情報処理学会論文誌 Vol.63 No.2 454–467 (Feb. 2022)

LightTouch：画面発光をタッチ入力に変換するタッチスクリーン用ガジェット

池松 香[1,a)] 加藤 邦拓[2,b)] 川原 圭博[3,c)]

受付日 2021年4月12日, 採録日 2021年11月2日

概要：本稿では，静電容量式タッチスクリーンのインタラクションを拡張するガジェットとしてLightTouchを提案する．LightTouchはフォトレジスタ（LDR）を組み込んだバッテリーレスの機構を有する．これをタッチスクリーンに取り付けることで画面輝度に応じてLDRの抵抗値が変化する．LDR受光部と対向する領域の画面輝度を制御することで，グラウンドとタッチスクリーンの間の経路を接続・切断し，タッチ入力を制御できる．本ガジェットは従来のタッチスクリーンの物理的な拡張インタフェースとは異なり，操作時に導電部上へ指を接触させ続ける必要はなく，かつ電池や外部電源も不要で動作する．本稿では，LightTouchの適用先について単純なタッチ入力の自動化にとどまらず，応用例の実装および議論を行い，デバイス間通信やタンジブルなインタフェースのトラッキング性の向上など，タッチスクリーン上での新たなインタラクションの模索・提案を行った．

キーワード：静電容量方式タッチスクリーン，タッチインタラクション，タンジブル，フォトレジスタ

LightTouch Gadgets: Extending Touchscreen Interactions by Converting Light Emission into Touch Inputs

Kaori Ikematsu[1,a)] Kunihiro Kato[2,b)] Yoshihiro Kawahara[3,c)]

Received: April 12, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: We present LightTouch, a battery-less 3D-printed gadget to enhance touch interactions on unmodified capacitive touchscreens. The LightTouch gadgets simulate finger operations such as tapping, swiping, and multi-touch gestures by means of conductive materials and light-dependent resistors (LDR) embedded in the object. The touchscreen emits visible light and the LDR senses the level of this light, which changes its resistance value. By controlling the screen brightness, it connects or disconnects the path between the ground and the touchscreen, thus allowing the touch inputs to be controlled. In contrast to conventional physical extensions for touchscreens, our technique requires neither continuous finger contact on the conductive part nor the use of batteries. Based on our previous report for the initial feasibility of the gadgets, we added the detailed implementation and further discussions. LightTouch technique opens up new possibilities for touchscreen interactions beyond the simple automation of touch inputs, such as establishing a communication channel between devices, enhancing the trackability of tangibles, and inter-application operations.

Keywords: capacitive touchscreen, touch interaction, tangible, light-dependent resistor

1. はじめに

近年，スマートフォンやスマートウォッチ，タブレットPCなどの静電容量方式のタッチスクリーンが広く普及し，タッチ入力は最も頻繁に利用される入力操作のひとつとなった．市販のタッチスクリーンは指によるタッチ入力の検出を目的として設計されているが，接地された導電体であれば指のタッチに限定せず，その接触を検出可能である．

[1] ヤフー株式会社
Yahoo Japan Corporation, Chiyoda, Tokyo 101–0062, Japan
[2] 東京工科大学
Tokyo University of Technology, Hachioji, Tokyo 192–0982, Japan
[3] 東京大学
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113–8656, Japan
[a)] k-ikematsu@acm.org
[b)] kkunihir@acm.org
[c)] kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

© 2022 Information Processing Society of Japan

これを利用して，導電性素材を組み込み，あるいは塗布した実物体のインタフェースを介する様々なタッチインタラクションが提案されている [2], [3], [5], [7], [19], [31], [33]．こうしたインタフェースは外部電源やバッテリを使用せずに動作するが，ユーザの人体を通じて導電部が接地されている間しかタッチ入力を発生させることができない．そのため，実現可能なインタラクションは限定され，また，その操作性は制限される可能性がある．例示すると，タッチスクリーン上に置いて使用するタンジブルなインタフェース [3] は，ユーザが導電部に触れている間はタッチ入力が発生し，指を離して非接地の状態になるとタッチ入力は消失する．タッチ入力が消失した際に，ユーザが指を離したのか，あるいはスクリーン上からインタフェースが持ち上げられたのかをアプリケーションが判別することは困難である．そのため，インタフェース使用時は終始導電部に触れ続ける必要がある [27], [28]．

一方で，アクティブな回路を組み込み，指の接触なく擬似的にタッチ入力を発生・制御するインタフェースが提案されている [1], [21], [27], [29], [32]．これらは，タッチインタラクションの拡張性を高めるものの，多数のインタフェースを扱う場合や長期にわたり使用する場合には，設定やメンテナンスに要するコストが増大する．

これらの課題に対し，指の接触不要かつバッテリーレスな機構でタッチ入力を発生させるガジェットとして LightTouch を提案する．LightTouch は 3D プリントされた筐体にフォトレジスタ（light-dependent resistor，以下 LDR）を内蔵した構造を有する（**図 1**）．これをタッチスクリーンに取り付けることで，LDR を介してタッチスクリーンとグラウンドを電気的に接続する（**図 2** (a)）．LDR は受光部に入射する光の強度により抵抗値が変化するため，ガジェット直下領域の画面輝度を制御することで，グラウンドとタッチスクリーン間の経路を接続または切断しタッチ入力を制御する．上述のアクティブな回路を使用したガジェットとは異なり，LightTouch はバッテリーレスで動作するため低コストで実装可能かつメンテナンスも容易である．

本稿ではまず，LightTouch の基本構造，実装およびデザインスペースについて紹介し，次いで LightTouch を制御するための諸条件の調査について報告する．そして，インタラクションシナリオを創出することを目的としたワークショップの実施内容について報告する．また，創出されたシナリオをもとに実装した応用例を紹介する．なお，本研究の一部は国際会議において発表済みであり，本稿は文献 [9], [10] に実装内容や応用例の詳細を追記した内容である．本稿の貢献を以下に要約する．

- LDR を用いて画面発光をタッチ入力へ変換するパッシブなガジェットを提案した．
- LightTouch の基本的な構造と特性を含めたデザインスペースを提示した．
- タッチ入力を適切に制御するための条件を調査した．
- ワークショップで創出されたインタラクションシナリオをベースとした応用例を実装した．

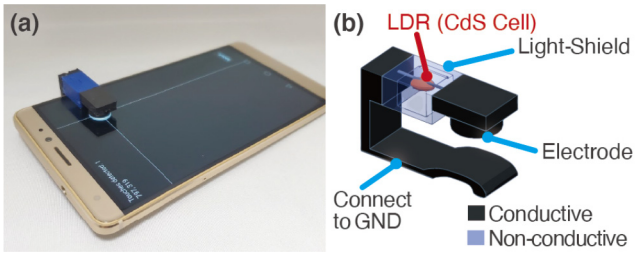

図 1 LightTouch の基本デザイン．LDR 直下領域のタッチスクリーン輝度が上昇することで，LDR の抵抗値が低下する．これにより導電部が接地され，電極直下でタッチ入力が発生する
Fig. 1 Basic design of LightTouch gadget.

2. 関連研究

2.1 タッチインタラクションの拡張

静電容量方式のタッチスクリーンやタッチパッドは，指の接触のみでなく，金属や導電性ゴムなどの導電性素材を通じたタッチ入力を検出可能である．タッチインタラクションを拡張することを目的とし，導電性素材を組み込んだパッシブなオブジェクトやガジェットが提案されている．例示すると，タッチサーフェスの上に置いて使用するタンジブル・ユーザ・インタフェース（TUI）[2], [3], [15], [26], [31], タッチサーフェス外への操作領域の拡張 [11], [14], [33]，カスタマイズ可能なタッチセンサ [22], [23]，複数デバイス間通信 [5], [19]，あるいはデバイスの認証システム [18] などへ活用されてきた．しかし，これらのインタフェースは操作中に導電部に指で触れ続ける必要があり，その操作性や実現可能なインタラクションが制限される可能性がある．たとえば，上述の TUI の一部 [3], [15], [31] は，ユーザが導電部に触れている間はタッチ入力が発生し，指を離して非接地の状態になるとタッチ入力は消失する．タッチ入力が消失した際に，ユーザが指を離したのか，あるいはスクリーン上からインタフェースが持ち上げられたのかをアプリケーションが判別することは困難である [27], [28]．さらに，非導電性の物体（爪など）の接触により TUI の位置が移動した場合には，その変位検出は困難であり，TUI の実際の位置とアプリケーションが認識する位置との間に差異が生じる可能性がある．これに対し，Voelker らは導電部に指が触れていない状態であってもタッチ入力を発生させることが可能な Passive Untouched Capacitive Widgets（PUCs）[28] を提案した．PUCs は 2 つ以上の電極が相互に接続されている構造の TUI である．この構造をタッチスクリーン上に置いた場合，一方の電極がスキャンされている間に他方の電極がタッチスクリーン内部の電極を通じて接地されるため，タッチ入力が発生する．しかし，市販のタッチスクリーンの多くは，タッチ位置もしくは流出電

