

静電容量に基づくブロックシステム

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

本研究では、ユーザが物理的なブロックを積み重ねることにより仮想空間内の3Dモデルを構築することを可能にするために、静電容量に基づくブロックシステム (Capacitive Blocks) を開発した。このシステムにおける個々のブロックは静電容量を持つコンデンサとなるように作られており、3Dプリンタを用いて印刷することが可能である。本システムは、静電容量を計測することにより、積み重ねられたブロックの計数を行う。このため本システムには、ブロック内に電子デバイスを持たない単純な構造を持つ、カメラを使わずに積み重ねられたブロックの計数を行う、という特長がある。

In order to make it possible to construct a 3D model in a virtual space by piling physical blocks, we developed a block system based on capacitance. The block is a capacitor that consists of two layers made of conductive plastic filament and between them a layer made of non-conductive plastic filament, which can be printed out using a 3D printer. This system counts the piled blocks by measuring the capacitance of the piled blocks. Due to this, this system has the merits of being simply constructed, not having electronic devices in the blocks, and counting of the piled blocks without using a camera.

1 はじめに

積み木やブロックなどの、手を使って部品を組み合わせて形(すなわちモデル)を作る玩具は、多くの人に親しまれている。この「手を使って部品を組み合わせる」という、多くの人に親しまれている操作をコンピュータの操作として活用する試みは多くなされている。例えば Ullmer らが提唱したタンジブルユーザインタフェース [9] としても、ブロックを組み合わせることにより 3D モデルを構築できるブロック型 UI が研究されている [17]。

このブロック型 UI を実現するには、ブロック同士の接続を認識する必要があり、その方法は、ブロック自体に電子デバイスを組み込む方法 [1][19][2][7] か、カメラ等のセンサを使う方法 [4][8][13][25] の 2 種類に

大別される。しかし、前者には、高価であるため手軽に扱えないという欠点があり、後者には、オクルージョンが生じる、カメラの設置場所に制約を受けるなどの欠点がある。

これらに対して、本研究では静電容量に基づくブロックシステム (Capacitive Blocks) を開発した [21][28]。このシステムにおける個々のブロックは静電容量を持つコンデンサとなるように作られている。本システムは、静電容量を計測することにより、積み重ねられたブロックの計数を行い、仮想空間内に 3D モデルを表示する。本システムには、ブロック内に電子デバイスを持たない単純な構造を持つ、カメラを使わずに積み重ねられたブロックの計数を行う、という特長がある。

2 関連研究

ブロック型 UI を実現する方法については、今まで様々な研究がなされてきた。その中でもブロック同士の接続を認識する手法として、電子デバイスを組み込む手法と、カメラ等のセンサを用いる手法が存在

Block System based on Capacitance.

Arika Yoshida, Masaya Tsuruta, Koshi Ikegawa, Tetsuya Abe, Buntarou Shizuki and Jiro Tanaka, 筑波大学, University of Tsukuba.

コンピュータソフトウェア, Vol.34, No.2 (2017), pp.93-101.

[研究論文] 2016 年 5 月 31 日受付.

する。また、本研究で使用した技術に関連する、静電容量に基づくマーカ認識に関する研究、3D プリントを用いたファブリケーション、電子デバイスを含むブロックの製品等も本章において述べる。

2.1 電子デバイスを組み込む手法

Anderson らは、組み立てた LEGO 型ブロックをコンピュータに接続することにより、形状の入力が可能な電子ブロックを開発した[1]。このブロック内部には回路が内蔵されている。コンピュータの電源を入れると、各ブロック間で通信を行い、組み立てたブロックの3次元形状を認識する。Watanabe らの ActiveCube[19] は、様々な方向に接続可能な立方体のブロックの内部に回路を組み込み、コンピュータと各ブロック間で通信を行うことにより、リアルタイムに3次元形状を認識し、モデリングを行うことが可能なブロックである。Ando らの作成した StackBlock [2] は、ブロック内部に赤外線 LED とフォトトランジスタをマトリクス状に敷き詰めることにより、重ねたブロックの任意の位置や角度の形状を認識可能なブロックである。Gorbet らの Triangles[7] は、マイクロプロセッサとユニーク ID を有する回路が組み込まれた正三角形平板の物理的なピースであり、そのピースを組み合わせた形状をコンピュータが認識し、仮想空間内で3次元モデルとして表現している。

2.2 カメラ等のセンサを用いる手法

Baudisch らが作成した Lumino[4] は、ガラスファイバーとマーカで構築されたブロックの見え方を机の下からカメラで撮影し、積み重ねられたブロックの高さを認識している。Miller らは、深度カメラを用いてブロックの構築形状を認識し、認識した形状をコンピュータ上に再現する手法を提示している [13]。

