# モジュラー型パルス遅延回路に基づく 3D モデリングのためのインタラクティブブロック

# 齋藤 圭汰 \*† 志築 文太郎 ‡ 川口 一画 ‡ 高橋 伸 ‡

概要. ユーザが現実のブロックを用いて 3D モデリングを行うための,モジュラー型パルス遅延回路に基 づくインタラクティブなブロックシステムを開発した.本システムにおけるブロックは,パルスを遅延させ て出力する安価なアナログ回路(モジュラー型パルス遅延回路)を内蔵する.積み重ねられたブロックは, 底面におけるパルスの印加をトリガとして,最下段から順番にパルスを出力する.本システムは,パルスの 出力時間に基づきブロックの段数を識別する.また,測定される電圧値に基づき,ブロックの種類を識別す る.本システムを用いて,8種類のブロックを用いた30段の積み重ねを識別できることを確認した.本シス テムにおいて,1段であれば100種類,20段であれば25種類のブロックの識別が可能となる見込みである.



図 1. 開発したインタラクティブなブロックシステム. 積み重ねたブロックの位置および種類を識別する.

# 1 はじめに

ユーザが現実のブロックを用いて 3D モデリング を行うための,インタラクティブなブロックシステ ムの研究がなされてきた.ブロックシステムはユー ザが組み合わせたブロックの構造(以降,ブロック 構造)を識別することにより,ブロック構造を 3D モ デルへ変換する.ブロックシステムは,コンピュー タ上の操作対象と現実世界のブロックを一対一に対 応させることができるため,操作対象の位置および 形状をユーザが識別しやすいという特徴を持つ.

これまで,ブロックシステムとして,大きく分け て,電子回路を用いるシステム [3,4,7,8,10,11,13, 16,17],カメラを用いるシステム [9,15],マーカを 用いるシステム [5,6],電磁気的特性を用いるシス テム [12,14,18]が開発されてきた.ただし,ブロッ クシステムの開発において,安価なブロックを用い て構造全体および複数種類のブロックを識別するこ とは課題であった.例えば,カメラを用いる手法に おいては、市販の安価なブロックをそのまま用いる ことが可能であるものの、オクルージョンによりカ メラに映らない位置にあるブロックを識別すること が難しい.また、ブロック同士の通信が可能な電子 回路を内蔵する手法ではブロック構造をなす個々の ブロックを識別可能であるものの、ブロックの作製 コストが高い.

WISS 2020

我々はモジュラー型のパルス遅延回路に基づく, インタラクティブなブロックシステムを開発した (図 1).開発したブロックシステムにおけるブロッ クは,安価なアナログ回路のみを内蔵する.これに より,ブロックの作製コストを抑える.また,積み重 ねられたブロックの底面において測定される電圧を 用いて,ブロックの積み重ね段数,種類および積み 重ね順を識別できるため,ブロック構造をなす個々 のブロックを識別できる.

## 2 関連研究

ブロックシステムとして,電子回路を用いるシス テム,カメラを用いるシステム,マーカを用いるシ ステムおよび電磁気的特性を用いるシステムが研究 されてきた.これらと本研究との差分を述べる.

#### 2.1 電子回路を用いるシステム

ブロックに内蔵したマイクロコントローラ, 距離セ ンサ, およびジャイロセンサ等の電子回路を用いて, ブロック構造識別を行うシステムが開発されてきた. Gorbet ら [8], Anderson ら [3], および Watanabe ら [17] は, ブロックにマイクロコントローラを内蔵 し, ブロック同士を通信させることによりブロック 構造を識別するシステムを開発した. Ando ら [4] および Hosoi ら [10] は, コネクタのないブロック を用いて, 積み重ねられたブロックの位置および角 度を推定するシステムを開発した. Glauser ら [7],

Copyright is held by the author(s).

<sup>\*</sup> 筑波大学コンピュータサイエンス専攻

 $<sup>^{\</sup>dagger}$  ksaito@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

<sup>‡</sup> 筑波大学システム情報系

Wangら [16] および Leen ら [13] は,センサおよび 変形できるパーツを持つブロックを用いて,ブロック 同士の接続だけでなく,ブロックの曲げ伸ばしを計 測するシステムを開発した.これらの手法において, 各ブロックには通信が可能なマイクロコントローラ が内蔵されているため,ブロックの作製コストは高 い.一方,センサを搭載することにより,ブロック へのタッチおよび傾ける操作などを入力として利用 できる.

