

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

ブロック構造物に対する
磁気計測に基づく構造認識
およびその3Dモデリングシステムへの応用

池川 航史

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 志築 文太郎

2019年3月

概要

幼少期の頃、様々な夢を思い描きながらブロック遊びをした経験はあるだろうか。子どもたちが作り上げた作品を3DモデルとしてPCに読み込み、大型の3Dプリンタを用いて同じ構造を持つ物体を印刷することで、この夢を少しばかり現実のものとする事ができるだろう。本論文では、その夢を実現する第一歩として、ブロック構造物に対する磁気計測に基づく構造認識手法を提案する。また、その構造認識手法を応用し、タンジブル3Dモデリングシステムを作成した。これまでに、本研究の他にも積み木やLEGOのようなブロック型の物体を3Dモデリングに利用するシステムが研究されてきた。これらの多くは電子回路を内蔵したブロックを用いて、ブロック同士が電気信号を送受信することによりブロック構造物の構造を認識している。またブロック構造物全体を俯瞰できる位置に設置した深度カメラの映像から構造を認識する手法も存在する。ただし、これらの手法にはブロック自体が複雑になるという問題や、カメラ映像を用いることに伴ってオクルージョンが発生することから構造物全体を認識できないという問題がある。これらの問題を解決するために、本論文で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用いたシステムを提案する。提案システムは、磁石のみを内蔵するという単純な構造を持つブロックからなる構造物の構造認識を磁気計測に基づいて行い、認識結果を3Dモデルとしてディスプレイに描画する。本論文では、提案システムの実装方法を示し、ブロック構造物の高さおよび3軸磁気センサの使用個数を変化させたときの認識精度を評価する実験を行った。16個の3軸磁気センサを使用した場合、ブロック構造物の最大規模が $2 \times 2 \times 2$ のときの構造認識精度は80.1%であった。また、ブロック構造物の最大規模を $2 \times 2 \times 3$ としたときの構造認識精度は17.7%であり、高さ方向に規模を大きくすると認識精度が低下することが分かった。そこで、3軸磁気センサを64個使用した場合の認識精度を評価する実験を行った。結果、ブロック構造物の最大規模を $2 \times 2 \times 3$ としたときの構造認識精度は77.7%であり、16個の3軸磁気センサを使用したときと比較して構造認識精度は大きく向上することが分かった。

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の特性	1
1.2	タンジブル3Dモデリングシステムへの応用	3
1.3	既存のタンジブル3Dモデリングシステムが抱える問題点	3
1.4	本研究の目的およびアプローチ	3
1.5	本研究における用語の定義	4
1.6	本研究の貢献	4
1.7	本論文の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	タンジブルユーザインタフェースの基礎概念	5
2.2	タンジブルユーザインタフェースの応用研究	5
2.3	ブロック構造物の構造認識手法に関する研究	6
2.3.1	電子回路を内蔵したブロックを用いた構造認識手法	6
2.3.2	カメラ映像を用いた構造認識手法	7
2.3.3	その他のブロック構造認識手法	7
2.4	磁気計測に基づく入力インタフェースに関する研究	8
2.5	本研究の位置付け	9
第3章	磁気計測に基づくブロック構造認識技術	10
3.1	磁気の特性と構造認識の原理	10
3.2	提案システムにおける座標系の定義	10
3.3	提案システムにおける変数の定義	12
3.3.1	磁気データ m の定義	12
3.3.2	ブロック構造物の構造データ s の定義	12
3.4	磁気計測に基づく構造認識の具体例	12
3.5	磁気計測に基づくブロック構造認識システムの特徴	15
第4章	実装	17
4.1	提案システムの実装概要	17
4.2	提案システムに用いるブロック	17
4.3	磁気計測ハードウェア	18

4.3.1	磁気計測ハードウェアの回路	18
4.3.2	Arduino プログラムの実装	22
4.3.3	磁気計測ハードウェアの筐体	22
4.4	トレーニングデータ作成ソフトウェア	23
4.4.1	トレーニングデータ作成ソフトウェアの実装	23
4.4.2	トレーニングデータ作成ソフトウェアの操作方法	23
4.5	構造認識ソフトウェア	26
4.5.1	構造認識アルゴリズム	26
4.6	3D モデルビューア	27
4.6.1	3D モデルビューアの実装	27
4.6.2	3D モデルビューアの操作方法	28
第 5 章	提案システムの使用方法	30
5.1	提案システムの動作手順	30
5.2	提案システムの動作例	30
第 6 章	評価実験	32
6.1	実験環境	32
6.2	実験設計	32
6.2.1	実験 1：磁気計測ハードウェアから得られる 16 個の 3 軸磁気センサアレイから得られる磁気データを使用した実験	32
6.2.2	実験 2：ブロック構造物を 4 回動かすことによって擬似的に 64 個の 3 軸磁気センサから得られる磁気データを使用した実験	34
第 7 章	実験結果	36
7.1	構造認識精度：各ブロック構造物の構造全体が正しく認識されているかについての精度	36
7.1.1	構造認識精度の定義	36
7.1.2	構造認識精度に関する評価実験結果	36
7.2	ブロック認識精度：ブロック構造物を構成する磁気ブロック 1 つ 1 つが正しく認識されているかについての精度	38
7.2.1	ブロック認識精度の定義	38
7.2.2	ブロック認識精度に関する評価実験結果	38
第 8 章	議論	42
8.1	ブロック構造物の認識可能な規模	42
8.2	磁気計測ハードウェアの 3 軸磁気センサの個数	42
8.3	3 軸磁気センサアレイのセンサ間隔	42
8.4	永久磁石の表面磁束密度	43
8.5	地磁気や周辺の電子機器の影響	43

8.6	トレーニングデータについての議論	43
第9章	まとめ	44
	謝辞	45
	参考文献	51
	著者論文リスト	52
付録A	磁気ブロックの円筒形固定具設計図	55
	A.1 円筒形固定具 3D モデルの外観図	56
	A.2 円筒形固定具 3D モデルの三面図	57
付録B	磁気計測ハードウェアの設計図	58
	B.1 磁気計測ハードウェアの回路図	59
	B.2 筐体下部 3D モデルの外観図	60
	B.3 筐体下部 3D モデルの三面図	61
	B.4 8 × 8 の突起を持つ筐体上部の 3D モデルの外観図	62
	B.5 8 × 8 の突起を持つ筐体上部の 3D モデルの三面図	63
	B.6 4 × 4 の突起を持つ筐体上部の 3D モデルの外観図	64
	B.7 4 × 4 の突起を持つ筐体上部の 3D モデルの三面図	65

目次

1.1	タンジブルユーザインタフェースの特性：ユーザが意識している対象物と実際に操作をしている対象物は同一である。	2
1.2	グラフィカルユーザインタフェースの特性：ユーザが意識している対象物と実際に操作をしている対象物は異なっている。	2
3.1	磁気ベクトルの和：磁石 a および磁石 b が存在する状態における観測点の磁気。	11
3.2	提案システムにおける座標系。	11
3.3	提案システムから得られる磁気データの各要素：提案システムでは 16 個の 3 軸磁気センサを使用しているため $n = 16$ であり、48 個の要素を持つ磁気データが得られる。	13
3.4	構造データの例。	14
3.5	ブロック構造物の例： $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の規模のブロック構造物。	14
3.6	磁気 B_{STR} を構成する磁気である、 $B_{1,1,1}$ 、 $B_{2,1,1}$ 、および $B_{1,1,2}$ 。	16
3.7	$B_{1,1,1} + B_{2,1,1} + B_{1,1,2}$ を計算することによって得た磁気 B_{STR} の予想値と磁気 B_{STR} の実測値。	16
4.1	磁気ブロックの外観。	19
4.2	空ブロックの外観。	19
4.3	磁気ブロックの構成：左) 2×2 LEGO Duplo ブロック、中) 円筒形固定具、右) ネオジム永久磁石。	19
4.4	磁気ブロックの組み立て方法。	19
4.5	磁気計測ハードウェアの外観。	20
4.6	磁気計測ハードウェアの回路：a) 4×4 の格子状に配置された 3 軸磁気センサ、b) 16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサ、c) マイコンボード。	20
4.7	3 軸磁気センサ (Honeywell 社製 HMC5883L)。	21
4.8	16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサ (Texas Instruments 社製 CD74HC4067)。	21
4.9	Arduino マイコンボード (Arduino Nano)。	21
4.10	マイコンボードからシリアル通信によって出力される磁気の測定値の例 (Arduino シリアルモニタのスクリーンショット)。	22
4.11	筐体下部 (3 軸磁気センサアレイを格納する)。	24
4.12	アクリル板。	24

4.13	8 × 8 の突起を持つ筐体上部。	24
4.14	4 × 4 の突起を持つ筐体上部。	24
4.15	磁気計測ハードウェアの組み立て方法。	25
4.16	磁気計測ハードウェアの回路を筐体に内蔵したときの外観。	25
4.17	8 × 8 の突起を持つ筐体上部を使用したときの外観。	25
4.18	4 × 4 の突起を持つ筐体上部を使用したときの外観。	25
4.19	ブロック構造物が $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の場合に、記録する必要がある磁気データ得るためのブロック構造物の例。	26
4.20	3D モデルビューアのスクリーンショット。	29
5.1	提案システムの動作例：a) 起動時、b) $x = 1$ 、 $y = 1$ 、 $z = 1$ の座標に磁気ブロックを置いたとき、c) $x = 1$ 、 $y = 1$ 、 $z = 2$ の座標に磁気ブロックを置いたとき、d) $x = 2$ 、 $y = 1$ 、 $z = 1$ の座標に空ブロックを置いたとき、e) $x = 2$ 、 $y = 1$ 、 $z = 2$ の座標に磁気ブロックを置いたとき。	31
6.1	実験環境。	33
6.2	ブロック構造物を動かすことによって擬似的に 64 個の 3 軸磁気センサを持つ磁気計測ハードウェアを使ったブロック構造認識をしている様子。	34
7.1	実験結果の例：(a) テストデータと認識結果が完全一致、(b) 認識結果に足りないブロックがある、(c) 認識結果は不要なブロックを 1 つ含む、(d) 認識結果は足りないブロックと不要なブロックをそれぞれ 1 つずつ含む。	37
7.2	構造認識精度の結果を示すグラフ：a) ブロック構造物を構成するすべてのブロックが正しい位置に存在した場合、b) 不必要なブロックが存在した場合、c) 必要なブロックが存在しなかった場合、d) 不必要なブロックが存在し、必要なブロックが存在しなかった場合。	39
7.3	ブロック認識精度の結果を示すグラフ：a) 正しくブロックが存在した場合、b) 正しくブロックが存在しなかった場合、c) 不必要なブロックが存在した場合、d) 必要なブロックが存在しなかった場合。	41

表目次

7.1	構造認識精度の実験 1 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.2 参照)	39
7.2	構造認識精度の実験 2 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.2 参照)	39
7.3	ブロック認識精度の実験 1 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.3 参照)	41
7.4	ブロック認識精度の実験 2 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.3 参照)	41

第1章 序論

幼少期の頃、積み木やブロックなどの玩具を用いて好きなものを想いのままに作り上げた経験はあるだろうか。憧れのスーパーカーや飛行機、戦艦に乗ることや、城や大豪邸に住むことなど、様々な夢を思い描きながらブロック遊びをしたことだろう。子どもたちが作り上げた作品を3DモデルとしてPCに読み込み、大型の3Dプリンタを用いて同じ構造を持つ物体を印刷することで、この夢を少しばかり現実のものとするができるだろう。こうしたモノづくりを経験した子どもたちが成長し、より高度なモノづくりに興味を持つことができたならば、世界の工業や産業はより発達できる。私は、ブロック構造物に対する構造認識手法が実現された暁には、より良い世界が待っていると考える。

本研究では、永久磁石を内蔵したブロックによって構築された構造物に対する、磁気計測に基づく構造認識手法およびその3Dモデリングシステムへの応用を示す。本章において、はじめに背景としてタンジブルユーザインタフェースの特性を述べる。次に、タンジブル3Dモデリングシステムへの応用を述べる。続いて、タンジブル3Dモデリングシステムが抱える問題点を述べる。また、本研究の目的およびアプローチを述べる。最後に、本論文の構成を述べる。

1.1 タンジブルユーザインタフェースの特性

実世界に存在する有形の物体に対して、ユーザが動かす、触れる、および2つの物体を近づけるなどの動作をコンピュータへの入出力操作に用いるタンジブルユーザインタフェース(TUI)という概念が提唱されている[FIB95, IU97, UI00, Ish08]。TUIによる操作の場合は、ユーザが意識している対象物と実際に操作をしている対象物が同一であるという特性がある(図1.1)。一方で、グラフィカルユーザインタフェース(GUI)の場合、ユーザが意識している対象物と実際に操作をしている対象物が異なるという特性がある(図1.2)。例えばGUIによる操作の場合、ユーザが実際に操作している対象はマウスやトラックパッドであることに対して、ユーザの意識はディスプレイに描画されたカーソルに向いている。GUIによる操作と比較してTUIによる操作では、意識の対象と操作の対象が同一であるため、コンピュータに詳しくないユーザでも理解しやすいインタフェースが実現できる。よって、子どもや3D CADソフトウェア初学者向けの分かりやすいユーザインタフェースの実現可能性を有する。

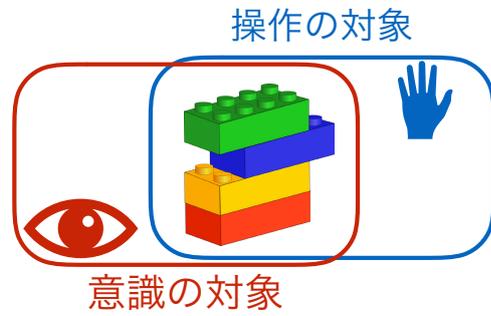
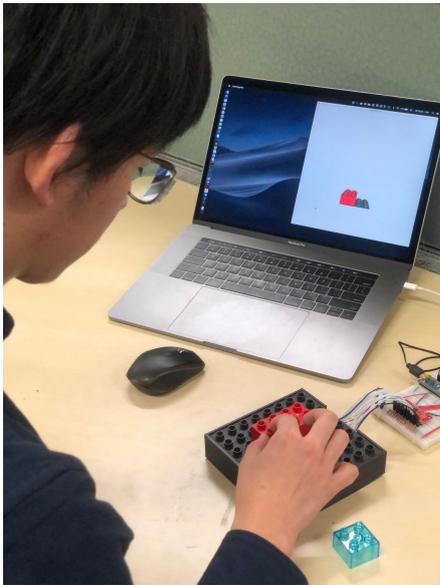


図 1.1: タンジブルユーザインタフェースの特性：ユーザが意識している対象物と実際に操作をしている対象物は同一である。

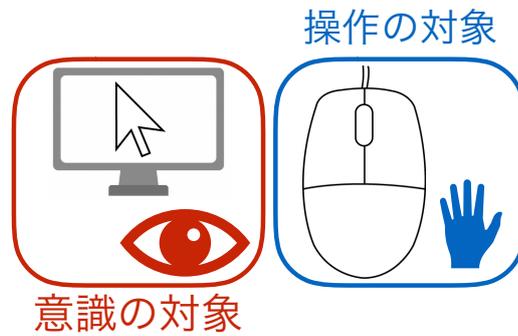
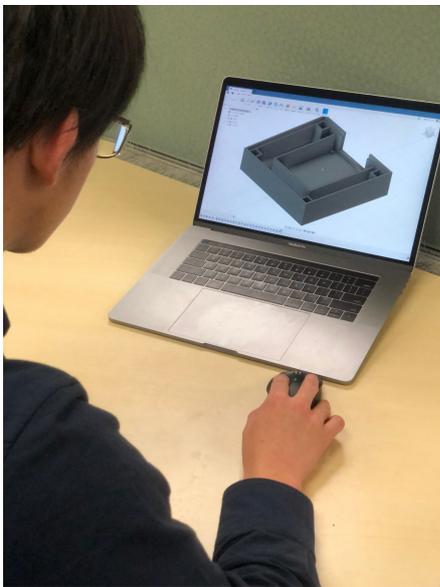


図 1.2: グラフィカルユーザインタフェースの特性：ユーザが意識している対象物と実際に操作をしている対象物は異なっている。

1.2 タンジブル 3D モデリングシステムへの応用

タンジブルユーザインタフェースには音楽プレイヤー [IML01, Ish04] や子ども向けの知育玩具 [FSMI00] など、複数の応用例が示されている。本研究においては、積み木や LEGO ブロックのようなブロック型の物体を組み合わせたたり積み上げる操作によって構造物を作製し、その構造物の構造を認識する研究に焦点を当てた [AIH⁺14, BBR10]。ブロック型の物体を組み立てる操作はユーザの意識の対象と操作の対象が同一である。したがって、この操作をコンピュータへの入力として使用することは、TUI の概念が適用されることを意味する。加えて、ブロックを組み合わせて作製された構造物の構造を認識して 3D モデルとして描画するブロック型タンジブル 3D モデリングシステムの研究がなされている [AFM⁺00, BBR10, MWC⁺12]。これらの研究では、ブロック形状のオブジェクトを組み立てるというメタファに基づいて 3D モデルが作成されるため、ユーザにとって分かりやすい操作となる。

1.3 既存のタンジブル 3D モデリングシステムが抱える問題点

ブロック型タンジブル 3D モデリングシステムを実現するために、組み立てられたブロック構造物の構造を認識する必要がある。その手法は大きく 2 つに分けることができる。1 つ目は、ブロックに内蔵されたマイコンボード同士が電気や電磁波などを介して信号を送受信することによりブロック構造物の構造を認識する手法である。2 つ目は、構造物全体を俯瞰できる位置に設置された単数および複数のカメラ映像からブロック構造物の構造を認識する手法である。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り、ブロック 1 つのコストが高くなる問題や、メンテナンス性が悪くなる問題がある。また、2 つ目の手法にはカメラを使用するため、ユーザの手などの障害物により認識できないブロックが存在するオクルージョンが発生することにより、ブロック構造物全体の正しい構造を認識できない問題がある。

