

AcrySense: インタラクティブなアクリル彫刻の提案と試作

三久保 莉也^{†1} 塚田 浩二^{‡2} 椎尾 一郎^{†3}

^{†1}, ³ お茶の水女子大学 〒112-0012 東京都文京区大塚 2-1-1

^{‡2} 公立はこだて未来大学/JST 〒041-0803 北海道函館市亀田中野町 116-2

E-mail: ^{†1} mikubo@is.ocha.ac.jp, ^{†2,3} {tsuka, siio}@acm.org

あらまし 近年、レーザー加工機などの普及に伴い、アクリル板の表面に彫刻を施した作品作り（アクリル彫刻）が身近になりつつある。こうしたアクリル彫刻は液晶バックライトのように、側面から光を投射することで彫刻模様が浮かび上がり、美しく魅せることができる。我々は、こうしたアクリル彫刻をシンプル/安価な仕組みでインタラクティブな入力装置として扱えるシステム「AcrySense」を提案する。AcrySenseは、LEDとフォトダイオードが配置された基板をアクリル彫刻の下部に配置し、LEDを光源としつつ、アクリル板内で反射したフォトダイオードへの入射光を検出する。本論文では、まずAcrySenseのコンセプト、実装について述べ、次に、AcrySenseを用いた応用例を紹介する。さらに、提案システムの評価実験を行い、アクリル彫刻のデザインに関する制約を把握する。

キーワード インタラクティブ、入出力インタフェース、ファブリケーション

AcrySense: Interactive Carved Acrylic Board

Marina MIKUBO[†] Koji TSUKADA[‡] and Itiro SIIO[‡]

[†] Ochanomizu University 2-1-1 Ohtsuka, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-0012 Japan

[‡] Future University Hakodate/ JST 116-2 Kamedanakano-machi, Hakodate-shi, Hokkaido, 041-0803 Japan

E-mail: [†] mikubo@is.ocha.ac.jp, [‡] {tsuka, siio}@acm.org

Abstract These days, the carved acrylic boards became popular because the laser cutters have widespread. When an acrylic board is lighted from its side with LEDs like a LCD backlight, the carved patterns become beautifully lighted. We propose an interactive system, “AcrySense”, which can treat a carved acrylic board as an input device with simple and inexpensive configuration. The AcrySense mainly consists of a carved acrylic board and main boards (LEDs, Photo Transistor and a micro controller) on the sides. This paper describes the concept and implementation of the system.

Keyword Interactive device, Input/Output Interface, Fabrication

1. はじめに

近年、個人が自由にものづくりをする、パーソナル・ファブリケーションが注目されており[1]、3Dプリンタやレーザー加工機などの工作機械を備え、一般市民に利用機会を提供する実験工房 FabLab¹が各地に設立されている。特に、レーザー加工機は、コンピュータデータからアクリル/木材などを切断/彫刻加工することができ、その手軽さから FabLab 等でも幅広く活用されている。本稿では、レーザーカッターを用いて手軽に製作できるアクリル彫刻（アクリルを切断したり、表面に彫刻加工をする作品作り）に着目する。アクリル彫刻は単体でも美観に優れるが、液晶バックライトのように側面から光を照射することで、彫刻から光が漏れ出し、魅力的な表現ができる。我々は、自作のアクリル彫刻と組み合わせて利用することで、インタラクティブな入出力を実現できるシステム

「AcrySense」を提案する。我々は、彫刻部からの光の漏れに着目し、彫刻部を指で触れることでアクリル板内の光量が増えることを確認した。そこで彫刻部への接触を AcrySense への入力操作とし、この光量の変化を元に接触した彫刻部の位置を推定する機構を考案した。LEDとフォトダイオード(以下、PD)がペアで配置された基板をアクリル彫刻の下部に設置し、入射方向に戻る光量をPDで検出する。

