

抵抗測定に基づき種類識別を行うブロックシステムの検討

齋藤 圭汰^{1,a)} 富田 洋文^{2,b)} 安藤 宗孝^{2,c)} 志築 文太郎^{3,d)} 高橋 伸^{3,e)}

概要：我々は抵抗の測定を用いて種類および段数を識別する事ができるブロックシステムを検討している。本システムのブロックは抵抗を内蔵し、積み重ねられた際の合成抵抗が唯一となるように設計されている。本システムは積み重ねられたブロックの種類および段数をこの設計を基に識別する。また、識別結果から仮想空間内に 3D モデルを表示する。本システムの特徴として、カメラを用いないこと、回路が単純であること、複数ブロックの同時積み重ねが可能であることが挙げられる。

1. はじめに

家具を組み立てる、箱を積み重ねる、蓋をかぶせるといった実世界に存在する物体を組み合わせる操作は、日常生活において自然に発生するため、多くの人に親しまれている。一方、3D モデルの入力のような 3 次元仮想空間内にて物体を組み合わせる操作は、マウスおよびキーボードなどの既存の操作デバイスが仮想空間に対する操作に焦点を置いていないことから多くの人にとって親しみにくい。このため、実世界における物体を組み合わせる操作を、仮想空間における操作に適用する事ができれば、多くの人が容易に 3D モデルの入力を行う事ができる可能性がある。これを実現する手法の 1 つとして、実世界におけるブロックを用いた操作を仮想空間における 3D モデルの入力とする手法が提案されている（例：[1,10,11,16]）。

ブロックを用いた 3D モデルの入力を実現するためにはブロックの積み重ねられ方（以降、構造）を識別する必要がある。これまでに識別手法として大きく 2 つの手法が提案されてきた。1 つはブロックに電子回路を内蔵する手法、もう 1 つはブロックに回路を内蔵せず構造全体を俯瞰するカメラを用いる手法である。前者については、複雑な構造を識別するためには内蔵する回路を複雑にしなければなら

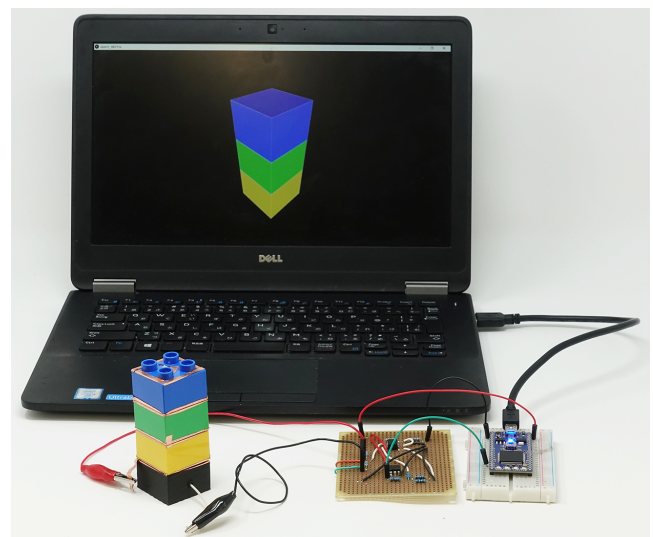


図 1 検討中のブロックシステム。ユーザがブロックを積むと、積まれたブロックに対応した色のブロックがコンピュータの画面に描画される。

ない。後者については、ブロックの作製コストが低いという利点がある一方、ユーザの手およびブロックによるオクルージョンが発生する。

我々は積み重ねられたブロックの種類および段数を識別することが可能なブロックシステム（図 1）を検討している。本システムのブロックは内部に抵抗器から成る単純な回路を内蔵し、システムは積み重ねられたブロックの下部において抵抗を測定することによって種類および段数を識別する。また、本システムは積み重ねられた複数のブロックを一度の測定によって識別可能である。なお、ブロックは電氣的に接続されるため、オクルージョンは発生しない。

¹ 筑波大学情報メディア創成学類
College of Media Arts, Science and Technology, University of Tsukuba
² 筑波大学システムコンピュータサイエンス専攻
Department of Computer Science, University of Tsukuba
³ 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba
a) ksaito@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
b) tomita@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
c) ando@iplab.cs.tsukuba.ac.jp
d) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp
e) shin@cs.tsukuba.ac.jp