1.4 本研究の目的およびアプローチ

以上の問題に対して本研究では、磁気を計測することによりブロック構造物の構造認識をするブロック型タンジブル 3D モデリングシステムを開発した。提案システムは、ユーザによって組み立てられたブロック構造物の構造を認識し、3D モデルをディスプレイに描画する。ブロックにマイコンボードを含む電子回路を内蔵する手法に比べて、メンテナンス性の高いシステムを実現した。ユーザは永久磁石を市販の LEGO Duplo ブロックに取り付けるのみで提案システムのブロックを準備することができる。さらに、磁気が構造を認識するためにユーザの手によるオクルージョンは発生しない。

1.5 本研究における用語の定義

本研究におけるタンジブル3Dモデリングシステムとは、ユーザが作製した実世界の構造物の構造を認識して3Dモデルを構築するシステム（または3Dモデルの構築が実現可能であるシステム）全体を指す。また、本論文における提案システムとは、ブロック構造物に対する磁気計測に基づく構造認識およびその3Dモデリングシステムを指す。

1.6 本研究の貢献

本研究の貢献を以下に列挙する。

- 市販のLEGO Duplo ブロックに永久磁石を取り付けるのみの単純な構造を持つブロックを用いた構造認識を可能とした。
- 磁気計測に基づいた構造認識アルゴリズムにより、オクルージョンの問題が発生しないブロック構造物の構造認識を可能とした。
- 永久磁石を取り付けていないブロックと組み合わせることにより、中空構造を持つブロック構造物の3Dモデリングを可能とした。
- 提案システムのブロック構造物の構造認識精度を評価し、システムの有用性を示すとともに利用制限についての議論を示した。

1.7 本論文の構成

本論文の構成を述べる。第1章において、本論文の序論を述べる。第2章では、関連研究と本研究の位置づけを述べる。第3章では、磁気計測に基づくブロック構造認識技術について述べる。第4章では、本研究で提案するシステムの実装について述べる。第5章では、提案システムの使用方法を述べる。第6章では、提案システムの認識精度を評価する実験について述べる。第7章では、認識精度を評価する実験の結果について述べる。第8章では、実験結果、提案システムの制限および今後の課題を議論する。第9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、ブロック構造物を認識するための手法、3Dモデリングをするための手法、磁気センサと永久磁石を用いたインタラクション技術の研究が多数行われている。本章において、これらの中で、特に我々の手法に関連する研究について概説する。はじめにタンジブルユーザインタフェースの概念とその応用研究を紹介する。次にブロック構造物の構造認識手法に関する研究を紹介する。続いて、磁気計測に基づく入力インタフェースに関する研究を紹介する。最後に、本研究の位置付けを述べる。

2.1 タンジブルユーザインタフェースの基礎概念

GUIは汎用性の高いインタフェースを目的としており、複数のアプリケーションドメインにおいて利用可能である。一方で、TUIは特定のアプリケーションドメインにおいて利用可能なインタフェースによってユーザビリティの向上を目的としている。Fitzmauriceら[FIB95, Fit96]のBricksでは、Graspable User Interfaces (Graspable UI)という概念が提唱されている。この研究では、ユーザが把持可能な実世界のBricksと呼ばれるレンガ状の物体に対して直接操作をすることをコンピュータへの入力として用いる。このGraspable UIを包含する概念として、Ishiiら[IU97, 石井02, Ish08]およびUllmerら[UI00]は、情報に物理的実体を与えることによって直接接触して感知および操作できるようにするためのタンジブルユーザインタフェース(TUI)という概念を提案した。TUIは、実世界の物体を握る、動かす、触れるなどの動作を入力操作として利用するインタフェースである。これらの動作は人間が幼少期から日常的に行ってきた動作であり、ユーザはシステムを利用する前に操作方法の訓練が済んでいる状態である。そのため、ユーザはシステムを利用する前に追加の学習をする必要がなく、分かりやすいシステムを実現できる。

2.2 タンジブルユーザインタフェースの応用研究

TUIの概念が提案された後に実現された応用研究を紹介する。Ullmerら[UI97]のmetaDESKは、デスク型のシステムであり、多数のセンサおよびプロジェクタより構成される。実世界のPhiconと呼ばれる物体をデスク上で動かす動作をシステムへの入力操作としている。Freiら[FSMI00]のCurlybotはマイコンボードによって制御される2つの独立したタイヤを持つ玩具である。ユーザがCurlybotの記録ボタンを押した後に平面上を動かすと、Curlybotはその軌道をメモリに記録する。次に、ユーザが再生ボタンを押して放すとメモリに記録された

軌道通りに動き始める。Ishii ら [IML01, Ish04] の bottles はユーザが実世界のボトルの蓋を直接手で開けることによって、そのボトルの中に詰まった情報にアクセスできるというコンセプトを実現したものである。蓋を開けることによって音楽や天気予報などの音声再生が開始され、蓋を閉めることにより音声停止するという、情報へのアクセスを可能とするインタフェースである。Piper ら [PRI02] の Illuminating Clay は、ユーザが粘土によって作製した景観モデルの地形を 3D スキャナを用いてリアルタイムでコンピュータに読み込む。その後、地形の斜面の角度を計算することによって得られた標高のデータを、プロジェクトで色付けして投影するシステムである。

本研究では、子どもや 3D CAD ソフトウェア初心者が利用しても分かりやすい 3D モデリングシステムを提案する。Ishii らによって提唱された TUI の概念を継承し、実世界に存在するブロック型の物体をユーザの手で組み立てて構造物を作製するという操作を入力操作に用いることで追加の学習が不要な 3D モデリングシステムを実現した。

2.3 ブロック構造物の構造認識手法に関する研究

TUI の概念を用いた、ユーザにとって理解しやすい 3D モデリングシステムの研究が行われてきた。このシステムでは、ユーザが実世界のブロック型の物体を組み合わせて作製したブロック構造物の構造を認識する必要がある。本節では、ブロック構造物の構造認識手法に関する研究を紹介する。はじめに、電子回路を内蔵したブロックを用いた手法について紹介する。次に、カメラ画像を用いた手法を紹介する。最後に、その他のブロック構造認識手法を紹介する。

2.3.1 電子回路を内蔵したブロックを用いた構造認識手法

ブロック型タンジブル 3D モデリングシステムの研究における、代表的なブロック構造物の構造認識手法として、ブロックに電子回路を内蔵する手法がある。この手法は、ブロックに内蔵されたマイコンボード同士が電気や電磁波などを介して信号を送受信することによりブロック構造物の構造を認識する。

Gorbet ら [GO97, GOI98] の Triangles は、プラスチック製の平らな正三角形の物体を認識するシステムである。正三角形の物体の中には、マイコンボード、それぞれの個体を識別する ID が保存された電子回路、および他の正三角形の物体と電気通信するためのコネクタが内蔵されている。複数の正三角形の物体の辺同士を接続して作製した平面構造物と PC を接続することによって、その構造物の構造認識ができる。Anderson ら [AFM⁺99, AFM⁺00] および Watanabe ら [WIA⁺04] は、ユーザが構築したブロック構造物の構造を認識するシステムを作製した。ブロックに内蔵されているマイコンボード同士が金属コネクタを介して電気通信することにより構造認識をする。Ando ら [AIH⁺14] の StackBlock は、直方体の 6 面すべてに赤外線 LED およびフォトトランジスタを格子状に敷き詰めた積み木を認識するシステムである。このシステムは赤外線 LED の受発光から積み木の積み重ねを検出し、それぞれの積み木

間の接触領域を推定する。また、それぞれの積み木同士が赤外線を用いた光通信を行うことによって構造を認識することを可能としている。Hosoi ら [HTA⁺14] は磁気センサ、加速度センサおよび Bluetooth モジュールを搭載した積み木を設計している。この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。Glaser ら [GMP⁺16] および Wang ら [WLL⁺18] は、マイコンボードとセンサを内蔵したジョイント（曲げることやねじることにより変形することができる物体）を作製した。ユーザは、それらをつなぎ合わせて作製した構造物のジョイントを動かすことによって、3D モデルを動かすことができる。Leen ら [LRL17] は 3D モデリングの経験がないユーザが、物理的な空間でマイコンボードおよびセンサを内蔵したストラット（突っ張り棒のような形状をしており、伸縮可能な物体）およびハブ（ストラット同士を接続する球状の物体）と呼ばれる著者らが設計した物体を組み立てることによって 3D モデルをプロトタイプ化するシステムを提案した。Hsieh ら [HLH⁺18] は超高周波無線周波数識別（RFID）を内蔵したブロックと RFID リーダを用いたタンジブル 3D モデリングシステムである RFIBricks を提案した。

一方で、提案システムは、磁気計測に基づき永久磁石を内蔵させるのみの単純な構造を持つブロックを用いたブロック型タンジブル 3D モデリングツールを実現している。

2.3.2 カメラ映像を用いた構造認識手法

構造物全体を俯瞰できる位置に設置された単数および複数のカメラ映像からブロック構造物の構造を認識する手法がある。Baudisch らの Lumino [BBR10] 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ている。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している。Miller ら [MWC⁺12] や Gupta ら [GFCC12] のシステムは、深度カメラを用いてブロック構造物を認識している。

一方で、提案システムは、カメラ映像ではなく磁気計測に基づくため、これらのシステムと比較して小型なシステムを実現しており、またオクルージョンによる誤認識も発生しない。

2.3.3 その他のブロック構造認識手法

その他にも、吉田ら [吉田 17, YST15] 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によりブロック自体がコンデンサとなるように設計した。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的に増加する。システムは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。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できる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、ブロック自体にマイコンボードを内蔵せず、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が発生しない3Dモデリングを実現している。

一方で、提案システムは永久磁石をブロックに内蔵するという新たな手法によりタンジブル3Dモデリングを実現している。

2.4 磁気計測に基づく入力インタフェースに関する研究

永久磁石と磁気センサを用いたTUIの研究も盛んに行われている。Bianchiら[BO13]は3種類の永久磁石を用いることによって、磁気センサを内蔵したスマートフォンと組み合わせることで利用できるTUIを用いたツールを作製した。スライダやダイヤルなどの各ツールには永久磁石が内蔵されており、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ている。さらにBianchiら[BO15]は、バッテリー、モータおよび永久磁石を内包したマーカを提案している。永久磁石はモータの先に埋め込まれており、マーカによって各モータの回転数を調整している。マーカの永久磁石が回転することによりSおよびN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、様々なアプリケーションへと応用している。Chenら[CLWP13]のuTrackは2つの3軸磁気センサを使用して永久磁石の位置と角度を追跡するシステムである。uTrackは、親指に装着された1つの永久磁石と薬指に装着された2つの磁気センサを使用して親指と指からのリアルタイム3D入力を可能にする。Kadomuraら[KS14]のMagNailは指に取り付けた永久磁石をスマートフォンの3軸磁気センサを用いて磁気を計測することにより、ペイントアプリケーションやランチャーアプリケーションを実現した。Abeら[AST16]は永久磁石を取り付けたスタイラスとスマートフォンの3軸磁気センサを用いて磁気を計測することにより、ペイントアプリケーションを実現している。これらに対して我々は永久磁石と磁気センサを用いてブロック型タンジブル3Dモデリングツールを実現している。

永久磁石と磁気センサを用いたTUIの研究には、複数の磁気センサを格子状に配置した磁気センサアレイを用いた研究もある。Liangら[LCCY12]のGaussSketchはスマートフォン背面に取り付けた磁気センサアレイと永久磁石を取り付けたスタイラスを用いて、ペイントアプリケーションを実現している。さらに、Liangら[LCS⁺12]のGaussSenseはさらに多くの磁気センサを格子状に配置した磁気センサアレイをスマートフォン背面に取り付け、ペイントアプリケーション(GaussBrush[L^{SW+}12])、実世界の物体を認識(GaussBits[LCC⁺13a, LCC⁺13b]、GaussBricks[LCT⁺14a, LCT⁺14b, LCT⁺14c]、GaussStones[LKC⁺14]、GaussStarter[LKC15]、GaussRFID[LKC16a, LKC16b]、GaussMarbles[KLLC16])をした。

一方、我々は永久磁石と3軸磁気センサを用いてブロック型タンジブル3Dモデリングシステムを実現している。

2.5 本研究の位置付け

本研究は、子どもや3D CADソフトウェア初心者が利用しても分かりやすい3Dモデリングシステムを実現することを目的としている。Ishiiらによって提唱されたTUIの概念を継承し、実世界に存在するブロック型の物体をユーザの手で組み立てて構造物を作製するという操作を入力操作に用いることで追加の学習が不要な3Dモデリングシステムを実現した。本研究は、磁気計測に基づく入力インタフェースに関する研究を参考に永久磁石と3軸磁気センサを用いてブロック型タンジブル3Dモデリングシステムを実現した。

また、本研究の提案システムは既存手法が持つ問題を解決することを目的としている。電子回路を内蔵したブロックを用いた構造認識手法およびその他のブロック構造認識手法に対して提案システムは、磁気計測に基づき永久磁石を内蔵させるのみの単純な構造を持つブロックを用いたブロック型タンジブル3Dモデリングツールを実現している。加えて、カメラ映像を用いた構造認識手法に対して提案システムは、カメラ映像ではなく磁気計測に基づくため、これらのシステムと比較して小型なシステムを実現しており、またオクルージョンによる誤認識も発生しない。

第3章 磁気計測に基づくブロック構造認識技術

本章において、ブロック構造物に対する磁気計測に基づく構造認識の方法を述べる。はじめに、磁気の特性和構造認識に利用するためのアイデアにを述べる。次に、提案システムにおける座標系の定義を述べる。続いて、提案システムにおける変数の定義を述べる。また、磁気計測に基づく構造認識の具体例を示す。最後に、磁気計測に基づくブロック構造認識システムの特徴を述べる。

3.1 磁気の特性和構造認識の原理

磁気は加法定理が成り立つ。例えば、図 3.1 のように、永久磁石 a および永久磁石 b が配置されている状態における観測点の磁気 \vec{B} は、永久磁石 a のみ配置されている場合の磁気を \vec{B}_a 、永久磁石 b のみ配置されている場合の磁気を \vec{B}_b とすると以下の式で示される。

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

一般に、永久磁石が n 個存在する場合の磁気は、永久磁石 M_1 が単体で存在するときの磁気 \vec{B}_{M_1} から永久磁石 M_n が単体で存在するときの磁気 \vec{B}_{M_n} の総和となるため、以下の式から求めることができる。

$$\vec{B} = \sum_{x=1}^n \vec{B}_{M_x}$$

観測点を増やすことによって認識精度が向上すると仮説を立て、提案システムは 3 軸磁気センサを複数個使用することによって複数の観測点を設けている。この複数の観測点における磁気を取得し、解析することによって、磁気ブロックで構成されるブロック構造物の構造認識を行う。

3.2 提案システムにおける座標系の定義

提案システムにおけるユーザが作製するブロック構造物および 3D モデルビューアが描画する 3D モデルの座標系を定義する。提案システムにおいては、図 3.2 に示すような右手座標系を用いた。幅方向の変数は x 、奥行き方向の変数は y 、高さ方向の変数は z を用いて表現する。

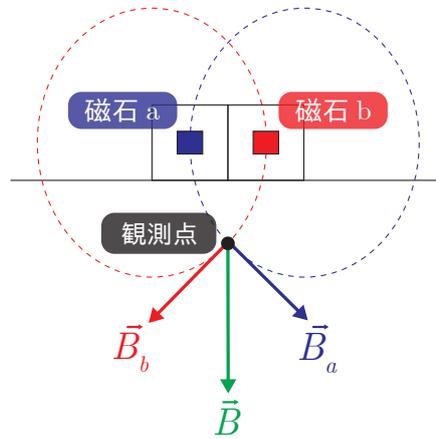


図 3.1: 磁気ベクトルの和：磁石 a および磁石 b が存在する状態における観測点の磁気。

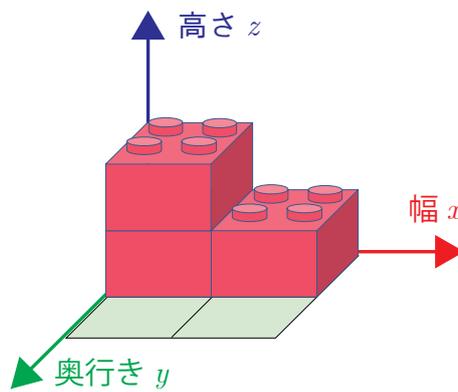


図 3.2: 提案システムにおける座標系。

3.3 提案システムにおける変数の定義

提案システムにおける定数を定義する。はじめに、磁気データ \vec{m} の定義を示す。次に、ブロック構造物の構造データ \vec{s} の定義を示す。

3.3.1 磁気データ \vec{m} の定義

複数の3軸磁気センサから同時に得られる磁気の測定値を磁気データと定義する。磁気データ $b_{x,y,z}$ は式3.1のようなベクトルで表現する。

$$\vec{m} = (m_1, \dots, m_{3n}) \quad (3.1)$$

m_i ($i = 1, \dots, 3n$) は1つの3軸磁気センサから得られる1つの軸に対する磁気の測定値である。また、 n は3軸磁気センサの個数である。図3.3に示すように提案システムでは16個の3軸磁気センサを使用しているため $n = 16$ であり、48個の要素を持つ磁気データが得られる。

3.3.2 ブロック構造物の構造データ \vec{s} の定義

ブロック構造物の構造データ \vec{s} を以下の式3.2に示す。 \vec{s} の各要素 $s_{x,y,z}$ ($s_{1,1,1} \dots s_{w,d,h}$) は座標 (x, y, z) にブロックが存在するかを0もしくは1で表現している (1: 磁気ブロックがその座標に置かれている場合、0: 空ブロックがその座標に置かれている場合、もしくはその座標にいずれのブロックも存在しない場合)。

$$\vec{s} = (s_{1,1,1}, \dots, s_{w,d,h}) \quad (3.2)$$
$$s_{x,y,z} \in \{1, 0\}$$

