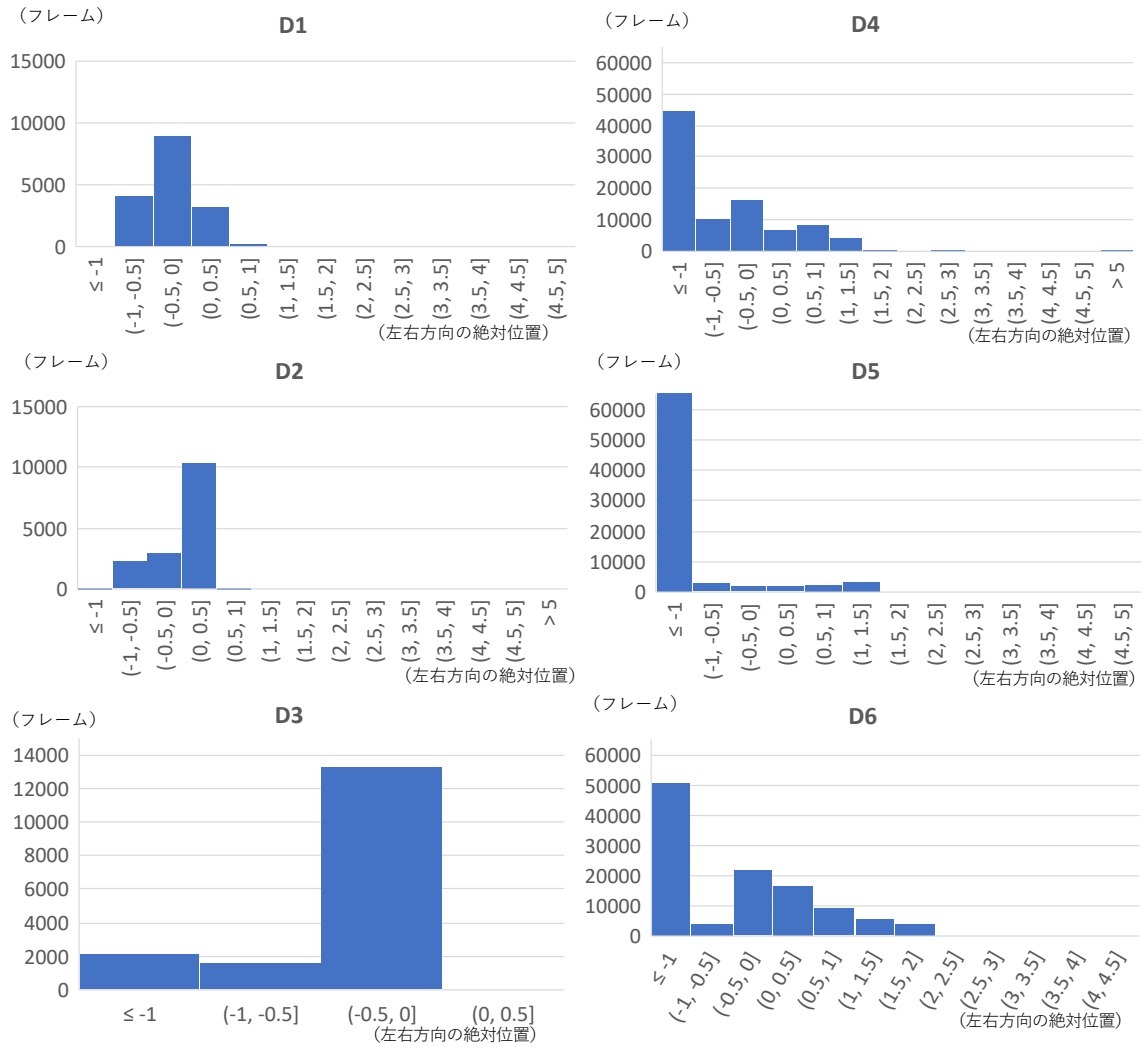


図 6.7 日毎の上下方向のキャリブレーション時の絶対位置と各フレームの絶対位置の差のヒストグラム

表 6.1 日毎の距離データを記録した時間とフレーム数

	計測時間 (hh:mm:ss)	フレーム数
D1	0:30:17	16638
D2	0:29:17	16062
D3	0:31:16	17114
D4	2:48:52	92331
D5	2:23:06	79702
D6	3:25:48	113656
合計	10:08:36	335503

