タッチパネル入力機器のための
クリック感を有する透明スイッチ機構*新井 史人^{*1}, 岩田 直也^{*2}, 福田 敏男^{*1}Transparent Switch Structure Having A Feeling of Click
for Touch-Screen InterfaceFumihito ARAI^{*3}, Naoya IWATA and Toshio FUKUDA^{*3} Department of Micro-Nano Systems Engineering, Nagoya University,
1 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

We developed a transparent tactile device on touch screen interface, which provides actual keystroke and feeling of click without preventing the functions of the interface. We designed and fabricated transparent switch structure using silicone elastomer with transparency of over 88%. In this case, high visibility was realized by filling the interspaces with the sealing liquid that has near reflective index as silicone. A feeling of click is yielded by buckling phenomenon of the structure and mechanical property is measured quantitatively by comparing its keystroke and reaction force on the key top. Our device structure is flat and thin, so that it can fit on the ordinal touch screen interface easily as one of the human machine interface functions.

Key Words: Human Machine Interface, Tactile Feeling, Touch-Screen Interface, Switch

1. 緒 言

現在, 我々の身の回りにはインターネットに接続可能な情報端末が様々な形態で存在してきている。これは一人の人間が多くのコンピュータを使いこなす, 「いつでも・どこでも」コンピュータを利用できるコンピュータの第三世代, いわゆる「ユビキタス社会」^①が実現しつつあるという事実である。

しかしながら, 現在使われているコンピュータとのインタフェースとしては, マウスやキーボードによるものが主流である。これらのインタフェースは元々人間一人がコンピュータ一台と対面し, 効率よく作業することを目的として設計されてきた。しかしながら, ユビキタス社会においては, 人間がコンピュータの作業に没頭する状況ばかりであるとは考えにくい。例えば, 歩きながら情報検索したり, 運転中に様々な情報処理を行ったりする必要もあるだろう。このような状況においてこれまでのインタフェースが必ずしも有用とは言えない。より携帯性に優れ, 無意識的にコンピュータを操作でき, 様々な情報を容易に操作できるような自由度を持つインタフェースが必要とされるだろう。コンピュータと人

間との関わり方の変化に伴いインタフェースの重要性が注目されている^{②③}。

現在街中などでよく見かけられる入力手段としてタッチパネルが挙げられる。銀行のキャッシュディスプレイや駅の券売機などに広く用いられている。タッチパネル式のインタフェースは一般社会において利用されていることから, その自由度の高さやコンピュータ操作を意識させない操作性が注目されている。導入分野がさらに広まると共に技術開発も進み, タッチパネル市場はさらに拡大されていくと考えられている。

しかしながら, タッチパネルの大きな問題点は, 押しボタンのようなクリック感が無いことである。触感知(ハプティック特性^{④⑤})は物体を操作する際に生じる触覚の刺激を意味するが, 画面上の仮想的なスイッチを操作するタッチパネルではそのハプティック特性に劣ると言われている。タッチパネルに触覚を与えようとする研究は過去にも行われてきた^⑥。特に最近ではSMKコーポレーション^⑦がピエゾ素子を用いてクリック感のような擬似振動を提示するタッチパネルを発表した。ピエゾによる振動は入力と同時に電氣的に制御されるが, 実際に押し込む際の力・変位特性を与えているものではない。

* 原稿受付 2004年10月20日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(〒464-8603 名古屋市中種区不老町)。^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: arai@mein.nagoya-u.ac.jp

本研究ではタッチパネルにおけるクリック感の有用性を考え、クリック感を与えることが可能な力-変位特性を備えた入力装置を設計・製作する。その上、画面上に設置することを考慮し、透明性・視認性に優れた機構を設計する。クリック感については擬似的な振動・音・映像によるものではなく、実際のスイッチ操作によるクリック感を提供することを目的とする。