図3.4に構造データの例を示す。

3.4 磁気計測に基づく構造認識の具体例

ユーザが作成するブロック構造物の最大規模が幅 w 、奥行き d 、高さ h とする。この場合、ブロック構造物すべてのパターンの磁気は $(x, y, z) = (1, 1, 1)$ から $(x, y, z) = (w, d, h)$ の各座標にブロックを1つのみ置いたときの磁気を足し合わせるにより表現できる。図3.5にユーザが作成するブロック構造物の最大規模が幅2、奥行き2、高さ2としたときの具体例を示す。この具体例の場合、ブロック構造物 STR の磁気 B_{STR} は以下の式に示すように、 $B_{1,1,1}$ 、 $B_{2,1,1}$ および $B_{1,1,2}$ の和となる。

$$B_{STR} = B_{1,1,1} + B_{2,1,1} + B_{1,1,2}$$

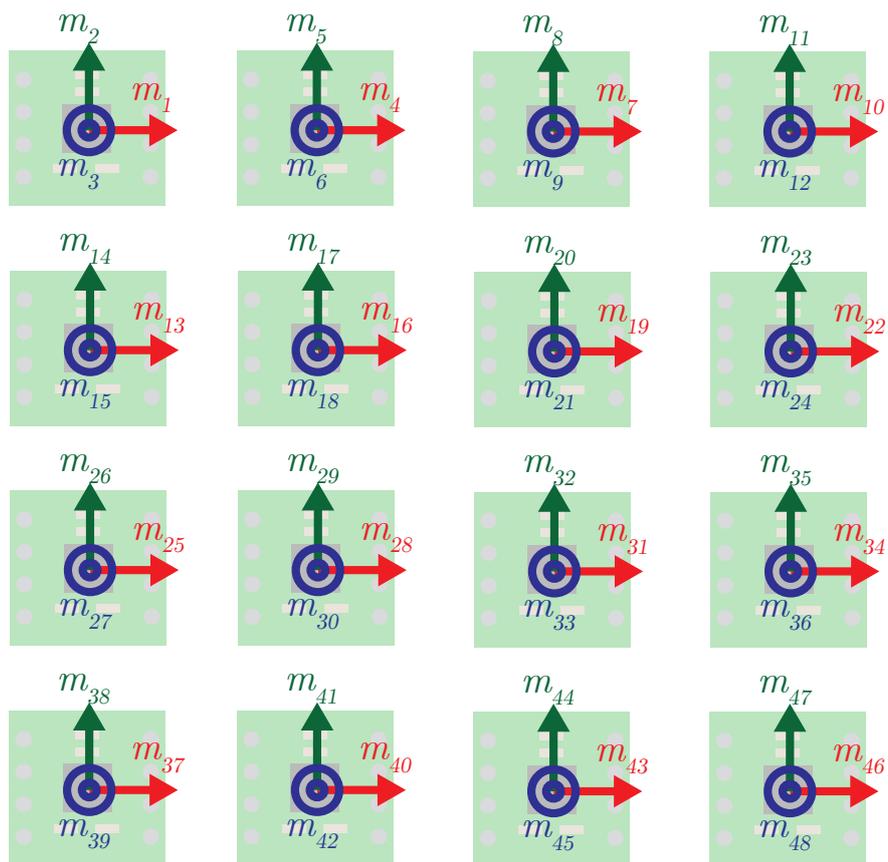


図 3.3: 提案システムから得られる磁気データの各要素 : 提案システムでは 16 個の 3 軸磁気センサーを使用しているため $n = 16$ であり、48 個の要素を持つ磁気データが得られる。

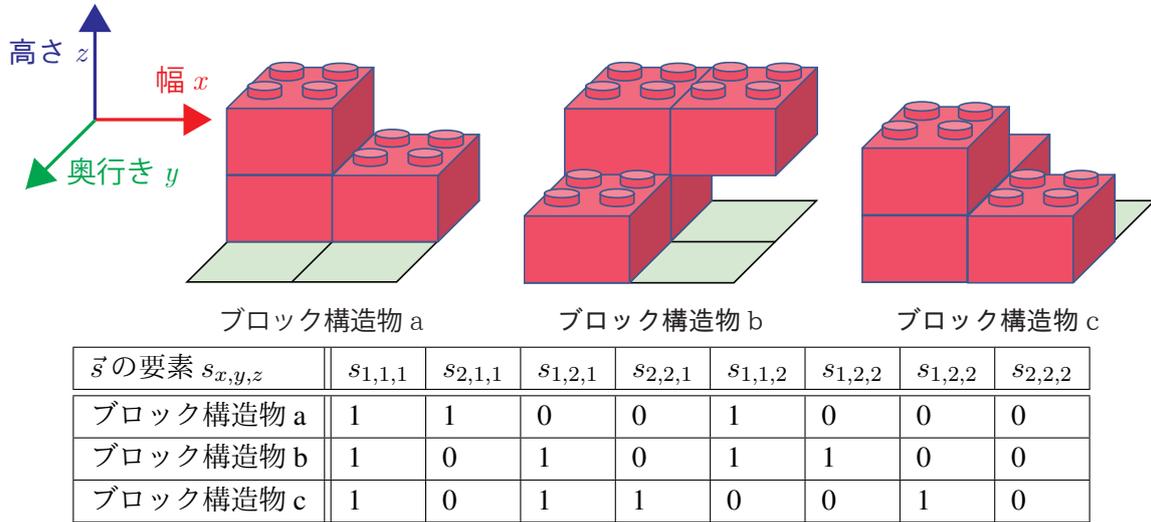


図 3.4: 構造データの例。

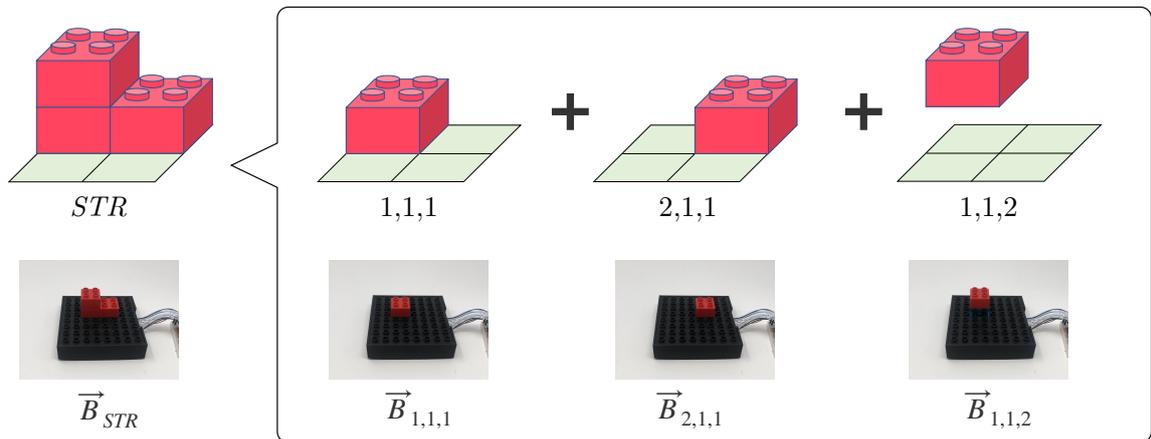


図 3.5: ブロック構造物の例 : $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の規模のブロック構造物。

4.3 節に示す磁気計測ハードウェアを用いて磁気の加法定理が成り立つことを確認した。図 3.6 に磁気 B_{STR} を構成する磁気である、 $B_{1,1,1}$ 、 $B_{2,1,1}$ 、および $B_{1,1,2}$ を示す。また、図 3.7 に $B_{1,1,1} + B_{2,1,1} + B_{1,1,2}$ を計算することによって得た磁気 B_{STR} の予想値とブロック構造物 STR を作製して計測した磁気 B_{STR} の実測値を示す。なお、図 3.6 および図 3.7 における横軸の x 、 y 、および z は 3 軸磁気センサの各軸を表し、0 から 15 の数字は 16 個の 3 軸磁気センサの識別番号である。予想値と実測値は近いことが分かる（誤差 0.28%）。

3.5 磁気計測に基づくブロック構造認識システムの特徴

提案システムは、磁気計測に基づいたブロック構造物の構造認識を採用することにより、電子回路を内蔵したブロックを用いた構造認識手法やカメラ画像を用いた構造認識手法の問題を解決している。以下に、提案システムの特徴を列挙する。

- 市販のブロックに永久磁石を取り付けるのみの単純な構造を持つブロックを用いた構造認識が可能である。
- 磁気計測に基づいた構造認識により、オクルージョンの問題が発生しない。
- 永久磁石を取り付けていないブロックと組み合わせることにより、中空構造を持つブロック構造物の 3D モデリングが可能である。

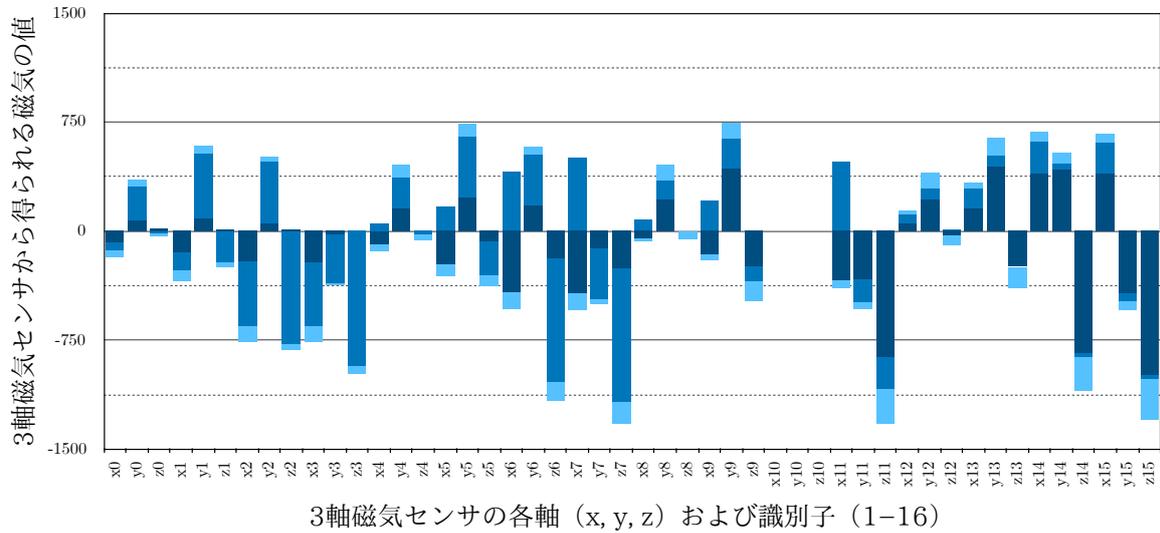


図 3.6: 磁気 B_{STR} を構成する磁気である、 $B_{1,1,1}$ 、 $B_{2,1,1}$ 、および $B_{1,1,2}$ 。

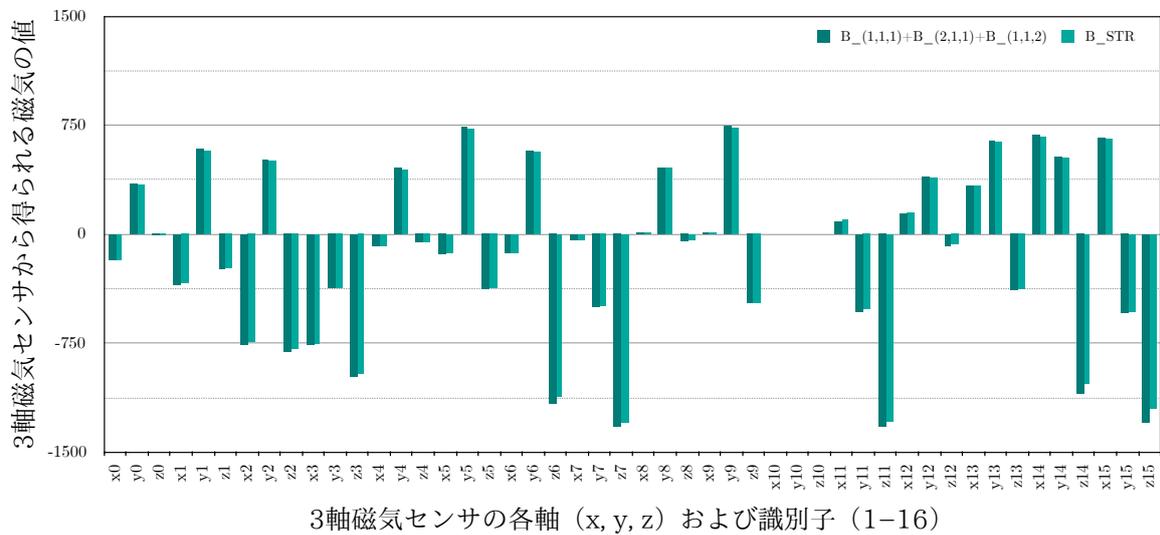


図 3.7: $B_{1,1,1} + B_{2,1,1} + B_{1,1,2}$ を計算することによって得た磁気 B_{STR} の予想値と磁気 B_{STR} の実測値。

第4章 実装

本章において、提案システムの実装方法を述べる。はじめに、提案システムの実装概要を述べる。次に、提案システムに使用するブロックの実装方法を述べる。続いて、複数の3軸磁気センサを格子状に配置した磁気計測ハードウェアの実装方法を述べる。さらに、構造認識に使用するトレーニングデータを取得するためのソフトウェアの実装方法を述べる。また、磁気計測ハードウェアから得られた磁気の測定値を用いてブロック構造物の構造認識をするソフトウェアの実装方法を述べる。最後に、構造認識ソフトウェアより得られた構造データを3Dモデルとして描画するビューアの実装方法を述べる。

4.1 提案システムの実装概要

提案システムはユーザが組み立てたブロック構造物の構造を認識し、3Dモデル化してディスプレイに描画するタンジブル3Dモデリングシステムである。提案システムはブロック、複数の3軸磁気センサを格子状に配置したハードウェア（磁気計測ハードウェア）、構造認識ソフトウェア、および3Dモデルビューアから構成される。ユーザは永久磁石を内蔵したブロック（磁気ブロック）と永久磁石を内蔵しない通常のブロック（空ブロック）を組み合わせることによって、擬似的に中空な構造を持つブロック構造物を組み立てることができる。磁気計測ハードウェアを用いて、ブロック構造物の磁気を計測する。得られた磁気の測定値より、構造認識ソフトウェアはブロック構造物の認識を行う。その認識結果より、3Dモデルビューアは同じブロック構造物と同じ構造を持つ3Dモデルをディスプレイに描画する。

4.2 提案システムに用いるブロック

市販の2×2 LEGO Duplo ブロックの内部に永久磁石を埋め込むことにより、磁気ブロック（図4.1）を作製した。また、中空構造を持つブロック構造物を表現するために、永久磁石を埋め込まない2×2 LEGO Duplo ブロック（空ブロック）を準備した（図4.2）。図4.3に磁気ブロックの構成要素を示す。磁気ブロックは永久磁石（図4.3a）と円筒形固定具（図4.3b、付録A.1）、2×2 LEGO Duplo ブロック（図4.3c）から構成される。今回我々は永久磁石として直径6mm、高さ2.5mm、表面における磁束密度220mTのネオジム永久磁石を使用した。なお、2×2のLEGO Duplo ブロックの内部にある円筒形の空洞は直径10.8mmである。このため、永久磁石をこの空洞に固定するために円筒形固定具を使用した。円筒形固定具は直径10.5mm、高さ16.0mmの円筒形であり、上部に永久磁石を固定するための直径6.25mm、高さ2.5mm

の窪みを持つ（付録 A.2）。我々はこの円筒形固定具を 3D CAD ソフトウェア（Fusion 360¹）を用いて設計し、熱溶解積層方式の 3D プリンタ（FLASHFORGE Dreamer²）を用いて印刷した。

磁気ブロックの組み立て方法を図 4.4 に示す。はじめに、円筒形固定具の窪みの中に永久磁石を入れる（図 4.4a）。次に、永久磁石を入れた円筒形固定具の上部にホットボンドを付着させる（図 4.4b）。最後に、2×2 LEGO Duplo ブロックの内部にある空洞に、円筒形固定具を固定し、磁気ブロックを作製した。

4.3 磁気計測ハードウェア

ユーザが組み立てたブロック構造物の磁気を計測するためのハードウェアを作製した（図 4.5）。本節において、はじめに磁気計測ハードウェアの回路の実装方法を述べる。次に、磁気計測ハードウェアの筐体の実装方法を述べる。

4.3.1 磁気計測ハードウェアの回路

図 4.6 に磁気計測ハードウェアの回路の外観を示す。磁気計測ハードウェアの回路は 16 個の 3 軸磁気センサアレイ（図 4.6a、図 4.7、Honeywell 社製 HMC5883L）、16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサ（図 4.6a、図 4.8、Texas Instruments 社製 CD74HC4067）、およびマイコンボード（図 4.6b、図 4.9、Arduino Nano）、から構成される（付録 B.1）。それぞれの 3 軸磁気センサが 15.24 mm の間隔となるように 4×4 個の格子状にユニバーサル基板上に配置した。この間隔は 2×2 LEGO Duplo ブロックの横幅および奥行き長さである 32 mm の約半分であり、2×2 LEGO Duplo ブロックの下に 4 つの 3 軸磁気センサが配置されている状態を実現する設計となっている。

なお今回使用した 3 軸磁気センサは I²C 通信を使用する際に用いるスレーブアドレスが固定値であり変更することができないため、16 チャンネル・アナログ・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。16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサの各チャンネルには、I²C 通信に用いるシリアルデータ（SDA）の信号線を接続した。また、電源（3.3 V）、アース（GND）、およびシリアルクロック（SCL）の信号線は 16 個の 3 軸磁気センサに対してマイコンボードから並列接続した。本研究にて使用している 3 軸磁気センサは SDA および SCL 信号線にプルアップ抵抗を接続する必要がある。本研究の実装では、2.2 kΩ の炭素皮膜抵抗をプルアップ抵抗として使用した。

実装した磁気計測ハードウェアの回路から得られる磁気データはマイコンボードから PC に送信される。マイコンボードと PC の接続には USB シリアル通信を使用した。

¹AUTODESK Fusion 360 <https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/overview>（2019 年 2 月 15 日閲覧）