2. 関連研究

HCIの分野では、平面上のセンシングに関する研究が多数提案されている。平面上での物体検出の主な手法の1つとして、FTIR方式が提案されている[2, 3, 4]。この手法は、赤外光をカメラで撮影した画像をもとに平面上の接触位置を検出するものである。そのため、平面の上下どちらかに、カメラを設置するための一定の空間が必要である。また、静電容量方式によるタッ

¹ <http://fablabjapan.org/>

チ検出も広く用いられている。SmartSkin[5]は、網状の電極を面上に敷設し、網交点と人体との距離を静電容量変化によって計測しており、さまざまな物体の面に組み込むことでインタラクティブなものにする可能性をもっている。これらの手法では、平面の上下空間あるいは平面に直に接する位置に検出機構が置かれるが、それに対し AcrySense では、アクリル板下部に入出力機構を集約する。側面一カ所に集約することにより、アクリル彫刻の外観を損ねずに入力機能を付加することができ。また、アクリル彫刻の差し替えが手軽に行えるデバイスを制作することが可能となる。

他の検出手法として、物体に光を当て、反射してきた光を検出することで物体の有無や位置を判定するフォトフレクタの機構を利用したセンシング手法がある。Butlerらは液晶ディスプレイの内部にフォトフレクタアレイを埋め込み、指の形やジェスチャを認識するシステム [6] を提案している。AcrySense は、フォトフレクタの機構で接触位置を検出する手法を、彫刻が施されたアクリル板に応用した。また、検出機構を平面上ではなく、アクリル板下部の一辺に集約する。

3. AcrySense

我々は、アクリル彫刻で用いる照明の隣に簡易なセンサを配置した基板を自作のアクリル彫刻に取り付けるだけで入出力装置にできるシステムとして AcrySense を提案する。AcrySense では、個人がデザインしたアクリル彫刻を照明台に設置し、用途に応じたソフトウェアを組み合わせることで、例えば部屋の見取り図が彫刻されたアクリル彫刻に照明の操作機能を搭載するなど、さまざまなアプリケーションを構築することができる (図 1)。次節では、AcrySense の入出力について記述する。

3.1. 入力

我々は、彫刻部を指で触れることでアクリル板内の光量が増えることを確認した。この光量変化の原因として以下が考えられる。すなわち、図 2 左のように、アクリル彫刻の側面から LED を照射すると、彫刻部の断面から光が漏れ出し、彫刻部で乱反射して、明るく見える。ここで、図 2 右のように彫刻部を指などで押さえると、彫刻部から漏れた光が指によって反射し、入射した方向に戻る光路ができ、光量が増える。この現象を利用して、光源への戻り光量変化を元に指が接触した彫刻部を推定する機構を考案した。これにより AcrySense を入力装置とすることができる。シンプルかつ安価な構成とするため、アクリル板下に LED と PD を設置し、PD を利用して戻り光量のセンシングを行う。