2. 設計

2.1 基本コンセプト

一般的なゴムスイッチの形状はドーム型になっており、座屈現象を利用することでクリック感を生み出している(図1)。一般的にはキーボードや電卓のボタンの内部にはゴム製の、携帯電話のボタンの下部には金属製のドームが取り付けられている。ドーム形状によるクリック感はいくつかの点に発生する。まず、キートップから押し込み力が加えられると併にスカート部がたわみ始めて反力が増大する。その後座屈が起こり、押圧部に発生する反力は極大値をとった後減少を続ける。底面に接触後は、急激な反力上昇を示す。この過程を瞬時に行うことでクリック感を出す。

本研究では以下のような材料を用いて透明デバイスを構成する(図2)。透明なスイッチを構成するためにゴムスイッチを透明度の高いシリコンゴム(透明度 88 %以上)で構成する。しかしこれだけでは構造の凹凸や表面の粗さで視認性が良くない。そこで、構造部にシリコンゴムと同屈折率の封入液を満たすことで構造の表面上の凹凸による屈折を無くすることができる。本研究ではシリコンゴムを用いたことから、表1よりほぼ同屈折率の封入液としてグリセリンの利用が考えられる。これらの構造を一般的なタッチパネル上に配置することで触覚を再現できると考えている。また、スイッチの ON・OFFを確認するために、電極には透明電極 ITO(酸化インジウムスズ)を使用することも可能である。

Fig. 1 Dome structure

Table 1 Reflective index and viscosity of materials

Material	Reflective index	Viscosity (mPa·s)
Silicone	about 1.4	-
Air	1.000	-
Glycerin	1.409	106.9
Methanol	1.329	6.2
Ethanol	1.362	12.0
Acetone	1.359	3.2
Water	1.333	10.1

2.2 スイッチ機構と封入液の作用

スイッチ構造の断面を図2に示す。一般的なラバースイッチは構造のスカート部の肉厚と長さがクリック感に大きく関わってくる。今回は一般的なドーム形状の設計の比率と型製作のための3次元造形装置によって実現可能な精度を考慮し、設計を行った。

また、今回は透明化のために液体を用いるが、スイッチの ON・OFF の際に封入液による影響が生じないようにしたい。そこで、スイッチ上部が押される際には内部封入液が流路を流れ、抵抗が生じないように設計を行った。具体的にはダッシュポット(図3)をモデルとし流路部で生じる流体抵抗の影響を算出し、設計時に考慮する。ダッシュポットの粘性係数は式(1)を用いて表される⁹⁾。

$$c = 8\pi\mu l \frac{A^2}{a^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで A はピストン断面積、 a は流孔面積、 l は流孔長さ、 μ は封入液の粘度(表1参照)である。本研究での c の値は $a = 1.0 \times 0.3 \text{ mm}^2$ を設計値とした場合 $1297 \text{ N/m}\cdot\text{s}$ である。また流路部における流体の流れ抵抗は式(2)より得られる。

$$F = c(dx/dt) \quad \dots\dots\dots(2)$$

スイッチを押す動作を 0.1 秒以下と考えると、ストローク量 $S = 1.5 \text{ mm}$ であることより流れ抵抗は 0.02 N となる。キーボードなどのスイッチが約 0.8 N の力で押されていることを考えれば充分小さな値となっており、触感の評価に影響しないと考えられる。

Fig. 2 Concept of the device

Fig. 3 Dashpot model

実験的にダッシュポットモデルを製作し、流れ抵抗を測定した。 $A = 30 \text{ mm}^2$ 、 $a = 0.2 \text{ mm}^2$ のシリンドラおよび封入液として $\mu = 106.9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ のグリセリンを用意したところ流れ抵抗値が 0.07 N となった。式(1),(2)より得られるべき算出値は 0.16 N である。誤差はあるものの実際の設計値 $a = 1.0 \times 0.3 \text{ mm}^2$ においても 0.02 N 以下の十分小さい抵抗になると考えられるため触感への影響を無視することができる。

