

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

磁気計測に基づくブロック型
タンジブルユーザインタフェース

池川 航史

指導教員 志築 文太郎

2017年 1月

概要

磁気を計測することによって、ユーザが作製した構造物の構造を認識し、3Dモデルを構築するブロック型タンジブルユーザインタフェースの実現手法を示す。ブロック型タンジブルユーザインタフェースは、ブロックを組み立てるという直感的な操作を用いた3Dモデリングを可能にする。本システムのブロックは永久磁石を内蔵するのみの単純な構造を持つため、ブロック内に追加の回路や電源を必要としない。また、構造の認識に用いる電子回路は、ユーザが構造物を作製する土台に統合されているため、カメラを用いるシステムと比較し、小型なシステムを実現した。

本論文にて、Tesla Blocks を構成する磁気ブロック、構造物認識ハードウェア、ならびに3Dモデルビューアの実装を述べる。また、実装したシステムが認識可能な構造物の規模を調査した結果を述べる。結果、ブロックを用いて作製した構造物の底面が最大で2行2列とした場合において実験を行った結果、高さ4まではシステムは正しく認識し、高さ5においては誤認識が多くなった。3行3列とした場合において、実験を行った結果、高さ2まではシステムは正しく認識し、高さ3においてはシステムの処理が重くなり、動作しなくなった。

目次

第1章	序論	1
1.1	タンジブルユーザインタフェース	1
1.2	ブロック型タンジブルユーザインタフェースとその問題点	1
1.3	目的とアプローチ	2
1.4	貢献	2
1.5	本論文の構成	2
第2章	関連研究	4
2.1	TUIの代表的な研究および製品	4
2.2	ブロック型TUI	4
2.2.1	ブロックに内蔵された電子回路を用いる手法	5
2.2.2	カメラを用いる手法	5
2.2.3	静電容量計測を用いる手法	6
2.3	磁気に基づくTUI	6
2.3.1	単一の磁気センサを使用した研究	6
2.3.2	複数の磁気センサを使用した研究	7
2.4	その他のブロックに関する研究および製品	7
2.5	本研究の位置づけ	8
第3章	提案システムの概要	9
3.1	磁気の特性と構造認識手法	9
3.2	Tesla Blocks	9
3.2.1	Tesla Blocksの特長	9
3.2.2	Tesla Blocksの動作	9
第4章	プロトタイプと予備実験	12
4.1	磁気ブロックのプロトタイプ	12
4.2	構造物認識ハードウェアのプロトタイプ	12
4.3	3Dモデルビューアのプロトタイプ	13
4.4	予備実験	13
第5章	実装	18
5.1	磁気ブロック	18

5.2	構造物認識ハードウェア	18
5.3	3D モデルビューア	19
第 6 章	磁気計測に基づくブロック認識	25
6.1	学習データの作成	25
6.2	構造物の構造認識アルゴリズム	25
6.2.1	総探索アルゴリズム	25
6.2.2	制約付きアルゴリズム	26
第 7 章	実験	27
7.1	実験方法	27
7.2	実験結果	27
7.2.1	総探索アルゴリズムを用いたときの結果	27
7.2.2	制約付きアルゴリズムを用いたときの結果	28
第 8 章	議論	29
8.1	システムの動作制限	29
8.2	今後の課題	29
第 9 章	結論	30
	謝辞	31
	参考文献	32

目次

1.1	Tesla Blocks システムの外観：システムは磁気ブロック，構造物認識ハードウェアと，PC 上で動作する 3D モデルビューアから構成される．	3
3.1	磁気の加法定理を表した図．	10
3.2	Tesla Blocks の概念図：(左) 磁気ブロック，(中) 構造物認識ハードウェア，(右) 3D モデルビューア．	10
3.3	Tesla Blocks の動作例，磁気ブロックを 1 個追加したときの状態．	11
4.1	プロトタイプ版の磁気ブロックの構成要素：(左) 永久磁石，(中) 2×2 LEGO duplo，(右) 磁気ブロックのプロトタイプ．	13
4.2	構造物認識ハードウェアプロトタイプの外観図．	14
4.3	構造物認識ハードウェアプロトタイプの回路図．	15
4.4	ブロックの個数に対する磁気センサの z 軸のセンサ値の変化．	15
4.5	3D モデルビューア動作時のスクリーンショット：ブロックを 2 個積み上げた状態．	16
4.6	プロトタイプ版 Tesla Blocks を用いた予備実験の様子．	17
5.1	磁気ブロックの構成要素：(a) 永久磁石，(b) スペーサ，(c) LEGO duplo．	19
5.2	2×2 LEGO duplo の空洞：(a) 空洞の様子，(b) 空洞にスペーサを入れたときの外観．	20
5.3	構造認識ハードウェアの外観：(a) Arduino Nano，(b) マルチプレクサ，(c) 4 つの磁気センサ．	21
5.4	構造認識ハードウェアの回路図．	22
5.5	3D モデルビューアの動作例：(左) ユーザが作製した構造物，(右) 3D モデルビューアにて描画された 3D モデル．	23
5.6	3D モデルビューアの拡大・縮小機能と視点移動機能：(上) 起動時の様子，(中) 拡大・縮小機能使用時の様子，(下) 視点移動機能使用時の様子．	24

表目次

6.1	データ数 2×2 のときの構造物予測例.	26
7.1	2種類のアゴリズムを用いた際の認識可能なブロックの高さ.	27

第1章 序論

本論文にて、磁気を計測することによって、ユーザが組み立てたブロックの構造を認識し、コンピュータ上に3Dモデルを構築するブロック型タンジブルユーザインタフェースの実現手法を示す。本章にて、まずタンジブルユーザインタフェースを説明する。次に、ブロック型のタンジブルユーザインタフェースに関する既存の研究およびその問題点を述べる。続いて、本研究の目的およびアプローチを述べる。その後、本研究の貢献を述べる。最後に、本論文の構成を記す。

1.1 タンジブルユーザインタフェース

実世界に存在する有形の物体を直接操作することにより、無形であるコンピュータ内の情報を操作可能にするタンジブルユーザインタフェース（以降、TUI）の概念が提唱されている [FIB95, IU97, UI00]。TUIは、従来のマウスやキーボードを用いた操作と比較して直感的な入力操作が可能である。

1.2 ブロック型タンジブルユーザインタフェースとその問題点

TUIの1つとして、LEGO¹などを用いたブロック型TUIが研究されており、ブロックを組み立てることによって3Dモデルの構築するなどの応用がされている。[AFM⁺00, BBR10, MWC⁺12]。3Dモデリングを行うとき、ユーザがマウスおよびキーボードを用いた操作に比べ、ブロックを組み立てる操作は、組み立てられたブロック（以降、構造物）とリアルタイムに構築される3Dモデルが同期しているため直感的な操作である。そのため、ブロック型TUIは初心者や子ども向けの3Dモデリングを実現する可能性を有する。

ブロック型TUIを実現するにあたり、構造物の構造を認識する必要がある。構造を認識する代表的な手法を述べる。1つ目はブロックに内蔵されたマイクロコントローラを含む電子回路によって構造を認識する手法 [AFM⁺00, WIA⁺04, AIH⁺14] である。2つ目は、構造物全体を俯瞰できる位置に設置されたカメラによって構造を認識する手法 [BBR10, MWC⁺12, GFCC12] である。しかし、1つ目の手法には、ブロック自体に複雑な回路を内蔵する必要があるという問題がある。また、2つ目の手法には、カメラを設置するためシステムが大規模になる点、カメラの死角が発生する点、およびユーザの手などの障害物がカメラと構造物の間に映り、入力映像に構造物が映らない点（オクルージョン）などの問題が生じる。

¹<https://www.lego.com> (2017年1月20日閲覧)

1.3 目的とアプローチ

1.2 節に述べた問題を解決するために，本研究にて，ブロックに永久磁石を内蔵し，磁気を計測することにより構造物の構造を認識するブロック型 TUI である Tesla Blocks (図 1.1) を開発した．本システムのブロック（以降，磁気ブロック）は永久磁石を埋め込むのみという単純な構造を持つため，ブロック内に追加の回路や電源を必要としない．また，構造物の構造認識に用いるハードウェアは，ユーザが構造物を組み立てるための土台に統合されているため，カメラを用いる手法と比較してシステムを小型にできる．さらに，構造の認識に磁石と磁気センサを用いており，磁気は人間の手およびプラスチック製のブロックを透過する性質を持つため，オクルージョンは発生しない．

1.4 貢献

本研究の貢献を以下に述べる．

- 磁気ブロックを用いて作製した構造物の構造を，磁気センサを用いることにより認識できることを明らかにした．
- 本システムにて用いることができる磁気ブロックを考案し，実装した．
- 複数の磁気センサを用いて構造物の構造を認識するハードウェアを考案し，実装した．
- 構造物の構造を認識するための 2 種類のアルゴリズムを考案し，実装した．
- ユーザが自由に視点や拡大縮小をすることができる 3D モデルビューアを考案し，実装した．
- 本システムが認識可能な構造物の規模を明らかにした．

1.5 本論文の構成

本論文の構成を次に述べる．第 1 章にて，本論文の序論を述べる．第 2 章にて，本論文に関連する研究や製品を紹介し，本研究の立ち位置を明らかにする．第 3 章にて，本論文の提案システムである Tesla Blocks の概要を述べる．第 4 章にて，提案システムを実現するために実装したプロトタイプおよび，それを用いた予備実験を述べる．第 5 章にて，プロトタイプの実装および予備実験から得られた知見をもとに改良を行った Tesla Blocks の実装を述べる．第 6 章にて，提案システムのアルゴリズムを述べる．第 7 章にて，本システムが認識可能な構造物の規模を明らかにした．第 8 章にて，本研究に対する議論を述べる．第 9 章にて，本論文のまとめを述べる．

