

距離センサアレイを用いた膝によるカーソル操作手法

市川 佑^{1,a)} 志築 文太郎^{2,b)} 高橋 伸^{2,c)}

概要：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、カーソル操作に応用することを提案する。膝による入力を実現することで、手といった他の入力モダリティとも組み合わせることができる可能性がある。ユーザは机の前に座り、机の下で膝を上下左右に動かすと、カーソルを操作できる。机の裏に機器を設置することにより、ユーザの邪魔になりにくく、身体に装置を取り付ける必要もない。我々は、膝の位置の認識、膝の位置からカーソル座標への変換を行うシステムを実装した。システムは簡単なキャリブレーションを行うことで、様々な体格の人に対応させることができる。我々はシステムをカーソル操作に適用し実験を行い、膝の操作性やユーザの疲労感、上下左右方向への膝の運動の難易度を調査した。

1. はじめに

一般に椅子に座り机上で作業をする場合、手を用いることが多い。例えば、コンピュータを用いる作業では両手をマウスやキーボードの操作に充てることが多い。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、手による操作を中断することなく他の入力を行うことができ、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 [1]、机に取り付けた装置を足で動かす方法 [2], [3] 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 [4] 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、装置を持ち運ぶことができない、ユーザの衣服などに制限が生じるといった制約がある。

これらの問題から、我々は膝をコンピュータの入力に用いることを提案する。膝による入力を実現するため、机の下に取り付けることにより、膝の位置を認識する距離センサアレイを開発した。図 1 は実際に距離センサアレイを用いて、膝により操作を行っている様子である。これにより、特別な装置を足に取り付けることなく、かつ容易に設

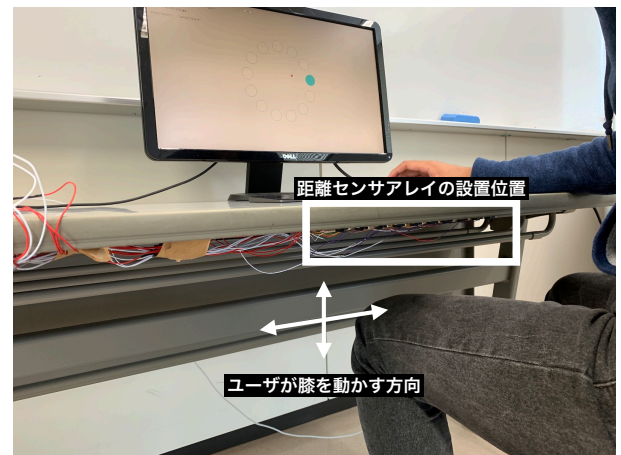


図 1 膝による操作の様子

置することが可能な装置で、足を用いて入力することが可能になる。膝による入力を実現することで、手といった他の入力モダリティとも組み合わせることができる可能性がある。本研究ではその第一歩として、認識した膝の位置をマウスカーソルの操作に適用し、膝単体での特徴を調査する。

2. 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を入力として用いた研究を挙げる。次に、足を入力として用いているが、座った状態における研究を挙げる。最後に、特に膝を入力として用いた研究を挙げる。

2.1 足を用いたジェスチャ入力

足による入力に焦点を当てている研究では、まず足の

¹ 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

² 筑波大学 システム情報系

a) yichikawa@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

c) shin@cs.tsukuba.ac.jp

ジェスチャを用いるものが挙げられる。Fan ら [5] 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となった。Han らの Kick[6] 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 [7] 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コンピュータの制御に用いた。

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で異なるものの、そのような状況においても足を用いたインタラクションは有効であると考え、

2.2 机上での作業における足を用いた入力

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、提案した研究例を挙げる。Pearson ら [2], [3] 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 [4] 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。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っている。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、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。