図4はスイッチ構造1つ分（以下、スイッチ要素と呼ぶ）の設計図である。ディスプレイの面上で使用するためにこれらのスイッチ要素を複数敷き詰める。円形状を六角形状にすることで蜂の巣状に配置することができ、隙間なく設置することが可能である。面を敷き詰めるのであれば四角形状も考えられるが、ドーム型スイッチ形状に理想的な円形とは形状が大きく異なることで、特に角部において意図しないような座屈変形を起こしたり応力集中がおこる可能性が考えられる。また、面の中で一点に集まる頂点の数が多くなることで、場所ごとでの触感（スイッチ要素の中心部と頂点が集まる部分等）が大きく異なってくることが考えられる。以上より本論文ではスイッチ要素形状として六角形状を選択した。

Fig. 4 Modeling of the switch element

2. 3 電極の設置方法

スイッチの機能の確認を行うのは電氣的にキートップと底面の接触を認識する必要がある。これには

- (1) スイッチ構造内部に電極を設置する方法
- (2) スイッチ構造と電極を別に設置する方法

が考えられる（図5）。手法（1）では構造に直接電極となるITOを製膜する必要があるが、機構は薄く造ることが可能となる。スイッチ構造下面と透明基板上に電極を配置すればよい。一方、手法（2）ではスイッチ構造部に電極部の作りこみが不要で、スイッチ構造を既存のタッチパネルに設置するだけで済むという利点が考えられる。

手法（1）を実現するため透明電極ITOをスパッタリング法を用いて成膜する実験をした。構造に用いるものと同じシリコンゴム上に製膜し、ITOのシート抵抗を測定した結果、 $185 \text{ k}\Omega/\text{square}$ であった。ITO電極は $10^2 \Omega/\text{square}$ の抵抗値を得ることができるといわれている。ポリマー上にITOを形成したため、その変形によりミクロのひび割れが起こることが走査型電子顕微鏡(SEM)で確認された。抵抗値低減の課題はあるが、スイッチのON・OFFは十分確認できた。このため、基板上に透明電極によるスイッチパターンを形成しておけば、スイッチ特性を実現することが可能である。

3. 製作

CADを用いて設計したモデルを実物化するためには3次元造形装置が必要である。光造形装置などの利用も考えられるが、材料の選択肢が限られることなどから本研究ではインクジェット式積層造形装置を使用した⁹⁾。これはワックス材を層状に重ね3次元成形する装置である。層を最も薄くすると $50 \mu\text{m}$ の厚みの層で成形することが可能である。ワックス材の脆性があるので下記の手順(i)～(vi)を用いて型およびモデルの製作を行った（図6）。型を製作することで同形状であれば複数のモデルを大量に製作することができ、時間的・経済的に大きな利点があると言える。

Fig. 5 Attachment of the electrodes
(left: method 1, right: method 2)

Fig. 6 Fabrication process flow: (a) 3D wax model (b) female mold fabrication (c) hydrophilic surface treatment (d) pouring of silicone elastomer (e) ITO electrode sputtering

- (i) CAD ソフトにてモデルを設計する。(図4のスイッチ要素を面上に配置する。)
- (ii) インクジェット式積層造形装置を用いてモデルの表裏両面の形状をそれぞれ作製する。
- (iii) ワックス型をシリコンゴム材料に転写し、凸型を製作する。
- (iv) 材料と型の剥離性をよくするため、型表面を酸素プラズマにより親水化処理しておく。
- (v) 型にシリコンゴムを流し、成形する。
- (vi) スパッタリング法により ITO 電極をモデル下面に蒸着させる。