© 2022 Information Processing Society of Japan

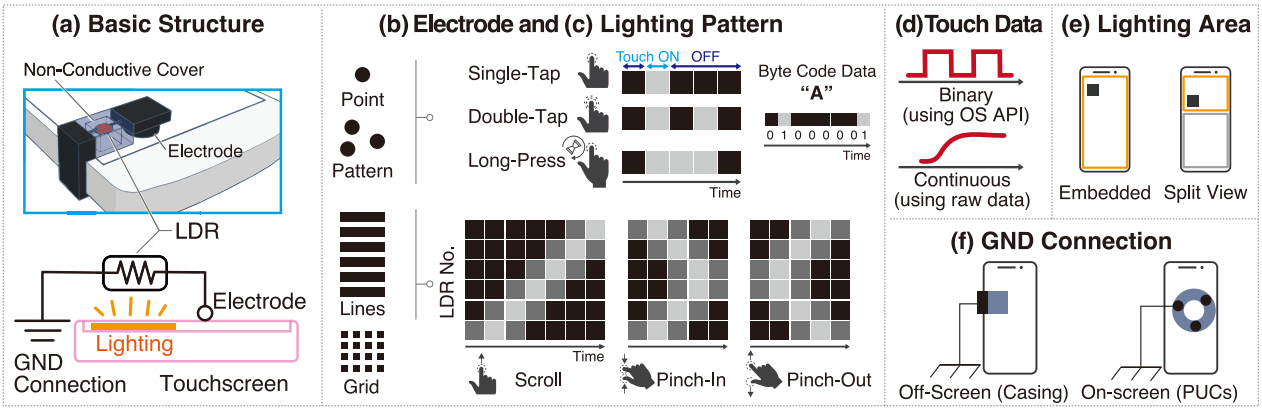

図 2 LightTouch のデザインスペース
Fig. 2 Design space of LightTouch gadget.

流量の変化しない信号を除外することで，周辺環境に適応するフィルタリングを内部的に行っている [8], [27], [28]．そのため，PUCs によるタッチ入力は時間経過によって認識されなくなり，長時間の使用は困難である [27]．

2.2 タッチ入力を制御するインタフェース

アクティブな回路を組み込み，指の接触なく擬似的にタッチ入力を発生・制御するインタフェースが提案されている．これらは主に，リレースイッチを使用しタッチスクリーン上のタッチ点からグラウンドへと至る経路の接続・切断を制御する手法 [32]，または，外部から交流信号を印加する手法 [25] を用いている．こうしたインタフェースはデバイス間のデータ通信 [21], [29] や，スクリーン上の TUI の長時間にわたるトラッキング [27], [32]，教育目的のプログラマブルな TUI [1] などに用いられている．また，データ入力やゲーム進行を自動化する目的の製品も販売されている[*1]．これらは安定してタッチ入力の制御が可能であるものの，動作には電池や外部電源を必要とする．そのため，多数のインタフェースを扱う場合や，長期にわたり使用する場合にはメンテナンスに要するコストが増大する．

これに対し，LightTouch は 3D プリントされた筐体内部に LDR を内蔵したバッテリーレスの構造である．ガジェット直下領域の画面輝度の変化により LDR の抵抗値を増減させることで，タッチ点からグラウンドに至る経路を電気的に接続あるいは切断し，タッチ入力を制御する．そのため，電池やマイコンなどは不要である．なお，[6], [21] も LDR により画面輝度を検知し入力として用いるがタッチの制御には電源が必要である．

2.3 流出電流値データを利用したインタラクション

タッチ・非タッチ状態の検出に加え，タッチ時の流出電流と相関するデータを用いたインタラクションが提案されている．タッチスクリーンの流出電流値はタッチコントローラ[*2]から取得でき，タッチスクリーンからグラウンドに至る経路のインピーダンスに応じて変化する [4], [12]．このデータは，ヒューマン・コンピュータ・インタラクション（HCI）の研究分野では，主にインピーダンス容量成分の計測に活用されている．例示すると，タッチスクリーンに接触した指の接触面積 [16], [20]，形状 [17]，部位（関節や爪など）の識別 [13]，あるいは，角度の推定 [30] などがあげられる．

また，流出電流値を TUI に活用した例もある．Flexibles [24] は，柔軟な素材内部に複数の電極を配置した構造を持つ．ユーザがインタフェースに力を加え変形させると，インタフェース内部の電極間距離が変化し，容量成分の変化が生じる．この容量成分の変化を流出電流値により検出することで，押し・曲げ・ねじりといった動作を連続的に検出できる．

流出電流値は容量成分だけでなく，電気抵抗成分の影響を受けることに着目した例として，Ohmic-Touch [12] がある．Ohmic-Touch はパッシブな電気抵抗部品を組み込むことで，光や熱，位置，圧力などのセンシングを利用したインタラクションを実現する．また，Ohmic-Touch と同様に，抵抗成分の変化を利用した例として Ohmic-Sticker [8] がある．これは，感圧の変化により抵抗値が変化するパッシブな機構を持つ入力機器である．この抵抗値の変化を流出電流値によって検出することで，TrackPoint ライクな Force-to-Motion の入力を実現する．一般に，流出電流値のデータにアクセスするにはカーネルの変更や，プライベートフレームワークを使用する必要があり，アプリケーションの開発・利用が制限される．

LightTouch は [8], [12] と同様に，抵抗成分の変化を利用しタッチインタラクションに活用するが，流出電流値へのアクセスは基本的には不要である．本研究の一部の応用例（後述する図 11 のアプリケーション）は流出電流値を利用するが，これを除いた応用例はいずれも一般に公開されてい

[*1] Pegg – Turbo 7: https://peggelectronics.com/

[*2] Accessing the Raw Data of Capacitive Touchscreens on Commodity Smartphones: http://huyle.de/2019/02/12/accessing-capacitive-images/

© 2022 Information Processing Society of Japan

るAPIからアクセス可能なタッチイベントのみを利用する．

3. LightTouch

3.1 動作原理

静電容量方式のタッチスクリーン（以下，タッチスクリーン）は電極を格子状に並べた構造を有する．一方が送信電極群（T_x）であり，他方はこれらと直行する受信電極群（R_x）である．タッチスクリーンは高周波信号を送信電極 T_x へ順に印加し，受信電極 R_x でこれを受信する．電極交点に指などの接地された導電体が近接すると T_x からの信号の一部は人体を通じグラウンドへと流出し，R_x で検出される信号は減衰する．タッチドライバはこの流出量（流出電流値）をもとにタッチ・非タッチの状態を判別する．流出電流値はタッチスクリーン上のタッチ点からグラウンドへと至る経路の電気的特性により変化する [4]．流出電流値はこの経路のインピーダンス容量性成分だけでなく，抵抗成分の変化にも影響されるため，抵抗値変化する機構をタッチ点とグラウンドとの間に介在させることでもタッチ入力の制御が可能である [8], [12]．

LightTouch は Ohmic-Touch [12] や Ohmic-Sticker [8] と同様に，パッシブな電気抵抗部品をタッチ入力制御に利用する．具体的には図 2 (a) のように，LDR をタッチ点とグラウンドの間に設置し，LDR 直下の領域の画面輝度を制御することでその抵抗値を変化させる．高輝度時には入射する光の強度増加にともない抵抗値が減少するため，電極直下でタッチ入力が発生し，低輝度時には抵抗値が増加してタッチ入力が消失する．以上のように，LightTouch は画面輝度を制御することでタッチ入力の制御を行う．

3.2 基本構造

LightTouch の作成にはグラフェンを主成分とする導電性 PLA 樹脂[*3]，非導電性 PLA 樹脂[*4]および，LDR[*5]を用いた．熱溶解積層方式の 2 色造形可能な 3D プリンタ[*6]を使用し，タッチスクリーンとグラウンド間の配線および電極を導電性樹脂で，LDR を外部の環境光から遮断する壁（2 mm 厚）を非導電性樹脂で造形した．LDR のリード線は導電部に設けた ϕ 1-mm の穴に差し込み，硬化性のある導電性塗料[*7]を塗布し接合した．

LightTouch をタッチスクリーンに取り付けると，LDR に接続された導電部の一端（電極）はタッチスクリーン上に，他端はグラウンドに接続される設計とした．LDR 直下の画面領域にはグレースケール画像を表示し，画像の階調を変化させることで LDR の抵抗値を変化させ，タッチ入力を制御する．

3.3 デザインスペース

上述の基本構造に加え，LightTouch は個別に設計可能な構成要素を持ち，それらを組み合わせることで様々なインタラクションを可能とする．本節は LightTouch のデザインスペースについて述べる．