本研究では膝による入力操作を行うことで、最終的に手による入力との組み合わせを目指す。また膝を用いること

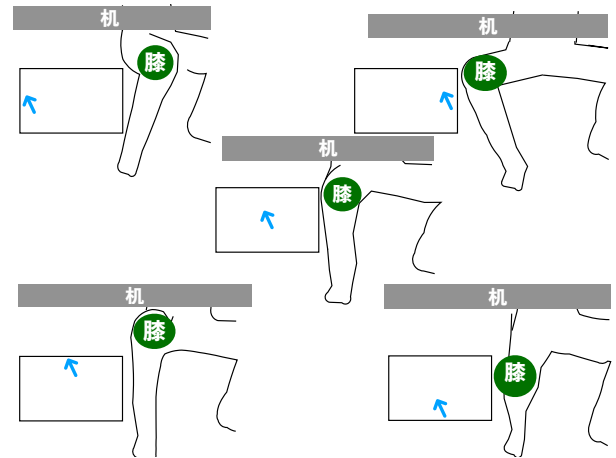


図2 カーソルの位置に対するユーザの膝のイメージ

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。

2.3 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 [1] 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考える。

3. 膝によるカーソル操作の設計

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。そのため、本研究で想定する膝の移動は、膝を左右に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2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。

マウスカーソルを左右に移動するときには、膝を左右に傾ける。上方向に移動するときには、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ときには、足を手前に引き、そのとき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。足が完全に地面についているときにカーソルが画面の中心にあるため、ユーザは比較的楽な姿勢で操作することができる。

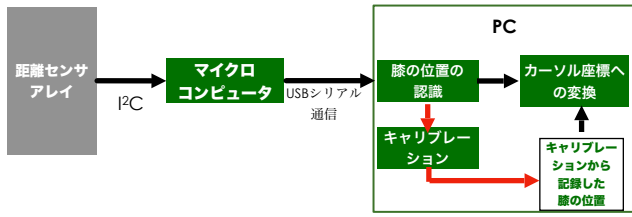


図 3 プロトタイプシステムの全体図

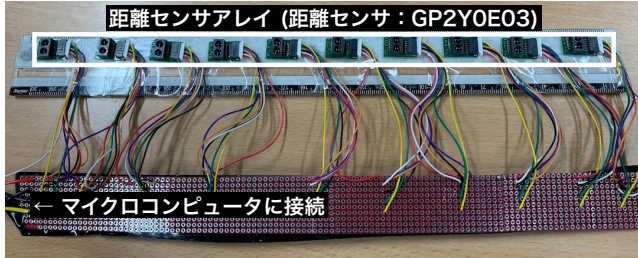


図 4 距離センサアレイ

4. プロトタイプシステムの実装

プロトタイプシステムは、三角法を用いた光学式距離センサ 10 個を一列に並べた距離センサアレイ、マイクロコンピュータ、および PC からなるハードウェアと、センサから距離データの取得、膝の位置の認識、キャリブレーションの記録、カーソル座標への変換を行うソフトウェアからなる。これらのシステムの処理の流れを図 3 に示す。

4.1 距離センサアレイ・マイクロコンピュータ

距離センサは、SHARP 社製 GP2Y0E03 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、4cm から 50cm である。長さ約 30 cm のプラスチック製の定規に、センサ本体を 30 mm 間隔で定規に接着剤を使って固定した。各距離センサは I²C 通信にてマイクロコンピュータに接続する。マイクロコンピュータには、Arduino Mega 2560 を用いる。

距離センサアレイからマイクロコンピュータが膝との距離を取得する。マイクロコンピュータ上のプログラムは、I²C 通信により距離センサが計測した膝との距離を取得する。これを 10 個の距離センサ全てについてそれぞれ行う。計測された 10 個の距離の組を距離データと呼ぶ。PC 上のプログラムでは、USB シリアル通信を通してマイクロコンピュータから距離データを取得する。

4.2 膝の位置の認識とカーソル操作への適用

取得した距離データをもとに膝の位置を計算する。本システムでは膝の可動範囲を記録するためのキャリブレーションを行う。この記録をもとに、膝の位置を画面上のカーソル座標へ変換する。

4.2.1 膝の位置の認識

Xiao[11] らの方法を参考に、距離データから膝の位置の計算、および PC 画面上的のカーソル座標への変換を行う。

時刻 t において取得した距離データを D^t として、以下の手順で距離センサアレイとの相対的な膝の座標 $K^t = (K_x^t, K_y^t)$ を計算する。まず、仮の座標 $k^t = (k_x^t, k_y^t)$ 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。