²FLASHFORGE Dreamer <http://flashforge.co.jp/dreamer/>（2019 年 2 月 15 日閲覧）



図 4.1: 磁気ブロックの外観。

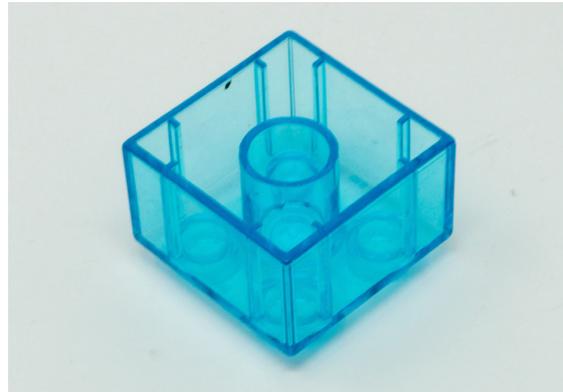


図 4.2: 空ブロックの外観。

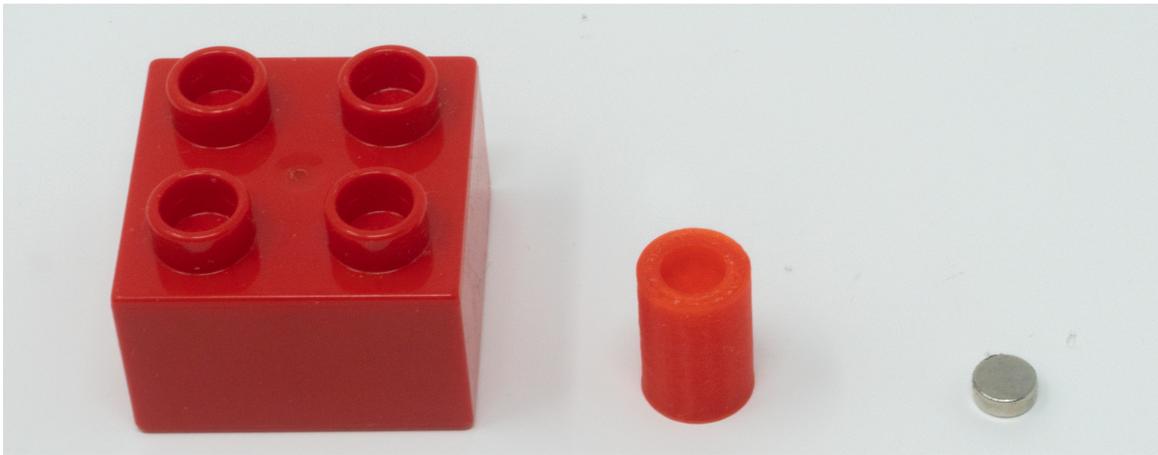


図 4.3: 磁気ブロックの構成：左) 2×2 LEGO Duplo ブロック、中) 円筒形固定具、右) ネオジム永久磁石。



図 4.4: 磁気ブロックの組み立て方法。

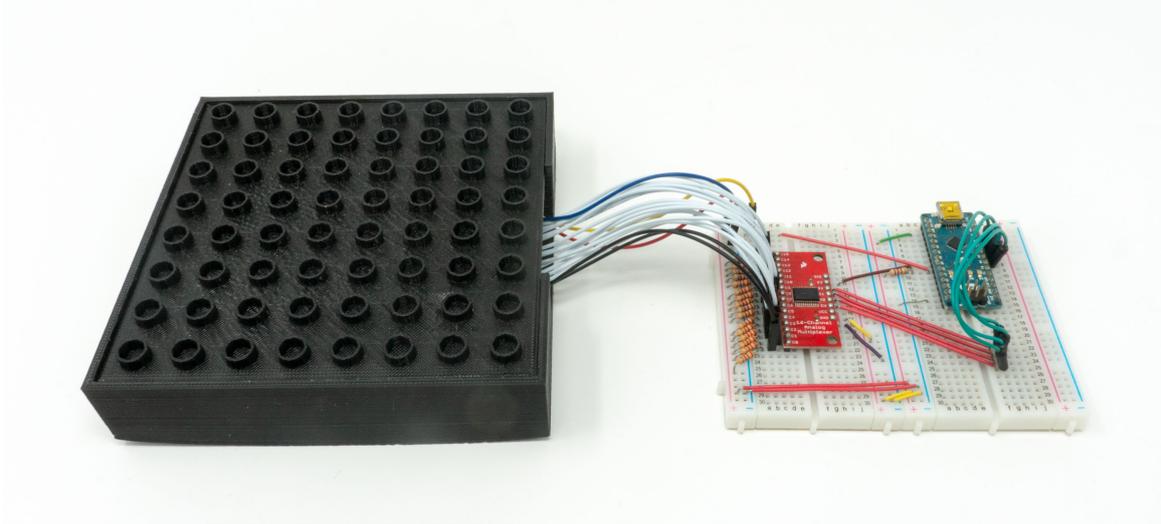


図 4.5: 磁気計測ハードウェアの外観。

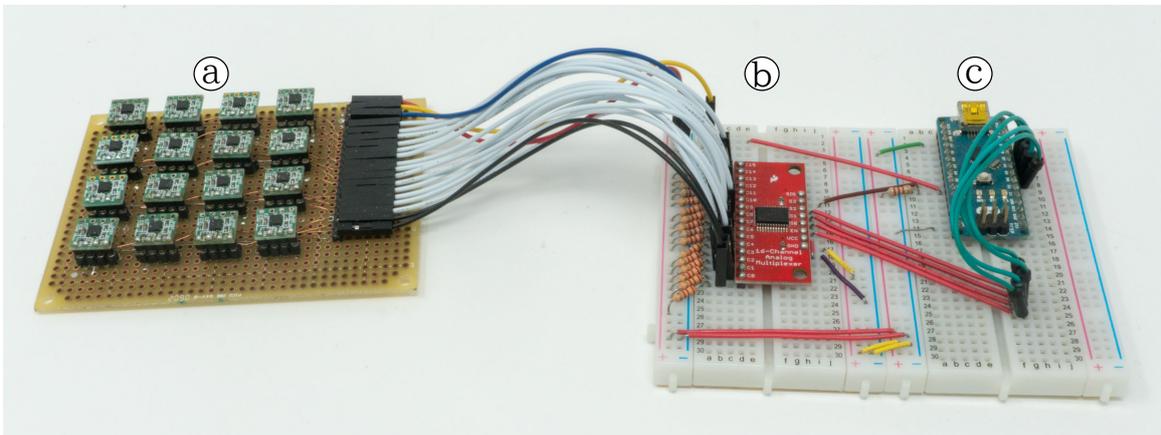


図 4.6: 磁気計測ハードウェアの回路 : a) 4×4 の格子状に配置された 3 軸磁気センサ、b) 16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサ、c) マイコンボード。

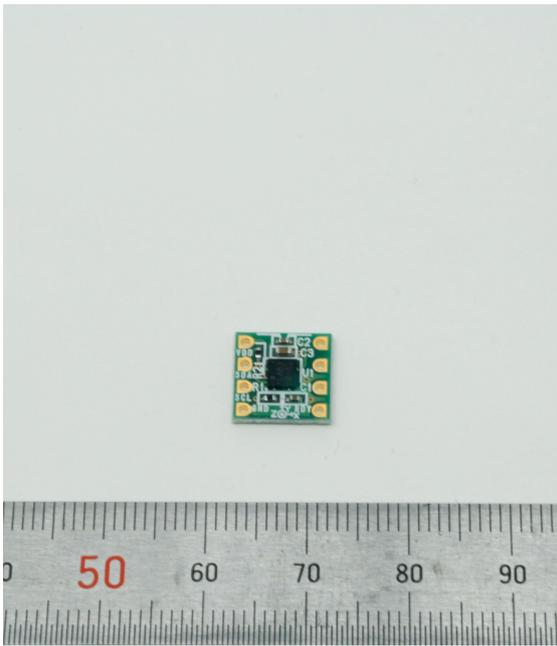


図 4.7: 3 軸磁気センサ (Honeywell 社製 HMC5883L)。

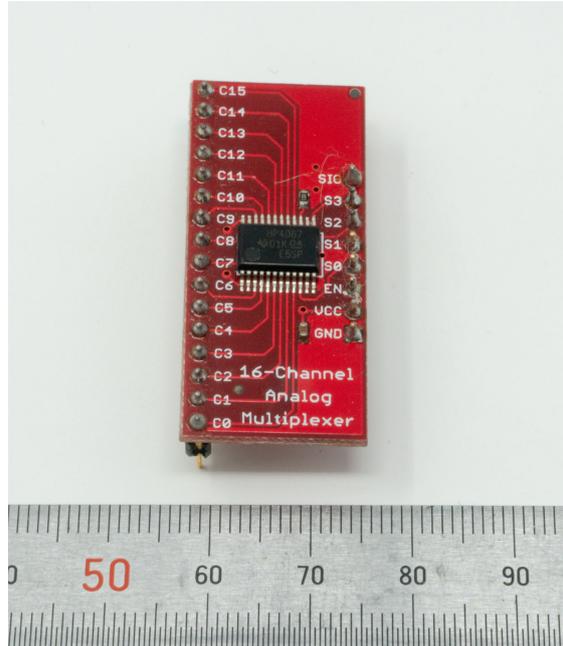


図 4.8: 16 チャンネル・アナログ・マルチプレクサ (Texas Instruments 社製 CD74HC4067)。

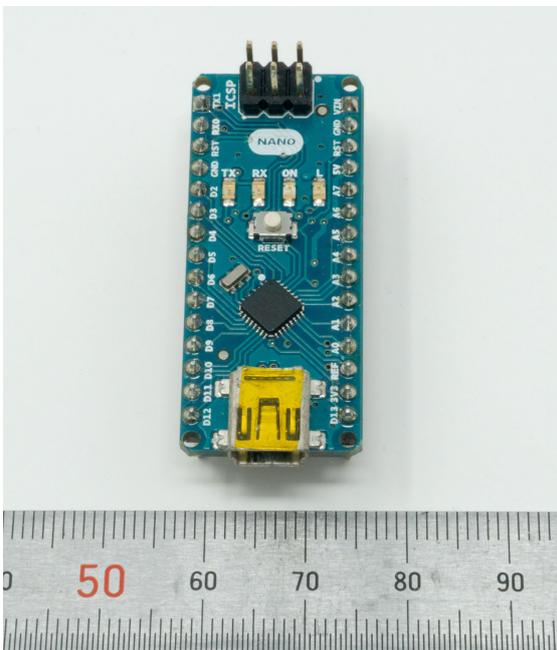


図 4.9: Arduino マイコンボード (Arduino Nano)。

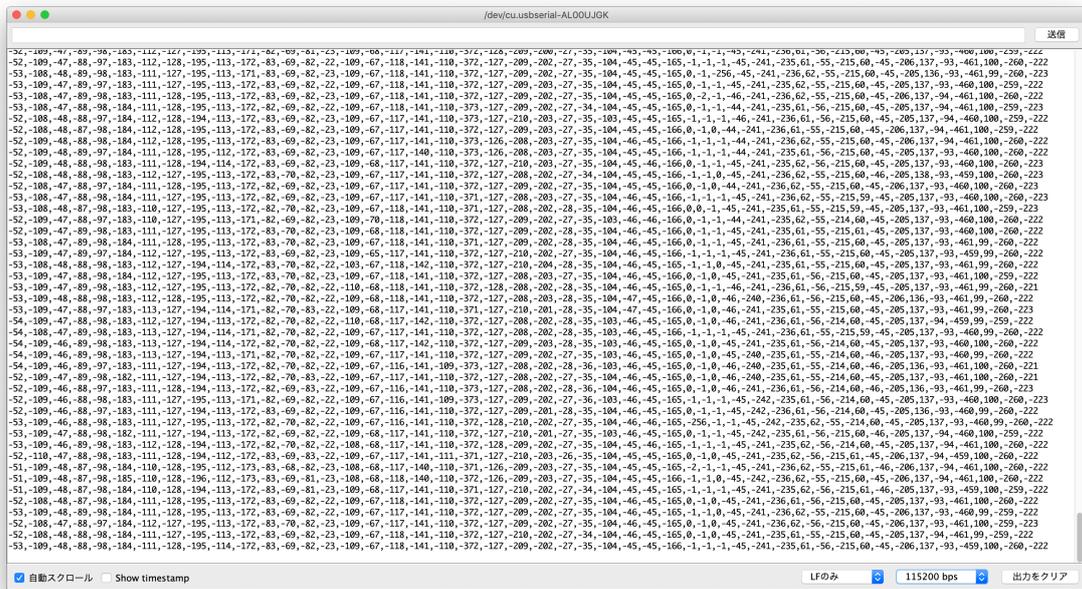


図 4.10: マイコンボードからシリアル通信によって出力される磁気の測定値の例 (Arduino シリアルモニタのスクリーンショット)。

4.3.2 Arduino プログラムの実装

磁気計測ハードウェアを制御するためのマイコンボードのプログラム (Arduino プログラム) を Arduino IDE 1.8.7 を用いて実装した。はじめに、Arduino プログラムは 16 個の 3 軸磁気センサの初期化を行う。回路に搭載されている 16 個の各 3 軸磁気センサは 75 Hz のサンプリング周波数にて磁気を計測し、過去 8 サンプルの平均値をレジスタに保存する設定とした。また、 $\pm 0.56 \text{ mT}$ の検出レンジを持ち、 -2048 から 2047 のデジタル値をレジスタに保存する設定とした。次に、Arduino プログラムは、16 個の 3 軸磁気センサから磁気の測定値を取得し続け、シリアル通信を用いて PC にその磁気の測定値を出力し続ける。出力の形式は、16 個の 3 軸の磁気センサの磁気値 (x 軸方向、y 軸方向、および z 軸方向の磁気値) をカンマ区切りで 1 行に並べたものとした。よって、16 個の 3 軸磁気センサレイから取得する磁気値の形式は、48 個の数値がカンマ区切りで配置されたものとなる (図 4.10)。

4.3.3 磁気計測ハードウェアの筐体

16 個の 3 軸磁気センサレイの上部にユーザが構造物を作製できるように、磁気計測ハードウェアが収まる筐体を作製した。この筐体は磁気計測ハードウェアの回路における 3 軸磁気センサレイのみが収まるように設計されている。この筐体は、3 軸磁気センサレイを直接格納する筐体下部 (図 4.16、付録 B.2、付録 B.3)、アクリル板 (図 4.17)、および LEGO

Duplo ブロックと同じ間隔の突起を持つ筐体上部（図 4.18 および図 4.14）から構成される。この筐体下部は縦横が 135 mm、高さ 31.5 mm の直方体である。筐体上部は LEGO Duplo ブロックと同じ間隔で 8×8 個の突起が並んでいるもの（付録 B.4、付録 B.5）と 4×4 個の突起が並んでいるもの（付録 B.6、付録 B.7）を作製した。ユーザはこの筐体の上にブロック構造物を作製する。

図 4.15 に磁気計測ハードウェアの筐体の組み立て方法を示す。はじめに、筐体下部に磁気計測ハードウェアの回路の 3 軸磁気センサアレイ部分を取り付ける（図 4.15a）。次に、ユーザがブロック構造物を作製したときに筐体が歪まないように、アクリル板を取り付ける（図 4.15b）。最後に、筐体上部を取り付ける（図 4.15c）。

4.4 トレーニングデータ作成ソフトウェア

本節では、はじめにトレーニングデータ作成ソフトウェアの実装方法を述べる。次に、トレーニングデータ作成ソフトウェアの操作方法を述べる。

4.4.1 トレーニングデータ作成ソフトウェアの実装

構造認識に必要となるトレーニングデータを作成するソフトウェア（トレーニングデータ作成ソフトウェア）を実装した。トレーニングデータ作成ソフトウェアの実装には Ruby 2.5.3 を使用した。本ソフトウェアは Ruby で動作するライブラリである `serialport 1.3.1` を用いて、Arduino から送信される磁気データを受信する。トレーニングデータ作成ソフトウェアは、磁気計測ハードウェアから磁気データを取得し、CSV ファイルとして書き出しを行う。

4.4.2 トレーニングデータ作成ソフトウェアの操作方法

はじめに、本ソフトウェアを起動後にキーボードの `tab` キーを押して磁気計測ハードウェア上に磁気ブロック置かない状態の磁気を記録する。この磁気の測定値は地磁気や周辺の電子機器などが発する磁気の影響を取り除くためのオフセットとして使用する。ユーザが構造認識ハードウェアを動かしたときは、磁気計測ハードウェア上に磁気ブロックを置かない状態の磁気データを再度記録する必要がある。次に、幅 x 、奥行き y 、高さ z の各座標に 1 つずつ磁気ブロックを置いたときの磁気データを記録する。 $x = 1, y = 1, z = 1$ の座標に磁気ブロックを置き、キーボードの `space` キーを押すことにより、磁気データを取得し、CSV ファイルに書き込む。この手順を、 $x = w, y = d, z = h$ の座標に磁気ブロックを 1 つ置いたときまで繰り返す。ユーザが作製できるブロック構造物が $w = 2, d = 2, h = 2$ の場合に、記録する必要がある磁気データ得るためのブロック構造物の例を図 4.19 に示す。この例の場合はトレーニングデータの作成に 8 個の磁気データを記録する必要がある。最後に、キーボードの `ctrl` キーと `c` キーを同時押しすることによってトレーニングデータ作成ソフトウェアを終了する。