Gupta らの DuploTrack [8] は、深度カメラを用いて Duplo Block を組み立てるプロセスをリアルタイムに推測し、追跡する。この手法を用いることにより、組み立てられたブロックの形状を画面上で表示することが可能となる。永井らの TSUMIKICASTLE [25] は、ユーザが現実空間に積み重ねた積み木が、仮想空間において立体的な城に変化する体験ができる

システムである。積み木の重さとケース上部に配置されたレーザダイオードとフォトダイオードのアレイを用いて積み重ねられた積み木を認識している。

2.3 静電容量に基づくマーカ認識に関する研究

物体が置かれたことを本研究と同様に静電容量に基づいて検出する手法は、タッチパネル上に置かれたマーカを検出することに使われている。Chan らが作成した CapStones [5] は、表面と静電容量式タッチパネルとの接触面を導体で接続し、その導体パターンにより、積み重ねの認識を可能とする。ただし、ユーザがタッチしている状態でなければ認識せず、触れていないブロックは認識されない。中島らの PUCs [24] は、ユーザが触れていない間でも静電容量式タッチパネルによって継続的に位置認識が可能な物理的ウィジェットの構成方法を示している。しかし、物理的ウィジェットの存在は認識するものの、積み重ねの認識は行わない。

2.4 3D プリントを用いたファブリケーション

3D プリントを用いたファブリケーション支援が多く研究されている。例えば Vázquez ら [18] は内部の空気圧を検出可能な物体を 3D プリントを用いて印刷し、ユーザが押した圧力をコンピュータに認識させることにより、様々なアプリケーションに応用している。Muller らの faBrickation [14] は 3D プリントとブロックを組み合わせることにより、高速なプロトタイプ作成の支援を行っている。Weichel らが作成した ReForm [20] は、粘土状の物理的なオブジェクトをデジタルモデルと同期させることにより、オブジェクトの形状を変更している。本研究も上記の研究と同様に、3D プリントを利用した研究として位置づけられる。

2.5 電子デバイスを含むブロックの製品

LEGO Mindstorms [10] では、専用のブロックを組み立てることでロボット等を作成できる。LittleBits [12]、および Grove System [16] では、電子部品が搭載されている専用の基板をつなげることにより、電子回路を簡単に作る事ができる。一方、本研究のブロッ

クシステムはブロック内に電子デバイスを含まない単純な構造を持つ。

2.6 その他

李らが作成した Bloxels [29] では、可視光通信と発光をするための回路が組み込まれたブロックをユーザが積み重ねることにより、デバイス間の光通信路を構築することができる。さらに、この光通信路を用いてそれぞれのブロックのカラーデータを転送することにより、各ブロックを発光させ、ブロック全体を1つのディスプレイとして機能させる。矢敷ら [23] は、電子重畳通信を用いたブロック型デバイスを実装している。電源を供給するバスとデータバスを共通化することにより、マイコンを内蔵したブロックの小型化を図っている。熊谷らが作成した LEGOrics [27] は、LEGO ブロックと同じ形状・外観を保ちつつ、インタラクティブに動作する電子ブロックであり、その内部に埋め込まれたマイコンが LED を制御している。

椎尾らは、ブロックを正しく組み立てた場合に歪み無く見える映像を投影することで、部品の取り付け位置や向きを提示するトイブロック組み立て支援システム StudI/O を提案し、実装した [22]。大野らは、ブロック玩具に対する能動的音響計測を用いて、インタラクティブなプロトタイプを作成する手法を示している [26]。ブロックの形状を有する音響センサを対象物に取り付け、その対象物への操作をソフトウェア上で学習させることによって、デザイナーは容易にインタラクティブなプロトタイプを作成することが可能である。

また、静電容量を計測することによって物体の状態を認識する試みは既になされている。Sato らの Touché [15] は、複数の周波数で静電容量を測ることにより、導電体の物質に対してタッチしている手や体の認識が可能なタッチセンシング技術である。cubecube [6] は抵抗を用いたブロックを積み重ねるに基づく 3D モデリングインタフェースである。LegoX [11] は「location-mapping and gyroscopic sensors」を用いて個々の DUPLO ブロックの位置および向きを認識する。ユーザはこれらを組み立てることによって 3D モデリングが行える。