D6では232(0.20%)フレームであった。以上の結果から、の実験では膝の上下方向の絶対位置の閾値を2.0に設定した。

6.7 両膝ジェスチャおよび時間差ジェスチャの認識率調査

設計した各膝ジェスチャが識別アルゴリズムによって識別できるかの調査を行った。調査は両膝ジェスチャと時間差ジェスチャのみを対象とした。なお片膝ジェスチャについては、5.3節とほぼ同様の操作となるため対象外とした。調査は筆者1名で行った。両膝ジェスチャ4種類、時間差ジェスチャ2種類をそれぞれ50回、合計300回のジェスチャを行った。まず表計算アプリケーションを用いて、ランダムなジェスチャの実行順を作成した。次にその順番にジェスチャを実行し、膝を下ろした瞬間に図6.6のプログラムによって表示される識別結果を記録した。図6.8は識別結果を混同行列としてまとめたものである。実験全体での識別率は83.3%であり、両膝ジェスチャ、時間差ジェスチャは問題なく識別できると考えられる。

6.8 膝ジェスチャのユーザビリティ評価実験

膝によるジェスチャを使ってKeynote, Excel, VSCodeを操作した時のユーザビリティ、ならびに各アプリケーションにおいて、どのような操作を膝ジェスチャで行うべきかを調査した。実験参加者は6名で、全て男性の大学生または大学院生であった。このうち5名は過去の実験に参加しており、4名は第4章と5.4節で行った実験に、1名は第4章、5.3節および5.4節で行った実験に参加していた。

6.8.1 実験手順

まず参加者が着座した後、距離センサアレイが設置されている位置と参加者の足の位置を大まかに合わせた。次に実施者が実験用プログラムを起動した。プログラムが開始すると両

(回)	両膝左 スワイプ	両膝右 スワイプ	足を開く	足を閉じる	左, 右の順に 膝を上げる	右, 左の順に 膝を上げる	識別なし
両膝左 スワイプ	43	0	3	0	0	0	3
両膝右 スワイプ	0	41	0	0	0	0	9
足を開く	1	0	41	0	0	0	8
足を閉じる	0	0	2	42	0	0	6
左, 右の順に 膝を上げる	0	0	0	0	39	0	11
右, 左の順に 膝を上げる	0	0	0	0	0	44	6

図 6.8 両膝ジェスチャおよび時間差ジェスチャの識別結果

膝の左右方向の絶対位置（数値は 0.5–3.5 程度で変化する）がそれぞれ表示される。この表示をもとに参加者は膝の細かい位置を調整して、両膝の位置が 1.5–2.0 の範囲でほぼ同じ値になるようにした。

次に「練習フェーズ」を行った。まず実施者が参加者に現在認識可能なジェスチャを説明した。参加者がジェスチャを行うとプログラムにジェスチャの認識結果が表示された。実施者の説明と並行して、参加者はジェスチャそれ自体の練習を行い、システムに慣れてもらった。

練習フェーズ終了後に「本番フェーズ」を行った。本番フェーズは 3 セッションに分けて行った。1 つのセッションでは、参加者は Keynote, Excel, VSCode のいずれかを、従来の操作と膝によるジェスチャを組み合わせる操作をした。各セッションの開始前に、実施者は参加者に練習フェーズで行ったジェスチャと機能の対応を、対応表（表 6.2）を用いて説明した。なお対応表はセッションの開始後も参加者の手元に置いておくものとした。説明をした後セッションを開始した。セッション中は、参加者は後述の実験タスクに加えて、「ジェスチャを行い正しく認識された回数」、「ジェスチャを行ったが認識されなかった回数」、「意図せずジェスチャが行われた回数」の 3 つを記録用ラップトップ PC を用いて記録した。また各セッションの終了後と全てのセッション終了後にアンケートを行った。

6.8.2 実験タスク

各セッションでは、参加者に各アプリケーションを使った以下のような簡単な課題を行ってもらった。

表 6.2 ジェスチャとアプリケーションの操作との対応

ジェスチャ	Keynote での操作	Excel での操作	VSCoDe での操作
両膝で左スワイプ	オブジェクトリスト のトグル	行 or 列の削除	エディタを 左右方向に分割
両膝で右スワイプ	インスペクタサイドバー のトグル	新しい行 or 列の挿入	エディタを 上下方向に分割
足を開く	スライド表示の拡大	シート拡大	
足を閉じる	スライド表示の縮小	シート縮小	
左膝のみ上げて から左右に移動	オブジェクトを 1 レイヤー分 前に出す (左) /奥に送る (右)	表示シートの移動	開いているファイル を切り替える
左膝のみ上げて 下ろす			
右膝のみ上げて から左右に移動	前のスライドに移動 (左) 次のスライドに移動 (右)		検索したときに 前の項目 (左), 次の項目 (右) に移動
右膝のみ上げて 下ろす		絶対/相対参照の切り替え	
左, 右の順に 膝を上げる		選択した行 or 列 を昇順ソート	関数の定義部分 にジャンプ
右, 左の順に 膝を上げる		選択した行 or 列 を降順ソート	関数の定義を その場に表示