- (1) 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 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。

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

- (3) w_i から k_x^t を式 2 のように計算する。

$$k_x^t = \frac{\sum_i i w_i}{\sum_i w_i} \quad (2)$$

- (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_x^t とする。ここでは、 $\alpha = 0.7$ としている。

$$K^t = \alpha(k^t - K^{t-1}) + K^{t-1} \quad (3)$$

4.2.2 カーソル座標への変換

本システムでは、膝の位置をカーソル座標へ変換するために、キャリブレーションを必要とする。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。可動域はユーザが膝を動かすことができる限界ではなく、ユーザ毎に膝を動かしやすい範囲に設定できるようにすることで、操作をより簡単にすることを意図している。キャリブレーションによって、左右の可動域における左右方向の膝の位置、上下の可動域における上下方向の膝の位置、中心位置における上下方向と左右方向の膝の位置を記録する。記録した上下左右の 4 点を $(C_{left}, C_{right}, C_{upper}, C_{lower})$ 、中心位置を $C_{center} = (C_{center_x}, C_{center_y})$ と表す。

キャリブレーションの記録から、時刻 t における画面上的のカーソル座標 (P_x^t, P_y^t) を式 4、式 5、式 6、式 7 のように K^t 計算する。ここでは、解像度が (W_x, W_y) であるディスプレイを想定している。

$$P_x^t = \frac{(K_x^t - C_{left}) \left(\frac{W_x}{2}\right)}{C_{center_x} - C_{left}} \quad (K_x^t < C_{center_x}) \quad (4)$$

$$P_x^t = \frac{(K_x^t - C_{center_x}) \left(\frac{W_x}{2}\right)}{C_{right} - C_{center_x}} \quad (C_{center_x} \leq K_x^t) \quad (5)$$

$$P_y^t = \frac{(K_y^t - C_{upper}) \left(\frac{W_y}{2}\right)}{C_{center_y} - C_{upper}} \quad (K_y^t < C_{center_y}) \quad (6)$$

$$P_y^t = \frac{(K_y^t - C_{center_y}) \left(\frac{W_y}{2}\right)}{C_{lower} - C_{center_y}} \quad (C_{center_y} \leq K_y^t) \quad (7)$$

表 1 各参加者の大腿と下腿の長さ (単位: cm)

	P1	P2	P3	P4
大腿	43	42	43	45
下腿	56	53	57	54

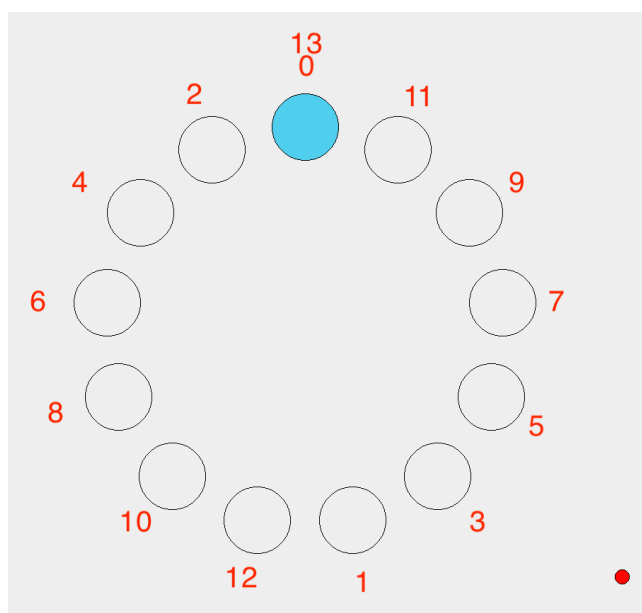


図 5 実験において参加者が見る画面

5. 評価実験

本プロトタイプシステムを用いて評価実験を行い、膝によるマウスカーソル操作の性能と、ユーザが感じる膝の操作の難易、疲労感を調査する。加えて、膝を動かす方向によって性能に差があるかを調査する。実験には ISO9241-411[12]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プログラムを用いた。