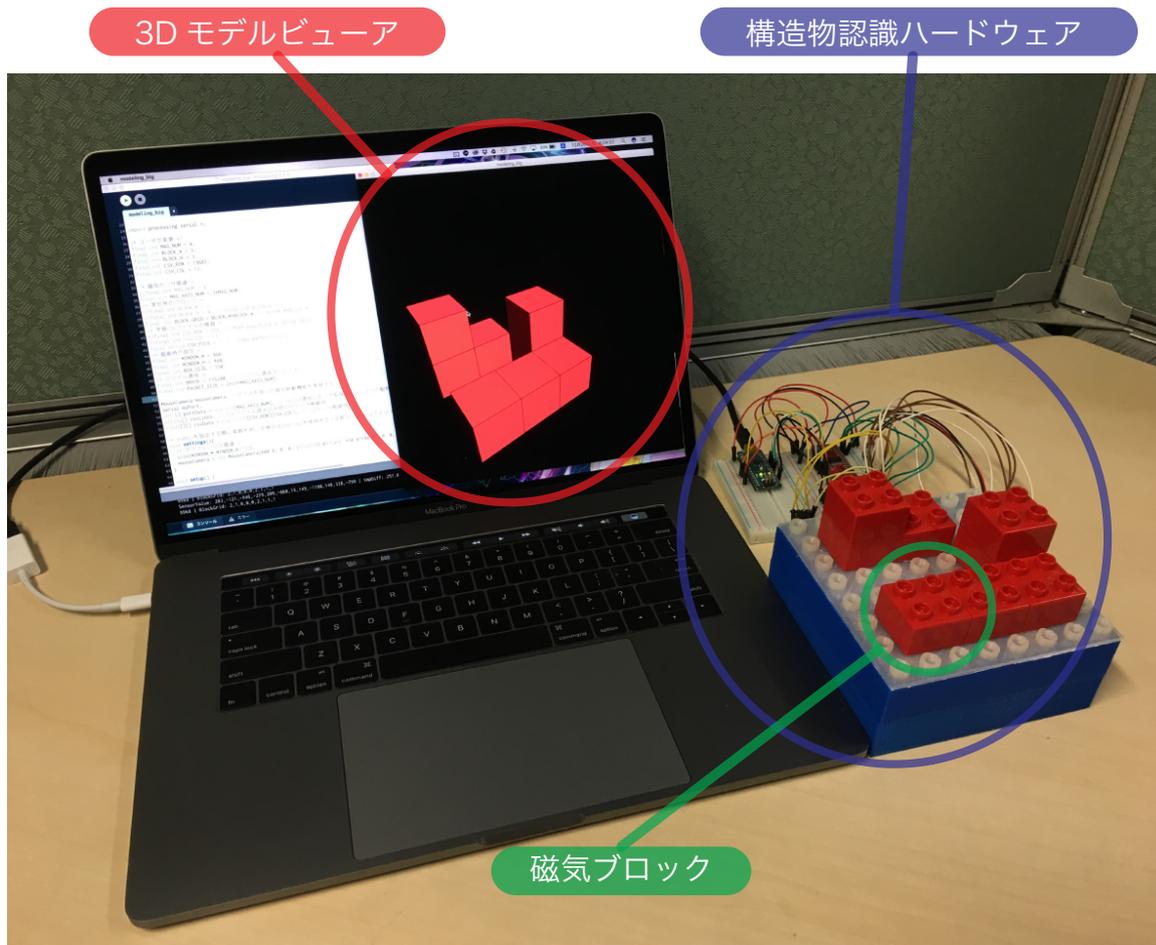


図 1.1: Tesla Blocks システムの外観：システムは磁気ブロック，構造物認識ハードウェアと，PC 上で動作する 3D モデルビューアから構成される。

第2章 関連研究

本章にて、本研究に関連する研究を紹介する。本研究は、ユーザが永久磁石を内蔵したブロックを用いて組み立てた構造物の構造を磁気センサを用いて認識することにより、コンピュータ上に3Dモデルの構築を可能にするブロック型TUIを設計、実装する。よって、はじめにTUIの研究例と製品例を紹介する。次に、関連研究としてブロック型の物体を用いて作製した構造物を認識し、3Dモデルとして描画する手法を紹介する。続いて、磁気を計測することにより、様々なコンピュータへの入力を行っている研究を紹介する。最後に、本研究の位置づけを述べる。

2.1 TUIの代表的な研究および製品

本節にてTUIの代表的な研究および製品を紹介する。musicBottles [IML01]はガラスボトルの形をしたTUIである。ガラスボトルの中に音楽が入っているという状態に見立て、ユーザがコルク栓を開けると音楽が流れ始めるという操作を提供する。reactTable [JGAK07, Rea]はシンセサイザの機能を実現したTUIである。テーブル上に配置した物体同士の距離を変えたり回転させたりすることによって音色を変化させる。reactTableは楽器として、ミュージシャンがライブで使用したり、公共施設に設置して多くの人に触ってもらうなど、エンターテインメントの分野において応用されている。Microsoft社のSurface Studioは、Surface Dial [Mic]と呼ばれる円筒形の入力装置を使用する。Surface Dialは卓上だけでなくディスプレイ上に置いて使用することができる。ユーザがSurface Dialに触れたり、それ自体を移動や回転させるなどの操作をすることにより、様々なインタラクションを実現した。

2.2 ブロック型TUI

ブロックを用いて作製した構造物の構造を認識し、コンピュータ上に3Dモデルを構築するブロック型TUIの研究が行われている。ブロック型TUIを実現する手法として、ブロックに電子回路を内蔵する手法、カメラを用いる手法、静電容量に基づくブロック検出手法を紹介する。

2.2.1 ブロックに内蔵された電子回路を用いる手法

Anderson ら [AFM⁺00] はマイクロコントローラを内蔵した LEGO 型ブロックを用いて、構造物の構造を認識するシステムを提案した。このシステムは、ブロックに内蔵されているマイクロコントローラ同士が通信することにより、ユーザが組み立てた構造物の構造を認識する。ActiveCube [WIA⁺04] はマイクロコントローラを内蔵する立方体のブロックを用いたシステムである。このシステムに用いるブロックは、立方体の6面全てが接続面になっており、ブロック同士の接続をリアルタイムに認識する。また、ActiveCube は、センサや LED などをブロックに内蔵することによって 3D モデルの描画だけでなく様々なインタラクションを実現した。StackBlock [AIH⁺14, 続毅 16] は、直方体の6面すべてに赤外線 LED とフォトトランジスタを格子状に敷き詰めたブロックを用いたシステムである。このシステムは赤外線 LED の受発光からブロックの積み重ねを検出し、それぞれのブロック間の接触領域を推定する。さらに、それぞれのブロック同士が赤外線通信を用いたデータ通信を行うことによって構造を認識できる。Hosoi ら [HTA⁺14] は積み木の中に磁気センサ、加速度センサ、Bluetooth モジュールを搭載したブロックを設計した。システムは積み木の積み上げ個数以外にも、それぞれの積み木の積み方（方向や接地面）をリアルタイムに認識する。Glauser らは、曲げることやねじることを可能としたジョイントにマイクロコントローラとセンサを内蔵した [GVM⁺16]。それらをつなぎ合わせて作製した構造物は 3D モデルの関節と対応しており、ジョイントを動かすことにより 3D モデルを動かすことができる。

これらの研究は、ブロックに内蔵されたマイクロコントローラ同士が通信をすることによって、構造物の構造を認識するブロック型 TUI である。高精度な構造物の構造認識が可能である。一方、我々のシステムは、永久磁石のみをブロックに内蔵させるという単純な構造によってブロック型 TUI を実現した。

2.2.2 カメラを用いる手法

Baudisch ら [BBR10] の Lumino は、ガラスファイバとマーカによって構成されたブロックを使用した。システムはこのブロックを用いて作製された構造物を机の下のカメラから撮影し、マーカの底面の見え方の違いから積み上げられたブロックの高さを認識する。Miller ら [MWC⁺12] は深度カメラ（Microsoft 社製、Kinect）を用いて構造認識を行った。ユーザがブロックを用いて作製した構造物の構造を認識し、コンピュータ上に 3D モデルを構築する手法を提案した。Gupta ら [GFCC12] の DuploTrack は、Miller らの研究と同様に深度カメラを用いた。このシステムは、ユーザが LEGO duplo¹を用いて組み立てる構造物の構造をリアルタイムに推測および追跡する。さらに、推測および追跡した結果を用いて 3D モデルを作製し、描画を行う。

これらの研究は、構造物全体を俯瞰できる位置に設置されたカメラによる構造認識手法によってブロック型 TUI を実現した。一方、我々のシステムは、カメラではなく磁気に基づくため、構造物全体を俯瞰できる位置にカメラを設置する空間を必要とせず、小型なシステム

¹<https://www.lego.com/ja-jp/duplo> (2017 年 1 月 20 日閲覧)

を実現している。また、カメラを使用しないため、カメラの死角により構造物を認識できない問題、およびオクルージョンによる誤認識の問題を解決する。

2.2.3 静電容量計測を用いる手法

吉田ら [YST15, 吉田 15] は熱溶解積層方式の 3D プリンタを使用し、導電性と非導電性のフィラメントを組み合わせることでコンデンサとなるようなブロックを設計した。このブロックが積み上げられるとコンデンサが並列接続され、結果として土台において計測される静電容量が線形に増加する。システムは Arduino で動作する Capacitive Sensing Library [Bad] を使用して、計測した静電容量をブロックの個数に対応付けすることによってブロックの積み上げ個数を検出する。また、3D プリンタにて作製されたブロックの静電容量が安定しなかった問題を、ブロックの内部にチップコンデンサを内蔵したブロックを用いることによって改善し、システムをさらに発展させた研究がある [ITA⁺16]。Chan ら [CMRB12] は静電容量式タッチパネルの上に積み上げられたブロックの個数を検出可能なシステムを開発した。このシステムのブロックにはそれぞれ上下に 4 つ以上の接点がある。ユーザがブロックを置く際にブロックの側面を触ると、タッチパネル上に積み上げられた個数に応じたタッチ点が発生する。システムは発生したタッチ点の組み合わせから個数を推定する。

これらの手法は先述した手法に比べ、マイクロコントローラを内蔵せず、ブロックが持つ静電容量の検出によってオクルージョンによる誤認識を解決した 3D モデリングを実現した。一方、我々の手法は磁石をブロックに内蔵するという方法によって 3D モデリングを実現する。

2.3 磁気に基づく TUI

永久磁石と磁気センサを用いた TUI の研究が盛んに行われている。はじめに、単一の磁気センサを用いて様々なインタラクションを実現した研究を紹介する。次に、我々の研究と同様に複数の磁気センサを用いて磁気を計測することによって様々なインタラクションを実現した研究を紹介する。

2.3.1 単一の磁気センサを使用した研究

Bianchi ら [BO13, BO15] は 3 種類の永久磁石を用いてスライダおよびダイヤルなどのツールを作製し、磁気センサを内蔵したスマートフォンの操作に用いた。磁気を計測することによってスマートフォンの周囲にどのツールが置かれたか、またそれらがどのように操作されたのかを認識し、スマートフォンのインタラクションを拡張した。さらに Bianchi らはバッテリー、モータ、および磁石を内包したマーカを提案した。磁石はモータの先端に埋め込まれており、マーカの種類によって各モータの回転速度が異なる。マーカの永久磁石が回転することにより SN の極性が変化し、システムはその変化の周波数を解析することによってマーカの種類を区別し、様々なインタラクションへと応用した。Abe ら [AST16] はスマートフォンに内

蔵された3軸磁気センサと磁石を取り付けたスタイラスペンを使用した、新たな入力手法を提案した。卓上に置かれたスマートフォンが、ユーザによってスタイラスペンを用いて描かれた軌跡を、認識する。この手法を使用し、磁石の移動の軌跡をもとに数字認識およびペイントアプリケーションの操作を行った。

2.3.2 複数の磁気センサを使用した研究

永久磁石と磁気センサを用いた TUI の研究には我々のシステムと同様に、複数の磁気センサを用いた研究もある。Liang ら [LCS⁺12, LSW⁺12, LCCY12] は複数の磁気センサを格子状に配置したハードウェアをタブレット端末の背面に接続した。このシステムを用いることにより、スタイラスペンの傾斜角および、タブレット上におけるスタイラスペンの位置の特定などの機能を実現した。また、Liang らはこのハードウェアをスタイラスペン入力だけでなく、様々な研究に応用した。GaussBits [LCC⁺13] は永久磁石が内蔵されたマーカを使用し、物体の位置および角度を認識することにより様々なインタラクションが可能であることを提示した。GaussStones [LKC⁺14] は特性の異なる磁気シールドの中に永久磁石を内蔵したマーカを利用したシステムである。シールド内に局所的に発生した磁気を液晶パネルの裏にある複数の磁気センサを格子状に配置したハードウェアを用いて計測することによりマーカを認識した。このシステムは2つまでの積み上げられたマーカを認識することができる。GaussBricks [LCT⁺14] は複数の磁気センサを格子状に配置したハードウェアを使用し、両端に磁石がついた骨型のパーツの組み合わせを認識する。これによってタッチパネルにおける様々なインタラクションを実現した。GaussRFID [LKC16] は永久磁石の配置パターンを変化させることにより、磁気 の性質が異なる物体の識別をする。複数の磁気センサを格子状に配置したハードウェアを用いることにより、物体を識別することができる。また、Son らの G-Shark [PHAM13] は3軸磁気センサを格子状に配置したものを、タブレット端末の後ろに取り付けたハードウェアを使用する。ユーザは指にネオジウム磁石を取り付け、このハードウェアの周辺にて指を動かす。このシステムは、磁気センサの情報をもとに、ネオジウム磁石の位置を追跡することにより、ジェスチャ入力などの様々なインタラクションを提供した。Huang ら [HMT⁺15] は、LC コイルによるマーカが発する誘導磁界を複数の磁気センサを用いて検出することによりマーカの位置を追跡するシステムを実装した。磁気センサのセンサ値をもとに逆問題を解いてマーカの位置と方向を特定する。1つのマーカに3つのLCコイルを取り付けることにより、追跡ができない角度および位置をなくした。

