

Capacitive Blocks: 静電容量に基づくブロックシステム

吉田 有花* 志築 文太郎† 田中 二郎†

概要. 我々は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 (Capacitive Block) 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 プリンタで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埋め込ま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. 本稿においては, Capacitive Block のプロトタイプと, 静電容量に基づくブロックの計数方法, 積み重ねられたブロックの静電容量の計測実験を示す.

1 はじめに

積み木やアイロンビーズ, 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, 「手を使って実物体を組み合わせる」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 [14] と呼ばれる実物体を操作対象とするインタフェースがある. その中でも, ブロック同士を接続し, 3D モデルを構築できるブロック型 UI の研究がある.

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, 16, 2, 6] か, カメラやセンサを使う方法 [4, 7, 10, 21] 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.

これらに対して我々は静電容量に基づくブロックスタッキングシステム (Capacitive Blocks) を開発した [17]. このシステムの個々のブロック (Capacitive Block) 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 プリンタで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埋め込ま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.

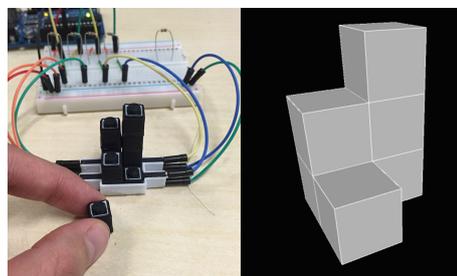


図 1. Capacitive Blocks のプロトタイプ: (左) 概観. (右) プロトタイプの表示アプリケーション. 積み重ねられたブロックの 3D モデルを表示する.

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. その中の方法として, 電子デバイスを組み込む方法を採用した研究と, 外部カメラやセンサを用いる研究が存在する. また, 静電容量に基づくマーカ認識に関する研究や, 3D プリンタ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, およびその他の関連研究についても述べる.

2.1 電子デバイスを組み込む方法を採用した研究

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基盤が内蔵されている. 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 [16] 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

Copyright is held by the author(s).

* 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

† 筑波大学 システム情報系

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 [6] 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 外部カメラやセンサを用いる研究

カメラを利用する研究として、Baudischらが作成したLumino [4] は、グ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 [10]。GuptaらのDuploTrack [7] は、深度カメラを用いてDuploBlockを組み立てるプロセスを推測し、追跡するリアルタイムシステムを提示している。この手法を用いることにより、組み立て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TSUMIKI CASTLE [21] は、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ブロックである。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らの作成した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、ブロックの導体パターンにより、積み重ねたことが認識可能である。しかし、ユーザがタッチしている状態でなければ反応せず、触れられていないブロックは認識しない。中島らのPUCs [20] は、ユーザが触れていない間でも静電容量式マルチ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プリンタを用いたファブリケーション

Vazquezら [15] は3Dプリンタで空気圧を変化可能な物体を印刷し、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 [11] は3Dプリンタ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。本研究も同様に、3Dプリンタを利用して簡易に作成したデバイスを用い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

電子デバイスを含むブロックの製品として、LEGO Mindstorms [8] は、専用のブロックを組み立てることによってロボットを作成できる。LittleBits [9]、Grove System [13] は、電子部品が搭載されている専用の基盤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、我々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Bloxxels [24] 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で各ブロックが発光し、ブロック全体として一つのディスプレイを形成している。矢敷ら [19] 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、小型化が容易になる。熊谷らが作成したLEGOrics [23] 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、ブロック内部に小さなマイコンを埋め込み、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 [18]。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 [22]。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、デザイン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。例えばSatoらのTouché [12] 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。

3 Capacitive Blocks

Capacitive Blocksは、個々のブロック (Capacitive Block) 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スタッキングシステムである。本システム (図 2) は、Capacitive Block (図 3)、接続部 (図 4)、静電容量認識部、表示アプリケーションの4つから構成される。

3.1 Capacitive Block

Capacitive Blockは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である。個々のブロックはその上下に導通部分を有し、この導通部分を