5.1 実験参加者

実験参加者は 4 名である。年齢の内訳は 22 歳が 1 名 (P1), 23 歳が 3 名 (P2,P3,P4) であり、全員が男性の大学生もしくは大学院生である。また、利き足について質問したところ全員が右足と回答した。各参加者の大腿・下腿の長さの計測結果を表 1 に示す。

順序効果を除くために、P1 と P3 は右膝、左膝の順に、P2 と P4 は左膝、右膝の順に実験を行った。

5.2 実験手順

図 5 は、実験プログラムの画面の一例であり、実験参加者はこの画面に従い操作を行う。参加者は水色の円で示されるターゲットに、赤色の円で示されるカーソルを膝で操作し、2 つが重なったときに選択操作を行う。この選択操作 1 回を 1 試行と数える。なお選択操作は足ではなくキーボード上の Enter キーで行う。参加者は図 5 に示されている番号 0, 1, ..., 13 の順にターゲットを選択する 14 試行を

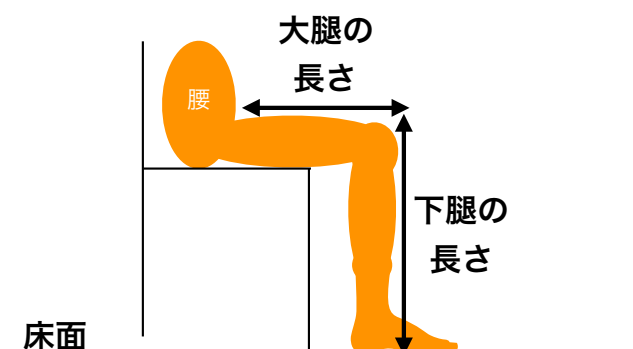


図 6 大腿・下腿の計測範囲

行う。ただし、1, 2, ..., 13 番の選択についてのみ実験データとして記録を行い、0 番の選択は記録しない。

はじめ、ターゲットは選択できない状態になっている。実験参加者が Command キーを押すことで、実験が開始され、ターゲットを選択できるようになる。13 試行を終えると、再びターゲットが選択できない状態に戻る。このとき、Shift キーを押すことで、実験条件が変化し、さらに Command キーを押すことで再びターゲットを選択できるようになる。

9 条件すべてについて実験を行うことを 1 セッションと数える。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。どちらかの膝について 5 セッション行うことを 1 ピリオドと数える。解析のために、実験参加者が 1 回の試行に要した時間、その選択操作においてミスをしたかどうか、1 試行における操作の開始点と終点およびターゲットとして表示されている円の中心座標を収集した。参加者 1 人あたりのデータ数は、 $13(\text{試行}) \times 9(\text{ターゲットサイズ条件}) \times 5(\text{セッション}) \times 2(\text{左右膝}) = 1170$ である。

参加者ははじめ椅子に座り、実験実施者が足の大腿と下腿の長さの計測を行う。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 6 に示す。

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する。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する。追従に問題がある場合は再度キャリブレーションを行う。問題がない場合、第 1 ピリオドを開始する。第 1 ピリオドの終了後、5 分間の休憩を取り、第 2 ピリオドを開始する。第 2 ピリオドの終了後、後述するアンケートに回答する。

5.3 評価方法

評価にはフィッツの法則 [13] を用いる。フィッツの法則は式 8 で表される。

$$MT_p = a + b \log_2 (D/W + 1) \quad (8)$$

MT_p とはカーソルをターゲットに移動させるまでにかかる時間である。 a と b は実験環境や機器に依存する定数である。 D はターゲット間の距離、 W はターゲットの大きさ (円の直径) を表す。 なおこの実験では、 D はターゲットが配置されている円周の直径としている。 また、 $\log_2(D/W + 1)$ という式は Index of Difficulty (ID) と呼ばれ、課題の困難度を表す指標である。

D と W の大きさは以下の条件を用意した。

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

これにより、9種類の ID {1.170, 1.415, 2.248, 2.858, 3.222, 3.565, 3.949, 4.304, 5.066} を得る。