一方、我々は永久磁石と磁気センサを用いて構造物の構造を認識するブロック型 TUI を実現した。

2.4 その他のブロックに関する研究および製品

LEGO 社の MINDSTORMS [LEG] は、ユーザが専用の部品を組み立てることにより、自由にロボットを作ることができる製品である。ロボットは、Bluetooth 通信を用いることによりス

スマートフォンと接続することができる。ユーザはスマートフォンやタブレット端末などのモバイル機器をコントローラとして使用し、ロボットを動かすことができる。littleBits [lit] および電子ブロック [電子] は様々な機能を持った電子回路が内蔵されたブロックである。ユーザは、このブロックを組み合わせることにより、電子工作を体験することができる。LEGOrics [熊谷 15] は LEGO の外見を保ちつつ電氣的に拡張したブロックを提案した。ブロックの内部にマイクロコントローラとフルカラー LED を配置した基板を搭載している。I²C 通信を用いてブロック内部のフルカラー LED の色を制御することができる。Legolization [LYH+15] は、色情報付きの 3D モデルを入力データとして与えることにより、LEGO にて組み立て可能な 3D モデルを構築するシステムである。このシステムは、実世界にて組み立てた時においても壊れることが無いような耐久性の高い LEGO による構造物を構築することができる。

2.5 本研究の位置づけ

本論文にて提案する Tesla Blocks は、永久磁石を内蔵したブロックおよび磁気センサを用いて組み立てた構造物の構造を認識することにより、3D モデルの構築を行うブロック型 TUI である。他のブロック型 TUI の実現手法であるブロックに内蔵されたマイクロコントローラを用いる手法と比較して、永久磁石のみをブロックに内蔵させるという単純な構造のブロックを用いており、追加の回路や電源を必要としない。また、カメラではなく磁気に基づくため、構造物全体を俯瞰できる位置にカメラを設置する空間を必要とせず、小型なシステムを実現している。加えて、カメラを使用しないため、カメラの死角により構造物を認識できない問題、およびオクルージョンによる誤認識の問題を解決する。

磁気に基づくタンジブルユーザインタフェースの研究が多数存在し、本研究では磁気を用いてブロック型 TUI を実現する。

第3章 提案システムの概要

本章において、磁気を計測することによって構造物の構造を認識するシステムである Tesla Blocks の概要を述べる。はじめに、磁気の特徴を述べる。次に、本手法の概要を述べる。その後、本手法の特徴を述べる。最後に、本手法の動作を示す。

3.1 磁気の特徴と構造認識手法

磁気は図 3.1 に示すように、加法定理が成り立つ。つまり、磁気を持つ物体 a と b が両方配置されている状態の観測点（磁気センサ）の磁気 \vec{B} は、a のみ配置されている時の磁気を \vec{B}_a 、b のみ配置されている時の磁界を \vec{B}_b とすると以下の式から求めることができる。

$$\vec{B} = \vec{B}_a + \vec{B}_b$$

本研究では、この磁気の加法定理を応用して、構造物の構造認識を行った。

3.2 Tesla Blocks

Tesla Blocks はユーザが実世界に作製した構造物の構造を認識し、コンピュータ上に 3D モデルを構築するブロック型 TUI である。本手法は、磁気の特徴を用いて、構造物の構造認識を行っている。

3.2.1 Tesla Blocks の特長

本手法の特徴を以下に示す。

- 磁石を埋め込むのみの単純な構造であるため、既存のブロックに内蔵することができる
- 磁気の特徴を使用しているため、オクルージョンの問題が発生しない。

3.2.2 Tesla Blocks の動作

図 3.2 に Tesla Blocks の概念図を示す。構造物認識ハードウェアは PC と接続されている。ユーザは構造物認識ハードウェアの上に構造物を作製する。PC にて動作する 3D モデルビューアは、構造物の構造を認識し、3D モデルを構築している。図 3.3 に本手法を用いて構造物の構造を認識している様子を示す。

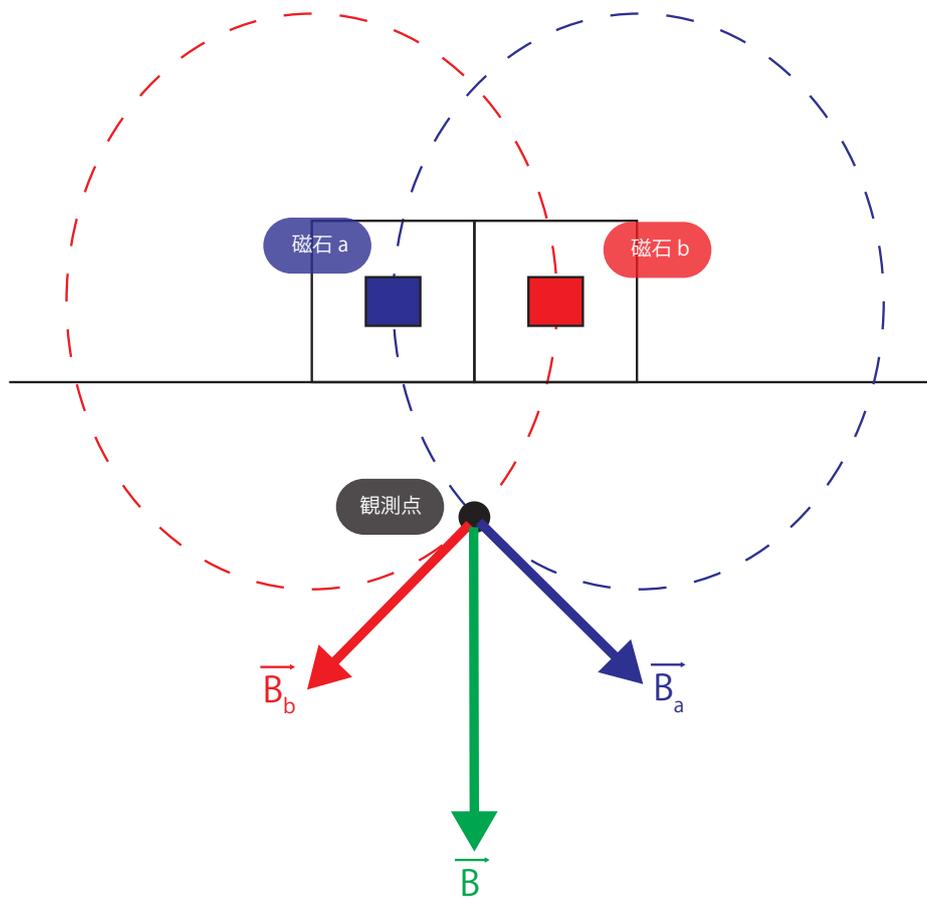


図 3.1: 磁気の加法定理を表した図.

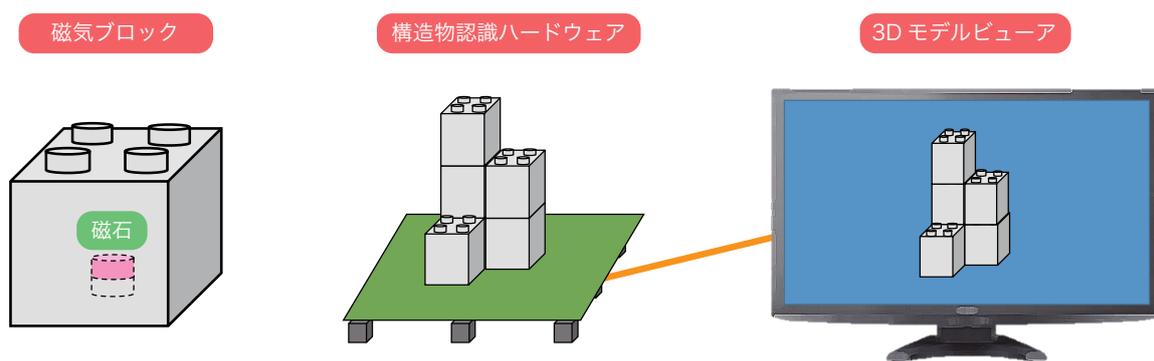


図 3.2: Tesla Blocks の概念図 : (左) 磁気ブロック, (中) 構造物認識ハードウェア, (右) 3D モデルビューア.

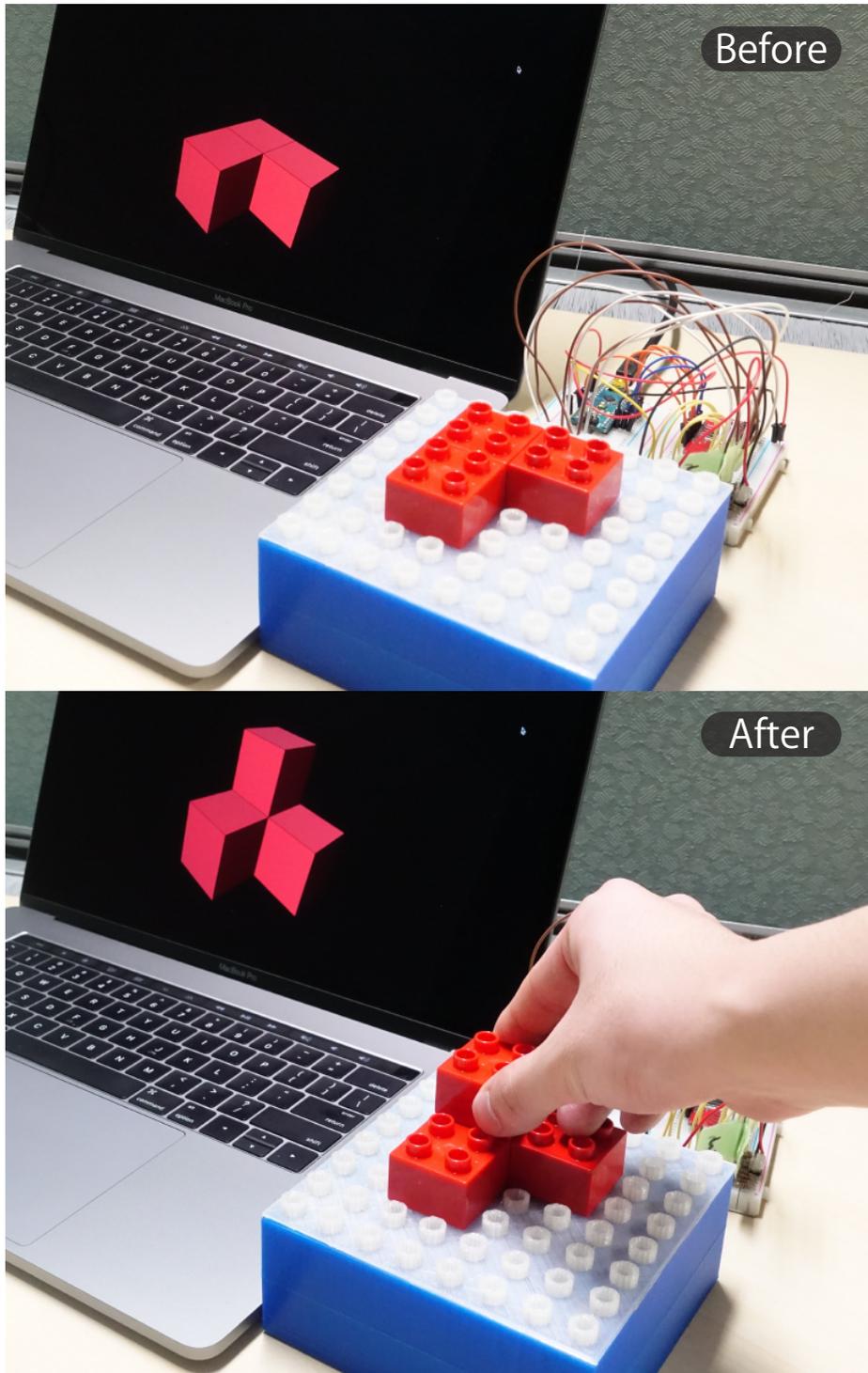


図 3.3: Tesla Blocks の動作例, 磁気ブロックを 1 個追加したときの状態.