Capacitive Blocks: 静電容量に基づくブロックシステム

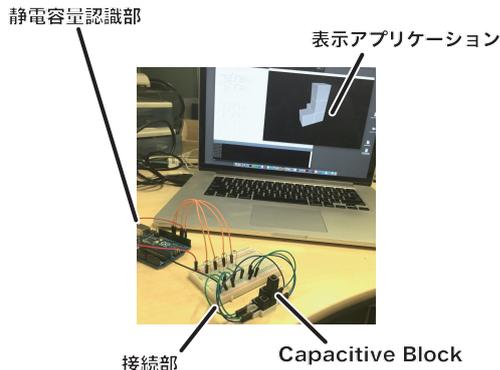


図 2. Capacitive Blocks

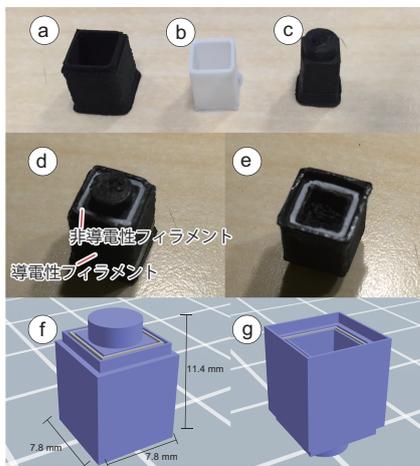


図 3. Capacitive Block

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。また、このように作られたブロックは3Dプリンタで印刷することが可能である。Capacitive Blockとして我々はまず、 1×1 LEGOブロックの形状をベースに、 $7.8 \times 7.8 \times 11.4$ mmのブロック(図3f, 3g)を作成した。このブロックは、3つのパーツ(図3a-3c)から構成されており、ブロックの外側と中心のパーツ(図3a, 3c)は、導電性PLAフィラメント(Proto-Plant Inc.製)、その間のパーツ(図3b)は非導電性PLAフィラメントから作られる。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 接続部

ブロックと静電容量認識部との接続部(図4)として、 1×1 および 2×2 のプロトタイプを作成した。両者ともジャンパ線以外は3Dプリンタで印刷されている。前者は1つの、後者は4つのコネクタを有する。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認識部に接続されるように設計されている。



図 4. 1×1 および 2×2 の接続部のプロトタイプ

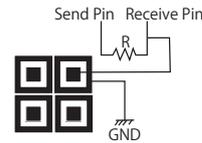


図 5. 2×2 の接続部と回路図

3.3 静電容量認識部

静電容量認識部ではブロックの計数を行うために、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]をひとつずつ接続した(図5)。なお、現実装ではRとして $1 \text{ M}\Omega$ の抵抗を用いている。またこの静電容量認識部の実装には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1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

3節のCapacitive Blockと接続部を利用し、ブロックの静電容量の計測実験を行った。

4.1 静電容量に基づくブロックの計数

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。まず我々が設計し、3Dプリンタを使って印刷したブロックは、図3dおよび図3e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ブロックは並列にコンデンサを形成する。このコンデンサの静電容量 C は、コネクタの静電容量が C_c 、ひとつのブロックの静電容量が C_b であるため、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 を計測すれば n を求めること、すなわちコネクタに重ねられたブロックの計数を行うことが可能となる。

表 1. ブロックの静電容量

		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

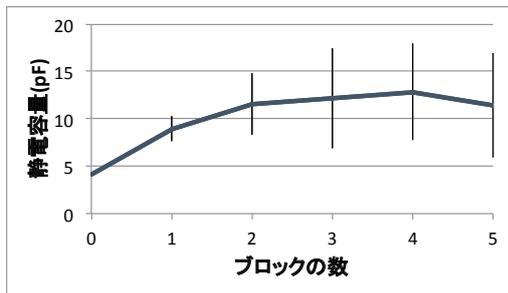


図 6. ブロックの静電容量の平均値

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

4章に示した計数方法を試すために、3章の Capacitive Block と接続部を利用し、ブロックの静電容量の計測実験を行った。

5.1 静電容量の計測実験

1 × 1 の接続部に 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 6 に示す。

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 6 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、誤認識が生じやすいということが示された。



図 7. (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	7.1	24.3	34.5	48.5	71.8	81.2
	2	7.2	24.3	40.7	57.2	73.4	89.7
	3	7.1	24.3	41.7	58.5	73.9	88.3
	4	7.1	24.7	41.2	57.5	67.2	83.8
	5	7.3	24.8	40.7	55.6	69.2	77.0
	6	7.1	24.4	41.1	56.4	67.0	70.5
	7	7.1	23.6	37.3	46.0	60.4	80.5
	8	7.1	24.3	40.6	54.8	65.1	76.4
	9	7.1	24.6	41.7	57.7	70.3	90.7
	10	7.1	24.7	41.5	57.2	72.3	87.3

