PUNIcon: ゲルを用いた柔らかい物体の物体識別 およびインタラクションの取得

大門 亮哉^{1,a)} 小栗 芙美果^{2,b)} 上堀 まい^{2,3,c)} 正井 克俊^{4,d)} 杉浦 裕太^{5,e)} 伊藤 雄一^{1,f)}

概要:現代の多くの入力デバイスは、スマートフォンのタッチスクリーンやコンピュータのマウスのよう に、平面的な操作に最適化されている.一方で、タンジブルユーザインタフェースのように、日常の実空 間での動作を積極的にインタラクションに採り入れることで、その直感性を高める研究がなされている. 本研究では、操作対象として柔らかいゲルを用いたタンジブルユーザインタフェース "PUNIcon"を提案 する. PUNIcon は自由に成形した透明ゲルでできた物体を、赤外線 LED とフォトトランジスタを装備し た台座に載せ、ゲル内部を透過する赤外光をフォトトランジスタで受光し、その時系列データを機械学習 により解析することで、載せられたゲルの識別とインタラクションを推定する.本デバイスの性能評価と して、4 種類のゲル物体の識別精度と、円柱型の物体を使用した 6 種類のインタラクション取得の実験を 実施し、それぞれ最大 99.8 %、98.4 %の精度で識別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のタッチスクリーン, コン ピュータのマウスやキーボード, ジョイスティックやコン トローラのように, コンピュータに対するユーザの操作意 図の入力デバイスが多く実装されている. これらのデバイ スは, ユーザが直感的に操作できるように設計されており, 日常生活や業務において不可欠な存在となっている. しか し,多くの入力デバイスは平面的な入力を前提としている. 例えばタッチスクリーンでは,指先の接触やスワイプ,マ ウスやキーボードでは,その操作方法は二次元平面に閉じ ていると言える.

これに対し,ダイヤルやスティックといった直接触れる ことで三次元的な入力を可能にするタンジブルユーザイン タフェース(TUI)の研究が進められている [1–3]. TUI は 形状に応じて様々な種類のインタラクションを可能にする. 例えば,ボタンの操作では押しと離し,ジョイスティック では傾ける動作が入力として使われる. それぞれのデバイ

- 1 青山学院大学 理工学部
- 2 青山学院大学大学院理工学研究科
- 3 日本学術振興会 特別研究員
- 4 九州大学 システム情報科学研究院
- 5 慶應義塾大学 理工学部情報工学科
- $^{a)}$ ryoya.daimon@x-lab.team
- $^{\rm b)}$ oguri.fumika@x-lab.team
- ^{c)} mai.kamihori@x-lab.team
- $^{\rm d)} \quad masai@ait.kyushu-u.ac.jp$
- $^{\rm e)}$ sugiura@keio.jp
- $^{f)} \quad itoh@it.aoyama.ac.jp\\$

スは特定の用途に応じたフィードバックを提供するが,汎 用性に欠ける場合が多い.さらに,柔軟な素材を使ったイ ンタフェースは,実世界に存在する物体の多くが柔らかい ものであることから,医療やロボット,玩具といった分野 で注目されている.様々な分野での需要がある一方で,セ ンサやデバイスには硬いものが多く実現が難しいことか ら,多くの研究者が研究を進めている [4].

そこで本研究では、柔らかい物体を操作対象とするタン ジブルユーザインタフェース "PUNIcon"の実現を試みる. PUNIconは、操作対象として内部が透明でやわらかいウレ タン樹脂でできたオブジェクトを使用する.オブジェクト の内側に赤外線 LED を照射し、内部で反射した赤外線を フォトトランジスタで受光することで、反射の様子からオ ブジェクトの形状を取得する.同じ原理で、柔らかい物体 を押したりつまんだりする際の変形も、赤外線の変化から 取得できる.柔らかい物体を使用することで、日常生活に おけるインタラクションを採り入れたり、触覚的なフィー ドバックを提供できる.また、様々な形状の物体を操作対 象とできるような技術を確立することで、提案手法の汎用 性を向上させることを目指す.