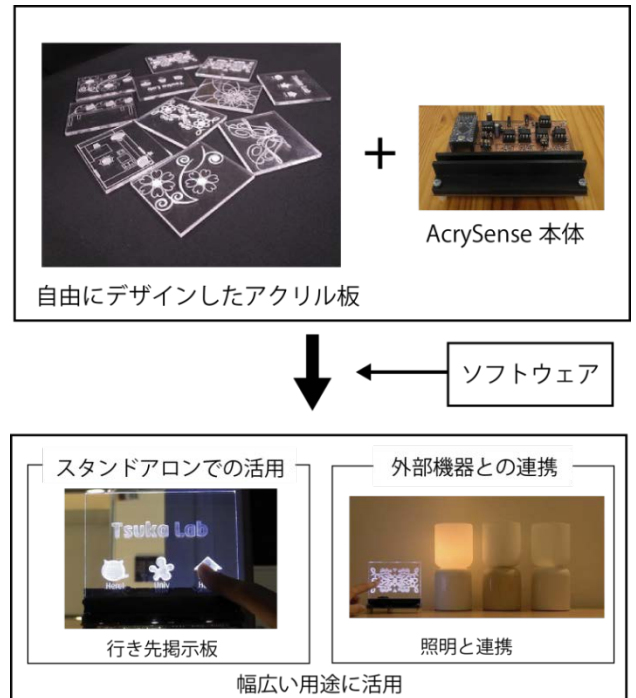


図 1 AcrySense のコンセプト
自由にデザインしたアクリル彫刻をソフトウェアに
応じてさまざまな用途に活用する

戻り光量変化は彫刻の深さにも依存する。すなわち、図 3 に示すように、彫刻が浅い場合では、深い場合と比べ入射方向に帰還する光量が大幅に減少する。この特性を利用し、AcrySense では彫刻の深さを調整することで、彫刻の一部分のみを入力部とする。

以上のようにして、通常のアクリル彫刻に入力機能を追加することで、インタラクティブなアクリル彫刻を実現できる。

3.2. 出力

アクリル彫刻を利用者が触ることに対して、2 種類のフィードバックを返す仕組みを実装した。その 1 つは、アクリル彫刻照明用 LED の点滅や色を変化させる基本的なフィードバックである。2 つ目は、AcrySense に接続した PC を介して、照明、音楽プレイヤー、エアコンなどの外部機器をコントロールする方式である。後者では、PC に接続した X10² / Hue³ / iRemocon⁴等を利用することで、さまざまな家電製品のコントロールを実現する。

² 電灯線通信で照明器具や家電機器の電源 (on/off や電圧) を制御するための規格

³ <http://www.mee> <http://www.meethue.com/ja-US>

⁴ <http://i-remocon.com/>

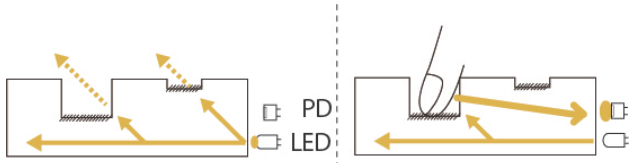


図 2 PD に入射する光量の変化 (アクリル板断面図)

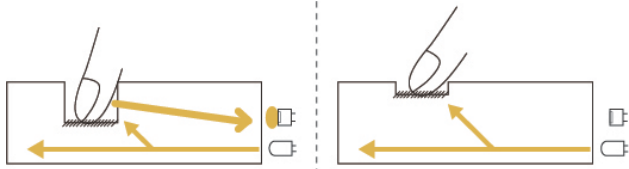


図 3 彫刻の深さによる光量の変化

4. 実装

図 4 に AcrySense のデバイス構成を示す。AcrySense は、メイン基板、アクリル彫刻、コネクタパーツで主に構成されている。メイン基板は 80mm×100mm で、アクリル板の下部に設置する。基板には LED と PD をペアで 3 セット配置しており、LED と PD の制御は Arduino ProMini で行う (図 8)。ペア数は、LED と PD の大きさを考慮し、一定の精度 (3 箇所を識別する) を確保しつつ、シンプルな構成となるよう決定した。PD は光源に入射する光量をセンシングするため、LED の隣に設置する。本プロトタイプでは、LED は輝度の高い白色 LED (NSSW157T, 輝度 8500mcd) もしくは、フルカラー LED (JRGB1316LS) を、PD は価格と検出感度を考慮し、表面実装用フォトダイオード PS1101W を使用している。図 5 左は、我々が以前設計した旧プロトタイプ基板である [7]。LED と PD 中心のシンプルな構成となっていたが、彫刻から外光を取り込んでしまうため、蛍光灯による影響を強く受けていた。そこで、本プロトタイプ基板では、汎用オペアンプ (NJM4558DD) 等を用いて、検出部にバンドパスフィルタと増幅/整流/平滑回路を組み込んだ (図 5 右)。LED を 31.25kHz で点滅させ、PD からの信号に通過中心周波数 33.12kHz のバンドパスフィルタを通すことで、外光の影響を軽減している。