3.3.1 電極

多くのタッチスクリーン用のインタフェースでは円形の電極が用いられている [33]．電極が接地されると電極直下で 1 点のタッチを発生させることが可能である．円形電極を複数組み合わせることで，複数タッチ点からなる任意のタッチパターンを形成可能である [3], [32]．これらの電極構造はいずれも LightTouch に適用可能である（図 2 (b)）．また，スクロールやスワイプのようにタッチ点が連続的に変化する指の動きを模倣するには，細い線形電極の列 [2], [26] や，グリッド状の電極構造 [7], [14] が適していることが知られている．LightTouch では個々の電極に LDR を接続し，接地状態を個別に制御することで [2], [7], [14], [26] と同等のタッチ入力を実現する．

LightTouch は電極サイズにより容量成分が，画面輝度により LDR の抵抗成分が変化する．そのため，電極サイズが大きく，かつ画面輝度が高い場合には流出電流量が増加しタッチ入力の認識率は高くなる．一方で，市販のタッチスクリーンの多くは指のタッチ検出を目的として設計されているため，指先大（ϕ 6–10 mm 程度）より過度に大きい接触面積のタッチはフィルタリングされ，タッチ入力として検出されない場合がある．

3.3.2 階調変化パターン

LightTouch はグレースケール画像の階調変化のパターン（以下，パターン）に応じて様々なタッチ入力を実行可能である．図 2 (c) 上段に 1 本指でのタッチ入力を模倣するパターンを示す．これらは，単体の円形電極と組み合わせて使用する．具体的には，一定時間の間に短時間（数百ミリ秒程度）のみ高輝度にするパターンでシングルタップを，短時間間隔の点滅を 2 回行うパターンでダブルタップを，高輝度の状態を一定時間以上維持するパターンでロングプレスを実行可能である．また，時系列的に等間隔に区分したパターンは，タッチの ON を 1，OFF を 0 として扱うことでバイナリデータの表現を行える．例示すると，“01000001” のようにタッチ入力の ON/OFF が切り替えられた場合，ASCII コードの “A” の文字列を表す．これは FlashTouch [21] などのインタフェースで用いられている．

図 2 (c) 下段は，連続的な指の動作によるタッチジェスチャを模倣するパターンを示す．これらは，複数の線形電極またはグリッド状の電極と組み合わせて使用する．これらのパターンは各電極の接地・非接地状態をシームレスに

*3 Graphene Laboratories, Inc., Conductive Graphene PLA Filament (0.6 Ω·cm)
*4 Polymaker Industrial, PolyMax PLA
*5 CdS cell, GL5528（明抵抗 10–20 kΩ，暗抵抗 1 MΩ）
*6 Shaoxing Bibo Automatic Equipment Co., BIBO 3D Printer Dual Extruder
*7 Bare Conductive SKU-0018, Bare Conductive Ltd.

© 2022 Information Processing Society of Japan

切り替えることが可能であるため，スクロールやピンチイン・アウトなどのタッチジェスチャを実行できる．

3.3.3 タッチセンシングデータ

OS の API により取得可能なバイナリなタッチ入力に加え，2.3 節で紹介した流出電流値の連続的なデータを用いることも可能である（図 2 (d)）．これにより，LDR の抵抗値の変化を連続的に検出できるため，画面上のコンテンツの輝度の変化をより詳細にセンシング可能となる．

3.3.4 パターン表示領域

パターンを表示するための領域は，LightTouch 専用アプリケーションに実装し表示することを想定している．また，市販のスマートフォンやタブレット PC に採用されている pop-up view[*8]や，split view[*9,*10]の機能を使用することで，パターン領域のみを一般のアプリケーション上に重ねて表示することも可能である．

3.3.5 グラウンド接続方式

ガジェット導電部を人体を介さずにグラウンドに接続するための簡便な方法として，(1) タッチスクリーン筐体を介して接続する方法（図 2 (f), 左）と，(2) タッチスクリーン内部電極を介して接続する方法（図 2 (f)，右）がある．(1) について，一般にタッチスクリーン筐体内部の電子基板のグラウンドと筐体は電気的に接続されている．そのため，導電部を筐体を通じグラウンドへと接続することで，人体による接触がない場合であってもタッチ入力を発生させることが可能である [8]．なお，筐体がプラスチック製やガラス製などのタッチスクリーンの場合，筐体表面からグラウンド部に直接接続することはできないが，筐体表面に接触させる LightTouch の導電部のサイズを大きくすることでグラウンドに接続可能である．これは，筐体表面が非導電性の素材であっても，通常は電磁波ノイズの対策のため内部でシールドされており，LightTouch の導電部と交流結合できるためである．

(2) は PUCs [28] で提案されたグラウンド接続方法である．これは，2 つ以上の電極が相互に接続されている構造をタッチスクリーン上に置いた場合，一方の電極がスキャンされている間に他方の電極がタッチスクリーン電極を通じてグラウンドと接続されることを利用している．なお，市販のタッチスクリーンの多くは，タッチ位置もしくは流出電流量の変化しない信号を除外することで，周辺環境に適応するフィルタリングを内部的に行っている．これは，時間的に変化する電気的なノイズなどをタッチ入力として検出しないことが目的であると考えられる．具体的には，長時間タッチ入力が発生している間に，タッチ検出に関わる閾値が更新されていく処理が想定される．こうしたフィルタリングにより，タッチスクリーン上に置いた TUI は指を離すと短時間（たとえば，PUCs の場合 5–30 秒程度）でトラッキング不可になる．一方，LightTouch は流出電流の連続的な変化を引き起こすため，フィルタリングによるタッチ入力のキャンセルを回避できる．

[*8] SAMSUNG, Using the Smart Pop-Up View my Galaxy Phone, https://www.samsung.com/au/support/mobile-devices/using-the-smart-pop-up-view-on-the-galaxy-s10

[*9] Apple, Use Multitasking on your iPad, https://support.apple.com/en-us/HT207582

[*10] Google, Multi-Window Support, https://developer.android.com/guide/topics/ui/multi-window

4. 調査実験

LightTouch によりタッチ入力を発生させるための適切な画面輝度および，その切替え時間間隔を調査した．本実験ではシングルタップ，ダブルタップ，スクロール操作およびトラッキング可能性（タッチの連続検出時間）についての調査を実施した．これらは，単純なタッチの自動化に限らず，次節以降で述べる様々なアプリケーションを実現するための基礎的な調査である．本実験では，LightTouch が多様なタッチスクリーンで動作することを示すため，**表 1** に示す背面の筐体素材や画面サイズ，OS の組合せが異なる 3 機種のタッチスクリーンを選定して用いた．タッチスクリーンは AC アダプタを通じてグラウンドに接続されている場合，バッテリ駆動時よりタッチ検出の感度が高くなるため [4], [8]，これらのデバイスは AC アダプタを通じてコンセントに接続した状態で実施した．各タッチスクリーンの最大・最小画面輝度が異なるため，次の設定を行った．まず，Note9 の画面輝度をシステムコントロールから 50%に設定した．次に，画面輝度計[*11]を用いて Note9 と同じ画面輝度になるよう iPad と MateS の輝度を調整した．この際，画面輝度の自動調整機能は OFF にした．実験中，輝度条件は実験用アプリケーションに表示されるパターンの階調を変化させることで設定し，システムコントロールを利用した調整は行わなかった．

4.1 シングルタップ操作

まず，シングルタップを発生させることが可能な画面輝度条件を調査した．本実験では，図 1 (a) に示すクリップ状の導電部により筐体を通じてグラウンドに接続する方式のガジェットを用いた（電極サイズ：ϕ 10 mm）．画面輝度はグレースケール値を 25.5 から 255 までの範囲（0.20–55 cd/m^2 に相当）を 25.5 刻みで変化させた 10 条件を用いた．以下，グレースケール値を単に輝度と表記し，値範囲 0–255 を輝度

表 1 調査実験で用いたタッチスクリーン
Table 1 Devices used in the experiment.

	筐体素材（背面）	画面サイズ	OS
Galaxy Note9	ガラス	6.4 inch	Android
iPad Pro	アルミ合金	11 inch	iPadOS
MateS	アルミ合金	5.5 inch	Android

[*11] SM208, Shenzhen Sanpo Instrument Co., Ltd.

© 2022 Information Processing Society of Japan

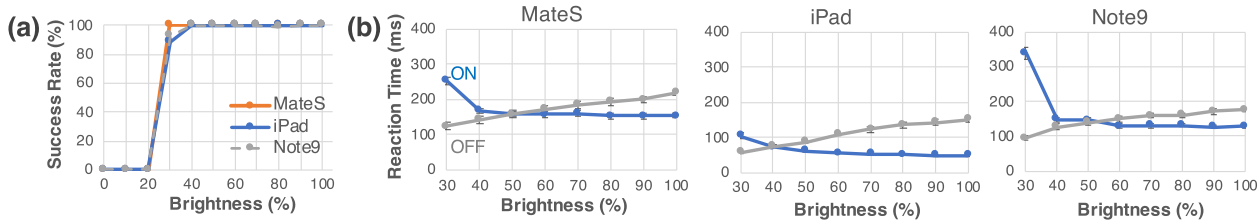

図 3 シングルタップ操作実験の結果．(a) 操作成功率，(b) 輝度切替えからタッチイベント発生までに要した時間

Fig. 3 Results for single-tap operation: (a) success rate of single taps, (b) mean reaction time with SD for each touch event.

