#### 筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

#### 卒業研究論文

## 柔らかいマウスパッドを用いた操作手法

# 栗原 拓郎 指導教員 志築 文太郎 三末 和男 田中 二郎 2013年 2月

#### 概要

マウスが使われ初めてから 40 年以上経過しているが,未だに利用者はマウスを用いて単純な操作しか行うことができない.この問題を解決するため,本論文ではマウスを沈みこませることによって様々な入力を可能にする柔らかいマウスパッドを示す.柔らかいマウスパッドとは弾性素材を用いて拡張されたマウスパッドである.これを用いることにより,利用者は任意のマウスを使用しながらも,従来のマウス機能に加えて,沈み込ませる操作を行える.さらにマウスを沈み込ませた際にマウスを経由して力覚フィードバックを利用者に与えることにより,利用者の誤操作を減少させ,正確なポインティングを可能にさせる.マウスを沈み込ませない場合,柔らかいマウスパッドは滑らかな平面であるため,従来のマウス機能には干渉しない.その為,通常のマウスパッドとして使用することができる.本研究では柔らかいマウスパッドを用いた操作手法を提案し,柔らかいマウスパッドのプロトタイプシステムの実装とアプリケーションを開発した.また,実際に使用してもらい,得られた意見とその様子から柔らかいマウスパッドについて考察を行った.

# 目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的	1
1.3	本研究のアプローチ	2
1.4	本研究の貢献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
1.5	本論文の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
第2章	関連研究	3
2.1	マウス機能を拡張する研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
2.2	弾性素材を入力に用いたインタフェースの研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
2.3	圧力を認識に利用した研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
	25 CHOHAIC 13713 C 7CN178	•
第3章	Sinkpad:マウスを沈み込ませて入力できる柔らかいマウスパッド	5
3.1	設計方針	5
3.2	Sinkpad の柔らかさを利用した操作	5
3.3	期待する効果	6
第4章	実装	7
4.1	弾性素材の作成	7
	4.1.1 弾性素材の選定	7
	4.1.2 ウレタンゲルの柔らかさに関する調査	8
	4.1.3 ウレタンゲルの表面を滑らかにする素材の選定	8
4.2	プロトタイプシステム1	10
	4.2.1 ハードウェア構成	11
	4.2.2 認識手法	14
4.3	プロトタイプシステム 2	15
	4.3.1 ハードウェア構成	15
	4.3.2 解析ソフトウェア	15
	4.3.3 認識手法	17
4.4	弾性素材をマウスパッドとして用いる応用例	19
	4.4.1 マウス版プロトタイプシステム	19
	4.4.2 弾性素材の上に硬い板を置くプロトタイプシステム	20

第5章	アプリケーション	21
5.1	重なりあった複数ウィンドウの切り替え	21
5.2	重なりあった複数ウィンドウをずらして表示	21
5.3	CD 比の動的変更及び拡大鏡	23
5.4	マウスポインタのワープ	24
第6章	議論	25
6.1	複数種類のマウスの利用	25
6.2	操作感	25
6.3	傾けた際のボタンの誤入力	27
第7章	結論と今後の課題	28
	謝辞	29
	参考文献	30

# 図目次

1.1	マウス	1
1.2	マウスパッド	1
3.1	(a) 通常操作, (b) Sink 操作, (c) Tilt 操作, (d) Sink+Move 操作	6
4.1	弾性素材の候補,(a) 発泡体,(b) ウレタンゲル.................	8
4.2	作成したウレタンゲル	9
4.3	ウレタンゲルの表面を滑らかにするために覆う素材 , (a) ラップフィルム , (b) パ	
	ウダー,(c) スパンデックス繊維....................................	10
4.4	開発時の使用環境・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
4.5	システム構成	12
4.6	pad 部,左:初期の pad 部,右:現在の pad 部 ...............	12
4.7	Sinkpad にマウスを載せている状態 , (a) 通常時 , (b) 沈み込ませている状態 ,	
	(c) 傾けている状態	13
4.8	sensor 部 , (a) 圧力センサ 9 個 , (b) 圧力センサ 16 個	13
4.9	回路図	14
4.10	sensor 部	16
4.11	解析ソフトウェア , (a) 現在の各圧力センサの値 , (b) 20 フレーム分の各圧力セ	
	ンサの値	16
4.12	圧力センサの値の変化	17
4.13	各操作認識のための平均値 $E(X)$ と閾値の関係 $\ldots$	17
4.14	各操作の認識までのフローチャート	18
4.15	マウスへの圧力センサの装着	19
4.16	板の角 4 箇所に弾性素材を装着,(a) 4 箇所の弾性素材と圧力センサ,(b) 弾性	
	素材と圧力センサの上に硬い板を乗せ,その上にマウスを載せている状態..	20
5.1	(a) 重なりあった複数ウィンドウを仮想的に横から見た状態, (b) Sink 操作によ	
	り 2 枚のウィンドウが半透過された状態 , (c) クリック操作により , ウィンド	
	ウレイヤの順序が切り替わり,Window3 が最前面に移動した状態	22
5.2	Sink 操作によりウィンドウが切り替わる様子	22
5.3	(a) 重なりあった複数ウィンドウを仮想的に横から見た状態, (b) Tilt 操作によ	
	リウィンドウがずれた状態 . (c) ウィンドウが元の位置に戻った状態	23

5.4	Tilt 操作によりウィンドウがマウスの傾きに応じてずれていく様子	23
5.5	同じ距離マウスを動かした時のポインタの移動 ,(a) CD 比の高い状態 ,(b) Sink+Mov	ve
	操作により,CD 比が低くなりポインタ周辺が拡大表示されている状態	24
5.6	マウスポインタが Tilt 操作により隣のディスプレイへ移動する	24
6.1	トラックボール . 左:OrbitTrackball , 右:M577	26
6.2	WISS2012 にて Sinkpad を使用してもらっている様子	26

## 第1章 序論

本章では,はじめに背景と本研究の目的を述べる.次に本研究のアプローチと貢献を述べる.最後に本論文の構成を述べる.

#### 1.1 背景

マウスは Engelbart がはじめてデモを行なって以来,40 年以上使われている入力デバイスである [Eng68].マウスを図1.1 に示す.入力デバイスとしてタッチパッドも使われるようになってきているが,マウスはタッチパッドと比較して精度が高く入力速度も速い [ACGO07] ため,未だにマウスは多く使われている.これらのマウスが持つ機能は初期からほぼ変わっておらず,利用者は自由度の低い単純な操作しか行うことができない.具体的にはボタンのクリック、マウスホイールの操作、水平方向の移動である.

次にマウスを使用する環境を考える.マウスを使用する際,利用者はマウスをマウスパッド上にて動かすことがある.マウスパッドを図1.2に示す.マウスパッドは摩擦によりポインティング精度及び操作感に影響を与える.しかし,マウス機能の自由度に影響を与える役割は持たない.





図 1.1: マウス

図 1.2: マウスパッド

#### 1.2 本研究の目的

本研究では,先述のようなマウス機能の自由度が低い問題を解決することを目的とする.しかし,単純に自由度を増やした場合,その自由度の多さから,利用者は誤操作を起こすこと

や,正確なポインティングを行えないことが考えられる.そこで,本研究では利用者にマウスを経由して力覚フィードバックを与える.これにより,利用者に現在行なっている操作を認識させ,誤操作を減少させる.また,力覚フィードバックにより操作のブレを減少させ,正確なポインティングを可能にさせる.