2. 関連研究

これまで、ブロックの構造識別手法が多数提案されている。本研究と同じくブロック内に電子回路を内蔵する手法を述べる。ブロック内に電子回路を内蔵せず、カメラを用いる手法についても述べる。また、本研究と同じく、抵抗の変化を測定し、物体の識別を行う研究も示す。

2.1 ブロックの構造識別手法

ブロックの構造識別手法として、ブロックに電子回路を内蔵する手法およびカメラを用いる手法を述べる。

2.1.1 ブロックに電子回路を内蔵する手法

積み重ねられたブロックの構造識別手法として、マイクロコントローラ、距離センサ、およびジャイロセンサなどの能動素子を内蔵したブロックを用いる手法が提案されてきた。Andersonら [1] はブロックに内蔵されたマイクロコントローラ同士を通信させることにより組み立てられたブロックの構造識別を行った。Gorbetら [5] は正三角形の板を組み合わせてできる構造物の形状を板に内蔵したマイクロコントローラを用いて識別した。Andoら [2] は、ブロックの各面に赤外線 LED とフォトトランジスタをマトリクス状に敷き詰め、積み木のように任意の位置および角度にて重ねたブロック構造を識別した。また、Hsiehら [7] は、ブロックに RFID タグを複数取り付け、動作するタグを読み取ることによりブロックの積み重ねを識別した。積み重ねだけでなく、自由な角度でのブロック同士の接続を可能にした研究も存在する。Leenら [10] は加速度センサおよびジャイロセンサを内蔵した棒状のデバイスを自由な角度に接続し、デバイスによって構成される構造物の形状を識別させた。Wangら [14] は加速度センサおよびジャイロセンサを内蔵した 3 自由度を持つブロックを使用し、3D モデルの変形操作を行った。一方、本研究にて使用しているブロックはこれらの研究におけるブロックと異なり、能動素子を内蔵しないためブロック内の回路が簡易である。このため、ブロックの作製が容易であるという利点がある。

次に、本研究と同様に受動素子を内蔵したブロックを用いる手法を述べる。Chanら [4] は静電容量式のタッチパネル上に積み重ねられたブロックを識別するシステムを開発した。ブロック内には導体が内蔵され、この導体に触れることにより、タッチパネル上にブロックの種類に応じたタッチ点が生じる。ブロックの種類や段数の識別は、タッチ点のパターンの識別によって行われる。本研究は chenらのシステムと同じく種類と段数を識別できるが、種類識別に電極のパターンではなく抵抗を用いる点が異なる。静電容量計測を用いた他の手法として、吉田ら [16] の研究がある。吉田らは静電容量を内蔵したブロックを用いて、積み重なったブロックの静電容量を計測することにより、ブ

ロックの段数を識別した。また、電子素子以外をブロックに埋め込み、構造を識別する手法として、池川ら [8] の研究がある。池川らは永久磁石を内蔵したブロックによってできた構造物を磁気センサを用いて識別するシステムを開発した。本研究はこれらの研究と異なり、積み重ねられたブロックの段数だけでなく種類も識別可能である。

2.1.2 カメラを用いる手法

Millerら [11] や Guptaら [6] は、ブロックの構造および色を深度カメラを用いて識別するシステムを開発した。本研究はこれらの研究と異なり、全てのブロックを電氣的に接続するため、オクルージョンが発生しない。Baudischら [3] はグラスファイバとマーカによって構成されたブロックを用いた。カメラによって積み重ねた際のマーカの底面を撮影し、底面の見え方の違いからブロックの種類および段数を識別する。この研究はグラスファイバの形状を工夫し、下から撮影を行うことにより、オクルージョンの問題を解決した。一方、グラスファイバを使用した特殊なブロックを使わなければならない。

2.2 抵抗測定に基づく識別手法

抵抗値の変化を測定し、物体や状態の識別に応用した例を述べる。池松ら [9] は静電容量方式のタッチサーフェスに対し、抵抗を持つオブジェクトを介してタッチをすることにより、タッチ入力を拡張する手法を提案した。この研究では、それぞれのオブジェクトがもつ抵抗をオブジェクトの識別に利用している。中村ら [12] は、スポンジに導電性インクを染み込ませたセンサを開発した。このセンサは、スポンジの圧縮、ひねり、曲げ、せん断によって生じる抵抗の変化を測定することにより、これらの形状変化を検出する。本研究はこれらの研究と同じく抵抗測定を用いるが、これらの研究とは異なり、積み重ねられたブロックの種類および段数を識別するために抵抗測定を用いる。

