多様なマルチタッチ入力を自動生成するデバイスの構築

岡本 雅弘 村尾 和哉*

概要. スマートフォンやタブレット,ノートパソコンなどのタッチパネルを搭載した機器の普及にともない,ユーザがタッチ入力を行う機会が増えた.本研究では、タッチパネルにおけるタッチ入力を高速、連続、またはハンズフリーで実現するために、マルチタッチ入力を自動生成するデバイスを構築した.提案デバイスは導電性インクを用いて電極を印刷した電極シートと電圧制御基板から成り、タッチパネルの静電容量を時間空間的に変化させることでマルチタッチ入力を生成する.評価実験より、提案デバイスはシングルタッチ、プレスアンドタッチ、スクロール、ピンチイン、ピンチアウト、回転の6つのマルチタッチ入力を高精度で生成できることを確認した.

1 はじめに

スマートフォンやタブレット,ノートパソコンなど静電容量式タッチパネルを搭載した機器が広く普及している.ユーザはタッチパネルに対してタッチ入力を行うことで,意図する要求を直観的に入力できるようになった.

本研究では印刷可能な回路とマイコンを用いてマルチタッチ入力を生成するデバイスを提案する. 提案デバイスはタッチパネルに新たなソフトウェアを一切インストールすることなく, ひとつのインタフェースでスクロールやピンチ操作などのマルチタッチ入力を生成する. マルチタッチ入力をユーザに代わって自動生成するデバイスがあれば, 高速, 連続, ハンズフリーのタッチ入力を実現でき, タッチパネルを利用した作業の効率化や自動化が期待できる.

提案デバイスは導電性インクを用いて電極を印刷 した電極シートと電圧制御基板から成り、タッチパ ネルの静電容量を時間空間的に変化させることでマ ルチタッチ入力を生成する. 予備実験を行い, マル チタッチ入力を生成するために必要な電極の大きさ と間隔を調査し、デバイスを設計、実装した. 評価 実験では、提案デバイスがシングルタッチ、プレス アンドタッチ, スクロール, ピンチイン, ピンチア ウト,回転の6つのマルチタッチ入力を高精度で生 成できることを確認した.また、生成したスクロー ルがページを移動させたピクセル量(移動量),ピ ンチアウトによってページが拡大された割合(拡大 量), ピンチインによってページが縮小された割合 (縮小量),回転によってページが回転した角度(回 転量)を測定した. さらに, マルチタッチ入力の生成 終了後、次のマルチタッチ入力までに最低限必要な インターバルを調査し、提案デバイスがマルチタッ チ入力を高速で生成できることを確認した.

2 関連研究

Voelker ら [7] はタッチ入力を生成するインタフ ェースとして, タッチパネル内の送信電極を導電性 のブリッジを介して別の位置にある受信電極と静電 結合させ、バッテリや人体の接触を必要としないマ ルチタッチ生成デバイスを提案している. Ikeda ら [3] は、導電性インクで印刷した2次元の電極パター ンをタッチパネルに接触させることで電極パターン の位置でマルチタッチを生成し, 任意のコードを表 現できる CapacitiveMarker を提案している. Kato らの ExtensionSticker[4] は,導電性インクを用い て作成した縞模様のシールで, タッチパネルに張り 付けてタッチパネルを拡張するインタフェースであ る. シールの導電部をタッチすることで印刷パター ンに応じたタッチ入力をタッチパネルに発生させる. 提案デバイスは、導電性インクで導電部を印刷した シートを用いてマルチタッチ入力を生成するが、従 来研究と異なり,ひとつのシートで多用なマルチタッ チ入力を動的に生成できる.