0–100%として扱う．輝度 0%の状態から開始し，100 ms の間の条件値に切り替え，再度 0%の状態に戻るパターンを実験用アプリケーション上で表示し，タッチ発生有無を記録した．合計で，3（機種）× 10（輝度条件）× 100（試行）= 3,000 のデータを取得した．

結果． 図 3 (a) に輝度条件ごとのシングルタップの成功率を示す．結果から，いずれのタッチスクリーンもシングルタップの実行には最低 30%の輝度が必要であることが分かった．図 3 (b) にタッチの反応時間（ON：条件値の輝度に切り替えてからタッチ入力が発生するまでの時間，OFF：0%輝度に切り替えてからタッチ入力が消失するまでの時間）を示す．いずれの機種においても，タッチ反応時間の ON と OFF の差および合計は 40–50%輝度で最小になることが分かった．

4.2 ダブルタップ操作

次に，複数回の連続したタップを実行するための輝度切替え時間の条件を調査した．本実験では 4.1 節の実験と同じガジェットを使用した．切替え時間は 10 ms から 100 ms の範囲を 10 ms 刻みで変化させた 10 条件を用いた．輝度条件はすべての機種で安定してタッチが発生し，かつタッチの反応時間の平均が最小となる 40%を採用した．なお，タッチスクリーンは数十ミリ秒の切替え時間の入力を認識可能であるが，実際にタッチイベントが発生するまでには図 3 相当の時間を要する．**図 4** (a) に緑線で示すように，輝度 0%から開始し，40%と 0%を切り替えるパターンを実験用アプリケーション上で表示しタッチ発生有無を記録した．本実験では，パターン表示後に 2 回のタップが実行されなかった場合をエラーとしてカウントした．合計で，3（機種）× 10（切替え時間条件）× 100（試行）= 3,000 のデータを取得した．

結果． 図 4 (b) に切替え時間条件ごとのタブルタップの成功率を示す．必要な最短切替え時間は機種によって差が見られたものの，80–100 ms の場合はすべての機種で高い成功率（> 97%）であった．切替え時間が短い場合，1 回のみのタップ，または 1 回もタップが発生しないという結果となった．これは，LDR の抵抗値が十分な変化を得る前に輝度の切替えをしたことが原因であると考えられる．

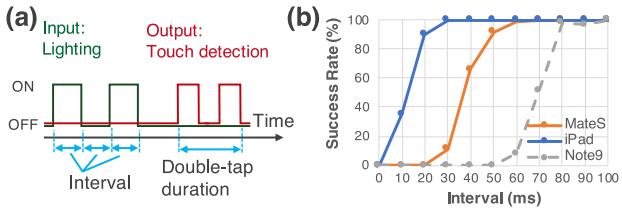

図 4 (a) 輝度切替えからタッチイベントが発生するまで（緑線と赤線で示されたイベントの発生タイミングの差）に数十から数百ミリ秒程度の遅延が発生する．(b) ダブルタップ操作成功率

Fig. 4 (a) Touches occurred tens to hundreds of milliseconds later than emissions due to the response speed of the LDR and processing delay introduced by the touch-screen, (b) Success rate of double taps.

4.3 スクロール操作

スクロールを実行するための輝度と切替え時間の条件を調査した．本実験では，複数の線形電極（サイズ：1.6 × 8.0 mm，間隔：1.6 mm，[26] を参考に設計）を 1 列に並べた構造を持つガジェットを用いた．**図 5** (a) のように，2 個の線形電極ごとに 1 個の LDR を接続し，各 LDR を 2 mm 厚の非導電部で区切る設計とした．

一般に，スクロール操作では**図 6** (a) のように，*Touch Start*・*Touch Move*・*Touch End* の順でタッチイベントが発生する．スクロール操作を模倣するための適切なパターンを決定する予備調査として，図 5 (b)–(d) に示す 3 種類の異なるパターンをテストした．図 5 (b) について，*Touch Move* イベントが頻繁に中断され，複数回の *Touch Start*・*Touch End* イベントの発生が観察された．(c) について，入力がマルチタッチイベントとして認識され，意図しないピンチ操作が発生した．(d) については *Touch Move* イベントが中断されることなく，タッチ位置の電極配置に沿ったシームレスな変化が観察された．予備調査の結果から，本実験では (d) のパターンを採用した．

本実験では，10%から 100%の範囲を 10%刻みで変化させた 10 条件の輝度と，10 ms から 100 ms の範囲を 10 ms 刻みで変化させた 10 条件の切替え時間を用いた．合計で，3（機種）× 10（輝度条件）× 10（切替え時間条件）× 100（試行）= 30,000 のデータを取得した．

結果． 図 6 (b) に，*Touch Move* イベント中のタッチ位置

© 2022 Information Processing Society of Japan

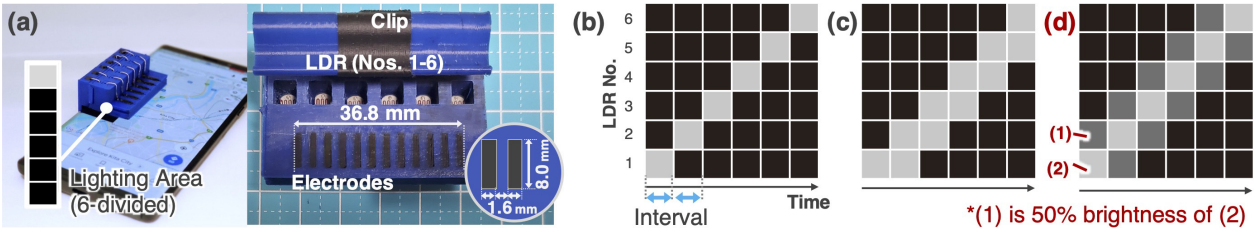

図 5 (a) スクロール操作実験で使用したガジェット，(b)–(d) 予備調査で使用したパターン

Fig. 5 (a) Gesture interface used in the experiment for scroll operation experiment, (b)–(d) Tested lighting patterns in the preliminary study.

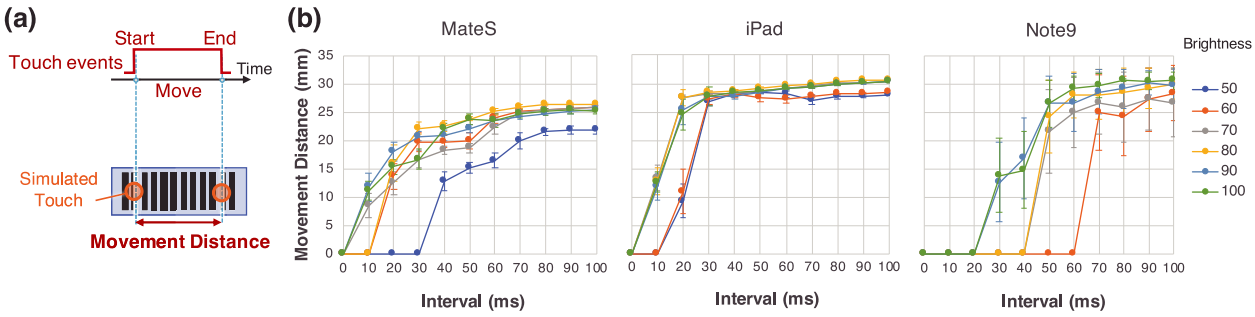

図 6 (a) スクロール操作におけるタッチイベント発生順序，(b) 各輝度・切替え時間条件ごとのコンテンツ移動量

Fig. 6 (a) Touch event sequence of scrolling operation, (b) Mean movement distance with SD for each interval and brightness.