RFIBricks [11] は、RFID タグを使用して、ブ ロック構造を識別するシステムである. RFID タグ には、個別の ID を割り振ることができるため、こ のシステムでは多くの種類のブロックを識別できる. また、RFID タグを用いるため、ブロックの製造コ ストは低い.一方、RFID タグの通信距離の制限に より、9 段以上の積み重ねを識別できないことが示 されている.

我々のブロックシステムもこれらのシステムと同 様にブロックに電子回路を内蔵する.ただし,内蔵 される回路は、マイクロコントローラや RFID など の通信を行う部分を含まず、替わりにパルスを遅延 させて出力するアナログ回路のみから成る.このた め、ブロックの作製コストを抑えられ、かつ、理論 上では識別可能なブロックの個数に制限がないとい う特徴を持つ.

#### 2.2 カメラを用いるシステム

ブロック構造を識別するために,カメラ画像を使 用するシステムが開発されてきた. Miller ら [15] の システムおよび DuploTrack [9] は深度カメラによっ て取得した画像を用いてブロック構造を識別する. カメラ画像を使用するため,ブロックとして市販の 安価なものを使える.一方,オクルージョンにより, カメラに映らない位置にある個々のブロックを識別 できない.

我々のブロックシステムは、これらのシステムと 異なり、ブロックに電子回路を内蔵する.これによ り、ブロック構造をなす個々のブロックを識別する.

#### 2.3 マーカを用いるシステム

マーカを用いてブロック構造を識別するシステム が開発されてきた. Lumino [5] はグラスファイバ によって構成されたブロックおよびマーカを用いる ことにより,ブロック構造を識別する. CapStones and ZebraWidgets [6] は静電容量性マーカによって タッチパネル上に発生するタッチポイントの形状を 用いることにより,ブロック構造を識別する. これ らのシステムでは,積み重ねられたブロックの底面 に現れる形状(すなわち,各ブロックが持つマーカ を足し合わせた形状)を用いることにより,ブロッ クの段数を識別する. そのため,ブロックの底面の 大きさによって,識別可能な段数が制限される.



図 2. 複数接続されたモジュラー式パルス遅延回路 およびパルスの印加に対する出力パルスの時間変化.

我々のブロックシステムでは、ブロックを測定電 極に接続する必要があるため、ブロックを置ける位 置は測定電極の位置に制約される.一方、理論上ブ ロックの積み重ね段数に制限がない.

#### 2.4 電磁気的特性を用いるシステム

電磁気的特性を持つブロックのブロック構造を識 別するシステムが開発されてきた. Yoshidaら [18], Liangら [14],および Ikegawaら [12] は,静電容量 または磁気を持つブロックを用いて,ブロック構造 を識別するシステムを開発した. これらのシステム はブロック構造をなす個々のブロックを識別可能で あり,かつ,ブロックを安価に作製可能である.一 方,識別可能なブロックは1種類のみである.

我々のブロックシステムは、これらのシステムと 異なり、複数種類のブロックを識別できる.

#### 3 識別原理

我々のブロックシステムは積み重ねられたブロッ クの底面において測定される電圧を識別に用いる. 種類を伴うブロックの並び順に電圧値を対応させる 場合,少なくとも種類の段数乗の分解能が測定器に 必要となるため,多段多種の識別は難しい.一方, ブロックを1つずつ順番に測定できれば,測定時間 に基づき段数を識別し,電圧に基づき種類を識別で きるため,測定器に種類数を識別できる分解能があ ればよい.この回路を実現するために,我々はパル ス遅延回路を使用したブロック構造識別回路(以降, モジュラー型パルス遅延回路)を設計した.また, 抵抗を用いて,種類を識別できるようにした.本節 ではこれらの回路の動作原理,および,この回路を 用いたブロック構造の識別原理を述べる.

# 3.1 モジュラー型パルス遅延回路

モジュラー型パルス遅延回路はCR回路およびシュ ミットトリガインバータによって構成される(図 2 ブロック 0). モジュラー型パルス遅延回路の入力 端子 V<sub>in</sub> の電圧が 0V から HIGH(今回の実装に おいては5V)に切り替わることにより,出力端子 V<sub>out</sub> の電圧が HIGH から 0V へと切り替わる.ま た,出力の切り替わり後に一定時間(今回の実装に おいては 0.1 ms)経つとコンデンサの充電が終わり, シュミットトリガインバータへの入力電圧が下がる ため,V<sub>out</sub> の電圧が 0V から HIGH に戻る.モジュ ラー型パルス遅延回路を複数個接続すると,各回路 が 1 回ずつ順番に 0V のパルスを出力することにな る(図 2).