本研究における評価は、Soukoreff ら [14] によって示されている方法を参考にした。 まず、それぞれの選択操作における D_e, W_e を D と W の組み合わせごとに次のように計算する。

(1) 選択操作 1 回ごとの始点と終点の間の直線距離 d を計算する。 始点は前回の選択操作において Enter キーが押された位置、終点は今回の選択操作において Enter キーが押された位置である。

(2) 選択操作 1 回ごとの終点と選択すべきターゲットの中心位置 w との距離を計算する。

(3) D_e は d の平均、 W_e は w の標準偏差である。

求めた D_e, W_e から、ある D と W における ID_e は式 9 で表される。

$$ID_e = \log_2(D_e/W_e + 1) \quad (9)$$

次に、 D と W の組み合わせごとに選択操作に要した時間の平均 MT を求める。 MT と ID_e のペアの列から、線形回帰を用いて式 10 における a, b を求める。

$$MT = a + b \times ID_e \quad (10)$$

また、左右の膝や、膝の操作方向における速度を比較するために、スループット TP を計算する。 スループットは、 D と W の組み合わせごとに、 ID_e を MT で割ったものを平均したものであり、式 11 で求める (ただし、 n は D と W の組み合わせの総数)。

$$TP = \frac{1}{n} \sum_{(D,W)} \frac{ID_e}{MT} \quad (11)$$

式 10 を用いて求めた線形回帰のグラフ、式 11 を用いて求めた TP 、および参加者ごとのエラー率から膝によるカーソル操作の性能評価を行う。 さらにカーソルの操作方向が水平方向か垂直方向かで、性能が異なるかの調査を行う。 図 5 において、水平方向の操作は選択ターゲットが 6,7,8 の時、垂直方向の操作は 0,1,12,13 の時と定義した。 また、後述するアンケートから操作感や疲労感の評価を行う。

5.4 実験機器

実験に用いる機器は、ディスプレイ (DELL S2409Wb 24inch 1920× 1080)、コンピュータ (Apple MacBookPro 2018 TouchBar)、プロトタイプシステム、外付けキーボード (Apple Magic Keyboard 2) である。 D と W の大きさは、ディスプレイの実寸と解像度を元にプログラム内でピクセル値に変換されている。

5.5 アンケート

実験の最後に、参加者の疲労感と膝によるカーソル操作の難易の、2つの観点からアンケートを行った。 疲労感については以下の4項目を5点リッカート尺度で評価してもらった (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

加えて、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)。 膝によるカーソル操作の難易については、以下の2項目を5点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)。

5.6 結果

式 10 を用いて求めた線形回帰のグラフ、式 11 を用いて求めた TP 、および参加者ごとのエラー率からカーソル操作の性能の結果を、アンケートから疲労感や操作性に関する結果を示す。

5.6.1 カーソル操作の性能

図 7 は、それぞれ左膝、右膝の全ての選択操作における選択時間と、選択時間から線形回帰で求めた直線をプロットしたグラフである。 全ての操作から図 8 は水平方向の操作、図 9 は垂直方向の操作のみをそれぞれ取り出したときの選択時間と、選択時間から線形回帰で求めた直線をプロットしたグラフである。 縦軸が選択時間、横軸が実験結果から計算された ID_e を表す。 各点は1試行の選択時間をそれぞれプロットしたものであり、参加者ごとに色と記号を分けている。 また、各直線は参加者ごとの選択時間から、式 10 によって線形回帰で求めた直線であり、参加者ごとに色を分けている。 なお、点と直線の色は参加者ごとに対応する。