5.2 ブロックの再設計と静電容量の計測

5.1 節に示したブロックは誤認識を生じやすかったため、個々のブロックの静電容量を大きくすることによって誤認識を減らす試みを行った。個々のブロックの静電容量を大きくするために、幅・奥行き・高さを 2 倍にしたブロックを作成した。図 7 に、作成した 15.6 × 15.6 × 22.8 mm 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、接続部にブロックを 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。計測に際しては、ブロックを積み重ねてから 1-30 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 2 に、静電容量の平均値を図 8 に示す。

図 8 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 (標準偏差は、ブロックが 3 個の時 $\sigma = 4.23$ 、ブロックが 5 個の時 $\sigma = 6.62$)。しかし、積み重ねるブロックが多いほど、静電容量が安定するまでに時間がかかり (1-30 秒)、リアルタイムでの計測は困難であった。また、PLA 樹脂で作成されたブロックは素材が柔らかいため、何度も積み重ねを繰り返すとブロックの劣化が起り、接続が悪くなった。

ブロックを横に置いた場合の計測

本システムを使用する際に、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確かめた。この計測には、図 7 右のブロックを使用した。まず 2 × 2 の接続部の左上もしくは左下のコネクタに LCR メー

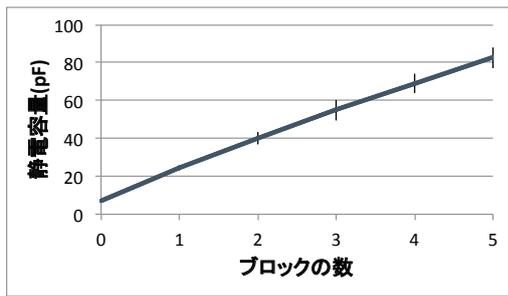


図 8. 再設計したブロックの静電容量の平均値

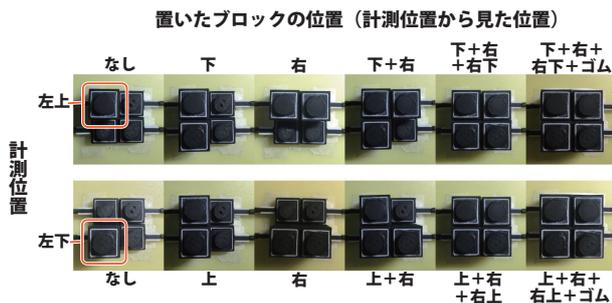


図 9. ブロックを横に置いた場合の置き方

タをつなぎ、他の3箇所のコネクタを Arduino につなげた。計測対象のブロックの横2ヶ所と斜め1ヶ所(図9)、およびゴムを用いて4つのブロックを囲い、ブロック同士の間隙を小さくした状態(図10)の、6試行×2ヶ所の計測を行った。結果を表3に示す。表3から、1ブロックの場合、最大で1.6 pFの違いのみであった。1ブロックが持つ静電容量が19 pF前後であることから、使用されるブロックの数が少ない場合には計数に影響はないと考えられる。

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	24.4	0
	下	24.8	+0.4
	右	26.0	+1.6
	下+右	25.9	+1.5
	下+右+右下	25.1	+0.7
	下+右+右下+ゴム	25.9	+1.5
左下	なし	26.0	0
	上	25.7	-0.3
	右	25.5	-0.5
	上+右	25.5	-0.5
	上+右+右上	25.3	-0.7
	上+右+右上+ゴム	26.2	+0.2

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7右のブロックを使用して



図 10. 4つのブロックをゴムで囲った様子

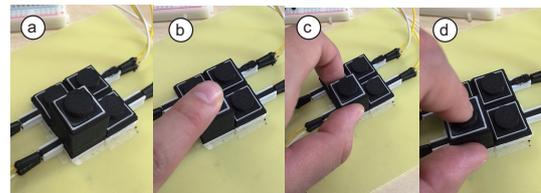


図 11. ブロックを手で触った場合の計測

いる。

結果として静電容量は、図11aの時には25.8 pF、図11bのように内側を触ると40 pFだった。また、図11cのように外側を触ると、28.3 pF、図11dのように内側と外側を触ると約500 pFだった。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

本稿では、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スタッキングシステムであるCapacitive Blocksを示した。

実験結果より、1×1 LEGOブロックと同じ大きさで作成したCapacitive Block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ブロックの2倍の大きさのブロックを作成したところ、静電容量が積み重ねられたブロックの数に応じた線形増加が観測されたため、静電容量に基づきブロックの計数を行える可能性が示された。

