

# GUI操作における膝入力の実用可能性の調査

市川 佑<sup>1,a)</sup> 志築 文太郎<sup>2,b)</sup> 高橋 伸<sup>2,c)</sup>

**概要:** これまで我々は距離センサアレイを用いた膝によるカーソル操作を実現し、その特性を調査してきた。しかし、一般的な GUI 操作に対する膝操作の適用については未検証であった。本稿では、ペイントツールに膝操作を適用することで、一般的な GUI への適用可能性を探った。今回、膝による操作の例として、ベジェ曲線の制御点の移動、レイヤの切り替え、ペンの色の切り替えを実装した。また、実装したペイントツールを用いて複数レイヤの描画を行う実験を行い、膝による操作のユーザビリティ評価を行った。

## 1. はじめに

一般に GUI アプリケーションは、マウスやタッチによる入力により操作することが多い。一方で、足は操作が割り当てられることは少なく、ほとんど動かすことがない。操作を足に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 [1] や、電車内など手の動きが制限されてしまう状況 [2] 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。

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、先行研究には膝でレバーを操作する方法 [3]、机に取り付けた装置を足で動かす方法 [4], [5] 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 [6] を用いる方法がある。こうした方法は、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。

またこれらの研究では、一般の GUI アプリケーションを使った足や膝のユーザビリティについての調査は行われていない。我々の以前の研究 [7] では、距離センサアレイを机下に設置することで膝の位置を認識することでカーソル操作を行い (図 1)、膝操作の特性を調査した。その結果、膝操作はタッチパッド、ジョイスティックに匹敵する性能があり、疲労感はあるが、無理なく意図した通りに行うことができると分かった。しかし、一般的な GUI 操作に対して膝操作を適用した場合については未検証であった。

そこで、本稿では一般の GUI 操作へ膝操作を適用し、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ことを目的とする。このアプローチとして、ベジェ曲線描画プログラムをアプリケーション例として、各機能に膝操作を適用し、ユーザスタディを行う。



図 1 距離センサアレイと膝での操作の様子

## 2. 関連研究

関連する研究について、座った状態において足を入力として用いている研究と、膝を入力として用いた研究を挙げる。

### 2.1 机上での作業における足を用いた入力

Pearson ら [4], [5] 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 [6] 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

<sup>1</sup> 筑波大学  
システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻  
<sup>2</sup> 筑波大学 システム情報系  
<sup>a)</sup> yichikawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp  
<sup>b)</sup> shizuki@cs.tsukuba.ac.jp  
<sup>c)</sup> shin@cs.tsukuba.ac.jp

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。Vellosoら[8]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、片方の足つま先をマウス操作やスライダ操作に適用し、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、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をとることで、問題の解決を図る。

また、足と他の入力モダリティとの組み合わせを行った研究としては、次のようなものが存在する。Göbelら[9]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[10]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。これらの研究では、視線と足による組み合わせでのインタラクションを目的としている。本研究では膝による入力操作を行うことで、膝単体および膝と手を組み合わせた操作を実現する。また一般のGUI操作へ適用することで、どのような操作が膝操作に適しているかを調査する。さらに膝を用いることで、手だけでなく足による入力とも組み合わせることができる可能性がある。

## 2.2 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[3]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することが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、ユーザは座る位置をレバーに合わせなければならず、またレバーを動かすために力をかける必要がある。

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。

## 3. 膝操作を利用したベジェ曲線描画プログラム

代表的なGUI操作として今回調査対象としたのは、「カーソル操作」、「リスト選択」、「スライダ操作」の3つである。これらはGUI操作に必須の機能であり、膝操作単体また

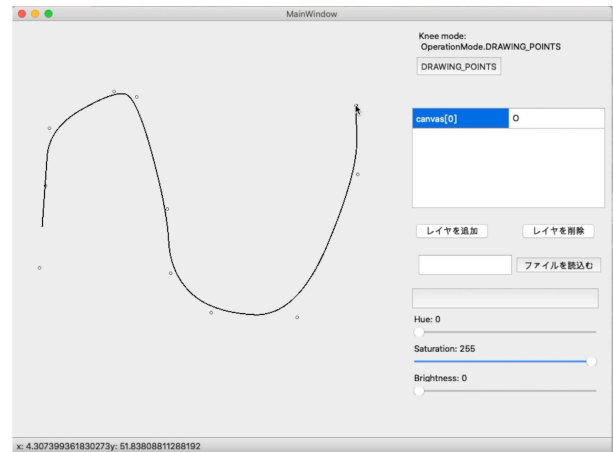


図2 ベジェ曲線描画プログラムの画面一例。

は膝とマウスを組み合わせることで、ユーザビリティが向上すると予想した。それぞれの操作をベジェ曲線描画プログラム上の、「ベジェ曲線の制御点の移動」、「レイヤの切り替え」、「ペンの色の変更」として実装した。図2は作成したプログラムの画面一例である。