3 Capacitive Blocks

Capacitive Blocks は、個々のブロックが静電容量を持つコンデンサとなるように作られたブロックシステムである。個々のブロックの形状は既存のブロックシステムに基づく。本システム (図 1) は、ブロック (図 2)、ベースプレート (図 3)、静電容量計測部、表示アプリケーションの 4 つから構成される。

3.1 ブロック

個々のブロックはコンデンサとなるように作られる。また、ブロックはその上下に導通部分を有し、この導通部分を通じて上下のブロックと並列にコンデンサを形成するように作られる。このようなブロックは 3D プリンタを用いて印刷することが可能である。我々ははじめに、1×1 LEGO ブロックの形状を元に、7.8mm×7.8mm×11.4mm のブロック (図 2f, 2g) を作成した。このブロックは、3つのパーツ (図 2a-2c) から構成されており、ブロックの外側と中心のパーツ (図 2a, 2c) は導電性 PLA フィラメント (Proto-Plant Inc. 製)、その間のパーツ (図 2b) は非導電性 PLA フィラメント (Zhejiang Flashforge 3D Technology Co., Ltd. 製) から作られる。外側と中心のパーツがコンデンサを構成するための 2 枚の電極として、間のパーツが電極に挟まれた誘電体として機能するため、ブロックがコンデンサとなる。

3.2 ベースプレート

ベースプレート (図 3) は幾つかのコネクタを持ち、個々のコネクタはブロックを積み上げる土台として機能する。我々は今回ベースプレートとして 1×1 個のコネクタを持つものおよび 2×2 個のコネクタを持つものを作成した。両者ともジャンパ線以外は 3D プリンタを用いて印刷されている。それぞれのコネクタは、上に積み重ねられたブロックの外側と中心のパーツがそれぞれ静電容量計測部に接続されるように設計されている。

3.3 静電容量計測部

静電容量計測部ではブロックの計数を行うために、

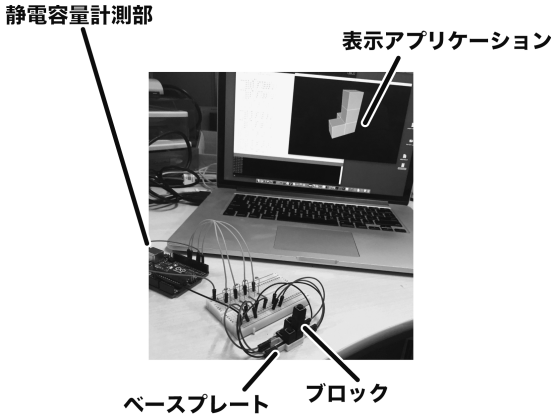


図 1 Capacitive Blocks

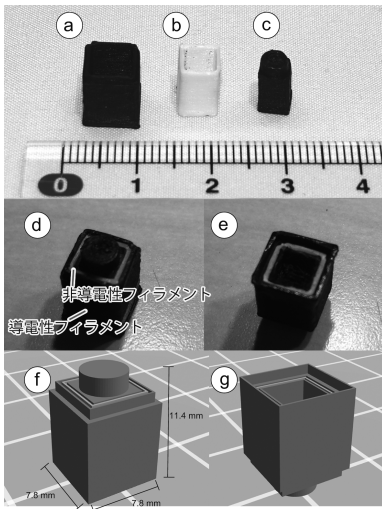


図 2 Capacitive Blocks のブロック

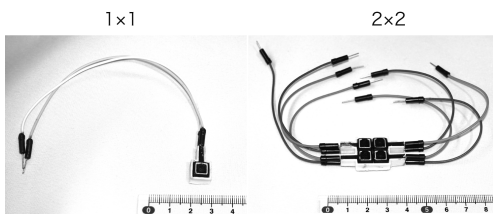


図 3 1×1 および 2×2 のベースプレートのプロトタイプ

コネクタを含むブロックの静電容量を常に計測する。この計測のために、各コネクタに静電容量を計測するための回路[3]をそれぞれのベースプレートに接続し

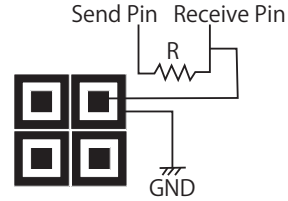


図 4 2×2 のベースプレートと回路図 (回路はそれぞれのベースプレートに接続されている)