Yuら [6] らが提案する Clip-on Gadgets では、物理的なボタンが取り付けられたクリップをスマートフォンなどのタッチパネルに取り付けてタッチ入力を行っている。クリップの内側には導電性ゴムが取り付けられており、ボタンを押した際に導電性ゴムの静電容量が変化し、タッチ入力を発生させている。Ogataら [5] は、マルチタッチデバイスのタッチスクリーンに対して、タッチセンシングの判定を電子的に変更することができるペン型デバイスを用いて、データ通信を実現している。 Kim ら [2] は、3D プリンタを用いてスタイラスペンを物理的に動かし、タッチパネルへの入力を行う SikuliBot という機構を構築している。

3 提案手法

本節では提案手法の構成および処理を説明する.

Copyright is held by the author(s).

^{*} 立命館大学

3.1 デバイス構成

提案デバイスは図1に示すように、ワンボードマイコン、メカニカルリレーから成る回路、電極シート、電源で構成される。電極シートは導電性インクで複数の電極を印刷したものであり、タッチパネルに接触させて使用する。各電極は個別のリレーに接続されており、リレーがオンのとき、対応する電極が接地される。ワンボードマイコンはリレーを制御する。デバイスの詳細な実装は次節で述べる。

3.2 静電容量式タッチパネルの基本原理

静電容量式タッチパネルにおけるタッチ検出手法を簡単に説明する.詳細は文献 [1] を参照していただきたい.タッチパネル内部には信号送信電極と信号受信電極が格子状に配置されており、送信電極と受信電極の交点では静電結合が生じている.静電結合されている箇所に人体など接地された導電体が接近すると電極間の静電容量が変化する.この静電容量の変化量を計測してタッチを検出する.送信電極の信号を走査することで複数のタッチを検出できる.

タッチパネルは指による操作に適応するため,静電容量が変化している面積が小さすぎる,または大きすぎる場合はタッチを検出しない.また,指がタッチパネルに接触する前にタッチに検出しないために,静電容量の変化に閾値を設けている.さらに,2点をタッチする場合,2点の距離が電極の格子間隔より短いと,2点を分離して識別できず1点のタッチと認識される.本研究では,これらの制約を考慮してデバイスを作成する.

3.3 マルチタッチ入力生成原理

提案デバイスではマイコンとリレーによる制御で電極を接地させ、シングルタッチ、ダブルタッチ、ホールド、プレスアンドタッチ、スクロール、ピンチアウト、回転の8種類のマルチタッチ入力を実現する。各マルチタッチ入力を図2に示す。シングルタッチは、1回タッチする操作、ホールドはタッチは素早く2回タッチする操作、ホールドはタッチは素早く2回タッチする操作である。スクリーのは指でタッチはままである。スクロールは指でタッチしたまま一方向に動かす操作、ピンチアウトは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指でタッチは2本の指を列とは1本の指を円を描で触れて、1本を中心にしてもう1本の指を円を描くように動かす操作である。

各タッチの実現方法は以下の通りである。シングルタッチは1個の電極を1度だけ接地させる。ダブルタッチはシングルタッチを2回素早く生成する。ホールドは1個の電極を一定時間接地させる。

残りの5種類のマルチタッチ入力は,複数の電極 を連続的に接地させて,静電容量の変化の重心点を

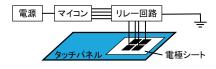
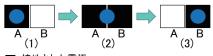


図 1. デバイス構成



図 2. マルチタッチ入力の例¹



- ■:接地された電極
- □:接地されていない電極
- タッチパネルが認識する静電容量変化の重心点

図 3. スクロールの生成手順

移動させることで生成する.スクロールの生成手順を図3に示す.図中の■は接地された電極,□は接地されていない電極,青丸はタッチパネルが認識する静電容量変化の重心点を表す.スクロールの生成手順は次のとおりである.

- 1. 電極 A のみを接地させて静電容量変化の重心 を電極 A の位置に生成する.
- 2. 電極 B も接地させて静電容量変化の重心を 2 つの電極の中点に移動させる.
- 3. 電極 A を解放(接地させない)して,静電容量変化の重心を電極 B の位置に移動させる.