2. 関連研究

2.1 タンジブルユーザインタフェース

タンジブルユーザインタフェース (TUI) は,物質的なオ ブジェクトを直接操作することで直感的な情報操作を可能 にする [1]. 画面に映し出された情報をマウスなどの平面 的な動きで操作する GUI から、日常生活を営む 3 次元的 な動きを取り入れることで、普段の動作をインタラクショ ンに取り入れることができる [2]. TUI の研究の例として, 續らの "StackBlock" が挙げられる [5]. ブロック状のデバ イスを積み木のように積み重ね、重ねた位置や向きからブ ロックで構築された形状を取得することができる.また、 Weiss らは、透明パネルの裏側から赤外光を投影し、パネ ルとデバイスの間で拡散反射した光をバックカメラで捉え る FTIR 方式のウィジェットを提案している [6]. ダイヤ ルやボタンなどのウィジェットを作成し、ダイヤルの向き や押下されたボタンを取得できる.他にも、中村は軸型オ ブジェクトに巻いたゲルシートの中に細かい磁石を無数に 埋め込み,磁気センサシートを使って磁石の移動をとるこ とでインタラクションを推定する手法を提案している [7]. 磁気センサで磁束密度の変化をとることで、スティックを 傾ける・押し込むなどの3次元的な入力をカメラを使わず に取得できる.

しかし,多くの TUI はプラスチックや金属など硬い素材 を用いており,柔らかい物体をつまんだり,変形させたり といった柔軟な物体に対するインタラクション取得には対 応していない.

2.2 柔らかい物体を操作対象とした入力デバイス

柔らかい物体を利用した研究は多く提案されており, データの取得方法は様々である.一つの手法として、物体 の変形をカメラで撮影し、画像認識により相互作用を取得 する試みがある. Punpongsanon らは、特殊なインクを使 用して弾性体の変形を取得する、"DeforMe"を提案して いる [8]. この手法では、対象の弾性体に赤外光を反射す る不可視インクを塗布し,赤外線カメラで反射光から特 徴点をキャプチャし,変形を推定する.神山らは,マーカ の位置変化を利用してゲル状物質にかかる力を取得する, "GelForce" を提案している [9]. この手法では, 弾性体内 部に2層のマーカを埋め込み、マーカ位置の変化を読み取 ることで、力の方向と大きさを取得する.また、筧らも、 "GelForce"と同様のマーカを利用した, "ForceTile"を提 案している [10]. "ForceTile" ではテーブル内に赤外線発 光体とカメラを設置しており、ユーザが特別な機器を装着 せずにインタラクションが可能である.

一方,マーカやインクを使用しない手法として,佐藤 らは"PhotoelasticTouch"を提案している [11]. この手法 は,透明な弾性体の持つ光弾性特性を利用し,弾性体が変 形した際の偏光をカメラで撮影することでインタラクショ ンを取得する. Slyper らは,シリコン内部に電極を埋め込 み,変形時の電圧や電流の変化からインタラクションを推 定する手法を提案している [12]. また,He らは,音響セ ンシングを利用した弾性体へのインタラクションを取得す る"SqueezaPulse"を開発している [13]. 柔らかい物体に 空気チューブを通し,接触時に発生する空気振動をマイク で取得・分析することで,インタラクションを検出する手 法である.

このように、柔らかい物体を用いることでインタラク ションの取得が可能である.しかし、これらの手法は、カ メラ設置といった空間の確保や、弾性体へのマーカやセン サの埋め込みといった事前準備が必要である.また、セン サを埋め込む手法では、オブジェクトの形状が固定され、 様々な形状に汎用的に使用することが困難である.