我々のシステムにおける各ブロックは、モジュラー 型パルス遅延回路を内蔵する(図2).積み重ねら れたブロックは、底面におけるパルスの印加をトリ ガとして、最下段から順にパルスを出力する.我々 のシステムは、パルスが出力されている時間の測定 により、積み重ねられたブロックの段数を識別する.

#### 3.2 種類識別

我々のブロックシステムは、図 2の $R_{ref}$ における 電圧降下 $V_{R_{ref}}$ を測定し、測定結果に基づきブロッ クの種類を識別する.識別には、個々のブロックに 内蔵される種類識別抵抗 $R_n$ が変わると、これに応 じて $V_{R_{ref}}$ が変わることを利用する. $V_{R_{ref}}$ は、電 源電圧 $V_{CC}$ 、ダイオードの順方向電圧 $V_{diode}$ 、基準 抵抗 $R_{ref}$ および $R_n$ を用いて、次式で表される.

$$V_{R_{ref}} = \frac{R_{ref}}{R_{ref} + R_n} \times (V_{CC} - V_{diode}) \qquad (1)$$

なお,任意の異なる2種類の種類識別抵抗 $R_n$ に よる $V_{R_{ref}}$ の差は,測定器の分解能以上でなければ ならない.そこで,我々は任意の2種類のブロック における $V_{R_{ref}}$ の差が一定かつ分解能以上となるよ うに $R_n$ を選択した.また,種類識別に使用できる 電圧は $V_{CC} - V_{diode}$ であり,その電圧を最大限使用 できるようにした.以下に $R_n$ の選択式を示す.

$$V_{R_{ref}R_n} = V_{CC} - V_{diode} \quad (2)$$

$$dV = \frac{V_{R_{ref}R_n}}{N} > V_{res} \quad (3)$$

$$R_n = V_{R_{ref}R_n} \frac{R_{ref}}{(V_{R_{ref}R_n} - n \times dV)} - R_{ref} \quad (4)$$

ここで,V<sub>Rref Rn</sub> は R<sub>ref</sub> および R<sub>n</sub> における電圧降 下の和,N は識別したい種類数,V<sub>res</sub> は測定器の分



図 3. 作製したブロック. 左:上面,右:底面.



図 4. ブロックに内蔵する部品.

解能, *dV* は任意の 2 種類のブロックにおける *V<sub>ref</sub>* の差を表す. また, *n* はブロックの種類を表す 0 以 上の整数である.

# 4 実装

我々のシステムは、モジュラー型パルス遅延回路 を内蔵したブロックおよびパルス測定ハードウェア から成る.また、作製したハードウェアを用いて 3D モデリングを行えるようにするアプリケーションを 作製した.

#### 4.1 ブロック

モジュラー型パルス遅延回路を内蔵したブロック (図 3) を 30 個作製した. ブロックは, 回路を入れ るための箱、ブロックの上面および底面に取り付け るマグネット式電極(図4左および中央),およびモ ジュラー型パルス遅延回路(図4右)によって構成 される.マグネット式電極は USB ケーブル (Oraf, Rotating Magnetic Data Cable) に用いられてい るものである.また,モジュラー型パルス遅延回路 において使用される素子は、コンデンサ(100 pF, エラー率5%),抵抗器(1MΩ,エラー率1%およ び種類識別用抵抗エラー率1%),シュミットトリガ インバータ(TOSHIBA, TC4584BP, 6回路入り, 1回路のみ使用)である.これらの素子を使用した 際にブロックから出力されるパルスの幅は約 0.1 ms であった.また,現在回路に使用している素子の価 格の合計は 43 円である.なお,表面実装用の素子 (シュミットトリガインバータ:74AHC1G14GW (Nexperia), ダイオード: M4A (HY Electronic Corp), MLCC: 100 pF (Murata), SMD レジス



図 5. パルス測定ハードウェア.

タ:1 MΩ および種類識別用(RS PRO))を用いた 場合は, 5 円 [1] である.

