

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

抵抗測定に基づき種類識別を行う
ブロックシステム

齋藤 圭汰

指導教員 志築 文太郎

2019年1月

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ことができるブロックシステムを開発した。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。現状のシステムは 3 種類のブロックによる 3 (縦) × 2 (横) × 2 (奥行) までの構造を識別可能である。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。本論文において、種類および段数の識別手法、本ブロックシステムのプロトタイプ、識別回路に関する測定実験を示す。また、今後の展望として、識別可能なブロックの種類および段数の拡張方法、本システムに用いる識別手法の応用例、導電性フィラメントを用いたブロックの作製について述べる。

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的とアプローチ	1
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	ブロック構造の識別手法	4
2.1.1	ブロックに電気電子回路を内蔵する手法	4
2.1.2	カメラを用いる手法	5
2.2	抵抗測定に基づく識別手法	5
2.3	電子部品を内蔵したブロック玩具	6
2.4	その他のブロックを用いた研究	6
第3章	識別原理	7
3.1	合成抵抗の計算方法	7
3.2	ブロックに内蔵される抵抗の選択方法	9
3.3	合成抵抗が唯一となることの証明	9
3.4	種類および段数の識別方法	10
第4章	実装	11
4.1	高さ方向（1次元）の認識システムの実装	11
4.1.1	抵抗器内蔵ブロック	11
	試作ブロック1	11
	試作ブロック2	11
	試作ブロック3	14
4.1.2	抵抗測定ハードウェア	16
4.1.3	3Dモデリングアプリケーション	16
4.2	横（2次元）および奥行き（3次元）方向へのシステムの拡張	17
4.2.1	抵抗測定ハードウェアの拡張	18
4.2.2	3Dモデリングアプリケーションの拡張	18
第5章	抵抗測定ハードウェアの予備実験	20

5.1	測定方法	20
5.2	測定結果と考察	20
第 6 章	議論および今後の課題	26
6.1	識別可能な種類および段数の拡張	26
6.2	識別手法の応用例	26
6.2.1	管理システム	26
	在庫管理システム	26
	書類管理システム	27
6.2.2	複数スライダのスクロールバー	27
6.3	導電性フィラメントを用いたブロックの作製	28
第 7 章	結論	30
	謝辞	31
	参考文献	32
付録 A	付録 電圧増幅回路の回路図	36
A.1	電圧増幅回路の回路図	36

目次

1.1	開発した抵抗測定に基づくブロックシステム. 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.	2
1.2	オクルージョンが発生するブロック構造. 左: 3 (縦) × 3 (横) × 3 (奥行) に積まれたブロック. 右: 左図のブロックの中心に位置するブロック.	3
3.1	識別可能なブロックに内蔵される回路. 左: 一つのブロックに内蔵される回路. 右: 積み重ねにより形成される回路. $R_{s_1 s_2 \dots s_n}$ はブロックを n 段積んだ時の合成抵抗, B_{s_n} は n 段目のブロックの1つが持つ合成抵抗, a, b は合成抵抗の測定点, r_{s_n} は n 段目に積み重ねられた種類 s_n のブロックに内蔵される抵抗, R は全てのブロックにおいて共通の抵抗である.	8
3.2	合成抵抗の変化の範囲の模式図. 合成抵抗 $R_{s_1 \dots s_n}$ は1段目のブロックに内蔵される抵抗によって変化範囲が定まる. 例えば, 種類1のブロックを1段目にもつ合成抵抗 $R_{1 \dots s_p}$ は, 1段目のブロックに内蔵される抵抗 r_1 が積み重ねによって変化する合成抵抗の下限となり, $r_1 + R$ が上限となる. 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.	9
4.1	試作ブロック1. ポリプロピレン製の箱に抵抗器および電極を取り付けたもの.	12
4.2	試作ブロック1の積み重ね時に接続する電極のペア.	12
4.3	試作ブロック1を積み重ねた様子. 左: 識別可能な積み重ね. 右: 識別不可能な積み重ね.	13
4.4	試作ブロック2. 回転を考慮した点対称な形状の電極を持つ.	13
4.5	試作ブロック2の積み重ね時に接続する電極のペア.	14
4.6	試作ブロック3. 2×2 LEGO Duplo に電極と抵抗器を取り付けた. 左: 上面の電極の形状. 右: 底面の電極の形状.	15
4.7	試作ブロック3の積み重ね時に接続する電極のペア. 積み重ねによって中央の電極および周囲の電極同士が接続する.	15
4.8	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.	16
4.9	3Dモデリングアプリケーションの動作例. 左: ユーザが積み重ねたブロック. 右: 描画された3Dモデル.	17
4.10	拡張したハードウェア. 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, d: マルチプレクサ.	18

4.11	拡張した 3D モデリングアプリケーションの動作例. 左: ユーザが積み重ねたブロック. 右: 描画された 3D モデル. 下の 2 つは上のブロックを 180° 回転させたもの.	19
5.1	予備実験に使用した器材構成. ブレッドボード上に等価回路を作製. 抵抗測定ハードウェアによって回路に印加された電圧を測定.	21
5.2	ブロックの積み重ね順の変化に対する電圧の測定結果. 縦軸は測定値を電圧値に変換した値, 横軸は 2 段目以降のブロックの積み重ね順, グラフの項目は 1 段目のブロックの種類を表す. 横軸における文字列は積み重ねられたブロックの種類および段数を表す. 例えば, 「ABD」は 1 段目に「A」, 2 段目に「B」, 3 段目に「D」のブロックが積み重なっていることを表す. また, 横軸における「なし」は 1 段目のブロックのみの測定結果を表す.	23
5.3	3 種類のブロックを用いて, 1 から 3 段積み重ねた際の電圧の測定結果. . .	24
5.4	1 種類のブロックのみを積み重ねた際の段数に対する電圧の変化の測定結果. 縦軸は測定値を電圧値に変換した値, 横軸は積み重ね段数, グラフの項目は積み重ねたブロックの種類を示す.	25
6.1	複数スライダのスクロールバー. 上: 使用する回路. 下: 対応するソフトウェアのイメージ.	27
6.2	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. 2×2 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.	28

第1章 序論

本研究では，抵抗の測定を用いて，抵抗を内蔵したブロックの種類および積み重ね段数を識別する．また，識別結果から仮想空間内に 3D モデルを表示する．本章において，初めに，背景として実世界におけるブロックの操作を 3D モデルの入力に用いることの利点を述べる．次に，ブロック構造の識別手法と課題を述べる．また，本研究の目的とアプローチを述べる．最後に，本論文の構成を述べる．

1.1 背景

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，日常生活において頻繁に発生するため，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．実物体に対する操作をコンピュータの入力とするインタフェースとして，タンジブルユーザインタフェース [IU97, UI00] が提唱されている．その中には，実世界におけるブロックに対する操作を仮想空間における 3D モデルの入力とする研究が多数存在する（例：[AFM⁺99, BBR10, AIH⁺14, HLH⁺18]）．

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，ブロック構造）を識別する必要があり，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ない．そのため，ブロックの作製コストが高い．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によって，ブロック構造の誤認識が起こる可能性がある．

1.2 本研究の目的とアプローチ

本研究における目的は，積み重ねられたブロックの種類および段数を識別し，3D モデルに反映させることである．そのためのアプローチとして本研究では抵抗測定に基づくブロックシステム（図 1.1）を開発した．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

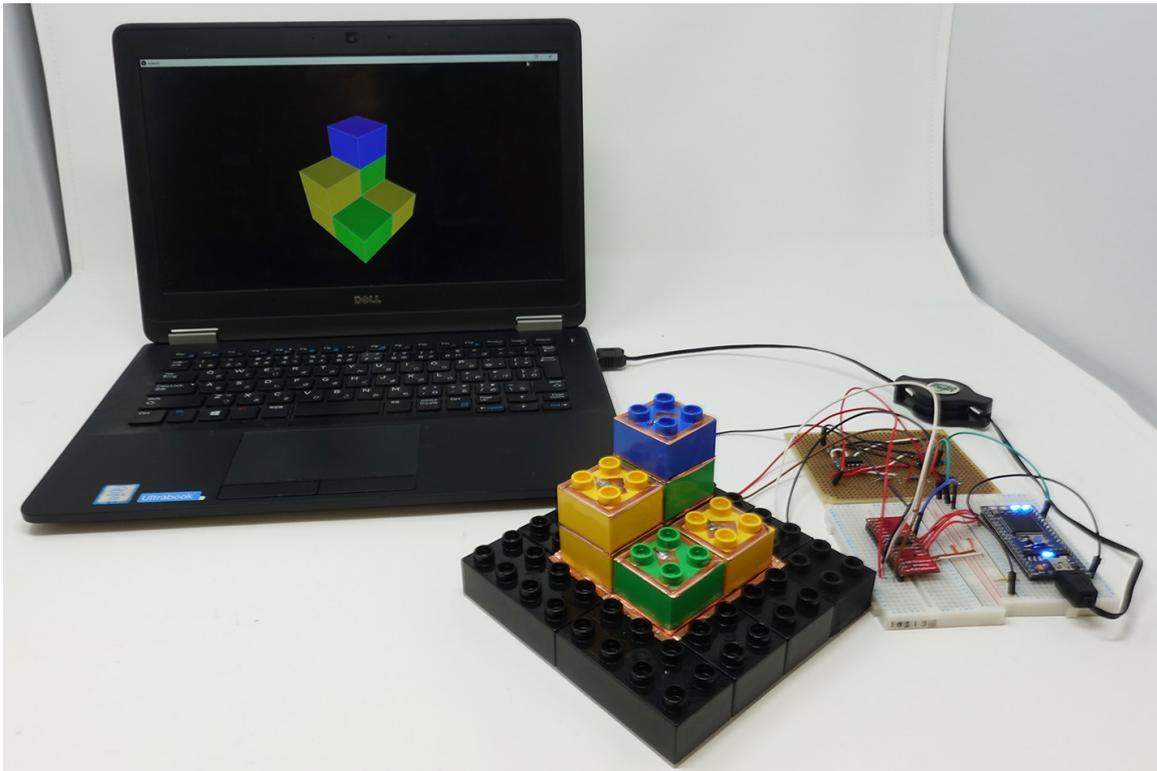


図 1.1: 開発した抵抗測定に基づくブロックシステム. ユーザがブロックを積むと, 積まれたブロックに対応した色のブロックがコンピュータの画面に描画される.