3. 識別原理

我々は図 2 の回路において、 m 種類のブロックのすべての段数 n と並び順 ($m^1 + \dots + m^n$ 通り) に対して、合成抵抗が唯一となるような抵抗の組み合わせを見出した。合成抵抗が唯一となることを利用し、ブロックの種類および段数を識別することが可能である。本章において、積み重ねられたブロックの合成抵抗の計算方法、抵抗の選択方法、合成抵抗の唯一性の証明、ブロックの種類および段数の識別方法を述べる。

3.1 合成抵抗の計算方法

m 種類のブロックがあることを考える。1 つのブロックには図 2 左の回路が内蔵される。 R は m 種類のブロックにおいて共通な抵抗であり、 r_m は各ブロックにおいて異なる抵抗である。ブロックを積み重ねた場合、図 2 右の回

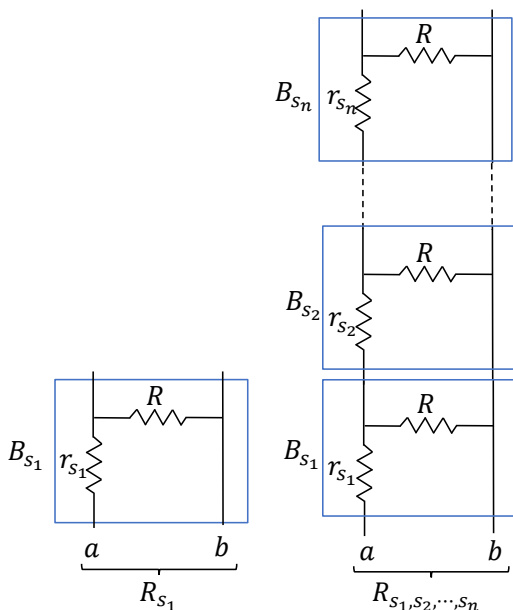


図 2 識別に用いる回路. 一つのブロックに内蔵される回路 (左). 積み重ねにより形成される回路 (右). $R_{s_1 s_2 \dots s_n}$ はブロックを n 段積んだ時の合成抵抗.

路が形成される. ここで, 図 2 右の回路において, 2 点 a, b 間の合成抵抗を考える. 任意の 1 つのブロック s_1 を積んだ場合, 2 点 a, b 間の合成抵抗 R_{s_1} は,

$$R_{s_1} = R + r_{s_1}$$

となる. ここで, s_i は下から i 段目に積み重ねられたブロックの種類を表す変数であり, $s_i \in \{1, 2, \dots, m\}$ となる. 次に, s_1 の上に任意のブロック s_2 を積み重ねることを考える. この時の 2 点 a, b 間で測定される合成抵抗は 2 変数関数

$$f(x, y) \equiv (R \times y)/(R + y) + x \quad (1)$$

によって求められ,

$$R_{s_1 s_2} = f(r_{s_1}, B_{s_2}) = (R \times B_{s_2})/(R + B_{s_2}) + r_{s_1} \quad (2)$$

となる (ただし, $B_{s_i} = R + r_{s_i}$). 3 段以上に積み重ねられた合成抵抗は関数 $f(x, y)$ を再帰的に使うことにより計算され, n 段のブロックの合成抵抗 $R_{s_1 s_2 \dots s_n}$ は,

$$R_{s_1 s_2 \dots s_n} = f(r_{s_1} f(r_{s_2} \dots f(r_{s_{n-1}} B_{s_n}) \dots)) \quad (3)$$

と求められる. ここで $s_1 s_2 \dots s_n$ は積み重ねたブロックの種類と段数を表す. 例えば, 1 段目に種類 “4” のブロック, 2 段目に種類 “5” のブロック, 3 段目に種類 “6” のブロックが積み重ねられた際, s_1 は 4, s_2 は 5, s_3 は 6 である.

3.2 ブロックに内蔵される抵抗の選択方法

積み重ねによって合成抵抗は変化し, この変化範囲は使

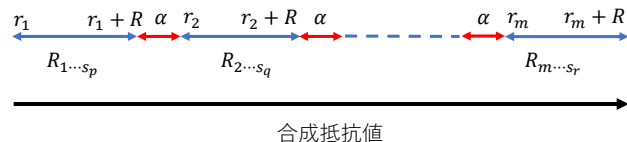


図 3 抵抗の選択方法. $R_{s_1 \dots s_n}$ は 1 段目のブロックに内蔵される抵抗によって定まる範囲において変化する. α はそれぞれの範囲を被らせないためにとる間隔である.

