

StackBlock：積み重ね形状を認識するブロック型UI

續 毅海^{1,a)} 伊藤 雄一¹ 安藤 正宏¹ 細井 俊輝² 高嶋 和毅² 尾上 孝雄¹ 北村 喜文²

受付日 2016年1月21日, 採録日 2016年9月6日

概要：本研究では、本物の積み木のように任意の位置や角度でブロックを積み重ね、構築された3次元形状をコンピュータに入力することができる新たなブロック型UI “StackBlock” を提案する。StackBlockの各表面上には赤外線LEDとフォトトランジスタをマトリクス状に敷き詰めており、ブロックを積み重ねると、片方のブロックの赤外線LEDが発光し、向かい合うブロックのフォトトランジスタが赤外線を受光する。フォトトランジスタが受光した赤外線の受光強度は各ブロックの接触情報として保持され、接触領域内の赤外線LEDとフォトトランジスタを用いて、ブロック間で接触情報を赤外線通信する。積み重ねられたブロックは最も上のブロックから順に、下のブロックへ自身の接触情報を伝播していき、一番底に配置されたブロックがすべてのデータを集約したうえで、ホストPCに送信する。ホストPCは接触情報から構築形状を認識する。我々は子供の積み木遊びを観察、分析し、StackBlockの必要要件を定め、ブロックの6面すべてに認識、通信機能を持たせたStackBlockのプロトタイプを実装した。さらに、実装したStackBlockのプロトタイプを用いて、形状認識の精度や形状認識の速度の評価を行った。その結果、目標値を満たす精度で形状認識が可能であり、子供の積み木遊びに必要な要件を実現できていることが確認された。

キーワード：タンジブル、積み木、赤外線通信

StackBlock: A Block-shaped Interface for 3D Model Reconstruction of Stacked Blocks

TAKEMI TSUZUKI^{1,a)} YUICHI ITOH¹ MASAHIRO ANDO¹ TOSHIKI HOSOI² KAZUKI TAKASHIMA²
TAKAO ONOYE¹ YOSHIFUMI KITAMURA²

Received: January 21, 2016, Accepted: September 6, 2016

Abstract: We propose StackBlock, a novel building-block interface that precisely constructs 3D models by letting users simply stack blocks at arbitrary positions and angles. StackBlock has Infrared LEDs and phototransistors laid in a matrix on each surface. When a block is stacked on a block that is already stacked, each block recognizes the contact area from infrared light reception from other blocks. The IR LEDs and PTRs are also used to transmit the contact-area information to the other block. Contact-area information is sent from the top block to the bottom-most block in the sequence. This data is sent to a computer where the positions and angles of the stacked blocks are estimated and their 3D shapes are constructed. We ascertained the required specifications for StackBlock by observing how children play with physical building blocks and implemented a prototype of StackBlock with several blocks. The results of our evaluation of the accuracy and latency of 3D shape recognition confirmed that StackBlock sufficiently performs 3D shape recognition for flexible stacking.

Keywords: tangible, building blocks, infrared (IR) communication

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 東北大学電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku
University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

^{a)} tsuzuki.takemi@ist.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

近年ユーザインタフェース (UI) の中でも、より直感的にコンピュータとインタラクションをする方法として、実物体を操作対象とするタンジブルユーザインタフェース

(TUI) が注目されている [1], [2], [3], [4], [5]. TUI では, コンピュータ内の情報が, 実物体の形状や, 実物体の持つ意味に割り当てられており, ユーザは経験をもとにした実物体への操作を行うことで, より直感的に情報とインタラクションすることが可能になる. また, TUI の中でもブロックを組み上げる操作により 3D モデルを構築できるブロック型 UI に注目が集まっている. ブロック型の実物体を用いて形状を構築する行為は, 専門的な知識を必要とせず, 3 次元空間での空間認知を容易にするため, 建築設計や工業デザインでのモデリングや, 知育玩具, 脳機能の診断など, 様々な分野に応用されている [6], [7].

一方, 従来, 慢性的な心的ストレスを被った子供に対する心理的ケアに, 積み木による遊戯療法がよく用いられてきた [8]. この療法では, 子供の積み木遊びをビデオでコーディングしたり, 行動や操作を観察者が解釈したりすることが主な測定方法であったが, 不安定な心理状態にある子供の遊び方の微妙な変化を正確に計測することは難しかった. また, 心理学や臨床の場においても, 子供の遊び方, 特に構築形状の安定性に注目している例も多く [9], 積み方を詳細に検討することは非常に重要である. そのため, より詳細な行動分析, 心理分析に向けては, 積み木遊びにおいて各ブロックがどのような位置や角度で積まれているのかを正確に認識する必要がある. 積み方や構築形状を取得する手法として, 先述したビデオによるコーディングのほかにもスキャナなどを用いたスキャンが考えられる. しかしこれらの手法では, 子供の自由な積み木遊びを阻害してしまうのに加えて, 遊びの場を制限してしまい, 断片的な構築形状データしか取得することができない. 子供の積み木遊びを阻害せずに構築形状の認識を逐次的に, つまりリアルタイムに行うことで, 最終的な構築形状のみでなく, 時系列に沿った構築形状データを取得することが可能となる. これらのデータを用いることは, 子供の心理状態や集中力を定量的に推定することにつながり, 心的ストレスに対する積み木遊戯療法や積み木遊びによる教育にも新たな展開が期待できる.

そこで本研究では, ユーザ (特に子供) が積み木のようにブロックを自由に積み重ね, ホスト PC がその形状をリアルタイムに認識できるブロック型 UI “StackBlock” を提案する. 外観を図 1 に示す. StackBlock を構成する各ブロックの各面上には赤外線 LED とフォトトランジスタをマトリクス状に敷き詰め, ブロックを積み重ねたときの赤外線 LED の発光とフォトトランジスタの受光状況から積み重ね領域を認識する. そして, 積み重ね領域内で対面する赤外線 LED とフォトトランジスタ間での赤外線通信により, 積み重ね情報を送受信する. 積み重ね情報はブロック間の赤外線通信のリレーにより, 最終的にコンピュータに送られ, コンピュータ上で構築形状が再現される. また赤外線を用いているため, ブロックと手の接触を区別して

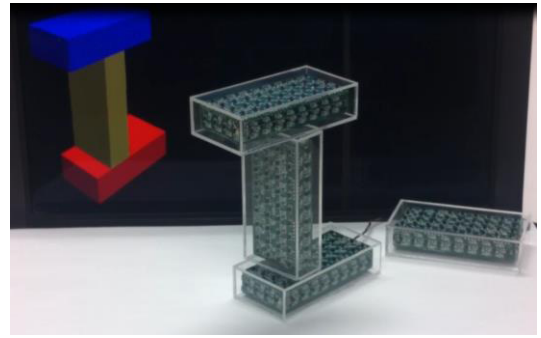


図 1 実装した StackBlock

Fig. 1 Implementation of StackBlock.

認識することも可能である.

本稿ではまず 2 章で関連研究について述べ, StackBlock と既存のブロック型 UI の違いについて詳説する. 3 章では子供による被験者実験を通じて, StackBlock の必要要件についてまとめ, 4 章で実装について述べる. 5 章では, 実装した StackBlock を用いた性能評価実験で, 3 章での必要要件を満たしているか検証する. 6 章で考察を行い, 7 章で本稿をまとめる.