### 3.1 各機能と膝操作の対応

図3A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。

図3B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。

図3C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。

### 3.2 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4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、「切り替え領域」まで膝を大きく上に動かす。

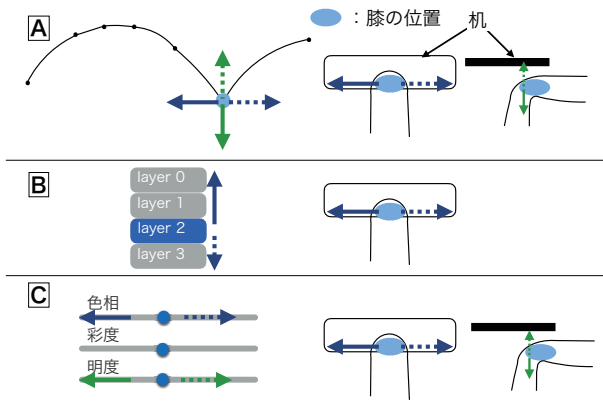


図 3 ベジェ曲線描画プログラム上の 3 つの操作と膝の移動方向との対応。

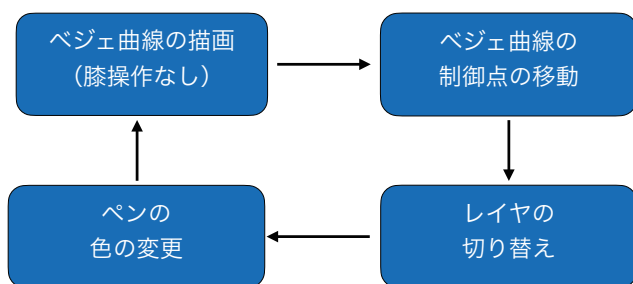


図 4 膝によって切り替わる各操作の状態遷移図。

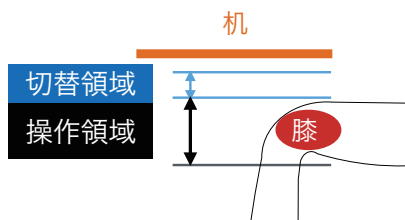


図 5 ユーザの膝と操作領域および切り替え領域の関係

### 3.3 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できるように、起動時に膝位置のキャリブレーションを行う。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キャリブレーションが行われる。プログラムでは、ユーザの左右方向の膝の位置と上下方向の膝の位置を 20 回ずつ取得し、それぞれの平均値を保存する。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、前述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。

## 4. 予備実験

ユーザが膝操作によって区別可能な、操作領域の分割数を調査するための予備実験を行った。この実験は 3 名（男性 1 名、女性 2 名）の参加者に対し行った。

### 4.1 実験条件・タスク

図 6 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）が表示されている。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（= 1 選択操作）。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 回ずつ行われる。5 分割の時は 4 回、10 分割の時は 2 回同じセクションがターゲットとなり、15 分割の時はランダムに 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 1 のように変化する。

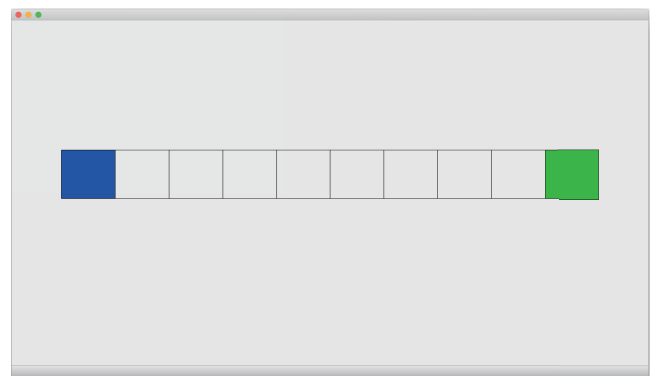


図 6 予備実験にて使用したプログラムの画面一例（膝の操作方向：左右、セクション数：10、可視条件）。

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	124
10	108	62
15	72	41.3
20	54	31

