

粘着を用いたタッチサーフェスのための 粘着性変化モジュールの開発

石原 好貴*¹ 伊藤 雄一*¹ 尾上 孝雄*¹

A Research on Adhesion Changeable Surface

Yoshitaka Ishihara*¹, Yuichi Itoh*¹ and Takao Onoye*¹

Abstract – In this research, we propose an adhesion changeable touch surface with an adhesive sheet whose adhesiveness varies depending on the temperature. By arranging a plurality of peltier elements on the back side of the adhesive sheet and locally controlling the surface temperature, it is possible to realize a touch surface in which the adhesive force is unevenly distributed. This makes it possible to present information such as irregularities, texture, and temperature of an object that can not be presented by the glass-based touch surface. In this paper, we explain about details of the surface adhesion change module which changes the adhesive force of the surface. Then, we describe about the specification of the implemented module by showing the relationship between the surface temperature and the adhesive force which can be perceived by participants.

Keywords : touch surface, adhesion, temperature control

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレットなどのタッチサーフェスを搭載したデバイスが広く普及している。これらのタッチサーフェスは指による直感的な操作が可能であるが、これらの多くは表面がガラス平面で構成され、情報空間と現実空間が二次元平面で隔絶されているため、物体に実際に触れている感覚を提示できない。これを解決するために、ディスプレイ表面の形状変化や温度変化を用いて触覚情報を提示するディスプレイの研究がなされている。形状変化により情報を提示するディスプレイとしてアクチュエータを上下に動作させて三次元形状を制御する手法が提案されている [1–3]。スクリーンとプロジェクタを用いて映像の投影も行うため、ユーザは提示された情報との視覚と触覚による直感的なインタラクションが可能となる。また、押す、引くなどの入力を検知してフィードバックを与えることも可能である。温度変化を用いたディスプレイとしては Kushiyama らの提案する “Thermo-Paradox” がある [4]。Thermo-Paradox は温度制御を備えたスクリーンに映像を投影することで、視覚情報に冷たさや温かさなどの温度情報を重畳することができるディスプレイである。手のひらに局所的に温度の高低パターンを提示することで、ユーザに温度錯覚を引き起こし、表示している物体の湿り具合や隆起、へこみなどを表現することもできる。本研究では、温度によって粘着力が変化するシートを利用し、温度を制御することに

よって、ユーザに粘着力を利用した触覚情報を提示するタッチサーフェスを実装する。

2. 粘着性変化モジュール

2.1 システム概要

提案するシステムの概要について述べる。提案システムでは粘着性変化モジュールを複数組み合わせることで個別に制御することでタッチサーフェスを実現する。PC上で粘着力を発生させたい位置を指定し、指定箇所の粘着性変化モジュールを制御することで粘着力を発生させて情報を提示する。粘着性変化モジュールは図1に示すように、粘着性シート、粘着性シートを固定する板、温度制御のための素子およびその制御回路により構成される。本研究では粘着性シートとして、感温性粘着シートであるインテリマーテープ (ニッタ株式会社)¹を用いる。感温性粘着シートは温度変化により粘着、非粘着を繰り返す機能性粘着テープである。ペルチェ素子により粘着性シートの温度を変化させることで粘着性を制御する。サーミスタはペルチェ素子の上部に配置することでリアルタイムにシートの温度を取得する。また、ペルチェ素子の下部には放熱のためにヒートシンクと DC ファンを配置する。

2.2 粘着性シート

本研究で使用する感温性粘着シートには、あらかじめ設定されたスイッチング温度があり、スイッチング温度付近で粘着力が急激に変化する。温感粘着性シートは、スイッチング温度より低い温度において粘着力が消失するクールオフタイプ、スイッチングより高い

*1: 大阪大学大学院 情報科学研究科

*1: Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1: 感温性粘着シートインテリマーテープ
<https://www.nitta.co.jp/product/intelimer/>

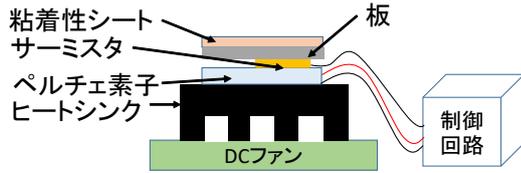


図1 モジュール構成
 Fig. 1 Module configuration.