2. 関連研究

ブロック型 UI は, 実世界のブロックを用いることにより専門的な知識がないユーザの 3 次元モデリングを可能とする. こうしたブロックでの構築形状の認識方法は様々なものが提案されてきた.

その代表的なものとして, ブロック内部にセンサを埋め込んだ手法がある. Anderson らは, LEGO 型のブロックを用いて複雑な形状をコンピュータに入力できるシステムを提案している [10], [11]. このシステムは, ユーザが LEGO を用いて自由に形状を組み立てた後, コンピュータに接続し, 電源を投入すると, ブロックの 3 次元形状を認識し, その形状のモデリングを行うシステムである. また, Watanabe らが提案した ActiveCube は各ブロックにマイコンを搭載したブロック型 UI で, Anderson らの手法と同様, コンピュータと各ブロック間の電氣的な通信により構築形状を認識する [6], [7]. これらのブロック間で電氣的な通信を行うブロック型 UI では, 安定したブロック間通信のために, ブロックどうしを物理的に密着して接続する必要があるが, LEGO の接続システムやホック, 磁石などが用いられている. これによって多様な形状を構築し維持することができるが, 接続の向きの自由度が低い, またはブロックの接続や分離に力が必要となるなどの理由から, 幼児のような子供が従来の積み木のように積み重ねるだけで形状構築し, その形状をコンピュータに入力することは難しい. また, 李らが提案した Bloxels はブロック間で光通信を行うブロック型 UI であり, ブロックが積み上げられたとき, 隣接ブロックからの色のデータを受信しフルカ

ラーで発光することで1つのピクセルの機能をなし、全体で1つの形状ディスプレイとして機能する[12]. Wangらはブロック間で赤外線通信を行い、異なる役割を持たせたブロックの組合せに応じた出力をすることで、子供の教育に応用するシステムを提案した[13], [14]. これらのシステムではブロックどうしがワイヤレス通信を行うため、接続や分離に強い力を必要とせず、接続の向きの自由度も高い. しかし、形状認識のためのセンサを備えておらず、積み重なったブロックのIDなどの情報を取得することができないため、構築形状の細かな変化まで認識することは不可能である.

一方で、外部のセンサによるブロック形状認識手法も多く提案されている[15], [16], [17], [18]. 永井らは積み木遊びを行う場全体をインタフェースとし、格子状に並べられた透明な筒の中に積み木を入れることで、積み木の位置、種類を検出し、実際の構築形状に応じた城のグラフィックを画面上でリアルタイムに表示した[15]. Baudischらは、内部に光ファイバを搭載したブロックを用いて、タッチスクリーン上で形状を認識するシステムを提案した[16]. しかし、これらの手法では、ブロック位置、もしくは形状の推定のために、積み重ねの場や自由度を制限しており、ユーザは自由な積み重ねをすることができない. MillerらはKinectを用いてブロックの構築形状を認識し、形状をPC上に再現する手法を提案している[17]. このようなカメラベースの手法では、接続、分離に力を必要とせず、積み重ねの自由度が高いという利点があるが、カメラから取得したデータをもとに形状認識を行うため、特にユーザが複数の場合、ユーザの手でブロックが隠れたり、構築形状の内部に空洞が生じたりした場合、構築形状の認識が難しく、カメラによる認識では正確なブロック位置を認識することが困難であるという問題がある. これらの問題に対し、磁気センサを物体内部に搭載し3次元物体計測をする手法も存在する. クレイモデリング中の形状リアルタイム計測[19]が事例としてあげられる. 磁気を用いるために遮蔽を問題にしない利点を持つが、既存の磁気センサでは、同時利用できるマーカの個数が少なく、またマーカサイズが大きいと有線のマーカであるため、ブロック型UIへの適用は難しい. さらに、磁気を利用するため周囲に金属がある環境では測定精度が落ちるなど、使用の場が制限されてしまう.

本研究で提案・実装するStackBlockでは、積み重ねるだけで3次元形状を構築でき、オクルージョンによる問題も発生せず、かつ正確に構築形状を推定する形状認識手法を実現する.

3. 子供の積み木遊びの観察・分析

StackBlockに求められる必要要件を明らかにするために、子供に実際に積み木遊びをしてもらい、その様子を観

察して遊び方の傾向を分析し、StackBlockに必要な要件を抽出する.

3.1 実験手順

実験に利用する積み木は、アクリル製の大小2種類をそれぞれ6個ずつ、計12個とした. 大きい積み木のサイズは $100 \times 50 \times 25$ mm, 質量は78 g, 小さい積み木は $50 \times 50 \times 25$ mm, 39 gであった. このサイズと重量は一般的な木製積み木*1とほぼ同じである. また、12個の積み木は5色（赤3, 青3, 黄3, 緑1, 白2）で構成した. 被験者は生後2歳8か月から6歳6か月の12人であり、平均年齢は3歳11か月, 男児7人, 女児5人であった. 被験者は保護者とともに入室し、机の上にあらかじめ用意された積み木で約20分間遊んだ. 被験者の積み木遊びの様子を2台のビデオカメラで異なる方向から撮影した.

3.2 評価指標と分析方法

本実験は、ある特定の状況や症例に着目したものではなく、健常な2歳から6歳程度の幼児の遊び方の傾向を理解し、システム（ブロック）の設計に活かすものである. そのため、行動分析や発達の観点からではなく、積み木ブロックの位置と角度の基礎的項目を主に観察し、コーディングによって以下の3つの分類を得た.

(a) 「上に」積み重ねた・「隣に」置いた

すでに置かれている積み木の上に積み重ねたか、または、その隣に並べるように置いたかを分類した.

(b) 「立てて」置いた・「寝かせて」置いた

大小それぞれの積み木の面積が最も大きい面を下にした場合を「寝かせた」と見なし、それ以外の面を下にした場合を「立てた」と見なし.

(c) 「まっすぐ」・「ずらして」・「斜めに」置いた

積み木の辺や頂点どうしを合わせたり、辺どうしが平行になるように置いたりした場合を「まっすぐ」、辺や頂点がずれて置いた場合を「ずらして」（目視で明確にズレが認識できる程度）、それ以外の場合を「斜めに」置いたと見なし.

3.3 結果とStackBlockに求められる仕様

前節で述べた評価指標に基づいて各操作の回数を数え、全被験者のものを合計した. 評価指標から分類できないような特殊な積み木を行った被験者は観察されず、積み木の扱い方には大きな個人差はないと考えられる. 被験者の積み木遊びで観察された各操作の割合を図2に示す（母親や実験者のサポート時の操作は省く）.