- Keynote を使うセッション： コンピュータゲームのルール説明を行うスライドを作成する作業
- Excel を使うセッション： 家計簿を模した表を編集する作業
- VSCode を使うセッション： 最大公約数を求める C プログラムの穴埋め作業

なお各課題の達成度等は実験結果として考慮しないものとした。各セッションの制限時間は5分とした。各セッション終了後にアンケートを行った。質問項目は次の通りである。

- Q1. このアプリケーションにおける膝ジェスチャの操作は覚えやすいか（1：覚えにくい－7：覚えやすい）
- Q2. このアプリケーションにおける膝ジェスチャの操作は疲れやすいか（1：疲れにくい－7：疲れやすい）
- Q3. このアプリケーションにおける膝ジェスチャの操作は操作しやすいか（1：操作しにくい－7：操作しやすい）
- Q4. このアプリケーションにおける膝ジェスチャの操作は日常的に使いたいと思うか（1：使いたくない－7：使いたい）
- Q5. 両膝を使うジェスチャと片膝のみを使うジェスチャはどちらがやりやすいか
- Q6. 左右に動かすジェスチャと上方向にのみ動かすジェスチャ、はどちらがやりやすいか
- Q7. 今回の対応以外で、膝を使ってアプリケーションのどのような機能を使いたいか、またその時の膝のジェスチャはどのようなものが良いか（自由記述式）

また全てのセッション終了後に別のアンケートを行った。質問項目は以下の通りである。

- Q1. 膝によるジェスチャ操作それ自体は覚えやすいか（1：覚えにくい－7：覚えやすい）
- Q2. 膝によるジェスチャ操作それ自体は疲れやすいか（1：疲れにくい－7：疲れやすい）
- Q3. 膝によるジェスチャ操作それ自体は操作しやすいか（1：操作しにくい－7：操作しやすい）
- Q4. 膝によるジェスチャ操作それ自体は日常的に使いたいと思うか（1：使いたくない－7：使いたい）
- Q5. 膝によるジェスチャ操作それ自体は、机の上で PC の作業をしているという環境では周りの目が気になると思うか（1：気にならない－7：気になる）

6.8.3 実験データと分析方法

セッション中、「ジェスチャを行い正しく認識された回数」、「ジェスチャを行ったが認識されなかった回数」、「意図せずジェスチャが行われた回数」を参加者にカウントしてもらった。分析では合計4回のアンケート結果によるユーザビリティの評価と、上記の3点から認識精度の評価を行った。

6.8.4 結果

ジェスチャの実行回数

図 6.9 に、セッションごとユーザがジェスチャを行った回数を示す。実験全体でジェスチャは 135 回行われ、ジェスチャの実行回数の合計は、Keynote が 19 回、Excel が 91 回、VSCode が 25 回であった。Keynote では、2 名の参加者 (P2, P6) が実行回数が 0 回であった。ジェスチャを行い正しく認識された回数は、Keynote で 11 回 (57.9%)、Excel で 66 回 (72.5%)、VSCode で 19 回 (72.0%) であった。またジェスチャを行ったが認識されなかった回数は、Keynote で 8 回 (42.1%)、Excel で 25 回 (27.5%)、VSCode で 6 回 (24.0%) であった。意図せずジェスチャが行われた回数は、VSCode で 1 回であったが、他の 2 セッションでは 0 回であった。ジェスチャごとの実行回数を調べるため、実験中のビデオから行われたそれぞれのジェスチャが行われた回数を数えた。その実行回数と認識結果を表 6.3 に示す。表中の TP はジェスチャを行い正しく認識された回数、TN はジェスチャを行ったが認識されなかった回数、FP は意図せずジェスチャが行われた回数を表す。

表 6.3 膝ジェスチャごとの実行回数と認識率

	両膝左 スワイプ	両膝右 スワイプ	足を 開く	足を 閉じる	左膝のみ 上げてから 左右に移動	右膝のみ 上げてから 左右に移動	右膝のみ 上げてから 下ろす	左、右の 順に膝を 上げる	右、左の 順に膝を 上げる	合計
TP	3	0	0	0	60	11	21	0	0	95
TN	0	0	0	3	33	2	1	0	0	39
FP	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
合計	3	0	0	3	94	13	22	0	0	135
合計に対する TP の割合 (認識率)	100.0%		0.0%		63.8%	84.6%	95.5%			70.4%