表 2 は左右の膝におけるターゲット選択のエラー率を、

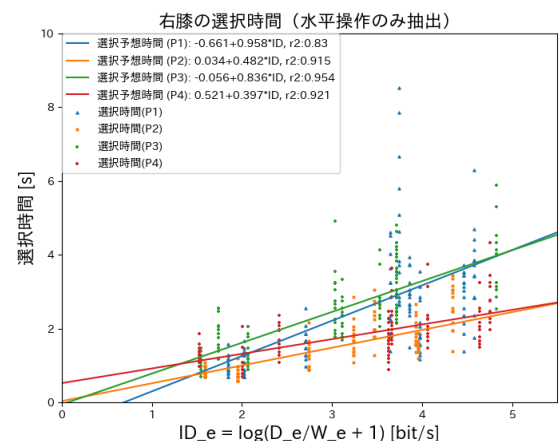
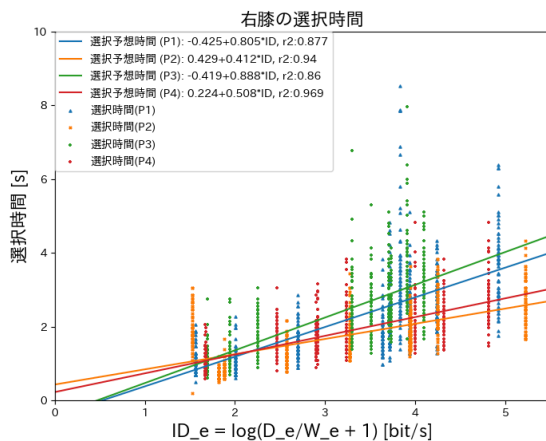
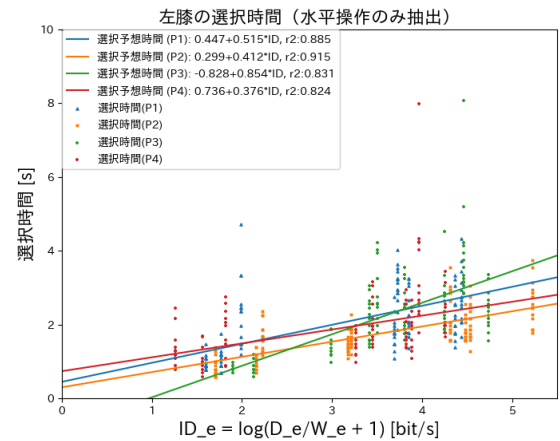
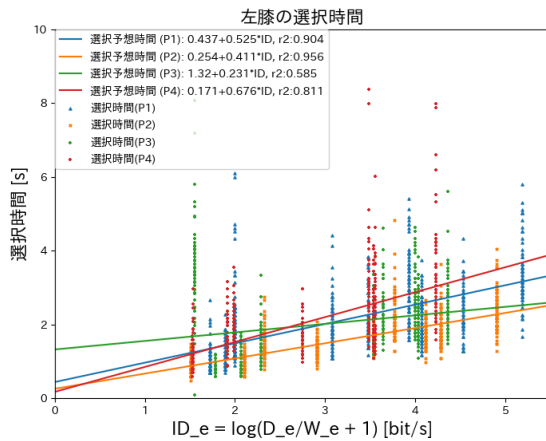


図 7 左右膝の選択時間と線形回帰モデル

図 8 水平方向の操作に要した選択時間と線形回帰モデル

表 2 選択操作のエラー率（全体）

	左膝	右膝
P1	6.32%	5.64%
P2	6.84%	5.13%
P3	5.64%	7.86%
P4	14.02%	9.57%
平均	8.21%	7.05%

表 3 選択操作のエラー率（方向別）

	左膝 垂直方向	左膝 水平方向	右膝 垂直方向	右膝 水平方向
P1	4.44%	8.15%	2.78%	8.15%
P2	6.67%	3.70%	2.22%	7.41%
P3	2.78%	7.41%	7.22%	10.37%
P4	21.11%	12.59%	10.56%	8.89%
平均	8.75%	7.96%	5.69%	8.70%

表 3 は、その中から上下方向の操作のみ、左右方向の操作のみを抽出したときのエラー率を表している。全参加者のエラー率の平均は、左膝で 8.21%、右膝で 7.05% であった。

表 4 は、参加者ごとの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、右膝が 1.63 であった。各被験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 ($F(3,3) = 9.28, p = 0.36 > 0.05$) 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 ($p = 0.36 > 0.05$)。