図2(a)に示すように、「上に」積み重ねる場合が65%であり、積み木における大部分の遊び方は上方向への積み重

*1 株式会社ニチガン製無塗装積み木,
<http://www.nocorp.co.jp/mutoso/>

ねであることが確認できた。そのため、初期検討においては積み木遊びの中でも重要な、上方向への積み重ねを認識する手法を実装する。

図 2(b) は、面の利用方法を示したもので、寝かせて置く（大きな面を下に）ことが 58% と多かった。立てて置くことも同程度に観察されたため、6 面すべてに認識機能を持たせることが必要だといえる。

図 2(c) は、置き方に関するものである。多くの子供には、複数のブロックを綺麗にそろえて（ピッタリ重ねてなど）置く意思があるように見受けられたが、実際にはこのような積み重ねを実現できたのは 32% 程度であった。一方で、積み木を平行方向に「ずらして」または「ずれてしまっ」積み重ねたのは 63% と非常に多かった。また、明確に「斜めに（たとえば下ブロックに対して 45 deg. など）」置いた場合が 5% であった。これは、被験者の年齢が低いこともあり斜めに置くような置き方はやや難しかったと考えられる。しかし、実験終盤や挑戦的な積み重ね時、重要な見立て遊び時に見られることが多かったことから、斜めの置き方についても重要な意味を持つ可能性は高い。また、コーディングにおいて、ビデオカメラの映像からは、極端に近接しない限り 1 mm の差を目視で明確に把握することができなかった。積み木が置かれた角度など様々な要因から目視で 2–5 mm 程度のズレを認識していた。そのため、StackBlock の初期検討として、その上限である 5 mm 程度の計測精度を目指すこととする。このズレは微細なものではないが、観察の結果からも崩れの原因になりやすいなど積み木遊びにおいて比較的重要なものであった。また、回転のズレは頻度が低く、下の積み木に対して意図的に斜めに置くような積み方（たとえば下ブロックに対して 45 deg. など）はほとんどの被験者で観察することができなかった。加えて、4.3 節で述べる StackBlock の表面の素子配置間隔と認識可能距離の関係から総合的に求めた数値（12 deg.）を計測精度の目標値とする。

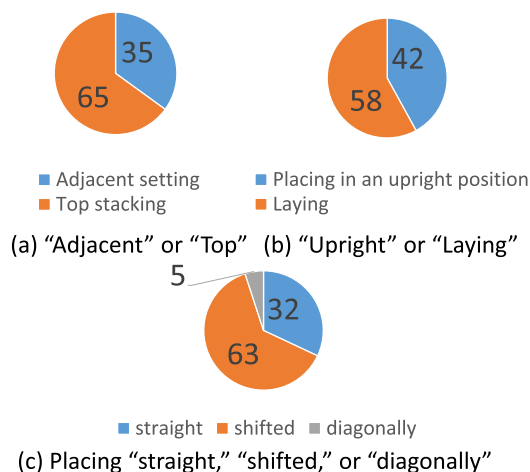


図 2 観察された各操作の比率

Fig. 2 Ratio of each operation in observation.

実験結果から定めた StackBlock の必要要件を以下に示す。

必要要件 1：ブロックの 6 面すべてが積み重ね認識機能を持ち、上方向だけでなく横方向への積み重ね認識も可能である。

必要要件 2：平行のずれが 5 mm 以下の精度で認識可能である。

必要要件 3：回転のずれが 12 deg. 以下の精度で認識可能である。

また、一般的なユーザインタフェースには反応のリアルタイム性も重要である [20]。実験結果から定めた必要要件に加え、以下の項目も StackBlock の必要要件として定める。

必要要件 4：ブロックを積み重ねてからの応答時間が 1 sec 以内である。

4. StackBlock

4.1 概要

これまで述べたように StackBlock は、ユーザがブロックどうしを接続することなく、積み重ねるだけでその構築形状をホスト PC が認識する。積み重ねによる構築形状認識には、どのブロックが、どのブロックの、どの面上に、どのように乗っているかを接触箇所ごとに検出し、ホスト PC に送信する必要がある。そのためには、図 3 に示すように接触箇所ごとの、お互いのブロックの ID と、それぞれの接触面の ID、それぞれの接触領域情報（以下ではこれらを接触情報と呼ぶ）を収集し、その情報をホスト PC に接続された BaseBlock に集約することが必要である。そこで、ブロック表面に赤外線 LED とフォトトランジスタをマトリクス上に敷き詰める方法を用いる。ユーザがブロックを積み重ねると、対面するブロックと接触している領域内のフォトトランジスタは、対面するブロック表面に配置された赤外線 LED からの赤外線を強く受光するため、ブロック表面のフォトトランジスタの受光強度に基づいて接触領域の認識が可能となる。

また、このように赤外線 LED とフォトトランジスタを敷き詰めることで、対面するブロック間での接触領域内の赤

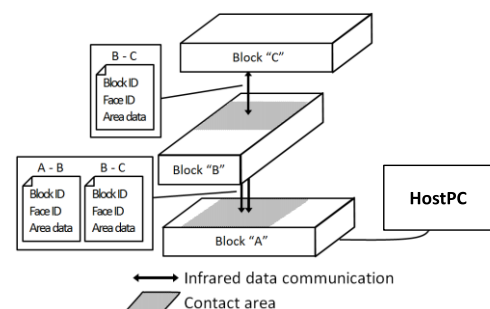


図 3 システム全体像

Fig. 3 System overview.

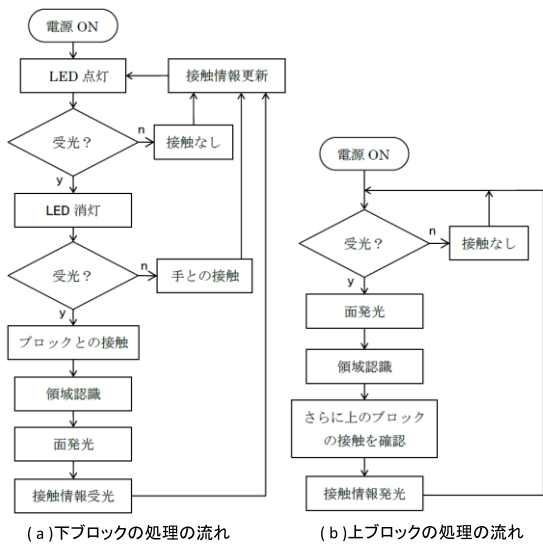


図 4 各ブロックの処理
Fig. 4 Flowchart.

外線 LED とフォトトランジスタを用いた赤外線通信が可能となる．対面するブロック間で互いの接触情報を赤外線通信で交換，集約することによって，自分より下のブロックへ自身の接触情報を伝搬する．これを繰り返し，全接触箇所の接触情報を，BaseBlock に集約する．BaseBlock は，集約した接触情報をホスト PC に定期的送信する．ホスト PC は BaseBlock から受信した全接触箇所の接触情報に基づき構築形状を復元する．

このようにして，提案手法では，接触領域の認識に用いる赤外線 LED とフォトトランジスタを，情報伝搬のための通信にも用いることで，ホスト PC との通信のための追加的なハードウェアを各ブロックに搭載せずに，ホスト PC への情報伝搬を実現する．

4.2 各ブロックの処理

積み重ね認識のための各ブロックの処理フローについて，下に置かれたブロックのものを図 4(a) に，上に載せられたブロックのものを図 4(b) に示す．BaseBlock を含む，すでに構築され認識されたブロック（以下，下ブロック）の上面は，上面にブロックや手などの物体が存在するかどうかをセンシングするために順番に 1 つずつ赤外線 LED を点灯し，受光を待つ．いずれかの下ブロックに接触した新たなブロック（以下，上ブロック）は，この下ブロックからの赤外線を受光すると，下面の全赤外線 LED を一定時間点灯する．また，下ブロックと手が接触する場合には，下ブロックからの赤外線が手で反射する．下ブロックは，受光が確認されない場合，点灯した LED の上には接触がないと判断し，次の LED を点灯させ上記処理に戻る．もし下ブロックが受光を確認すると，上面にブロックか手の接触があると判断し，ブロックと手の判別を行うために点灯していた赤外線 LED を消灯する．このときブロックと

表 1 実装に用いた素子
Table 1 Elements of use.