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. 識別結果は仮想空間内に 3D モデルとして表示する. なお, ブロックは電氣的に接続されるため, 本システムは見えない位置にあるブロックを識別可能である. 例えば, 図 1.2 に示す 3 (縦) \times 3 (横) \times 3 (奥行) に積まれたブロックの中心にあるようなブロックを識別可能である.

1.3 貢献

本研究の貢献を以下に列挙する.

- 抵抗を用いた種類および段数の識別回路を示した.
- ブロックの並び順および段数により, 合成抵抗が唯一となる抵抗の選択方法を示した.
- 識別原理に基づくブロックシステムを開発した.

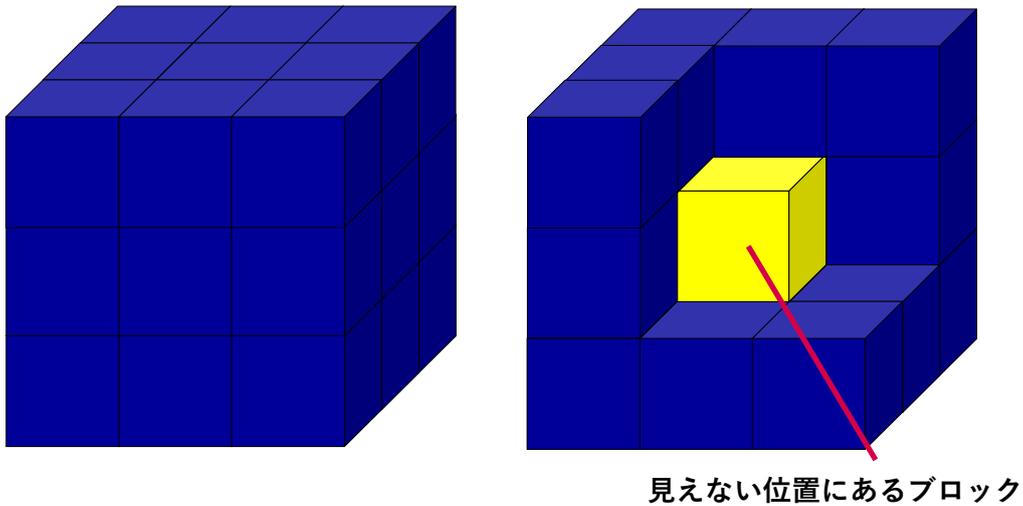


図 1.2: オクルージョンが発生するブロック構造. 左: 3 (縦) × 3 (横) × 3 (奥行) に積まれたブロック. 右: 左図のブロックの中心に位置するブロック.

1.4 本論文の構成

本論文の構成を述べる. 第 1 章では, 本研究の序論を述べる. 第 2 章では, 関連研究を述べる. 第 3 章では, 提案するブロックシステムに用いる種類および段数の識別原理を述べる. 第 4 章では, 提案するブロックシステムの実装を述べる. 第 5 章では, 提案システムが識別可能なブロックの種類の数および段数の調査のための測定実験を述べる. 第 6 章では, 本研究の議論および今後の展望を述べる. 第 7 章では, 本研究の結論を述べる.

第2章 関連研究

これまでに、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気電子回路（以下、回路）を内蔵する手法を述べる。ブロック内に回路を内蔵せず、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、電子部品を内蔵したブロック玩具およびその他のブロックを用いたコンピュータとのインタラクションに関する研究も述べる。

2.1 ブロック構造の識別手法

ブロック構造の識別手法として、ブロックに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 ブロックに電気電子回路を内蔵する手法

ブロックに回路を内蔵し、ブロック構造の識別を行う手法として、これまでに、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 [AFM⁺99] 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構造の識別を行った。Gorbet ら [GOI98] 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 [AIH⁺14] 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 [HLH⁺18] 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 [LRL17] 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 [WLL⁺18] 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。Cubecube [Bry14] は本研究と同じく抵抗を内蔵したブロックを積み重ねることで3D モデリングを行う。この

システムは、10（縦）×8（横）×8（奥行）のブロック構造を識別可能である。本研究は抵抗を内蔵したブロックを用いるが、種類識別可能である点がこのシステムとは異なる。Chanら [CMRB12] 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Chan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異なる。静電容量計測を用いた他の手法として、吉田ら [吉田15] 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 [INS17] 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、ブロックの構造だけではなく種類も識別可能である。池川らと同様に磁石を用いた研究として、Liangら [LCT⁺14] の研究がある。この研究では、タブレット端末上に置かれた磁石内蔵のブロックを、液晶パネルの裏にある磁気センサアレイを用いて計測することにより、組み合わせたブロックの形状を識別する。この研究において識別可能な形状は2次元形状であり、ブロックの高さ方向への積み重ねは識別できない。

2.1.2 カメラを用いる手法

カメラを用いてブロック構造を識別する手法について述べる。Millerら [MWC⁺12] やGuptaら [GFCC12] は、ブロック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。これらの研究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によって、ブロック構造の誤認識を起こす可能性がある。本研究はこれらの研究と異なり、全てのブロックを電気的に接続するため、オクルージョンによる誤認識を発生させず、見えない位置にあるブロックも識別可能である。Baudischら [BBR10] 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。そのため、ブロックの作製コストが高い。

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研究を述べる。池松ら [IS18] 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 [NNNK17] 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。高田ら [高田 17] は導電繊維を編み込んだ手袋を用いて、手形状の識別を行った。この研究では指の曲げの計測に導電繊維の抵抗値の変化を用いている。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。

2.3 電子部品を内蔵したブロック玩具

電子部品を内蔵したブロック玩具を述べる。LEGO Mindstorms [The18] はセンサまたはサーボモータなどを内蔵したブロックを組み立て、ロボットを作製することができる。また、制御用のブロックによって、専用ソフトウェアを用いて作製したプログラムを実行し、ロボットを制御可能である。アーテックロボ [株式 19] も LEGO Mindstorms と同様に電子部品を内蔵したブロックを組み合わせることで、プログラムによって制御可能なロボットを作製できる。

2.4 その他のブロックを用いた研究

ブロックを用いたコンピュータとのインタラクションに関する研究を述べる。熊谷ら [熊谷 15] は LEGO ブロックと同形状のインタラクティブなブロックを提案した。この研究では、ブロックに内蔵された LED を制御し、LED の色を変更可能である。Wang ら [WIT⁺18] はスマートウォッチを内蔵したブロックを用いて、積み木遊びを分析するシステムを設計した。スマートウォッチのモーションセンサおよび静電容量式タッチスクリーンから得られる情報を用いて、遊び手の動作を識別することが可能である。Suzuki ら [SYL⁺18] は磁石の埋め込まれた 9mm × 9mm × 9mm のブロックを用いて 3D プリントを行う手法を開発した。8 層に積み重ねられた約 3000 個のブロックを下から押し出すことにより、造形を行う。また、造形物は押し下げることにより、ブロック同士の結合が離れるため、再利用可能である。Zhao ら [ZKW⁺17] は自走可能な小型のロボット Zooids [LGKP⁺16] を内蔵したブロックを用いて、物体の造形およびその造形物を用いた仮想オブジェクトとのインタラクションを可能とした。大野ら [大野 15] はブロック玩具に対する能動的音響計測を用いてインタラクティブなプロトタイプを実現する手法を示した。

第3章 識別原理

我々は図3.1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、我々のシステムはブロックの種類および段数を識別する。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

我々の用いるブロックには図3.1左の回路が内蔵される。ここで抵抗の異なる m 種類のブロックがあることを考える。 R は m 種類のブロックにおいて共通な抵抗であり、 r_{s_n} 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3.1右の回路が形成される。図3.1右に示す形状の回路はラダー回路と呼ばれ、抵抗減衰器[東京16]という電気信号の強さを減衰させる装置に用いられている。ここで、図3.1右の回路における、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、

$$R_{s_1} = R + r_{s_1} \quad (3.1)$$

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

$$f(x, y) \equiv (R \times y) / (R + y) + x \quad (3.2)$$

によって求められ、

$$R_{s_1 s_2} = f(r_{s_1}, B_{s_2}) = (R \times B_{s_2}) / (R + B_{s_2}) + r_{s_1} \quad (3.3)$$