第4章 プロトタイプと予備実験

本章にて、磁気計測に基づくブロック型タンジブルユーザインタフェースである Tesla Blocks のプロトタイプの実装を記す。はじめに、磁気ブロックのプロトタイプの実装を述べる。次に、構造物認識ハードウェアのプロトタイプの実装を述べる。続いて、3D モデルビューアのプロトタイプの実装を述べる。最後に、プロトタイプ版 Tesla Blocks の予備実験とその結果を示す。

4.1 磁気ブロックのプロトタイプ

2×2 の LEGO duplo の内部に永久磁石を入れることにより、磁気ブロックのプロトタイプを作製した。2×2 の LEGO duplo は入手が容易であり、永久磁石を内蔵することが可能である大きさであったため、このブロックを選択した。図 4.1 にプロトタイプ版の磁気ブロックを構成する部品を示す。磁気ブロックは永久磁石（図 4.1 左）と LEGO duplo（図 4.1 中）から構成される。本研究にて、永久磁石として直径 6 mm、高さ 2.5 mm、表面における磁束密度 220 mT のネオジウム磁石を使用した。2×2 の LEGO duplo の内部には直径 10.8 mm の円筒形の空洞が存在する。この円筒形の空洞に永久磁石を入れることにより、磁気ブロックを作製した。なお、永久磁石を空洞に完全に固定するために、ホットボンドを使用した。図 4.1 右に作製した磁気ブロックのプロトタイプを示す。

4.2 構造物認識ハードウェアのプロトタイプ

ユーザが組み上げた磁気ブロックの構造を認識するためのハードウェアのプロトタイプを実装した（図 4.2）。構造物認識ハードウェアのプロトタイプはマイコン（Arduino Nano）と 3 軸磁気センサ（Honeywell 社製 HMC5883L）から構成される。図 4.3 に構造物認識ハードウェアのプロトタイプの回路図を示す。磁気センサは I²C 通信を用いてマイコンにデータを送信する。また、磁気センサは 75 Hz のサンプリング周波数にて計測値をマイコンに出力し、±0.47 mT の検出レンジを持つように設定されている。なお、地磁気の影響を除くために、マイコンの起動時に取得した計測値をオフセットとして、磁気センサの計測値をシリアル通信にて PC へ送信する。磁気センサの上部に磁気ブロックを配置できるように、LEGO duplo ブロックを用いて回路を覆った。

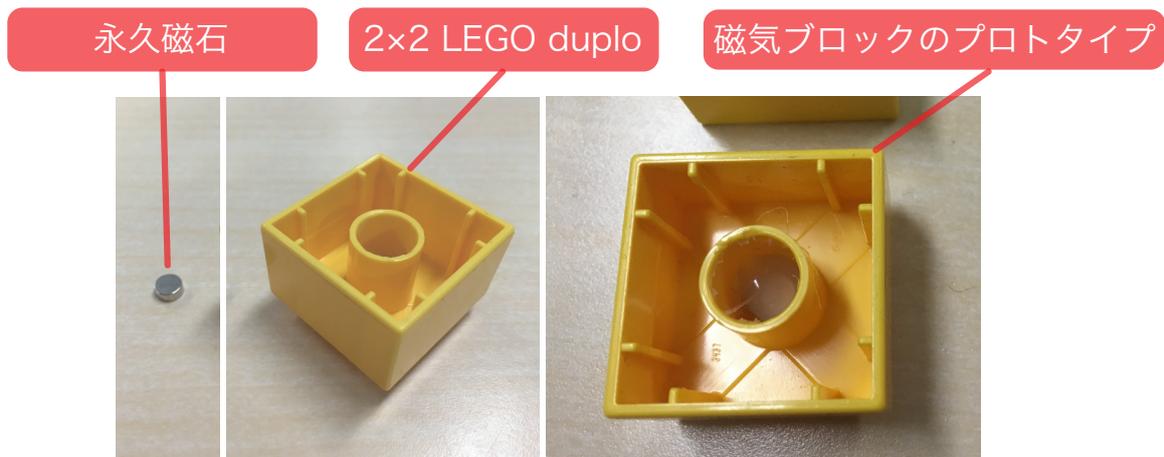


図 4.1: プロトタイプ版の磁気ブロックの構成要素：(左) 永久磁石, (中) 2 × 2 LEGO duplo, (右) 磁気ブロックのプロトタイプ.

4.3 3D モデルビューアのプロトタイプ

ユーザが作製した構造物の構造を認識し、3D モデルを構築する 3D モデルビューアのプロトタイプを実装した。この 3D モデルビューアは PC 上で動作する。PC には Apple 社製の Macbook Pro¹を使用した。なお、プロトタイプ版では、構造物の構造は底面が 1 × 1 という制限を設け、高さ方向のみのブロックの積み上げを認識し 3D モデルの構築を行った。

ブロックの積み上げを認識するために、実験的にセンサ値を記録し、しきい値として使用することとした。高さ方向にのみブロックを積み上げたため、磁気センサの x 軸, y 軸のセンサ値に大きな変化はないため、 z 軸のセンサ値にのみ注目した。図 4.4 にブロックの個数に対する磁気センサの z 軸のセンサ値の変化のグラフを示す。

3D モデルビューアは Processing 3 [Pro] を用いて実装されている。3D モデルの描画には Processing 標準の 3D 描画エンジンである P3D を使用した。図 4.5 に 3D モデルビューア動作時のスクリーンショットを示す。

4.4 予備実験

予備実験として、ブロックを 1 個ずつ積み上げ、正しく認識できるかどうかの確認を行った。図 4.6 に実験の様子を示す。ブロックを 1 段ずつ積み上げていき、積み上げが認識できたら、さらにもう 1 段ブロックを追加する。この実験の結果、3 個のブロックの積み上げまでは正しく認識できたが、4 個以上の積み上げを行うと誤認識が増えた。この原因としては、磁気ブロックの作製精度が悪かったため、個体差が出たと考えられる。そのため、磁気ブロック

¹Macbook Pro 15-inch, 2016, CPU: 2.9GHz Intel Core i7, RAM: 16GB 2133MHz LPDDR3, GPU: Radeon Pro 460 4096MB. <http://www.apple.com/jp/> (2017 年 1 月 20 日閲覧)

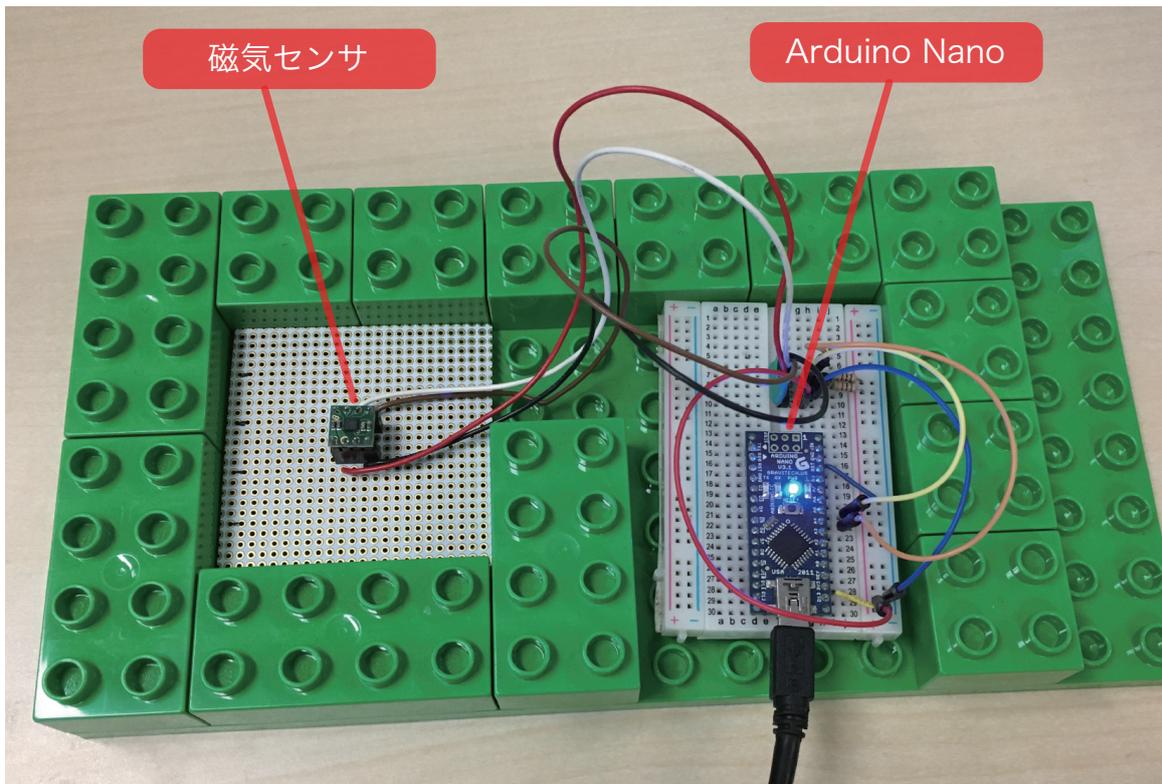


図 4.2: 構造物認識ハードウェアプロトタイプの外観図.