#### 1.3 本研究のアプローチ

本研究ではマウスパットがマウス機能の自由度に影響を与えていない点に着目し,マウスパッドを拡張する.この拡張したマウスパッドとはマウスを沈み込ませて入力できる柔らかいマウスパッドである.このマウスパッド上にてマウスを沈み込ませる操作を可能にすることにより,マウス機能の自由度を増やす.さらにマウスパッドの弾性力による力覚フィードバックを利用者に与える.

#### 1.4 本研究の貢献

マウス機能を拡張する手段として,マウスパッドを活用することは,これまで十分に検討されていなかった.本研究の貢献は,柔らかいマウスパッドを用いた操作手法を述べることにより,柔らかいマウスパッドの可能性を示したことである.これにより,マウスに依存することのないマウス機能の拡張が実現可能になった.

#### 1.5 本論文の構成

1章においては研究の背景となるマウスとマウスパッドを説明し、その問題点とこれを改善する本研究のアプローチを示した、2章では関連研究を述べる、3章では、本研究の提案する柔らかいマウスパッドである Sinkpad と柔らかいマウスパッドを用いた操作手法を述べる、4章では、Sinkpad の実装を述べる、5章では、Sinkpad を用いたアプリケーションを述べる、6章では、実装したシステムに関して議論を行う、最後に7章では本論文の結論と今後の課題を述べる、

## 第2章 関連研究

本研究にて提案する柔らかいマウスパッドは弾性素材を用いてマウス機能を拡張している.そこで本章では,マウス機能を拡張する研究と弾性素材を入力に用いたインタフェースの研究を述べる.また,提案する柔らかいマウスパッドは操作の認識に圧力を使用するため,圧力を認識に用いた研究を述べる.

#### 2.1 マウス機能を拡張する研究

Venolia はスクロールホイールをマウスに付けることによって 3D インタラクションを可能にした [Ven93]. MacKenzie らは 2 つのボールを持つマウスを作成し 3DOF (degrees-of-freedom) 入力に対応させた [MSP97]. Balakrishnan らの Rockin'Mouse はマウスの底が丸くなっているため,4DOF 入力が可能である [BBKF97]. Hinckley らの VideoMouse はマウス下部に取り付けられたカメラによって特定のパターンの模様が描かれたマウスパッドを認識し,その変化を入力として用いている.これにより 6DOF 入力を可能にしている [HSH+99].

Balakrishnan らの PadMouse はマウスの上にタッチパッドが取り付けられているため,コマンド入力が可能である [BP98].Villar らはマルチタッチ操作可能な 5 種類のマウスと,そのマウスを用いたマルチタッチジェスチャを述べた [VIR $^+$ 09].また,Yang らはマウスにタッチスクリーンディスプレイを取り付けることにより,このディスプレイを経由してデスクトップPC の操作を可能にした [YMM $^+$ 10].

Cechanowicz らは圧力を利用したマウス機能の拡張において,圧力センサを取り付ける最適な場所と個数を調べた [CISO7].そして圧力センサを利用したインタラクション手法を提案した.同様に,Shi らは圧力センサをマウスにとりつけることにより,圧力を操作に用いる時の最適な圧力のレンジの分割方法を示した [SIGSO8].Kim らの Inflatable Mouse は気圧により大きさの変わる風船型のマウスである [KKL+08].これは空気の反発力による力覚フィードバックを利用者に与えることができる.また,これを利用しない時は PC スロットにしまうことも可能である.Adaptive Mouse はスポンジを利用したマウスである [TT10].利用者がマウスを握った際にスポンジに生じる変形を検出することにより,マウスのもち方を認識し,その結果に合わせてボタンの位置を変更する.赤松ら [AM96] 及び渡辺 [渡辺 01] はマウスに触覚を付与することにより,アイコンの存在を振動により伝えた.

これらの研究では,拡張されたマウスを使用するか,拡張されたマウスと専用のマウスパッドを組み合わせて使用することによりマウス機能を増やしている.これに対して本研究では,マウスパッドのみを拡張する.マウスをこのマウスパッド上にて使用することによりマウス

#### 2.2 弾性素材を入力に用いたインタフェースの研究

Valk らの GelForce は弾性体表面に加わる力の大きさと向きを検出することができる [VMK+05]. また, 佐藤らの Photoelastic Touch は透明な弾性素材の変形を用いたテーブルトップインタフェースである [SMKF09]. 坂本らの Wrinkle Surface は弾性素材により構成された入力面に生じるしわを入力として用いるテーブルトップインタフェースである [坂本 11]. Follmer らの deForm は, 柔らかい表面を利用し, タッチジェスチャや任意の物体を入力に用いることができる [FJAI11]. また, 筧らの Force Tile はテーブルトップ環境において,マーカーの埋め込まれた弾性体である Force Tile の位置や向きを認識する [KJS+08]. これらの研究は操作の認識に光学を使用している. その為,細かい操作を認識することができる一方,システムが大規模であり,特にカメラを用いるために高さを必要とする.これに対して,本研究では操作の認識に圧力を使用する.圧力の認識には高さを必要としない為,システムを小型化することが可能である.

Wimmer らは,タッチ可能な柔らかい表面を Time-Domain Reflectometry(TDR[MO64]) を用いて作成した.このシステムは高さを必要としないものの,直接触る必要があるため,マウスを経由した認識を行うことができない [WB11] .

福本は,モバイル端末に弾性素材を取り付けることにより,モバイル端末におけるタッチパネルのユーザビリティとパフォーマンスを向上させた[Fuk09].この研究はユーザビリティを向上させるために弾性素材を使用しているのに対し,本研究はユーザビリティの向上に加え,追加の操作を行うために弾性素材を使用する.

#### 2.3 圧力を認識に利用した研究

Resenberg らの UnMousePad は,新しい圧力センシング原理を利用し,UnMousePad 上において押されている強さを認識することができる [RP09]. Ramos らはペンタブレットにペンを押し付けた際の強さを認識することにより,圧力を用いたウィジェットのデザインを調査した [RBB04].また Lee らはモバイル端末とケースの間に取り付けた圧力センサの値を認識することにより,接線力に基づいて入力を行う UI のデザインとその評価を行った [LLL+12]. 一方本研究では,弾性素材を経由したマウスの押し込みの認識を行うことにより,マウス機能の自由度を増やす.

## 第3章 Sinkpad:マウスを沈み込ませて入力で きる柔らかいマウスパッド

本章では、マウスを沈み込ませて入力できる柔らかいマウスパッドである Sinkpad を述べる. Sinkpad の設計方針を述べた後に、Sinkpad の柔らかさを利用した操作を述べる. 最後に本システムの期待する効果を述べる.

#### 3.1 設計方針

Sinkpad の設計方針を以下のように定める.