この手順をスクロール方向に隣接する2個の電極で実施することで、スクロールを生成する.この手法は、隣接する電極間距離がタッチパネル内部の格子電極間隔より短い場合、2点の接地が1点のタッチと誤認識される制約を利用している.その他のマルチタッチ入力は図4に示すように、シングルタッチ、ホールド、スクロールの組合せで実現する.具体的には、プレスアンドタッチは1個の電極を接地させたまま、隣接しない別の電極を接地させる.ピンチイン(アウト)は2つのスクロールを互いに近づく(離れる)方向に生成する.回転は1個の電極をホールドし、隣接しない位置でスクロールを生成する.

4 実装

本節ではマルチタッチ入力生成に必要な電極サイズを調査する予備実験と予備実験の結果にもとづく

 $^{^{1}\,}$ designed by Macrovector - Freepik.com

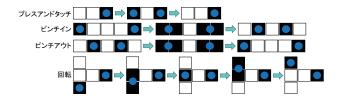


図 4. プレスアンドタッチ, ピンチイン, ピンチアウト, 回転の生成手順

実装を述べる.

4.1 予備実験

文献 [7] では,タッチパネル内部の格子電極間隔は 5mm が一般的であると推測されている.最も長くなる対角の電極交差点の距離は $5\sqrt{2}\approx 7.07[mm]$ であり,これより短い電極間隔であればマルチタッチ入力を生成できない可能性がある.一方で,電極間隔が大きいとデバイスが大きくなるため,マルチタッチ入力が高確率で生成される最小の電極間隔が最適である.そこで,プロトタイプデバイスを作成し,重心点の移動をともなうスクロール,ピンチイン,ピンチアウト,回転の 4 つのマルチタッチ入力に対して,電極間隔を変えて成功率を調査した.

電極シートは導電性インク(エレファンテック社 製 AgIC インク#1000)を用いて専用シート(三菱 製紙社製 NB-TP-3GU100) にインクジェットプリ ンタ (EPSON 社製 PX-S160T) で図3と図4に示 すように電極を印刷して作成した. 1個の電極は1 辺 4, 5, 6, 7, 8[mm] の 5 種類の大きさの正方形 で作成し, 電極間の隙間は互いに通電しない最小距 離である 0.5mm とした. 使用したタッチパネルは Lenovo ThinkPad X1 Yoga (Windows 7, 10 点 マルチタッチ対応)である. 各マルチタッチ入力を タッチパネル内部の格子電極に対して平行方向と対 角方向(平行方向に対して45度傾けた方向)の2 方向で5種類の大きさの電極シートを用いて 100 回 ずつ, 合計 6 種マルチタッチ入力 ×5 種シート ×2 方向×100回=6,000回生成し、成功率を計測した。 成功の判定方法については、Google Earth²におい て,筆者らの目視による確認で,スクロールの移動 量,ズームインとズームアウトの量,回転の量は考 慮せずに、正しいマルチタッチ入力が生成されれば 成功とした. ただし, スクロールと回転は正しい方 向に生成された場合のみ成功とした.

電極を接地させる時間について,図5に示すスクロールで2個の電極A,Bを制御する時系列を例に説明する.電極の接地パターン維持する時間を本研究では切替時間と呼び,予備実験ではすべての切替時間を50ms とした.また1回のマルチタッチ入力が終了した後,次のマルチタッチ入力を開始するま

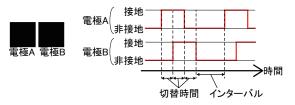


図 5. スクロールを例とした電極を制御する時系列

表 1. 生成成功率 [%]

電極	スクロール		ピンチイン		ピンチアウト		回転	
サイズ	平行	対角	平行	対角	平行	対角	平行	対角
4mm	0	0	99	84	68	80	0	0
$5 \mathrm{mm}$	0	0	100	99	92	72	68	71
$6 \mathrm{mm}$	87	0	100	100	95	99	72	75
$7 \mathrm{mm}$	100	93	100	100	100	100	84	90
8mm	99	100	100	100	100	100	85	86

での時間をインターバルと呼び、1,000ms とした. 切替時間とマルチタッチ入力の成功率の調査は後述 する評価の節で述べる.