今回の実装では、式 2–4 に基づき、異なる 8 種 類の抵抗を内蔵する 8 色のブロックを作製した.ま ず、式 2–4 における変数にはそれぞれ、 $V_{CC} = 5$  V、  $V_{diode} = 0.6$  V、N = 8、 $R_{ref} = 10$  kΩ を代入 した.次に、n=0-7 とした計算結果に近い抵抗を E24 系列の抵抗から選択した.結果として、黒色に は  $R_0 = 0$  Ω、緑色には  $R_1 = 1.5$  kΩ、オレンジ色 には  $R_2 = 3.3$  kΩ、青色には  $R_3 = 6.2$  kΩ、ピンク 色には  $R_4 = 10$  kΩ、赤色には  $R_5 = 16$  kΩ、黄色 には  $R_6 = 30$  kΩ、白色には  $R_7 = 68$  kΩ を取り付 けた.

# 4.2 パルス測定ハードウェア

パルス測定ハードウェアは、電圧測定器およびパ ルスジェネレータとしての多機能測定器 (Digilent, Analog Discovery 2), 5V 電源およびマルチプレ クサのコントローラとしてのマイクロコントローラ (Arduino Srl, Arduino UNO Rev3), マルチプレ クサ(SparkFun,CD74HC4067)および 16 個の リードリレー (FUJITSU SEMICONDUCTOR, FRL-644D05 / 1AS 5V) から成る(図 5).また, 20 個以上のブロックを使用する場合において、Arduino 電源の定格電流(200 mA)以上の電流を必要 とするため、直流安定化電源(KIKUSUI, PMC18-3) (図 5右)を使用した. なお, マルチプレクサは, 測定したいブロック列に接続されたリードリレーを オンにする.マルチプレクサを介して電圧を印加す ると抵抗(約70Ω)の影響を受けて印加電圧が減衰 するため、接点接触抵抗が150mΩであるリードリ レーを使用した. その後, パルスジェネレータから ブロック列には、パルス幅 0.5 ms の矩形パルスを 印加する.システムは、サンプリング周波数2MHz において電圧測定器を使用して, R<sub>ref</sub> に加わる電 圧を測定する. 電圧測定器は 8000 個の測定電圧を バッファリングして PC に送信する.



図 6. 3D モデリングアプリケーションを用いて作製し た作品(左:キリン,中央:花,右:タワー).キ リンおよび花において黒色のブロックは透明なブ ロックとして扱った.

# 4.3 3D モデリングアプリケーション

作製したハードウェアを用いて 3D モデリングを 行えるようにするアプリケーションを作製した. この アプリケーションは、プログラム言語として Python 3.7.6, 描画ライブラリとして OpenGL 4.6.0 を用 いて作製された. アプリケーションは電圧測定器か ら送信された測定電圧が閾値(今回は 0.4 V)以上 となる時間を用いてブロックの段数を識別する. ま た,各ブロックにおける電圧値と閾値を比較するこ とによりブロックの種類を識別する. このため、全 種類のブロックの電圧を予め測定し、その電圧を基 準として± 0.2 V を閾値とした. ハードウェア 16 箇 所のブロック列を測定し、アプリケーションが画面 を更新するまでの時間は、0.3 s である.

アプリケーションを用いて3つの作品を作製した (図 6).キリン(図 6 左)には,20 個,花(図 6 中央)には15 個,タワー(図 6 右)には30 個のブ ロックを使用した.キリンおよび花において黒色の ブロックを透明に描画した.今後,アプリケーション と現実のブロックの見た目を揃えるために,透明を 意味するブロックを透明の素材を用いて作製する予 定である.なお,タワーの作製により,システムが 30 段のブロックを識別できることを確認した(図 6 右).

#### 5 性能評価

作製したブロックおよびパルス測定ハードウェア の性能を評価するための実験を行った.これらの実 験において,電源には Arduino UNOの5V電源で はなく,安定した電源を確保するために,直流安定 化電源(KIKUSUI, PMC18-3)を使用した.

# 5.1 種類数

測定実験のために,式2-4に基づき,種類識別抵抗を作製した.種類識別抵抗には,誤差率1%のE24系の抵抗を1個または2個使用した.また,作製した種類識別抵抗の値は,計算結果から最大1%の差



図 7. 100 種類(n=0-99)のブロックを 1 段積んだ際 に測定される電圧.



図 8. 20 段積んだブロックの各位置において測定され る電圧.