- Sinkpad にマウスを沈み込ませることを可能にするために,表面をマウスを沈み込ませられる柔らかさにする.
- Sinkpad をマウスパッドとして使用するために,表面をマウスを動かすことができる滑らかさにする.
- Sinkpad の柔らかさを利用した操作が従来の操作を妨げることがないように,沈み込ませるという動作を全てに組み合わせる.
- 現在行なっている操作とその度合を利用者に認識させるために,利用者に力覚フィード バックを与える。

## 3.2 Sinkpad の柔らかさを利用した操作

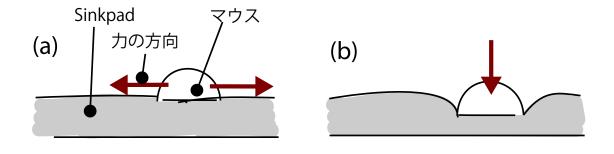
利用者は図 3.1a に示すような従来のマウス機能に加えて, Sink 操作, Tilt 操作, Sink+Move 操作の 3 種類の操作を行うことができる.

#### Sink 操作

Sink 操作とは Sinkpad に対して,マウスを垂直方向に押しこむ操作である.この操作を 図 3.1b に示す.

#### Tilt 操作

Tilt 操作とは Sinkpad に対して,マウスの端を押しこむようにして傾ける操作である.この操作を図 3.1c に示す.



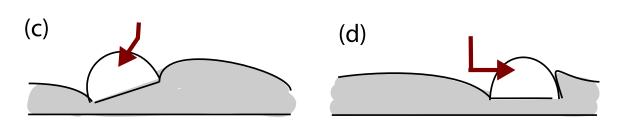


図 3.1: (a) 通常操作, (b) Sink 操作, (c) Tilt 操作, (d) Sink+Move 操作

#### Sink+Move 操作

Sink+Move 操作とは Sinkpad に対して,マウスを垂直方向に押し込んだ後に,水平方向に動かす操作である.この操作を図 3.1d に示す.

### 3.3 期待する効果

利用者は Sink 操作と Tilt 操作時に, Sinkpad の変形とその変形に伴う力覚フィードバックにより, 傾き具合や押しこみ度合いを知ることができる.これにより, 利用者は本研究の提案する操作を正確に行うことが期待される.加えて, Sink+Move 操作時には通常操作時に比べ,抵抗が大きくなるため, 利用者はこの抵抗によってマウスを少しずつしか動かせなくなる.これにより, 利用者は細かい操作を正確に行うことが期待される.

また,利用者が Sinkpad の柔らかさを利用した操作を行う為には, Sinkpad 上にてマウスに垂直方向の力をかける必要がある.力をかけることをやめた場合, Sinkpad は自身の反発力によって元の平面に戻る.この為,利用者は力覚フィードバックと Sinkpad の状態から,現在行なっている操作を知ることができ,誤操作の減少が期待される.

## 第4章 実装

本章では、Sinkpadの実装を述べる.はじめにSinkpadが用いた弾性素材を述べ、次にこの素材を用いたSinkpadのプロトタイプシステム1、プロトタイプシステム2を述べる.最後に弾性素材をマウスパッドとして用いる応用例を2種類述べる.

#### 4.1 弾性素材の作成

Sinkpad の表面はマウスを沈み込ませることが可能な柔らかさと従来の操作を行うことができる滑らかさを持つ必要がある.そのため Sinkpad では弾性素材と,弾性素材の表面を滑らかにする素材を組み合わせることによりこれを満たす.そこで本節では,弾性素材の選定とその柔らかさに関する調査及び弾性素材の表面を滑らかにする素材の選定を述べる.

#### 4.1.1 弾性素材の選定

弾性素材はマウスを載せた状態では沈み込まず,押し込んだ際にマウスが沈み込む柔らかさである必要がある.この要素を満たす弾性素材の候補として,発泡体とウレタンゲルの2種類を調べた.

#### 発泡体

発泡体を図 4.1a に示す . 発泡体上にてマウスを水平方向に動かすことは困難であったが , 発泡体にマウスを沈み込ませることは可能であった . しかし反発力が低く , 力覚フィードバックを得ることが困難であった .

#### ウレタンゲル

ウレタンゲルを図 4.1b に示す.ウレタンゲルとして人肌のゲル(株式会社エクシールコーポレーション $^1$ , Asker-C  $^0$ )を利用した.ウレタンゲルも発泡体と同様にマウスを水平方向に動かすことが困難であったが,マウスを沈み込ませることは可能であった.また,反発力も強かったため,Sinkpad にはウレタンゲルを採用した.

<sup>1</sup>http://www.exseal.co.jp/



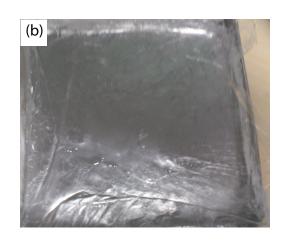


図 4.1: 弾性素材の候補, (a) 発泡体, (b) ウレタンゲル

12 4.1. ブレフフブルのルは (4.1. フレフファルの) は (4.1. フレフファルの) は (4.1.										
主剤 (g)	硬化剤 (g)	配合率 (%)	恒温槽に入れた時間	混ぜ時間	硬さ					
499.87	14.03	2.80	1 時間	1 分以上	固め					
509.92	14.76	2.89	2 時間	1分未満	柔らかめ					
409.03	12.03	3.00	1 時間 30 分	1分未満	柔らかめ					
903.33	27.48	3.00	1 時間 30 分	1 分以上	固め					
325.43	10.34	3.17	1 時間 30 分	1分未満	固め					
625	18.78	3.00	1 時間	1 分以上	柔らかめ					
	499.87 509.92 409.03 903.33 325.43	499.87       14.03         509.92       14.76         409.03       12.03         903.33       27.48         325.43       10.34	主剤(g) 硬化剤(g) 配合率(%) 499.87 14.03 2.80 509.92 14.76 2.89 409.03 12.03 3.00 903.33 27.48 3.00 325.43 10.34 3.17	主剤(g)硬化剤(g)配合率(%)恒温槽に入れた時間499.8714.032.801 時間509.9214.762.892 時間409.0312.033.001 時間 30 分903.3327.483.001 時間 30 分325.4310.343.171 時間 30 分	主剤(g)硬化剤(g)配合率(%)恒温槽に入れた時間混ぜ時間499.8714.032.801 時間1 分以上509.9214.762.892 時間1 分未満409.0312.033.001 時間 30 分1 分未満903.3327.483.001 時間 30 分1 分以上325.4310.343.171 時間 30 分1 分未満					

表41.ウレタンゲルの比較

#### 4.1.2 ウレタンゲルの柔らかさに関する調査

Sinkpad に用いたウレタンゲルは主剤と硬化剤から構成される.主剤と硬化剤を混ぜた後に,固めるために恒温槽にて100度の温度で1時間加熱する必要がある.そこで,主剤と硬化剤の配合率とその混ぜ時間及び恒温槽にかける時間を記録し,これらと柔らかさの関係を調べた.その結果を表4.1に示す.また作成した弾性素材を図4.2に示す.なお,表4.1の番号と図4.2の番号は対応している.

表 4.1 と図 4.2 より, 柔らかさに関しては,配合率と同様に,素材の混ぜ時間も大きな割合を占めた.この結果より,ウレタンゲルを作成する際には主剤と硬化剤の配合率を 3%以下とし,混ぜ時間を1分未満にすると良いことが分かった.