2.3 光センサによる変形の取得

物体の変形を認識する手法の一つとして、光センサを利 用した手法が研究されている. 佐藤らは、物体に異なる波 長の光を複数照射することで素材を識別する "SpecTrans" を開発している [14]. 物体によって反射した光をデバイス の光センサで受光し、その情報から物体の素材を識別する 手法である. 杉浦らは、クッションの綿密度をフォトリフ レクタで計測し、インタラクションを取得する"fuwafuwa" を開発している [15]. クッション内部の綿に赤外線を照射 し、綿と綿の間隔の変化に伴う反射光の変化を測定するこ とで、インタラクションの検出を可能にしている. 尾形ら は、フォトリフレクタをバンド状にして手首に巻き、皮膚 の動きを取得することで、腕を柔らかい入力デバイスとし て操作可能にする, "SenSkin"を提案している [16]. この 手法では、皮膚に赤外線を照射し、距離の変化を赤外線の 反射率から読み取ることで、皮膚の変形を認識している. また、門脇らは、物体内部に赤外線 LED を照射し、変形 時の反射光量の変化をフォトトランジスタで取得すること により、インタラクションの取得が可能な埋込型柔軟触覚 センサを開発している [17].

このように,光センサを用いる手法は,物体の形状認識 に有効であると考えられる.ただし,"fuwafuwa"ではクッ ション,"SenSkin"では人の肌など,特定のインタフェー スに限り入力デバイスとして利用可能である.入力デバイ スは,様々な形状で汎用的に使用できることが望ましい. また,門脇らの埋込型柔軟触覚センサは,赤外線 LED と フォトトランジスタが柔らかい本体内部に埋め込まれて いるため,オブジェクトの形状を変更できないという制約 がある.そこで本研究では,センシングデバイスとインタ フェースである弾性体部分を分離し,インタフェースの交 換によって多様な形状の柔らかいインタフェースに対しイ ンタラクションを取得する手法を提案する.

3. 提案手法

図1にデバイスの概要を示す.本研究では、物体の形状 の識別および、変形によるインタラクションの取得が可能 な入力デバイス「PUNIcon」を提案する. PUNIcon は、赤 外線 LED とフォトトランジスタ (PTr) により、ゲルを用 いて成形された柔らかい物体の種類や変形の状態を推定す る.本章では、まず提案手法の原理を述べ、次に使用する デバイスとシステムの構成について述べる.

3.1 原理

図 2 にデバイスの構成を示す. 透明な物体に光を当て ると,その光は物体内部を通過する.また,光は物体の面 に当たると,物体内部を通過せずに反射する性質がある. この性質に基づき,反射した光をセンシングすることでゲ ルの状態(物体・インタラクション)を推定する.台座の 上の面に赤外線 LED と PTr を配置する.台座の中心部か ら台座に載せたゲルの内部に赤外線を照射し,ゲルの表面 で反射した光を PTr で受光する.ゲルの形状が変化するこ とで,赤外光の反射方向が変わり,PTr に届く赤外光の量 が変化し,PTr に印加される電圧が変化する.PTr の電圧 の変化を機械学習で分析し,ゲルの種類やインタラクショ ンを推定する.

3.2 ハードウェア

PUNIcon は,透明な柔らかいゲル,ゲルの種類とイン タラクションによる変形を取得するための赤外線 LED と PTr,ゲルを設置する台座部分で構成される.

本研究で使用する柔らかい物体は、「光が透過すること」 「柔らかく指で変形できること」「様々な形状で作成できる こと」を条件とする.以上の条件を踏まえて、本研究では



図 1: PUNIcon (直方体のゲルを置いた状態)