表 5 は垂直方向、水平方向のみの操作を抽出したものである。左膝における垂直方向の平均スループットは 1.78、水平方向の平均スループットは 1.75 であった。各被験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 ($F(3,3) = 9.28, p = 0.10 > 0.05$) 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 ($p = 0.48 > 0.05$)。右膝における垂直方向の平均スループットは 1.83、水平方向の平均スループットは 1.65 であった。各被験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 ($F(3,3) = 9.28, p = 0.44 > 0.05$) 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 ($p = 0.49 > 0.05$)。

5.6.2 アンケート結果

表 6 はアンケートの中で、リッカート尺度で評価を行った、Q1, Q2, Q3, Q4, Q6, Q7 における結果である。疲

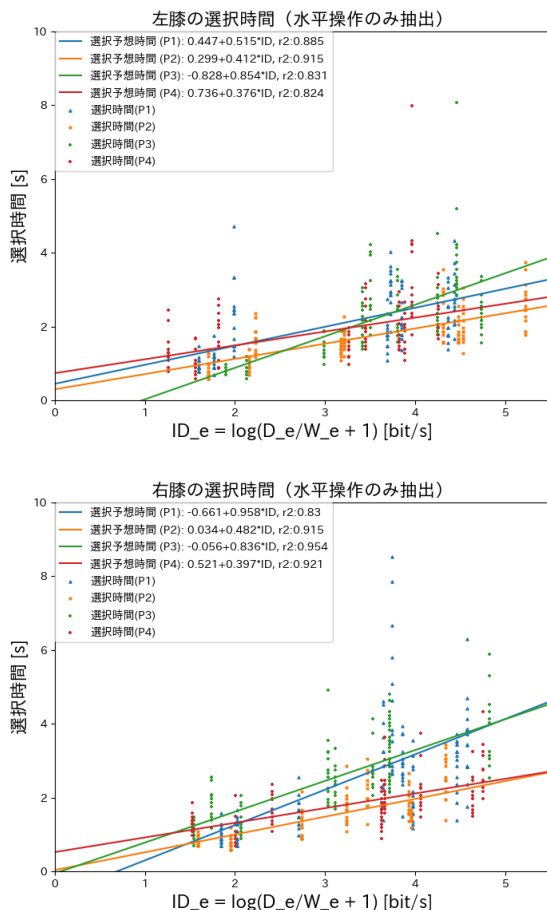


図 9 垂直方向の操作に要した選択時間と線形回帰モデル

表 4 スループット（全体）

	左膝	右膝
P1	1.54	1.55
P2	2.04	1.90
P3	1.66	1.37
P4	1.37	1.71
平均	1.65	1.63

表 5 スループット（方向別）

	左膝 垂直方向	左膝 水平方向	右膝 垂直方向	右膝 水平方向
P1	1.67	1.56	1.79	1.49
P2	2.34	2.00	2.26	2.08
P3	1.86	1.81	1.47	1.26
P4	1.24	1.61	1.81	1.79
平均	1.78	1.75	1.83	1.65

労感について質問した Q4 において、Q1 では 4 人中 3 人の参加者が 4（＝疲れている）と回答している。しかし操作感について質問した Q6, Q7 において、すべての参加者が Q6 では 4（＝意図した通りに操作を行うことができた）または 5（＝とても意図した通りに操作を行うことができた）と回答し、Q7 では 1（＝膝を無理に動かさなければい

表 6 アンケート結果（Q1, Q2, Q3, Q4, Q6, Q7）

	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
平均	3.25	3.00	2.25	2.50	4.25	1.25

けない操作は全く当てはまらない）または 2（＝膝を無理に動かさなければいけない操作はあまり当てはまらない）と回答している。

また自由記述での回答を求めた Q5, Q8 では、Q5 においては、目（P1）に疲労感を感じたという意見を受けた。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、Q8 においては、引くとき（下方方向の膝の移動）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。