結果を表1に示す.スクロールは,電極サイズ5mm以下で成功率0%となり,対角方向では6mm以下で成功率0%となった.これらはおおむね予想通りの結果といえる.ほかのマルチタッチ入力については,5mmの電極でも生成できた.スクロールは隣接する2電極で生成するのに対し,ピンチインとピンチアウトは5電極,回転のスクロール部分は3電極使用しており,静電容量変化の重心の移動量が大きいため小さい電極でも成功率が高くなったと推察できるが,詳細な調査は今後の課題とする.ピンチインとピンチアウトで同じ電極サイズでも成功率が異なるため,ソフトウェアによる制御が働いている可能性もある.少なくともスクロールを高い確率で生成するためには電極サイズを7mm以上にする必要がある.

4.2 デバイスの実装

予備実験の結果をもとに,電極の印刷面積を可能な限り小さくし,かつスクロールなどの方向の粒度を上げるために対辺距離が 7 mm の正六角形の電極をハニカム構造で 9 個配置するデザインで設計した.図 6 に示すように,スクロールは隣接する 2 個の電極を使用して 6 方向に生成可能で,3 個の電極を使用すれば $\pi/6[\text{rad}]$ ずれてさらに 6 方向に生成可能で,合計 12 方向に生成可能である.ピンチインとピンチアウトは 4 個の電極でスクロールを 2 組生成することで実現し,回転は 6 個の電極で 2 つの弧を同時に描くように電極を操作することで実現した.シングルタッチ,ダブルタッチ,ホールド,プレスアンドタッチは予備実験と同様であるため図での説明は割愛する.

実装したデバイスと回路図をそれぞれ図7と図8

https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/

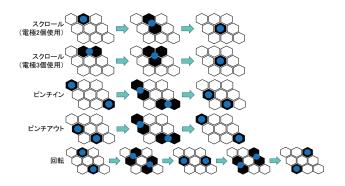


図 6. ハニカム構造におけるマルチタッチ入力生成手順



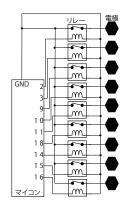


図 7. 実装したデバイス

図 8. デバイスの回路図

に示す.マイコン(ダイレクト USB ATmega32U4 ボード Arduino Leonardo 互換)と電極シートをリレー(HSINDA PRECISION CO., LTD 製 Y14H-1C-5DS)9 個を経由して接続している.電極シートの電極と導線は導電性テープで接着している.マイコンの電力は USB で給電しているが,電池による給電も容易に可能である.タッチパネルを搭載した端末にソフトウェアのインストールや事前設定は一切不要で,タッチパネル上に提案デバイスを置くだけでマルチタッチ入力を生成できる.

5 評価

本節ではマルチタッチ入力の成功率とスクロール の移動量,回転の回転量の評価を行う.

5.1 マルチタッチ入力の成功率

5.1.1 評価環境

マルチタッチ入力の生成に要する時間は短い方が望ましいため、シングルタッチ、プレスアンドタッチ、スクロール、ピンチイン、ピンチアウト、回転の6つのマルチタッチ入力について、切替時間を変えて成功率を評価した。タッチパネルは予備実験と同様のLenovo ThinkPad X1 Yoga を使用した。シングルタッチ、プレスアンドタッチは超簡易版タッ

プ速度計測ツール3にて成功回数を計測し、試行回数 で除することで成功率を算出した. スクロール, ピ ンチイン,ピンチアウト,回転はGoogle Earth に おいて,筆者らの目視による確認で,スクロールの 移動量、ズームインとズームアウトの量、回転の量 は考慮せずに, 正しいマルチタッチ入力が生成され れば成功とした. スクロールと回転は正しい方向に 生成された場合のみ成功とした. シングルタッチは 切替時間を 1ms から 25ms まで 1ms 刻みで変化さ せ、インターバルは設けずに連続で各100回(合計 2,500回) 生成した. シングルタッチ以外は, 切替時 間を 5ms から 50ms まで 5ms 刻みで変化させ, イ ンターバルを 1.000ms として各 100 回(合計 1.000 回) 生成した. なお, ダブルタッチはシングルタッチ を連続で生成すればよく、ホールドはシングルタッ チを一定時間継続すればよいため, 評価からは割愛 する.