の変位を示す．MateS および iPad では 50%，Note9 では 60%以上の輝度条件で *Touch Start*・*Touch Move*・*Touch End* の順でタッチイベントが発生した．これより低い輝度では，*Touch Start*・*Touch End* は発生するものの，*Touch Move* は発生しなかった．

実験で使用した 3 機種のタッチスクリーンはいずれも異なる解像度であり，px 単位のスクロールの移動量を直接比較することは困難である．そのため，本節はスクロールの移動量を mm 単位に変換した値（以下，コンテンツ移動量）を用いて議論する．全体として，輝度が高く切替え時間が長いほどコンテンツ移動量は大きくなり，最終的には 25–30 mm 程度で頭打ちになることが確認できる．輝度 100%条件の平均コンテンツ移動量は，MateS, iPad, Note9 でそれぞれ 25.1 mm，30.4 mm，および 30.6 mm であり，線形電極の全幅（36.8 mm，図 5 (a) 参照）の 70%，84%，85%に相当する．一般に，OS の API で報告されるタッチ座標は，接触接点の中心部に近い位置が報告される．本ガジェットにおいても *Touch Start* および *Touch End* は電極の両端よりやや内側で発生しており，これが電極の全幅よりコンテンツ移動量が小さくなった原因と考えられる．

4.4 トラッキング性能

3.3.5 項で述べたように，提案手法を適用したインタフェースは流出電流の連続的な変化を引き起こすため，フィルタリングによるタッチ入力のキャンセルを回避できると期待される．本実験では，PUCs と同様のグラウンド接続方式（図 2 (f)）の LightTouch ガジェットのトラッキング性能を調査した．具体的には，[28] で提案されたリングマーカの電極間に LDR を接続したガジェット（電極サイズ：ϕ 10 mm，リング直径：50 mm）を使用した．実験用のアプリケーションには輝度を一定時間ごとに切り替えるパターンを表示した．輝度条件について，流出電流値の変化が小さい入力を長時間にわたり実行した場合，タッチスクリーンの内部的なフィルタリング機能により除外される可能性があると考えられる．そのため，抵抗値の変化が大きくなる 0%と 100%の輝度条件を採用した[*12]．切替え時間は 20，40，60，80，100，200，400，600 および 800 ms の 9 条件を用いた．各条件で，ガジェットをタッチスクリーン上に置いてから 30 分間タッチ発生有無を記録した．ガジェットのサイズは Note9 および MateS の画面領域より大きいため，本実験は iPad 上のみで実施した．

結果． 100–600 ms の切替え時間条件において，ガジェットは継続的にタッチ入力を発生させることが可能であった．なお，1,000 ms 以内のタッチ入力の消失（*Touch End* イベント発生後 1,000 ms 以内に *Touch Start* が再度発生した場合）はタッチ入力が継続している状態として扱った．この対策をとった理由は，抵抗値の増加時に 1 度タッチが消失し，減少時に再度タッチが発生する状態を繰り返すケースが観察されたためである．ユーザが意図的にガジェットを

[*12] なお，シングルタップの実験は，できるだけ短い時間で ON/OFF の切替えをするために，抵抗値が下がりきらず，流出電流値の変化がタッチ検出の閾値を大幅に超えないと想定される低画面輝度の条件を含め調査した．

© 2022 Information Processing Society of Japan

同一箇所に 1 秒未満でタッチスクリーンから持ち上げて再度置くことを繰り返す状況は考えにくいため，対策として閾値を設定した．一方で，20–80 ms の条件では 30 秒以内にタッチ入力が消失した．また，実験用のガジェットと同様の素材で作成した LDR を組み込んでいないオリジナルのリングマーカについても 30 秒程度でタッチ入力が消失した．以上より，適切な切替え時間を適用することで，先行例，[28] と比べ長時間（30 分程度）にわたりガジェットのトラッキングが可能であることを確認した．

5. オンラインワークショップ

5.1 実施概要

LightTouch のインタラクションシナリオの創出を目的としたワークショップを実施した．筆者らの所属組織の COVID-19 警戒ガイドラインに従い，ワークショップは対面ではなくビデオ会議アプリケーション（Zoom Video Communications, Inc.）を利用しオンラインで開催した．HCI 関連領域の研究に携わる 6 名の大学院生および教職員（女性 4 名，男性 2 名，平均年齢 38.9 歳（SD=16.0））が本ワークショップに参加した．各参加者から多様な意見やアイディアを収集することを目的とし，平等に意見を述べる機会を確保したいと考えたため，少人数の参加者に設定した．参加者には 3 章相当のドキュメントを配布し，ワークショップ前に内容を確認するよう指示した．ワークショップでは，最初に一般的なガイドラインおよびワークショップの構成について説明し（10 分間），次に，図 2 に示す，LightTouch の基本的な機能や特性を紹介した（10 分間）．そして，参加者は LightTouch の機能やパターン，適用先のフォームファクタなどの要素を組み合わせ，実現しうるインタラクションシナリオの創出を行った（50 分間）．コンセプトアイディアは Wiki（Scrapbox, Pitecan Inc.）を使用し，文章・スケッチ・画像を含めてまとめるよう指示した．Wiki 上のすべてのページは作業中自由に閲覧することができ，他の参加者のアイディアを確認しつつ，参加者間で自由に議論を行い進行した．最後に，各参加者はインタラクションシナリオのプレゼンテーションを行った（30 分間）．各参加者のプレゼンテーション後には参加者間で質問・議論する時間を設けた．事前準備を含めた一連の参加報酬として各参加者は 5,000 円を受け取った．

本ワークショップでは，合計 22 件のインタラクションシナリオが提案された．これには 3 章で紹介した機構や機能を直接的に利用するシナリオのみでなく，3 章をもとに新たなインタフェース構造のコンセプトを提示し創出されたシナリオが含まれる．ワークショップ実施後，創出されたコンセプトを参考に我々は複数のガジェットを実装した．これについては 6 章で述べる．

5.2 タッチ入力の自動化

最もシンプルなアイディアはタッチ入力の自動化をテーマとしたインタラクションシナリオである．例示すると，データ入力やゲーム進行の自動化に LightTouch を利用するシナリオが提案された．また，1 画面で複数のアプリケーションを分割表示し，アプリケーション間の相互操作による処理の自動化のシナリオが提案された．具体的には，図 7 (a) のように，メインのアプリケーションの表示に変化が生じた場合（たとえば，特定のプロセスの完了を視覚的にフィードバックする場合）に，インタフェースを介して LightTouch 専用アプリケーションに流出電流値のデータとして伝達する．その後，専用アプリケーションは対応するタッチ操作をメインアプリケーションに伝達し後続の

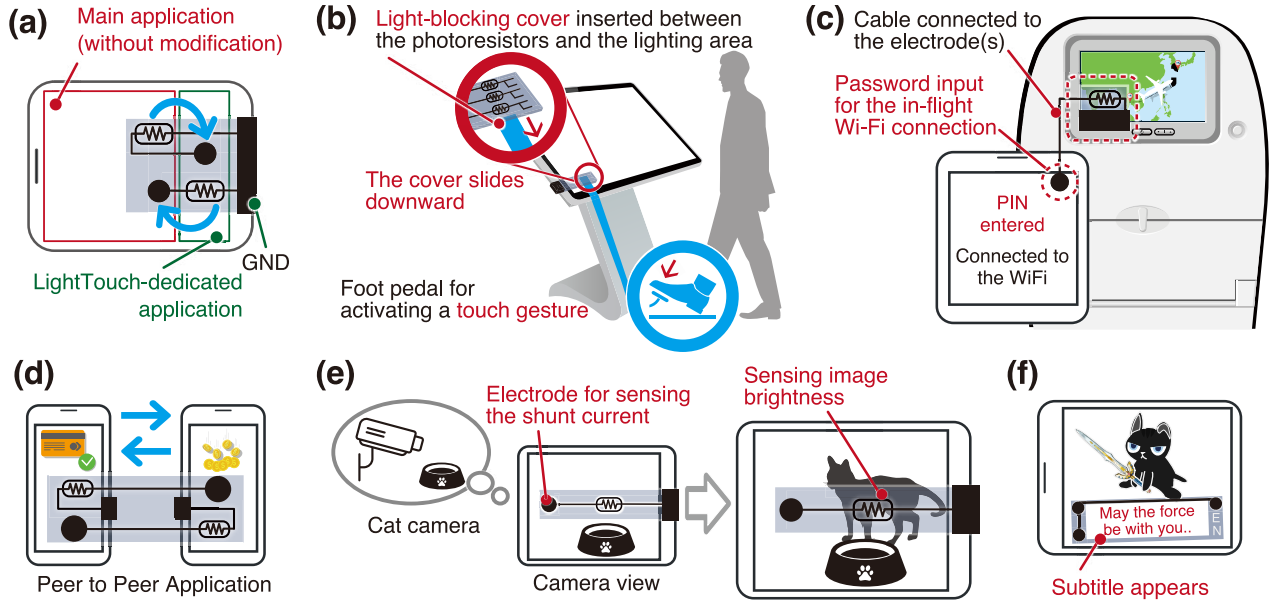

図 7 ワークショップで提案されたインタラクションコンセプト例
Fig. 7 Interaction concepts excerpted from the workshop.