アクリル彫刻には、大きさ縦 85mm×横 100mm、厚さ 5mm の透明アクリル板を利用した。彫刻模様は、入力部 2.5mm 程度、その他部分は 0.3mm 程度に彫刻している。

基板とアクリル彫刻はコネクタパーツで固定したものである (図 4 右)。コネクタパーツは、2 つの L 字型板と穴のあいた薄い板で構成される (図 6)。これらは、基板、薄い L 字型板の順で重ね、ネジで固定されている。薄い板には、アクリル彫刻を基板に設置する際のスペーサーとしての役割と、LED の光が PD に直接入射することを防ぐ仕切りとしての役割がある。L 字型板は、2 枚の板をアクリル用接着剤で垂直に固定している。この L

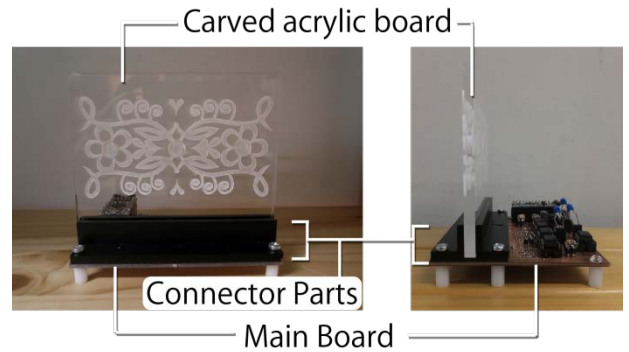


図 4 プロトタイプの外観と構成

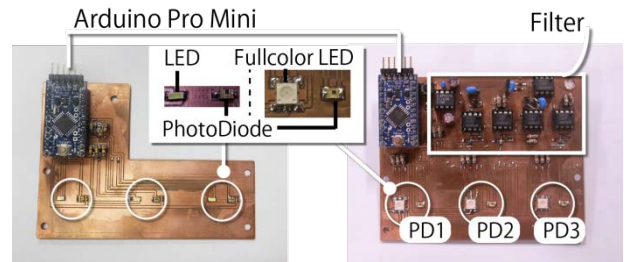


図 5 プロトタイプの基板部分
(左図：旧基板、右図：耐環境光基板)

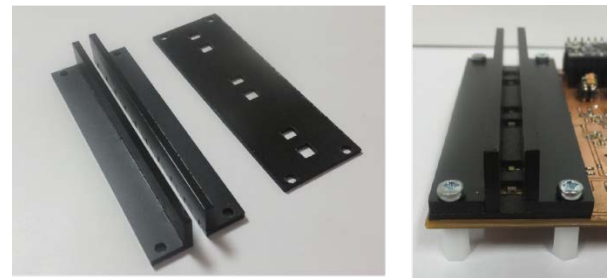


図 6 アクリル彫刻を固定するコネクタパーツ

字型板 2 つを使い両側から支えることで、アクリル彫刻を垂直に固定している。製作者は、アクリル彫刻をコネクタパーツの横から差し込むことによって、簡単に取り付けることができる。

5. 応用例

本章では、AcrySense の応用例について述べる。我々は、応用システムとして、AcrySense 単体 (スタンドアロン) で動作するものと、外部機器と連動して動作するものを構築した。

スタンドアロンシステムは、入力に対して光や音でフィードバックを返す。図 7 上は研究室の前などに設置する行き先掲示板の応用例である。ここでは、在室/学内/帰宅の 3 つのアイコンをアクリルに彫刻した。利用者が彫刻部に触れると、その下部の LED がゆっくり点滅をはじめ、現在の在室状態を表現する。図 7 下は、ドアチ