用するブロックの組み合わせによって異なる. したがって, この変化範囲が他のブロックの組み合わせと被らないようにブロックに内蔵する抵抗を選択する必要がある. 合成抵抗はブロックの積み重ねによって必ず減少するため, 変化範囲の上限は 1 段目に積まれたブロックの抵抗である $R + r_{s_1}$ となる. また, 式 1 より, $(R \times y)/(R + y)$ の項は多数のブロックが積み重ねることにより 0 に収束するため, 変化範囲の下限は r_{s_1} となる. これらのことから n 段のブロックの合成抵抗の変化範囲は,

$$r_{s_1} \leq R_{s_1 \dots s_n} \leq r_{s_1} + R$$

となる. したがって, 各ブロックに内蔵される種類識別に用いる抵抗 r_i を

$$r_{i+1} = r_i + R + \alpha \quad (1 \leq i \leq m, 0 < \alpha)$$

のように選択していくことにより, 図 3 に示すように, ブロックの積み重ねによる合成抵抗の変化範囲がブロックの種類によって被らなくなる.

3.3 合成抵抗が唯一となることの証明

1 段目のブロックが異なれば, 積み重ねによらず合成抵抗が異なり,

$$x_1 \neq y_1 \Rightarrow R_{x_1 x_2 \dots x_p} \neq R_{y_1 y_2 \dots y_q} \quad (4)$$

となる. 本節では, 2 段目以降の積み重ねに関して述べる. 合成抵抗は積み重ねによって必ず抵抗が減少するため,

$$R_{s_1} \neq R_{s_1 s_2} \quad (5)$$

となる. また, 2 段目のブロックが異なる種類の場合,

$$x_2 \neq y_2 \Rightarrow R_{s_1 x_2} \neq R_{s_1 y_2} \quad (6)$$

である. 式 4, 5, 6 より,

$$R_1 \neq \dots \neq R_m \neq R_{11} \neq \dots \neq R_{1m} \neq \dots \neq R_{mm} \quad (7)$$

となり, 1 段および 2 段のすべてのブロックの組み合わせにおいて, 合成抵抗が異なる. ここで, $1-m$ の各ブロックの上に, $1-m$ および 2 段のブロック $11-mm$ を積むことを考える. 式 7 よりこれらは異なる合成抵抗をもつことか

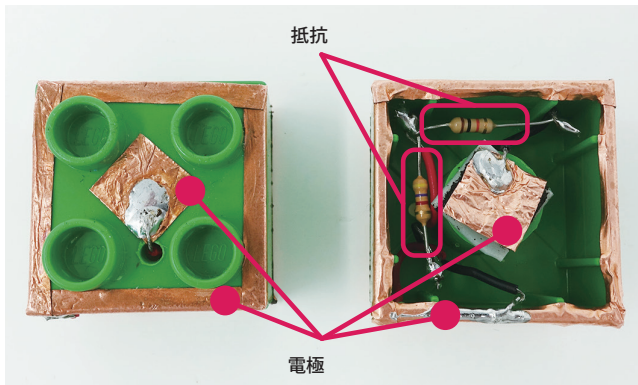


図 4 作製したブロック. 2×2 LEGO Duplo に電極と抵抗器を取り付けた. 左が上面の電極の形状. 右が底面の電極の形状.

ら, 式 4, 5, 6 より,

$$R_1 \neq \dots \neq R_{mm} \neq R_{111} \neq \dots \neq R_{mmm}$$

が成り立つ. さらに, $1-m$ の各ブロックの上に, $1-m$, $11-mm$ および $111-mmm$ のブロックを積み重ねることを繰り返すことにより, すべての種類と段数におけるブロック全体の合成抵抗の唯一性が漸的に証明される.

3.4 種類および段数の識別方法

3.2 節において示した抵抗の選択方法を用いることにより, すべての種類および段数において合成抵抗は唯一になる. このことを利用して本システムでは次のように種類および段数を識別する.

- (1) すべての種類および段数における抵抗を記録
- (2) 図 2 における 2 点 a, b 間の合成抵抗を測定
- (3) 測定値と記録した抵抗を比較
- (4) 最も近い合成抵抗の種類および段数と識別

4. 実装

我々のシステムはユーザが組み立てたブロックの構造を識別し, その識別結果を 3D モデルとして描画する. システムは抵抗を内蔵したブロック (図 4), 抵抗の測定を行うハードウェア (図 5), PC 上において動作する 3D モデリングアプリケーション (図 6) から構成される. 本節では, これらの構成要素の詳細を述べる.