素子名	型番	製造元
赤外線 LED	TAN1111C	Stanley
フォトトランジスタ	TEMT1020	Vishay
リチウムポリマー電池	ID-1578	Adafruit
マイクロコントローラ	R5F2123CJFP	Renesas Electronics
シフトレジスタ	TC74VHC595FT	TOSHIBA
デコーダ	CD74HCT238	Texas Instruments
マルチプレクサ	TC74LVX4051FT	TOSHIBA



図 5 素子の配置
Fig. 5 Arrangement of elements.

の接触の場合には上ブロックからの赤外線により受光が確認されるが，手との接触の場合には赤外線の反射が起こらないため受光は確認されない．下ブロックはブロックとの接触が確認されると，受光した上面のフォトトランジスタの受光状況に基づき接触領域を認識し，その後上面の全赤外線 LED を一定時間点灯する．上ブロックは下面のフォトトランジスタの受光状況に基づき接触領域を検出する．次に，上ブロックはさらに上にブロックがあるかどうかを確認するために，上ブロックの上面に対して図 4(a) の処理を実行する．上ブロックの確認が終わると，最後に，上ブロックは，自身の接触情報，および，自身より上のブロックから受け取って保持しているすべての接触情報を下へ送信する．これを繰り返すことにより，最も下に置かれた BaseBlock にすべての接触面での接触情報を集約し，BaseBlock がホスト PC にこれらの情報を送信する．

4.3 StackBlock の構成・実装

実装に用いた素子の一覧を表 1 に示す．StackBlock は一般的な木製の積み木をモデルとして，縦 50 mm，横 100 mm，高さ 25 mm とし，重さは 100 g 以下となるように実装した．また，図 5 に示すように，ブロックの 6 面すべてに赤外線 LED とフォトトランジスタをマトリクス状に配置した．この際，使用する赤外線 LED の半値角が 145 deg. であることから，半値以上の強度の赤外光は亚克力板と空気層の境界で屈折し，半径 0.8 cm の円範囲に放射される（図 6）．このことから，少なくとも半値以上の強度の赤外光を隙間なく放射するためには，赤外線 LED を 1.1 cm 四

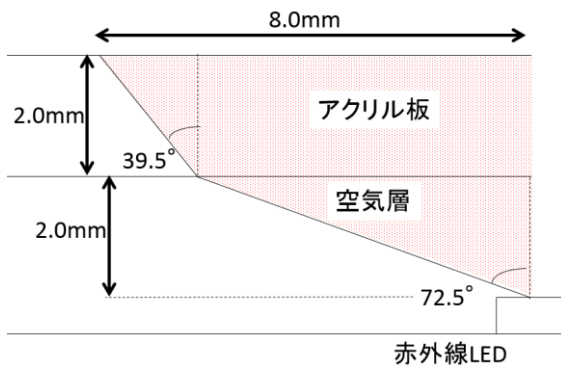


図 6 赤外線の屈折と強度分布の関係

Fig. 6 Relationship of refraction and the intensity distribution of infrared (side view).

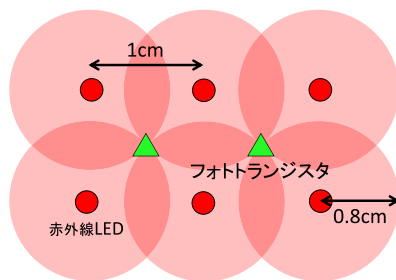


図 7 赤外線の強度分布（平面図）

Fig. 7 Intensity distribution of infrared (plane view).

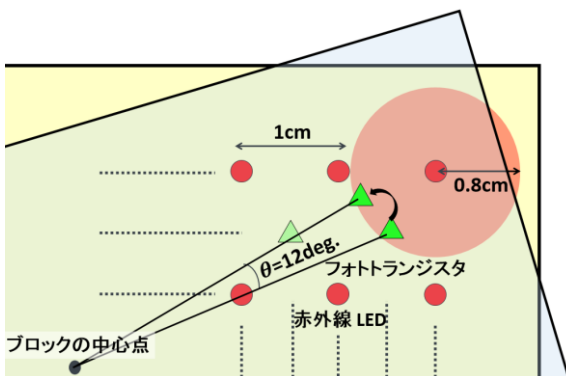


図 8 角に配置されたフォトランジスタの受光範囲

Fig. 8 IR light-receiving range of PTR on the corner.

方以内あたりに 1 つ配置する必要がある．実装の煩雑化や素子のコストを考慮し，StackBlock には 1cm 四方あたり 1 つずつ，赤外線 LED とフォトランジスタをマトリクス状に配置した（図 7）．

なお，StackBlock の素子配置では，図 8 に示すように 2 つのブロックを大きい面どうして接触させた状態から上のブロックを回転させる場合，12 deg. 以下の回転角では，ブロックの角に配置されたフォトランジスタは，対面するブロックからの半値以上の強度の赤外線をつねに受光する．つまり，12 deg. 以下の回転角は同一角度に認識される可能性がある．このことから，3.3 節の実験結果と合わせて，StackBlock の角度の認識精度の目標数値を必要要件 3

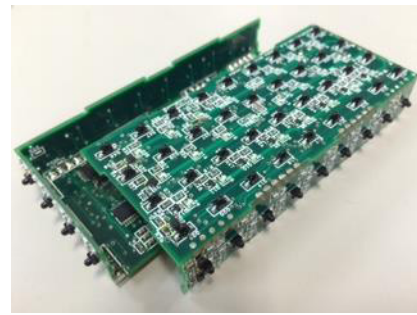


図 9 6 面ブロックの構成

Fig. 9 Configuration of the six-sided block.