図 4.11: 筐体下部 (3 軸磁気センサアレイを格納する)。

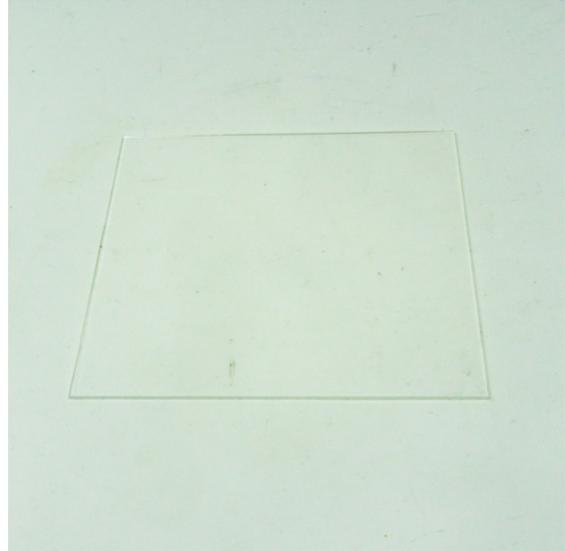


図 4.12: アクリル板。

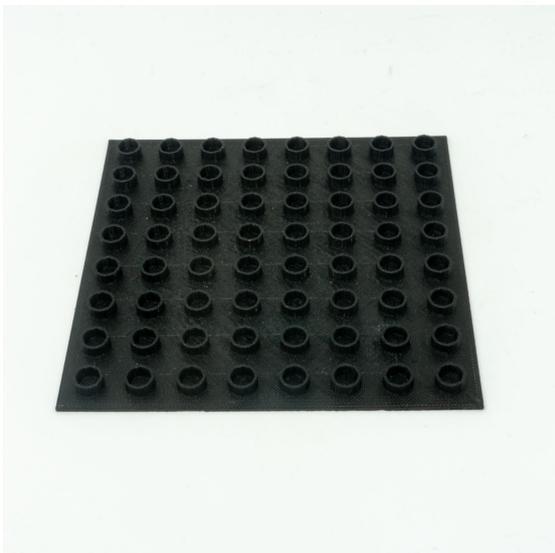


図 4.13: 8 × 8 の突起を持つ筐体上部。



図 4.14: 4 × 4 の突起を持つ筐体上部。



図 4.15: 磁気計測ハードウェアの組み立て方法。

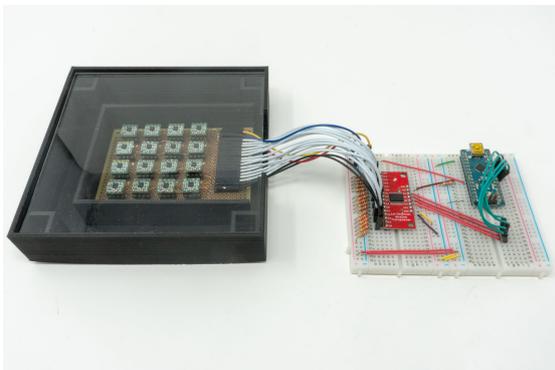


図 4.16: 磁気計測ハードウェアの回路を筐体に内蔵したときの外観。

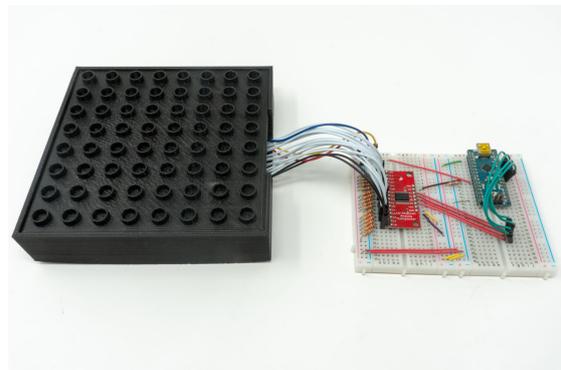


図 4.17: 8×8の突起を持つ筐体上部を使用したときの外観。

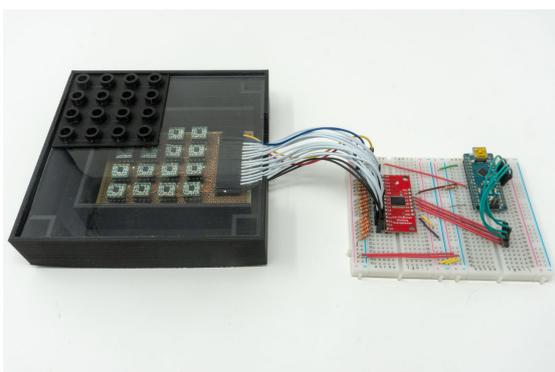


図 4.18: 4×4の突起を持つ筐体上部を使用したときの外観。

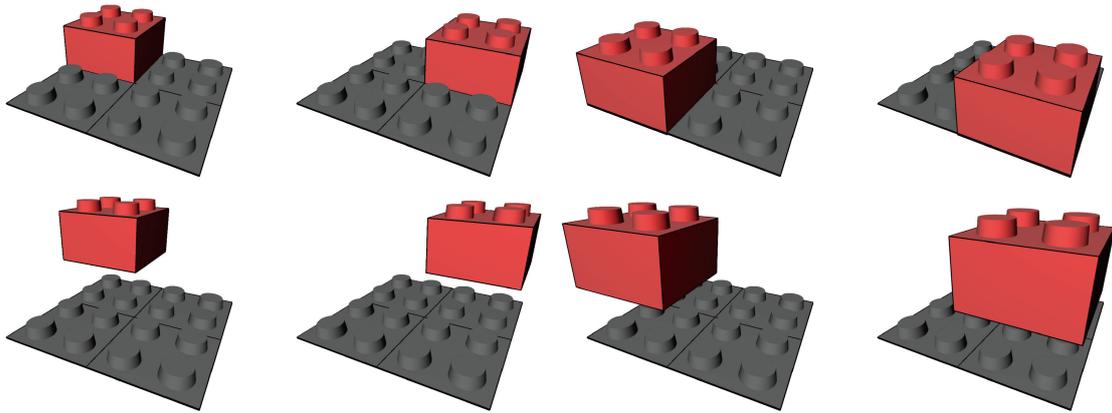


図 4.19: ブロック構造物が $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の場合に、記録する必要がある磁気データを得るためのブロック構造物の例。

また、トレーニングデータ作成ソフトウェアを用いて取得した磁気データは $\vec{b}_{x,y,z}$ で表現する。 $\vec{b}_{1,1,1}$ から $\vec{b}_{w,d,h}$ までの $2 \times 2 \times 2$ 個の磁気データを取得する。

4.5 構造認識ソフトウェア

構造認識ソフトウェアは磁気の加法定理を利用し、行列の計算によりブロック構造物の認識をする。構造認識ソフトウェアは Python 3.6.5 を用いて作製した。構造認識ソフトウェアの認識結果を 3D モデルビューアに送信するために、socket ライブラリにより提供されるソケット通信を使用した。

4.5.1 構造認識アルゴリズム

はじめに、トレーニングデータの作成をする。ユーザが作製できるブロック構造物は幅 w 、奥行き d 、高さ h であり、 $w \times d \times h$ 個のブロックで構成されるとする。中空な構造を持つブロック構造物を作製する場合、ユーザは $2^{w \times d \times h}$ パターンのブロック構造物を作製することができる。トレーニングデータ作成ソフトウェアを用いて、幅 x 、奥行き y 、高さ z の各座標に 1 つずつ磁気ブロックを置いたときの磁気データを記録する。この手順により、合計 $w \times d \times h$ 個の磁気データを記録する。

次に、トレーニングデータから、行列 \mathbf{B} を作製する (式 4.1)。行列 \mathbf{B} はトレーニングデー

タを構成する磁気データを転置し、順に列方向に配置して作成する。

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \vec{b}_{1,1,1}^T & \vec{b}_{2,1,1}^T & \cdots & \vec{b}_{w,d,h}^T \\ b_{1,1,1,1} & b_{1,1,2,1} & \cdots & b_{w,d,h,1} \\ b_{1,1,1,2} & b_{1,1,2,2} & \cdots & b_{w,d,h,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{1,1,1,n} & b_{1,1,2,n} & \cdots & b_{w,d,h,n} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

第3章の3.1節に示したように、 $2^{w \times d \times h}$ パターンの構造物を作製した際の磁気は $w \times d \times h$ 個の記録した磁気データの和と差を組み合わせることで計算することが可能となる。よって式4.2に示すように、行列 \mathbf{B} にブロック構造物と転置した構造データ \vec{s}^T の積は、そのブロック構造物を作製したときに得られる磁気データ \vec{m}^T となる。

$$\vec{m}^T = \mathbf{B} \vec{s}^T. \quad (4.2)$$

このことから、式4.3に示すように、ブロック構造物の構造データ \vec{s} は行列 \mathbf{B} の逆行列 \mathbf{B}^{-1} とユーザがブロック構造物を作製したときに磁気計測ハードウェアから得られる磁気データ \vec{m} の積から算出できる。なお本実装では、磁気計測ハードウェア上にブロックを置いていない状態の磁気データをオフセットとして差し引いた値を磁気データ \vec{m} として用いている。

$$\vec{s}^T = \mathbf{B}^{-1} \vec{m}^T \quad (4.3)$$

ただし、行列 \mathbf{B} は正則ではない。よって \mathbf{B}^{-1} は \mathbf{B} の疑似逆行列を計算することによって導き出した。

しかし、3軸磁気センサ、永久磁石、および永久磁石の取り付け位置には個体差があるため、磁気の計測値には誤差がある。よって、式4.3を用いて導出された \vec{s} の成分は0周辺の値、もしくは1周辺の値となる。したがって、ブロック構造物の構造認識にしきい値を使用する。すなわち、 \vec{s} の成分がしきい値より大きい場合、構造認識ソフトウェアは対応する位置に磁気ブロックがあると推定する。本研究におけるしきい値は0.5とした。以上より求めた構造データをソケット通信によって3Dモデルビューアに送信する。

4.6 3Dモデルビューア

本節では、はじめに3Dモデルビューアの実装方法を述べる。次に、3Dモデルビューアの実装方法を述べる。

4.6.1 3Dモデルビューアの実装

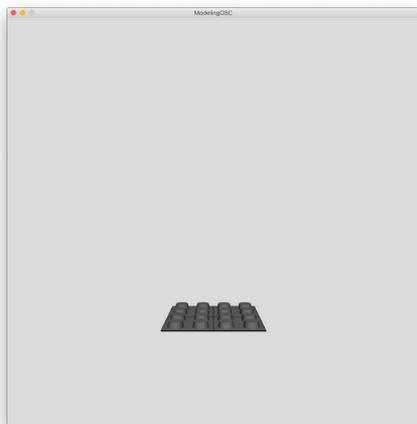
構造認識ソフトウェアより得られた結果から3Dモデルを作製し、ディスプレイに描画する3Dモデルビューアを実装した。このアプリケーションはソケット通信によるデータの送受信

が可能となる OpenSound Control ライブラリを用いて、構造認識ソフトウェアから送信される結果を受け取る。3D モデルビューアの実装には Processing 3.4 を用いた。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。

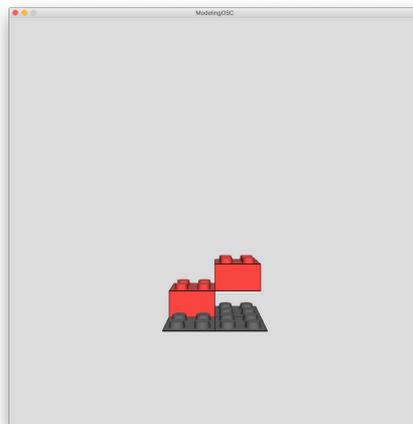
4.6.2 3D モデルビューアの操作方法

3D モデルビューアを起動すると図 4.20a に示す土台が表示される。ユーザが磁気計測ハードウェア上にブロック構造物を作成すると、同じ構造を持つ 3D モデルがリアルタイム描画される (図 4.20b)。3D モデルビューアはユーザが 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の移動機能、視点のズームイン・アウト機能、および視点の平行移動機能を提供している (図 4.20c-e)³。マウスの左クリックボタンを押しながらドラッグすることによって視点の移動ができる (図 4.20c)。マウスのスクロールホイールを上方向に回転させることによって視点のズームイン、下方向に回転させることによって視点のズームアウトができる (図 4.20d)。マウスの中ボタン (スクロールボタン) を押しながらドラッグすることによって視点の平行移動ができる (図 4.20e)。マウスの右クリックボタンを押すことによって視点を初期位置に戻すことができる。

³東京工業大学 ロボット技術研究会 マウス操作によるカメラ移動 with Processing <http://titech-ssr.blog.jp/archives/1047616866.html> (2019 年 2 月 15 日閲覧)



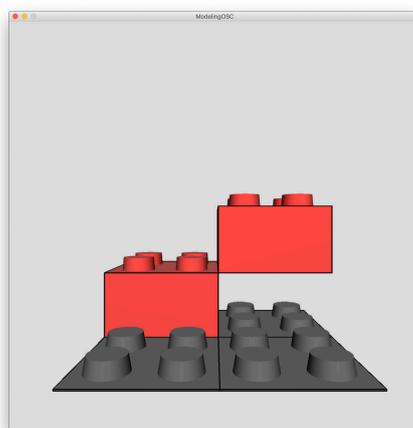
(a) 起動時



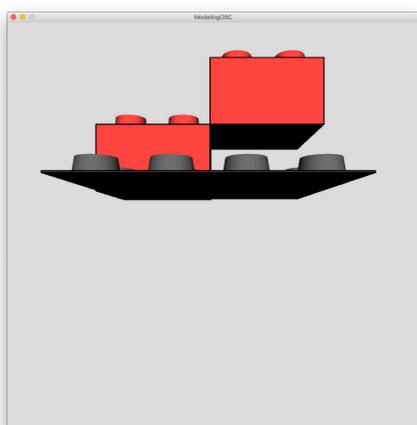
(b) ブロック構造物を描画



(c) 視点の移動



(d) 視点のズームイン・アウト



(e) 視点の平行移動

図 4.20: 3D モデルビューアのスクリーンショット。

第5章 提案システムの使用方法

本章において、提案システムの使用方法を示す。はじめに、提案システムの動作準備を示す。次に、提案システムの動作例を示す。

5.1 提案システムの動作手順

提案システムを動作させるための手順を以下に示す。提案システムは磁気を使用するため、磁気を発する電子機器や鉄を含む物体などがシステムの付近に存在しないかを確認してから動作させる必要がある。

- 1 磁気計測ハードウェアと PC を USB 接続する。
- 2 Arduino プログラムをコンパイルし、磁気計測ハードウェアに書き込む（既書き込み済みの場合はこの手順を飛ばす）。
- 3 Ruby を用いて実装されたトレーニングデータ作成ソフトウェアを用いて、トレーニングデータを準備する（既に作成済みの場合はこの手順を飛ばす）。
- 4 Processing を用いて実装された 3D モデルビューアを起動する。
- 5 Python を用いて実装された構造認識ソフトウェアを起動する。

5.2 提案システムの動作例

本節において、提案システムの動作例を示す（図 5.1）。図 5.1a はシステムを起動したときの様子である。ユーザが磁気計測ハードウェア上の $x = 1$ 、 $y = 1$ 、 $z = 1$ の座標に磁気ブロックを置いたとき、3D モデルの同じ位置にブロックが描画される（図 5.1b）。ユーザが磁気計測ハードウェア上の $x = 1$ 、 $y = 1$ 、 $z = 2$ の座標に磁気ブロックを置いたとき、3D モデルの同じ位置にブロックが描画される（図 5.1c）。ユーザが磁気計測ハードウェア上の $x = 2$ 、 $y = 1$ 、 $z = 1$ の座標に空ブロックを置いたときは、3D モデルに変化は無い（図 5.1d）。ユーザが磁気計測ハードウェア上の $x = 1$ 、 $y = 1$ 、 $z = 2$ の座標に磁気ブロックを置いたとき、3D モデルの同じ位置にブロックが描画され、中空構造を表現することができる（図 5.1e）。

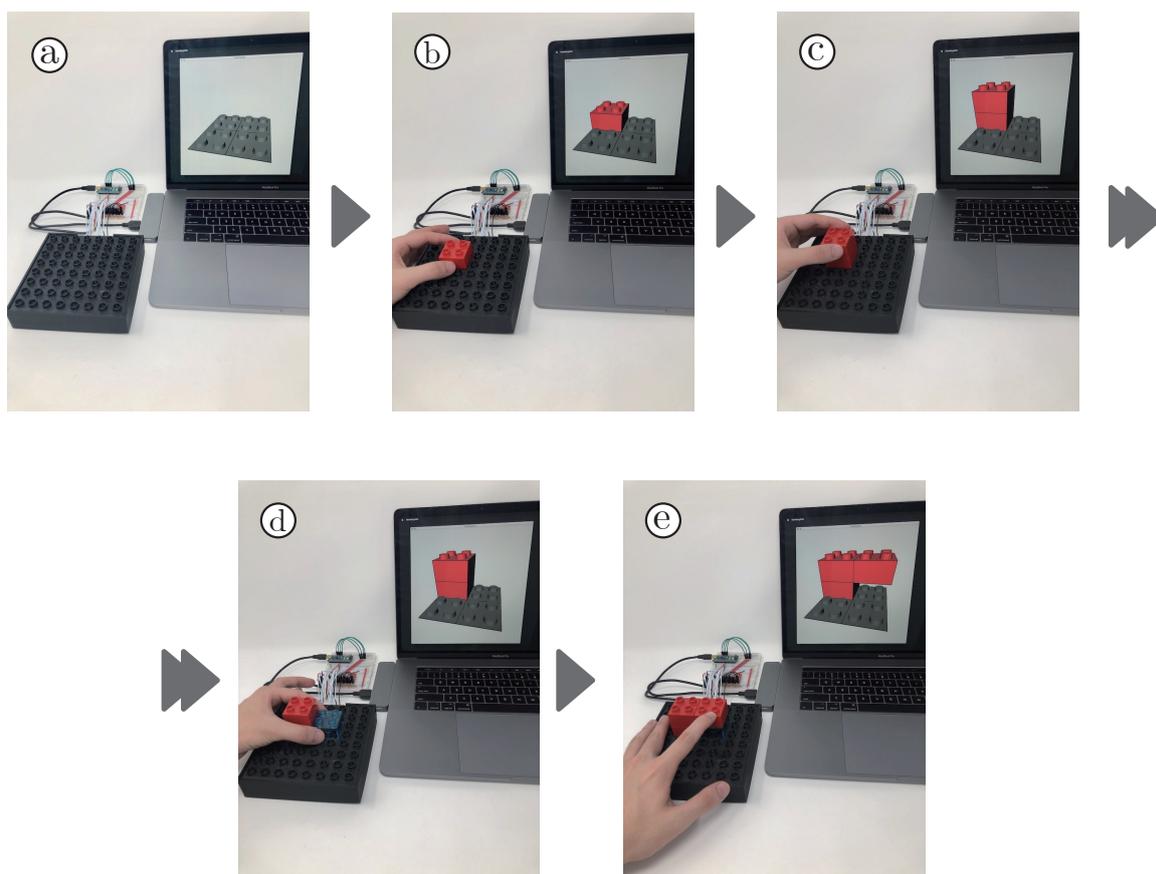


図 5.1: 提案システムの動作例 : a) 起動時、b) $x = 1$ 、 $y = 1$ 、 $z = 1$ の座標に磁気ブロックを置いたとき、c) $x = 1$ 、 $y = 1$ 、 $z = 2$ の座標に磁気ブロックを置いたとき、d) $x = 2$ 、 $y = 1$ 、 $z = 1$ の座標に空ブロックを置いたとき、e) $x = 2$ 、 $y = 1$ 、 $z = 2$ の座標に磁気ブロックを置いたとき。