を作製する際の永久磁石の固定位置の個体差を無くすことにより認識精度が向上すると考えられる。また、磁気センサを増やすことにより、精度が向上すると考えられる。予備実験の結果および考察をもとに改良した Tesla Blocks の実装を第 5 章に記す。

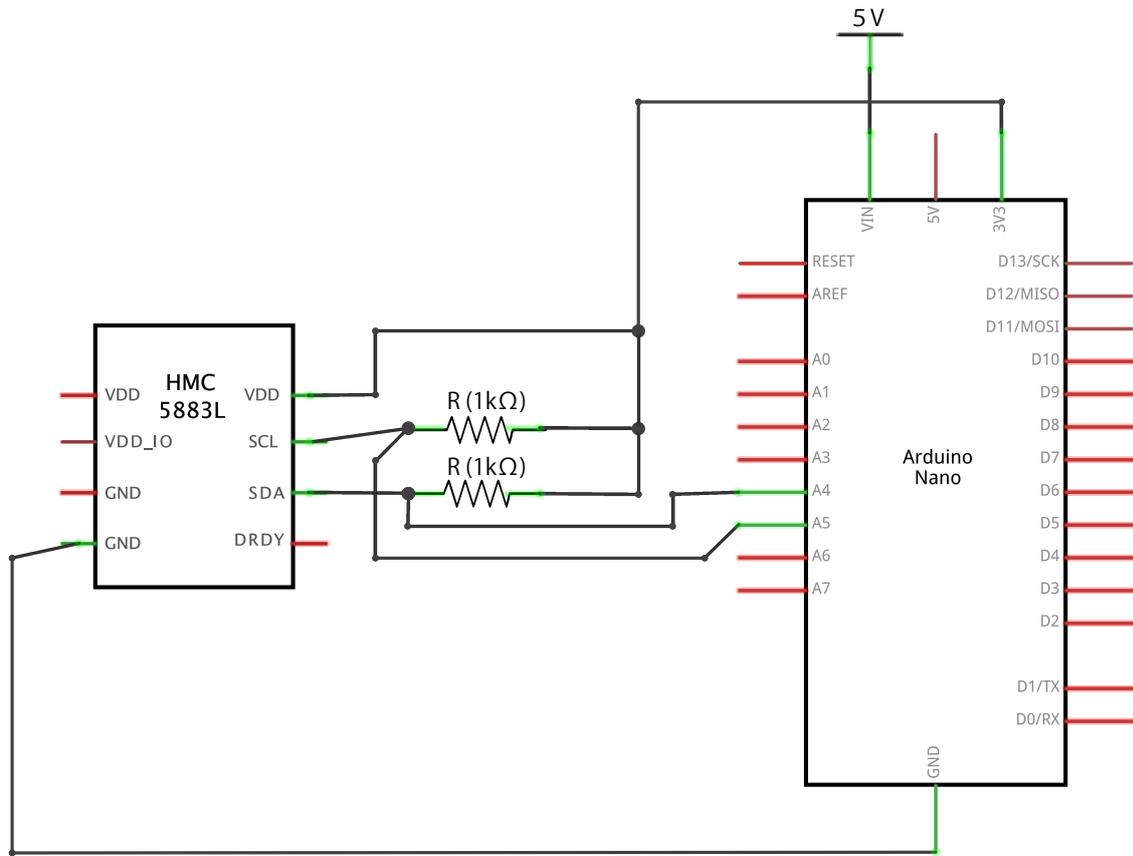


図 4.3: 構造物認識ハードウェアプロトタイプの回路図.

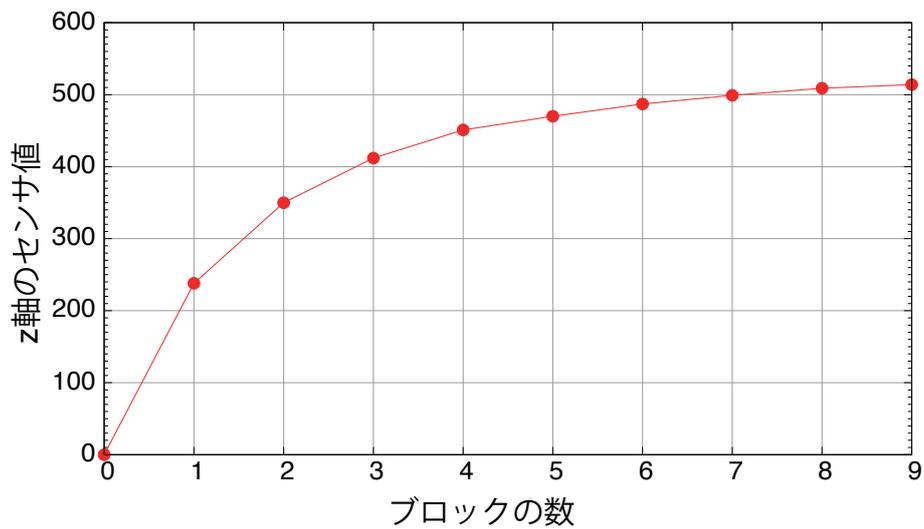


図 4.4: ブロックの個数に対する磁気センサの z 軸のセンサ値の変化.

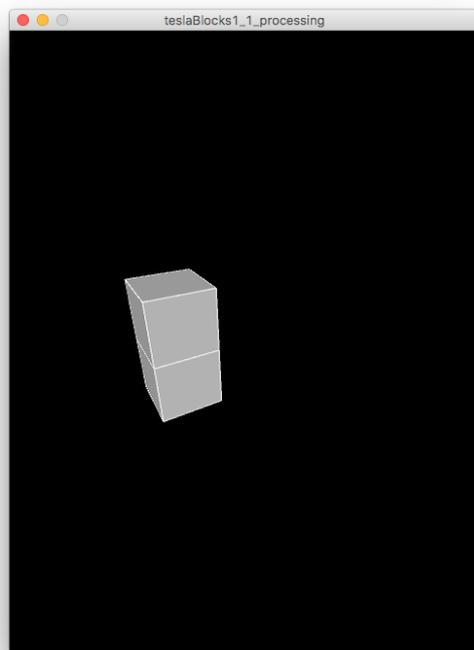


図 4.5: 3D モデルビューア動作時のスクリーンショット：ブロックを 2 個積み上げた状態.

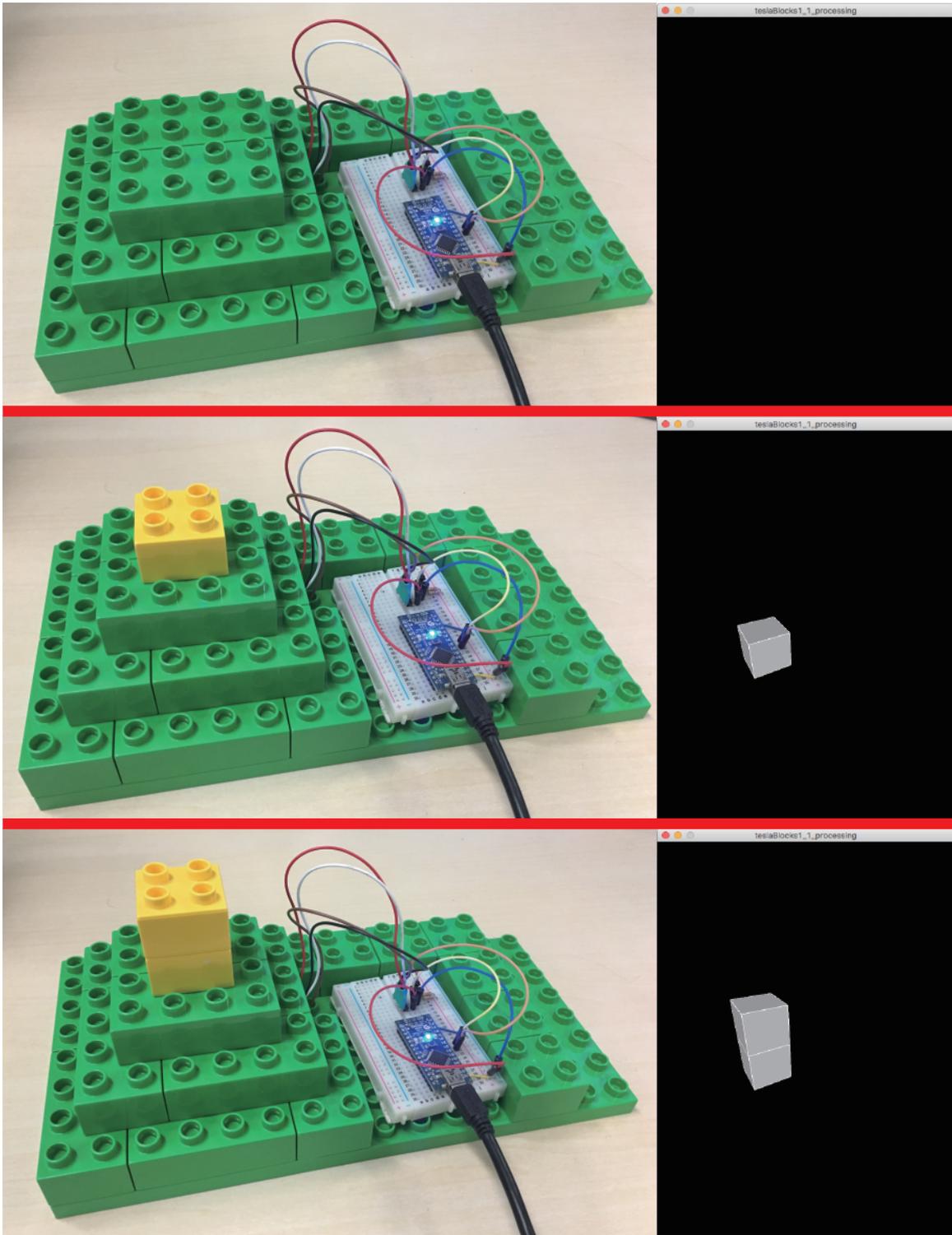


図 4.6: プロトタイプ版 Tesla Blocks を用いた予備実験の様子.

第5章 実装

プロトタイプ版の Tesla Blocks の実装および予備実験の結果から、ブロックの改良およびシステムの拡張を行った。はじめに、改良した磁気ブロックの実装を示す。次に、磁気センサの個数を増やした構造物認識ハードウェアの実装を述べる。最後に、機能を拡張した3Dモデルビューアの実装を述べる。

5.1 磁気ブロック

プロトタイプ版の磁気ブロックは磁石の固定位置に個体差が生じており、磁気センサを用いて測定したときにセンサ値にずれが生じていた。よって、磁石の固定位置に個体差が生じない工夫を行った。プロトタイプ版の磁気ブロックと同様の2×2のLEGO duploと永久磁石の他に、永久磁石を固定するためのスペーサを用いて磁気ブロックを作製した。図5.1に磁気ブロックの構成要素を示す。永久磁石はプロトタイプ版と同様の直径6 mm、高さ2.5 mm、表面における磁束密度220 mTのネオジウム磁石を使用した。2×2のLEGO duploの内部には円筒型の空洞があり、その直径は10.8 mmである(図5.2a)。この空洞にちょうど収まるスペーサを設計し、熱溶解積層方式の3Dプリンタ(Flashforge社製, Dreamer)を用いて印刷した(図5.2b)。スペーサの設計にはAutodesk社製の3DCADソフトウェアであるFusion 360を使用した。スペーサは直径10.5 mm、高さ16.0 mmの円筒形であり、上部に永久磁石を固定するための直径6.25 mm、高さ2.5 mmの窪みを持つ。

5.2 構造物認識ハードウェア

プロトタイプ版の構造物認識ハードウェアは磁気センサを1つ用いて実装されていた。つまり、1×1の格子状に配置された磁気センサアレイを使用していた。この磁気センサアレイを拡張し、2×2の格子状に磁気センサを配置した構造物認識ハードウェアを実装した。構造物認識ハードウェアはマイコン(図5.3a, Arduino Nano)、16チャンネル・アナログ・マルチプレクサ(図5.3b, Texas Instruments社製 CD74HC4067)、ならびに4個の3軸磁気センサ(図5.3c, Honeywell社製 HMC5883L)から構成される。図5.4に構造物認識ハードウェアの回路図を示す。磁気センサを2×2の格子状に、間隔がそれぞれ32 mmとなるようにユニバーサル基板上に配置した。ユーザはこの格子状に配置された磁気センサの上に構造物を作製する。この構造物認識ハードウェアの上部にユーザが構造物を作製できるように、3Dプリンタを用いて磁気センサアレイが収まるケースを印刷した。このケースの上面にはLEGO