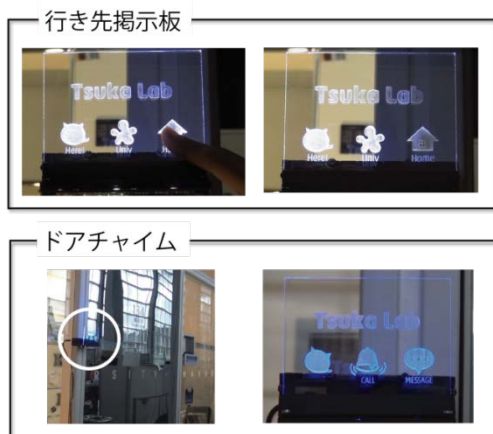


図 7 スタンドアロンの応用. 好きな彫刻を用いて、触れた個所が点滅する行き先掲示板（上）や、スピーカーなどを追加してドアチャイム（下）として活用できる。

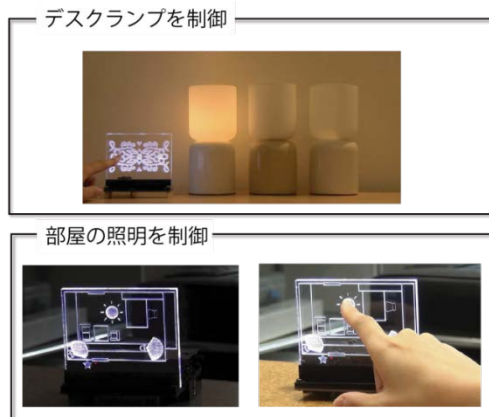


図 8 外部機器連携の応用例. X10 や赤外線を介して、外部尾照明などを制御できる。模様を施した亚克力板（上）や、部屋の見取り図（下）など、用途や故小見に応じたデザインを手軽に行える。

チャイムの応用例である。AcrySense はスピーカーを追加し、ベルアイコンにチャイム機能を組み込んだ。図 7 のように、AcrySense では、亚克力彫刻のデザインとソフトウェアを変更することで、手軽にバリエーションを増やすことが可能である。

外部機器連動の応用としては、入力部をスイッチに見立て、デスクランプ／部屋の照明を制御するシステムを実装した（図 8）。用途は、上段下段ともほぼ同じであるが、上段はきれいな模様の中に入力部を組み込んでおり、下段は部屋の見取り図に描いた照明アイコンを入力部としている。このように、好みのデザインの亚克力彫刻を用いて、システムを利用することができる。

いずれも基板部分は共通であり、亚克力彫刻のデザインとソフトウェアを変更することで、手軽に幅広く応用す

ることができる。現在のシステムでは、亚克力彫刻ごとに手でシステムを設定しているが、将来的にはソフトウェア機能を手軽に切り替えられるよう設計し、好みのデザインで亚克力板を彫刻し、ソフトウェアを選択するだけで、手軽にアプリケーションを構築できる環境を目指す。

6. 評価実験

6.1. 目的

本研究の最終的な目的は、個人がデザインし、作成した亚克力彫刻を AcrySense 本体に取り付け、ソフトウェアを組み合わせ、日常生活でさまざまな用途に利用することである。すべての入力部が機能する亚克力彫刻を設計するためには、入力部のデザインに関する制約を把握する必要がある。入力部のデザイン要素には、入力部の位置、大きさ、形が考えられるが、特に位置による影響が大きいと推測される。よって、本稿では「位置」に焦点を当て、入力部の配置の自由度と検出精度について、プロトタイプを用いて調査した。

6.2. 実験内容

入力部を複数配置する場合、入力部と PD 間の光路が他の入力部によって遮蔽される場合と、遮蔽されない場合で、指接触の認識精度が大幅に変化すると予想される。そこで本稿では、遮蔽の無い配置の場合と遮蔽の有る配置の場合における接触認識精度の変化について報告する。実験では、入力部のみ彫刻された亚克力板を用いて、入力部接触時と非接触時の各 PD の出力値の差分（変化量）を記録し、各入力部の接触を独立して認識可能であるか調査する。