第6章 評価実験

提案システムが認識可能なブロック構造物の規模を調査するための実験をした。本章において、はじめに実験環境を示す。次に、評価実験の手順を示す。最後に実験結果を示す。

6.1 実験環境

図 6.1 に実験環境を示す。第 4 章にて述べた磁気ブロック、空ブロックおよび磁気計測ハードウェアと実験用 PC をデスク上に配置し、磁気を発する金属や PC 以外の電子機器を遠ざけた状態で実験を行った。実験用の PC として Macbook Pro (15-inch, 2016, プロセッサ: 2.9GHz Intel Core i7, メモリ: 16GB 2133MHz LPDDR3, GPU: Radeon Pro 460 4096MB) を使用した。使用した Macbook Pro は USB Type-C ポートのみ搭載しているモデルであったため、USB Type-A から USB Type-C に変換するアダプタ¹を介して磁気計測ハードウェアと接続した。

6.2 実験設計

ブロック構造物の規模が $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 4$ とした場合において、提案システムが正しく構造認識できる精度を調査した。本論文では $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 1$ から $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 4$ の構造物の認識精度を調査する。はじめに、磁気計測ハードウェアの 16 個の 3 軸磁気センサから得られる磁気データを使用した実験 (実験 1) について述べる。次に、ブロック構造物を 4 回動かすことによって擬似的に 64 個の 3 軸磁気センサから得られる磁気データを使用した実験 (実験 2) について述べる。

6.2.1 実験 1: 磁気計測ハードウェアから得られる 16 個の 3 軸磁気センサレイから得られる磁気データを使用した実験

本節にて、磁気計測ハードウェアの 16 個の 3 軸磁気センサから得られる磁気データを使用した実験 (実験 1) を行った。

¹Apple Inc. USB-C - USB アダプタ <https://www.apple.com/jp/shop/product/MJ1M2AM/A/usb-c-to-usb> (2019 年 2 月 15 日閲覧)

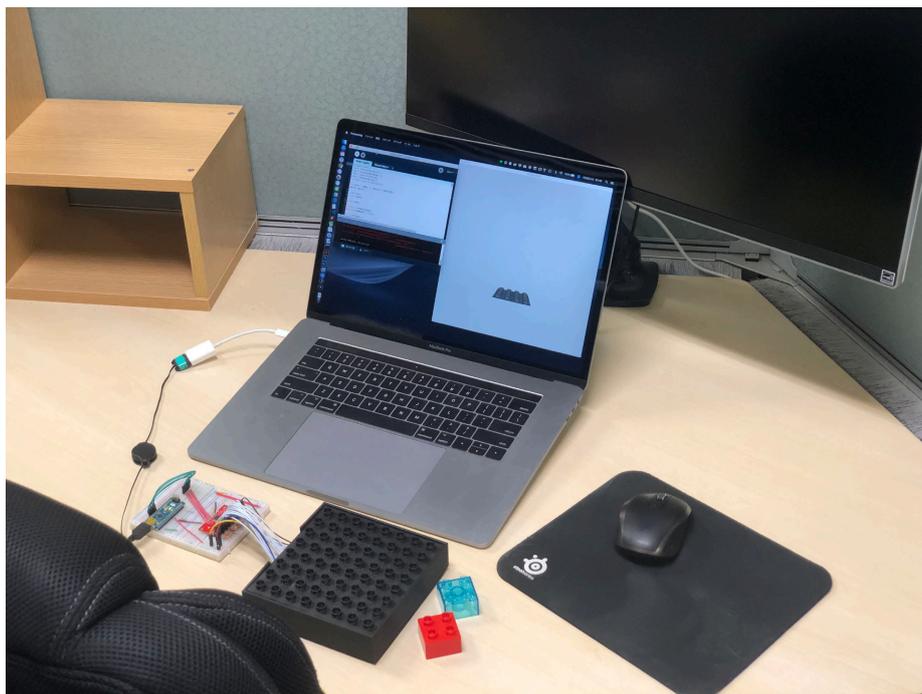


図 6.1: 実験環境。

実験 1 の準備

はじめに、トレーニングデータ作成ソフトウェアを用いて $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 4$ のブロック構造物を作製するために必要となるトレーニングデータを 4 セット準備した。次に、4 つのトレーニングデータの中から 1 つを選択し、行列 \mathbf{B} を作製した。続いて、残りの 3 つのトレーニングデータから 1 つを選択し、ブロック構造物全パターン ($2^{2 \times 2 \times 4}$ パターン) の磁気データ (テストデータ) を算出した。

実験 1 の手順

実験 1 の準備を行い、ブロック構造物全パターンのテストデータに対して、構造認識アルゴリズムを用いた構造認識を行い、認識精度を算出する。はじめに、テストデータの中から $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 1$ のブロック構造物すべてのパターンの磁気データを抽出し、その磁気データを用いた構造認識を行う。このときに、正しく構造認識が行われたかを記録し、最後に認識精度を算出する。次に、作業を $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 1$ のブロック構造物から $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 4$ のブロック構造物に対して繰り返し行う。以上の認識精度算出の手順を 4 セットのトレーニングデータすべての組み合わせに対して本手順の実験を行い、認識精度の平均値を求める。

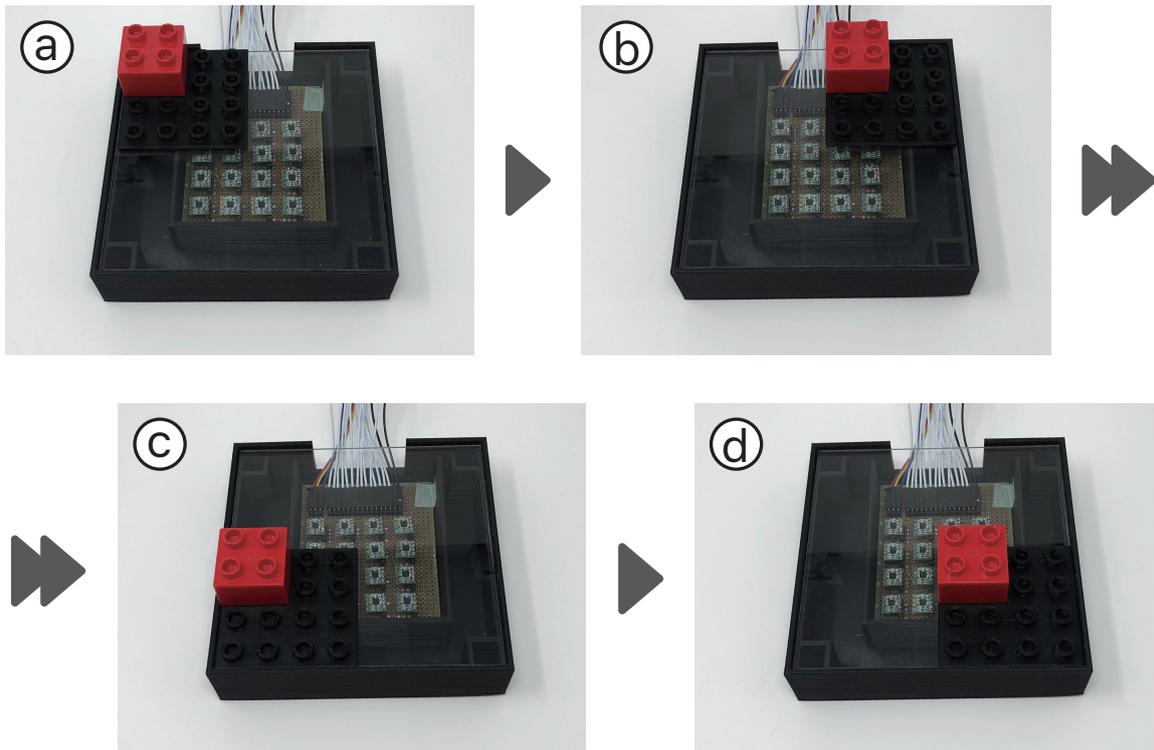


図 6.2: ブロック構造物を動かすことによって擬似的に 64 個の 3 軸磁気センサーを持つ磁気計測ハードウェアを使ったブロック構造認識をしている様子。

6.2.2 実験 2: ブロック構造物を 4 回動かすことによって擬似的に 64 個の 3 軸磁気センサーから得られる磁気データを使用した実験

磁気センサーを増やすことにより、認識精度が向上すると仮説を立てた。そこで、ブロック構造物を 4 回動かすことによって擬似的に 64 個の 3 軸磁気センサーから得られる磁気データを使用した実験（実験 2）を行った。

実験 2 の準備

図 6.2 に示すように、ブロック構造物を 4 回動かすことによって擬似的に 64 個の 3 軸磁気センサーから磁気データを得ることができる。

実験 2 の手順

実験 2 の準備を行い、テストデータのすべての項目に対して、構造認識アルゴリズムを用いた構造認識を行い、認識精度を算出する。はじめに、テストデータの中から $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 1$ のブロック構造物すべてのパターンの磁気データを抽出し、その磁気データを用いた構

造認識を行う。このときに、正しく構造認識が行われたかを記録し、最後に認識精度を算出する。次に、作業を $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 1$ のブロック構造物から $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 4$ のブロック構造物に対して繰り返し行う。最後に、以上の認識精度算出の手順を 4 つの磁気データすべての組み合わせに対して実施し、平均値および標準偏差を求める。

第7章 実験結果

本章にてブロック構造物の認識精度の評価実験結果を示す。本研究では、2種類の認識精度を定義し、それぞれに対しての実験結果を示す。はじめに、各ブロック構造物の構造全体が正しく認識されているかについての精度（構造認識精度）を定義する。次に、ブロック構造物を構成する磁気ブロック1つ1つが正しく認識されているかについての精度（ブロック認識精度）を定義する。なお、2種類の認識精度の定義を、図7.1に示す実験結果の例を用いて具体的に説明する。最後に、実験1および実験2の結果より、本章にて定義した2つの認識精度を適用し、考察を行う。

7.1 構造認識精度：各ブロック構造物の構造全体が正しく認識されているかについての精度

本節にて、各ブロック構造物の構造全体が正しく認識されているかについて精度である構造認識精度を評価する。

7.1.1 構造認識精度の定義

構造認識精度は各ブロック構造物の構造全体が正しく認識されているかについての精度である。図7.1の例におけるテストデータに対して、トレーニングデータaを用いた認識結果は正しく、提案システムは正しく認識したとする。トレーニングデータbを用いた場合は、ブロックが足りない状態でブロック構造物を認識しているため、提案システムは誤認識したとする。トレーニングデータcを用いた場合は、は不要なブロックを含む状態でブロック構造物を認識しているため、提案システムは誤認識したとする。トレーニングデータdを用いた場合は、は認識結果(b)および(c)の両方の特徴を含んでおり、提案システムは誤認識したとする。以上から図7.1の例において、提案システムは4つの認識結果中1つの認識結果のみが正しいため、構造認識精度は25%である。

7.1.2 構造認識精度に関する評価実験結果

図7.2は構造認識精度に関する実験1および実験2の結果を示すグラフである。また、表7.1および7.2は実験1および実験2のそれぞれの結果を示す表である。図7.2のaは認識に成功した割合を示し、b,cおよびdが失敗した割合を示す。ブロック構造物全体を正しく認識す

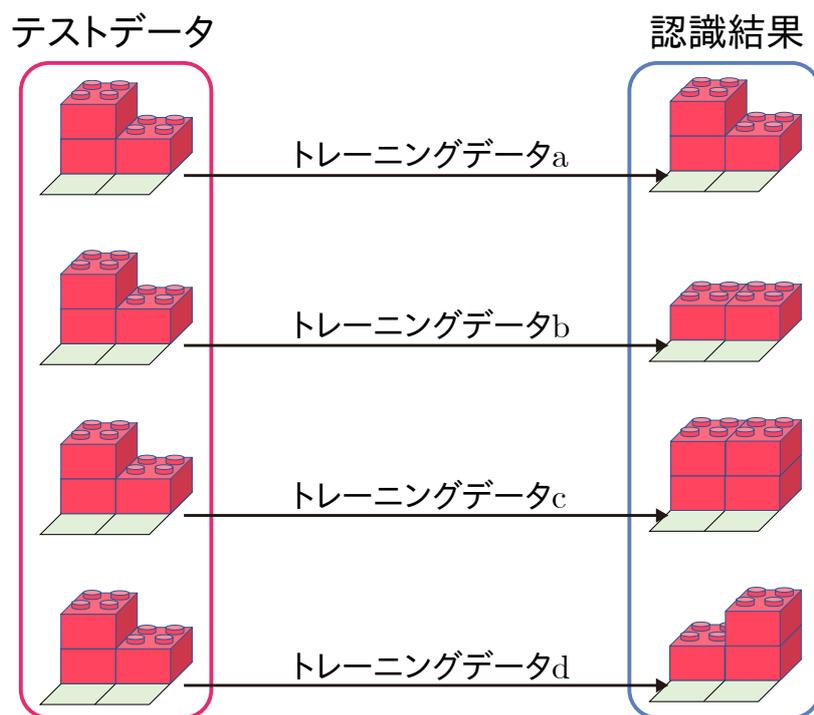


図 7.1: 実験結果の例 : (a) テストデータと認識結果が完全一致、(b) 認識結果に足りないブロックがある、(c) 認識結果は不要なブロックを 1 つ含む、(d) 認識結果は足りないブロックと不要なブロックをそれぞれ 1 つずつ含む。

ることは難しいことが読み取れる。図 7.2 実験 1 および表 7.1 より、実験 1 の $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の場合の構造認識率は 80.1% (SD = 0.221) である。また、 $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 3$ の場合は 17.7% (SD = 0.134) の認識が可能であった。図 7.2 実験 2 および表 7.2 より、実験 2 の $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の場合の構造認識率は 100% (SD = 0) である。また、 $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 3$ の場合は 77.7% (SD = 0.198) の認識が可能であった。認識に使用する 3 軸磁気センサの数を増やすことによって、構造認識精度は向上することが分かる。また、ブロックの高さが増加するに連れて、 d の割合が高くなる事が分かる。

7.2 ブロック認識精度：ブロック構造物を構成する磁気ブロック 1 つ 1 つが正しく認識されているかについての精度

本節にて、ブロック構造物を構成する磁気ブロック 1 つ 1 つが正しく認識されているかについての精度であるブロック認識精度を評価する。

7.2.1 ブロック認識精度の定義

ブロック認識精度はブロック構造物を構成する磁気ブロック 1 つ 1 つが正しく認識されているかについての精度である。図 7.1 の例におけるテストデータに対して、トレーニングデータ a を用いたときの認識結果は、存在すべき 3 つのブロックは正しい位置に存在し、存在すべきでない 5 つのブロックは存在しない。よって、トレーニングデータ a を用いたときのブロック認識精度は 100% である。トレーニングデータ b を用いた場合、提案システムは $w = 1$ 、 $d = 1$ 、 $h = 2$ に存在すべき磁気ブロックが存在していないと認識した。よって、トレーニングデータ b を用いたときのブロック認識精度は 8 つの座標に関するブロックのうち 1 つの座標に関するブロックが誤っているためブロック認識精度は 87.5% である。トレーニングデータ c を用いた場合、提案システムは $w = 1$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ に存在すべきでない磁気ブロックが存在していると認識した。よって、トレーニングデータ c を用いたときのブロック認識精度は 8 つの座標に関するブロックのうち 1 つの座標に関するブロックが誤っているためブロック認識精度は 87.5% である。トレーニングデータ d を用いた場合、提案システムは $w = 1$ 、 $d = 1$ 、 $h = 2$ に存在すべき磁気ブロックが存在していないと認識し、更に $w = 1$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ に存在すべきでない磁気ブロックが存在していると認識した。よって、トレーニングデータ d を用いたときのブロック認識精度は 8 つの座標に関するブロックのうち 2 つの座標に関するブロックが誤っているためブロック認識精度は 75% である。図 7.1 の例全体において、以上の 4 つの認識結果の平均より、提案システムのブロック認識精度は 75% となる。

7.2.2 ブロック認識精度に関する評価実験結果

図 7.3 は構造認識精度に関する実験 1 および実験 2 の結果を示すグラフである。また、表 7.3 および 7.4 は実験 1 および実験 2 のそれぞれの結果を示す表である。図 7.3 の a と b は認

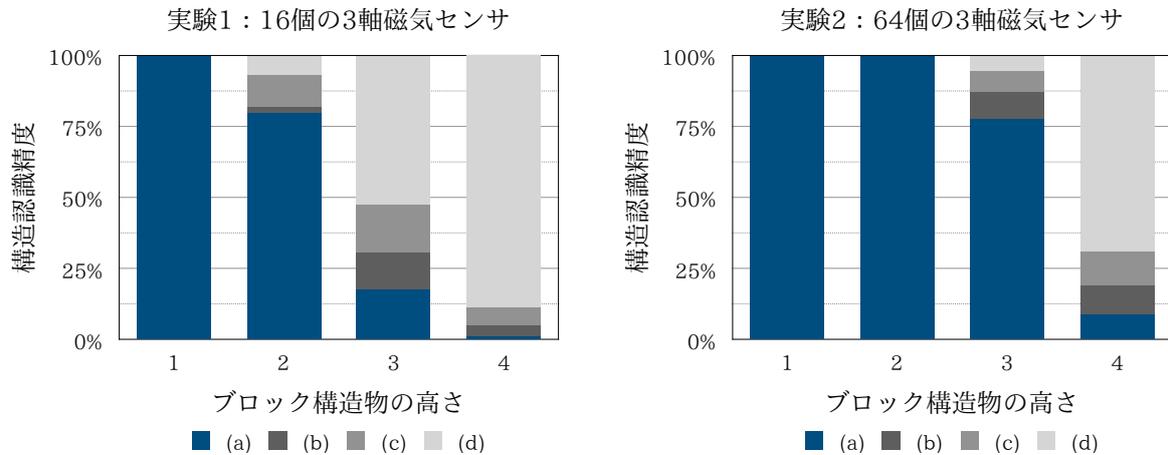


図 7.2: 構造認識精度の結果を示すグラフ : a) ブロック構造物を構成するすべてのブロックが正しい位置に存在した場合、b) 不必要なブロックが存在した場合、c) 必要なブロックが存在しなかった場合、d) 不必要なブロックが存在し、必要なブロックが存在しなかった場合。