アンケートの結果

図 6.10 は各セッション終了後に行ったアンケートの、全参加者の Q1-Q4 の回答の平均である。なお、Keynote の結果からはジェスチャを行わなかった 2 名の回答が除外されている。また表 6.4 と表 6.5 はそれぞれ各セッション終了後に行ったアンケートの Q5 と Q6 の、2 つの選択肢の回答者数である。なお、Keynote で膝ジェスチャを使わなかった 2 名は、Q5 ではい

(回) アプリケーションごとの膝ジェスチャの実行回数

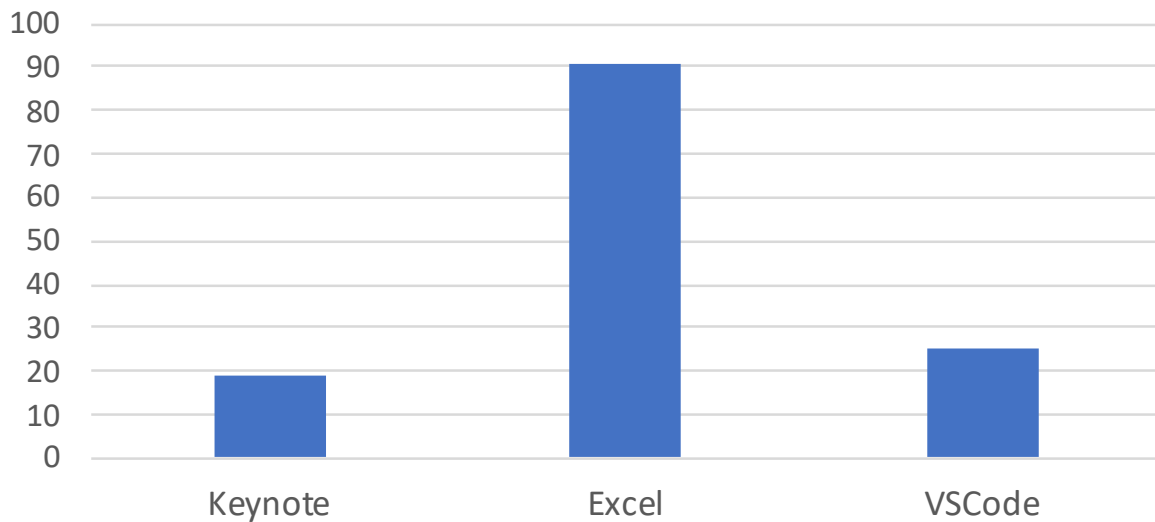


図 6.9 ユーザが膝ジェスチャを実行した回数（棒）とシステムの認識率（折れ線）

いずれも両膝を使うジェスチャを選択しており、Q6でもいずれも左右に動かすジェスチャを選択した。

セッション後アンケート Q1-Q4平均

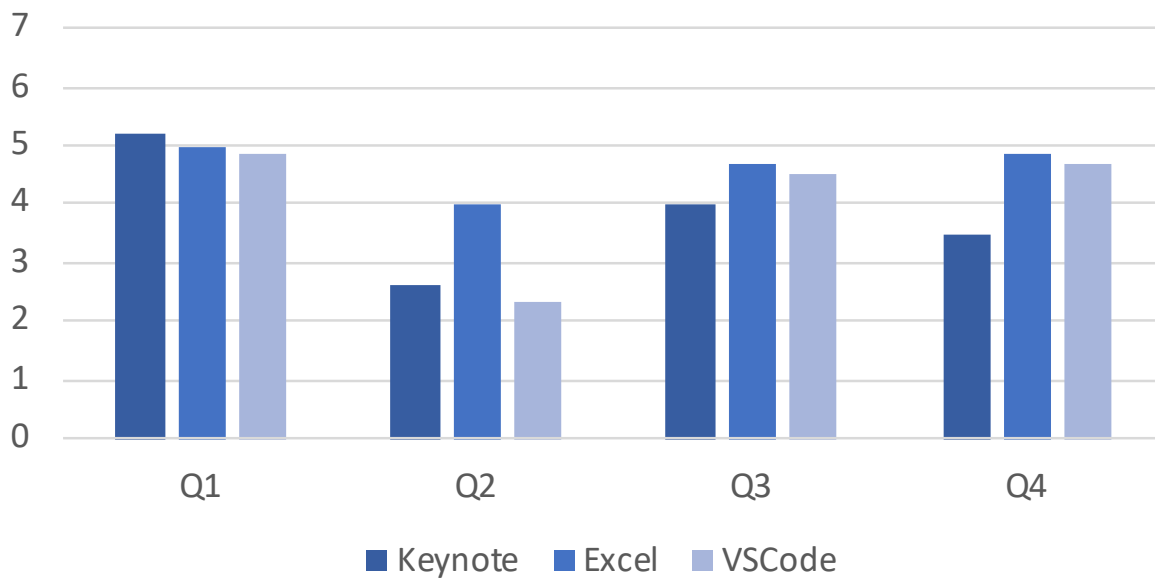


図 6.10 各セッション終了後のアンケート結果（Q1-Q4のみ）

表 6.4 セッション後アンケートの Q5 の回答者数

回答者数 (人)	片膝	両膝
Keynote	3	3
Excel	6	0
VSCode	6	0

表 6.5 セッション後アンケートの Q6 の回答者数

回答者数 (人)	左右	上
Keynote	2	4
Excel	1	5
VSCode	1	5

Q7 での回答は次のようになった。

- Keynote

- 新しいスライド作成，図形の挿入，タブの切り替えをマウスカーソルを動かしてメニューから選択するような操作で行いたい。(P1)