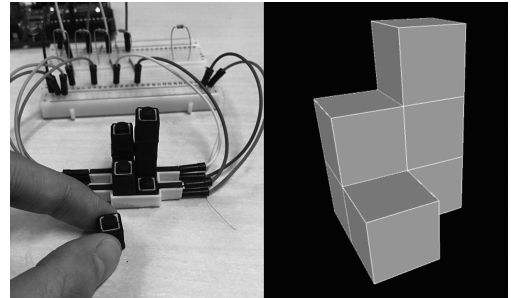


図 5 Capacitive Blocks のプロトタイプ: (左) 外観, (右) 積み重ねられたブロックの 3D モデルを表示するアプリケーション

た(図 4). なお、現実装では R として 1MΩ の抵抗を用いている。またこの静電容量計測部の実装には Arduino UNO を、静電容量の計測には Arduino のライブラリである Capacitive Sensing Library [3] を用いている。

3.4 表示アプリケーション

図 5 のように、積み重ねられたブロックの数に応じて仮想空間内に 3D モデルを表示する表示アプリケーションを開発した。ユーザは物理的なブロックを積み重ねることにより、仮想空間内に 3D モデルを構築することが可能である。表示アプリケーションの実装には Processing 2.0 を用いた。

4 静電容量に基づくブロックの計数方法

静電容量に基づくブロックの計数は次の仕組みに基づく。まず、本研究のブロックは、図 2d および図 2e に示されるように、その上下に導通部分を有す。ブロックが重なると、上下のブロックの導通部が接続される。またコネクタも同様の導通部を有する。このため、コネクタも含めて、コネクタに重ねられた

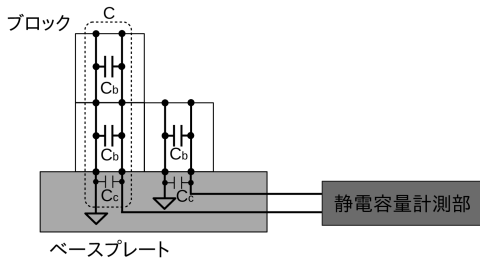


図6 コネクタおよびブロックが構成する並列回路

ブロックは並列にコンデンサを形成する(図6)。このコンデンサの静電容量 C は、コネクタの静電容量を C_c 、ひとつのブロックの静電容量を C_b とすると、コネクタに重ねられたブロックの個数が n の場合、 $C = C_c + nC_b$ となる。したがって、 C_c と C_b が既知である場合、 C を計測することにより、コネクタに重ねられたブロックの個数 (n) を計測することが可能となる。ただし、後述するように現実装では計測される静電容量に多くの誤差が含まれる。そのため、現実装での表示アプリケーションは積み重ねられたブロックの数と静電容量を記録している。そして、その記録した静電容量以上を計測した場合、1個ブロックが追加で積み重ねられたとみなし、改めて積み重ねられたブロックの数と静電容量を記録する。

5 ブロックの静電容量の計測実験と ブロックの再設計

4章に示した計数方法を試すために、3章のブロックとベースプレートの静電容量を計測した。また、この結果に基づきブロックの再設計を行った。

5.1 静電容量の計測実験

1×1のベースプレートに0-5個のブロックを積み重ね、LCRメータ(DER EE Electrical Instrument, DE-5000)を用いてコネクタを含むブロックの静電容量を計測した。計測は各ブロックの個数毎に10回ずつ行った。計測に際しては、ブロックを積み重ねてから1-15秒待ち、計測される静電容量が安定した時点のものを記録した。計測結果を表1に、静電容量の平均値を図7に示す。

表1 ブロックの静電容量の計測

		ブロックの数					
		0	1	2	3	4	5
試行回数	1	4.1	6.75	7.13	7.51	10.69	8.89
	2	4.09	10.72	17.24	21.46	21.95	22.41
	3	4.15	8.57	10.28	12.22	11.58	10.42
	4	4.08	8.67	8.80	9.16	9.34	8.44
	5	4.14	10.43	15.84	20.43	20.69	20.57
	6	4.1	7.67	10.66	8.27	8.88	9.69
	7	4.15	9.63	11.27	12.33	12.96	11.57
	8	4.18	9.27	11.65	15.09	15.73	8.66
	9	4.1	10.31	14.38	7.69	7.81	8.26
	10	4.19	7.58	8.70	7.33	8.61	5.72

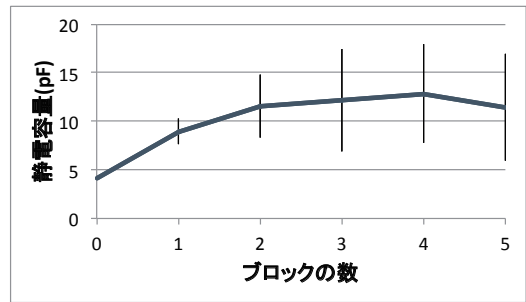


図7 ブロックの静電容量の平均値

結果として、1×1 LEGOブロックと同じ大きさでブロックを作成すると、LEGOブロックとの相性は良いものの、図7から、ブロックが3個以上重ねられた時、標準偏差が大きくなる($\sigma = 5.30$)ため、計数にも誤認識が生じやすくなることが示された。