に示すように 12 deg. とした．

図 9 に示すように，ブロックの各面は 2 つの 3 面ユニットの組合せによって構成する．2 つの 3 面ユニットはそれぞれ 1 つずつのマイクロコントローラによって制御し，電源供給とユニット内通信のために有線で接続する．また，電源供給は 1 つのリチウムポリマバッテリーにより実施する（3.7 V，500 mAh）．ブロックを積み重ねた際の下面と上面は別の 3 面ユニット上にあるため，積み重ね認識の際にはユニット間通信が必要となる．

ユニットの制御には，マイクロコントローラの I/O ポートでは不足するため，シフトレジスタやデコーダ，マルチプレクサといった素子を用いて I/O ポートを拡張する．また，接触領域の認識にはマイクロコントローラの A/D コンバータ機能を用いて，各フォトランジスタの受光強度を認識し，閾値による判定を行う．赤外線通信はマイクロコントローラのシリアル通信機能を用いて実装した．

この 2 つのユニットを組み合わせたものを，2 mm 厚のアクリル板のケース内に収納し，1 つのブロックとする．

4.4 形状認識手法

本節ではホスト PC が，ブロックから受信した接触情報から構築形状を認識する手法について述べる．

3 章で述べた必要要件より，形状認識における目標値は，位置の平均誤差 5 mm 以下（必要要件 2），角度の平均誤差 12 deg. 以下（必要要件 3）とする．

前述のとおり，接触情報はすべての接触箇所における互いのブロック ID，接触する面 ID，そして接触領域の情報により構成されている．ただし接触領域情報とは，接触面上に配置された各フォトランジスタの赤外線受光強度を示す．これらの情報より，ホスト PC は現在の構築形状を推定し表示する．たとえば，図 10 (a) のように 2 個のブロックが積み重なっているとすると，このとき，下のブロックの上面と，上のブロックの下面が，他方との接触を認識している．図 10 において，ブロックの接触領域は図 10 (b) の灰色で示した多角形部分であり，ブロックごとの接触領域の図形を示すと，それぞれ図 10 (c) の青の領域と図 10 (d) の赤の領域のようになる．接触領域は 2 個のブロックにお

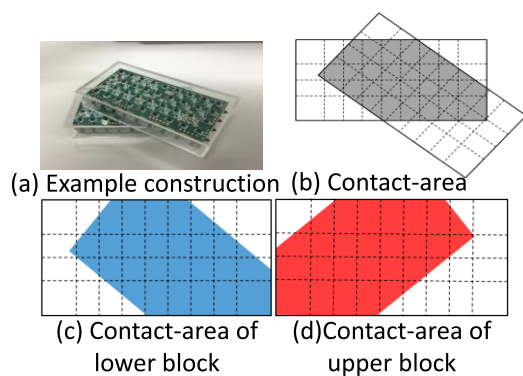


図 10 接触部分の形状

Fig. 10 Shape of contact area.

いて共通なので、接触領域はおおよそ合同である。提案する形状認識手法は、ブロックの接触領域がおおよそ合同であるという特性を用いて、ブロックの認識する赤外線受光強度からブロックどうしの接触位置と角度を決定するものである。

StackBlock のブロック表面に配置した各フォトトランジスタは、対面するブロックからの赤外線を受光すると、その受光強度を 0–1023 の 1024 段階で認識し、その強度に応じて、接触率を算出し、受光したフォトトランジスタの座標に重み付けを行い、ブロックどうしの接触位置と角度を推定する。ここで接触率とは、あるフォトトランジスタを中心とした 1 辺 10 mm の正方形領域が、他ブロックと接触している率と定義する。この領域はフォトトランジスタ素子の配置間隔に基づいた定数である。予備実験を実施し求めた接触率を表 2 に示す。実験では、2 個のブロックを大きい面どうしでぴったりと接触させた状態を初期状態とし、上のブロックを長辺方向へ変位幅 1 mm で 20 mm まで移動させ、さらに各変位で短辺方向へ同様に移動させ、その際の受光強度（50 刻み）と各フォトトランジスタの正方形領域との重なり部分の面積より接触率を算出した。

表 2 に示した値を用いて接触位置と角度の推定を行う。まず、受光強度数値 800 以上のフォトトランジスタに関しては接触率が 100% となるので、そのままの座標を用いて相加平均を算出し、それを暫定中心座標 (x_t, y_t) とする。その後、受光強度 800 未満のフォトトランジスタについては、上記で求めた (x_t, y_t) に近づくように、接触率による重み付けを行い、自身の領域内を移動させる。ある受光強度を持つフォトトランジスタの座標を (x, y) 、その受光強度における接触率を p とすると、重み付けを行った後の座標 (x', y') は次の式 (1) のようになる。

$$(x', y') = \left(x + \frac{5 \operatorname{sgn}(x_t - x)(100 - p)}{100}, y + \frac{5 \operatorname{sgn}(y_t - y)(100 - p)}{100} \right) \quad (1)$$

接触面上のすべてのフォトトランジスタの座標 (x', y') の総和から平均を算出し、最終的な接触領域の予測中心座

表 2 実験より求めた接触率値

Table 2 Contact probability.

IR light intensity	Contact Probability (%)
0 - 49	0
50 - 99	0
100 - 149	0.109
150 - 199	1.12
200 - 249	1.00
250 - 299	3.52
300 - 349	7.65
350 - 399	9.51
400 - 449	16.6
450 - 499	20.5
500 - 549	34.4
550 - 599	42.7
600 - 649	60.5
650 - 699	79.3
700 - 749	90.9
750 - 799	97.2
800 - 849	100
850 - 899	100
900 -	100

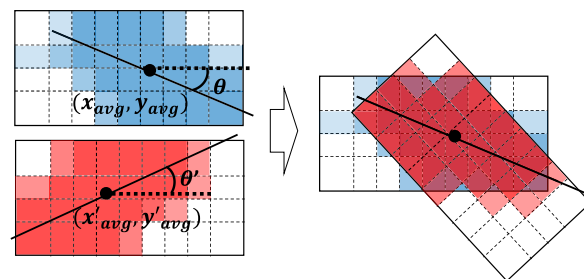


図 11 接触位置、接触角度の決定

Fig. 11 Determination of the position and angle of the contact area.

標 (x_{avg}, y_{avg}) とする。ブロックの接触角度は、接触領域の図形が、接触面に対してどの程度傾いているかを計算することにより決定する。算出した接触位置 (x_{avg}, y_{avg}) を通り、接触面上の各フォトトランジスタの座標との距離の二乗和が最小となるような直線を算出し、その傾きを $\tan \theta$ とする。この θ を接触領域の角度とする。

最後に、図 11 に示すように、接触する 2 個のブロックにおける接触位置と直線が空間内で一致するように整合させることにより、2 個のブロックの構築形状が認識される。この処理を全接触箇所について行い、ブロックどうしの対応付けを行うことにより、構築された全体の形状認識を行う。

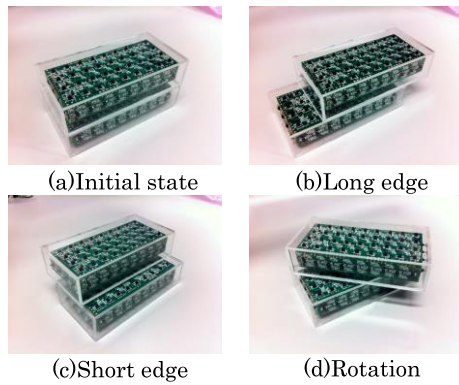


図 12 評価実験におけるブロックの積み重ね

Fig. 12 Stack of blocks in the evaluation experiment.