© 2022 Information Processing Society of Japan

タスクを進める．上述の処理を繰り返すことでタスクを完了させるという内容である．

なお，データ入力やゲームの自動化といったユースケースについては，ソフトウエアを用いたタッチ自動化の方法が導入コストなどの点から適していると考えられる．一方で，タッチスクリーンのハードウェア検査など，指でのタッチ相当の操作を物理的に行う必要がある場合に提案ガジェットは有用であるといえる．

5.3 ハンズフリー操作

特定のユーザ動作をタッチジェスチャに変換することをテーマとしたシナリオが提案された．具体的には，感染症対策の観点から，公共のデジタルサイネージに直接手で触れて操作する代わりに，ハンズフリー操作を導入するという内容である．本シナリオには，LDR とタッチスクリーン間に可動式の遮光プレートを挿入したガジェットのコンセプト提案が含まれる（図 7 (b)）．遮光プレートはワイヤを介してペダルに接続されており，ユーザがペダルを踏むと遮光プレートは下方にスライドする．これにより，LDR に光が入射し，ガジェットは画面上のパターンに応じてスクロールなどのタッチジェスチャを実行する．また，ユーザがペダルから足を離すと，プレートは定常位置に戻り，タッチジェスチャは終了する．提案されたガジェットについて，「既存のタッチスクリーンの機能を活用し，かつ複雑な機構を使用せずに低コストでハンズフリー操作を実現できるため有用である」といった意見があがった．

5.4 デバイス間通信

タッチ入力をバイトコードデータ（図 2 (c)）として扱い，デバイス間でデータ通信を行うというシナリオが提案された．これは，あるタッチスクリーンの発光によるパターンを，異なるタッチスクリーンにタッチ入力として送信する FlashTouch [21] の手法に共通するアイディアである．デバイス同士を同一のネットワークや Bluetooth に接続する必要がないため，プライベートなネットワーク接続ができない場合に有効であるとの意見があった．例示すると，航空機内の座席のタッチスクリーンと個人端末間でのインタラクションがあげられる（図 7 (c)）．両デバイスを LightTouch を介して接続することで，機内の WiFi へのワンステップ接続や，到着地点の情報を個人端末に送信可能となる．また，P2P（Peer-to-Peer）のモバイル決済アプリケーションにおける店舗端末と個人端末間のデータ通信や，個人端末同士で連絡先や URL の共有に使用するシナリオも提案された．さらに，流出電流値の連続的なデータの読み取りを行うことで，バイナリデータを多段階的に拡張し，単位時間あたりのデータ通信量を増やす工夫も可能であるという意見があがった．

5.5 ショルダーハック対策

ある参加者は，LightTouch を介したデータ通信がセキュリティ強化に有効な場合があると述べた．たとえば，ゲームパッドを利用したパスワード認証は，テレビなどのディスプレイと組み合わせて利用することが多い．この場合，パスワード入力は画面上のソフトキーボードで行われるため，ショルダーハックされる危険性がある．あらかじめパスワードが記録されているユーザの個人端末から LightTouch を経由し，タッチパッドを搭載したゲームパッド（DUALSHOCK コントローラ[*13]など）にパスワードを転送することでこの危険性を低減できる．

5.6 画像差分検出

LightTouch を使用した簡易な物体検出をテーマとしたシナリオが提案された．これは，流出電流値データを LightTouch を通じて取得し，画像上の特定の位置の明るさや空間周波数の変化をセンシングすることで，画像内の物体検出を行うという内容である．具体的には，Web カメラの映像をタッチスクリーンに表示している状態で，カメラの前にペットがいるか否かをガジェットを通じ電流値の変化により検出し，ペットがいる場合には自動的に写真を撮影するというシナリオである（図 7 (e)）．これについて，参加者からは LightTouch で検知可能な情報は輝度のみであり，RGB 値を取得することはできないため検出対象には制約があるものの，LDR によるセンシング領域を複数設けることで，より高度な物体検知に発展する可能性があるという意見があがった．

5.7 タッチスクリーン用 TUI

タッチスクリーン上で操作する TUI をテーマとしたシナリオが提案された．これは，リングマーカ状の LightTouch を特定の機能やアプリケーションにアクセスするためのウィンドウとして利用するという内容を含むものである[*14]．ユーザが LightTouch をタッチスクリーン上に置くと，対応するアプリケーションが枠内に表示される．これにより，ユーザは階層的なメニューや複数のデスクトップ領域を移動することなく，アプリケーションに直接アクセスすることが可能である．例示すると，ビデオストリーミングアプリケーションで動画再生中にガジェットを置くことで，字幕表示を枠内で行うシナリオが提案された（図 7 (f)）．基本となるアイディアは，紙窓 [34] で提案されたアプリケーションと同様であるが，LightTouch はガジェットから指が離れた後でもトラッキング可能であるため，比較的長時間

[*13] https://pur.store.sony.jp/ps4/products/ps4_controller/CUH-ZCT2J_product/

[*14] なお，LightTouch を「アプリケーションにアクセスするためのウィンドウとして利用する」という内容はリングマーカの構造説明の際に紹介しており，参加者が提案したのはこれをより具体化したシナリオ部分である．

© 2022 Information Processing Society of Japan

（数十分から数時間）の利用が想定されるビデオ会議などのアプリケーションにも適しているという意見があがった．

6. 応用例

ワークショップで創出されたインタラクションシナリオを参考にガジェットの実装を行った[*15]．本節の応用例は上述の複数のシナリオを筆者らが組み合わせ，あるいは拡張した内容を含む．

6.1 二次元のタッチ入力制御

5.2 節のコンセプトを参考に，二次元平面のタッチ入力操作を制御するガジェットを実装した（**図 8**）．図 8 は，画面を折りたたむことのできるスマートフォン（Samsung Galaxy Z Flip）の上にガジェットを設置した例である．水平に配置した画面下半分をパターン表示領域に使用し，上半分を 45 度程度閉じた状態で情報を提示している．本機構は下部に電極を，上部に LDR 受光部（6 × 6）を持ち，LDR のリード線の一端は下部の電極に，他端は側面に配線しグラウンドへと接続した．本機構を用いることで，1 台のタッチスクリーンで表示したパターンを異なるタッチスクリーンにタッチ入力として転送することが可能である．これにより，パターンロック認証相当の入力を転送できるため，ドアロックの解除やユーザ認証などへの応用できると考えている．

6.2 可動式遮光板を利用した入力制御

5.3 節のコンセプトを参考に，可動式遮光板の機構を用いてタッチ入力の制御を行うガジェットを実装した（**図 9**）．本ガジェットの基本構造は調査実験で用いたスクロール用のガジェットと同様であるが，LDR 設置部の底面に 1.5 mm 厚の溝を設けた．この溝に遮光板を挿入し，LDR 配置方向に沿ってスライド可能な設計とした．LDR 直下領域には図 5 (d) のようなスクロール用のパターンを常時再生することで，遮光板で遮蔽されていない LDR と接続された電極部の範囲でスクロール操作が発生する．遮光板をスライドし，非遮光領域が増加することで，反応する電極数が増えるため，1 回のアニメーション再生時のコンテンツ移動量が増加する．そのため，遮光板の位置を調整することで，単位時間あたりのコンテンツ移動量の制御が可能となる．フットペダルなどの任意の外部機構による動作で遮光板の位置を操作することで，ハンズフリーの操作を実現する．

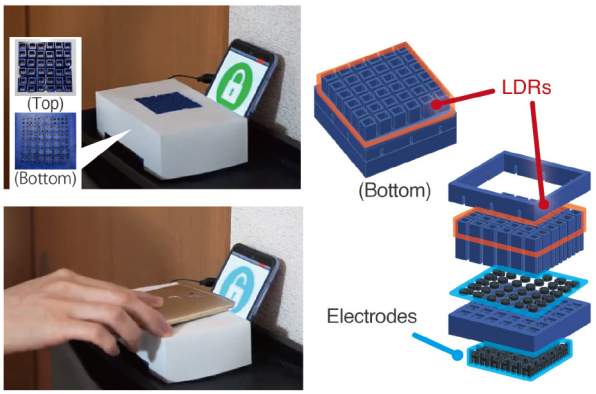

図 8 2 台のタッチスクリーンを利用したパターンロック認証
Fig. 8 Pattern-lock authentication between the room security device and the personal smartphone.

[*15] 各ガジェットの動作の様子は以下から動画視聴可能である．https://www.youtube.com/watch?v=TsKEuZ_IjJU

6.3 単方向/双方向データ通信

5.4，5.5 節のコンセプトを参考に，データ通信用のガジェットを実装した（**図 10** (a)）．本ガジェットには，受光部と円形電極が反対方向に設置されている．本ガジェットを通じて 2 台のデバイスを接続することで，単方向通信が可能である．通信用のアプリケーションは FlashTouch [21] と同様のデータフォーマットを採用した．図 10 (b) に 2 台のタッチスクリーン間で相互にデータ通信を行うためのガジェットを示す．本ガジェットは，単方向通信のガジェットを拡張した機構であり，二対の円形電極・受光部・グラウンド接続部を持つ．なお，単方向通信を行う場合，データ送信側のデバイスはパターン表示が可能であればタッチスクリーンに限定せず，一般的な LCD ディスプレイなどを利用することができる．また，データ受信側においても，タッチ入力機器であればタッチスクリーンに限定せず，

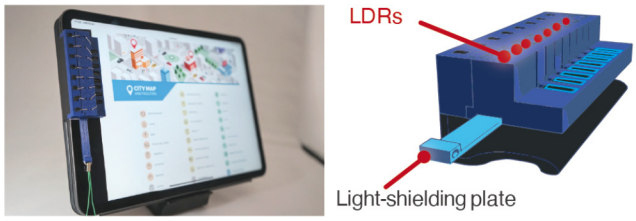

図 9 可動式遮光板を利用した入力制御機構
Fig. 9 Touch control mechanism using a movable light shield.