遮蔽の無い場合は、入力部を検出部から離れた場所や、検出部の真上以外の場所に設置すると、戻り光量が低下するため、指接触の検出が困難になると予想される。そこで、水平方向に配置可能な入力部の数と、検出部から入力部までの垂直距離と認識精度の関係について調べるため、入力部が水平方向に 5 つ配置され、検出部までの距離が異なる 3 種類の亚克力板 A, B, C（図 9）を利用し、実験を行った。亚克力板 A は距離 25mm、亚克力板 B は距離 50mm、亚克力板 C は距離 75mm の位置に入力部を配置した。また、各亚克力板入力部 1, 3, 5 は本システムに設置した時に各 PD の真上に、入力部 2, 4 はその中間にくるように配置し、全て 2.6mm の深さで彫刻した。

遮蔽の有る場合の実験では、亚克力板 D, E（図 10）を利用した。全ての入力部を各 PD の真上に、入力部 1, 2, 3 は検出部から入力部までの距離が 75mm、入力部 4, 5, 6 は 50mm の位置に配置した。亚克力板 D では入力部を全て深さ 2.6mm で彫刻したが、亚克力板 E では上段を深さ 3.9mm で、下段を深さ 2.6mm で彫刻した。

利用した亚克力板は全て、大きさは縦 85mm×横 100mm、厚さ 5mm で、各亚克力板に設けた入力部の形

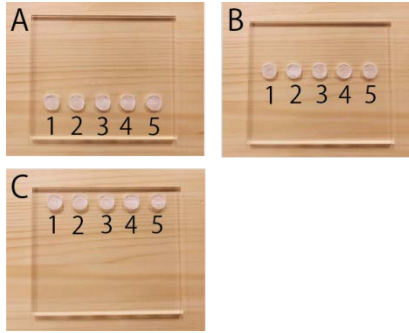


図 9 遮蔽の無い配置の実験に利用したアクリル板。アクリル板 A では、検出部から距離が 25mm に、アクリル板 B では 50mm に、アクリル板 C では 75mm に入力部を配置している。

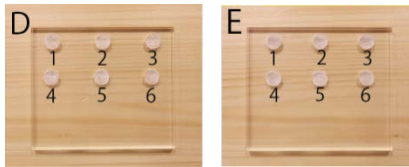


図 10 遮蔽の有る配置の実験に利用したアクリル板。アクリル板 D の入力部は全て深さ 2.6mm に、アクリル板 E では、下段を 2.6mm、上段を 3.9mm に彫刻している。

形状は日本人成人の指の大きさを考慮し、直径 10mm の円形に統一した。

6.3. 手法

実験者はアクリル板に触れない状態でシステムを起動し、システムは各 PD の出力値⁵を記録する。そして、実験者は人差し指で入力部を順番に 1 つずつ触れる。この動作を 10 回繰り返した上で、各 PD の変化量を記録した。ただし、変化量が 2 未満の場合は、誤差として切り捨てた。この操作をアクリル板 A~E を用いて行った。

6.4. 結果と考察

6.4.1. 遮蔽の無い配置における検出性能

実験結果を図 11、図 12、図 13 に示す。各グラフ中の PD1, 2, 3 は、本システムの PD の出力値であり、図 5 に示す PD1, 2, 3 に対応する。全体的に妥当な結果が出ており、各アクリル板において、入力部 1~5 まで異なる組み合わせの PD に一定の変化量が得られた。

一方で、一部例外が確認された。まず、アクリル板 A の実験においては、入力部 A-2, 4 が他 3 つの入力部の変化量に比べ極端に少ない結果を得た。これは、入力部 B-2, 4 や C-2, 4 と比べ、入力部から検出部までの距離が短い