5. 積み重ね認識の評価

5.1 形状認識の精度に関する評価

StackBlock は、3 章で述べたとおり、子供が使うことを想定して必要要件を設定しており、実装したシステムがその必要要件を満たしているかを評価する。本評価では、図 12 に示すように、2 個のブロックの大きい面どうしをぴったりと接触させた状態を初期状態とし、以下の 4 つで示したパターンでブロックを変位させ、それぞれのブロック位置で、形状認識されたブロックの位置と、実世界でのブロックの位置の誤差を計測し、誤差の平均値、最大値、分散値を評価する。

パターン 1. 下のブロックの長辺方向に、上のブロックを 1 mm ずつ、0 mm～50 mm の区間ずらした場合 (図 12 (b))

パターン 2. 下のブロックの短辺方向に、上のブロックを 1 mm ずつ、0 mm～25 mm の区間ずらした場合 (図 12 (c))

パターン 3. 上下のブロック中心軸を一致させたまま、上のブロックを 10 deg. ずつ、180 deg. まで回転させた場合 (図 12 (d))

パターン 4. 上のブロックの赤外線 LED と下のブロックのフォトトランジスタをずれないよう対面する位置を初期状態とし、上のブロックを鉛直方向へ 1 mm ずつ 0 mm～30 mm の区間離していく場合

各パターン内の各変位での計測はそれぞれ 3 回行う。パターン 1, 2 の変位は形状認識の平行方向への精度 (必要要件 2) を評価するため、またパターン 3 の変位は形状認識の回転方向への精度 (必要要件 3) を評価するために行う。パターン 4 の変位ではパターン 1～3 と異なり、実際の形状認識は行わず、上のブロックの赤外線 LED を 1 個点灯させ、下のブロックのフォトトランジスタを 1 個用いて受光強度を測定する。StackBlock の積み重ね認識には赤外線を用いているため、ブロック間が鉛直方向に離れていても、積み重なったとして形状認識が行われる可能性がある。このよう

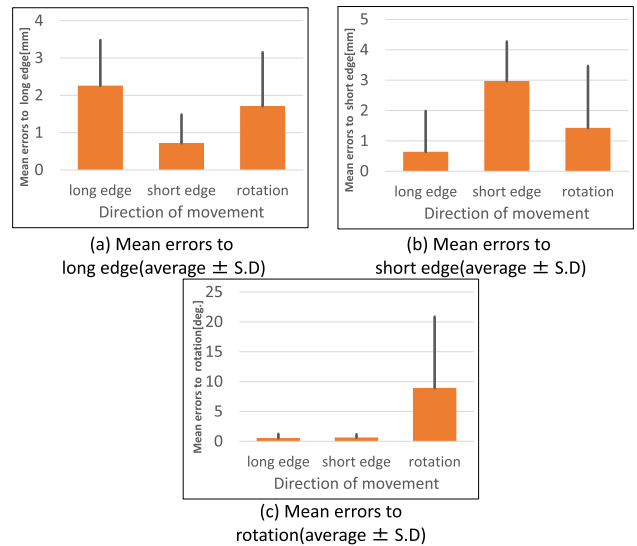


図 13 各方向への形状認識の平均誤差

Fig. 13 Mean errors to each direction.

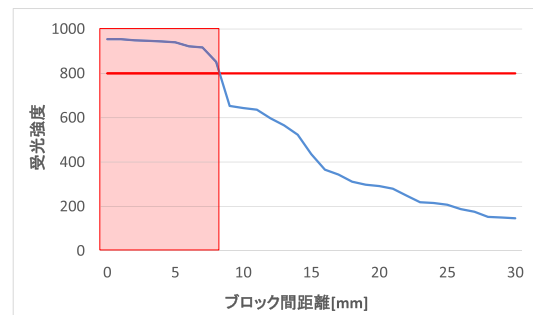


図 14 ブロック間距離と受光強度

Fig. 14 Received light intensity for the distance between blocks.

な誤認識を防ぐ閾値を定めるために、鉛直方向へのブロック間距離とフォトトランジスタの受光強度の評価を行う。

実験の結果を図 13, 図 14 に示す。長辺方向、短辺方向への平均誤差 (図 13 (a), (b)) は推定された接触領域の中心座標の誤差と同義であり、回転方向への平均誤差 (図 13 (c)) は推定された接触領域の傾きの誤差と同義である。図 13 (a)～(c) 中の各バーは先述した上のブロックの変位パターン (1～3) に対応し、それぞれが平均誤差 (mm) を示す。また、エラーバーは平均誤差の分散を示す。図 13 より、すべての置き方での辺方向への誤差は 3 mm 以下となっている。また、回転方向への誤差はすべての置き方で 10 deg. 以下となっていることが確認でき、必要要件を満たしていることを確認した。また、図 14 よりブロック間距離が大きくなればなるほど受光強度は小さくなるが、ブロック間が離れていても赤外線を受光することが確認された。形状認識を行うための閾値は図 14 中赤横線で示される 800 であるため、図 14 中赤領域で示される、ブロック間が約 8 mm までの場合には接触していると誤認識される可能性があることが分かった。

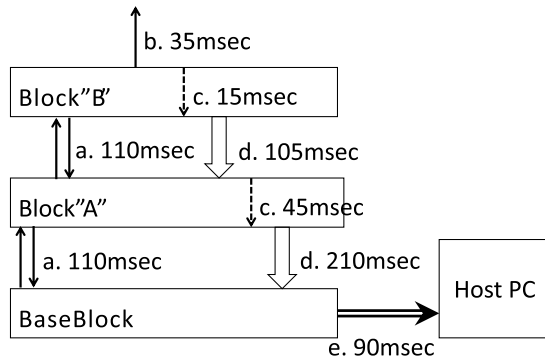


図 15 積み重ね認識に要する時間の内訳

Fig. 15 Breakdown of the time.

5.2 積み重ね認識のリアルタイム性の評価

ユーザインタフェースの実装では、反応のリアルタイム性も重要である [20]. そこで、積み重ね認識のリアルタイム性の評価 (必要要件 4) として、ブロックどうしの接触が Host PC に伝達され、形状認識が完了するまでの時間を測定する。

実際の操作と同様に電源の入ったブロックを重ねると、ブロックがわずかに離れた状態でも認識が行われる可能性があるため、積み重ね認識に要する時間を正確に測定できない。そこで今回の実験ではあらかじめ BaseBlock が積み重ね認識を開始すると同時にブロック表面に設置された緑色 LED を発光し、Host PC に接触情報を送信し終わると同時に緑色 LED を消灯するようプログラムした。

積み重ね認識に要する時間の計測では、ブロックを積み重ね、BaseBlock の緑色 LED が点灯してから消灯するまでの時間を計測した。ブロック内のマイコンと Host PC の間でクロックの同期をとれないため、積み重ね認識に要する時間はオシロスコープ (Tektronix 製 MSO4054B) のプローブを緑色 LED 点灯用の端子に取り付けて測定する。積み重ねに用いるブロックの数は 1~3 個とし、測定はそれぞれに対して 10 回ずつ行う。