表 7.1: 構造認識精度の実験 1 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.2 参照)。

ブロック構造物の高さ	16 個の 3 軸磁気センサを用いたときのブロック認識精度							
	1		2		3		4	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
認識率	1	0	0.801	0.221	0.177	0.134	0.009	0.008
a	1	0	0.801	0.221	0.177	0.134	0.009	0.008
b	0	0	0.017	0.029	0.131	0.05	0.042	0.015
c	0	0	0.112	0.118	0.166	0.061	0.063	0.021
d	0	0	0.07	0.114	0.527	0.171	0.886	0.042

表 7.2: 構造認識精度の実験 2 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.2 参照)。

ブロック構造物の高さ	64 個の 3 軸磁気センサを用いたときのブロック認識精度							
	1		2		3		4	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
認識率	1	0	1	0	0.777	0.198	0.088	0.04
a	1	0	1	0	0.777	0.198	0.088	0.04
b	0	0	0	0	0.095	0.108	0.101	0.033
c	0	0	0	0	0.075	0.091	0.12	0.054
d	0	0	0	0	0.053	0.08	0.691	0.071

識に成功した割合を示し、cとdが失敗した割合を示す。構造認識精度と比較したとき、ブロック認識精度について提案システムは高精度な認識ができる。図7.3 実験1および表7.3より、実験1の $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の場合のブロック認識率は96.3% (SD = 0.046)である。また、 $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 3$ の場合は81.2% (SD = 0.056)の認識が可能であった。図7.3 実験2および表7.4より、実験2の $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 2$ の場合のブロック認識率は100% (SD = 0)である。また、 $w = 2$ 、 $d = 2$ 、 $h = 3$ の場合は97.2% (SD = 0.029)の認識が可能であった。構造認識精度と同様に、認識に使用する3軸磁気センサの数を増やすことによって、ブロック認識精度は向上することが分かる。

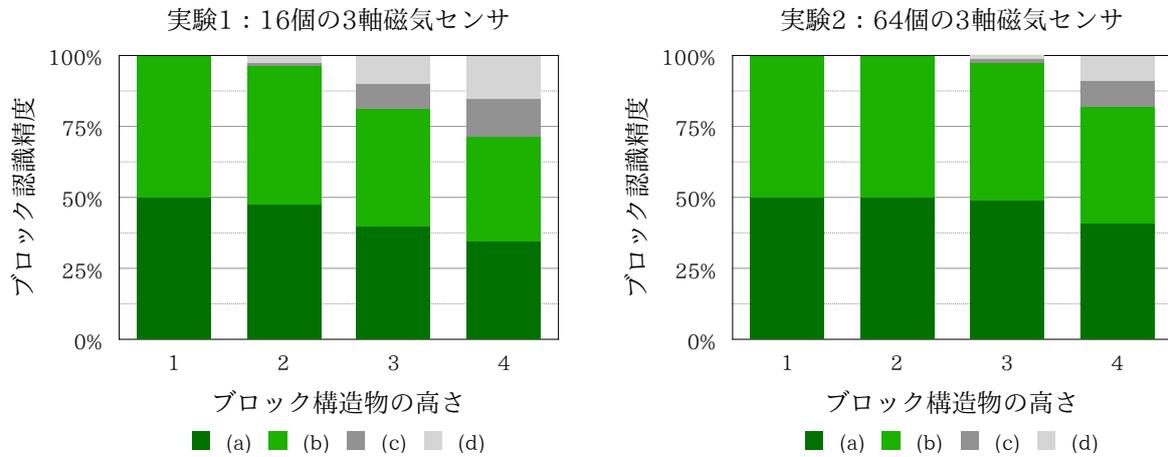


図 7.3: ブロック認識精度の結果を示すグラフ : a) 正しくブロックが存在した場合、b) 正しくブロックが存在しなかった場合、c) 不要なブロックが存在した場合、d) 必要なブロックが存在しなかった場合。

表 7.3: ブロック認識精度の実験 1 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.3 参照)。

ブロック構造物の高さ	16 個の 3 軸磁気センサを用いたときのブロック認識精度							
	1		2		3		4	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
認識率	1	0	0.963	0.046	0.812	0.056	0.715	0.035
a	0.5	0	0.475	0.03	0.401	0.03	0.346	0.022
b	0.5	0	0.489	0.017	0.412	0.029	0.369	0.017
c	0	0	0.011	0.017	0.088	0.029	0.131	0.017
d	0	0	0.025	0.03	0.099	0.03	0.154	0.022

表 7.4: ブロック認識精度の実験 2 に関する結果を示す表 (a-d : 図 7.3 参照)。

ブロック構造物の高さ	64 個の 3 軸磁気センサを用いたときのブロック認識精度							
	1		2		3		4	
	平均	SD	平均	SD	平均	SD	平均	SD
認識率	1	0	1	0	0.972	0.029	0.822	0.03
a	0.5	0	0.5	0	0.487	0.017	0.41	0.014
b	0.5	0	0.5	0	0.485	0.016	0.412	0.02
c	0	0	0	0	0.015	0.016	0.088	0.02
d	0	0	0	0	0.013	0.017	0.09	0.014

第8章 議論

本章において、はじめに、ブロック建造物の認識可能な規模について議論する。次に、磁気計測ハードウェアの3軸磁気センサの個数について議論する。続いて、3軸磁気センサアレイのセンサ間隔について議論する。また、永久磁石の表面磁束密度について議論する。さらに、地磁気や周辺の電子機器の影響について議論する。最後に、トレーニングデータについて議論する。

8.1 ブロック建造物の認識可能な規模

第7章の結果より、提案システムはブロック建造物の高さ方向の規模が大きくなるにつれ、認識精度が低下することが分かった。磁気を発する物体と3軸磁気センサの距離が大きくなるにつれ、磁気の計測値は小さくなる。提案システムは3軸磁気センサアレイを幅および奥行方向に敷き詰めており、高さ方向に磁気ブロックを積み上げていくにつれ観測点における磁気の変化量は少なくなる。そのため、ブロックの認識精度が悪くなると考える。高さ方向にも3軸磁気センサを敷き詰められるような磁気計測ハードウェアの設計が必要となる。または、3軸磁気センサアレイを物理的に高さ方向に動かす機構を考える必要がある。

8.2 磁気計測ハードウェアの3軸磁気センサの個数

第7章の結果より、3軸磁気センサの数を増やすことによって構造認識精度およびブロック認識精度が向上することを示した。3軸磁気センサの数をさらに増やした磁気計測ハードウェアを使用することによって、さらなる認識精度の向上が期待できる。しかし、3軸磁気センサを増やした磁気計測ハードウェアを作製することはコストの増加やメンテナンス性を損ねる問題がある。したがって、少量の3軸磁気センサを2Dプロッタ上に設置し、自動で動かすことにより擬似的に多数の3軸磁気センサから磁気値を取得することも考える。最終的に、2Dプロッタ上にスマートフォンを設置し、スマートフォンに搭載された1つの3軸磁気センサを用いてブロック建造物の構造認識ができるようになることを考える。

8.3 3軸磁気センサアレイのセンサ間隔

本研究の提案システムにおける3軸磁気センサアレイのセンサ間隔は2×2 LEGO duploブロックの幅および奥行きを参考に15.24 mmとした。センサ間隔をより狭くすること

によって認識精度が向上する可能性がある。今後、ブロック構造物の構造認識に最適なセンサ間隔を調査する必要がある。

8.4 永久磁石の表面磁束密度

本研究の磁気ブロックを構成する永久磁石の表面磁束密度は 220 mT である。より強力もしくは非力な表面磁束密度を持つ永久磁石を使用することによって、認識精度に改善が見られる可能性がある。今後、永久磁石の表面磁束密度の違いによる認識精度の変化を調査する必要がある。

8.5 地磁気や周辺の電子機器の影響

提案システムは磁気計測に基づいて実装されている。よって、提案システム動作時にシステムそのものを動かしてしまうと、地磁気の影響により正しい認識ができなくなる可能性がある。加速度センサおよびジャイロセンサなど他のセンサをシステムに取り入れることによって、地磁気の影響を取り除く工夫などを施す必要がある。しかし、動的に磁気に変化する電子機器が磁気計測ハードウェア付近に存在すると提案システムは正しく動作しない可能性がある。現状、この問題を避けることはできないため、システムの周辺に磁気を発する電子機器を設置しないようにする必要がある。

8.6 トレーニングデータについての議論

提案システムでは、トレーニングデータに存在しない座標に磁気ブロックを配置すると誤認識する。例えば、ブロックが半分ずらして配置されたブロック構造物などの認識は現状不可能である。ただし、トレーニングデータを作成する際に、ブロックが半分ずらして配置されたブロック構造物も含めた場合、認識可能となる可能性を有する。

第9章 まとめ

本論文において、ブロック構造物に対する磁気計測に基づく構造認識手法を提案した。また、その構造認識手法を応用して、タンジブル3Dモデリングシステムを作成した。提案システムに用いる磁気ブロックは市販の2×2 LEGO Duplo ブロックに永久磁石を内蔵するのみの単純な構造を持つ。また、永久磁石を取り付けていないブロックと組み合わせることにより、中空構造を持つブロック構造物の3Dモデリングを可能とした。

本論文では、提案システムの実装方法を示し、ブロック構造物の高さおよび3軸磁気センサの使用個数を変化させたときの認識精度を評価する実験を行った。16個の3軸磁気センサを使用した場合、ブロック構造物の最大規模が $2 \times 2 \times 2$ のときの構造認識精度は80.1%であった。また、ブロック構造物の最大規模を $2 \times 2 \times 3$ としたときの構造認識精度は17.7%であり、高さ方向に規模を大きくすると認識精度が低下することが分かった。そこで、3軸磁気センサを64個使用した場合の認識精度を評価する実験を行った。結果、ブロック構造物の最大規模を $2 \times 2 \times 3$ としたときの構造認識精度は77.7%であり、16個の3軸磁気センサを使用したときと比較して構造認識精度は大きく向上することが分かった。

今後、提案システムの認識精度を向上させることで、ユーザが作り上げた作品を3DモデルとしてPCに読み込み、大型の3Dプリンタを用いて同じ構造を持つ物体を印刷することができるようになる。将来、提案システムが普及したならば、子どもや3D CADソフトウェア初心者が作り上げた作品を3DモデルとしてPCに読み込み、3Dプリンタを用いて同じ構造を持つ物体を印刷することができる。提案システムを使ったユーザがより高度なモノづくりに興味を持つことができたならば、世界の工業や産業はより発達できると考える。

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および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筑波大学学類生時代より3年間、指導教員として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。研究者として大きく成長できたことを感じています。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に所属していた先輩方には、研究における様々なご支援をいただきました。同輩の皆様とは、ライバルとして切磋琢磨することで、お互いを高め合うことができました。後輩の皆様には、共に同じ研究について深く議論し、指導する側としての力を身につけるきっかけを生んでくださいました。特に WAVE チームに所属している皆様にはチームゼミをはじめ、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。深く感謝いたします。

最後に、私の学生生活を支えてくださった家族や友人、高等専門学校生時代に研究生活の基礎をご指導いただきました福井工業高等専門学校の川上由紀先生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.
- [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.
- [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 Appcessories. 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 Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pp. 61–68, New York, NY, USA, 2015. ACM.

- [CLWP13] Ke-Yu Chen, Kent Lyons, Sean White, and Shwetak Patel. uTrack: 3D Input Using Two Magnetic Sensors. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 237–244, New York, NY, USA, 2013. 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.
- [Fit96] George W. Fitzmaurice. *Graspable User Interfaces*. PhD thesis, Toronto, Ont., Canada, Canada, 1996. AAINN18871.
- [FSMI00] Phil Frei, Victor Su, Bakhtiar Mikhak, and Hiroshi Ishii. Curlybot: Designing a New Class of Computational Toys. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '00, pp. 129–136, New York, NY, USA, 2000. 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.
- [GMP⁺16] Oliver Glauser, Wan-Chun Ma, Daniele Panozzo, Alec Jacobson, Otmar Hilliges, and Olga Sorkine-Hornung. Rig Animation with a Tangible and Modular Input Device. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4, pp. 144:1–144:11, 2016.
- [GO97] Matthew G. Gorbet and Maggie Orth. Triangles: Design of a Physical/Digital Construction Kit. In *Proceedings of the 2nd Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques*, DIS '97, pp. 125–128, New York, NY, USA, 1997. 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 SIGCHI 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 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 189:1–189:10, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [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.
- [Ish04] Hiroshi Ishii. Bottles : A Transparent Interface as a Tribute to Mark Weiser. *IEICE transactions on information and systems*, Vol. 87, No. 6, pp. 1299–1311, 2004.
- [Ish08] Hiroshi Ishii. Tangible Bits: Beyond Pixels. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '08, pp. xv–xxv, New York, NY, USA, 2008. 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.
- [KLLC16] Han-Chih Kuo, Rong-Hao Liang, Long-Fei Lin, and Bing-Yu Chen. GaussMarbles: Spherical Magnetic Tangibles for Interacting with Portable Physical Constraints. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 4228–4232, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [KS14] Azusa Kadomura and Itiro Siio. MagNail: Augmenting Nails with a Magnet to Detect User Actions Using a Smart Device. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '14, pp. 135–136, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LCC⁺13a] 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.

- [LCC⁺13b] 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 *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, pp. 2837–2838, 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⁺14a] 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.
- [LCT⁺14b] 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 *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, pp. 587–590, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [LCT⁺14c] 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 *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, pp. 181–182, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [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.
- [LKC15] Rong-Hao Liang, Han-Chih Kuo, and Bing-Yu Chen. GaussStarter: Prototyping Analog Hall-Sensor Grids with Breadboards. In *Adjunct Proceedings of the 28th Annual*

ACM Symposium on User Interface Software & Technology, UIST '15 Adjunct, pp. 49–50, New York, NY, USA, 2015. ACM.

- [LKC16a] 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.
- [LKC16b] 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 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 8–8, 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.
- [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.
- [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, 2012.
- [PRI02] Ben Piper, Carlo Ratti, and Hiroshi Ishii. Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 355–362, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [UI97] Brygg Ullmer and Hiroshi Ishii. The metaDESK: Models and Prototypes for Tangible User Interfaces. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '97, pp. 223–232, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [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, 2004.

- [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 Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '18, pp. 19–26, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [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 17] 吉田有花, 鶴田真也, 池川航史, 阿部哲也, 志築文太郎, 田中二郎. 静電容量に基づくブロックシステム. コンピュータ ソフトウェア, Vol. 34, No. 2, pp. 93–101, 2017.
- [石井 02] 石井裕. 仮想と現実の融合 : 3. タンジブル・ビット-情報と物理世界を融合する, 新しいユーザ・インタフェース・デザイン-. 情報処理, Vol. 43, No. 3, pp. 222–229, 2002.

著者論文リスト

本論文に関する論文

本論文の主内容は、下記の論文として公表済みである。

査読付き国際会議論文（口頭発表）

1. Koshi Ikegawa, and Buntarou Shizuki. Tesla Blocks: Magnetism-Based Tangible 3D Modeling System using Block-Shaped Objects. In Proceedings of the 30th Australian Conference on Human-Computer Interaction (OzCHI 2018), ACM, December 2018, pp. 411-415.
<https://doi.org/10.1145/3292147.3292221>

査読付き国際会議論文（デモ・ポスター）

1. 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 2017 Asian CHI Symposium), May 2017, 8 pages.

査読なし国内会議論文（デモ・ポスター）

1. 池川航史, 志築文太郎. 磁気計測に基づくブロック型タンジブル 3D モデリングシステム. 第 26 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 (WISS 2018), 予稿なしデモ・ポスター, 日本ソフトウェア科学会, 2018 年 09 月.
2. 池川航史, 中前秀太, 志築文太郎. 磁気計測に基づき構造認識を行うブロックシステム. インタラクション 2017 論文集, 情報処理学会, 2017 年 02 月, pp. 707-711.

その他論文

査読付き学術論文誌論文

1. 吉田有花, 鶴田真也, 池川航史, 阿部哲也, 志築文太郎, 田中二郎. 静電容量に基づくブロックシステム. 日本ソフトウェア科学会, コンピュータ ソフトウェア Vol.34 (2017) No.2, 2017年05月, pp. 93-101, 9 pages.
https://doi.org/10.11309/jssst.34.2_93

査読付き国際会議論文 (口頭発表)

1. Koshi Ikegawa, Akira Ishii, Kazunori Okamura, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Investigating Effects of Users' Background in Analyzing Long-Term Images from a Stationary Camera. In Proceedings of the 20th International Conference on HIMI 2018, Held as Part of HCI International 2018 (HCII 2018), Part I, LNCS 10904, Springer, July 2018, pp. 490-504.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-92043-6_41

査読付き国際会議論文 (デモ・ポスター)

1. Koshi Ikegawa, Shuhei Aoyama, Shogo Tsuchikiri, Takuto Nakamura, Yuki Hashimoto, and Buntarou Shizuki. Investigation of Touch Interfaces Using Multilayered Urushi Circuit. In Proceedings of the 12th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2018), ACM, March 2018, pp. 115-122.
<https://doi.org/10.1145/3173225.3173285>.
2. 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 2016), ACM, November 2016, pp. 307-312.
<https://doi.org/10.1145/2992154.2996772>.