⁵ この値は、10bit の A/D 変換を通して、0-1023 にデジタル化した値である。

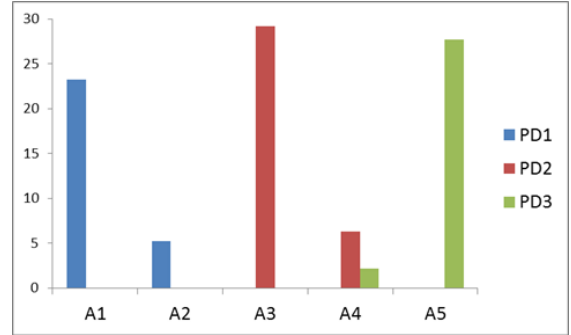


図 11 アクリル板 A (検出部から距離 25mm の位置に入力部を配置) において入力部操作した時の PD 出力値の変化量の平均

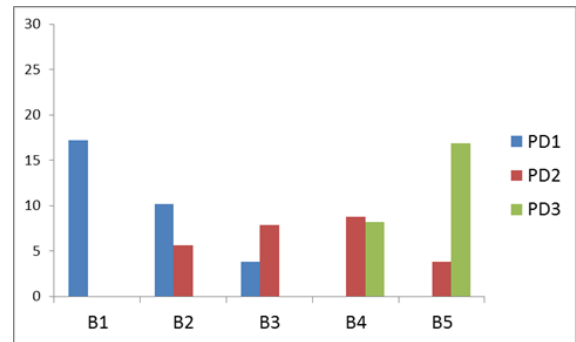


図 12 アクリル板 B (検出部から距離 50mm の位置に入力部を配置) において入力部操作した時の PD 出力値の変化量の平均

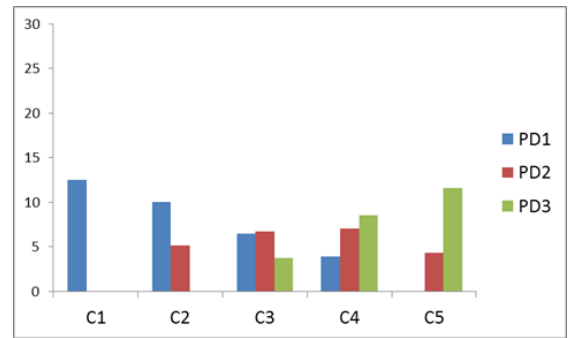


図 13 アクリル板 C (検出部から距離 75mm の位置に入力部を配置) において入力部操作した時の PD 出力値の変化量の平均

ため、両隣の PD に十分に反射光が届かなかったことが原因であると考えている。アクリル板 B, C においては、中央の入力部 3 に比べ、両端の入力部 1, 5 接触時における真下の PD の変化量が多い結果を得た。原因として、アクリル板の側面に近い両端の入力部では、側面の反射の影響があるのではないかと考えている。すなわち、側面で反射する光路により、指接触による光量変化が効率的に伝達されていると推測している。一方で、入力部 C-1, 5 においては、検出部からの距離がのびたため入力部 B-1, 5 に比

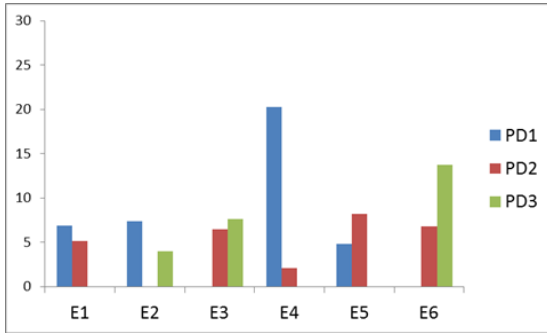


図 14 アクリル板 E (検出部から距離 50mm に配置した入力部は深さ 2.6mm, 距離 75mm に配置した入力部は深さ 3.9mm に彫刻) において入力操作した時の PD 出力値の変化量の平均

べ変化量が小さくなっている。また、入力部 C-3 では B-2 と比べ PD3 が、C-4 では B-4 と比べ PD1 の変化量が増えている。これは、距離がのびたことにより指から反射した光が拡散し PD に入射したと考える。

以上より、一部の入力部では PD の変化量が少ないものの、いずれかの PD において一定の変化量が得られているため、適切な閾値を設けることで接触位置を推定できると考える。このことから、今回のシステムでは、高さによらず、水平方向に 5 カ所の入力部を配置可能であることが判明した。