図 10 (a) 単方向通信用，(b) 双方向通信用のガジェット
Fig. 10 (a) Mono-directional and (b) bi-directional data communication by digitized touches.

© 2022 Information Processing Society of Japan

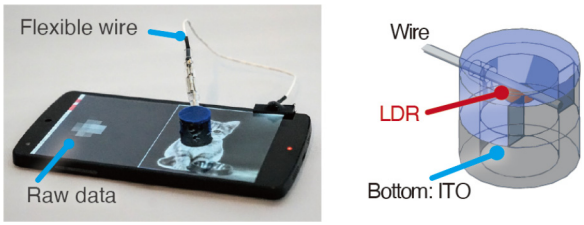

図 11 電流値データを用いた画面輝度センシング用のガジェット．底面の ITO と導線の間に 1 つの LDR が接続されている

Fig. 11 Detecting differences in images can be achieved by sensing the screen brightness through the interface.

タッチパッドなどの画面を持たないデバイスを利用することができる．

6.4 電流値データによる画面輝度センシング

5.6 節のコンセプトを参考に，画面輝度センシング用のガジェットを実装した（**図 11**）．本ガジェットは電極部と受光部を統合する実装により，画面の遮蔽領域を減らす工夫をした．具体的には，透明導電膜（ITO）を底面に設置し，LDR をその上方部に接続した構造を作成した．画面から発せられた光は ITO を通過するため，LDR は画面上の特定の位置の明るさをセンシングすることが可能である．これにより検出された輝度から画像差分を検知し，特定の処理を実行できる．

本アプリケーションでは，LG Nexus5 用のカスタムカーネル [16] を使用し，流出電流データを取得した．図 11 のスマートフォン画面左側領域には，右側領域で発生したタッチ入力の流出電流値を各電極交点ごとにグレースケール画像として表示しており，画素値が大きいほど高い流出電流値であることを意味する．なお，1 点のタッチ入力であっても複数の電極交点と反応するため，図 11 のように，複数セルが変化する可視化結果となる．

6.5 タンジブルなツールウインドウ

5.7 節のコンセプトを参考に，タンジブルな操作により特定の機能やアプリケーションにアクセスするためのガジェットを実装した（**図 12**）．本ガジェットは，調査実験で使用したリングマーカをもとに，3 個の電極間の相対的な位置（タッチパターン）を調整することで複数のガジェットを一意に識別できるようにした．本ガジェットの形状および配置位置に応じ，ビデオ会議用アプリケーションのウインドウ表示を変更するアプリケーションを実装した（図 12 (a)）．ガジェット固有のタッチパターンは特定のユーザ ID と紐付けられており，ユーザがタッチスクリーン上にガジェットを置くと，指定されたユーザとのビデオ通話を開始する．

また，ガジェットに対応するツールを呼び出すアプリケーションを実装した（図 12 (b)）．本アプリケーション

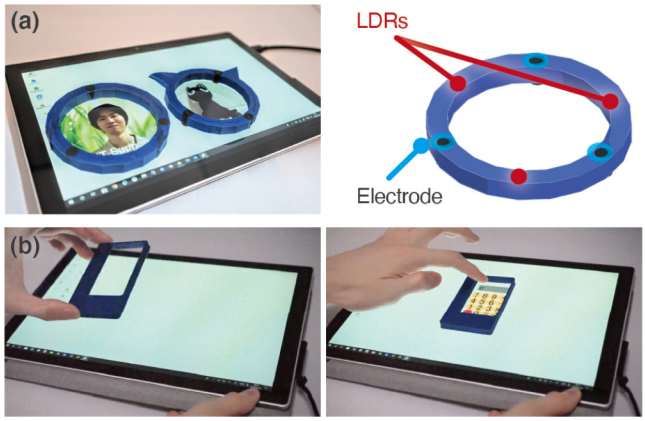

図 12 タンジブルな操作により特定の機能やアプリケーションにアクセスするためのガジェット．(a) テレビ会議用アプリケーション，(b) 電卓アプリケーション

Fig. 12 Passive markers enhanced by LightTouch technique for long-term detection.

は図 12 (a) と同様に，ガジェット固有のタッチパターンとアプリケーションが紐付けられており，タッチスクリーン上にガジェットを置くと，事前に設定したアプリケーションが枠内に表示され操作可能となる．

7. 議論と制約

7.1 画面遮蔽

LightTouch を使用する際，電極部と受光部をタッチスクリーン上に接触または近接させる必要があり，タッチスクリーンの表示・操作領域を一部を専有する．図 11 の実装例のように透明電極を使用し，受光部と電極部を統合することで遮蔽領域の縮小が可能である．また，LightTouch の入出力を高解像度化できればガジェットの小型化につながり，画面遮蔽を低減可能である．LightTouch を通じたタッチ入力の解像度は電極サイズに依存し，センシングの解像度は LDR のサイズ（本稿のプロトタイプでは ϕ 5 mm）に依存する．本研究で用いたタッチスクリーンについて，タッチセンシングの分解能・ディスプレイ解像度はどちらも LightTouch より高精度であるため，LightTouch の入出力解像度を改善した場合，タッチスクリーン側はそれに対応可能である．タッチ入力の解像度について，6.1 節で紹介したアプリケーションのように，接地状態を個別に制御可能な面積の小さい電極を多数設けることで高解像度化が可能である．ただし，電極，LDR および配線部が密集すると相互にカップリングし，タッチ検出精度が大幅に低下する場合がある．センシングについて，適切な反応速度・範囲で抵抗値が変化しパッシブに動作する素子は限られているため，現状は高解像度化は困難であると考えている．

7.2 グラウンド接続

金属製筐体のタッチスクリーンのみでなく，多くの非金

© 2022 Information Processing Society of Japan

属製筐体のタッチスクリーンにおいても筐体を介したグラウンド接続方法は利用可能であると考えられる．これは，筐体内部基板のグラウンドとガジェット導電部が筐体を介してACカップリングするためである．実際に，本稿の実験で使用した筐体背面がガラス製のGalaxy Note9について，適切な画面輝度と切替え時間の条件下ではタッチ入力制御が可能であった．一方で，スクリーン保護フィルムや，プラスチック製のスマートフォンカバーを使用する際には，グラウンド接続が不安定になり，入力制御を安定して行えない可能性がある．この場合，ガジェットのグラウンド接続部の面積を大きくする，あるいは，より導電性の高い素材を使用することでグラウンド接続状態を改善できると考えられる．

7.3 タッチ入力のフィルタリング

タッチスクリーンのフィルタリングのアルゴリズムは画一的ではなく，タッチスクリーン全体に対し大域的な単一閾値を適用しているものや，スクリーンを複数の領域に分割し，各領域に対して異なる閾値を適用しているものなどがある[28]．また，閾値自体もタッチドライバによって異なると考えられる．そのため，本稿の実験結果で提示した適切な切替え時間・輝度条件が調査に使用した機種以外においてもつねに適しているとは限らない．PUCs方式のグラウンド接続方法のガジェットを長時間検出するためには，タッチスクリーンの特性を評価しつつパターンの設計をする必要があると考えられる．

8. まとめ

本稿では，タッチスクリーン画面発光をタッチ入力へ変換するパッシブなガジェットであるLightTouchを提案した．LightTouchは従来のタッチスクリーンの物理的な拡張インタフェースとは異なり，ガジェットに指を接触させ続ける必要はなく，かつ電池や外部電源は不要で動作する．本稿ではLightTouchの構成要素を包括するデザインスペースを示し，入力として用いる画面表示の適切なパラメータを調査した．また，単純なタッチ入力の自動化にとどまらず議論および応用例の実装を行った．本研究はタッチスクリーン上で用いるガジェットやTUIの拡張性を高め，より広範な応用例の導出に貢献することが期待される．

参考文献

[1] Burjan, V., Kohler, K. and Volz, C.: CAPP: Capacitive Passive Programmable Tangibles, *Proc. 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, *ISS '17*, pp.409–412, ACM (2017).

[2] Chan, L., Müller, S., Roudaut, A. and Baudisch, P.: CapStones and ZebraWidgets: Sensing Stacks of Building Blocks, Dials and Sliders on Capacitive Touch Screens, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '12*, pp.2189–2192, ACM (2017).

[3] Götzelmann, T. and Schneider, D.: CapCodes: Capacitive 3D Printable Identification and On-screen Tracking for Tangible Interaction, *Proc. 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, *NordiCHI '16*, No.Article 32, pp.1–4, ACM (2016).

[4] Grosse-Puppendahl, T., Holz, C., Cohn, G., Wimmer, R., Bechtold, O., Hodges, S., Reynolds, M.S. and Smith, J.R.: Finding Common Ground: A Survey of Capacitive Sensing in Human-Computer Interaction, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '17*, pp.3293–3315, ACM (2017).