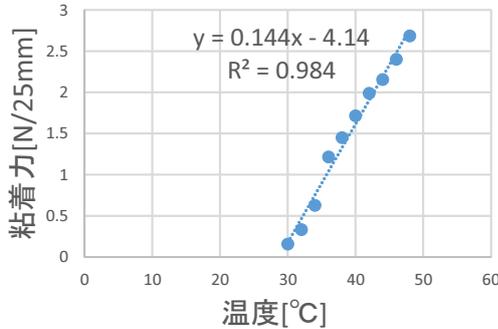


図2 粘着力の温度特性
 Fig. 2 Temperature characteristic of adhesion.

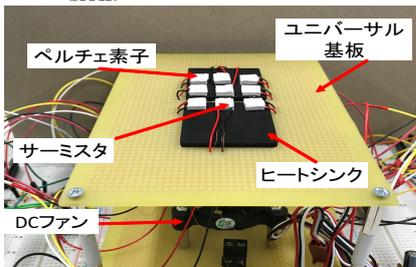


図3 タッチサーフェスのプロトタイプ
 Fig. 3 A Prototype of a Touch Surface.

温度において粘着力が消失するウォームオフタイプの2種類が存在する。本研究では、ユーザに痛みなどの不快感を与えない範囲の温度で粘着力の変化を提示できるように、スイッチング温度が40℃であるクールオフタイプのシート (CS4525Y02) を使用する [5]。予備実験により得られた粘着性シートの粘着力の温度特性曲線を図2に示す。図2より、この粘着性シートの粘着力は30℃から48℃の区間において最大で2.69[N/25mm]となり、また式(1)のように粘着力の回帰式が得られた。

$$y = 0.144x - 4.41 \quad (R^2 = 0.984) \quad (1)$$

x , y , R^2 はそれぞれ粘着性シートの温度 [°C], 粘着力 [N/25mm], 決定係数を表す。

2.3 プロトタイプ実装

図3に本研究で実装したタッチサーフェスのプロトタイプを示す。本研究では2.1節で述べた粘着性変化モジュールを9個使用して3×3ピクセルのタッチサーフェスを実装した。小型化のためモジュール間でヒートシンクとDCファンを共有し、それぞれ1個ずつ用いた。モジュールはそれぞれ独立した制御回路によ

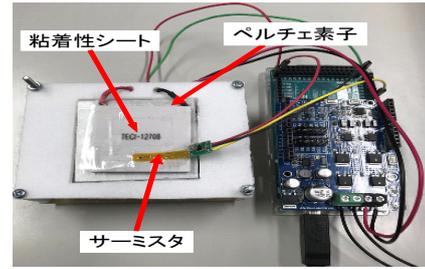


図4 実験装置
 Fig. 4 An overview of experimental apparatus.

て制御する。デバイスに指で触れることを想定して、ペルチェ素子は人差し指の大きさ程度の8.3×8.3mmのサイズのものを使用する [6]。ペルチェ素子の上部にサーミスタを配置し放熱用シリコンを用いてペルチェ素子とサーミスタ (56A1002-C3) を固定する。粘着性シートを固定する板は比熱と熱伝導率が大きな物質としてステンレスを用いた。ペルチェ素子はモータドライバ (TA7291P) を用いて駆動する。サーミスタのノイズ低減のためにオペアンプ (LM358) を用いてボルテージフォロワ回路を実装した。制御回路はArduino Megaに接続し、温度はPID制御によって制御した。予備実験により温度を1℃の精度で、10℃から65℃まで制御できることを確認した。