4.1 抵抗器内蔵ブロック

我々は, 2×2 LEGO Duplo に抵抗器と電極を取り付けることによりブロックを作製した. 今回作製したブロックは, 青 ($r_1 = 390 \Omega$), 黄 ($r_2 = 5.1 \text{ k}\Omega$), 緑 ($r_3 = 10 \text{ k}\Omega$) の 3 種類であり, 共通の抵抗 R を $4.7 \text{ k}\Omega$ とした. なお, すべての抵抗の誤差率は 5% である. 図 4 にブロックの構成要素および電極の配置を示す. 電極は銅箔テープを用いて作られている. 底面の中央に配置された電極が図 2 における電極 a, 底面の周囲に配置された電極が図 2 における

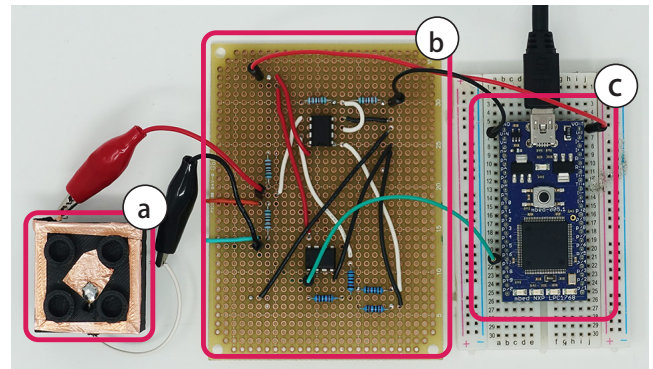


図 5 抵抗測定ハードウェア. a: ブロック接続用台座 b: 電圧増幅回路 c: 電圧測定用マイコン.

電極 b に相当する. 積み重ねにより, 底面の電極が他のブロック上面の電極と接触することにより, 図 2 右と等価な回路が形成される.

4.2 抵抗測定ハードウェア

積み重ねられたブロックの合成抵抗を測定するために, 図 5 に示す抵抗測定ハードウェアを実装した (図 5). 抵抗測定ハードウェアはブロック接続用の台座 (図 5a), 電圧増幅回路 (図 5b) および電圧測定用マイコン (図 5c) から成る. 電圧測定用マイコンとして ARM mbed NXP LPC1768 を使用した. 本マイコンは 12bit の AD コンバータを搭載し, 最大の入力電圧は 3.3 V である. 台座には 2 つの電極 (中心部と周辺部) が取り付けられており, これらの電極がブロックの電極と接続される. 本ハードウェアは台座の中心電極と周辺電極間の電圧 (測定電圧) を測定する. ブロックの積み重ねにより, 台座の電極間の合成抵抗が変化し, それにより測定電圧も変化する. 測定電圧はブロックの積み重ね構造によって異なるため, 測定電圧を読み取ることで構造を識別可能である. しかし, 合成抵抗の変化は積み重ね段数が多いほど小さくなり, 測定電圧の変化量も少なくなる. 測定電圧の変化量が, マイコンの分解能を下回ると識別ができないため, 識別可能な段数はマイコンの分解能に依存する. 我々は, 識別可能な段数を増やすため, 測定電圧を電圧増幅回路 (図 5b) によって 2 倍に増幅させた. これによって, より小さな電圧の変化を読み取ることが可能となる. なお, 増幅された測定電圧はマイコンによって 12bit ($3.3 \text{ V} \rightarrow 4096$) のデジタル値に変換され, PC へ送信される.

4.3 3D モデリングアプリケーション

積み重ねられたブロックを 3D モデルとして描画するアプリケーションを PC 上に実装した. アプリケーションの実装には Processing 3.3.7 を用いた. このアプリケーションは, 抵抗測定ハードウェアから取得した. 測定電圧を用いて, 積まれたブロックの種類および段数を識別し, その