上記の方法で製作したモデルが図7である。縦70 mm 横70 mm のサイズのシート形状に48個のスイッチ要素を配している。

4. 透明化の評価

空気中における視認性は図8-aに示すとおりである。ディスプレイ上で利用するために本研究では同屈折率の透明封入液を用意しスイッチ構造の隙間を埋めることで屈折率を一致させる方法を取った。使用した封入液はグリセリン(屈折率 1.41)で、構造部に使用したシリコンゴム(屈折率 1.40)に近いものにした(表1参照)。これによりスイッチ構造による視認性への影響は無くなった(図8-b)。

5. 力学的特性の評価

5.1 力学的特性の評価方法

クリック感を定量的に評価するためにその力学的特性を測定した¹⁰⁾。一般的なスイッチはキートップにかかる反力(F)とストローク量(S)とを比較した Force-Stroke curve (以下 F-S curve) をグラフ化することでスイッチ特性を評価する。F-S curve は非線形の曲線を描き、ピーク荷重(極大値)と底面接触荷重(極小値)の荷重差が大きいほど、良好なクリック感を得られる。汎用のキーボードでは0.2~0.4 N、携帯電話では約0.8 Nの荷重差がある。

今回は以下の方法を用いてキートップに働く反力とストローク量を計測した。変位計を用いて、ストローク 0.05 mm 間隔で反力を測定する。また、キートップの反力については、作用・反作用により同じ大きさの力が底面全体にかかることを考慮し、スイッチを電子秤の上に載せることで反力を測定した。

Fig. 7 Silicone structure model

Fig. 8 Visibility of the device
(a) In the air, (b) In the sealing liquid (glycerin)

5. 2 測定結果

図7に示すスイッチ機構においてストローク量と反力を測定した結果を図9に示す。スイッチ要素1つにおいては反力の極大値・極小値が確認でき、感覚としても違いを感じ取ることができた。

しかしながら、実際使用する際には透明化するための封入液と、その液体を封入させる表面力バーが必要となる。そこで、使用状態を実現するため、モデルにシリコンカバーを被せ、封入液を満たした状態で測定を行った。今回使用した2種類のカバーは0.35 mmと0.04 mmの2種類のシリコンゴム製のカバーである。グラフの結果よりカバーの厚みによって触感に違いが生じていることが確認できる。カバーが厚いと1つのスイッチ要素を押す際に周辺部の引き込みが同時に起こり座屈現象が一定に起こらないため、このような不完全なF-S curveになったのではないかと考えられる。今後は表面のカバーの影響も考慮しなくてはならない。

また、さらに高解像度を実現するためにスイッチ要素の面積を小さくしたものについても設計・製作を行った。半径を図4の1/2、面積を1/4にしたところ、指の大きさに対し押されるスイッチ要素の数が多くなることで座屈現象が一様に感じられず良好なクリック感とはいえなかった(図10 massed small switch elements)。また、ストローク量を1 mmにして設計したところ造形装置の造形精度により、肉厚部で十分な精度が得られなかった。

さらに、押す部分での触感の違いがないか実験を行った。タッチパネル上で自由に使用するためには場所の違いにより触感が異なるのは好ましくない。図7のモデルにおいて、スイッチ要素の中心部(point A)、スイッチ要素同士の接線上(point B)、スイッチ要素同士の頂点上(point C)において測定した結果を図11に示す。実験はスイッチモデルのみを評価している(封入液・カバーを含まない)。スイッチ要素を押すために直径15 mmの円柱を用意したが、これは人間の指のサイズに近いものとして採用した。結果は図11にあるとおりで場所による違いはほとんど感じられない。円柱の直径の方がスイッチ要素1つよりも大きいためいくつか同時に押されることで反力は大きくなっているが、クリック感については再現できていると言える。

6. 電極特性の評価

2. 3節で示した電極設置の手法について、構造内にITO電極を取り付ける手法では、現状ではITO

Fig.9 Force-Stroke curve (Effect of the top cover)

Fig.10 Force-Stroke curve (Miniaturized switch element)

Fig.11 Force-Stroke curve (Effect of the push points)