[5] Günther, S., Schmitz, M., Müller, F., Riemann, J. and Mühlhäuser, M.: BYO*: Utilizing 3D Printed Tangible Tools for Interaction on Interactive Surfaces, *Proc. 2017 ACM Workshop on Interacting with Smart Objects*, *SmartObject '17*, pp.21–26, ACM (2017).

[6] Hardy, J., Weichel, C., Taher, F., Vidler, J. and Alexander, J.: ShapeClip: Towards Rapid Prototyping with Shape-Changing Displays for Designers, *Proc. 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '15*, pp.19–28, ACM (2015).

[7] Heller, F., Voelker, S., Wacharamanotham, C. and Borchers, J.: Transporters: Vision & Touch Transitive Widgets for Capacitive Screens, *Proc. 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, *CHI EA '15*, pp.1603–1608, ACM (2015).

[8] Ikematsu, K., Fukumoto, M. and Siio, I.: Ohmic-Sticker: Force-to-Motion Type Input Device that Extends Capacitive Touch Surface, *Proc. 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '19*, pp.1021–1030, ACM (2019).

[9] Ikematsu, K., Kato, K. and Kawahara, Y.: LightTouch: Passive Gadgets for Extending Interactions on Capacitive Touchscreens by Automating Touch Inputs, *Adjunct Publication of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '20 Adjunct*, pp.10–12, ACM (2020).

[10] Ikematsu, K., Kato, K. and Kawahara, Y.: LightTouch Gadgets: Extending Interactions on Capacitive Touchscreens by Converting Light Emission to Touch Inputs, *Proc. 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1–11, ACM (2021).

[11] Ikematsu, K., Kato, K. and Kawakami, R.: ShiftTouch: Sheet-type Interface Extending Capacitive Touch Inputs with Minimal Screen Occlusion, *The Adjunct Publication of the 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '21*, pp.86–88, ACM (2021).

[12] Ikematsu, K. and Siio, I.: Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch through Resistive Objects, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '18*, No.Paper 521, pp.1–8, ACM (2018).

[13] Ikematsu, K. and Yamanaka, S.: ScraTouch: Extending Interaction Technique Using Fingernail on Unmodified Capacitive Touch Surfaces, *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol.4, No.3, pp.1–19 (2020).

[14] Kato, K., Ikematsu, K. and Kawahara, Y.: CAPath: 3D-Printed Interfaces with Conductive Points in Grid Layout to Extend Capacitive Touch Inputs, *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol.4, No.ISS, pp.1–17 (2020).

[15] Kratz, S., Westermann, T., Rohs, M. and Essl, G.: CapWidgets: Tangile Widgets versus Multi-touch Controls on Mobile Devices, *CHI '11 Extended Abstracts on*

© 2022 Information Processing Society of Japan

Human Factors in Computing Systems, *CHI EA '11*, pp.1351–1356, ACM (2011).
[16] Le, H.V., Kosch, T., Bader, P., Mayer, S. and Henze, N.: PalmTouch: Using the Palm As an Additional Input Modality on Commodity Smartphones, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '18*, pp.360:1–360:13, ACM (2018).
[17] Le, H.V., Mayer, S. and Henze, N.: Investigating the feasibility of finger identification on capacitive touchscreens using deep learning, *Proc. 24th International Conference on Intelligent User Interfaces*, *IUI '19*, pp.637–649, ACM (2019).
[18] Marky, K., Schmitz, M., Zimmermann, V., Herbers, M., Kunze, K. and Mühlhäuser, M.: 3D-Auth: Two-Factor Authentication with Personalized 3D-Printed Items, *Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '20*, pp.1–12, ACM (2020).
[19] Marquardt, N., Brudy, F., Liu, C., Bengler, B. and Holz, C.: SurfaceConstellations: A Modular Hardware Platform for Ad-Hoc Reconfigurable Cross-Device Workspaces, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '18*, No.Paper 354, pp.1–14, ACM (2018).
[20] Oakley, I., Lindahl, C., Le, K., Lee, D. and Islam, M.D.R.: The Flat Finger: Exploring Area Touches on Smartwatches, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '16*, pp.4238–4249, ACM (2016).
[21] Ogata, M., Sugiura, Y., Osawa, H. and Imai, M.: FlashTouch: Data communication through touchscreens, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '13*, pp.2321–2324, ACM (2013).
[22] Schmitz, M., Herbers, M., Dezfuli, N., Günther, S. and Mühlhäuser, M.: Off-Line Sensing: Memorizing Interactions in Passive 3D-Printed Objects, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '18*, No.Paper 182, pp.1–8, ACM (2018).
[23] Schmitz, M., Khalilbeigi, M., Balwierz, M., Lissermann, R., Mühlhäuser, M. and Steimle, J.: Capricate: A Fabrication Pipeline to Design and 3D Print Capacitive Touch Sensors for Interactive Objects, *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '15*, pp.253–258, ACM (2015).
[24] Schmitz, M., Steimle, J., Huber, J., Dezfuli, N. and Mühlhäuser, M.: Flexibles: Deformation-Aware 3D-Printed Tangibles for Capacitive Touchscreens, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '17*, pp.1001–1014, ACM (2017).
[25] Takashina, T., Tamura, T., Nakazumi, M., Nomura, T. and Kokumai, Y.: Toward a Compact Device to Interact with a Capacitive Touch Screen, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '16 Adjunct*, pp.173–174, ACM (2016).
[26] Ueno, S., Kato, K. and Miyashita, H.: A Tangible Interface to Realize Touch Operations on the Face of a Physical Object, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '16 Adjunct*, pp.81–83, ACM (2016).
[27] Voelker, S., Cherek, C., Thar, J., Karrer, T., Thoresen, C., Øvergård, K.I. and Borchers, J.: PERCs: Persistently Trackable Tangibles on Capacitive Multi-Touch Displays, *Proc. 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '15*, pp.351–356, ACM (2015).
[28] Voelker, S., Nakajima, K., Thoresen, C., Itoh, Y., Øvergård, K.I. and Borchers, J.: PUCs: Detecting transparent, passive untouched capacitive widgets on unmodified multi-touch displays, *Proc. 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, *ITS '13*, pp.101–104, ACM (2013).
[29] Vu, T., Baid, A., Gao, S., Gruteser, M., Howard, R., Lindqvist, J., Spasojevic, P. and Walling, J.: Distinguishing users with capacitive touch communication, *Proc. 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, *Mobicom '12*, pp.197–208, ACM (2012).
[30] Xiao, R., Schwarz, J. and Harrison, C.: Estimating 3D Finger Angle on Commodity Touchscreens, *Proc. 2015 International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, *ITS '15*, pp.47–50, ACM (2015).
[31] Yanagawa, Y., Ikematsu, K., Suga, C., Sasagawa, M., Matoba, Y. and Siio, I.: Anamorphicons: An Extended Display Utilizing a Cylindrical Mirror Widget, *Proc. 29th Australian Conference on Computer-Human Interaction*, *OZCHI '17*, pp.457–461, ACM (2017).
[32] Yu, N.-H., Chan, L.-W., Lau, S.Y., Tsai, S.-S., Hsiao, I.-C., Tsai, D.-J., Hsiao, F.-I., Cheng, L.-P., Chen, M., Huang, P. and Hung, Y.-P.: TUIC: Enabling tangible interaction on capacitive multi-touch displays, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, *CHI '11*, pp.2995–3004, ACM (2011).
[33] Yu, N.-H., Tsai, S.-S., Hsiao, I.-C., Tsai, D.-J., Lee, M.-H., Chen, M.Y. and Hung, Y.-P.: Clip-on gadgets: Expanding multi-touch interaction area with unpowered tactile controls, *Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, *UIST '11*, pp.367–372, ACM (2011).
[34] 加藤邦拓，宮下芳明：紙窓：カード内領域を独立したタッチパネルディスプレイのように扱うインタフェース，ヒューマンインタフェース学会論文誌，Vol.17, No.3, pp.245–254 (2015).

池松 香 （正会員）

1990 年生．2019 年お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士課程修了．博士（理学）．同年ヤフー株式会社 Yahoo! JAPAN 研究所特任研究員．同主任研究員を経て，2021 年より上席研究員．2020 年より東北大学電気通信研究所助教を兼任．ACM 会員．

加藤 邦拓 （正会員）

1989 年生．2018 年明治大学大学院先端数理科学研究科先端メディアサイエンス専攻博士後期課程修了．博士（工学）．2018 年東京大学大学院情報理工学研究科特任研究員．2020 年東京工科大学メディア学部助手，2021 年同大学助教，現在に至る．ACM 会員．

© 2022 Information Processing Society of Japan

川原 圭博 （正会員）

1977 年生．2000 年東京大学工学部電子情報工学科卒業．2002 年同大学大学院修士課程修了，2005 年同博士課程修了．博士（情報理工学）．2005 年東京大学大学院情報理工学系研究助手，助教を経て，2010 年同講師，2013 年同准教授，2019 年同教授．2011～2013 年ジョージア工科大学客員研究員および MIT Media Lab 客員教員を兼任．電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員．

© 2022 Information Processing Society of Japan