5.2 ブロックの再設計と静電容量の計測

個々のブロックの静電容量を大きくすることによって標準偏差を減らす試みを行った。そのために、幅・奥行き・高さを2倍にしたブロックを作成した。図8に、作成した15.6mm×15.6mm×22.8mmのブロックを示す。

ブロックを積み重ねた場合の計測

5.1節と同じように、ベースプレートにブロックを0-5個積み重ね、LCRメータを用いて、コネクタを含むブロックの静電容量を計測した。計測は各ブロックの個数毎に10回ずつ行った。計測結果を表2に、静電容量の平均値を図9に示す。

図9から、ブロックを5個積み重ねた状態でも、安定してブロックの計測が可能であることがわかった。

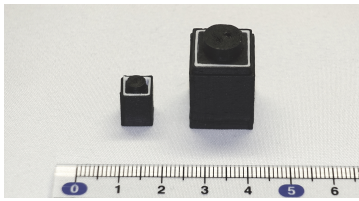


図 8 (左)1×1のブロック. (右)1×1の2倍の大きさのブロック

表 2 再設計したブロックの静電容量の計測

		ブロックの数					
		0	1	2	3	4	5
試行回数	1	7.4	30.2	52.8	75.8	98.2	120.5
	2	7.3	29.8	52.7	75.7	98.1	120.7
	3	7.4	30.3	52.7	75.5	98.5	120.7
	4	7.4	30.0	52.6	75.2	98.1	120.7
	5	7.3	30.1	52.7	75.1	97.8	120.7
	6	7.4	30.0	52.8	75.8	98.3	120.8
	7	7.3	30.4	53.0	76.1	98.6	120.9
	8	7.4	30.0	52.6	75.5	98.1	120.7
	9	7.4	30.4	53.4	76.0	98.3	120.9
	10	7.4	30.0	52.8	75.7	98.3	120.8

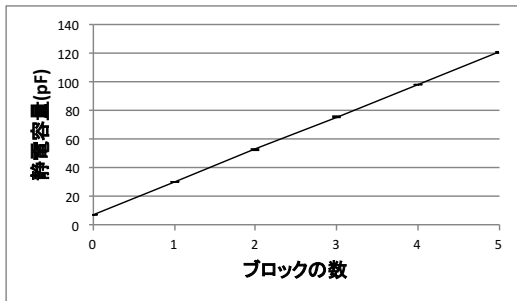


図 9 再設計したブロックの静電容量の平均値

(ブロックが3個の時 $\sigma = 0.32$, ブロックが5個の時 $\sigma = 0.11$).

ブロックを横に置いた場合の計測

計測対象のブロックの横にブロックが存在する場合、計測される静電容量にどのような影響があるかを調べた。この計測には、図8右のブロックを使用した。まず2×2の接続部の左上のコネクタにLCRメータをつなぎ計測を行った。計測対象のブロックの横2ヶ所と斜め1ヶ所にブロックを置いた状態(図10)、およびゴムを用いて4つのブロックを囲い、ブロック同士の隙間を小さくした状態(図11)の、計9

置いたブロックの位置 (計測位置から見た位置)

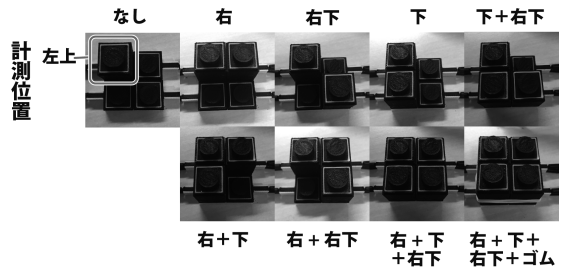


図 10 ブロックを横に置いた場合の置き方

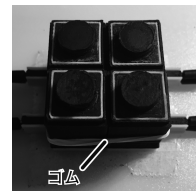


図 11 4つのブロックをゴムで囲った様子

表 3 ブロックを横に置いた場合の静電容量

計測位置	置いたブロックの場所 (計測位置から見た位置)	計測位置の静電容量 [pF]	差分 [pF]
左上	なし	31.8	0
	右	32.1	+0.3
	右下	32.0	+0.2
	下	32.1	+0.3
	下+右下	32.2	+0.4
	下+右	32.3	+0.5
	右+右下	32.2	+0.4
	右+下+右下	33.0	+1.2
	右+下+右下+ゴム	33.0	+1.2