#### 4.1.3 ウレタンゲルの表面を滑らかにする素材の選定

Sinkpad はマウスを沈み込ませることのできる柔らかさと同時に,マウスを滑らせることのできる滑らかさを持つ必要がある.しかしウレタンゲルは粘着力が強く,そのままではマウスパッドとして使用できない.そこでウレタンゲルの粘着力を低くするためにウレタンゲルを覆う素材の選定を行った.ウレタンゲルを覆う素材の候補は,ラップフィルム,ベビーパ

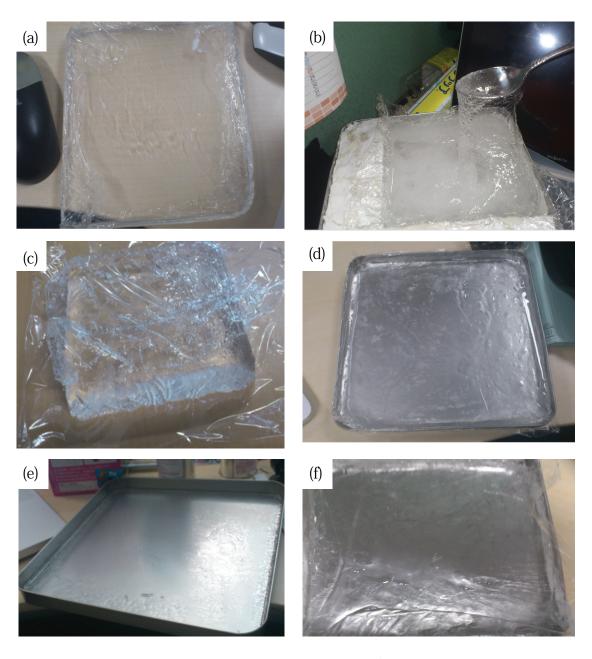


図 4.2: 作成したウレタンゲル



図 4.3: ウレタンゲルの表面を滑らかにするために覆う素材 , (a) ラップフィルム , (b) パウダー , (c) スパンデックス繊維

ウダー(以降,パウダー),スパンデックス繊維とした.以降に,それぞれの素材ごとにウレタンゲルを覆った結果を述べる.

#### ラップフィルム

ラップフィルムを使用した際のウレタンゲルを図 4.3a に示す.これにより,ウレタンゲルにて滑らかにマウスを動かすことが可能になった.しかし,ウレタンゲルが透明であったため,光学式マウスを利用した際,マウスポインタを正しく動かすことができなかった.また,ラップフィルムは伸縮性を持たないため,マウスを沈み込ませることが困難であった.

#### パウダー

パウダーを使用した際のウレタンゲルを図 4.3b に示す.これにより,ウレタンゲルの伸縮性を失うこと無く表面を滑らかにすることができた.また,ウレタンゲルが不透明になることによってマウスを動かすことが可能になった.しかし,時間の経過に従い,ウレタンゲルが粘着性を取り戻すという問題及びパウダーが机を汚すという問題が発生した.

#### スパンデックス繊維

ラップフィルムとパウダーの経験を踏まえ、弾力性があり、かつ粒子ではない素材としてスパンデックス繊維を使用した.スパンデックス繊維を使用した布によりウレタンゲルを覆った状態を図 4.3c に示す.これにより、マウスを滑らかに動かすことができ、かつマウスを沈み込ませることが可能になった.

以上の結果より,ウレタンゲルを覆う素材としてスパンデックス繊維が適していることが分かった.以降では,Sinkpadにはウレタンゲルとスパンデックス繊維を組み合わせたものを使用する.

#### 4.2 プロトタイプシステム1

本節では,プロトタイプシステム 1 のハードウェア構成と認識手法を述べる.また,開発時の使用環境を図 4.4 に示す.



図 4.4: 開発時の使用環境

#### 4.2.1 ハードウェア構成

ハードウェアは pad 部と sensor 部から構成される.

ハードウェア構成を図 4.5 に示す. pad 部には当初,縦 13cm,横 13cm,高さ 2cmのウレタンゲルを使用していたが,後に縦 18cm,横 18cm,高さ 1cmのウレタンゲルに変更した.これは,初期の pad 部ではマウスを動かす領域が狭く,また pad 部が厚かったためである.これらの pad 部では,マウスの滑りを良くするために,弾力性のある布(スパンデックス繊維)を用いてウレタンゲルを覆っている. pad 部を図 4.6 に示す.また,実際にこの pad 部にてマウスを沈み込ませている状態を図 4.7 に示す.

sensor 部は $3 \times 3$  ( pad 部を大きく変更した後は $4 \times 4$  ) の格子状に並べられた9 個(変更後は16 個)の圧力センサとマルチプレクサ,マイクロコントローラから構成されている.sensor 部を図4.8 に示す.また,圧力センサを9 個使用していた時の回路図を図4.9 に示す.なお,圧力センサにはFSR406,マルチプレクサには16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサ,マイクロコントローラには16 が管理している.圧力センサはマルチプレクサを経由してマイクロコントローラが管理している.圧力センサの値は,マイクロコントローラから16 PC の16 Sinkpad の状態を解析するソフトウェア(以降,解析ソフトウェア)へ送信される.

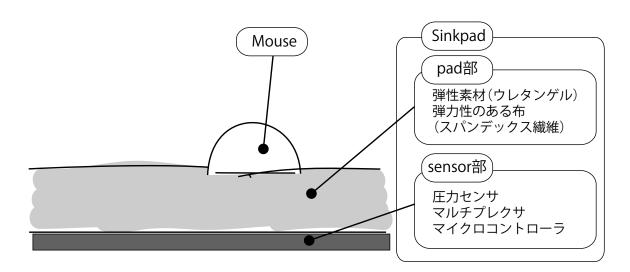


図 4.5: システム構成



図 4.6: pad 部,左:初期の pad 部,右:現在の pad 部



図 4.7: Sinkpad にマウスを載せている状態 , (a) 通常時 , (b) 沈み込ませている状態 , (c) 傾けている状態

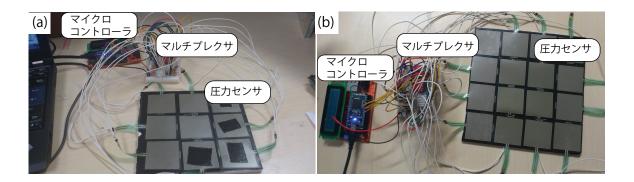


図 4.8: sensor 部 , (a) 圧力センサ 9 個 , (b) 圧力センサ 16 個

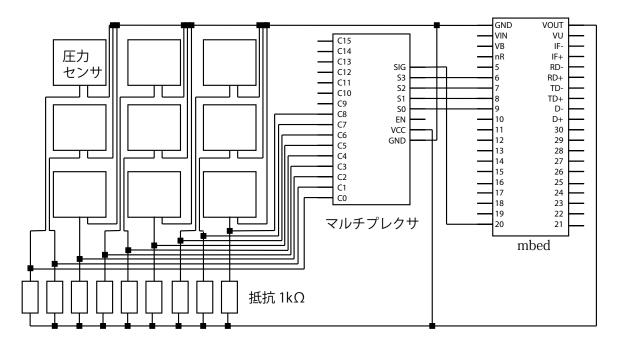


図 4.9: 回路図

#### 4.2.2 認識手法

マウスパッドにかかっている圧力が弱い時, Sinkpad は通常のマウスパッドと認識する.一定以上マウスパッドに圧力が掛かった時,最も圧力がかかっている点を基準にし,その圧力が弱い時にマウスポインタが移動した場合には Sink+Move 操作と認識する.その圧力が強い時,マイクロコントローラから送られてきた9個(変更後は 16個)の圧力センサの値を特徴量として機械学習の1つである SVM (Support Vector Machine)を使用して Sink 操作か Tilt 操作かを判定する.認識後, Sinkpad は圧力センサの値の変化に応じて, Tilt 操作であれば傾きを, Sink 操作であれば深さが変化したとみなす.