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、

$$R_{s_1 s_2 \dots s_n} = f(r_{s_1} f(r_{s_2} \dots f(r_{s_{n-1}} B_{s_n}) \dots)) \quad (3.4)$$

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。また、そのときの合成抵抗は R_{456} と表す。

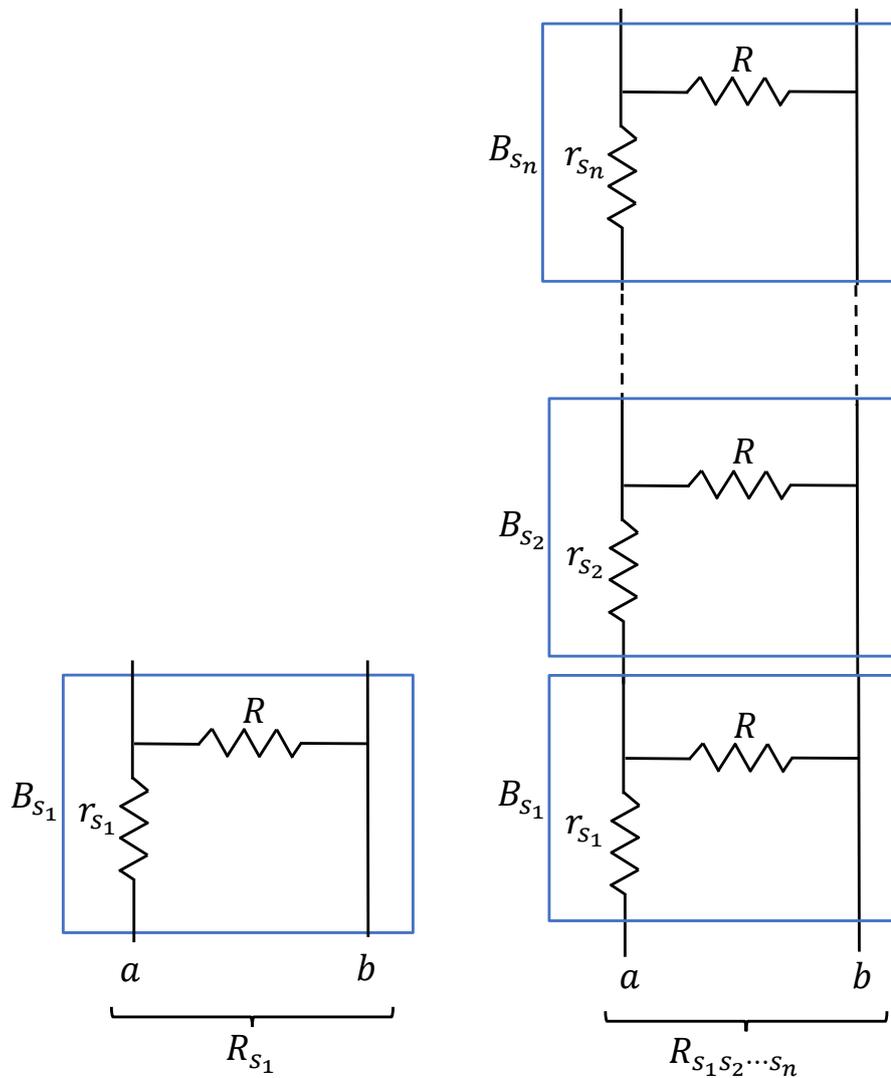


図 3.1: 識別可能なブロックに内蔵される回路. 左: 一つのブロックに内蔵される回路. 右: 積み重ねにより形成される回路. $R_{s_1 s_2 \dots s_n}$ はブロックを n 段積んだ時の合成抵抗, B_{s_n} は n 段目のブロックの 1 つが持つ合成抵抗, a, b は合成抵抗の測定点, r_{s_n} は n 段目に積み重ねられた種類 s_n のブロックに内蔵される抵抗, R は全てのブロックにおいて共通の抵抗である.

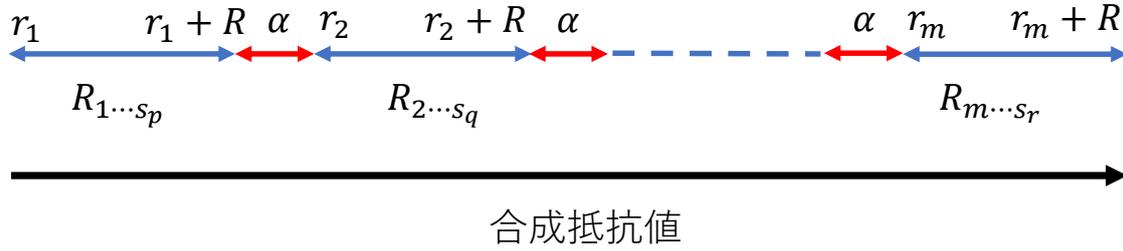


図 3.2: 合成抵抗の変化の範囲の模式図. 合成抵抗 $R_{s_1 \dots s_n}$ は 1 段目のブロックに内蔵される抵抗によって変化範囲が定まる. 例えば, 種類 1 のブロックを 1 段目にもつ合成抵抗 $R_{1 \dots s_p}$ は, 1 段目のブロックに内蔵される抵抗 r_1 が積み重ねによって変化する合成抵抗の下限となり, $r_1 + R$ が上限となる. α はそれぞれの範囲を被らせないためにとる間隔である.

3.2 ブロックに内蔵される抵抗の選択方法

本節において, ブロックの種類 s によって異なる抵抗 r_s の選択方法を示す. まず, 積み重ねによる合成抵抗の変化について考える. 積み重ねによって変化した合成抵抗が, 他のブロック構造の合成抵抗と等しくならないようにする. 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, 合成抵抗の変化範囲の上限は 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 (3.2) より, $(R \times y)/(R + y)$ の項は多数のブロックが積み重なることにより 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,

$$r_{s_1} \leq R_{s_1 \dots s_n} \leq r_{s_1} + R \quad (3.5)$$

となる. したがって, ブロックの種類 s によって異なる抵抗 r_s を

$$r_{s+1} = r_s + R + \alpha \quad (1 \leq s \leq m, 0 < \alpha) \quad (3.6)$$

のように選択していくことにより, 図 3.2 に示すように, 合成抵抗 $R_{s_1 s_2 \dots s_n}$ の変化範囲は 1 段目のブロックの種類によって異なるようになる.

3.3 合成抵抗が唯一となることの証明

本節において, すべての種類および段数におけるブロック全体の合成抵抗の唯一となることを示す. 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,

$$x_1 \neq y_1 \Rightarrow R_{x_1 x_2 \dots x_p} \neq R_{y_1 y_2 \dots y_q} \quad (3.7)$$

となる。次に、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、

$$R_{s_1} \neq R_{s_1 s_2} \quad (3.8)$$

となる。また、2 段目のブロックが異なる種類の場合、

$$x_2 \neq y_2 \Rightarrow R_{s_1 x_2} \neq R_{s_1 y_2} \quad (3.9)$$

である。式 (3.7), (3.8), (3.9) より、

$$R_1 \neq \dots \neq R_m \neq R_{11} \neq \dots \neq R_{1m} \neq \dots \neq R_{mm} \quad (3.10)$$

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 から m の各ブロックの上に、1 段のブロック 1 から m および 2 段のブロック 11 から mm を積むことを考える。式 (3.10) よりこれらは異なる合成抵抗をもつことから、式 (3.7), (3.8), (3.9) より、

$$R_1 \neq \dots \neq R_{mm} \neq R_{111} \neq \dots \neq R_{mmm} \quad (3.11)$$

が成り立つ。さらに、1 から m の各ブロックの上に、1 から m , 11 から mm および 111 から 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化的に証明される。

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. 事前にすべての種類および段数における合成抵抗を記録
2. 図 3.1 における 2 点 a, b 間の抵抗を測定
3. 測定値と記録した合成抵抗を比較
4. 測定値と最も近い合成抵抗を持つ種類および段数と識別

第4章 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4.6）、抵抗の測定を行うハードウェア（図4.8）、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4.9）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。まず、高さ方向（1次元）の積み重ね識別システムの実装を述べる。次に、横（2次元）および奥行き（3次元）方向へのシステムの拡張を述べる。

4.1 高さ方向（1次元）の認識システムの実装

我々は、高さ方向（1次元）のブロックの積み重ねを識別するシステムを作製した。その実装方法を述べる。

4.1.1 抵抗器内蔵ブロック

我々は3種類の抵抗器内蔵ブロックを試作した。それぞれのブロック作製方法および特徴を述べる。

試作ブロック1

6.5 cm×8.5 cm×5 cmのポリプロピレン製の箱に抵抗器および電極を取り付けることによりブロックを試作した（図4.1）。銅箔テープを用いて、電極を作製した。積み重ねによって、上下ブロックの電極が接続される。接続される電極のペアを図4.2に示す。しかし、この形状では、ブロックを縦方向の軸周りに90°回転させた場合（図4.3左）に電極同士が図3.1右の回路を形成しない。そのため、90°回転させたブロックの識別が不可能である。ブロックの向きによらず識別が可能にするため、回転によらない電極の形状を考える必要がある。

試作ブロック2

回転によらず常に等しい電極のペアが接続されるように、点対称な形状の電極を持つブロックを作製した（図4.4）。ブロックは5 cm×5 cm×5 cm立方体である。我々は熱溶解積層方式の3Dプリンタにて、PLA製のフィラメントを用いてこのブロックを印刷した。電極には銅



図 4.1: 試作ブロック 1. ポリプロピレン製の箱に抵抗器および電極を取り付けたもの.