状態にて1試行ずつ計測を行った。結果を表3に示す。表3から最小で0.2 pF, 最大で1.2 pFの違いが生じた。1ブロックが持つ静電容量が23 pF前後であることから、誤差は1%-5%である。このため、使用されるブロックの数が少ない場合には計数に横に置かれたブロックの影響はないと考えられるが、20個-100個のブロックが横に置かれた場合には計数誤りが生じる可能性もある。したがって、使用するブロックの個数を増やす場合には、ブロック自体の静電容量を増やす必要があると考えられる。

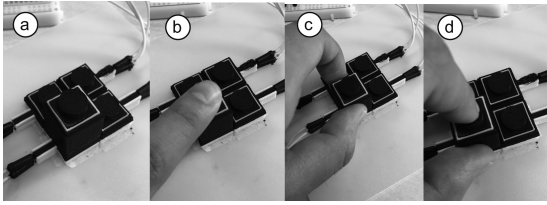


図 12 ブロックを手で触った場合の計測

ブロックを手で触った場合の計測

人間自体もコンデンサになっているため、ブロックを触るとブロックの静電容量も変化する。この影響を調べるために、触り方による静電容量変化を調べた。この計測には図 8 右のブロックを使用している。

図 12 のように、ブロックを手で触った場合の計測を 5 回行った。この計測における静電容量の平均は、図 12a の場合は 33.68 pF、図 12b のように内側を触った場合は 43.2 pF、図 12c のように外側を触った場合は 35.54 pF、図 12d のように内側と外側を触った場合は 600 pF–1400 pF であった。このように、人間がブロックに触れた場合には、計測される静電容量は大きく変化するため、ブロックへのタッチを検出できる可能性があることが分かった。

6 まとめと今後の課題

本論文では、ユーザが物理的なブロックを積み重ねることにより、仮想空間内の 3D モデルを構築することが可能なブロックシステムである Capacitive Blocks を示した。まずこの開発にあたって、積み重ねられたブロックの静電容量計測部を作成し、3D プリンタにより印刷したブロックシステム (Capacitive Blocks) の作成を行った。次に、このブロックの静電容量の計測実験を行った。実験結果より、1×1 LEGO ブロックと同じ大きさで作成したブロックは、LEGO ブロックとの相性は良いものの、3 個以上積み重ねると、誤認識を生じやすいということが確認された。次に、1×1 LEGO ブロックに対して幅・奥行き・高さを 2 倍にしたブロックを作成した。このときの静電容量は、積み重ねられたブロックの数に応じて線形に増加することが観測された。このことから、静電容量に基づきブロックの計数が可能であることが示され

た。ただし、静電容量に誤差が生じる、横に置かれたブロックの影響により静電容量に変化を生じる、という問題が明らかになった。

これらの問題を解決する手段として、個々のブロックの静電容量を上げる方法がある。本研究ではそのひとつとしてブロックを大きくする方法を試した。その他にも、誘電率が大きい材料を使用する、電極間を縮める、多層構造を採用するという方法も考えられる。ただし、我々が使用している 3D プリンタの精度 (現在約 1mm 厚である図 3b のパーツをこれ以上薄く印刷できない) の限界もあるため、今後は様々な 3D プリンタ用樹脂を試す、3D プリンタではなく他の手段を用いて作成したブロックを使う、大きく印刷する、他の 3D プリンタを使用する等によってこれらの方法の有効性を探ることが今後の課題である。

また、今回我々が用いた 3D プリンタ用樹脂は脆く、何回もブロックを取り外しすると摩擦によりブロック同士がしっかりと接続されなくなり、この結果として静電容量の計測精度が落ちる。この問題を解決する手段として、摩擦に強い 3D プリンタ用樹脂を使用することによってブロック同士がしっかりと接続され続けるようにする方法も考えられる。ただし今回導電性 PLA フィラメントより固い導電性 ABS フィラメントを用いた計測実験を行ったところ、3 個以上積み重なると、3 章に示したブロックと同様に計測される静電容量が減ったため、ブロックの計数ができなくなった。この原因は導電性 ABS フィラメントの抵抗率が高いことに起因すると考えられる (導電性 PLA フィラメント: 2.4k Ω , 導電性 ABS フィラメント: 7.2M Ω , それぞれ 1.75mm フィラメント 10cm の長さの抵抗値を計測)。今後、丈夫かつ抵抗率が低い樹脂が出てきた際には改善の余地はあると考えられる。