6.4.2. 遮蔽の有る配置における検出性能

まず、アクリル板 D を用いた実験を行った。実験より、下段の D-4, 5, 6 の変化量については、入力部 B-1, 3, 5 接触時とさほど変わらない結果を得たが、上段の D-1, 2, 3 については、1 以下の変化量しかなく、全く検出ができなかった。しかし、先の実験より、入力部 C-1, 3, 5 では個々の接触を検出できたため、検出できない原因は検出部から入力部までの距離ではなく、上段入力部と PD 間の光路を遮蔽する位置に下段入力部が配置されているからだと考えられる。

彫刻の深さを変えることで、遮蔽された入力部も検出されると考え、次に上段と下段の入力部の深さを変えたアクリル板 E を利用して実験を行った。実験結果を図 14 に示す。入力部 E-4, 5, 6 接触時は、各 PD の変化量に明確な違いが出ており、識別は容易であると考えられる。一方、入力部 E-1, 2, 3 接触時は、PD1, 2 で異なる入力部において同程度の変化量を確認したが、入力部毎に一定の変化量を示す PD の組み合わせが異なるため識別可能だと考える。ここで、入力部 E-2 のみ、真下の PD (PD2) でほとんど変化量を検出できなかったのだが、その原因は、先の実験で見られた現象と同様に、入力部 E-1, 3 接触時は側面の反射の影響をうけていることが考えられる。また、入力部 E-1, 2, 3 共に、隣接した PD においても一定

の変化量が確認できるが、これはアクリル板 C と同様に、検出部からの距離が長く、指からの反射光が拡散していることが原因だと推測する。

以上より、それぞれ異なる組み合わせの PD において一定の変化量が確認できるため、上段と下段で彫刻の深さを変えることによって、他入力部と PD 間の光路を遮蔽する位置に入力部を配置した場合もそれぞれ独立して検出可能だと判断する。

7. まとめ

本研究では、パーソナル・ファブ리케이션が注目され始めている流れを受け、個人が気軽に制作が可能となりつつあるアクリル彫刻にインタラクティブな入力機能を付加させることができるシステムを提案した。深く彫刻した部分を指で触れることを入力操作とし、システムはアクリル板内の光量変化を元に接触した彫刻の位置を推定する。本論文では、接触検出手法と実装について述べ、さらに、さまざまなアクリル彫刻に異なるソフトウェアを組み込んだ AcrySense の応用例を紹介した。今後は、評価実験より得られた入力部デザインの制約を元に、実際にデザインしたアクリル彫刻をレーザー加工機で作る作業から含めたワークショップを開催し、AcrySense の将来性や課題を把握する。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構さきがけプログラムの支援を受けた。

文 献

- [1] Neil A. Gershenfeld: Fab: The Coming Revolution on Your Desktop--from Personal Computers to Personal Fabrication, Basic Books (2005).
- [2] J. Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reaction. In Proc. UIST' 05, pp. 115 - 118. 2005
- [3] Y. Sakamoto, T. Yoshikawa, T. Oe, B. Shizuki and J. Tanaka, "Constructing an Elastic Touch Panel with Embedded IR-LEDs using Silicone Rubber", In Proc. IHCI 2012
- [4] A. Branzel, C. Holz, D. Hoffmann, D. Schmidt, M. Knaust, P. Luhne, R. Meusel, S. Richter, P. Baudish: GravitySpace: Tracking Users and Their Poses in a Smart Room Using a Pressure-Sensing Floor, In Proc. CHI 2013, 725-734.
- [5] J.Rekimoto: SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In Proc. CHI'02, pp. 113-120. ACM, 2002
- [6] A. Butler, S. Izadi, S. Hodges, "Sidesight: multi-"touch" interaction around small devices", In UIST '08, pp. 201 - 204. ACM, 2008
- [7] M. Mikubo, K. Tsukada and I. Siio, AcrySense: Interactive Carved Acrylic Board. In Proc. UbiComp2013 , pp. 1--4.