実験の結果、ブロックを 1 つ積み重ねた場合の積み重ね認識に要する時間は平均 313 msec (SD = 20.4 msec), 2 つ積み重ねた場合には平均 722 msec (SD = 26.4 msec), 3 つ積み重ねた場合には平均 1300 msec (SD = 60.2 msec) となった。図 15 に 2 つのブロックを積み重ねた際の積み重ね認識に要する時間の内訳を示す。図 15 より、積み重ねるブロックの数を n とした場合の積み重ね認識に要する時間 T は式 (2) で示される。

$$T = 260n + 65 + 135 \sum_{k=1}^{n-1} k \quad (\text{msec}) \quad (2)$$

図 15 に示すように、StackBlock では、積み重ね情報はブロック間の赤外線通信のリレーにより最終的に Host PC に送信されるため、積み重ねるブロックの数が大きくなれば、積み重ね情報の増大や赤外線通信の増加により積

み重ね認識に要する時間は長くなる。一般に、ユーザはタスクの種類に応じた適切な時間内にユーザインタフェースからレスポンスがあることを期待するが、コマンドラインからの入力のような比較的単純なタスクでは、1 秒程度以下のシステム応答時間が好ましいとされている [20]. 今回の実験結果では 2 個のブロックの積み重ね認識まではリアルタイム性を有しているといえるが、3 個以上のブロックではリアルタイム性は有しておらず、必要時間の削減は今後の課題である。

6. 考察

6.1 性能評価実験と必要要件について

ブロック位置の推定は、すべての辺方向への誤差が 3 mm 以下となっており、必要要件 2 (5 mm) を十分に満たしていることが分かる。またブロックの回転角度の推定に関しては、すべての動かし方で 10 deg. 以下となっており、必要要件 3 (12 deg.) を満たしている。回転方向への誤差が比較的大きくなってしまった理由としては、推定された接触領域の広がりが考えられる。赤外線受光強度を用いた形状認識手法では、受光しているすべてのフォトトランジスタの座標を計算に使用するため、実際の接触領域よりもやや拡大された領域が接触していると推定されることがある。このため、接触領域の傾きがやや小さく推定されることがあり、誤差が生じたと考えられる。これらを解決するためには、受光強度がわずかであるフォトトランジスタの座標をフィルタリングし、限られたデータのみで傾きを計算する手法などが考えられる。また、直接の必要要件ではないが鉛直方向への誤認識についても検討が必要である。StackBlock では赤外線を用いるため、ブロック間が離れていても赤外線を受光する。しかし、この特徴は、見方を変えればブロックどうしが接続される直前の状態も認識できるため、StackBlock はユーザ (特に子供) がブロックを積み重ねる前に構築形状を予測したり、ブロックをどこに置くか迷うといった動作を認識したりすることができると考えられる。

次に 3.3 節で述べた必要要件について述べる。必要要件のうち認識誤差について (必要要件 2, 3) は前述のとおり目標値を満たす結果が得られた。また、実装した StackBlock は 6 面すべてに認識機能を持ち、ハードウェアの機能としては横方向への積み重ねりも認識可能である (必要要件 1)。しかし現在は、子供の積み木遊びの中でも大きな割合を占める上方向への積み重ねりに対応した認識アルゴリズムを採用しており、横方向への積み重ねりを認識する場合には、4.2 節で述べた各ブロックの処理に追加の処理が必要となる。今後はこれらの処理の実装、および認識アルゴリズムの変化による全体の認識時間の増大についてのさらなる検討が必要である。また、反応のリアルタイム性について (必要要件 4) は、3 個以上のブロックを積み重ねた場合、リアルタイム性を満たさない結果となり、StackBlock は積

み重ね認識に要する時間をさらに削減する必要があると考えられる。そのために考えられる手法としては、データ形式の最適化があげられる。形状認識の精度とリアルタイム性はトレードオフの関係にあり、正確に構築形状を推定するためには多くのデータが必要となる。現在の形状認識手法では、正確な位置、角度推定のために、各ブロック上のすべてのフォトトランジスタの赤外線受光強度を保持、送信しているが、閾値を用いて各フォトトランジスタが保持するデータを接触、非接触の2値データに変換することでデータ量を減らすことが可能である。

実際の臨床場面の応用、子供を対象とした実験などには、本研究で議論の対象としていなかったバッテリー、重さなどパッケージングに関する課題がある。しかしながらこれらは、本研究で述べてきた主要な技術項目の延長線または実装上における細部の課題となると予想される。

6.2 現在の制約

現在の StackBlock の積み重ね認識アルゴリズムでは、安定した接触認識や赤外線通信のために、ブロックの接触面の赤外線 LED をすべて同時に発光させている。そのため、1 個のブロックの上に複数のブロックを積み重ねた場合、ブロックどうしの接触認識時に赤外線が漏れ、他のブロックの誤認識を引き起こす可能性がある。しかし、これらの問題は積み重ね認識アルゴリズムを改善することで解決可能である。たとえば、片方のブロックの特定の赤外線 LED を1つ点灯させ、もう片方のブロックでは複数のフォトトランジスタの受光強度から対面ブロックで点灯する赤外線 LED の位置を特定し、対面する赤外線 LED とフォトトランジスタをマッチングする手法に変更することで、必要最低限の赤外線発光でブロック位置を特定することが可能となる。この手法により、他ブロックへの赤外線の漏れを最小限にすることができると考えられる。

また、StackBlock では接触認識、ブロック間通信のために赤外線を利用しているため、環境によっては外光の影響で誤認識を起こす場合がある。しかしこれらは、電源起動時に外光の赤外線強度からあらかじめ較正を行うことで対処可能であると考えられる。

次に、製造コストについて述べる。StackBlock の設計と実装はシンプルであるが、現状のプロトタイプの電子基板は特注であるために、低コストを主張している他のシステム（文献 [16], [17] など）に比べてコストが高くなる傾向にある。しかし、これら既存のシステムと StackBlock は機能や目的が異なるため、厳密なコストの比較をすることは困難である。StackBlock の中核は赤外線 LED とフォトトランジスタ列である。これらの素子は1つあたりの価格は安く、利用する電子基板も標準的なガラスエポキシ（FR-4）製のプリント基板を採用しているため、大量に生産することができれば、安価な製造が期待できる。

6.3 応用

従来のブロック型 UI とは異なり、StackBlock はユーザーの自由な積み重ねによる構築形状を正確に認識する。また、StackBlock は外観だけではなく、積み上げたり、崩したりというような積み木と同様の扱いが可能である。

StackBlock はブロック表面に赤外線 LED、フォトトランジスタを配置するシンプルな実装である。そのため、実装する積み木の形状に応じて基板を作成する必要があるが、円柱型、三角柱型などの様々な形状の積み木に応用可能である。さらに、赤外光を透過するカラーアクリルケースを使用すれば、従来の積み木と同様に、それぞれを特徴づけることも可能である。

積み木はプレイセラピーや教育ツールとして用いられてきたため、StackBlock はプレイセラピーや教育ツールの効果の解析や測定に応用することが可能である [21], [22]。従来の積み木を用いた遊戯療法では、積み木の効果を見るためにはビデオを詳細に観察して分析するという、観測者や実験者に負担をかける方法をとることが多かったが、StackBlock を用いることで構築形状をつねに正確に認識することができるため、リアルタイムかつ詳細に子供の心理状態を推定することが可能となる。たとえば、現在の構築形状が不安定なときは集中を促すようなメッセージを表示させることで、子供の集中力の継続や、ストレス値の軽減効果が期待できる [22]。