現状のブロックシステムの接続部は 2×2 と小さく、自由度が低いシステムとなっている。今後は大規模な接続部、例えば 8×8 を実装し、システムを評価することを計画している。その後、表示アプリケーションの 3D モデルに色づけを行えるようにする機能や 3D モデルを滑らかにする機能などを追加してゆく計画である。

また、触り方で静電容量が変化することから、積み

重ねられたブロックの計数以外にも、触り方の違いを認識できる可能性がある。これによって触り方に応じて振る舞う 3D モデリングインタフェース (例：触り方に応じて 3D モデルの一部の色が変化する等) が実現される可能性がある。さらに、指が触れた面積や位置等を推定することができれば、さらに魅力的な 3D モデリングインタフェースを実現することが可能となる (例：積み重ねられたブロックがどのようにつかまれたのかまで読み取ることができる) ので、その推定方法を模索していきたい。

今後は、本稿で明らかになったブロックの課題を解決し、大規模化を行った上で 3D モデリングインタフェースを実装し評価を行う計画である。

参考文献

- [1] Anderson, D., Frankel, J. L., Marks, J., Agarwala, A., Beardsley, P., Hodgins, J., Leigh, D., Ryall, K., Sullivan, E. and Yedidia, J. S.: Tangible Interaction + Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling, in *SIGGRAPH '00*, 2000, pp. 393–402.
- [2] Ando, M., Itoh, Y., Hosoi, T., Takashima, K., Nakajima, K. and Kitamura, Y.: StackBlock: Block-shaped Interface for Flexible Stacking, in *UIST '14 Adjunct*, 2014, pp. 41–42.
- [3] Capacitive Sensing Library, <http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor?from=Main.CapSense>. [Online; accessed 4-January-2017].
- [4] Baudisch, P., Becker, T. and Rudeck, F.: Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles, in *CHI '10*, 2010, pp. 1165–1174.
- [5] Chan, L., Müller, S., Roudaut, A. and Baudisch, P.: CapStones and ZebraWidgets: Sensing Stacks of Building Blocks, Dials and Sliders on Capacitive Touch Screens, in *CHI '12*, 2012, pp. 2189–2192.
- [6] Cubecube: A Tangible CAD Interface, <http://www.instructables.com/id/Cubecube-A-Tangible-CAD-Interface/>. [Online; accessed 4-January-2017].
- [7] Gorbet, M. G., Orth, M. and Ishii, H.: Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography, in *CHI '98*, 1998, pp. 49–56.
- [8] Gupta, A., Fox, D., Curless, B. and Cohen, M.: DuploTrack: A Real-time System for Authoring and Guiding Duplo Block Assembly, in *UIST '12*, 2012, pp. 389–402.
- [9] Ishii H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces Between People, Bits and Atoms, in *CHI '97*, 1997, pp. 234–241.
- [10] LEGO Mindstorms, <http://mindstorms.lego.com/>. [Online; accessed 4-January-2017].
- [11] Lego X turns toy building blocks into a digital modelling kit for designers, <http://www.dezeen.com/2015/01/28/lego-x-gravity-digital-modelling-kit/>. [Online; accessed 4-January-2017].
- [12] LittleBits, <http://jp.littlebits.com/>. [Online; accessed 4-January-2017].
- [13] Miller, A., White, B., Charbonneau, E., Kanzler, Z. and LaViola, J. J., Jr.: Interactive 3D Model Acquisition and Tracking of Building Block Structures, *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 18, No. 4 (2012), pp. 651–659.
- [14] Mueller, S., Mohr, T., Guenther, K., Frohnhofen, J. and Baudisch, P.: faBrickation: Fast 3D Printing of Functional Objects by Integrating Construction Kit Building Blocks, in *CHI '14*, 2014, pp. 3827–3834, .
- [15] Sato, M., Poupayev, I. and Harrison, C.: Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects, in *CHI '12*, 2012, pp. 483–492.
- [16] Grove System, <http://www.seedstudio.com/wiki/Grove.System>. [Online; accessed 4-January-2017].
- [17] Ullmer, B. and Ishii, H.: Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces, *IBM Systems Journal*, Vol. 39, No. 3-4 (2000), pp. 915–931.
- [18] Vázquez, M., Brockmeyer, E., Desai, R., Harrison, C. and Hudson, S. E.: 3D Printing Pneumatic Device Controls with Variable Activation Force Capabilities, in *CHI '15*, 2015, pp. 1295–1304.
- [19] Watanabe, R., Itoh, Y., Asai, M., Kitamura, Y., Kishino, F. and Kikuchi, H.: The Soul of ActiveCube: Implementing a Flexible, Multimodal, Three-dimensional Spatial Tangible Interface, in *ACE '04*, 2004, pp. 173–180.
- [20] Weichel, C., Hardy, J., Alexander, J. and Gellersen, H.: ReForm: Integrating Physical and Digital Design Through Bidirectional Fabrication, in *UIST '15*, 2015, pp. 93–102.
- [21] Yoshida, A., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Capacitive Blocks: A Block System That Connects the Physical with the Virtual Using Changes of Capacitance, in *UIST '15 Adjunct*, 2015, pp. 85–86.
- [22] 椎尾一郎, 橋本菜摘: StudI/O: 立体への投影を利用したトイブロック組み立て支援, *WISS2014*, 2014, pp. 37–42.
- [23] 矢敷貴之, 秋田純一: 電力重量通信機能を持つブロック型デバイスとその実装, *インタラクシオン 2014*, 2014, pp. 412–415.
- [24] 中島康祐, 伊藤雄一, ジモン フェルカー, クリスチャン トーレセン, シェルオーバーゴード, ヤン ボルヒヤース: PUCs: 静電容量方式マルチタッチパネルにおけるユーザの接触を必要としないウィジェット検出手法, *情報処理学会論文誌*, Vol. 56, No. 1 (2015), pp. 329–337.
- [25] 永井淳之介, 沼野剛志, 東孝文, M. Tessier, 宮田一乗: TSUMIKI CASTLE - 積み木を用いたインタラクティブな VR システム, *芸術科学会論文誌*, Vol. 13,