圧力センサの値は 8 バイトの浮動小数点であり,次元数は圧力センサの数と同様に 9 (変更後は 16) である.システムの利用前に学習データとして各操作を 100 回ずつ様々な位置にて実行し,教師データとして利用した.なお,SVM の実装には  $SVM.NET^2$  というライブラリを使用した.

また, Sinkpad の状態の解析方法として次の2つを試した.

- 圧力センサの値をそのまま SVM にて解析する手法.
- 最も圧力が掛かっている圧力センサの上にマウスがあると仮定し,圧力センサの位置ごとに SVM にて解析する手法.

結果として,圧力センサの値をそのまま SVM にて解析する手法の精度は低かった.圧力センサの位置ごとに SVM にて解析する手法の精度は,各圧力センサの真上にマウスを置いて操作

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>http://www.matthewajohnson.org/software/svm.html

を行った際,高くなることを確認した.しかし各圧力センサの真上からずれた位置にマウス を置いて操作を行った際に精度が低くなることを確認した.どちらの手法も精度に問題があ るため,プロトタイプシステム 1 は Sinkpad には適さないと判断した.

#### 4.3 プロトタイプシステム2

本節では,プロトタイプシステム2のハードウェアと解析ソフトウェア,認識手法を述べる.プロトタイプ2はプロトタイプ1の圧力センサの種類を変更し,圧力センサの数を増やし,認識手法の変更を行ったものである.

#### 4.3.1 ハードウェア構成

ハードウェア構成を図 4.5 に示す.これはプロトタイプシステム 1 と同様のものである.また,pad 部もプロトタイプシステム 1 と同様の図 4.6 を使用する.

sensor 部を図 4.10 に示す . sensor 部は  $8 \times 8$  の格子状に並べられた 64 個の圧力センサと 4 台のマルチプレクサ , 4 台のマイクロコントローラから構成されている . 64 個の圧力センサは , 16 個ごとに 1 台のマルチプレクサに接続され , 1 台のマルチプレクサを 1 台のマイクロコントローラが制御している . なお , 圧力センサには FSR406 , マルチプレクサには 16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサ , マイクロコントローラには 16 を使用した . また , 16 のマイクロコントローラは 16 合の 16 とシリアル通信により接続されている . マイクロコントローラ 16 でも制御することは可能であったが , 処理速度を早めるために 16 台使用した . 現在の実装では 16 で 16 で 16 の速度にて動作している .

圧力センサの値は、マイクロコントローラから PC の Sinkpad の状態を解析するソフトウェア(以降,解析ソフトウェア)へ送信される.

#### 4.3.2 解析ソフトウェア

解析ソフトウェアは毎フレームごとに圧力センサの値の重心  $(x_g,y_g)$  (以降,重心  $(x_g,y_g)$ ) と圧力センサの値の平均 (以降,平均値 E(X)) を求める. なお, Sinkpad の領域は  $8\times 8$  の形に分割され,4台のマイクロコントローラから送られてきた圧力センサの値は分割されたそれぞれの領域の値として計算される.

解析ソフトウェアを図 4.11 に示す.解析ソフトウェアの (a) は現在の各圧力センサの値を青色の濃淡にて表現している.(b) は 20 フレーム分の各圧力センサの値を線の高さにて表現している.また,圧力が変化していく様子を図 4.12 に示す.濃い青色の場合,力がほとんど加わっておらず,白色に近づくに連れて力が加わっていることを表現している.

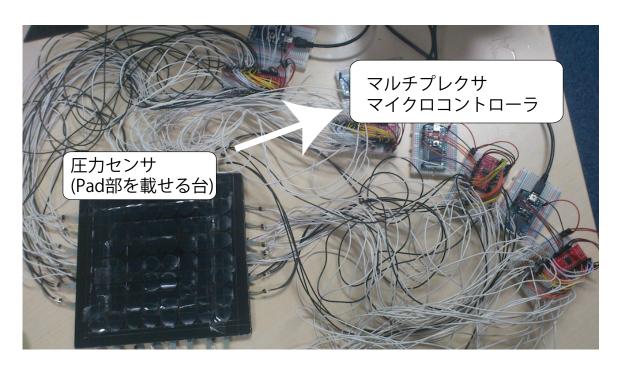


図 4.10: sensor 部

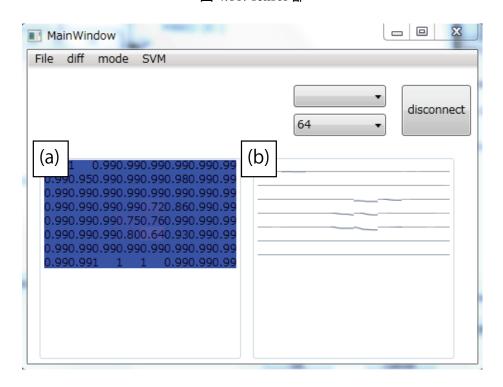


図 4.11: 解析ソフトウェア , (a) 現在の各圧力センサの値 , (b) 20 フレーム分の各圧力センサの値



図 4.12: 圧力センサの値の変化



図 4.13: 各操作認識のための平均値 E(X) と閾値の関係

重心  $(x_g,y_g)$  を求める式は以下の通りである. $m_{(i,j)}$  は対応する位置の圧力センサの値, $x_i$ , $y_i$  は圧力センサの置かれた軸である.

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} x_i \cdot m_{(i,j)}}{\sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} m_{(i,j)}}, y_g = \frac{\sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} y_i \cdot m_{(i,j)}}{\sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} m_{(i,j)}}$$

#### 4.3.3 認識手法

平均値 E(X) から押し込み度合いを求める.また,重心  $(x_g,y_g)$  の変化量から傾き度合いを求める.

各操作認識のための平均値 E(X) と閾値の関係を図 4.13 に示す.また認識のフローチャートを図 4.14 に示す.

平均値 E(X) が閾値 A 以下の間,通常のマウスパッドとして機能する.また,平均値 E(X) が閾値 A 以上かつ閾値 B 以下の間にポインタが移動した場合,Sink+Move 操作となる.また,平均値 E(X) が閾値 B 以上の時,閾値 B 以下の時の重心  $(x_g,y_g)$  と比べて現在の重心  $(x_g,y_g)$  位置が小さく変化していれば Sink 操作として,大きく変化していれば Tilt 操作として認識する.また,Sink 操作と認識された場合,毎フレームごとに現在の平均値 E(X) から押しこみ具合を求める.Tilt 操作と認識された場合,毎フレームごとに閾値 B 以下の時の重心と現在の重心位置の変化量から傾き具合を求める.