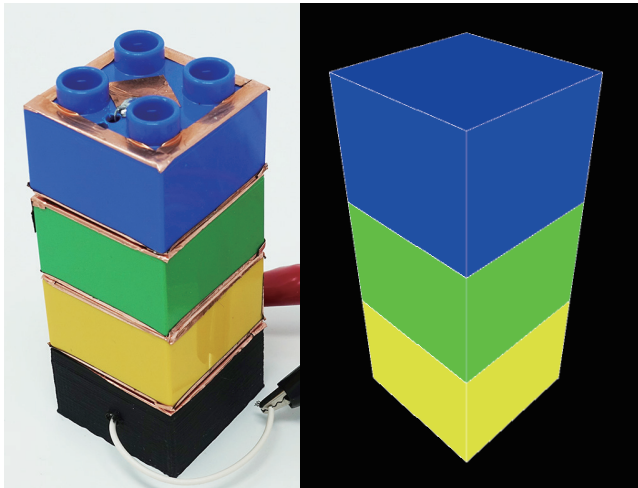


図 6 3D モデリングアプリケーションの動作例. ユーザが積み重ねたブロック (左). 描画された 3D モデル (右)

結果を 3D モデルとして描画する. 我々は, 事前にすべての積み重ねパターンに対応する測定電圧をアプリケーションに記録した. アプリケーションは抵抗測定ハードウェアから取得した測定電圧を, 記録された電圧と比較し, 最も近い電圧に対応した積み重ね構造を 3D モデルとして描画する. 下から黄, 緑, 青色のブロックを積み重ねた時のアプリケーションの動作例を図 6 に示す. なお, 描画される 3D モデルは, ブロックの構造に応じてリアルタイムに変化する.

5. 抵抗測定ハードウェアの予備実験

我々は検討したブロックシステムが識別可能な種類の数および段数を調査するために, 検討したブロックシステムと等価な回路を用いてブロックを積み重ねた際の電圧を測定する予備実験を行った.

5.1 測定方法

我々はブレッドボード上に, ブロックを積み重ねた際の回路と等価な回路を作製し, 抵抗測定ハードウェアを用いて, この回路に印加された電圧を測定した. 測定された電圧は図 5c の電圧測定用マイコンから 12 bit のデジタル値として PC に送信されたものである.

本予備実験においては, 我々はブロックの種類ごとに異なる 4 種類の抵抗を用いた ($A: r_A = 390 \Omega$, $B: r_B = 5.1 \text{ k}\Omega$, $C: r_C = 10 \text{ k}\Omega$, $D: r_D = 15 \text{ k}\Omega$). また, すべてのブロックに共通の抵抗として, $R = 4.7 \text{ k}\Omega$ を用いた. なお, すべての抵抗の誤差率は 1% である. 我々はこれらの抵抗の組み合わせを用いて, ブロックを 1-4 段積み重ねた際に形成される回路と等価な 340 通りの回路について電圧の測定を行った.

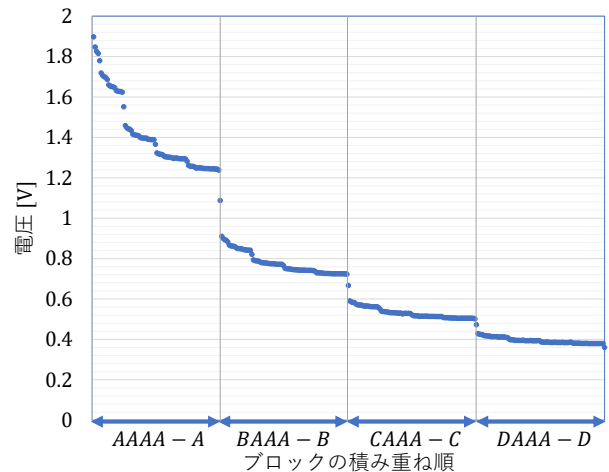


図 7 ブロックの積み重ね順の変化に対する電圧の測定結果. 1 段-4 段まで 4 種類のブロックと等価な回路を利用して測定を行った. 横軸はブロックの積み重ね順を表す. 4 段の AAAA から始まり, 4 段目から順に $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow$ “なし” の順に抵抗を入れ替えていき, “なし” となった段の一つ下の段を順に入れ替え, “なし” $\rightarrow A$ に戻るという順番に並んでいる.