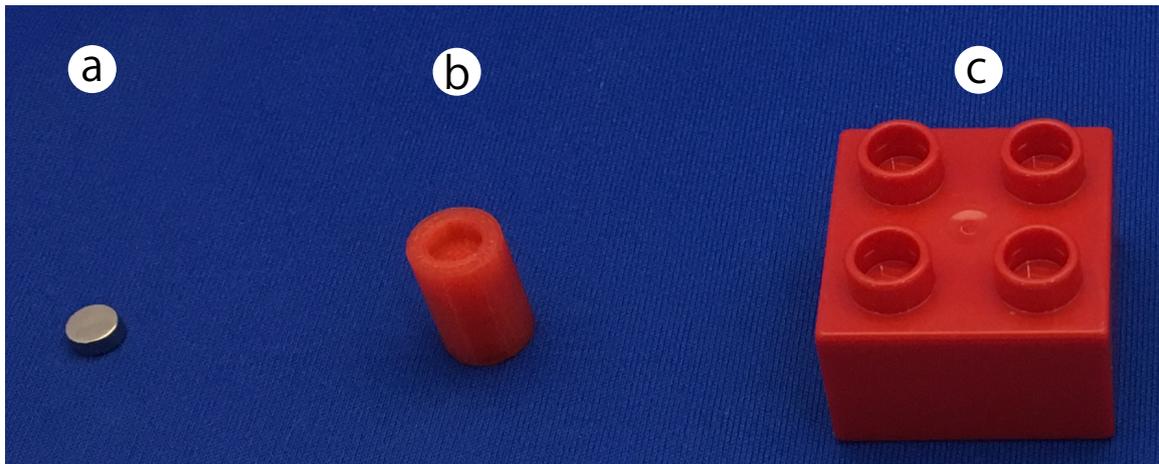


図 5.1: 磁気ブロックの構成要素 : (a) 永久磁石, (b) スペース, (c) LEGO duplo.

duplo と同じ間隔で 8×8 個の突起が並んでいる。また、各磁気センサは 75 Hz にて計測値をマイコンに出力し、 $\pm 0.47 \text{ mT}$ の検出レンジを持つように設定した。なお今回使用した磁気センサでは I²C 通信にて使用するスレーブアドレスが固定であったため、マルチプレクサを用いることによりマイコンと複数の磁気センサとの通信を可能とした。また、地磁気の影響を除くために、マイコンの起動時に取得した磁気センサの計測値をオフセットとして、シリアル通信にて PC へ送信する。

5.3 3D モデルビューア

プロトタイプ版 3D モデルビューアの機能の拡張を行った。プロトタイプ版と同様に、Processing 3 を用いて実装し、3D モデルの描画には P3D を使用した。図 5.5 に 3D モデルビューアの動作例を示す。本改良にて、ユーザが 3D モデルを確認しやすくするために、マウス操作による視点移動機能と拡大および縮小機能を提供している。図 5.6 に視点移動機能と拡大・縮小機能を使用したときの様子を示す。また、構造物の構造認識アルゴリズムを改良し、3 次元の構造物の構造を認識可能とした。構造物の構造認識アルゴリズムの詳細は、第 6 章にて記す。

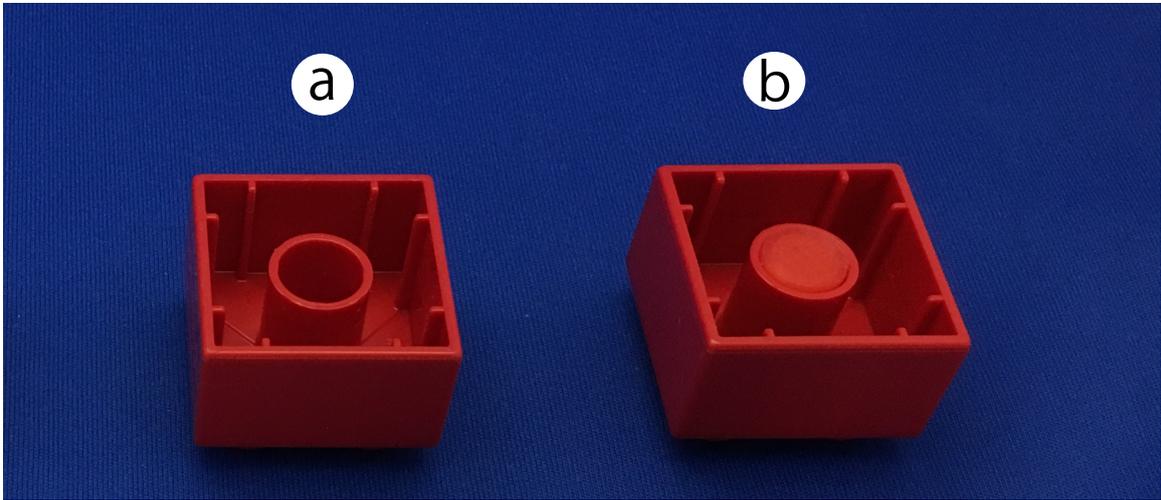


図 5.2: 2 × 2 LEGO duplo の空洞 : (a) 空洞の様子, (b) 空洞にスペーサを入れたときの外観.

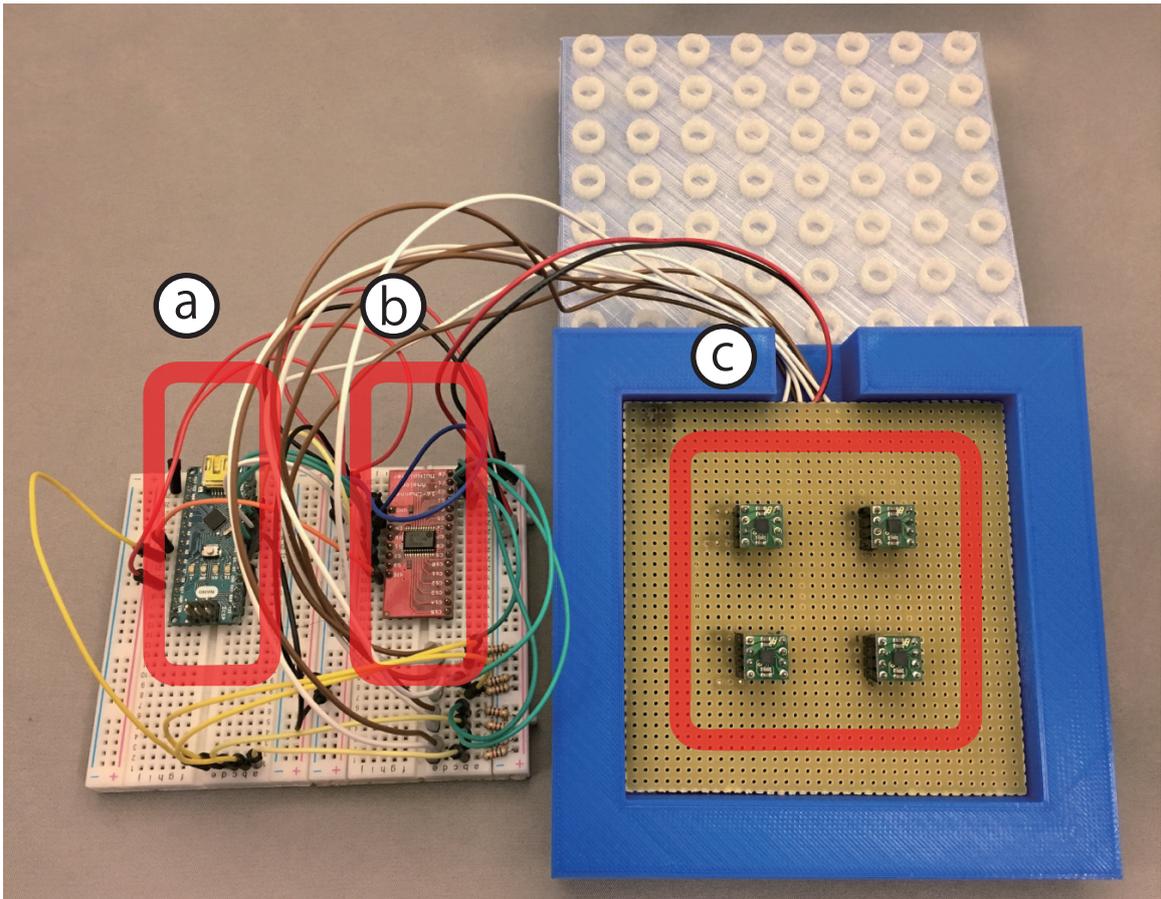


図 5.3: 構造認識ハードウェアの外観 : (a) Arduino Nano, (b) マルチプレクサ, (c) 4つの磁気センサ.

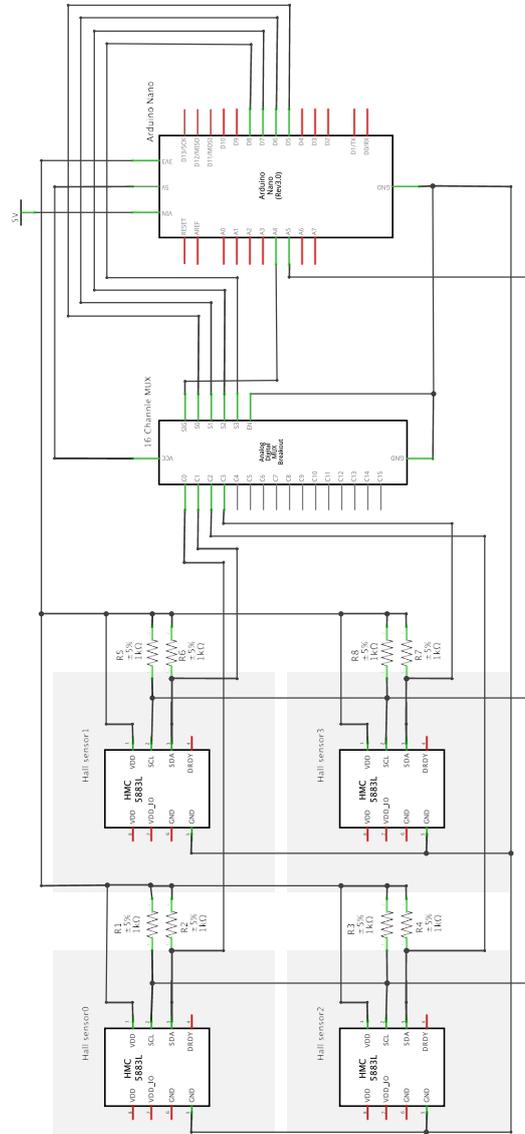


図 5.4: 構造認識ハードウェアの回路図.