3. 知覚可能な粘着力の閾値

本章では人が知覚できる粘着力の閾値を求める実験を行う。実験装置を図4に示す。実験には40×40mmのペルチェ素子を用い、その上部に粘着性シートを配置する。PID制御によりペルチェ素子の温度を制御し、ペルチェ素子の温度と人による粘着力の知覚の関係を上下法により計測する。粘着性シートを触る位置は指一本程度の場所に制限して実験する。また、人の指先の状態は一樣ではなく特に乾燥の状態によって粘着力の知覚に差が発生する可能性が考えられる。そこで本実験では人の指の状態として乾燥状態、通常状態、湿潤状態の3パターンを考慮し、それぞれの状態で実験を行った。通常状態は平常時の指の状態を指す。乾燥状態は指を乾燥タオルで拭くことで、湿潤状態は指を濡らしたタオルに触れさせることで作る。

3.1 実験手順

実験手順を以下に示す。

1. シート表面の温度を25℃に保ち実験参加者に提示する。
2. 実験参加者が粘着力を感じなければ温度を1℃上げ、粘着力を感じれば温度を1℃下げて実験参加者に再度シートを提示する。
3. 2を繰り返し、温度の増減方向が5回変化したときに実験を終了し、5回の平均温度を閾値とする。1から3の手順を各状態で行った。実験参加者は10名

表1 粘着力知覚の閾値
Table 1 Threshold of adhesion perception.

	乾燥状態 [°C]	通常状態 [°C]	湿潤状態 [°C]
閾値	35.7	35.9	35.3

表2 ウィルコクソンの検定統計量
Table 2 Test static of wilcoxon.

通常状態と乾燥状態	109.5
通常状態と湿潤状態	126.5
乾燥状態と湿潤状態	117

(男性 9 名, 女性 1 名) の大学生または大学院生 (平均年齢は 23.0±1.1 歳) である。

3.2 結果

実験から得られた 10 名の実験参加者の閾値の中央値を各状態での閾値として求めた。得られた閾値を表 1 に示す。次に、各状態の閾値に有意差があるかウィルコクソンの順位和検定を行った。検定統計量 W を表 2 に示す。ウィルコクソンの検定統計数表より、検定統計量 W が $78 \leq W \leq 132$ であれば仮説は棄却されない。よって、すべての組み合わせで仮説は棄却されず、各状態の中央値に有意差はないことが分かった。これより、本実験では指の状態により閾値が変化することを想定し 3 パターンでの閾値を求めたが、状態によらず閾値は同じ値になると考えられる。よって、最も一般的な状態である通常状態での値 35.9 °C を知覚可能な粘着力となるときの温度とする。2.2 節で求めた回帰式 (1) により、閾値 35.9 °C での粘着力は 1.03[N/25mm] であった。

4. 提示可能な粘着力の段階数

本章では粘着性変化モジュールの性能評価として、モジュールが提示できる粘着力の段階数について評価する。本実験では一対比較法を用いて提示可能な粘着力を検討する。評価方法により複数の種類があるが、本実験ではシェッフエの方法の変法である中屋の変法を用いて実験を行う [7]。実験装置は実験 1 で用いたものを拡張してペルチェ素子 2 個を左右に並べて制御する。

4.1 実験手順

以下に実験手順を述べる。

- 30 °C から 46 °C まで 2 °C 刻みの 9 段階の温度からランダムに 2 つの温度を選択する。そして選択した温度になるようペルチェ素子を同時に制御し、実験参加者に提示する。
- 実験参加者は、提示された 2 つの粘着力の大きさについて表 3 のように 5 段階でスコアをつける。表 3 において、L, R はそれぞれ左と右の粘着性シートにおける粘着力の大きさを表し、 L_T , R_T はそのときの粘着性シートの温度を表す。1 人の実験者につき、 ${}_9C_2 = 36$ 通りの組み合わせについて実験を行い、

表3 スコアの付け方
Table 3 A manner of scoring.