5.1.2 結果

シングルタッチ,スクロール,プレスアンドタッチ,ピンチイン,ピンチアウト,回転の生成成功率を図9に示す.以降,マルチタッチ入力の種類ごとに結果を述べる.

シングルタッチは切替時間 20 ms 以上では,ほぼ 100%の成功率でタッチを生成できた.切替時間 15 ms 以下では成功率が 20%以下となった.切替時間 $2\sim4[\text{ms}]$ では,100 回目の試行のみシングルタッチが認識された.シングルタッチの失敗時は何も生成されなかった.

プレスアンドタッチは切替時間 40 ms 以上では,100%の成功率であった.切替時間 20 ms では成功率が 8%,15 ms 以下では成功率が 0%であった.プレスアンドタッチの失敗時は,何も生成されない,またはシングルタッチと誤認識された.

スクロールは切替時間 20ms 以上で成功率は 90% 以上,50ms で 100% であった.切替時間 15ms では成功率 49% で,10ms 以下では成功率は 0% であった.スクロールの失敗時は,何も生成されない,またはシングルタッチと誤認識された.

ピンチインは切替時間 25 [ms] 以上では成功率 97% 以上,45 ms 以上では 100% であった.切替時間 5 ms 以下では成功率は 0% であった.ピンチインの失敗時は,何も生成されない,またはシングルタッチあるいはスクロールに誤認識された.

ピンチアウトは切替時間 35 ms 以上で成功率 100% であった. 切替時間 10 ms 以下では成功率 0%であった. ピンチアウトの失敗時は,何も生成されない,またはシングルタッチ,スクロール,ピンチインに誤認識された.

回転は他のマルチタッチ入力と比較すると成功率 の上昇が緩やかであり、切替時間 25ms 以上で成功

³ http://gadgetwatch.arrow.jp/tap/

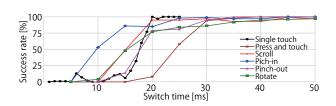


図 9. 切替時間を変化せさときのマルチタッチ入力生成の成功率

率は 80% 以上,50ms で 97%であった.切替時間 5ms 以下では成功率 0%であった.回転の失敗時は 何も生成されない,またはタッチ,スクロール,ピンチイン,ピンチアウトと誤認識された.

5.1.3 考察

結果から、シングルタッチは毎秒25回の速度で ほぼ 100% の成功率で生成できる. シングルタッチ の結果から、タッチパネルのタッチ認識は 20ms 間 隔で行われている, または発生間隔が 20ms 以下の 接触はタッチと認識しない制約があると考えられる. プレスアンドタッチ,ピンチイン,ピンチアウトも 切替時間を一定の長さ以上に設定すれば100%の成 功率で生成できた.全体の傾向として,複雑なマル チタッチ入力ほど成功率が低く,必要な切替時間が 長くなった. 回転はもっとも成功率が低かった. ま た,成功率が0%でも100%でもない場合では,同 条件で生成したマルチタッチ入力でも成功した試行 と失敗した試行があることを意味し、その原因とし て,電極シートがタッチパネルから浮いてしまった ことが考えられる. 生成に使用するすべての電極が タッチパネルに正しく接触している必要があるため, 使用する電極の数が多いほど成功率が低くなると考 えられる.

5.2 移動量,拡大量,縮小量,回転量

5.2.1 評価環境

スクロール,ピンチイン,ピンチアウト,回転のように,動きをともなうマルチタッチ入力は意図した量だけ移動や拡大・縮小,回転できるか,またはその量が安定しているかも重要な指標である.そこで,切替時間を変化させて,スクロールの移動量,ピンチアウトの拡大量,ピンチインの縮小量,回転の回転量を計測した.