人肌のゲル透明タイプ (エクシールコーポレーション社製) を使用する.この製品は、主剤と硬化剤の2種類の液剤を 混ぜることで硬化するウレタン樹脂であり、密度が 1.02、 硬度が Asker-C0 となっている. 作成するゲルの形は機能 検証として直方体,正四角錐,円柱,円錐の4種類,底面 が四角形であるものは一辺を 40 mm とし、底面が円形で あるものは直径を 40 mm とした.また,第4章の評価実 験でゲルの高さの違いによる識別精度を比較するために, 高さを 20 mm, 40 mm, 60 mm の 3 種類とした. ゲルの 造形には、液剤を流し込む型を使用する.型は、ポリプロ ピレン (PP) のフィラメントを使用して 3D プリンタで作 成した. 無加工のゲルの表面は透明であり、光を透過させ てしまうため、光を反射させ PTr で受光するために、底面 以外に白色の 250 µm の粉末状反射材(株式会社ペパレス 製作所製)を塗装し、表面全体はポリウレタン製の透明な コーティング剤(エクシールコーポレーション社製)で補 強した.

LED にはピーク波長が 940 nm の赤外線 LED, PTr に は 940 nm の赤外線受信用のものを用いる.これは,可視 光用の PTr を使用すると照明など外光の影響を受けやす いためである.そこで本研究では赤外線 LED を使用し, 光量変化の影響を軽減することで,より正確な値を取得す る.LED には 100 Ω の抵抗, PTr には 20 k Ω の抵抗を接 続する.

ゲルを載せる台座部分は、ポリ乳酸(PLA)のフィラメ ントを使用して 3D プリンタで作成した.台座の上面には 赤外線 LED と PTr を埋め込むための穴を設け、中心に赤 外線 LED を配置し、中心から 10 mm 離れた位置に、ゲ ル底面の 40 mm の長さを四等分した位置に相当する点で、 円状に均等に PTr を配置した.第4章の評価実験で PTr の数による精度の違いを比較するため、4 個、6 個、8 個 の PTr を配置できるようにそれぞれの台座を作成した.図 3 に台座を上から見た際の赤外線 LED および PTr の配置 を示す.側面の一つにはコードを通すための穴が開いてい る.台座のサイズは縦 70 mm、横 70 mm、高さ 40 mm である.

赤外線 LED と PTr はマイクロコンピュータ(Arduino MEGA 2560)で制御する. Arduino で PTr に印加される

電圧の大きさを取得し,1024 段階のアナログ値としてシリ アル通信でコンピュータに送信する.コンピュータで受信 した値を元に,以下のソフトウェア用件に基づき,ゲルの 形状と変形によるインタラクションを推定する.

3.3 ソフトウェア

提案システムでは, 複数のゲルの形状による違い, すな わち何が置かれたかを識別し, インタラクションによる変 形の状態を取得する. PTr に印加される電圧の大きさを特 徴量とし, 機械学習によって, PTr の値を基に, ゲルの種 類とインタラクションを推定する. 予備実験の結果, 機械 学習の分類器としてサポートベクターマシン (SVM) を用 いることとした.

4. 評価実験

4.1 実験概要

PUNIcon による物体識別の精度評価を目的に,各形状 のゲルを設置した際の PTr の値を収集する実験を実施す る.また,物体認識に加え,インタラクションの取得が可 能であることを示すため,同形状のゲルを変形させた際の PTr の値を収集する実験も実施する.使用する PTr の数 と精度の関係,ゲルの高さの差による精度差を調べるため に,PTr の数が 4 個,6 個,8 個の条件,ゲルの高さが 20 mm,40 mm,60 mm の条件の,全9条件で実験を実施す る.なお,蛍光灯などの室内照明からはごく微量ながら赤 外線が放射されていて,デバイスの赤外線と干渉する可能 性があるため,暗室環境で実施する [18,19].