- 右膝上方向で次のスライド，左膝上方向で前のスライドへ移動。(P3)
- 文字等を選択している時は「文字の拡大/縮小」に「足を開く/閉じる」を当てるように，コンテキストが分かれて欲しい。(P4)
- 膝の上げ下げでコピー&ペーストを使ってみたい。(P5)
- 片膝や上方向のみの簡単なジェスチャでは対応する操作がないように思った。(P6)

- Excel

- 割り当てられている操作は使いたくなるものが多かったのでこれらで十分と感じる。両膝スワイプはシートの移動とか，大きく表示が変わるものが良いと思う。(P1)
- 膝を上げるだけでシートを移動したい。(P2)
- セルのコピー&ペーストまたは移動を，セルを選択した状態で足を上げて下ろす。(P4)
- 膝を上げるだけで Enter できる機能が使いたい。(P5)
- 挿入/削除もよく使う操作なので片膝のみで操作したいと思った。足を上げる位置で分割できないか。(P6)

- VSCode

- プログラムの実行に足を上げる。ファイルの切り替えは両膝スワイプ。エディタの分割は、左足で左に追加/削除、右足で右に追加/削除。(P1)
- 細かい処理ではなく、ジェスチャー一回で登録されている複数の処理を一度に実行できると便利だと思った。(P2)
- 行移動。(P3)
- ファイルを閉じるに足を閉じる、フォーマットに両足を上げて下げる。(P4)
- 膝で tab (インデント) の調節をしたい、右左に動かすなど。(P5)
- (Q5,6 と関連して) 操作しやすいものは片膝/上方向だが、両膝を使うものの方が操作のイメージとはあっていた。(P6)