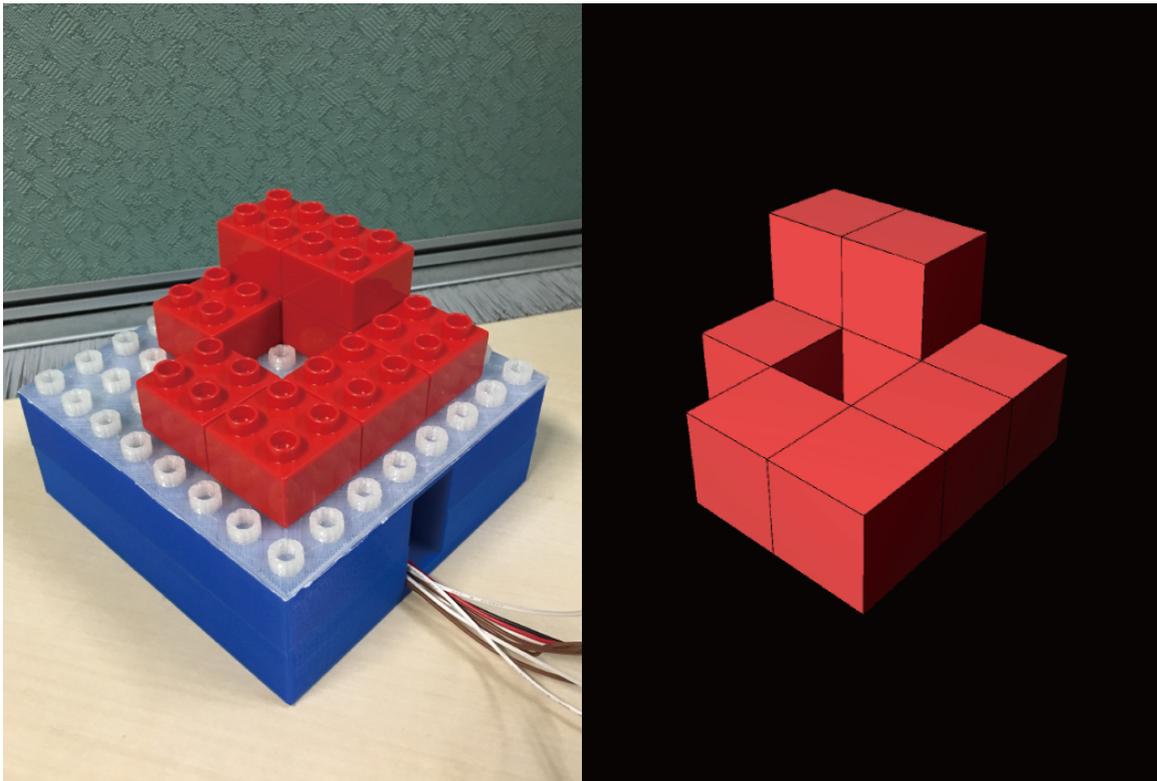


図 5.5: 3D モデルビューアの動作例 : (左) ユーザが作製した構造物, (右) 3D モデルビューアにて描画された 3D モデル.

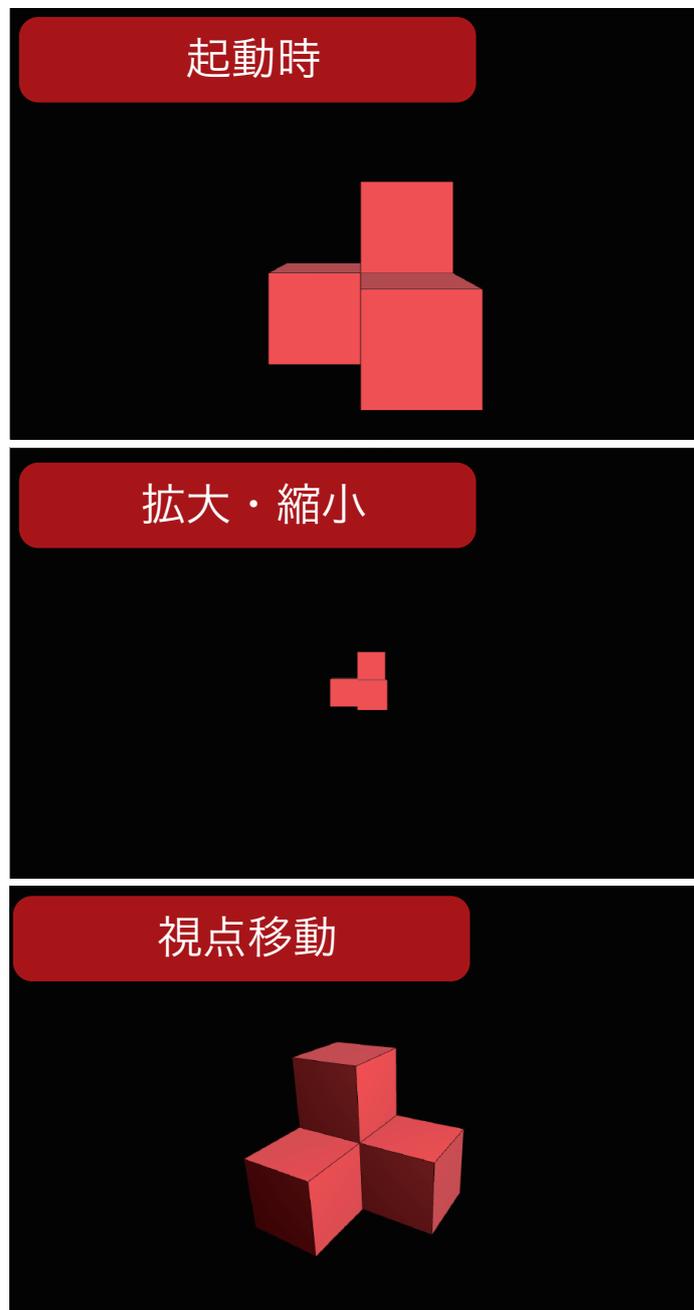


図 5.6: 3D モデルビューアの拡大・縮小機能と視点移動機能 : (上) 起動時の様子, (中) 拡大・縮小機能使用時の様子, (下) 視点移動機能使用時の様子.

第6章 磁気計測に基づくブロック認識

本章にて、磁気を計測することにより、建造物の構造を認識し、3Dモデルとして描画するためのアルゴリズムを示す。はじめに、学習データの作成方法を示す。次に、建造物を認識する2つのアルゴリズムを示す。

6.1 学習データの作成

建造物を3Dモデルとして表現するために、PC内にて扱いやすいようにコード化をする必要がある。建造物は N 行 N 列の各座標に対してそれぞれ0個から M 個までのブロックが積み上げられている。よって、データ数 $N \times N$ に対して、磁気ブロックを1個置いた場合から M 個積み上げた場合の磁気センサの計測値を学習データとして記録する。つまり、 $N \times N \times M$ パターンの計測値を学習データとして記録する。磁気ベクトルには加法定理が成り立つことから、システムは基礎データをもとに、ある建造物が作製されたときの磁気センサの予測値は全てのパターンにおいて算出可能となる。

6.2 建造物の構造認識アルゴリズム

Tesla Blocksは磁気センサの計測値を、建造物を取り得る構造全パターンに対応するセンサ予測値と比較し、最も近いセンサ予測値に対応するパターンを推定結果とする。本節にて、建造物の構造を認識するためのアルゴリズムとして、建造物すべてのパターンから探索するもの（総探索アルゴリズム）および、制約を設けることにより、探索領域を削減したアルゴリズム（制約付きアルゴリズム）の2種類を示す。

6.2.1 総探索アルゴリズム

本アルゴリズムでは、組み立て可能な建造物の構造データすべてに対し、磁気値を予測しておき、総探索を行うことにより建造物の構造を認識する。構造全パターンに対応するセンサ予測値を算出するための基礎データとして、 N 行 N 列の各座標に対して、ブロックを1個置いた場合から M 個積み上げた場合の磁気センサの計測値を記録する。つまり、 $N \times N \times M$ パターンの計測値を基礎データとして記録する。次に、磁気ベクトルには加法定理が成り立つことから、システムは基礎データをもとに、ある建造物が作製された磁気センサの予想計測値を全パターン算出する。実行時、システムは計測値に最も近いセンサ予測値を探索する。

この結果，得られたパターンをユーザが作製した構造物の構造と認識し，3Dモデルビューア上に描画する．本アルゴリズムは総探索を行うため，構造物の規模が大きくなるにつれ，計算コストが大きくなるという問題がある．

6.2.2 制約付きアルゴリズム

本アルゴリズムは，総探索アルゴリズムにて発生した計算コストの問題を解決するために，計算コストを削減したものである．探索コストを削減するために，ブロックは1つずつ増減し，ブロックが増減したときにユーザはPCのEnterキーを押すという制約を設ける．また，システム起動時には何も構造物がない状態であることとする．構造物の予測は，現時点の3Dモデルの状態を基準にして行われる．まず，現状の3Dモデルをコード化し，ハミング距離が1以下となるもの全てに対して，磁気センサの予測値を算出する．例として，表6.1に現在の3Dモデルの構造が2行2列，各座標の高さがそれぞれ $a_{(x,y)}$ のときのセンサ予測値を示す．システムがこの処理を行っている間に，ユーザは構造物に対し磁気ブロックの追加もしくは削減する．その後，ユーザがEnterキーを押すことにより，システムはセンサ予測値と現在の磁気センサの計測値とを比較する．比較の結果として，計測値に最も近いセンサ予測値を探索結果とし，3Dモデルをビューア上に描画する．以上の処理を繰り返すことにより，任意の構造物を3Dモデルとしてビューア上に描画することができる．

表 6.1: データ数 2×2 のときの構造物予測例.

	予測構造物のコード			
変化なし	$a_{(0,0)}$	$a_{(0,1)}$	$a_{(1,0)}$	$a_{(1,1)}$
ブロックを 減らす	$a_{(0,0)} - 1$	$a_{(0,1)}$	$a_{(1,0)}$	$a_{(1,1)}$
	$a_{(0,0)}$	$a_{(0,1)} - 1$	$a_{(1,0)}$	$a_{(1,1)}$
	$a_{(0,0)}$	$a_{(0,1)}$	$a_{(1,0)} - 1$	$a_{(1,1)}$
	$a_{(0,0)}$	$a_{(0,1)}$	$a_{(1,0)}$	$a_{(1,1)} - 1$
ブロックを 増やす	$a_{(0,0)} + 1$	$a_{(0,1)}$	$a_{(1,0)}$	$a_{(1,1)}$
	$a_{(0,0)}$	$a_{(0,1)} + 1$	$a_{(1,0)}$	$a_{(1,1)}$
	$a_{(0,0)}$	$a_{(0,1)}$	$a_{(1,0)} + 1$	$a_{(1,1)}$
	$a_{(0,0)}$	$a_{(0,1)}$	$a_{(1,0)}$	$a_{(1,1)} + 1$

第7章 実験

改良した Tesla Blocks にて認識可能な構造物の規模を調査するための実験を行った。はじめに、実験の方法を述べる。次に、第6章にて記載した2つのアルゴリズムを用いた場合それぞれの結果を示す。

7.1 実験方法

始めに構造物の底面が最大で2行2列とした場合において、どれほどの高さまでシステムが構造認識を正しく行えるのか調査した。まず高さ $2 \times 2 \times 1$ パターンの計測値を学習データとしてシステムに与えたのち、自由に2行2列および、高さ1以下の構造物を作製する。この結果、システムは全ての構造物を正しく認識することが確認されたとする。以降、システムが正しく認識していることが確認された場合、高さを1つ増やし調査を繰り返す。この作業を繰り返し、誤認識が増えてきたときの段数を記録する。次に同じ調査を構造物の底面が最大3行3列とした場合において行う。

7.2 実験結果

本節にて、第6章にて記載した2種類のアルゴリズムである、総探索アルゴリズムと制約付きアルゴリズムを用いたときのそれぞれの結果を示す。2種類のアルゴリズムを用いた際に認識可能なブロックの高さを表7.1にまとめる。

表 7.1: 2種類のアルゴリズムを用いた際の認識可能なブロックの高さ。

	2×2	3×3
総探索アルゴリズム	4	2
制約付きアルゴリズム	3	2

7.2.1 総探索アルゴリズムを用いたときの結果

構造物の底面が最大で2行2列とした場合において、高さ4まではシステムは正しく認識し、高さ5においてはブロック1つ分少なく認識されるなどの誤認識が多くなった。構造物の底面が最大3行3列とした場合、高さ3からシステムの処理が重くなりプログラムの動作