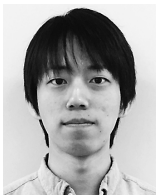
No. 1 (2014), pp. 67–75.

- [26] 大野誠, 志築文太郎, 田中二郎: ブロック玩具に対する能動的音響計測を用いたプロトタイピング, インタラクシオン 2015, 2015, pp. 960–963.
- [27] 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, 2015, pp. 598–601.
- [28] 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, WISS2015, 2015, pp. 1–6.
- [29] 李鎮河, 笈康明, 苗村健: Bloxels: 発光ブロック群による実体ボクセルディスプレイ: 積層によるブロック間の情報伝達 (人工現実感, 及び一般), ITE Technical Report, Vol. 33, No. 21 (2009), pp. 31–36.



吉田有花

2013年明治大学理工学部情報科学科卒業。2016年筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程修了。修士(工学)。同年、(株)富士通研究所入社。IoTシステムの研究開発に従事。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。2011年度IPA未踏クリエータ。ACM, 情報処理学会各会員。



鶴田真也

2015年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。同大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在学中。2012年度IPA未踏クリエータ。2017年度学振DC1採用内定。ヒューマンコンピュータインタラクシオン分野に興味を持つ。産業技術総合研究所人間情報研究部門システム脳科学研究グループテクニカルスタッフ。株式会社jiseCHIチーフデザイナー, チーフエンジニア。情報処理学会, 日本神経回路学会各会員。



池川航史

2015年福井工業高等専門学校電子情報工学科卒。現在、筑波大学情報学群情報メディア創成学類在学中。ヒューマンインタフェースに関する研究に

興味を持つ。ACM, 情報処理学会各会員。



阿部哲也

2015年筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒。同大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在学中。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。ACM, 情報処理学会各会員。



志築文太郎

1994年東京工業大学理学部情報学科卒業。2000年同大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻博士課程単位取得退学。博士(理学)。現在、筑波大学大学院システム情報系准教授。ヒューマンインタフェースに関する研究に興味を持つ。日本ソフトウェア科学会, ACM, IEEE Computer Society, 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。



田中二郎

1975年東京大学理学部卒業。1977年同大学大学院理学系研究科修士課程修了。1984年米国ユタ大学大学院計算機科学科博士課程修了。ユタ大学では関数型プログラミング言語の並列実装に関する研究に従事。Ph.D. in Computer Science。1985年から1988年に(財)新世代コンピュータ技術開発機構にて並列論理型プログラミング言語の研究開発に従事。1993年から2016年まで筑波大学に勤務。2016年から早稲田大学情報生産システム研究科教授。ヒューマンインタフェース全般, プログラミング言語の設計や実装, 未来の情報環境の構築に興味を持つ。ACM, IEEE, 情報処理学会, 電子情報通信学会各会員。