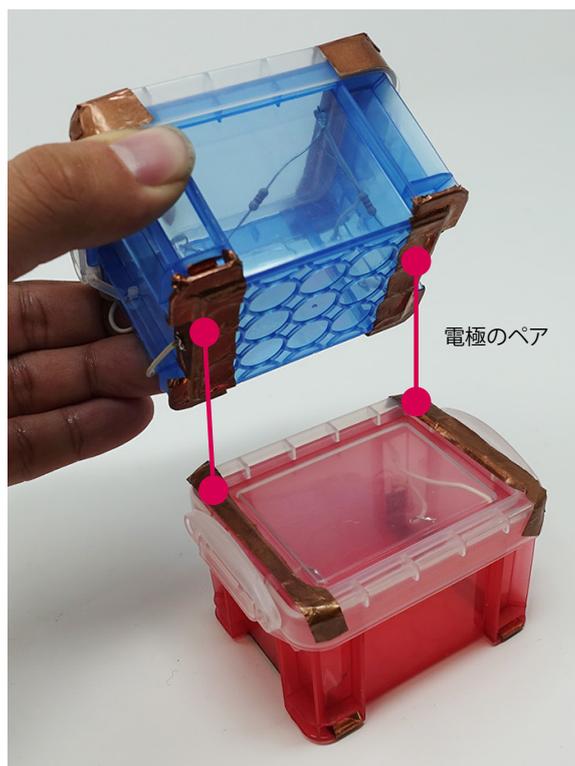


図 4.2: 試作ブロック 1 の積み重ね時に接続する電極のペア.



図 4.3: 試作ブロック 1 を積み重ねた様子. 左: 識別可能な積み重ね. 右: 識別不可能な積み重ね.

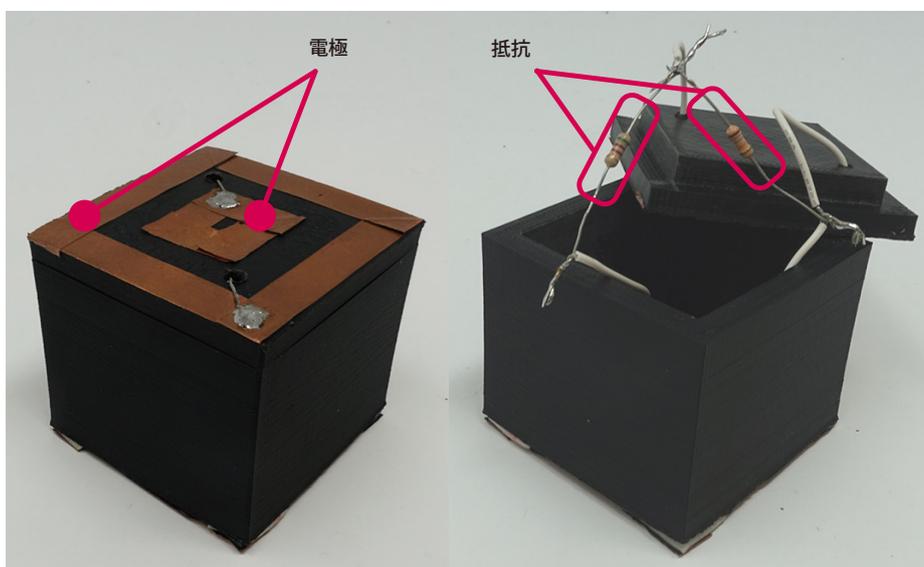


図 4.4: 試作ブロック 2. 回転を考慮した点対称な形状の電極を持つ.

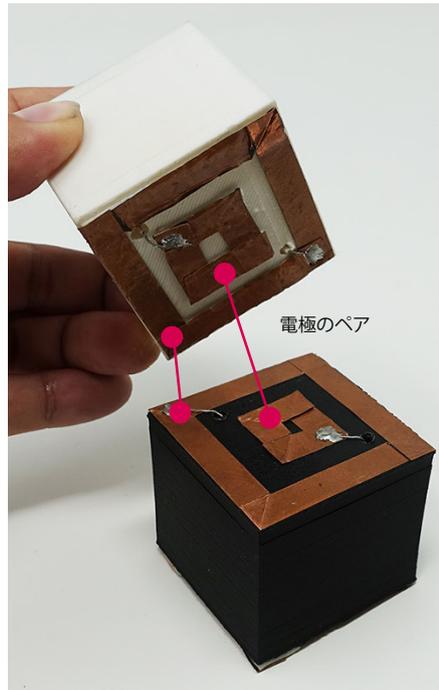


図 4.5: 試作ブロック 2 の積み重ね時に接続する電極のペア.

箔テープを使用し，図 4.4 に示す位置に取り付けた．図 4.4 に示す形状の電極を用いることにより，縦軸周りの回転によらず図 4.5 の電極のペアが接続される．これにより，回転によらず積み重ねたブロックの識別が可能となった．しかし，積み重ねられたブロックの電極同士の接触が悪いため，測定される抵抗値が不安定であった．

試作ブロック 3

電極同士の強い接触が可能なブロックとして，試作ブロック 3 を作製した．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．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 4.6 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．図 4.6 のブロックの底面の中央に配置された電極が図 3.1 における電極 a，底面の周囲に配置された電極が図 3.1 における電極 b に相当する．図 4.6 に示す電極形状を用いることにより，ブロックの回転によらず等しい回路が形成される．積み重ねにより，底面の電極がブロックの上面の電極と接触（図 4.7）することにより，図 3.1 右と等価な回路が形成される．試作した 3 種類のブロックの中において，最も安定した接触が可能であったため，このブロックを我々のシステムに用いるブロックとして採用した．

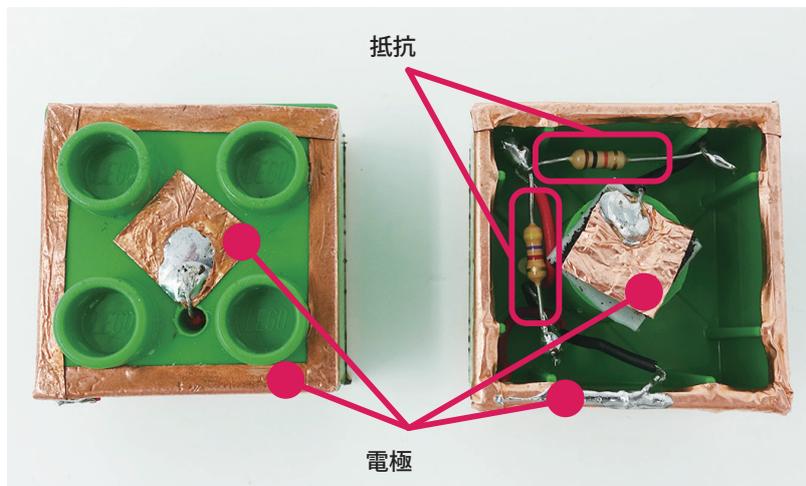


図 4.6: 試作ブロック 3. 2×2 LEGO Duplo に電極と抵抗器を取り付けた. 左: 上面の電極の形状. 右: 底面の電極の形状.

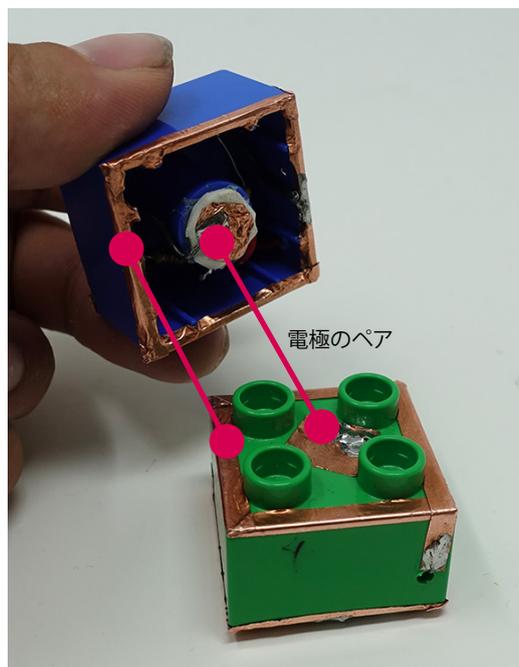


図 4.7: 試作ブロック 3 の積み重ね時に接続する電極のペア. 積み重ねによって中央の電極および周囲の電極同士が接続する.