4.2 ゲルの形状の識別精度実験

4.2.1 実験手順

ゲルの形状は概念実証の基本的なものとして直方体、正 四角錐,円柱,円錐の4種類とした.図4に使用したゲル の形状を示す.以下の手順に従い、異なる形状のゲルを設 置した状態と台座にゲルを置かない状態の5条件で PTr の 値を取得した.各形状のゲルを設置し、1秒ごとにデータ を取得し、5秒間の PTr の値の平均値を記録する. 値を取 得した後、一度ゲルを台座から取り外し、再度ゲルを同じ 向きで設置し直す.この操作を5回繰り返した後、ゲルの 角度を変えて再度データを取得する.角度は18°刻みで、 0°から342°までの20段階とした.また、台座に何も置 かれていない状態では、5秒おきに PTr の値を取得する. 各形状においてデータを 100 個取得し, 1 つの条件につき 計 500 個のデータを使用する. 各 PTr 数, 各ゲルの高さで 同じ実験を繰り返し行い、総試行回数は 4500 回(500 回 ×3条件×3条件)であった.取得したデータを,平均が 0、分散が1になるよう標準化し、機械学習による分類精 度を評価した.精度の評価には層化5分割交差検証を使用 した.



図 4: 使用したゲルの形状

表 1:	各	PTr 数,	ゲルの高さにおけ	る形状識別の精度
------	---	--------	----------	----------

	20 mm	$40~\mathrm{mm}$	$60 \mathrm{~mm}$	全使用
4個	90.2~%	98.8~%	90.0~%	85.1 %
6個	92.0~%	95.4~%	94.2~%	88.2 %
8個	90.8~%	99.8~%	97.2~%	91.7 %

4.2.2 結果と考察

表1にPTrの数,ゲルの高さについて,各条件下での形 状識別精度を示す.また,図5に各条件に基づくモデルを 使用した5形状識別結果の混同行列を示す.さらに,図6 に全ての高さのゲルを対象とした計13種類の物体識別に おける,識別結果の混同行列を示す.

最も高い5物体識別精度を示したのは、PTrが8個、ゲ ルの高さが 40 mm の条件であり, 99.8 %であった. また, 全ての高さのゲルを使用した分類においても、PTr が8個 の条件が最も高精度であり、91.7 % であった. このことか ら,赤外線 LED が1つ, PTr が8つ以下という少数のセ ンサ構成でありながら、最大 99.8 % と、極めて高い精度 で形状の識別が可能であることが確認できた. PTr の数を 一定にした条件では、ゲルの高さが 40 mm の条件が最も 識別精度が高く, 60 mm, 20 mm の順で識別精度が低くな る傾向があった.ゲルの高さが 60 mm の条件では、底面 から天面までの距離が長くなるため、反射光が減少し PTr に届く光量が減ることで、識別精度が低下すると考えられ る. ゲルの高さが 20 mm の条件では、物体間での形状の 差異が小さく、光量の変化量が減少することで、識別精度 が低下すると考えられる. また, ゲルの高さが 40 mm の 条件では、四角錐と円錐の同じ錐型での誤認識が多くあっ た.これは、ゲルの高さが低いことで形状差が小さくなり、 特徴量の差異が顕著でなくなるためであると考えられる.

同一高さのゲルを使用した場合,PTr の数と精度の相関 は確認できなかったが,全ての高さのゲルを対象とした計 13 種類の形状分類では,PTr の数が多いほど精度が向上す るという結果が得られた.誤認識が生じる場合,同じ高さ の物体間での誤認識が多く,異なる高さの同じ形状は識別 できたため,異なる高さの認識が可能であると言える.