査読付き国内会議論文 (口頭発表)

1. 永井美波, 池川航史, 志築文太郎, 高橋伸. 日本語フリック入力を用いたモバイル端末の把持姿勢識別. 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 (WISS 2017), 日本ソフトウェア科学会, 2017年12月, pp. 113-118.

査読なし国内会議論文（口頭発表）

1. 池川航史, 川上由紀. 遺伝的アルゴリズムにより設計した周波数選択板によるマイクロストリップアンテナの利得向上効果に関する研究. 電子情報通信学会 北陸支部 平成 26 年度学生による研究発表会, 電子情報通信学会, 2015 年 03 月, 1 page.

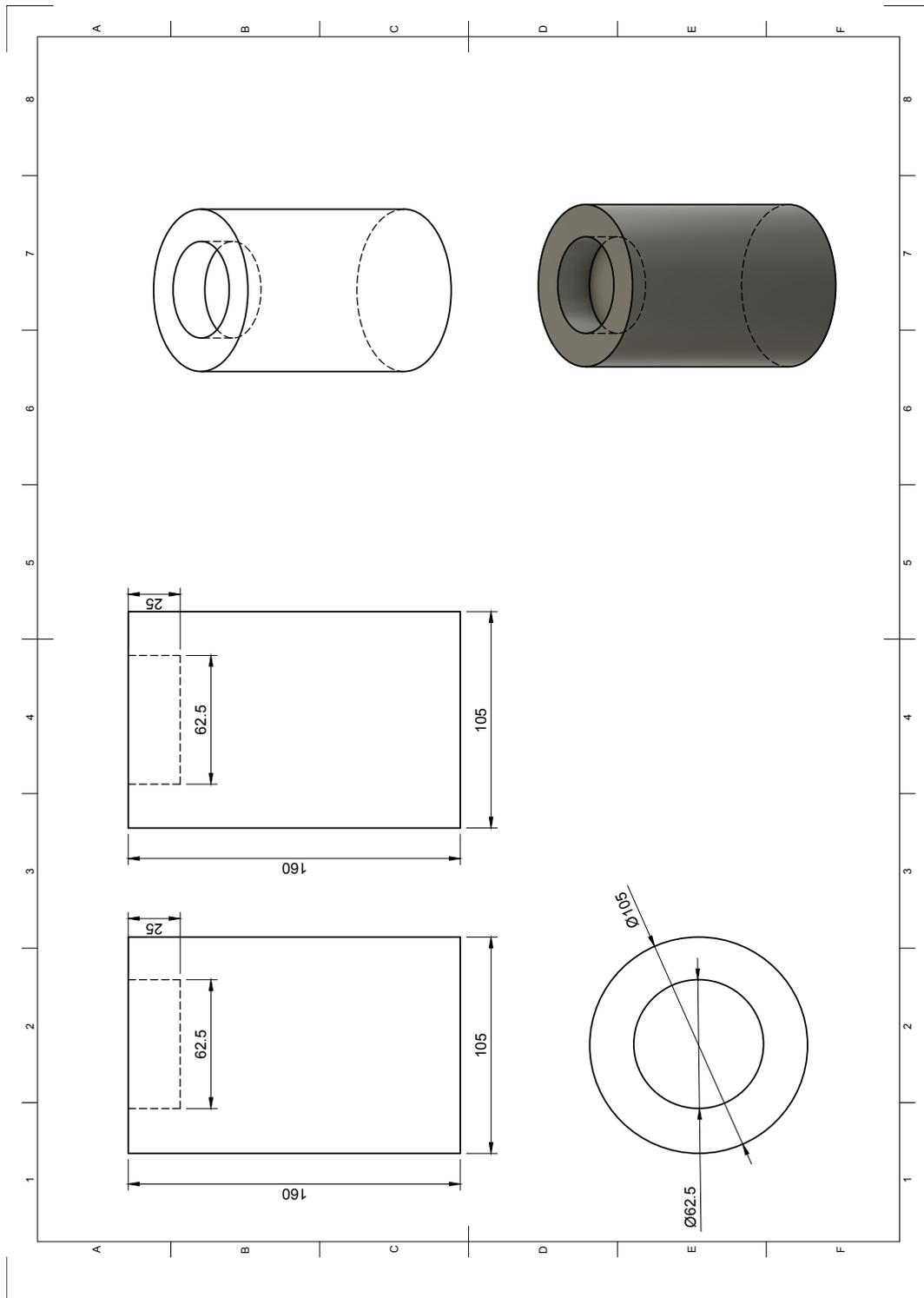
付録A 磁気ブロックの円筒形固定具設計図

本付録にて、第4章、4.2節に示した磁気ブロックの作成に使用する円筒形固定具の3Dモデル外観図および三面図を示す。

A.1 円筒形固定具 3D モデルの外観図



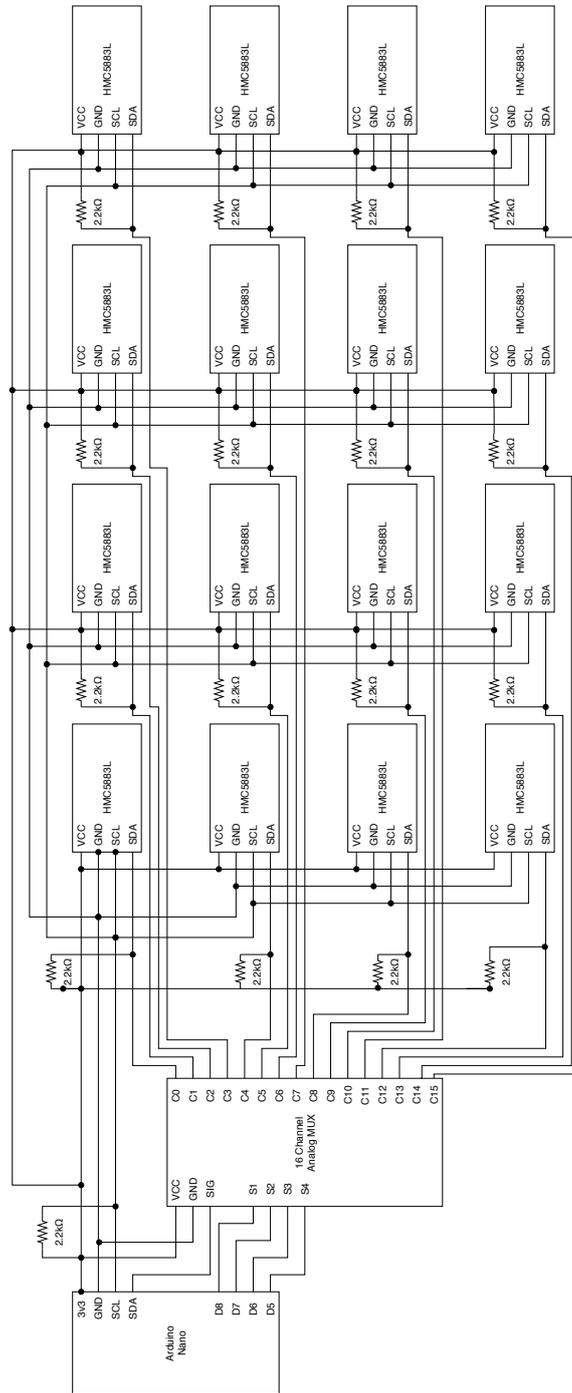
A.2 円筒形固定具 3D モデルの三面図



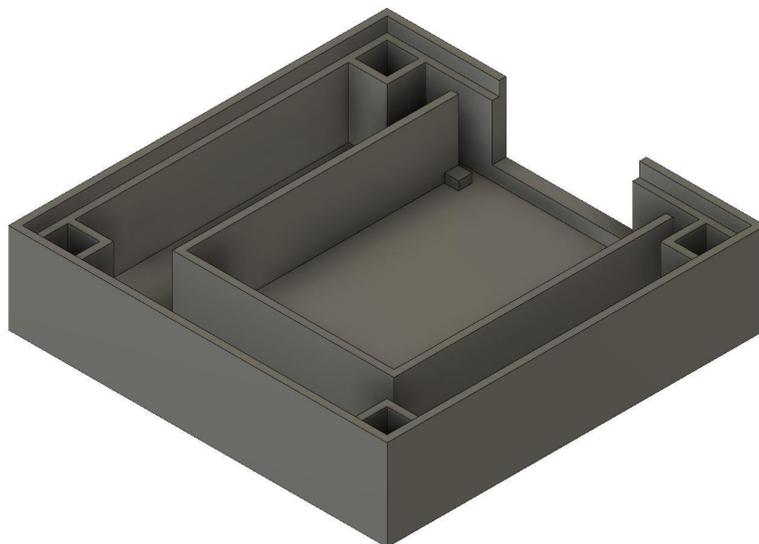
付録B 磁気計測ハードウェアの設計図

本付録にて、はじめに 4.3 節に示した磁気計測ハードウェアの回路図を示す。次に、4.3 節に示した磁気計測ハードウェアの筐体を構成する、筐体下部、 8×8 の突起を持つ筐体上部、および 4×4 の突起を持つ筐体上部について、それぞれ 3D モデルの外観図および三面図を示す。

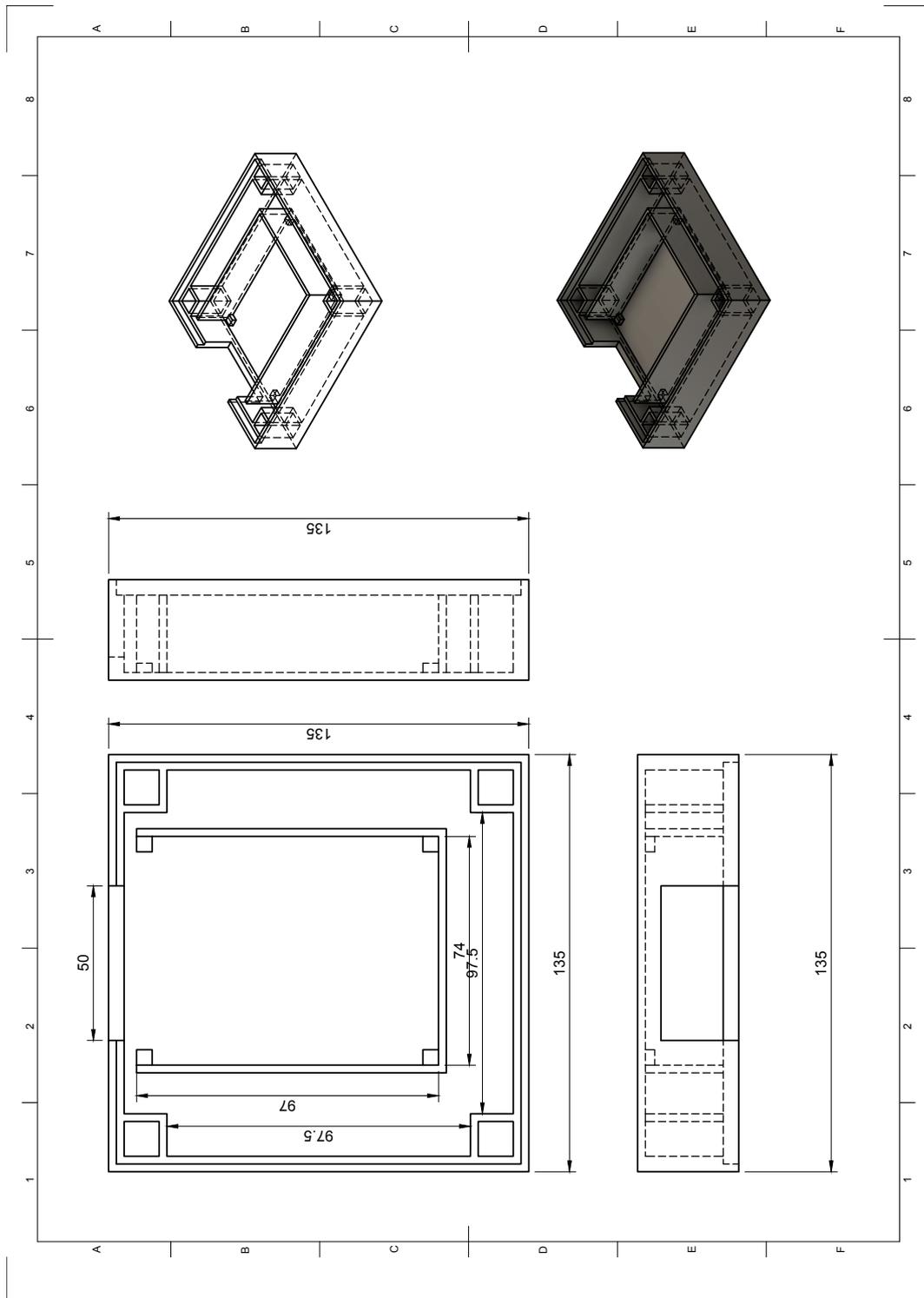
B.1 磁気計測ハードウェアの回路図



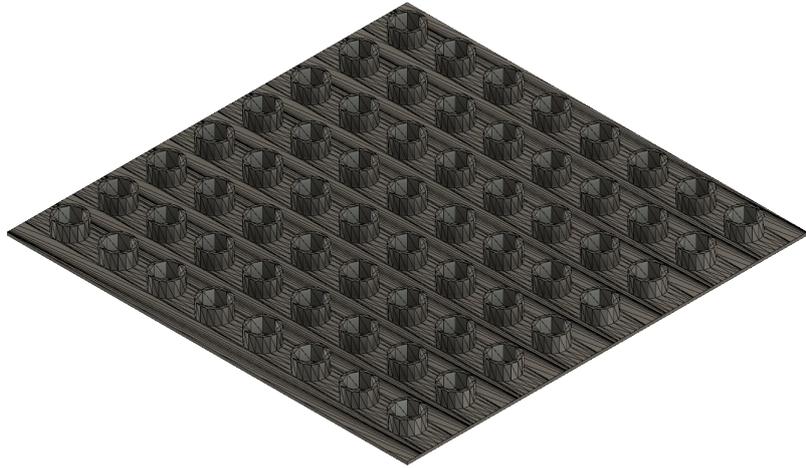
B.2 筐体下部 3D モデルの外観図



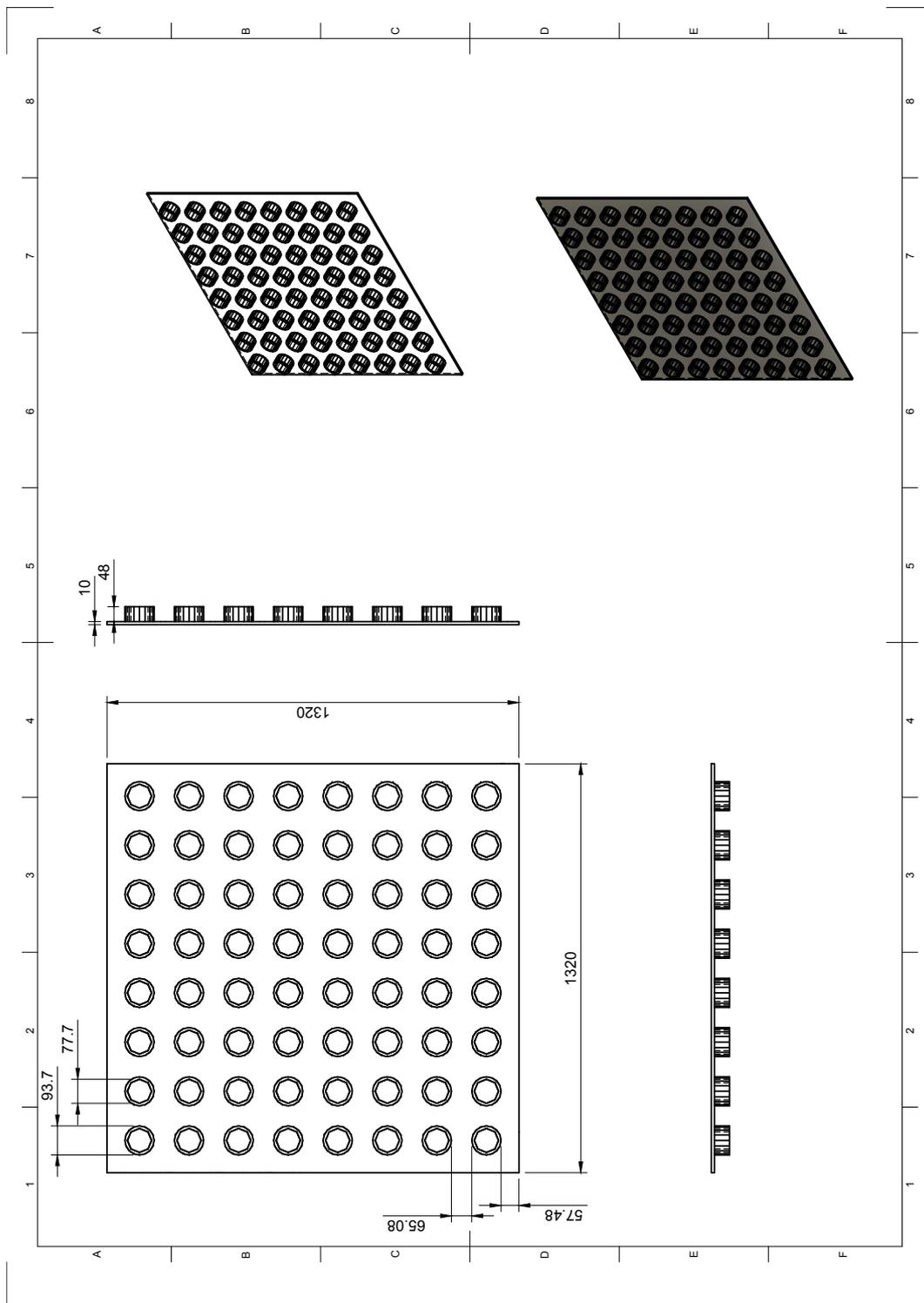
B.3 筐体下部 3D モデルの三面図



B.4 8×8 の突起を持つ筐体上部の 3D モデルの外観図



B.5 8×8の突起を持つ筐体上部の3Dモデルの三面図



B.6 4×4 の突起を持つ筐体上部の 3D モデルの外観図



B.7 4×4の突起を持つ筐体上部の3Dモデルの三面図