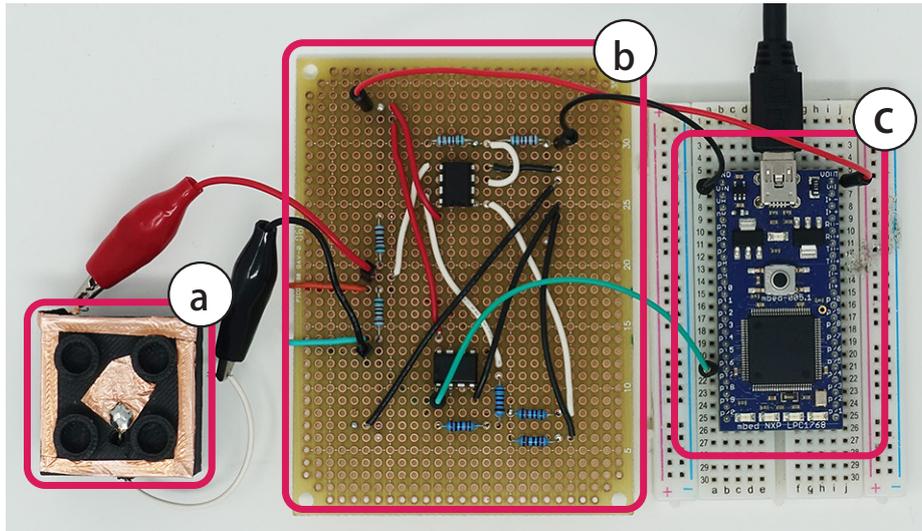


図 4.8: 抵抗測定ハードウェア : a) ブロック接続用台座, b) 電圧増幅回路, c) 電圧測定用マイコン.

4.1.2 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 4.8 に示す抵抗測定ハードウェアを実装した (図 4.8). 抵抗測定ハードウェアはブロック接続用の台座 (図 4.8a), 電圧増幅回路 (図 4.8b) および電圧測定用マイコン (図 4.8c) 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 12 bit のアナログ-デジタル変換回路を搭載し, 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により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 4.8b) 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 12 bit (3.3 V \rightarrow 4096) のデジタル値に変換され, PC へ送信される.

4.1.3 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

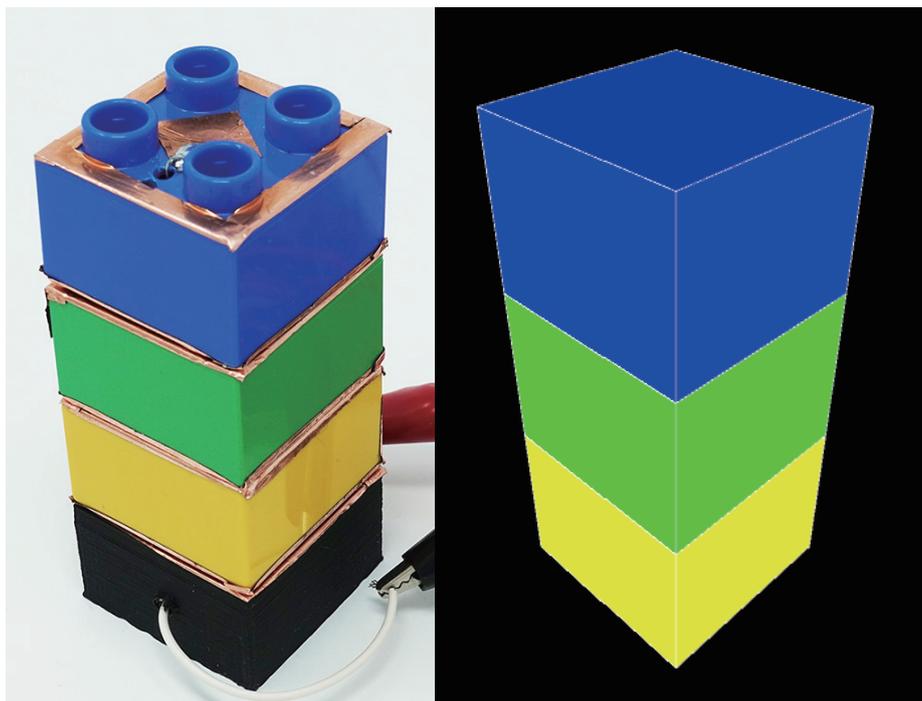


図 4.9: 3D モデリングアプリケーションの動作例。左：ユーザが積み重ねたブロック。右：描画された 3D モデル。

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。例として、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 4.9 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。

4.2 横（2次元）および奥行き（3次元）方向へのシステムの拡張

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）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、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った。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とした。また、3D モデルビューアに関しても 2次元および3次元方向に対応させた。

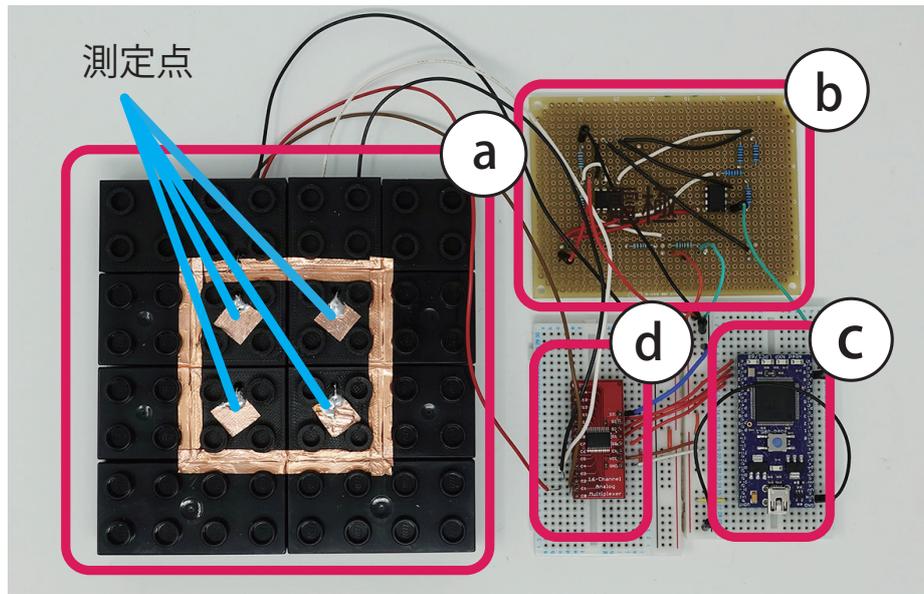


図 4.10: 拡張したハードウェア. a: ブロック接続用台座, b: 電圧増幅回路, c: 電圧測定用マイコン, d: マルチプレクサ.

4.2.1 抵抗測定ハードウェアの拡張

高さ方向（1次元）の認識システムに使用した抵抗測定ハードウェア（図 4.8）を拡張した（図 4.10）. 拡張したハードウェアは、台座（図 4.10a）の4つの測定点を、マルチプレクサ（図 4.10d）によって切り替え、それぞれの位置に積み重ねられたブロックに加わる電圧を測定する. マルチプレクサには SparkFun 社の 16 チャンネルアナログマルチプレクサである CH74HC4067 を使用した. マイコンはマルチプレクサを制御し、4つの測定点を切り替え、それぞれの測定点において電圧測定を行い、測定した4か所の電圧値を PC へ送信する. なお、PC に送信される電圧値は、マイコンによって変換された 12 bit のデジタル値である.

4.2.2 3D モデリングアプリケーションの拡張

1次元積み重ねを表示するプログラムを拡張し、抵抗測定ハードウェアから取得する台座ごとの測定電圧を用いて、3（縦）×2（横）×2（奥行）のブロックを描画するプログラムを作製した. アプリケーションの動作例を図 4.11 に示す. 図 4.11 の下の2つは上のブロックを 180° 回転させたものである. 図 4.11 上において、見えない位置にあるブロック（図 4.11 下における下部の青ブロック）も識別できていることが分かる.

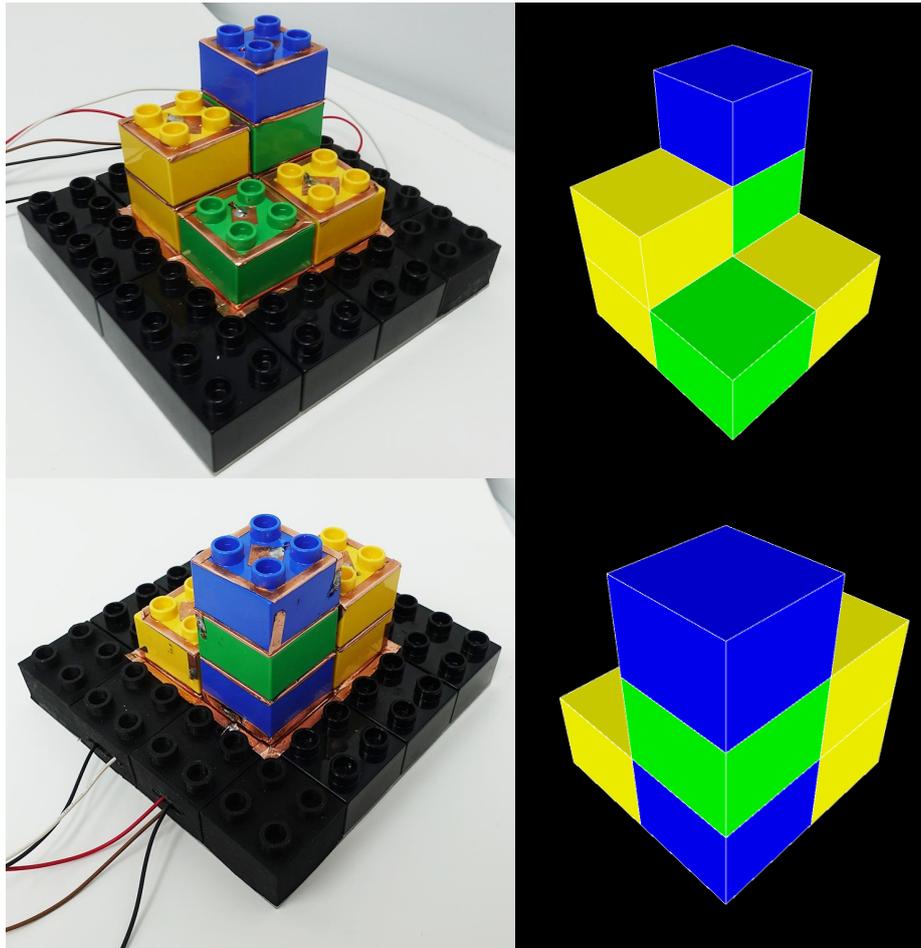


図 4.11: 拡張した 3D モデリングアプリケーションの動作例. 左: ユーザが積み重ねたブロック. 右: 描画された 3D モデル. 下の 2 つは上のブロックを 180° 回転させたもの.