4.3 インタラクションの取得精度実験

4.3.1 実験手順

ゲルの種類の識別に加え、ゲルの変形によるインタラク ションの推定が可能であるかを確認するため、インタラク ションの取得精度の実験を実施した.本実験では円柱型の ゲルを使用した.動作の種類は、ゲルに接触していない(未 変形)状態、ゲルの天面を上から約 1.5 cm 押した状態(前 後左右の4方向)、ゲルの側面上部を2本の指で約1 cm 摘 んだ状態(前後と左右の2種類)の、計7種類を設定した. 図7に動作の種類を示す.以下の手順に従い、各インタラ クション時の PTr の値を取得した.各動作を行い,1秒ご とにデータを取得し,5秒間の PTr の値の平均値を記録す る.値を取得した後,一度ゲルを台座から取り外し,再度 ゲルを同じ向きで設置し直す.これを5回繰り返した後, ゲルの角度を変更して再度データを取得する.角度は18° 刻みで,0°から342°までの20段階とした.各インタラ クションにおいてデータを100個取得し,1つの条件につ き計700個のデータを使用する.各PTr 数,各ゲルの高さ で同じ実験を行い,総試行回数は6300回(700回×3条 件×3条件)であった.取得したデータを,平均が0,分



図 6: 全ての高さのゲルを使用した形状識別の混同行列

散が1になるよう標準化し,機械学習による分類精度を評価した.精度の評価には層化5分割交差検証を使用した.

4.3.2 結果と考察

表2に PTr の数, ゲルの高さについて, 各条件下でのイ ンタラクション識別精度を示す.また,図8に各条件に基 づくモデルを使用した, テストデータの識別結果の混同行



図 7:動作の種類

表 2:	各 PTr 数,	ゲルの高さにおけるイ	ンタ	ラク	ショ	ン取行	导の
	精度						

	$20 \mathrm{~mm}$	$40 \mathrm{~mm}$	$60 \mathrm{~mm}$
4個	94.0~%	90.9~%	86.6~%
6個	94.7~%	99.3~%	94.6~%
8個	96.6~%	96.4~%	92.0~%

列を示す.

最も高い精度を示したのは、PTr が 8 個、ゲルの高さが 40 mm の条件であり、識別精度は 99.3 %であった.形状 識別の結果と同様に、極めて高精度でインタラクションの 識別が可能であることを確認した.PTr の数を一定にした 条件では、ゲルの高さが 40 mm の条件が最も識別精度が高 く、20 mm、60 mm の順で識別精度が低くなる傾向があっ た.特に、ゲルの高さが 60 mm の条件よりも、20 mm の 場合の方が精度が高くなった理由として、20 mm の条件 の方が LED から反射面までの距離が近く、ゲルに触れて いる状態とゲルに触れていない状態で、PTr の値の差が大 きかったことが精度向上に影響したと考えられる.

5. 議論・展望

5.1 デバイス全体の精度

本実験では、基本的な形状として円柱型のゲルを使用した場合のみでインタラクションの取得精度を検証したが、 PTr の数を一定にした条件では、ゲルの高さが 40 mm の 条件が最も精度が高く、ゲルの高さを一定にした条件で は、PTr の数が多いほど精度が高い.よって、ゲルの高さ が 40mm、PTr の数が 8 個の条件で、最もインタラクショ ン取得精度が高くなると推測できる.他の形状についても 光の透過度などは円柱と変わらないことから、実際にイン タラクションの取得精度を検証する必要があるものの、同 様な結果が得られると期待できる.

5.2 利点

PUNIcon には,既存の柔らかい物体を用いたデバイスと 比較して二つの利点がある.一つ目は,装置が軽量で小型 であるため,持ち運びが容易である点である.デバイスの





⁽i) PTr 数:8, ゲルの高さ:60 mm



サイズが小さいうえ, 台座の固定が不要であるため, ユー ザが自由にデバイスを移動させることができる.二つ目 は、ゲルの交換が容易である点である. 仮にゲルが劣化し て正常に機能しなくなった場合でも、システムを再構築す る必要はなく、ゲルの交換のみで対応可能である.また、 赤外線 LED と PTr を平面上に並べることで複数のゲルデ バイスを同時に利用することが可能であり, 例えば複数の 入力機能を持つデバイスをユーザに最適な形状にデザイン できるなどの応用が考えられる.