5.2 測定結果と考察

電圧の測定結果を図 7 に示す. 横軸における矢印の範囲は 1 段目のブロックが A , B , C , または D であることを示しており, 1 段目のブロックによって電圧の変化の範囲が異なることが, 横軸のそれぞれの矢印の範囲が示す電圧の変化の範囲が異なることから確認できる. これは我々の設計に準じている. また, 図 7 から C または D といった, 4 種類のブロックの中において大きな抵抗のブロックを 1 段目に使用する場合, 電圧の変化量が小さくなることを確認できる. これは, 大きな抵抗の並列接続ほど, 抵抗の変化が小さいためである. このことは 1 段目以外に C または D を配置した場合においても発生した. このことから, 今回の予備実験において, C または D を配置した際に電圧が変化しないことがあった. 電圧が変化しなかった場合を除くと, 最も抵抗の大きい D を除く, A , B , および C の 3 種類のブロックを用いた場合に, 1-3 段におけるすべての組み合わせにおいて, 電圧が他の組み合わせと重複しないことを確認した. この実験結果から, 現状の我々のブロックシステムは 3 段 3 種類の識別が可能であることが示された.

6. 議論および今後の課題

我々のブロックシステムに関する議論および今後の課題を述べる.

6.1 2 次元および 3 次元方向への拡張

現状の我々のブロックシステムは積み重ね方向 (1 次元) へ配置されたブロックの識別のみが可能である. 3D モデリングアプリケーションに利用するためには, 横 (2 次元)

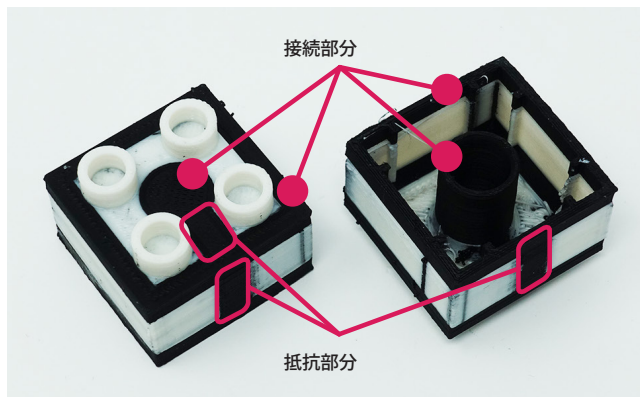


図 8 導電性フィラメントおよび非導電性フィラメントを用いて作製されたブロック。2times2 LEGO Duplo と同じ形状である。黒い部分が導電性 PLA, 白い部分が非導電性 ABS にて作製されている。

および奥行き（3次元）方向に配置されたブロックを識別する事が必須となる。このため、我々は次に、2次元および3次元方向に配置されたブロックを識別するためにシステムの拡張を行う。具体的には、複数のブロック接続用台座を使用することにより、2次元および3次元方向に配置されたブロックを識別可能にする。また、3Dモデルビューアに対しても2次元および3次元方向に対応させる。

6.2 識別可能な種類および段数の拡張

現状の我々のブロックシステムは、3段3種類までのブロックの積み重ねが識別可能であるが、より多くの種類および段数を識別することができれば、より複雑な構造を識別できる。このため、より複雑な構造を識別できるようにシステムの改善を行う。現状のシステムは、積み重ねられたブロックの種類および段数の増加に伴い、抵抗の変化が小さくなるため積み重ね可能なブロックの種類および段数が制限されている。このため、より精度の高い抵抗値の測定方法を用いる、増幅回路における電圧の増幅率を上げるなどの手法を用いて識別可能な種類および段数を拡張する。また、識別可能な種類および段数を増やすため、ブロックごとに内蔵する抵抗およびすべてのブロックに共通の抵抗の最適な組み合わせを調査する。

6.3 導電性フィラメントを用いたブロックの作製

本稿にて述べた抵抗器内蔵ブロックは、電極および抵抗器を2×2 LEGO Duploに取り付けることによって作製された。これに対して、先行研究（例：[13,15]）においては、回路を形成するための電子部品を、導電性フィラメントおよび非導電性フィラメントを使用し、3Dプリンタにて作製している。我々のシステムにおいても、3Dプリンタを用いて抵抗を持つブロックが作製できる可能性がある。図8に導電性フィラメントおよび非導電性フィラメントを使用し、3Dプリンタにて作製したブロックを示す。導電

性フィラメントを用いて抵抗部分を作製することにより、抵抗を持つブロックを作製できる。また、抵抗部分の導電性フィラメントの幅を変更する事により、ブロックが持つ抵抗を変える事が可能である。このことから、複数種類の抵抗を持つブロックを作製する事によって、3Dプリントしたブロックを用いて我々のシステムが実現できる可能性がある。しかし、現状、我々のシステムは3Dプリンタにて印刷したブロックを用いた構造は識別できない。この原因として、ブロック同士およびブロック接続用台座とブロックの接触が不安定であるため正確に電圧を測定できないこと、ブロックの持つ抵抗を自由に調節できないことなどがある。我々は今後、導電部分の安定した接触を実現するために作製するブロックの形状を再設計する。また、導電性フィラメントおよび非導電性フィラメントを用いて、任意の抵抗を持つブロックを作製する方法に関して調査を行う。