第5章 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にブロックに加わる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。予備実験に使用した器材の構成を図 5.1 に示す。測定値は図 5.1 の抵抗測定ハードウェアから 12bit 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 から 4 段積み重ねた際に形成される回路と等価な 340 通りをブレッドボード上に作り、それらの回路について電圧を測定した。また、1 種類のブロックのみを積み重ねた際の等価回路を用いて、段数に対する電圧の変化についても測定した。

5.2 測定結果と考察

電圧の測定結果を図 5.2 に示す。縦軸は測定値を電圧値に変換した値であり、横軸はブロックの並び順を示す。測定結果は抵抗値が小さい順となるように並んでいる。グラフの項目は 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、それぞれの項目の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 5.2 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が確認できる。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 から 3 段におけるすべての組み合わせにおいて、電圧が

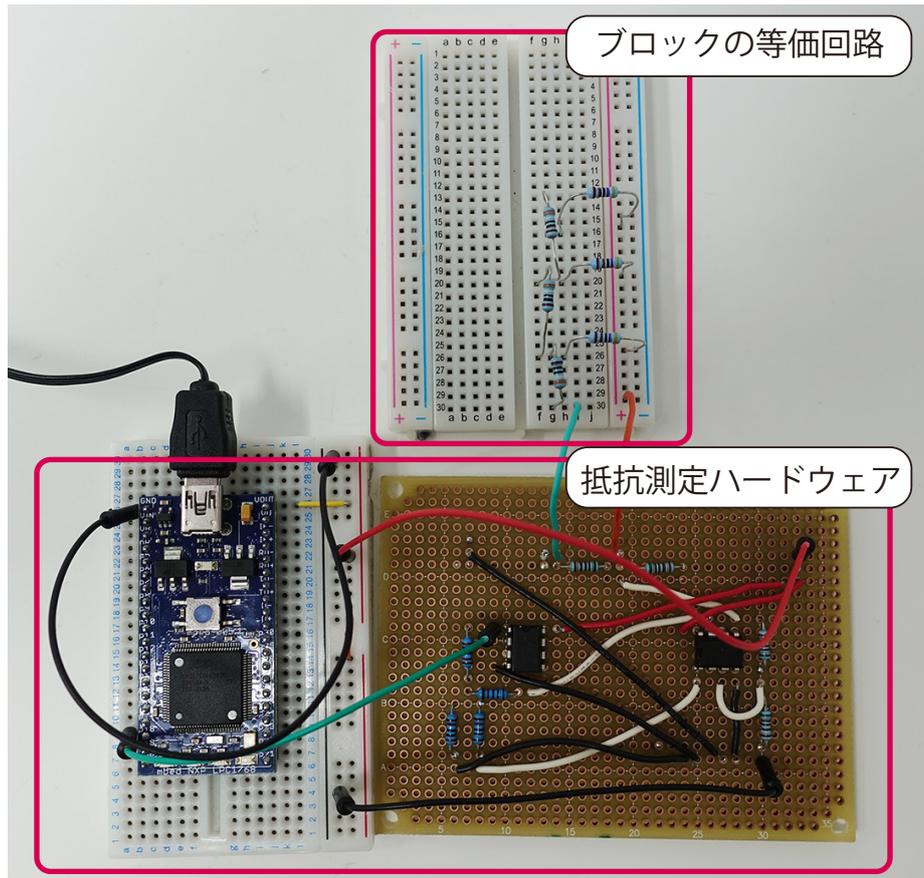


図 5.1: 予備実験に使用した器材構成. ブレッドボード上に等価回路を作製. 抵抗測定ハードウェアによって回路に印加された電圧を測定.

他の組み合わせと重複しないことを確認した。3種類のブロックを用いた1から3段積み重ねた際の電圧の測定結果を図5.3に示す。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。

また、1種類のブロックのみを積み重ねた際の等価回路を用いて、段数に対する電圧の変化の測定を行った。結果を図5.4に示す。縦軸は測定値を電圧値に変換した値、横軸は積み重ね段数、グラフの項目は積み重ねたブロックの種類を示す。それぞれの種類のブロックに対して1から7段の測定を行った。Aは6段、Bは4段、Cは3段、Dは2段まで抵抗値が変化した。このことから大きな抵抗のブロックほど電圧の変化量が小さくなることが確認できる。

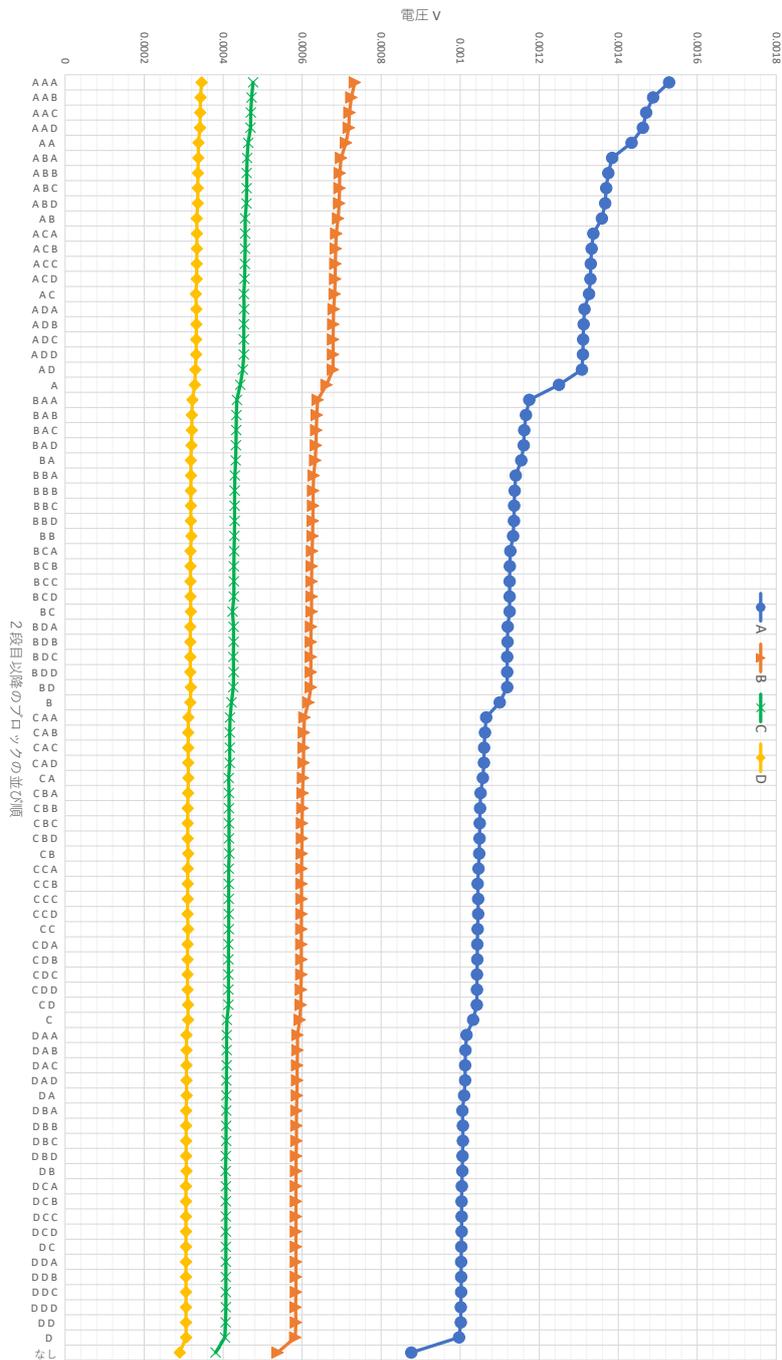


図 5.2: ブロックの積み重ね順の変化に対する電圧の測定結果. 縦軸は測定値を電圧値に変換した値, 横軸は 2 段目以降のブロックの積み重ね順, グラフの項目は 1 段目のブロックの種類を表す. 横軸における文字列は積み重ねられたブロックの種類および段数を表す. 例えば, 「ABD」は 1 段目に「A」, 2 段目に「B」, 3 段目に「D」のブロックが積み重なっていることを表す. また, 横軸における「なし」は 1 段目のブロックのみの測定結果を表す.