### 4.2 収集データ

データ数の合計は、2（操作方向）×4（分割数）×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。

### 4.3 実験結果

図7は予備実験における平均正解率、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。横軸は分割数を表す。平均操作時間のグラフのエラーバーは標準偏差を表す。ただし、平均操作時間のグラフでは10秒以上かかっていたデータを外れ値として除外している。可視条件では、5または10分割においては、平均90%以上の正解率であった。15または20分割でも80%以上の正解率であった。したがって、20分割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5または10分割では2秒以内、15または20分割でも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、正解数共に良好な10分割程度で実験を行うこととした。

また不可視条件では、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5または10分割と同程度であった。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。横軸は分割数を表す。エラーバーは標準偏差を表す。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。しかし分割数ごとに大きく差はなかった。またセクション数では、各分割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。

さらに不可視条件のとき、参加者がどのセクションを選択していたかを調べるため、各セクションの誤選択を含めた合計選択回数を調査した(図9)。結果、どの分割数においても両端のセクションが選択されている傾向があることがわかった。

分割数	左右方向(回)																
5	19	4	6	5	26												
10	16	1	3	1	4	2	3	1	5	24							
15	18	2	2	1	0	2	1	2	1	2	1	2	23				
20	6	0	2	2	3	1	1	6	1	1	2	0	2	2	0	1	26

分割数	上下方向(回)																	
5	21	5	6	4	24													
10	10	2	5	5	1	3	3	4	3	24								
15	16	1	0	6	1	5	4	1	1	1	0	0	0	2	22			
20	10	2	2	1	1	1	1	3	0	0	1	1	1	2	0	1	1	31