がある.そのため、計算結果からの差、および抵抗 の持つ誤差を考慮すると、最大 2%の差が発生する. 2%の誤差によって発生する  $R_{ref}$ における電圧降下 の差をシミュレータを用いて計算した結果、最大士 0.022 V となった.つまり、 $0.022 \times 2 = 0.044$  V刻み において  $R_{ref}$ における電圧降下が変化するように、 種類識別抵抗を選択すれば、測定される電圧に重複 がない.そこで、0.044 V刻みにおいて電圧降下が変 化するように、式 2–4 における変数を、 $V_{CC} = 5$  V、  $V_{diode} = 0.6$  V、N = 100、 $R_{ref} = 10$  kΩ、n = 0– 99 とし、100 種類の抵抗を作製した.

作製した抵抗を1つのブロックに取り付け,測定 ハードウェアを用いて R<sub>ref</sub> における電圧降下を測定 した(図7).図7において青が実測値,オレンジが シミュレーション値(LTSpice XVII)である.実測 値における種類間の最小の電圧の差は,0.032 V,最 大の電圧の差は0.055 V であった.つまり,理論値 の0.044 Vを基準として,-0.012 V および+0.011 V の差があった.この結果は,素子の誤差による差の 範囲内であった.一方,実測値とシミュレーション の差は抵抗値の増加に伴って大きくなり,最大の差 は0.049 V であった.この結果は,素子の誤差によ る差より大きい.この原因として,測定器の誤差, およびシミュレーションにおいて入出力インピーダ ンスを考慮していないことなどが考えられる.

#### 5.2 段数

ブロックを20段積み、ブロック底面の $V_{in}$ 端子に パルスを印加した.その後、各位置(1段目、2段目 など)のブロックにおいてパルスが出力された際に、  $R_{ref}$ に加わる電圧を測定した.また、この測定を 20段全てのブロックの種類識別抵抗が0Ω、10kΩ、 100kΩの3つの場合において測定した.その結果を 図8に示す.3つの場合において、高い位置になるほ ど、測定される電圧が下がっていることが確認でき る.それぞれの場合における最大の電圧および最小 の電圧の差は、0Ωにおいて0.127V、10kΩにおい て0.060V、100kΩにおいて0.012Vであった.電 圧が減衰する原因として、ブロックの電極による接 触抵抗が考えられる.すなわち、接続数が増えるほ ど抵抗値が加算されるため、高段に位置するブロッ クほど測定電圧が減衰すると考えられる.

#### 5.3 結果の考察

現在の実装では、基準電圧±数十 mV という閾値 を用いて種類識別を行う.実測値を基準電圧とした 場合、100 種類を閾値の範囲に重複なく測定できて おり、1 段であれば 100 種類を識別できる.一方、高 段のブロックの測定電圧には減衰があり、最大は 0 Ω における 0.127 V である.このことから、積み重ね 個数が 20 段までの場合は、抵抗の誤差と電圧の減衰 を考慮した、基準値 +0.022 V および -0.149 V(= -0.022 - 0.127) を閾値として、0.171 V(= 0.022 + 0.149) を刻み幅とした 25 種類(25.7 = 4.4/0.171) が識別できると考えられる.

# 6 議論と今後の展望

性能評価の結果より,我々のシステムにおいて, 1段であれば100種類,20段であれば25種類のブ ロックの識別が可能となる見込みである.また,各 ブロックに内蔵される回路は比較的安価(表面実装 の素子を用いた場合,回路の価格は5円程度[1])で ある.このように,比較的安価でありながら,多段 多種の識別を実現した点は,既存システムにはない 本システムの利点である.この利点を活かすことに より,大量のブロックを用いたモデリングシステム を実現できる可能性がある.

ただし,現実装では高段まで識別しようとするほ ど識別可能な種類数が減る.レゴブロック [2] に使 用されている色は 100 種類以上であることから,段 数を問わず 100 種類程度の識別ができることが目標 である.

本論文では1段および20段において識別可能な 種類数を推定した.今後,接触抵抗のシミュレーショ ンにより,各段数における識別可能な種類数を推定 し,段数に対する種類数の一般式を導く必要がある. 現在,高価(4.5万円程度)な測定器を使用して いるが,ADコンバータおよびマイクロコントロー ラを用いることにより,パルス測定ハードウェアを 安価な構成にて実現できる可能性がある.また,今 後,2MHzより低いサンプリングレートを用いたよ り安価な構成を検討する.さらに,パルス測定ハー ドウェアにおいてリレーを用いているが,台座の拡 張を簡単化するために,リレーを必要としないパル ス測定ハードウェアの設計を試みる.