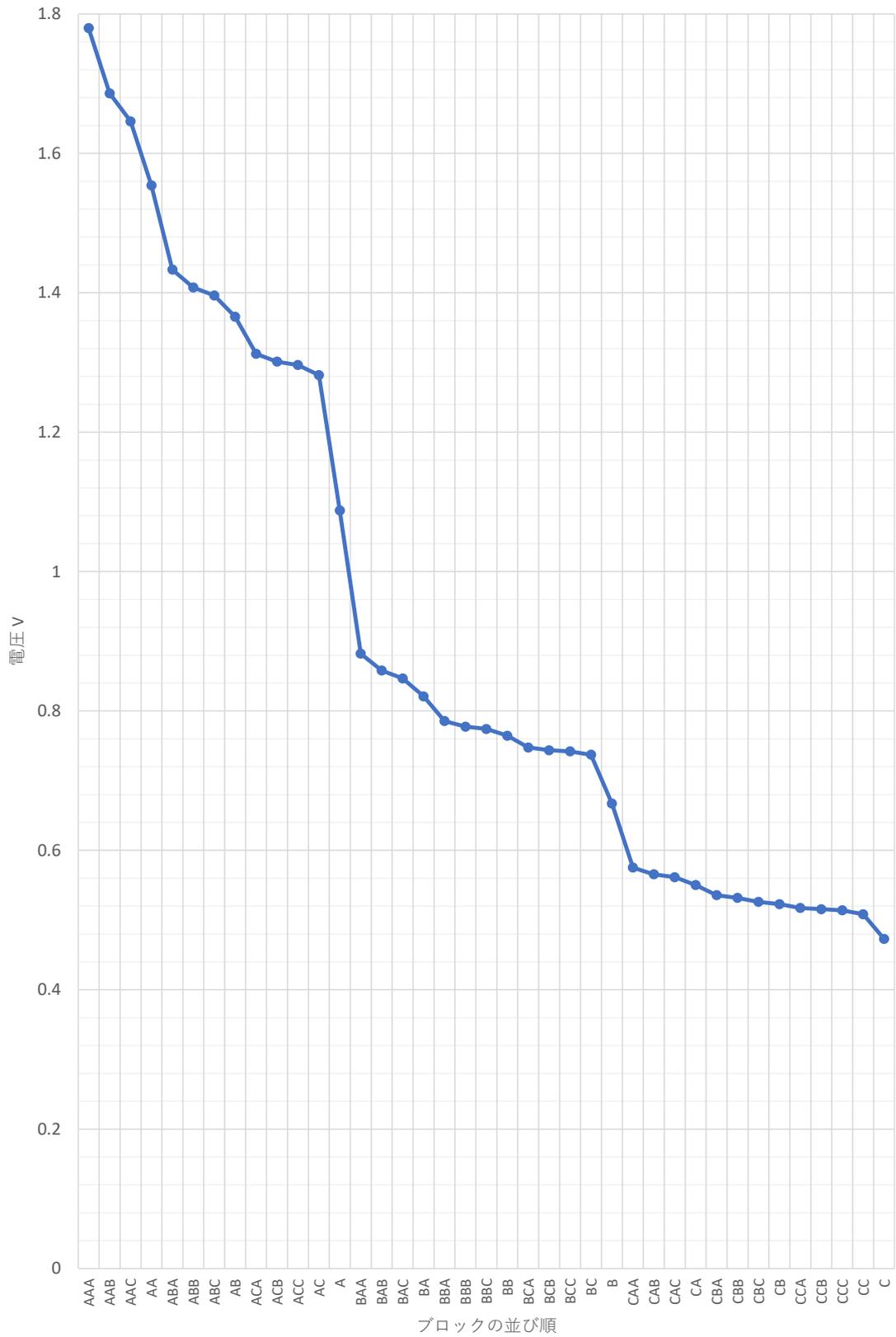


図 5.3: 3種類のブロックを用いて、1から3段積み重ねた際の電圧の測定結果。

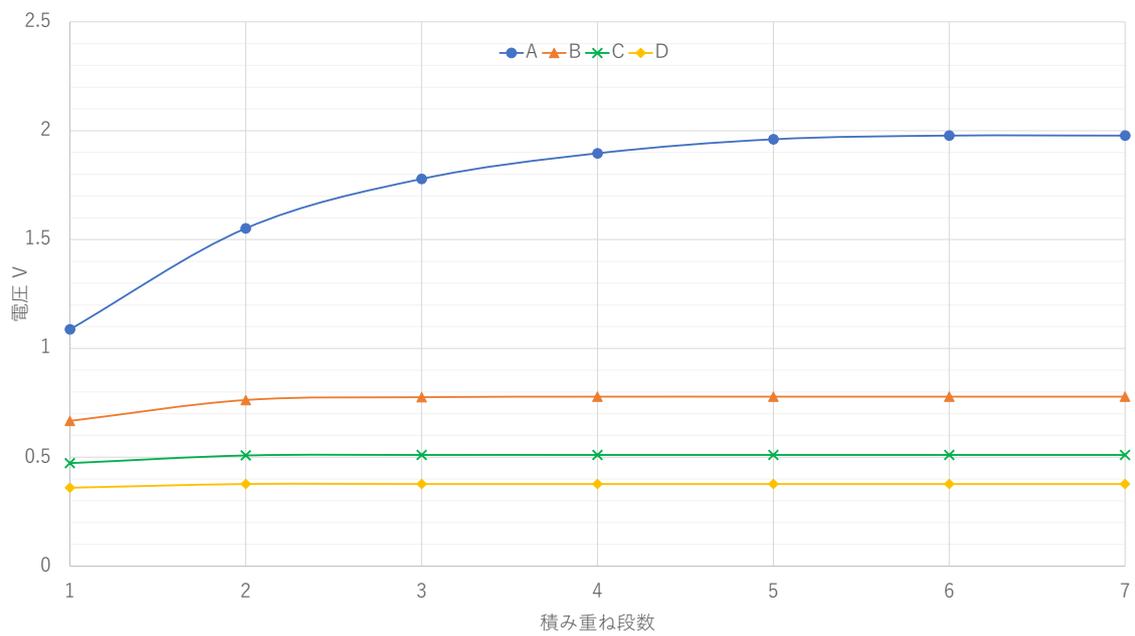


図 5.4: 1 種類のブロックのみを積み重ねた際の段数に対する電圧の変化の測定結果。縦軸は測定値を電圧値に変換した値，横軸は積み重ね段数，グラフの項目は積み重ねたブロックの種類を示す。

第6章 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 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。

6.2 識別手法の応用例

我々のブロックシステムにおいて用いた識別手法の応用例を述べる。

6.2.1 管理システム

我々のブロックシステムを管理システムとして応用する例を述べる。

在庫管理システム

我々のシステムを在庫管理に応用する例について述べる。我々のシステムは抵抗器を取り付けることにより、積み重なった状態の物体の識別を可能とする。例えばダンボールに抵抗器を取り付けることによりダンボールの識別が可能となる。そこで、在庫管理システムを考える。システムは、識別可能なダンボール、抵抗測定ハードウェア、在庫管理ソフトウェアから成る。在庫管理ソフトウェアには、ダンボールに取り付けられた抵抗器と識別可能なダンボールの中身を結び付けて登録する。このソフトウェアは抵抗測定ハードウェアから測定値を取得し、積み重なったダンボールの種類および段数を識別する。ユーザはこのソフトウェアを使用して、商品の入ったダンボールの有無を確認できる。また、積み重なったダンボー

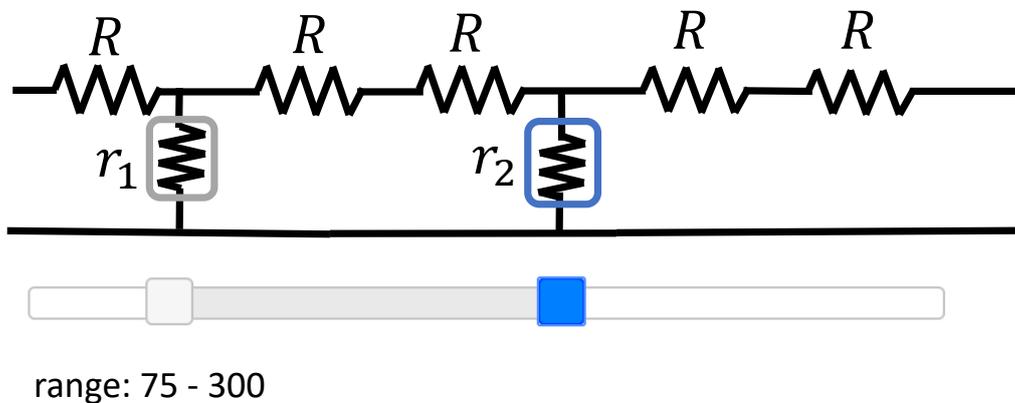


図 6.1: 複数スライダのスクロールバー. 上: 使用する回路. 下: 対応するソフトウェアのイメージ.