スクロールの移動量について、5.1.2 節の結果より、切替時間 10 ms 以下ではスクロールの成功率が低いため、切替時間を 15 ms から 100 ms まで 5 ms 刻みで変化させて各 100 回生成した。また、1 回のスクロールの最後に接地している電極(図 3 の (3) の状態)の切替時間が短いとフリックのような挙動を示すことを事前に確認していたため、切替時間 50 ms と 20 ms について、1 回のスクロールの最後に接地

する電極のみ接地時間を 100ms とする場合の計測 も行い,合計 2,000 回生成した.

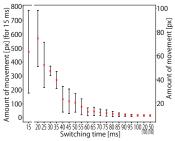
ピンチアウト、ピンチイン、回転について、スク ロールと同様に切替時間 15ms から 100ms まで 5ms 刻みで変化させて各 100 回生成し,切替時間 50ms と 20ms については、最後に接地する電極のみ接地 時間を 100ms とする場合の計測も行い, 合計 2.000 回生成した. 次のマルチタッチ入力とのインターバ ルは 500ms に設定した. 移動量, 拡大量, 縮小量, 回転量を取得するプログラムは javascript で実装し, Google Chrome 上で動作させて、筆者らの目視に よる確認で正しくマルチタッチ入力が生成された場 合のみ数値を記録した. 移動量はページが移動した ピクセル数を記録し、拡大量と縮小量は Chrome で ズーム率を確認し、マルチタッチ入力前後のズーム 率の差 [%] を記録し、回転量は回転開始時の 2 点タッ チを結ぶ線分と回転終了時の2点タッチを結ぶ線分 が作る内角の角度を度数で記録した.

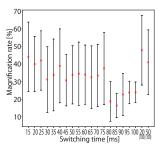
5.2.2 結果と考察

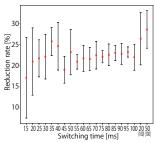
スクロールの移動量を図 10 に,ピンチアウトの 拡大量を図11に、ピンチインの縮小量を図12に、 回転の回転量の結果を図13に示す. いずれの図も 赤丸が平均値, エラーバーが標準偏差である. スク ロールは、切替時間 55ms 以下で移動量が極端に大 きくなった.切替時間が短いほど移動量が大きくな り,特に切替時間 15ms では移動量の平均は 473px となった. これは、最後に接地した電極の接地時間 が短く, フリックと認識されたためである. また, 切 替時間 60ms 以上では移動量は小さく, 90ms 以上で は移動量のばらつきも小さい. 最後の電極のみ接地 時間を 100ms とした結果, 切替時間 20ms と 50ms のいずれ場合でも移動量のばらつきが小さくなった. スクロールの移動量は最後に接地する電極の接地時 間に依存すると考えられる. 拡大量,縮小量,回転 量の平均値は切替時間に依存せず、ばらつきも大き かった. これは、試行によってタッチパネルに接地し た電極の位置が電極の中心や電極の端にずれて量が 安定しなかったためであると考えられる. また, 最 後の電極の接地時間を長くしても量に変化はなかっ た. しかしながら、拡大、縮小、回転はマルチタッ チ入力を行いながら適切な時点でマルチタッチ入力 を止める使い方が一般的であり、1回のマルチタッ チ入力で指定した量だけ変化する必要は必須ではな いと考えている. 200%に拡大したい場合や90度回 転したい場合は GUI から指定すればよい.一方で. スクロールは1回で画面上端まで移動することも求 められるため、移動量の安定性は重要である.