図9 不可視条件における各セクションの選択回数合計

### 4.4 考察

結果から、参加者は大まかに全てのセクションを半分に分けて、ターゲットが左(上)にある時と右(下)にある時で膝を左(上)方向、右(下)方向に動かしていたと推測

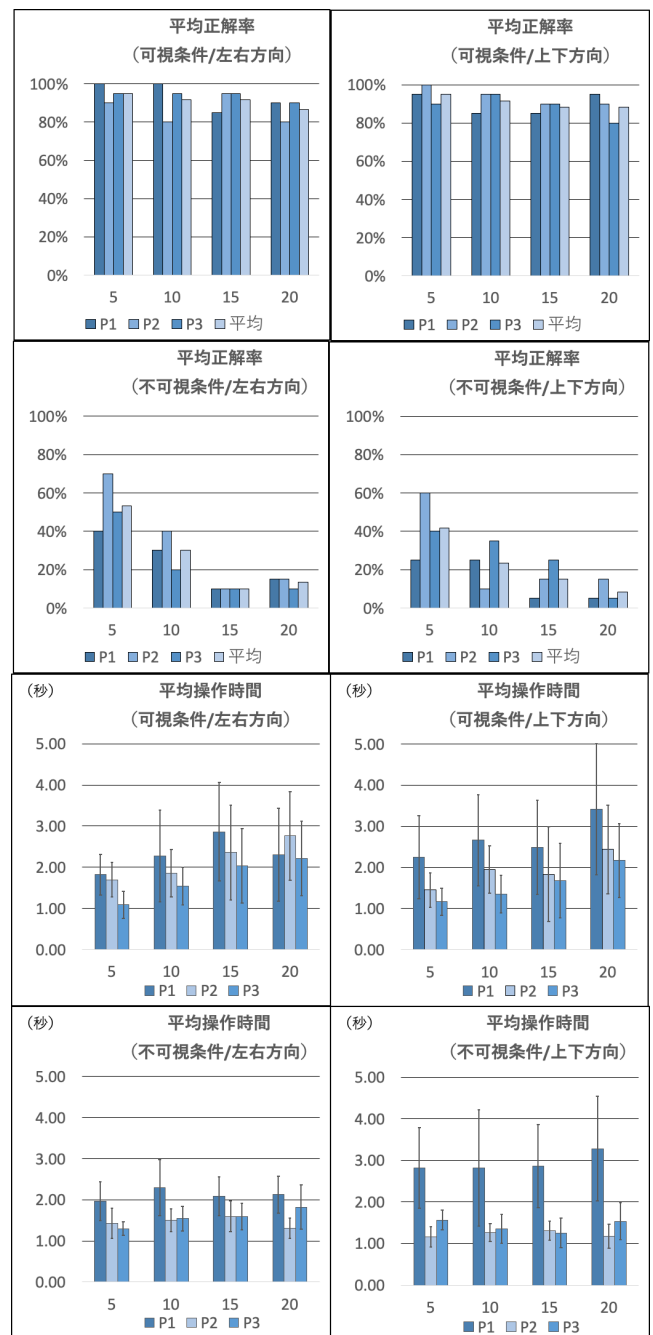


図7 予備実験における平均正解率、平均操作時間の結果。

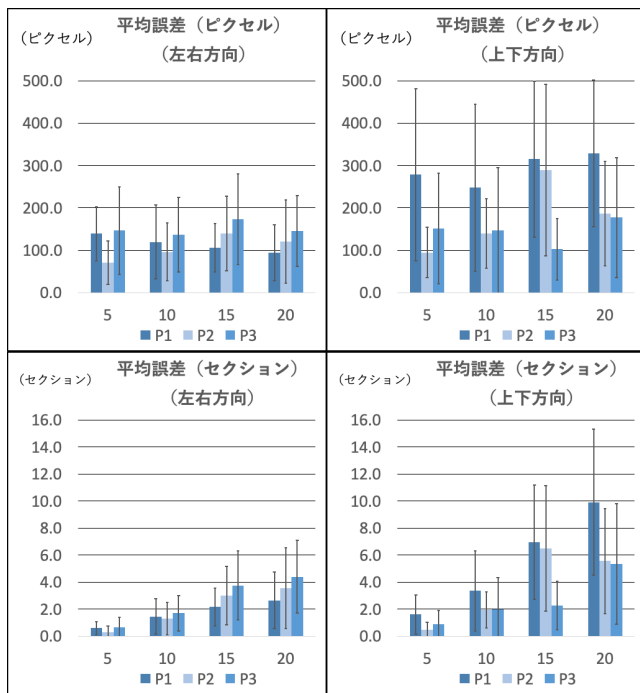


図 8 不可視条件における選択時の膝位置の平均誤差

される。加えて操作領域が十分大きくなかったことで、両端のセクションの選択回数が多くなり、ピクセル数の誤差も分割数にかかわらず一定であったと考えられる。今後操作領域が大きくなるようにキャリブレーション方法を見直すと共に、5分割未満の条件を追加して再実験を行い、不可視条件における膝の操作性を詳しく調査する。

## 5. 膝操作の GUI への適用実験

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。

### 5.1 参加者

参加者は合計 6 名 (男性 5 名, 女性 1 名) である。まず 2 名に対し実験を行ったところ、レイヤ切替モードとペンの色変更モードにおいて、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 つのモードにおいてレイヤや色の変更を停止し、モード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。

### 5.2 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。これは、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 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 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。

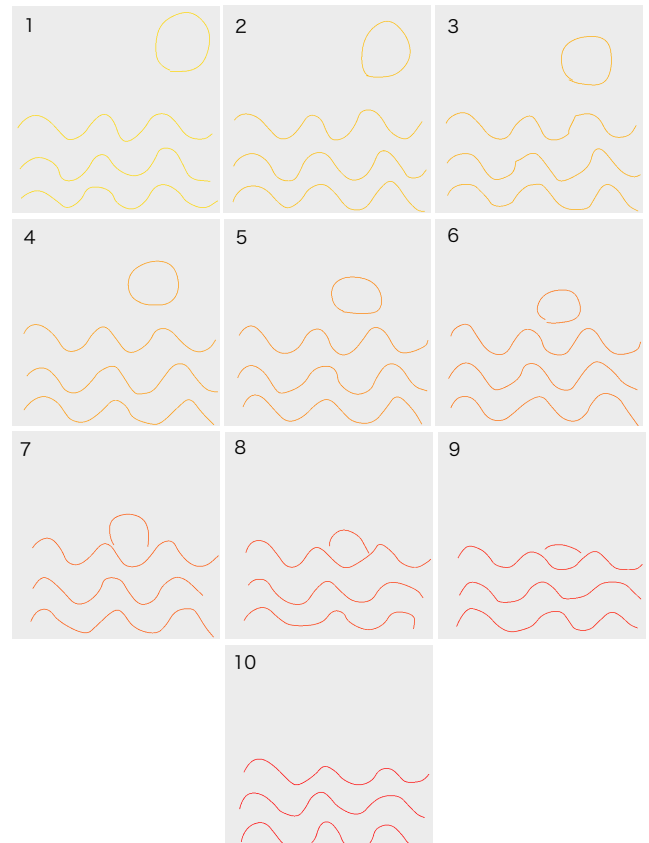


図 10 アニメーション描画タスクで描かれるアニメーション一例。

### 5.3 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する。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する。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う。その後 5 分間の練習タスクを行う。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う。その後本番タスクを行う。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う。