ルの中から商品が入ったダンボールの位置を特定することができる. さらに, システムは積み重ねられたダンボールの下部において抵抗を測定することにより識別を行うため, 見えない位置にあるダンボールの識別も可能である.

書類管理システム

また, 我々のシステムは, 抵抗器を取り付け, 識別回路を形成できるものであれば, ブロック以外の形状の物体の識別にも応用できる. 例えば, 書類に対して抵抗器を取り付け, 識別することも可能である. ダンボール管理システムと同様に, 取り付けられた抵抗器の種類と書類の種類を書類管理ソフトウェアに登録する. 書類管理システムが抵抗測定ハードウェアから測定値を取得し, 積み重なった書類の種類および数を識別する. 書類をファイルに綴じ, 外側から抵抗を測定することにより, ファイルを開くことなく, 書類の中身を識別することが可能となる.

6.2.2 複数スライダのスクロールバー

スライド式の変抵抗器は, スクロールバーとしてコンピュータの操作に用いることが可能である [LWM⁺17]. 通常, 変抵抗器はスライダを一つしか持たないが, 我々のシステムを位置特定に用いることにより, 複数のスライダを持つスクロールバーを実現可能である. 図 6.1 の回路上において, 抵抗を内蔵したスライダを動かすことにより, それぞれのスライダの位置を特定することが可能である. これを用いることにより, 範囲指定を行うスライダをハードウェアとして実現可能となる. また, 各スライダに, タブの切り替え, スクロール, 拡大

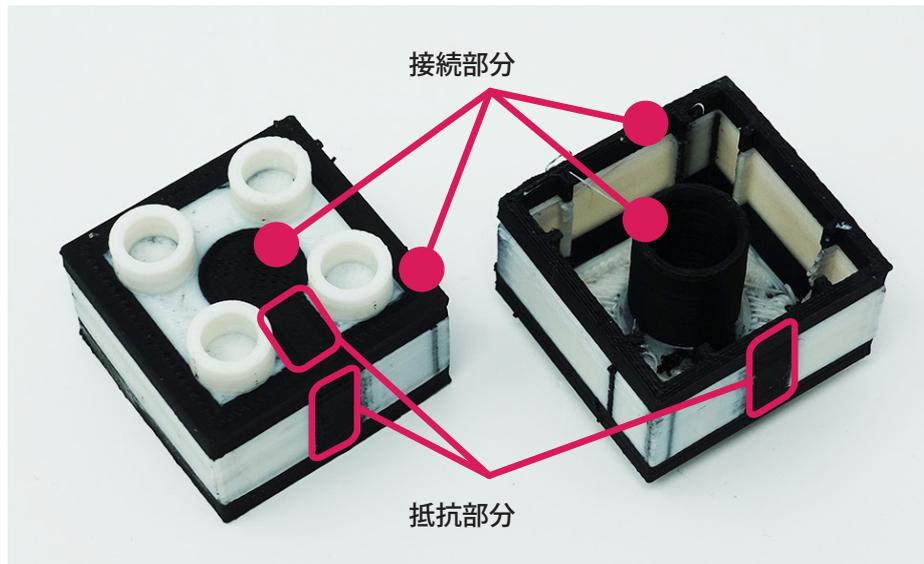


図 6.2: 導電性フィラメントおよび非導電性フィラメントを用いて作製されたブロック. 2×2 LEGO Duplo と同じ形状である. 黒い部分が導電性 PLA, 白い部分が非導電性 ABS にて作製されている.

縮小などの機能を持たせることにより, 一つのスクロールバー上において, 様々な機能を実現可能となる.

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: [ZKS+18, TST16]) 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 6.2 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。Taらは [TOK17] において、導電性インクの抵抗を調整する方法を示しており、これを導電性フィラメントに適用することを検討している。

第7章 結論

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開発を行った。開発したシステムは、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。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可能である事を示した。現状のシステムは3種類のブロックを用いた3（縦）×2（横）×2（奥行）までの積み重ねブロックの形状を識別可能である。また、我々のシステムに用いた識別手法の応用例を示した。そして、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。

謝辞

本研究を進めるにあたり、志築文太郎先生、高橋伸先生には多くのご意見とご指導をいただきました。心から感謝いたします。特に、志築文太郎先生には研究の進め方や論文の執筆方法だけでなく、研究生活においても丁寧かつ熱心なご指導をしていただきました。重ねて感謝いたします。また、インタラクティブプログラミング研究室の皆様には研究における様々なご支援をいただきました。特に、WAVE チームの皆様には数多くの意見をいただきました。お礼申し上げます。中でも安藤宗孝氏、富田洋文氏には研究を進める際、そして論文執筆の際に数多くのご支援をいただきました。大変感謝しております。最後に、私の生活を支えてくださった家族や友人、研究においてお世話になった全ての方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [AFM⁺99] 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.
- [AIH⁺14] 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.
- [BBR10] 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.
- [Bry14] Bryan Cera. Cubecube: A Tangible CAD Interface, 2014. <http://www.instructables.com/id/Cubecube-A-Tangible-CAD-Interface/> (2019年1月8日閲覧) .
- [CMRB12] 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.
- [GFCC12] 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.
- [GOI98] 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.

- [HLH⁺18] 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.
- [INS17] 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.
- [IS18] Kaori Ikematsu and Itiro Siio. 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.
- [IU97] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the 15th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, pp. 234–241, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [LCT⁺14] Rong-Hao Liang, Liwei Chan, Hung-Yu Tseng, Han-Chih Kuo, Da-Yuan Huang, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussBricks: Magnetic building blocks for constructive tangible interactions on portable displays. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 3153–3162, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LGKP⁺16] Mathieu Le Goc, Lawrence H. Kim, Ali Parsaei, Jean-Daniel Fekete, Pierre Dragicevic, and Sean Follmer. Zooids: Building blocks for swarm user interfaces. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 97–109, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [LRL17] Danny Leen, Raf Ramakers, and Kris Luyten. StrutModeling: 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.
- [LWM⁺17] Lars Lischke, Paweł W. Woźniak, Sven Mayer, Andreas Preikschat, and Morten Fjeld. Using variable movement resistance sliders for remote discrete input. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '17, pp. 116–125, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [MWC⁺12] 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.

- [NNNK17] Satoshi Nakamaru, Ryosuke Nakayama, Ryuma Niiyama, 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.
- [SYL⁺18] Ryo Suzuki, Junichi Yamaoka, Daniel Leithinger, Tom Yeh, Mark D. Gross, Yoshihiro Kawahara, and Yasuaki Kakehi. Dynablock: Dynamic 3D printing for instant and reconstructable shape formation. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 99–111, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [The18] The LEGO Group. LEGO Mindstorms, 2018. <https://www.lego.com/ja-jp/mindstorms> (2019年1月8日閲覧).
- [TOK17] Tung D. Ta, Fuminori Okuya, and Yoshihiro Kawahara. LightTrace: Auto-router for designing LED based applications with conductive inkjet printing. In *Proceedings of the 1st Annual ACM Symposium on Computational Fabrication*, SCF '17, pp. 3:1–3:10, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [TST16] 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.
- [UI00] B. Ullmer and H. Ishii. Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Systems Journal*, Vol. 39, No. 3-4, pp. 915–931, July 2000.
- [WIT⁺18] Xiyue Wang, Miteki Ishikawa, Kazuki Takashima, Tomoaki Adachi, Ehud Sharlin, Patrick Finn, and Yoshifumi Kitamura. Designing action-characterizing toy blocks for behavior assessments. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pp. LBW513:1–LBW513:6, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [WLL⁺18] 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.
- [ZKS⁺18] 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.

- [ZKW⁺17] Yiwei Zhao, Lawrence H. Kim, Ye Wang, Mathieu Le Goc, and Sean Follmer. Robotic assembly of haptic proxy objects for tangible interaction and virtual reality. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, ISS '17*, pp. 82–91, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [株式会社 19] 株式会社アーテック. アーテックロボ, 2019. <https://www.artec-kk.co.jp/artecrobo/ja/> (2019年1月8日閲覧).
- [吉田 15] 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.
- [熊谷 15] 熊谷明音, 沖真帆, 塚田浩二. LEGOrics: 外観を保ちつつ電氣的に拡張した lego ブロックの提案. インタラクション 2015 論文集, インタラクション 2015, pp. 598–601. 情報処理学会, 2015.
- [高田 17] 高田峻介, 志築文太郎, 高橋伸. GROVE: 導電繊維編み込み手袋を用いた手形状計測手法. 第25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. 77–82. 日本ソフトウェア科学会, 2017.
- [大野 15] 大野誠, 志築文太郎, 田中二郎. ブロック玩具に対する能動的音響計測を用いたプロトタイピング. インタラクション 2015 論文集, インタラクション 2015, pp. 960–963. 情報処理学会, 2015.
- [東京 16] 東京光音電波株式会社. CP-2500 Series, 2016. <http://www.ko-on.co.jp/products/att/cp.html> (2018年12月20日閲覧).

付録A 付録 電圧増幅回路の回路図

本付録にて，第4章，2節にて示した電圧増幅回路の回路図を示す。

A.1 電圧増幅回路の回路図