また、現在の構築形状を正確に認識し、より難易度が高い積み木の積み方をリアルタイムに認識、提示することで積み木遊びへの積極性や挑戦を促進することができる。または、事前に提示した目標形状との誤差を計算しスコア付けすることで、ゲームのように積み木遊びを楽しむことができるアプリケーションへの応用なども考えられる。加えて、ネットワークを介することで、先述のゲームのようなアプリケーションを、遠隔地の子供と協力しながら行うことが可能となり、多人数モデリングといった応用も考えられる。さらに、StackBlock は赤外線を用いて接触認識を行うため、人の手とブロックの接触を区別して認識することが可能である。これを利用することで、構築形状に加えて手の把持形状や把持時間といったデータを取得することも可能であり、より詳細なデータを用いたプレイセラピーや教育ツールにも応用が期待できる。

7. おわりに

本研究では、ユーザーの自由な積み重ねによる構築形状を正確に認識できるブロック型 UI である StackBlock を提案し、プロトタイプを実装した。評価実験により、形状認識の精度、形状認識のリアルタイム性を確認した。今後は、ブロックの横方向への認識を実装し、短時間で認識可能なアルゴリズムの検討を進めていく。

謝辞 StackBlock の実装にあたりご支援いただいた菊池

日出男氏に深い感謝の意を表す。また、本研究は JSPS 科研費（基盤研究（C）15K04139、挑戦的萌芽研究 15K12177）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms, *Proc. CHI'97*, pp.234–241 (1997).
- [2] Fitzmaurice, W.G., Ishii, H. and Buxton, A.S.W.: Bricks: Laying the foundations for graspable user interfaces, *Proc. CHI'95*, pp.442–449 (1995).
- [3] Ullmer, B., Ishii, H. and Jacob, J.K.R.: Token+constraint systems for tangible interaction with digital information, *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol.12, No.1, pp.81–118 (2005).
- [4] Brave, S., Ishii, H. and Dahley, A.: Tangible interfaces for remote collaboration and communication, *Proc. CSCW'98*, pp.169–178 (1998).
- [5] Ishii, H., Mazalek, A. and Lee, J.: Bottles as a minimal interface to access digital information, *CHI'01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.187–188 (2001).
- [6] 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, *Proc. ACE'04*, pp.178–180 (2004).
- [7] Itoh, Y., Akinobu, S., Ichida, H., Watanabe, R., Kitamura, Y. and Kishino, F.: Tsu.mi.ki: Stimulating children's creativity and imagination with interactive blocks, *Proc. International Conference on Creating, Connecting and Collaborating through Computing (C5'04)*, pp.62–70 (2004).
- [8] Reddy, A.L. et al.: *Empirically based play interventions for children*, American Psychological Association (2005).
- [9] 足立智昭, 北村喜文, 高嶋和毅, 細井俊輝, 大橋良枝, 伊藤雄一, 金高弘泰: インタラクティブ・コンテンツを用いた幼児の PTSD と積み木遊びに関する研究: 唾液アミラーゼ活性値によるストレス軽減効果の検証を中心に, 宮城学院女子大学発達科学研究, Vol.14, pp.25–30 (2014).
- [10] Anderson, D., Frankel, L.J., Marks, J., Leigh, D., Sullivan, E., Yedidia, J. and Ryall, K.: Building virtual structures with physical blocks, *Proc. UIST'99*, pp.71–72 (1999).
- [11] Anderson, D., Frankel, L.J., Marks, J., Agarwala, A., Beardsley, P., Hodgins, J., Leigh, D., Ryall, K., Sullivan, E. and Yedidia, S.J.: Tangible interaction + graphical interpretation: A new approach to 3D modeling, *Proc. SIGGRAPH'00*, pp.393–402 (2000).
- [12] 李 鎮河, 寛 康明, 苗村 健: Bloxels: 発光ブロック群による実体ボックスディスプレイ: 積層によるブロック間の情報伝達, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.109, No.75, pp.31–36 (2009).
- [13] Wang, D., Zhang, Y., Gu, T., He, L. and Wang, H.: E-Block: A tangible programming tool for children, *Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.71–72 (2012).
- [14] Wang, D., Zhang, L., Qi, Y. and Sun, F.: A TUI-based programming tool for children, *Proc. 2015 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITiCSE'15)*, pp.219–224, ACM (2015).
- [15] 永井淳之介, 沼野剛志, 東 孝文, Matthieu 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, pp.67–75 (2014).
- [16] Baudisch, P., Becker, T. and Rudeck, F.: Lumino: Tangible blocks for tabletop computers based on glass fiber bundles, *Proc. CHI'10*, pp.1165–1174 (2010).
- [17] Miller, A. et al.: Interactive 3D model acquisition and tracking of building block, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.18, No.4, pp.651–659 (2012).
- [18] Gupta, A., Fox, D., Curless, B. and Cohen, M.: DuploTrack: A realtime system for authoring and guiding duplo block assembly, *Proc. UIST'12*, pp.389–402 (2012).
- [19] Reed, M.: Prototyping digital clay as an active material, *Proc. TEI'09*, pp.339–342 (2009).
- [20] Butler, W.T.: Computer response time and user performance, *Proc. CHI'83*, pp.58–62 (1983).
- [21] Kaduson, G.H. and Schefer, C.E.: *101 more favorite play therapy techniques*, Aronson, Maryland (2001).
- [22] 細井俊輝, 佐藤裕美, 高嶋和毅, 伊藤雄一, 足立智昭, 北村善文: 加速度センサを用いた積み木による子供のストレス軽減効果に関する一検討, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.16, pp.91–96 (2014).



續 毅海

2015 年大阪大学工学部電子情報工学科卒業。同年同大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻入学。ヒューマンインタフェースの研究に従事。



伊藤 雄一 (正会員)

2000 年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院博士後期課程入学。2002 年同大学院情報科学研究科助手。2008 年より大阪大学ウェブデザインユニット准教授。2007 年日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞。博士（情報科学）。



安藤 正宏

2015 年大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻博士前期課程修了。ヒューマンインタフェースの研究に従事。



細井 俊輝

2015 年東北大学電気通信研究所博士前期課程修了。ヒューマンインタフェースの研究に従事。



高嶋 和毅

2006 年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。2008 年同大学院博士後期課程修了。同年同大学院情報科学研究科助教。2010 年東北大学電気通信研究所助教。博士（情報科学）。



尾上 孝雄（正会員）

1991 年大阪大学工学部電子工学科卒業。1993 年同大学大学院博士前期課程修了。現在同大学院情報科学科教授。低消費電力メディア処理アーキテクチャおよびその SoC 実装に関する研究に従事。工学博士，IEEE，電子情報通信学会，映像情報メディア学会，画像電子学会各会員。



北村 喜文（正会員）

1987 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年キャノン株式会社情報システム研究所，1992 年 ATR 通信システム研究所，1997 年大阪大学大学院工学研究科助教授，その後同大学院情報科学研究科准教授。2010 年より東北大学電気通信研究所教授。1997 年電子情報通信学会論文賞等受賞。博士（工学）。