(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で行う

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 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、膝の操作モードを、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。

#### 5.5 実験結果

表2 各操作モードの実験時間に占める割合。

操作モード	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。

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」と好意的な意見があった一方、「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かった」という、膝をマウスの補助とし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」と好意的な意見の一方で、「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。

#### 5.6 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「スライド操作」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。また、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。

#### 6. まとめと今後の課題

本稿ではこれまで未検証であった、膝操作の一般的なGUI操作への適用可能性を探った。カーソル操作、テーブル操作、スライド操作を対象とし、GUIアプリケーションの一例としてベジェ曲線描画プログラムを実装した。それぞれの操作は、「ベジェ曲線の制御点の移動」、「レイヤの切り替え」、「ペンの色の変更」として対応させた。また実装したプログラムを用いてアニメーション描画タスクを行い、膝操作をGUI操作に適用した時の使用感、指針を調査した。実験の結果、スライド操作が膝操作に適合する可能性が高いことがわかった。一方で、カーソル操作はマウスで行った方が良いこともわかった。これらの結果と、モード切り替えにおける知見を総合して、膝操作によるアプリケーション実装の指針を示した。

今後の課題として、実験結果を踏まえたより詳細な調査を行う。まず「リスト選択」と「スライド操作」について、膝操作とマウス操作のどちらを主な入力とするのがふさわしいかを調査する必要がある。さらに、「見本を忠実に再現した絵を描く」といった精密な操作を必要とするタスクによって、「ベジェ曲線の制御点の移動」の適合性をさらに調査する。また操作切り替えの誤発火について詳しく調査し、膝での操作切り替えを見直すことによって、マウスみの操作と同等の操作時間を目指す。加えて、マウスなど既存のデバイスと膝操作とを併用した、新たな操作やインタラクションの探究を行う。

#### 参考文献

- [1] Fan, M., Ding, Y., Shen, F., You, Y. and Yu, Z.: An Empirical Study of Foot Gestures for Hands-occupied Mobile Interaction, *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '17*, New York, NY, USA, ACM, pp. 172–173 (online), DOI: 10.1145/3123021.3123043 (2017).
- [2] Fukahori, K., Sakamoto, D. and Igarashi, T.: Explor-

- ing Subtle Foot Plantar-based Gestures with Sock-placed Pressure Sensors, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 3019–3028 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702308 (2015).
- [3] English, W. K., Engelbart, D. C. and Berman, M. L.: Display-Selection Techniques for Text Manipulation, *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, Vol. HFE-8, No. 1, pp. 5–15 (online), DOI: 10.1109/THFE.1967.232994 (1967).
- [4] Pearson, G. and Weiser, M.: Of Moles and Men: The Design of Foot Controls for Workstations, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '86, New York, NY, USA, ACM, pp. 333–339 (online), DOI: 10.1145/22627.22392 (1986).
- [5] Pearson, G. and Weiser, M.: Exploratory Evaluation of a Planar Foot-operated Cursor-positioning Device, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '88, New York, NY, USA, ACM, pp. 13–18 (online), DOI: 10.1145/57167.57169 (1988).
- [6] Horodniczy, D. and Cooperstock, J. R.: Free the Hands! Enhanced Target Selection via a Variable-Friction Shoe, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 255–259 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025625 (2017).
- [7] 市川祐, 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, Vol. 2019, No. 1, pp. 271–272 (2019).
- [8] Velloso, E., Alexander, J., Bulling, A. and Gellersen, H.: Interactions Under the Desk: A Characterisation of Foot Movements for Input in a Seated Position, *15th Human-Computer Interaction (INTERACT)*, Human-Computer Interaction – INTERACT 2015, Vol. LNCS-9296, No. Part I, Bamberg, Germany, pp. 384–401 (online), DOI: 10.1007/978-3-319-22701-6\_29 (2015).
- [9] Göbel, F., Klamka, K., Siegel, A., Vogt, S., Stellmach, S. and Dachselt, R.: Gaze-supported Foot Interaction in Zoomable Information Spaces, *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 3059–3062 (online), DOI: 10.1145/2468356.2479610 (2013).
- [10] Rajanna, V. D.: Gaze and Foot Input: Toward a Rich and Assistive Interaction Modality, *Companion Publication of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '16 Companion, New York, NY, USA, ACM, pp. 126–129 (online), DOI: 10.1145/2876456.2876462 (2016).