7 今後の課題と展望

現状のCapacitive Blockには、静電容量に誤差を生じる、という問題がある。また、今回PLA樹脂にて印刷したブロックには、PLA樹脂が脆いため、摩擦が激しいという物理的な問題がある。これにともない、ブロックを積み重ねると誤差が生じる、ブロック同士がしっかり接続されなくなり静電容量の計測精度が落ちる、という問題も生じている。したがって、今後は精度向上のためにブロック同士の接続が安定するようにブロックの再設計を行う。具体的には、PLA樹脂より強度が高いABS樹脂の導電性フィラメントを用いたブロックの作成を計画し

ている。また、これらの物理的な課題の解決が終わり次第、大規模な接続部、例えば 8×8 (現在の接続部は 2×2) 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いく。



図 12. Capacitive Block の他の形状の例

また、今後は図 12 に示すビーズのような他の形状のブロックを作成することを考えている。さらに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数の計数以外にも、触り方の認識などの応用が期待されるため、今後はこれらの実装と評価を行う計画である。

参考文献

- [1] D. Anderson, J. L. Frankel, J. Marks, A. Agarwala, P. Beardsley, J. Hodgins, D. Leigh, K. Ryall, E. Sullivan, and J. S. Yedidia. Tangible Interaction + Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling. In *SIGGRAPH '00*, pp. 393–402, 2000.
- [2] M. Ando, Y. Itoh, T. Hosoi, K. Takashima, K. Nakajima, and Y. Kitamura. StackBlock: Block-shaped Interface for Flexible Stacking. In *UIST'14 Adjunct*, pp. 41–42, 2014.
- [3] Capacitive Sensing Library. <http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor?from=Main.CapSense>. [Online; accessed 28-August-2015].
- [4] P. Baudisch, T. Becker, and F. Rudeck. Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers Based on Glass Fiber Bundles. In *CHI '10*, pp. 1165–1174, 2010.
- [5] L. Chan, S. Müller, A. Roudaut, and P. Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: Sensing Stacks of Building Blocks, Dials and Sliders on Capacitive Touch Screens. In *CHI '12*, pp. 2189–2192, 2012.
- [6] M. G. Gorbet, M. Orth, and H. Ishii. Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography. In *CHI '98*, pp. 49–56, 1998.
- [7] A. Gupta, D. Fox, B. Curless, and M. Cohen. DuploTrack: A Real-time System for Authoring and Guiding Duplo Block Assembly. In *UIST '12*, pp. 389–402, 2012.
- [8] LEGO Mindstorms. <http://mindstorms.lego.com/>. [Online; accessed 28-August-2015].
- [9] LittleBits. <http://jp.littlebits.com/>. [Online; accessed 28-August-2015].
- [10] A. Miller, B. White, E. Charbonneau, Z. Kanzler, and J. LaViola. Interactive 3D Model Acquisition and Tracking of Building Block Structures. *IEEE TVCG*, 18(4):651–659, 2012.
- [11] S. Mueller, T. Mohr, K. Guenther, J. Frohnhofen, and P. Baudisch. faBrickation: Fast 3D Printing of Functional Objects by Integrating Construction Kit Building Blocks. In *CHI '14*, pp. 3827–3834, 2014.
- [12] M. Sato, I. Poupyrev, and C. Harrison. Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects. *CHI '12*, pp. 483–492, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [13] Grove System. http://www.seeedstudio.com/wiki/Grove_System. [Online; accessed 28-August-2015].
- [14] B. Ullmer and H. Ishii. Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces. *IBM Syst. J.*, 39(3-4):915–931, 2000.
- [15] M. Vázquez, E. Brockmeyer, R. Desai, C. Harrison, and S. E. Hudson. 3D Printing Pneumatic Device Controls with Variable Activation Force Capabilities. In *CHI '15*, pp. 1295–1304, 2015.
- [16] R. Watanabe, Y. Itoh, M. Asai, Y. Kitamura, F. Kishino, and H. Kikuchi. The Soul of Active-Cube: Implementing a Flexible, Multimodal, Three-dimensional Spatial Tangible Interface. In *ACE '04*, pp. 173–180, 2004.
- [17] A. Yoshida, B. Shizuki, and J. Tanaka. CapacitiveBlocks: A Block System that Connects the Physical with the Virtual using Changes of Capacitance. In *UIST'15 Adjunct*, 2 pages, 2015.
- [18] 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. In *WISS2014*, 2014.
- [19] 矢敷 貴之, 秋田 純一. 電力重畳数心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*, pp. 412–415, 2014.
- [20] 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 ボルヒャース. 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*, 56(1):329–337, 2015.
- [21] 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*, 13(1):67–75, 2014.
- [22] 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プピンク. *インタラクシオン 2015*, pp. 960–963, 2015.
- [23] 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.
- [24] 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*, 33(21):31–36, 2009.