また、図 6.11 は実験終了時のアンケートの、全参加者の回答の平均である。

実験後アンケート

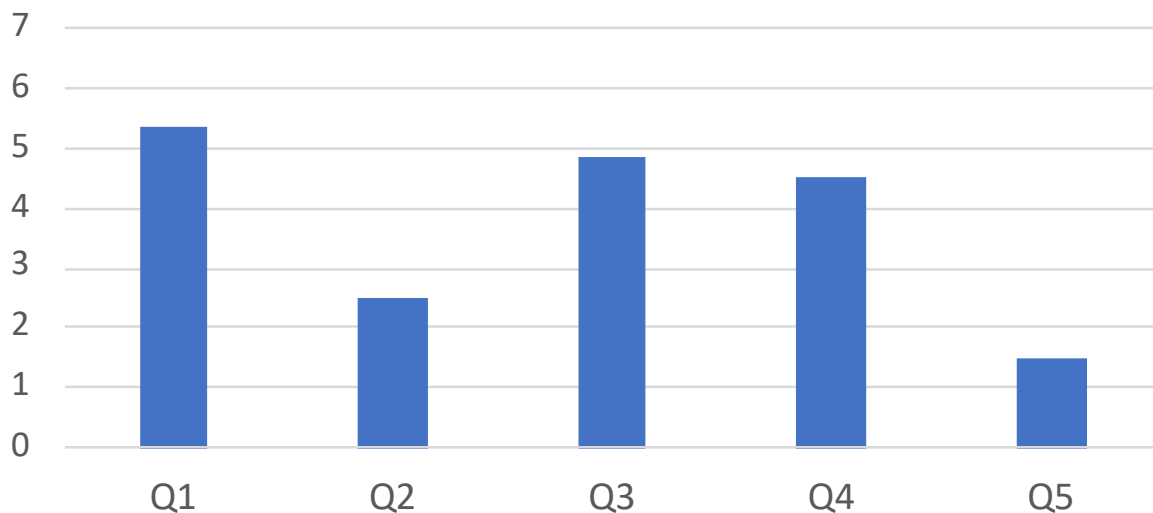


図 6.11 実験終了時アンケートの結果

6.8.5 考察

本実験における膝ジェスチャの認識率は、全体で 70.4% と十分高いとは言えない結果となった。P4 は「Keynote におけるスライドの移動と、Excel におけるシートの移動で、1 枚だけ移動するつもりが 2 枚以上動いてしまった」と述べており、片膝の操作が上手に操作できない様子であった。今後 6.7 節で述べた実験をより多くの参加者間で行い、識別率に影響を及ぼす要素について詳しく調査する必要がある。しかし意図せずジェスチャが行われた回数は全 135 回のジェスチャのうち 1 回だけであることから、6.6 節で決定した閾値は一定の効果があると考えられる。各ジェスチャでは片膝ジェスチャがとてよく使われ、ジェスチャと操作の対

応が便利であったと考えられる。対して時間差ジェスチャは全てのアプリケーションで1回も使われず、一部の両膝ジェスチャも使われなかったことから、ジェスチャの種類や操作との対応について、ユーザへのインタビューによってさらに調査する必要があると考えられる。

セッション後アンケートでは、ExcelのQ2の平均点が高く、他の2つと比べて疲労を感じる結果であった。Excelにおける膝ジェスチャの実行回数も他の2つと比べて多いため、膝ジェスチャを長時間使用すると疲労感が高い可能性がある。また、Keynoteにおいては2名が膝ジェスチャを1度も使わなかったほか、Q3とQ4の回答は他の2つに比べると少し悪い結果であることから、ジェスチャと操作の対応には改良の余地がある。特に、オブジェクトリストやインスペクタサイドバーのトグル、オブジェクトの移動は、実験中の映像を確認してもほとんど使われていなかった。しかしKeynoteにおけるスライド表示の拡大縮小やスライドの移動、Excelにおけるシートの表示の拡大縮小や表示シートの移動、VSCodeにおけるエディタを左右方向に分割、開いているファイルを切り替えるといった操作には好意的な意見も得られた。P4はKeynoteセッション後アンケートのQ4の回答に際して、先述の誤認識がなければ「スライドの移動や拡大・縮小に使いたいと思った」とも述べていた。

セッション後アンケートのQ5の結果から、片膝でのジェスチャが好まれる傾向があった。「片膝の方が楽に動かせた。」(P5)「両方の膝を使う時は動きが大きくなるため、少し動かしづらくなった。」(P4)という意見もあった。Q6の結果からは上方向に動かすことが好まれる傾向があったことが読み取れる。対してP6は「両膝を使う方が操作のイメージと合っていた」と述べている。「挿入/削除もよく使う操作なので片膝のみで操作したい。」(P6)や、「両膝スワイプはシートの移動とか、大きく表示が変わるものが良いと思う。」(P1)という意見もあることから、片膝では簡単な操作を行い、両膝では複雑な操作を行うことが好ましいと考えられる。

セッション後アンケートのQ7では膝ジェスチャのさまざまな活用例を得ることができた。特に「複数の処理を一度に実行できると便利だと思った。」(P2)と、膝ジェスチャにスクリプトを登録することの提案を受けた。よく使う操作を1つの膝ジェスチャで実行できれば、更なるユーザビリティ向上が期待できると考えられる。

実験終了時アンケートの結果からは、膝ジェスチャをしていることが周りから気にならない可能性が高いことがわかる。しかし、今回募った参加者は全て男性の大学生または大学院生であったため、女性や他の年齢層の参加者でも同様の結果が得られるか調査する必要がある。

6.9 本章のまとめ

本章では第5章の結果を踏まえて膝ジェスチャを設計し、広く普及しているアプリケーションの操作の補助として用いることを調査した。Keynote, Excel, VSCodeを使用した実験の結果、膝ジェスチャは実行回数が増えると疲労感が大きくなる可能性があるが、Keynoteにおけるスライドの移動や表示の拡大縮小、Excelにおけるシートの拡大縮小やシートの移動、VSCodeにおけるエディタの分割やファイルの切り替えといった操作において有用な可能性が高いという結果が得られた。加えて膝ジェスチャのさまざまな活用例を得ることができ、ス

クリプトを膝ジェスチャで実行できるようにすることで更なるユーザビリティ向上が期待できると考えられる。

第7章 結論と今後の課題

本研究では膝を PC の入力に用いて、様々な GUI の操作を支援する手法の提案と検証を行った。まず膝による入力を実現するため、距離センサ 10 個と Arduino からなる距離センサアレイを作成し、距離センサアレイから受け取った距離データから、膝の 2 次元座標を算出するソフトウェアを開発した。このシステムを用いて 3 つの実験を行い、各実験から得られた膝入力を実装する上での指針を示した。