条件	L_T	R_T
$L \ll R$	-2 点	2 点
$L < R$	2 点	1 点
$L = R$	0 点	0 点
$L > R$	1 点	-1 点
$L \gg R$	2 点	-2 点

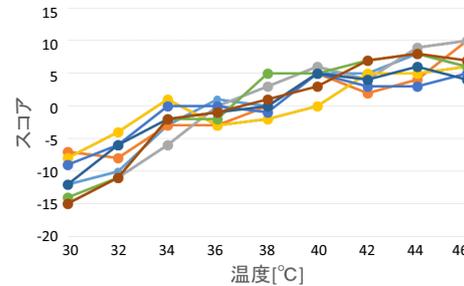


図5 粘着力のスコア
Fig. 5 Adhesion score.

表4 温度間の推定値の差
Table 4 Difference in estimated value between temperatures.

温度 [°C]	30-32	32-34	34-36	36-38
推定値の差	0.347	0.694	0.111	0.208
温度 [°C]	38-40	40-42	42-44	44-46
推定値の差	0.389	0.042	0.194	0.042

表5 粘着力の分散分析表
Table 5 Analysis of variance table of adhesion.

要因	平方和	自由度	不偏分散	F 値	p 値
主効果	297.24	8	37.154	71.69	4.3E-54
主効果×個人	35.54	56	0.635	1.22	0.16
組み合わせ効果	17.64	28	0.630	1.22	0.22
誤差	101.58	196	0.518		
総平方和	452	288			

提示する順番は実験参加者ごとにランダムとした。実験参加者は 8 名 (男性 7 名, 女性 1 名) の大学生または大学院生 (平均年齢 22.9±1.2 歳) であった。本実験で求めた各温度のスコアを評点とし、評点をもとに分散分析および多重比較を行い、粘着性変化モジュールが提示可能な粘着力の段階数を求める。

4.2 結果

実験により得られた実験参加者ごとの粘着力主観評価のスコアの合計を図 5 に示す。図 5 より得られる推定値から推定値の差を求め、分散分析を行った。推定値の差および分散分析表を表 4, 表 5 に示す。得られたスコアから分散分析を行うと主効果にのみ有意差を確認した ($F_{196}^8 = 71.69$, $p < .05$)。よって 9 段階の粘着力の間に有意差があることが分かった。次に多重比較を行い有意差がある区間を調べた。式 (2) により比較に用いるヤードスティック Y_ϕ を計算する。

$$Y_\phi = q_\phi \sqrt{\frac{\sigma^2}{tN}} \quad (2)$$

ただし、 q_ϕ はスチューデント化された範囲 $q_\phi(t, f)$, t

は評価対象数, f は分散分析表での誤差の自由度, σ^2 は分散分析表での誤差の不偏分散, N は実験参加者数を表す. 本実験では $q_\phi = 4.39$, $t = 9$, $f = 196$, $\sigma^2 = 0.518$, $N = 8$ より, 式 (3) の結果が得られる.

$$Y_{0.05} = 4.39 \sqrt{\frac{0.518}{9 \cdot 8}} = 0.3725 \quad (3)$$

各粘着力間の推定値の差がヤードスティックより大きいかを調べることで各粘着力間の差が有意であるかを調べられる. 表 4 より 32℃と 34℃の間, 38℃と 40℃の間の推定値の差がヤードスティックより大きくなっている. よって 32℃と 34℃, 38℃と 40℃の粘着力の主観評価結果に有意差が見られることが分かった.