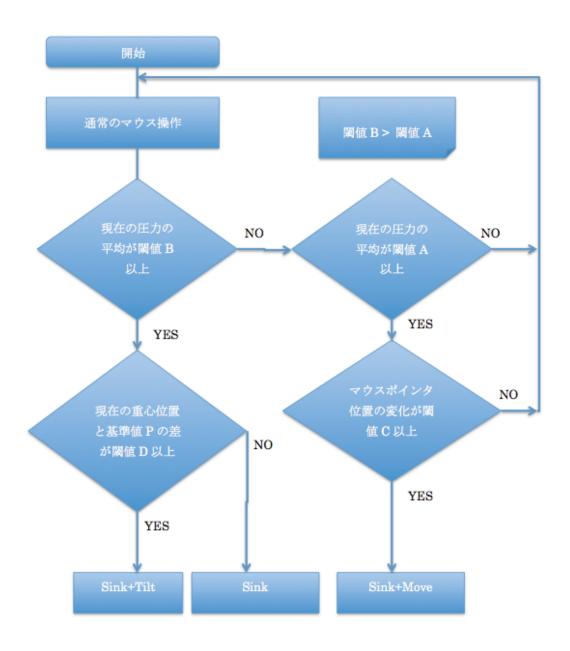


図 4.14: 各操作の認識までのフローチャート



図 4.15: マウスへの圧力センサの装着

#### 4.4 弾性素材をマウスパッドとして用いる応用例

本節では,弾性素材をマウスパッドとして用いる応用例を2種類述べる.はじめにSinkpadの認識システムをマウス側に取り付けたマウス版プロトタイプシステムを述べる.次に,Sinkpadとは異なるが,弾性素材の上に硬い板を置くプロトタイプシステムを述べる.

#### 4.4.1 マウス版プロトタイプシステム

マウス版プロトタイプシステムとはマウスの右上・左上・右下・左下に圧力センサをつけ,図 4.6 にて示した pad 上にて使用するシステムである. 本システムを図 4.15 に示す.

本システムはマイクロコントローラを通して PC と接続し解析を行う . 認識には 4 箇所の圧力の重心  $(x_q,y_q)$  とその平均値 E(X) を利用する .

マウス版プロトタイプシステムを用いることにより、従来の操作と柔らかいマウスパッドを活用した操作を全て行うことができた.また、これまでのプロトタイプシステムに比べてシステムを簡略化することができた.しかし、これまでのプロトタイプシステムでは、マウスパッド側にて認識を行なっていたが、マウス版ではマウス側にて認識を行う.このため、これまでのプロトタイプシステムと異なり、使用する際、マウスに圧力センサを装着する手間が生じる.





図 4.16: 板の角 4 箇所に弾性素材を装着,(a) 4 箇所の弾性素材と圧力センサ,(b) 弾性素材と圧力センサの上に硬い板を乗せ,その上にマウスを載せている状態

#### 4.4.2 弾性素材の上に硬い板を置くプロトタイプシステム

弾性素材の上に硬い板を置くプロトタイプシステムとは,硬い表面を持つ板の角 4 箇所を 弾性素材に載せ,弾性素材と板の間に圧力センサを取り付けたシステムである.本システム を図 4.16 に示す.

本システムは,マイクロコントローラを通して PC と接続し解析を行う.認識には 4 箇所の圧力の重心  $(x_q,y_q)$  とその平均値 E(X) を利用する.

本システムを用いることにより、従来の操作と Sink 操作を行うことができた.しかし Sink+Move 操作時、マウスを動かした時の抵抗が弱くなってしまった.これは Sinkpad と異なり、マウス の位置のみではなくマウスパッド全体が沈み込むことが原因である.また、Tilt 操作を認識することができなかった.

## 第5章 アプリケーション

本章では、Sinkpad の柔らかさを利用した操作に対応する4種類のアプリケーションについて述べる。これらのアプリケーションを開発することにより、デスクトップ環境においてSinkpad の可能性を示す。

#### 5.1 重なりあった複数ウィンドウの切り替え

利用者は重なりあった複数のウィンドウがマウスポインタ位置に存在している環境において, Sink 操作を行うことにより背面にあるウィンドウを素早く最前面に移動させることができる.この状態を図 5.1 に示す.また,実際にウィンドウが切り替わる様子を図 5.2 に示す.

重なりあった複数のウィンドウがマウスポインタ位置に存在している状態を図 5.1a に示す . この時 , 利用者が Sink 操作を行うことにより , 押し込み度合いに応じた枚数だけ前面にあるウィンドウが半透過される . これにより隠れていたウィンドウが利用者に見えるようになり , 最前面に移動したいウィンドウを確認することができる . 2 枚のウィンドウが半透過された状態を図 5.1b に示す . また , 透過率を著者らが見やすいと感じた 20%とした . Sink 操作中にマウスの左クリック操作を行うことにより , 半透過処理されていない重なりあったウィンドウのうち最前面にあるウィンドウが , マウスポインタ位置にある全てのウィンドウの最前面に移動する. 同時に透過処理も終了する. この時の最前面のウィンドウが変更された状態を図 5.1c に示す .

重なりあった複数のウィンドウ間においてマウスポインタを素早く移動させる研究[山中 11] もあるが,本アプリケーションはこの研究と異なり,マウスポインタを移動せずに複数ウィンドウ間のマウスポインタの移動を可能とする.

#### 5.2 重なりあった複数ウィンドウをずらして表示

利用者は,ウィンドウの重なりによって隠れてしまったウィンドウを Tilt 操作を行うことによって,素早く確認することができる.この状態を図 5.3 に示す.また,実際にウィンドウがずれていく様子を図 5.4 に示す.

マウスポインタ位置に複数のウィンドウが重なりあって存在している状態を図 5.3a に示す.この時,利用者は Tilt 操作を行うことにより,ウィンドウの表示位置を変更することができる.ウィンドウの表示位置はマウスの傾き具合に応じて,マウスの傾いた方向へ移動する.ウィンドウがずれた状態を図 5.3b に示す.このずれは,最前面にあるウィンドウは移動せず,奥

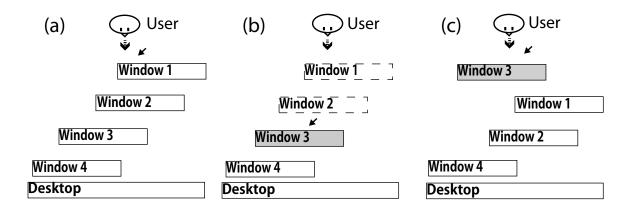


図 5.1: (a) 重なりあった複数ウィンドウを仮想的に横から見た状態 , (b) Sink 操作により 2 枚のウィンドウが半透過された状態 , (c) クリック操作により , ウィンドウレイヤの順序が切り替わり , Window3 が最前面に移動した状態



図 5.2: Sink 操作によりウィンドウが切り替わる様子

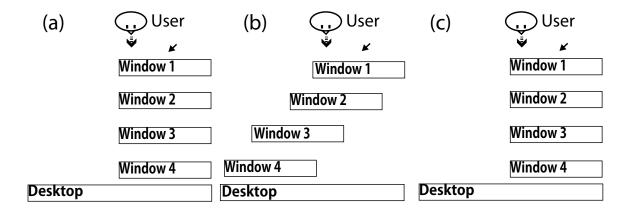


図 5.3: (a) 重なりあった複数ウィンドウを仮想的に横から見た状態, (b) Tilt 操作によりウィンドウがずれた状態, (c) ウィンドウが元の位置に戻った状態



図 5.4: Tilt 操作によりウィンドウがマウスの傾きに応じてずれていく様子

にいくほどウィンドウの表示位置が大きく移動する. Tilt 操作を終了すると,ウィンドウの表示位置も Tilt 操作以前の位置に戻る.ウィンドウが元の位置に戻った状態を図 5.3c に示す.