5.3 他の形状でのインタラクション取得

本研究では,円柱型のゲルを使用した際のインタラク ション取得精度を調査したが、異なる形状のゲルにおいて も同様に変形からインタラクションを取得できると考えら れる. 円柱型のゲルでは押す操作と摘む操作を識別できた が、例えば正四角錐や円錐などの錐型のゲルでは、ジョイ スティックのように傾ける操作を識別できる可能性がある. また、本研究ではインタラクションによる操作の有無をバ イナリとして識別したが、インタラクション強度によって PTr への入射光量が変化することが確認できており、分類 器と入射光量を組み合わせることで,アナログ入力を可能 とするゲル物体型入力デバイスを実装できると考えられる.

5.4 ゲルの設計

本研究では、白色の 250 µm の粉末状反射材を用いてゲ ルを塗装した.塗装の方法によっては、より多くの赤外光 が反射することが期待できる.また、塗装を複数回重ねて 厚塗りすることで精度向上も見込まれる.しかし、塗装を 厚くすると、インタフェースとして使用するゲルが硬化し、 変形しにくくなることで、操作に支障をきたす可能性があ る.さらに、長期間の使用により、塗装にひび割れが生じ、 赤外光の反射が変化することで、PTr が正確な値を取得で きなくなる恐れもある.今後は、塗装材の色や粒子の大き さに注目し、塗装方法による精度の変化についても詳細に 調査する予定である.

5.5 アプリケーション

PUNIcon はリアルタイムで物体の識別が可能であるた め、物理的なアイコンとして活用できる.また、前述のよ うに PUNIcon を複数個使用することで、ボタン入力や方 向入力などの機能を提供し、ゲームコントローラとして の利用が可能である.さらに、PTr の数や配置を工夫する ことで、本研究で使用した形状に限らず、文字やキャラク ターなどの複雑な形状にも対応できる可能性がある.ま た、既存の入力デバイスに搭載されているボタンやジョイ スティックといった間接操作だけでなく、今後は操作対象 を直感的に扱う構造を構築する予定である.

6. まとめ

本研究では、柔らかい物体を用いた形状識別とインタラ クション取得の両方を実現するデバイス "PUNIcon" を提 案した. PUNIcon は赤外線 LED とフォトトランジスタを 利用し,柔らかい物体の変形を検知するシステムであり, 異なる形状や多様な変形パターンに対応可能な点が特徴で ある.本デバイスの性能評価として、ゲルの形状識別精度 と円柱型のゲルを使用したインタラクション取得の実験 を実施した.形状識別とインタラクション取得の精度は, フォトトランジスタの数とゲルの高さの組み合わせにより 変化し,それぞれ最大 99.8 %, 98.4 % という高精度を達 成した.実験結果から、多様なインタラクティブな体験に 対応できる可能性を示した.本システムの利点として,汎 用的な形状識別機能および弾性体とセンサ部分を分離した デバイス設計が挙げられる.これにより、特定の用途に依 存せず,幅広い分野での応用が期待できる.今後の課題と して、外部環境の光量や温度などの変動に強い耐性を備え たデバイスの改良が必要である.また、異なる柔軟素材や 形状に対応する認識アルゴリズムの開発も進め、さらなる 汎用性向上を目指す.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 JP24H00745 の助 成を受けた.