1 つ目の実験では、膝入力を PC のカーソル操作に適用し、膝入力の特性を調査した。参加者にはマルチディレクショナルポインティングに基づいたタスクを行ってもらい、ターゲット選択に要した時間からフィッツの法則に基づいたスループットを算出し、性能を評価した。その結果、タッチパッドやジョイスティックに匹敵する性能があることが示唆された。またアンケートにより意図した通りに操作できるか、どれだけ疲労を感じるかを評価した。その結果、ある程度疲労感を感じるが、意図した通りに操作できることがわかった。

2 つ目の実験では、膝入力によって単一アプリケーションの GUI 操作を行い、膝単体または膝とマウスを組み合わせて操作した時の操作感の評価、膝で行いたい操作の調査を行った。カーソル操作、リスト操作、スライダ操作に焦点を当て、手と膝を組み合わせて入力を行うことができるベジェ曲線描画ツールを実装した。参加者にはアニメーション描画タスクを行ってもらい、各 GUI 操作が膝入力に適するかをアンケートによって調査した。その結果、リスト操作とスライダ操作は一定の評価を得られたが、カーソル操作は否定的な意見もあった。さらに、より補助的な操作に膝入力を適用する提案も得ることができた。

3 つ目の実験では、膝入力を様々なアプリケーションの操作の補助に用いることを提案し、そのユーザビリティを調査した。2 つ目の実験で得られた指針をもとに膝ジェスチャを設計し、それらを識別できるジェスチャ認識アプリケーションを実装した。膝ジェスチャを用いて Keynote, Excel, VSCode の操作を補助した時の認識精度を評価し、ジェスチャと操作との対応の評価、および膝ジェスチャで行いたい操作を参加者へのアンケートによって調査した。その結果、一部のジェスチャやその対応については有用であったが、ジェスチャの種類や対象とする操作の検討、またジェスチャの認識精度については課題が残る結果となった。

今後の課題として、距離センサの数を増やす、距離センサの間隔を変更することで、膝位置が認識可能な範囲を広げ、ユーザがさらに自由な姿勢で使用できることを目指す。また 3 つ目の実験の内容を踏まえ、ユーザによる膝ジェスチャ導出などを行うことで、膝ジェスチャによる操作の改良を行う。

謝辞

本論文の執筆，ならびに研究室生活においては高橋伸准教授，志築文太郎教授，川口一画助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

- [CBN10] Andrew Crossan, Stephen Brewster, and Alexander Ng. Foot tapping for mobile interaction. In *Proceedings of the 24th BCS Interaction Specialist Group Conference*, BCS '10, pp. 418 – 422, Swindon, GBR, 2010. BCS Learning and Development Ltd.
- [EEB67] William K. English, Douglas C. Engelbart, and Melvyn L. Berman. Display-selection techniques for text manipulation. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol. HFE-8, No. 1, pp. 5–15, 1967.
- [FDS⁺17] 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.
- [FSI15] Koumei Fukahori, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. Exploring subtle foot plantar-based gestures with sock-placed pressure sensors. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 3019–3028, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [GKS⁺13] 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.
- [HAK⁺11] 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.
- [HC17] 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.
- [Int12] International Organization for Standardization. Ergonomics of human-system interaction — Part 411: Evaluation methods for the design of physical input devices, 2012.

- [PW86] Glenn Pearson and Mark 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.
- [PW88] Glenn Pearson and Mark Weiser. Exploratory evaluation of a planar foot-operated cursor-positioning device. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '88, pp. 13–18, New York, NY, USA, 1988. ACM.
- [Raj16] 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.
- [SM04] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of fitts' law research in hci. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Vol. 61, No. 6, pp. 751–789, 2004.
- [SMS11] Nuttapol Sangsuriyachot, Haipeng Mi, and Masanori Sugimoto. Novel interaction techniques by combining hand and foot gestures on tabletop environments. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '11, pp. 268–269, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [SVAG14] Adalberto L. Simeone, Eduardo Velloso, Jason Alexander, and Hans Gellersen. Feet movement in desktop 3d interaction. In *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 71–74, 2014.
- [VABG15] 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, 2015.
- [VOS⁺15] Eduardo Velloso, Carl Oechsner, Katharina Sachmann, Markus Wirth, and Hans Gellersen. Arcade+: A platform for public deployment and evaluation of multi-modal games. In *Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, CHI PLAY '15, pp. 271–275, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [Wes97] S.J. Westerman. Individual differences in the use of command line and menu computer interfaces. *International Journal of Human Computer Interaction*, Vol. 9, No. 2, pp. 183–198, 1997.
- [XCG⁺18] 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.