の成膜の状態や封入液によって接触不良になる恐れがある。一方構造部のみをタッチパネルに設置させる手法を用いれば、構造と封入液のみで使用することが可能である。本論文では市販のタッチパネル（株式会社タッチテック製 TPK-064）上において使用した（図 1 2）。上記タッチパネルは 1.0~1.2 N で接触が認識され、解像度も 6.4 インチモニターで 640×480 ドットの解像度があるため、分解能も 0.2 mm 程度でシリコンスイッチ構造に比べ充分小さい。構造部と電極部が別々になることで誤認識が考えられることから認識率を確認した。実験はシリコンスイッチ構造の 3ヶ所（point A,B,C は力学的特性実験と同じ）について、図 1 2 (a) に示す画面上の仮想ボタンの境界部を基準とし、ポイントを左右（図 1 3 Displacement = 0 mm, それより左側が仮想ボタン外、右側が仮想ボタン内）にずらして仮想ボタンが反応するか調べた。結果を図 1 3 に示す。

仮想ボタンの境界を境として、スイッチ入力が認識されている。特に構造上シリコンがディスプレイに接触している point B では、仮想ボタン内部のみで 100 % 反応している。一方、スイッチ要素中心部では仮想ボタン外も誤認識が見られたが、これは指の大きさやシリコンスイッチ上面の傾きにより、接触するキートップ下面がずれるためではないかと考えられる。しかしながら、どの場所でも誤差は 2 mm 以内に収められたといえる。分解能については、シリコンスイッチ形状に依存するため更なる改良が必要であるが、このスイッチ構造がタッチパネル上で利用可能であることが確認された。

Fig. 12 User experiment with the device on the screen

Fig. 13 Recognition rate of the button on touch-screen

7. 結 言

本研究ではタッチパネル上で実現する透明触覚デバイスの設計・製作を行った。スイッチ形状によりクリック感を生み出すことが F-S curve より定量的に確認でき、一般的なラバースイッチのような感触を得ることができた。また、透明シリコンゴムと屈折率を合わせた透明封入液を用いることでディスプレイ上で使用可能な透明度を実現することができた。

本実験で製作したスイッチ構造を市販のタッチパネル上でも使用する場合、ユーザーには各人それぞれの好みなどの問題があるため、主観的な評価も必要であると考えられる。また、スイッチ構造そのものや表面カバー・透明封入液等の耐久性・信頼性についても更なる考慮が必要である。

8. 謝 辞

本研究は一部、マイクロ・メカトロニクス共同研究（インテリジェント生活支援ネットワークシステムの研究開発）の支援を受けた。本プロジェクトの参加者の皆様に深く感謝いたします。

文 献

- (1) M. Weiser, "Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing" Association for Computing Machinery Communications of the ACM vol.36 Issue7, Jul 1993, pp74-83
- (2) W. Hurst, "User interfaces for telepresentations - Input devices, interaction concepts and design issues" Journal of Network and Computer Applications Vol.23 Issue1, Jan 2000, pp1-15
- (3) 田村 博, "ヒューマン インタフェース", オーム社, p4-5, 1998

- (4) G. Robles, V. Hayward, "Force can overcome object geometry in the perception of sharp through active touch" Nature, Vol.412, Jul 2001, pp445-448
 - (5) Mark O. Ernst, Martin S. Banks, "Human integrate visual and Haptic information in a statistically optimal fashion" Nature, Vol.415, Jan 2002, pp429-433
 - (6) 大岡昌博, "触覚ディスプレイ装置におけるアクチュエータ技術", 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.7, Oct 2003, pp758-761
 - (7) SMK Corporation, "Force Feedback Touch Panels", <http://www.smk.co.jp/>
 - (8) 機械工学便覧 B1 機械要素設計・トライボロジ, pp151, 1985
 - (9) 中川威雄, 丸谷洋二, "積層造形システム 三次元コピー技術の新展開", 工業調査会, 1996
 - (10) Harris, Richard Hunter: United State Patent, US4118611
-