7. まとめ

我々は抵抗の測定を用いて種類および段数を識別する事のできるブロックシステムの検討を行った。検討したシステムは、抵抗を内蔵したブロックを用い、ブロックが積み重ねられた際の合成抵抗を計測する事によって積み重ねられたブロックの種類および段数の識別を行う。本稿において、我々はこのブロックシステムの原理および設計の検討を行った。さらにこの設計に基づいてブロックシステムを作製した。作製したシステムを用いて予備実験を行い、3段3種類のブロックの積み重ねが識別できる事を示した。また、導電性および非導電性フィラメントを用いた、3Dプリンタによる抵抗を持つブロックの作製を行い、このブロックを用いたシステムの実現可能性を示した。

参考文献

- [1] David Anderson, James L. Frankel, Joe Marks, Darren Leigh, Eddie Sullivan, Jonathan Yedidia, and Kathy Ryall. Building virtual structures with physical blocks. In *Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '99*, pp. 71–72, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [2] Masahiro Ando, Yuichi Itoh, Toshiki Hosoi, Kazuki Takashima, Kosuke Nakajima, and Yoshifumi Kitamura. StackBlock: Block-shaped interface for flexible stacking. In *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '14 Adjunct*, pp. 41–42, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [3] Patrick Baudisch, Torsten Becker, and Frederik Rudeck. Lumino: Tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '10*, pp. 1165–1174, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [4] Liwei Chan, Stefanie Müller, Anne Roudaut, and Patrick Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: Sensing stacks

- of building blocks, dials and sliders on capacitive touch screens. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 2189–2192, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [5] Matthew G. Gorbet, Maggie Orth, and Hiroshi Ishii. Triangles: Tangible interface for manipulation and exploration of digital information topography. In *Proceedings of the 16th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, pp. 49–56, New York, NY, USA, 1998. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [6] Ankit Gupta, Dieter Fox, Brian Curless, and Michael Cohen. DuploTrack: A real-time system for authoring and guiding Duplo block assembly. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 389–402, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [7] Meng-Ju Hsieh, Rong-Hao Liang, Da-Yuan Huang, Jheng-You Ke, and Bing-Yu Chen. RFIbricks: Interactive building blocks based on RFID. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 189:1–189:10, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [8] Koshi Ikegawa, Shuta Nakamae, and Buntarou Shizuki. A block system with magnetism-based structure recognition. In *Proceedings of the 2017 ACM CHI Symposium on Emerging Japanese HCI Research Collection*, CHI '17 Asian CHI Symposium, 2017.
- [9] Kaori Ikematsu and Itiro Sii. Ohmic-Touch: Extending touch interaction by indirect touch through resistive objects. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 521:1–521:8, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [10] Danny Leen, Raf Ramakers, and Kris Luyten. Strut-Modeling: A low-fidelity construction kit to iteratively model, test, and adapt 3D objects. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 471–479, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [11] Andrew Miller, Brandyn White, Emiko Charbonneau, Zach Kanzler, and Joseph J. LaViola Jr. Interactive 3D model acquisition and tracking of building block structures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No. 4, pp. 651–659, April 2012.
- [12] Satoshi Nakamaru, Ryosuke Nakayama, Ryuma Niyama, and Yasuaki Kakehi. FoamSense: Design of three dimensional soft sensors with porous materials. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 437–447, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [13] Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. MonoTouch: Single capacitive touch sensor that differentiates touch gestures. In *Proceedings of the 34th CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 2736–2743, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [14] Meng Wang, Kehua Lei, Zhichun Li, Haipeng Mi, and Yingqing Xu. TwistBlocks: Pluggable and twistable modular tui for armature interaction in 3D design. In *Proceedings of the 20th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '18, pp. 19–26, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [15] Rui Zhang, Volodymyr Kolbin, Mirko Süttenbach, Martin Hedges, and Oliver Amft. Evaluation of 3D-printed conductive lines and EMG electrodes on smart eyeglasses frames. In *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '18, pp. 234–235, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [16] 吉田有花, 志築文太郎, 田中二郎. Capacitive Blocks: 静電容量に基づくブロックシステム. 第 23 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集, pp. 1–6. 日本ソフトウェア科学会, 2015.