- [久米 99] 久米祐一郎, 井上啓, 津田元久. 足を用いたポインティングデバイスの検討 (第3報). 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 23, No. 66, pp. 7–12, 1999.
- [久米 00] 久米祐一郎, 井上啓. 両足操作型ポインティングデバイスの検討. 映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア = The journal of the Institute of Image Information and Television Engineers, Vol. 54, No. 6, pp. 871–874, 2000.
- [井上 98] 井上啓, 久米祐一郎, 津田元久. 足を用いたポインティングデバイスの検討 (第2報): 両足操作傾斜指示型デバイス. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 22, No. 17, pp. 1–6, 1998.
- [今井 97] 今井伸一, 久米祐一郎, 津田元久. 足を用いたポインティングデバイスの検討. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 21, No. 20, pp. 29–34, 1997.
- [市川 19a] 市川佑. 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. 平成30年度卒業論文, 筑波大学, 2019.
- [市川 19b] 市川佑, 志築文太郎, 高橋伸. 距離センサを用いた膝の動きによるカーソル操作手法. 第81回全国大会講演論文集, 第2019巻, pp. 271–272, 2019.
- [田中 05] 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.

付録A 膝位置認識デバイスの回路図

本研究にて作成した膝位置認識デバイスの回路図を図 A.1 示す。

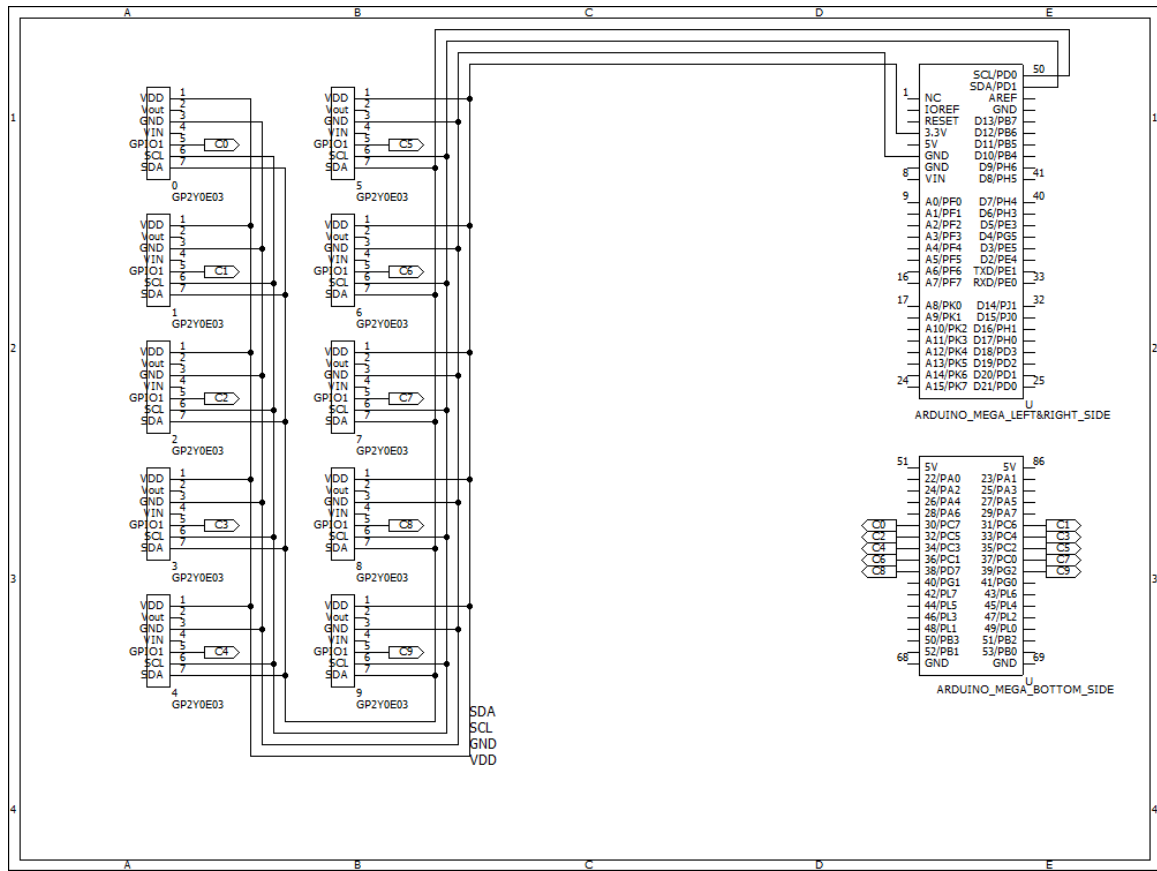


図 A.1 膝位置認識デバイスの回路図