5.7 考察

左右の膝におけるスループットの値は、Velloso ら [8] による足先を用いたカーソル操作の結果（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操作より高速に行える可能性がある。一方で Horodniczy ら [4] による足先を用いながらも補助装置を取り付けた手法（右足のみ：2.21）と比較すると低いことから、膝の操作方向やシステムの設計など、改良の余地があると考えられる。さらに、参加者は全員利き足が右であるが、左右の膝でスループットに差がないことから、利き足か否かに関係なく使用することができる。

また Soukoreff らによれば [14] 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と同等の速度で操作することができる。ただし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、現段階ではマウスほどの高速な操作は行えない。

エラー率に関しては Velloso ら [8] の結果とほぼ同等であり、実験条件の設定は適切な範囲内であるといえる。しかし、他の参加者と比べると、P4 のエラー率が高い結果となっている。この結果には、2つの原因があると考えられる。

1 つ目に、P4 は他の参加者よりカーソルとターゲットとのずれを大きく許容していた可能性がある。これは表 1 を見ても、参加者間で足の長さにほとんど差はないが、 W に対して W_e が最大で 3 倍程度大きく存在したためである。このことから、参加者への指示をより徹底する必要があったと考える。

2 つ目に、Enter キーを押す瞬間に、膝と距離センサとの距離が、計測できる範囲より小さくなってしまった可能性がある。これも W に対して W_e が最大で 3 倍程度大き

くなっている条件が存在したためである。今回のプロトタイプシステムでは距離センサの仕様上、膝との距離が一番小さいはずの距離センサは計測できる距離の最大値を出力してしまう。 K_y^t が距離データの中の最小の距離から計算されるのに対し、 K_x^t は各距離センサに対して、膝との距離を重み付けして計算される。したがって、最終的なカーソル座標 P_x^t が瞬間的に大きく変化してしまったと考える。この問題を解決するためには、ユーザが膝を動かした時の机との距離を詳しく計測し、より適切な距離センサを選ぶ必要があると考える。

アンケートからは、操作は意図した通り、無理な動きも少なく行えたと読み取れる。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、今後は疲労感を軽減できるような操作方法の設計が課題である。また、手による入力と組み合わせる時には、太ももやふくらはぎ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。

6. 結論と今後の課題・展望

本研究では膝による入力を実現する第一歩として、机の裏に設置した距離センサアレイによって膝の位置を認識し、カーソル操作を行ったときの性能を調査した。また距離センサアレイは特別な装置を足に取り付ける必要がなく、装置がユーザの邪魔となりにくい。我々は距離センサアレイから距離データを取得し、膝の位置を認識し、カーソル座標へ変換するプロトタイプシステムを実装した。プロトタイプシステムを用いた実験では、膝によるカーソル操作は足による操作より高速に行える可能性があり、操作は意図した通り無理なく行えるという結果を得た。

今回のプロトタイプシステムは片膝のみでの使用を想定しているが、両膝で使えるようになれば更なる入力の拡張も考えられる。これは、2つの距離センサを使うことで実現できる。しかし、スカートや膝掛けなど、両膝が衣服によって接続されている場合には正しく膝の位置を認識することはできない。これには使用するセンサの種類を変更するなどの必要があると考えている。また、今後手による入力と組み合わせることで更なるインタラクションが実現できる。例えば、マウスでファイルを選択した状態で、膝でファイルを動かすことができれば、マウスの移動量を減らすことができ、小さい机でも快適にマウスを使用できる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Han, T., Alexander, J., Karnik, A., Irani, P. and Subramanian, S.: Kick: Investigating the Use of Kick Gestures for Mobile Interactions, *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, ACM, pp. 29-32 (2011).
- [7] Fukahori, K., Sakamoto, D. and Igarashi, T.: Exploring 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).
- [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).
- [11] Xiao, R., Cao, T., Guo, N., Zhuo, J., Zhang, Y. and Harrison, C.: LumiWatch: On-Arm Projected Graphics and Touch Input, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 95:1-95:11 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173669 (2018).
- [12] International Organization for Standardization: *Ergonomics of human-system interaction — Part 411: Evaluation methods for the design of physical input devices* (2012).
- [13] Fitts, P. M.: 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).

- [14] Soukoreff, R. W. and MacKenzie, I. S.: 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 (online), DOI: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.001 (2004).