#### 5.3 CD 比の動的変更及び拡大鏡

利用者は Sink+Move 操作を行うことにより CD 比を動的に変更し拡大鏡を表示することができる.この状態を図 5.5 に示す.Sink+Move 操作を使用した時にマウスの CD 比を低くし,かつマウスポインタ周辺を見やすくするために拡大表示する.この状態を図 5.5b に示す.また,通常の移動操作を図 5.5a に示す.

この通常の移動操作と Sink+Move 時の移動操作を組み合わせることにより,利用者は素早いポインタの移動と正確なポインタの移動が可能になる.





図 5.5: 同じ距離マウスを動かした時のポインタの移動, (a) CD 比の高い状態, (b) Sink+Move 操作により, CD 比が低くなりポインタ周辺が拡大表示されている状態



図 5.6: マウスポインタが Tilt 操作により隣のディスプレイへ移動する

#### 5.4 マウスポインタのワープ

利用者は Tilt 操作を行うことによりマウスポインタを素早く移動させることができる.この状態を図 5.6 に示す.利用者は Tilt 操作を行うと,マウスが傾いた方向へマウスポインタを固定ピクセル移動させることができる.これにより,利用者は複数のディスプレイを使用する環境において,現在マウスポインタのあるディスプレイから別のディスプレイへマウスポインタを瞬時に移動させることができる.

## 第6章 議論

本章では、複数種類のマウスの利用と操作感及び傾けた際のボタンの誤入力を議論する、

#### 6.1 複数種類のマウスの利用

Sinkpad がどのような種類のマウスに対応できるかを調べるために,複数種類のマウスをSinkpad 上にて使用した.

はじめに 3 種類のマウス(ゲーミングマウス,マルチタッチマウス, 2 ボタンマウス)を Sinkpad 上にて使用した.その結果,全てのマウスにおいて各操作が正しく認識されることを 確認した.

次に、マウスが自身の移動を検知する手法として様々な方法があるが、どの手法が Sinkpad 上にて認識されるかを調べた、ボール式のマウスを使用したところ、通常の平面と異なり、マウスポインタを滑らかに動かすことができなかった、これは、ボールが沈み込んでしまい、正しく動かなかったことが原因である、光学式、レーザー式、青色 LED 式のマウスを Sinkpad 上にて動かした所、通常の平面と同様に動かすことを確認した。

また,トラックボールを Sinkpad と組み合わせることも調査した.使用したトラックボールは「ロジクール Wireless Trackball M570 M570 (以降, M577)」と「ケンジントン OrbitTrackball with Scroll Ring 72337 (以降, OrbitTrackball)」である.これらを図 6.1 に示す.

どちらのトラックボールも Sink 操作を問題なく行えた.しかし M577 を使用中に左方向に Tilt 操作を行った所,右手親指に力がかかり,右手親指の位置にあるトラックボールの操作が 困難であった.OrbitTrackball においては,クリックボタンが右側面と左側面に配置されているため,どちらの方向にも Tilt 操作を行うことが困難であった.また,どちらのトラックボールもトラックボールの背面に取り付けられた滑り止めによって Sink+Move 操作を行うことが 困難であった.

#### 6.2 操作感

WISS2012 (第 20 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ) にて約 50 人の参加者に Sinkpad を使用してもらい , その様子の観察と意見の収集を行った . Sinkpad を使用してもらっている様子を図 6.2 に示す .

利用者の Sinkpad を使用している様子から , 手の腹を使ってマウスを操作するとマウスを Sinkpad に沈み込ませやすいということが分かった .



図 6.1: トラックボール . 左:OrbitTrackball , 右:M577

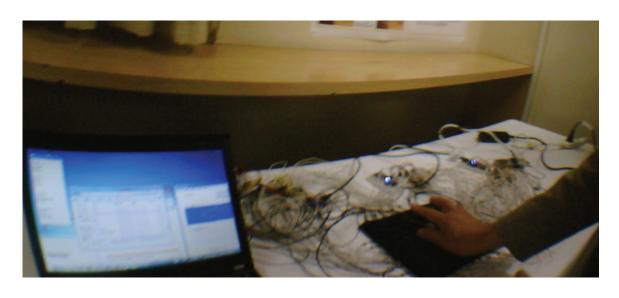


図 6.2: WISS2012 にて Sinkpad を使用してもらっている様子

利用者の意見として、Sinkpadの変形から押し込み具合・傾き具合がわかりやすいというものがあった.また、Sink+Move 操作時に Sinkpad の抵抗により、マウスを少しずつ動かす必要があったというものもあった.これらの意見から、利用者は正確に Sinkpad の柔らかさを利用した操作を使用でき、また Sink+Move 操作時は正確なポインティングも可能であると考えられる.また、Tilt 操作において、前方方向は傾けにくく、左右方向は傾けやすいという意見も得た.これは、前方方向にはボタンがあるため、誤ってボタンを押してしまうためであると考えられる.

#### 6.3 傾けた際のボタンの誤入力

6.2 節と同様に,WISS2012 にて Sinkpad の使用の様子を観察したところ,Tilt 操作時に傾けたい方向にボタンがあった場合.そのボタンをクリックしてしまう様子が見られた.これはマウスを傾けた時,傾ける力に加えて,Sinkpad の反発力によりボタンが押されてしまうことが原因と考えられる.これを解決する方法として,Tilt 操作時にはボタンの認識を行わないようにした.

## 第7章 結論と今後の課題

マウスを沈み込ませることによって様々な入力を可能にする柔らかいマウスパッドである Sinkpad を述べた.利用者は任意のマウスを Sinkpad に沈み込ませることによって, Sink 操作, Tilt 操作, Sink+Move 操作を行うことが可能になる.また, マウスを沈み込ませない場合, Sinkpad は滑らかな平面となるため従来のマウス機能には干渉しない.本研究ではプロトタイプシステムを作成し,各操作を利用したアプリケーションの作成を行った.試用の結果,利用者は複数種類のマウスを Sinkpad 上にて使用できることが分かった.また,利用者からマウスの押し込み具合,傾き具合がわかりやすいという意見を得た.しかしその一方, Tilt 操作時にボタンを誤って押してしまうことがわかった.

今後はシステムを改良し,垂直方向を軸としてマウスを回転させるような新しい操作を認識できるようにしていきたいと考えている.また,現在処理速度が遅いため,マイクロコントローラを高速なものに変えて処理速度を速めたい.