参考文献

- Ishii, H.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms, Conference on Human Factors in Computing Systems CHI/ACM Press (1997).
- [2] 平野光徳: タンジブルユーザインタフェースとその応用 例, 電気学会誌, Vol. 124, No. 9, pp. 587–590 (オンラ イン), DOI: 10.1541/ieejjournal.124.587 (2004).
- Ishii, H.: Tangible user interfaces, *The human-computer* interaction handbook, CRC Press, pp. 495–514 (2007).
- [4] Boem, A. and Troiano, G. M.: Non-Rigid HCI: A Review of Deformable Interfaces and Input, *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*, DIS '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 885–906 (online), DOI: 10.1145/3322276.3322347 (2019).
- [5] 續毅海,伊藤雄一,安藤正宏,細井俊輝,高嶋和毅,尾 上孝雄,北村喜文:StackBlock:積み重ね形状を認識する ブロック型 UI,情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 12, pp. 2565–2576 (2016).
- [6] Weiss, M., Wagner, J., Jansen, Y., Jennings, R., Khoshabeh, R., Hollan, J. D. and Borchers, J.: SLAP Widgets: Bridging the Gap between Virtual and Physical Controls on Tabletops, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 481–490 (online), DOI: 10.1145/1518701.1518779 (2009).
- [7] 中村淳之,伊藤雄一,尾上孝雄:磁気センサシートを用いた軸型オブジェクトに対するインタラクション取得手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 3, pp. 271-281 (2019).
- [8] Punpongsanon, P., Iwai, D. and Sato, K.: DeforMe: Projection-Based Visualization of Deformable Surfaces Using Invisible Textures, *SIGGRAPH Asia* 2013 Emerging Technologies, SA '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2542284.2542292 (2013).
- [9] Kamiyama, K., Kajimoto, H., Vlack, K., Kawakami, N., Mizota, T. and Tachi, S.: Gelforce, SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies, New York, NY, USA, Vol. 5 (online), available from (https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698600825234176) (2004).
- [10] Kakehi, Y., Jo, K., Sato, K., Minamizawa, K., Nii, H., Kawakami, N., Naemura, T. and Tachi, S.: ForceTile: Tabletop Tangible Interface with Vision-Based Force Distribution Sensing, ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos, SIGGRAPH '08, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/1401615.1401632 (2008).
- [11] Sato, T., Mamiya, H., Koike, H. and Fukuchi, K.: PhotoelasticTouch: Transparent Rubbery Tangible Interface Using an LCD and Photoelasticity, *Proceedings of the* 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '09, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 43–50 (online), DOI: 10.1145/1622176.1622185 (2009).
- [12] Slyper, R., Poupyrev, I. and Hodgins, J.: Sensing through structure: designing soft silicone sensors, *Pro*ceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, Association

for Computing Machinery, pp. 213–220 (online), DOI: 10.1145/1935701.1935744 (2010).

- [13] He, L., Laput, G., Brockmeyer, E. and Froehlich, J. E.: SqueezaPulse: Adding Interactive Input to Fabricated Objects Using Corrugated Tubes and Air Pulses, Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 341–350 (online), DOI: 10.1145/3024969.3024976 (2017).
- [14] Sato, M., Yoshida, S., Olwal, A., Shi, B., Hiyama, A., Tanikawa, T., Hirose, M. and Raskar, R.: Spec-Trans: Versatile Material Classification for Interaction with Textureless, Specular and Transparent Surfaces, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 2191–2200 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702169 (2015).
- [15] Sugiura, Y., Kakehi, G., Withana, A., Lee, C., Sakamoto, D., Sugimoto, M., Inami, M. and Igarashi, T.: Detecting shape deformation of soft objects using directional photoreflectivity measurement, *Proceedings of the* 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 509–516 (online), DOI: 10.1145/2047196.2047263 (2011).
- [16] Ogata, M., Sugiura, Y., Makino, Y., Inami, M. and Imai, M.: SenSkin: Adapting Skin as a Soft Interface, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 539–544 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502039 (2013).
- [17] Kadowaki, A., Yoshikai, T., Hayashi, M. and Inaba, M.: Development of soft sensor exterior embedded with multi-axis deformable tactile sensor system, RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp. 1093–1098 (online), DOI: 10.1109/RO-MAN.2009.5326073 (2009).
- [18] 内藤卓哉:照明の化学1,化学と教育,Vol. 65, No. 11, pp. 574–577(オンライン), DOI: 10.20665/kakyoshi.65.11_574 (2017).
- [19] 植田和茂:照明の化学 2,化学と教育,Vol. 65, No. 11, pp. 578-581 (オンライン), DOI: 10.20665/kakyoshi.65.11_578 (2017).