5.3 マルチタッチ入力のインターバル

マルチタッチ入力のインターバルの長さは連続でマルチタッチ入力を生成する場合の総時間に影響す







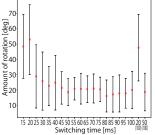


図 **10.** スクロールの移動量の 計測結果

図 **11.** ピンチアウトの 拡大率の計測結果

図 **12.** ピンチインの縮 小率の計測結果

図 13. 回転の回転量の 計測結果

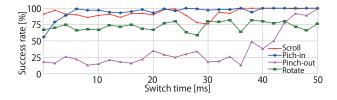


図 14. インターバルを変化させたときのマルチタッチ 入力生成の成功率

る. スクロール,ピンチイン,ピンチアウト,回転の4つのマルチタッチ入力について,切替時間を50msに固定し,インターバルを0msから25msまで1ms刻みで変化させ,各100回(合計2,600回)生成し,成功率を計測した.結果を図14に示す。スクロールはインターバル18ms以上で成功率はほぼ100%,0msでも91%となった。ピンチインは3ms以上で成功率は90%以上だが、0msで56%となった。ピンチアウトは25msで成功率は99%、0msで18%となった。回転はインターバルが長くても成功率は上昇せず、全体を通して成功率は60%~80%であった。いずれのマルチタッチ入力もインターバル0msで正しく生成された。特に、スクロールの成功率は0msでも91%であるので、高速スクロールが実現できる。

6 応用案

ピンチイン,ピンチアウト,回転などの入力やそれらを組み合わせた入力を可能とするスタイラスペンを実現できる.例えば,スタイラスペンを持ったまま画面内のオブジェクトを回転するには,ペンを持ち直す必要があるが,提案デバイスではスタイラスペンを使いながらタッチ入力できる.

指によるタッチ入力をタッチパネルのソフトウェアで読み取り、提案デバイスにそのタッチ入力を再現できる. 提案デバイスは静電容量方式のタッチパネルであれば利用可能であり、タッチ入力を別の端末にコピーできる. また、提案デバイスを複数用意すれば、複数のタッチパネルで同一のタッチ入力を同時に生成できため、ひとつのタッチパネルで複数のタッチパネルを操作できる.

7 おわりに

本研究では、印刷可能な回路とワンボードマイコンを用いて多様なマルチタッチ入力を生成するデバイスを構築した。シングルタッチは25回/秒の速度で100%、スクロールは最大97%、プレスアンドタッチ、ピンチイン、ピンチアウトは最大100%、回転は最大97%の成功率で生成できた。スクロールをインターバル0msで高速連続生成できることも確認した。また、スクロールの移動量、ピンチアウトの拡大量、ピンチインの縮小量、回転の回転量を測定し、拡大量、縮小量、回転量にはばらつきがあったが、移動量は約9.1pxで安定した。

参考文献

- [1] J. Rekimoto. SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces. In *CHI 2002*, pp. 113–120, 2002.
- [2] Jeeeun Kim, Mike Kasper, Tom Yeh, and Nikolaus Correll. SikuliBot: Automating Physical Interface Using Images. In UIST 2014, pp. 53–54, 2014.
- [3] K. Ikeda and K. Tsukada. CapacitiveMarker: Novel Interaction Method Using Visual Marker Integrated with Conductive Pattern. In AH 2015, pp. 225–226, 2015.
- [4] K. Kato and H. Miyashita. ExtensionSticker: A Proposal for A Striped Pattern Sticker to Extend Touch Interfaces and its Assessment. In CHI 2015, pp. 1851–1854, 2015.
- [5] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Hirotaka Osawa, and Michita Imai. FlashTouch: Data Communication through Touchscreens. In CHI 2013, pp. 2321– 2324, 2013.
- [6] N. Yu, S. Tsai, I. Hsiao, D. Tsai, M. Lee, M. Y.Chen, and Y. Hung. Clip-on Gadgets: Expanding Multi-touch Interaction Area with Unpowered Tactile Controls. In *UIST 2011*, pp. 367–372, 2011.
- [7] S. Voelker, K. Nakajima, C. Thoresen, Y. Itoh, K. Ivar Øvergård, and J. Borchers. PUCs: Detecting Transparent, Passive Untouched Capacitive Widgets on Unmodified Multi-touch Displays. In ITS 2013, pp. 101–104, 2013.