## 謝辞

本論文の執筆にあたり,志築文太郎先生,三末和男先生,田中二郎先生,高橋伸先生には ご意見とご指導を頂きました.心より感謝致します.また,志築文太郎先生には日頃から丁 寧なご指導を頂きました.特に,研究の進行や,論文執筆にあたり,非常に多くのご助言を 頂きました.無事論文を執筆することができたのは,志築文太郎先生のご助力があってのこ とです.心より感謝致します.

インタラクティブプログラミング研究室の皆様には、研究活動と日常生活を通して大変お世話になりました.特にWAVEチームの皆様には、システムの提案からハードウェアの実装まで幅広いご助言を頂きました.また、論文執筆の際には、自身が忙しい身でありながらも多くの時間をかけて添削して頂きました.心より感謝致します.

最後に,様々な面から筆者を支えてくれた家族と友人,そして大学生活においてお世話に なった全ての方々に心より感謝致します.

## 参考文献

- [ACGO07] Taher Amer, Andy Cockburn, Richard Green, and Grant Odgers. Evaluating swift-point as a mobile device for direct manipulation input. In *Proceedings of the eight Australasian conference on User interface Volume 64*, AUIC '07, pp. 63–70, Darlinghurst, Australia, Australia, 2007. Australian Computer Society, Inc.
- [AM96] Motoyuki Akamatsu and I. Scott MacKenzie. Movement characteristics using a mouse with tactile and force feedback. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 45, pp. 483–493, 1996.
- [BBKF97] Ravin Balakrishnan, Thomas Baudel, Gordon Kurtenbach, and George Fitzmaurice. The Rockin'Mouse: integral 3D manipulation on a plane. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '97, pp. 311–318, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [BP98] Ravin Balakrishnan and Pranay Patel. The PadMouse: facilitating selection and spatial positioning for the non-dominant hand. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, pp. 9–16, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [CIS07] Jared Cechanowicz, Pourang Irani, and Sriram Subramanian. Augmenting the mouse with pressure sensitive input. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '07, pp. 1385–1394, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [Eng68] Douglas C. Engelbart. The Mother of All Demos. http://sloan.stanford.edu/mousesite/1968Demo.html, 1968.
- [FJAI11] Sean Follmer, Micah Johnson, Edward Adelson, and Hiroshi Ishii. deForm: an interactive malleable surface for capturing 2.5D arbitrary objects, tools and touch. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '11, pp. 527–536, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [Fuk09] Masaaki Fukumoto. PuyoSheet and PuyoDots: simple techniques for adding "buttonpush" feeling to touch panels. In *Proceedings of the 27th international conference*

- extended abstracts on Human factors in computing systems, CHI EA '09, pp. 3925–3930, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [HSH<sup>+</sup>99] Ken Hinckley, Mike Sinclair, Erik Hanson, Richard Szeliski, and Matt Conway. The VideoMouse: a camera-based multi-degree-of-freedom input device. In *Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '99, pp. 103–112, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [KJS<sup>+</sup>08] Yasuaki Kakehi, Kensei Jo, Katsunori Sato, Kouta Minamizawa, Hideaki Nii, Naoki Kawakami, Takeshi Naemura, and Susumu Tachi. ForceTile: tabletop tangible interface with vision-based force distribution sensing. In *ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos*, SIGGRAPH '08, pp. 17:1–17:1, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [KKL<sup>+</sup>08] Seoktae Kim, Hyunjung Kim, Boram Lee, Tek-Jin Nam, and Woohun Lee. Inflatable mouse: volume-adjustable mouse with air-pressure-sensitive input and haptic feedback. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pp. 211–224, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [LLL<sup>+</sup>12] Bhoram Lee, Hyunjeong Lee, Soo-Chul Lim, Hyungkew Lee, Seungju Han, and Joonah Park. Evaluation of human tangential force input performance. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 3121–3130, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [MO64] Bernard M. Oliver. Time Domain Reflectometry. *HP Journal*, Vol. 15, No. 6, pp. 1 8, 1964.
- [MSP97] I. Scott MacKenzie, R. William Soukoreff, and Chris Pal. A two-ball mouse affords three degrees of freedom. In *CHI '97 extended abstracts on Human factors in computing systems: looking to the future*, CHI EA '97, pp. 303–304, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [RBB04] Gonzalo Ramos, Matthew Boulos, and Ravin Balakrishnan. Pressure widgets. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '04, pp. 487–494, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [RP09] Ilya Rosenberg and Ken Perlin. The UnMousePad: an interpolating multi-touch force-sensing input pad. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 65:1–65:9, July 2009.
- [SIGS08] Kang Shi, Pourang Irani, Sean Gustafson, and Sriram Subramanian. PressureFish: a method to improve control of discrete pressure-based input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pp. 1295–1298, New York, NY, USA, 2008. ACM.

- [SMKF09] Toshiki Sato, Haruko Mamiya, Hideki Koike, and Kentaro Fukuchi. Photoelastic-Touch: transparent rubbery tangible interface using an LCD and photoelasticity. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '09, pp. 43–50, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [TT10] Sheng Kai Tang and Wen Yen Tang. Adaptive mouse: a deformable computer mouse achieving form-function synchronization. In *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, pp. 2785–2792, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [Ven93] Dan Venolia. Facile 3D direct manipulation. In *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 conference on Human factors in computing systems*, CHI '93, pp. 31–36, New York, NY, USA, 1993. ACM.
- [VIR<sup>+</sup>09] Nicolas Villar, Shahram Izadi, Dan Rosenfeld, Hrvoje Benko, John Helmes, Jonathan Westhues, Steve Hodges, Eyal Ofek, Alex Butler, Xiang Cao, and Billy Chen. Mouse 2.0: multi-touch meets the mouse. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '09, pp. 33–42, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [VMK+05] Kevin Vlack, Terukazu Mizota, Naoki Kawakami, Kazuto Kamiyama, Hiroyuki Kajimoto, and Susumu Tachi. GelForce: a vision-based traction field computer interface. In CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems, CHI EA '05, pp. 1154–1155, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [WB11] Raphael Wimmer and Patrick Baudisch. Modular and deformable touch-sensitive surfaces based on time domain reflectometry. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '11, pp. 517–526, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [YMM<sup>+</sup>10] Xing-Dong Yang, Edward Mak, David McCallum, Pourang Irani, Xiang Cao, and Shahram Izadi. LensMouse: augmenting the mouse with an interactive touch display. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pp. 2431–2440, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [坂本 11] 坂本侑一郎, 吉川拓人, 大江龍人, 志築文太郎, 福本雅朗, 田中二郎. WrinkleSurface: しわを作って入力できる柔らかいマルチタッチインタフェース. 第 19 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2011), 日本ソフトウェア科学会, pp. 66–71, 2011.
- [山中 11] 山中祥太, 宮下芳明. スイッチバックカーソル: 重なりあったウィンドウ間を移動可能なマウスカーソル操作手法. 第 19 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2011), 日本ソフトウェア科学会, pp. 7–11, 2011.

[渡辺 01] 渡辺哲也. 触覚マウスを用いた図形情報の識別ー視覚障害者に図形情報を伝える ための一方策ー. 画像ラボ, Vol. 12, No. 6, pp. 13-17, 2001.