現在の実装において、30 段までであれば同一ブ ロックが複数並んだ場合においても、問題なく識別 ができることを確認した.一方、システム構成およ び使用環境が異なる場合において、コンデンサの精 度およびシュミットトリガインバータの閾値が変化 するため、パルス幅が変わる可能性がある.その場 合において、正確に段数を計測する方法を調査する.

本システムでは、それぞれのブロックが持つ抵抗 を測定できるため、抵抗値の変化に基づくセンサを 使用できる可能性がある.抵抗変化型のタッチセン サおよび傾きセンサなどをブロックに埋め込むこと により、ブロックに対するタッチ、およびブロック を傾ける操作によって 3D モデルを変化させるなど のインタラクションが可能となると考えられる.

# 7 まとめ

モジュラー型パルス遅延回路を用いたインタラク ティブなブロックシステムを開発した.本論文にお いて,モジュラー型パルス遅延回路を内蔵するブロッ ク,パルス測定ハードウェア,および 3D モデリン グアプリケーションの実装を示した.また,本シス テムを用いて,8種類のブロックを用いた 30 段の 積み重ねを識別できることを確認した.性能評価の 結果より,我々のシステムにおいて,1段であれば 100 種類,20 段であれば25 種類のブロックの識別 が可能となる見込みである.今後,測定ハードウェ アの安価な実装,識別性能の向上方法,および本シ ステムにおけるセンサの使用を検討する.

## 参考文献

- RS コンポーネンツ、2020. https://jp. rs-online.com/web/, (2020年9月29日閲覧).
- [2] レゴ, 2020. https://www.lego.com/, (2020 年 11月12日閲覧).
- [3] D. Anderson, J. L. Frankel, J. Marks, D. Leigh, E. Sullivan, J. Yedidia, and K. Ryall. Building Virtual Structures with Physical Blocks. In UIST '99, pp. 71–72, 1999.
- [4] 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.
- [5] P. Baudisch, T. Becker, and F. Rudeck. Lumino: Tangible Blocks for Tabletop Computers

Based on Glass Fiber Bundles. In  $C\!H\!I$  '10, pp. 1165–1174, 2010.

- [6] 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.
- [7] O. Glauser, W.-C. Ma, D. Panozzo, A. Jacobson, O. Hilliges, and O. Sorkine-Hornung. Rig Animation with a Tangible and Modular Input Device. ACM Trans. Graph, 35(4):144:1– 144:11, 2016.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] T. Hosoi, K. Takashima, T. Adachi, Y. Itoh, and Y. Kitamura. A-Blocks: Recognizing and Assessing Child Building Processes during Play with Toy Blocks. In SA '14, pp. 1:1–1:2, 2014.
- [11] M.-J. Hsieh, R.-H. Liang, D.-Y. Huang, J.-Y. Ke, and B.-Y. Chen. RFIBricks: Interactive Building Blocks Based on RFID. In *CHI '18*, pp. 189:1–189:10, 2018.
- [12] K. Ikegawa and B. Shizuki. Tesla Blocks: Magnetism-based Tangible 3D Modeling System Using Block-shaped Objects. In OzCHI '18, pp. 411–415, 2018.
- [13] D. Leen, R. Ramakers, and K. Luyten. Strut-Modeling: A Low-Fidelity Construction Kit to Iteratively Model, Test, and Adapt 3D Objects. In UIST '17, pp. 471–479, 2017.
- [14] R.-H. Liang, L. Chan, H.-Y. Tseng, H.-C. Kuo, D.-Y. Huang, D.-N. Yang, and B.-Y. Chen. GaussBricks: Magnetic Building Blocks for Constructive Tangible Interactions on Portable Displays. In CHI '14, pp. 3153–3162, 2014.
- [15] A. Miller, B. White, E. Charbonneau, Z. Kanzler, and J. J. LaViola Jr. Interactive 3D Model Acquisition and Tracking of Building Block Structures. *IEEE TVCG*, 18(4):651–659, 2012.
- [16] M. Wang, K. Lei, Z. Li, H. Mi, and Y. Xu. TwistBlocks: Pluggable and Twistable Modular TUI for Armature Interaction in 3D Design. In *TEI '18*, pp. 19–26, 2018.
- [17] 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. *Comput. Entertain.*, 2(4):Article 6b, 1–13, 2004.
- [18] A. Yoshida, B. Shizuki, and J. Tanaka. Capacitive Blocks: A Block System that Connects the Physical with the Virtual Using Changes of Capacitance. In UIST '15 Adjunct, pp. 85–86, 2015.