5. 考察

5.1 実験結果の考察

まず, 人が知覚可能な粘着力について考察する. 4.2 節より, 人の指の状態は複数のパターンが考えられるため, 閾値を求める実験として乾燥状態, 通常状態, 湿潤状態の 3 パターンで実験を行った. そして得られた閾値からウィルコクソンの順位和検定を行ったところ有意差は確認できなかった. これより指が乾燥状態や湿潤状態であるときの粘着力への影響は無視できるほど小さいと考えられる. 人が知覚可能な粘着力の閾値は通常状態のとき 1.03[N/25mm] であった. よって 1.03[N/25mm] 以上の粘着力を提示すると人は粘着力を知覚できると考えられ, また本研究で用いる粘着性テープでは 35.9℃に設定することで閾値の粘着力を表現することができると分かった. 次に粘着力の識別結果に関して考察する. 識別可能な粘着力は 30℃~32℃, 34℃~38℃, 40℃~46℃の 3 段階であった. これらの範囲は図 5 より 30℃~32℃では粘着力がほとんど知覚されておらず, また 40℃~46℃は明らかに粘着力が知覚されていると考えられる. これよりその間の範囲である 34℃~38℃を境界に粘着力が知覚されていると考えられる. ここで, 3.2 節で得られた結果より人の粘着力知覚の閾値である温度は 35.9℃であり, この値は実験参加者の閾値の中央値であった. このことを考慮すると, 34℃~38℃の温度範囲は粘着力知覚の閾値の中央値を含んでいることが分かり, この範囲は実験参加者ごとの粘着力が知覚される温度のばらつきを示していると考えられる. また, この実験により粘着力の知覚は複数段階で行え, 提示手法を検討することでより多段階の粘着力を提示できる可能性が示された.

5.2 今後の展望

本稿では, 人が知覚できる粘着力の閾値および実装したモジュールが提示可能な粘着力の段階数を求めた. しかし, 本実験で提案するタッチサーフェスは温度に

より粘着力を制御するため, 粘着力の知覚に温冷感が影響していると考えられる. そのため今後の課題としては, 追加の実験を行い粘着力と温冷感の相互作用について検討することが挙げられる. また提案システムは粘着力によって実物体を付着させ, その固定・解放を制御することで文字や絵などの情報を提示するディスプレイとしても使用できると考えられる. このような粘着力による実物体の制御に関しても検討していく.

6. 結論

本稿では, 温度により粘着力が変化する粘着性シートを制御し情報を提示するモジュールの提案と実装を行った. 評価実験を行い, 人が知覚できる粘着力の閾値を上下法によって測定したところ, 1.03[N/25mm] であることが分かった. その粘着力を再現する粘着性シートの温度は 35.9℃であり, モジュールの表面温度を 35.9℃以上に設定することで, 粘着力による情報提示が可能であることが分かった. 次に 30℃から 46℃まで 2℃刻みの 9 段階の温度に設定したシートを実験参加者にランダムに提示し, 一対比較法を用いて粘着力の識別能力に関する評価を行った. その結果, 粘着力に関して 3 段階の粘着力の識別が可能であることが分かった.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP16H02891 の助成を受けたものである.

参考文献

- [1] H. Iwata, et al., "Project FEELEX: Adding haptic surface to graphics," *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 469-476, 2001.
- [2] D. Leithinger and H. Ishii, "Relief: a scalable actuated shape display," *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 221-222, 2010.
- [3] S. Follmer, et al., "inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation," *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 417-426, 2013.
- [4] K. Kushiyama, et al., "Thermal design display device to use the thermal tactile illusions: "thermoparadox", " *ACM SIGGRAPH 2010 Posters*, p. 99:1, 2010.
- [5] G.L. Wasner and J.A. Brock, "Determinants of thermal pain thresholds in normal subjects," *Clinical Neurophysiology*, Vol.119, No.10, pp. 2389-2395, 2008.
- [6] AIST 日本の手の寸法データ
<https://www.dh.aist.go.jp/database/hand/data/list.html> Last Access: Feb. 4, 2018.
- [7] 日科技連官能検査委員会, "官能検査ハンドブック," pp. 379-385, 1973.