が停止した。この原因として、本システムではあらかじめ全パターンの構造物に対応するセンサ予測値を算出しているため、構造物の規模に応じて指数関数的にセンサ予測値が増えることが考えられる。

7.2.2 制約付きアルゴリズムを用いたときの結果

構造物の底面が最大で2行2列とした場合において、高さ3まではシステムは正しく認識し、高さ4においては誤認識が多くなった。構造物の底面が最大3行3列とした場合において、高さ2まではシステムは正しく認識し、高さ3においては誤認識が多くなった。この制約付きアルゴリズムを用いた場合、処理が停止することはなかった。この原因として、現状態の3Dモデルをコード化し、ハミング距離が1以下となるもの全てに対して、磁気センサの予測値を算出していたが、ハミング距離が1の場合、探索領域が狭すぎたためと考えられる。

第8章 議論

本章にて、磁気計測に基づくブロック型 TUI である Tesla Blocks の議論を記す。はじめに、本システムの動作制限を述べる。次に、今後の課題を述べる。

8.1 システムの動作制限

Tesla Blocks は、従来のシステムと比較して、カメラの死角やユーザの手によるオクルージョンの問題を解決している。しかし、磁気を持つ物体や磁性体、磁気シールドとなるような物体などがシステムに近づいた場合、システムは正しく動作しない可能性がある。また、地磁気の影響を防ぐために、システム起動時にオフセットを設定している。しかし、システム動作時に構造物認識ハードウェアを動かすと、オフセットを設定し直す必要がある。

総探索アルゴリズムの場合、探索領域が大きくなりすぎるため、計算量が膨大となり、システムに負荷がかかるという問題が生じる。また、制約付きアルゴリズムは計算コストを削減するために、構造物のブロックを1つずつ増減させ、加えてキー入力をしなければならぬという制約がある。

8.2 今後の課題

現在のシステムが誤認識を起こす原因に、磁気距離特性が挙げられる。構造物の段数が高くなるにつれブロックを置く際の磁気センサとの距離が大きくなる。磁気は距離の2乗に反比例するため、センサ値の変化量が小さくなり、認識精度が低下したと考えられる。また、磁気ブロックの誤差（永久磁石の磁気、スペーサの大きさなど）や構造認識ハードウェアの磁気センサの精度誤差も誤認識の原因として考えられる。したがって今後、誤認識の原因を調査し、また磁気センサの数および、格子状に配置する際の密度を上げるなどの工夫によって、改良を試みる計画である。さらに、構造物の構造を認識するアルゴリズムを改良する必要がある。加えて、現在のシステムは4個の磁気センサを2×2の格子状に配置しているが、3×3のシステムなど磁気センサを増やしたときにどのような影響が出るかを調査する必要がある。その他に、磁気センサの配置を格子状だけでなく、立体的に配置するなどの工夫により、距離特性の問題を解決し精度向上を試みる。

第9章 結論

本論文にて，磁気センサを格子状に配置したハードウェアを用いて，ユーザによって組み立てられたブロックの構造を認識するブロック型 TUI である **Tesla Blocks** の設計および実装を示した．本システムのブロックは永久磁石のみを内蔵するという単純な構造を持つため，追加の回路や電源を必要としない．また，構造の認識に用いる電子回路は，ユーザが構造物を作製する土台に統合されているため，カメラを用いるシステムと比較し，小型なシステムを実現した．

構造物を認識するために総探索アルゴリズムと制約付きアルゴリズムの2つのアルゴリズムを考案した．総探索アルゴリズムでは，底面が最大で2行2列とした場合において実験を行った結果，高さ4まではシステムは正しく認識し，高さ5においては誤認識が多くなった．また，3行3列とした場合において，実験を行った結果，高さ2まではシステムは正しく認識し，高さ3においてはシステムの処理が重くなり，動作が停止した．制約付きアルゴリズムでは，底面が最大で2行2列とした場合において実験を行った結果，高さ3まではシステムは正しく認識し，高さ4においては誤認識が多くなった．また，3行3列とした場合において，実験を行った結果，高さ2まではシステムは正しく認識し，高さ3においては誤認識が多くなった．制約付きアルゴリズムでは，処理が停止することはなかった．

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，嵯峨智先生，シモナ・ヴァシラケ先生には多くのご意見とご指導をいただきました。心からお礼申し上げます。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。ここに深く感謝いたします。

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 チームの皆様にはゼミをはじめ，論文執筆を行った際には多くのご助言や添削など，多くのご支援をいただきました。

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方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [AFM⁺00] David Anderson, James L. Frankel, Joe Marks, Aseem Agarwala, Paul Beardsley, Jessica Hodgins, Darren Leigh, Kathy Ryall, Eddie Sullivan, and Jonathan S. Yedidia. Tangible Interaction + Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '00*, pp. 393–402, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [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.
- [AST16] Tetsuya Abe, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Input Techniques to the Surface Around a Smartphone using a Magnet Attached on a Stylus. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '16*, pp. 2395–2402, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [Bad] Paul Badger. Capacitive Sensing Library. <http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor> (2017年1月20日閲覧) .
- [BBR10] Patrick Baudisch, Torsten Becker, and Frederik Rudeck. Lumino: Tangible Building Blocks Based on Glass Fiber Bundles. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies, SIGGRAPH '10*, pp. 16:1–16:1, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [BO13] Andrea Bianchi and Ian Oakley. Designing Tangible Magnetic Accessories. In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '13*, pp. 255–258, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [BO15] Andrea Bianchi and Ian Oakley. MagnID: Tracking Multiple Magnetic Tokens. In *Proceedings of the 9th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, TEI '15*, pp. 61–68, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [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 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 2189–2192, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [FIB95] George W. Fitzmaurice, Hiroshi Ishii, and William A. S. Buxton. Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '95, pp. 442–449, New York, NY, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [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.
- [GVM⁺16] Oliver Glauser, Benedek Vartok, Wan-Chun Ma, Daniele Panozzo, Alec Jacobson, Otmar Hilliges, and Olga Sorkine-Hornung. Rig Animation with a Tangible and Modular Input Device. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16 Adjunct, pp. 35–36, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [HMT⁺15] Jiawei Huang, Tsuyoshi Mori, Kazuki Takashima, Shuichiro Hashi, and Yoshifumi Kitamura. IM6D: Magnetic Tracking System with 6-DOF Passive Markers for Dexterous 3D Interaction and Motion. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 6, pp. 217:1–217:10, October 2015.
- [HTA⁺14] Toshiki Hosoi, Kazuki Takashima, Tomoaki Adachi, Yuichi Itoh, and Yoshifumi Kitamura. A-blocks: Recognizing and Assessing Child Building Processes During Play with Toy Blocks. In *SIGGRAPH Asia 2014 Emerging Technologies*, SA '14, pp. 1:1–1:2, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [IML01] Hiroshi Ishii, Ali Mazalek, and Jay Lee. Bottles as a Minimal Interface to Access Digital Information. In *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '01, pp. 187–188, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [ITA⁺16] Koshi Ikegawa, Masaya Tsuruta, Tetsuya Abe, Arika Yoshida, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Lightweight Capacitance-based Block System for 3D Space Interaction. In *Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, pp. 307–312, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [IU97] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, pp. 234–241, New York, NY, USA, 1997. ACM.

- [JGAK07] Sergi Jordà, Günter Geiger, Marcos Alonso, and Martin Kaltenbrunner. The reacTable: Exploring the Synergy Between Live Music Performance and Tabletop Tangible Interfaces. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '07, pp. 139–146, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [LCC⁺13] Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, Liwei Chan, Chuan-Xhyuan Peng, Mike Y. Chen, Rung-Huei Liang, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussBits: Magnetic Tangible Bits for Portable and Occlusion-Free Near-Surface Interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 1391–1400, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [LCCY12] Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, Bing-Yu Chen, and De-Nian Yang. GaussSketch: Add-on Magnetic Sensing for Natural Sketching on Smartphones. In *ACM SIGGRAPH 2012 Posters*, SIGGRAPH '12, pp. 39:1–39:1, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [LCS⁺12] Rong-Hao Liang, Kai-Yin Cheng, Chao-Huai Su, Chien-Ting Weng, Bing-Yu Chen, and De-Nian Yang. GaussSense: Attachable Stylus Sensing using Magnetic Sensor Grid. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 319–326, New York, NY, USA, 2012. 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 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 3153–3162, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LEG] LEGO. mindstorms. <https://www.lego.com/ja-jp/mindstorms> (2017年1月20日閲覧) .
- [lit] littleBits Electronics. littleBits. <http://jp.littlebits.com/> (2017年1月20日閲覧) .
- [LKC⁺14] Rong-Hao Liang, Han-Chih Kuo, Liwei Chan, De-Nian Yang, and Bing-Yu Chen. GaussStones: Shielded Magnetic Tangibles for Multi-Token Interactions on Portable Displays. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 365–372, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LKC16] Rong-Hao Liang, Han-Chih Kuo, and Bing-Yu Chen. GaussRFID: Reinventing Physical Toys using Magnetic RFID Development Kits. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 4233–4237, New York, NY, USA, 2016. ACM.

- [LSW⁺12] Rong-Hao Liang, Chao-Huai Su, Chien-Ting Weng, Kai-Yin Cheng, Bing-Yu Chen, and De-Nian Yang. GaussBrush: Drawing with Magnetic Stylus. In *SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies*, SA '12, pp. 11:1–11:2, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [LYH⁺15] Sheng-Jie Luo, Yonghao Yue, Chun-Kai Huang, Yu-Huan Chung, Sei Imai, Tomoyuki Nishita, and Bing-Yu Chen. Legolization: Optimizing LEGO Designs. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 34, No. 6, pp. 222:1–222:12, October 2015.
- [Mic] Microsoft. Surface Dial. <https://www.microsoft.com/en-us/surface/accessories/surface-dial> (2017年1月20日閲覧) .
- [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.
- [PHAM13] PHAM THANH SON, 高橋伸, 田中二郎. G-Shark: 磁石を利用した携帯端末3次元入力インタフェース. *インタラクシオン 2013*, pp. 787–789, 2013.
- [Pro] Processing. Processing 3. <https://processing.org/> (2017年1月20日閲覧) .
- [Rea] Reactable Systems. reactTable. <http://reactable.com/> (2017年1月20日閲覧) .
- [UI00] Brygg Ullmer and Hiroshi Ishii. Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces. *IBM Systems Journal*, Vol. 39, No. 3-4, pp. 915–931, 2000.
- [WIA⁺04] Ryoichi Watanabe, Yuichi Itoh, Masatsugu Asai, Yoshifumi Kitamura, Fumio Kishino, and Hideo Kikuchi. The Soul of ActiveCube: Implementing a Flexible, Multimodal, Three-Dimensional Spatial Tangible Interface. *Computers in Entertainment*, Vol. 2, No. 4, pp. 15–15, October 2004.
- [YST15] Arika Yoshida, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Capacitive Blocks: A Block System that Connects the Physical with the Virtual using Changes of Capacitance. In *Adjunct Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15 Adjunct, pp. 85–86, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [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 (WISS2015), 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. インタラクシオン 2015, pp. 598–601, 2015.
- [続毅 16] 続毅海, 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, December 2016.
- [電子] 電子ブロック機器製造株式会社. 電子ブロック. <http://www.denshiblock.co.jp/> (2017年1月20日閲覧).