

StudI/O：プロジェクションマッピングによる トイブロックの組み立て・記録支援

橋本 菜摘^{1,†1,a)} 椎尾 一郎^{1,b)}

受付日 2016年1月20日, 採録日 2016年9月6日

概要：実世界の立体的な建物や物体に映像を投影するプロジェクションマッピングの技術では、立体物の形状を補償した映像を投影することで歪みのない映像投影を可能にしている。本研究では、この手順を逆にし、LEGO ブロックの組み立て作業と作品の記録作業の支援を行う。正しく組み立てた場合に歪みな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し、組み立て支援をする。同様の方法を用いて、作成した作品からブロックを取り外しながら作品をデータとして保存し、作品を改良することやインターネット上で共有することができる。ユーザ自身が手作業で行う位置調整により、人や LEGO ブロックの位置検出のためのセンサは不要であるため、投影を行うプロジェクタのみというシンプルな構成で効果的な実用性の高いシステムである。

キーワード：StudI/O, プロジェクションマッピング, LEGO, 組み立て支援, 記録作業支援

StudI/O: Supporting Toy Block Assembly and Recording by Projection

NATSUMI HASHIMOTO^{1,†1,a)} ITIRO SIIO^{1,b)}

Received: January 20, 2016, Accepted: September 6, 2016

Abstract: Projection mapping uses a compensation technique to project images correctly on 3D buildings or real-world objects rather than on ordinary flat projection screens. In this study, we reverse this procedure in order to assist with toy block assembly and scanning methods. In order to assist with toy block assembly, our “StudI/O” system projects round markers on the studs of a target toy block to indicate the mounting position and direction of the block. When a user places a block in an appropriate location, the stud areas are illuminated exactly, without distortions. These markers are also useful when a user wants to disassemble his/her toy block work to scan the structure. The user can reassemble and continue the work by using the assembly instruction function of our system mentioned above. This is an effective and practical system that uses only a projector. Because the user manually adjusts the positions during the assembly and scanning task, no sensing devices to detect the position of the user and toy blocks are required.

Keywords: StudI/O, projection mapping, LEGO toy-blocks, assembly support, scanning support

1. はじめに

トイブロック（以下 LEGO[®] ブロックまたはブロック）は、想像力を働かせながら独創的な組み立てを行うことで、遊びを通して創造力を伸ばす子供向けの玩具として登場

した。その後、作品を作るために必要な部品の一式と説明書を同梱したキットとしても販売され、説明書に従えば誰もが完成度の高い作品を作れるようになった。その結果、独創的な創作を楽しむ従来の愛好者に加えて、用意されたキットの組み立てを楽しむユーザが増え、幅広い層の愛好者を集めるようになった。

近年、コンピュータ上で LEGO 作品を作成するソフトウェア（LEGO 社の LDD^{*1}など）が普及し、創作作品デー

¹ お茶の水女子大学大学院理学専攻情報科学コース
Ochanomizu University, Bunkyo, Tokyo 112-8610, Japan

^{†1} 現在、大日本印刷株式会社
Presently with Dai Nippon Printing Co., Ltd.

a) hashimoto.natsumi@is.ocha.ac.jp

b) siiio@acm.org

^{*1} <http://ldd.lego.com/>

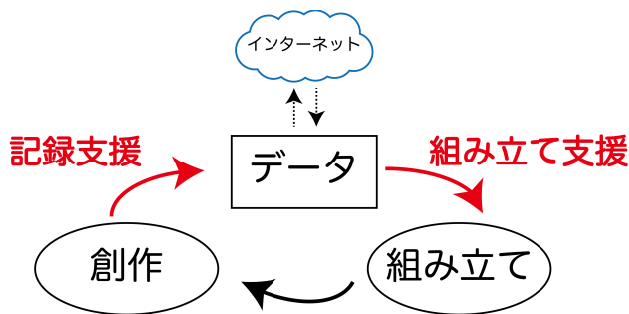


図 1 ブロック作業の流れ. StudI/O はブロック作品の組み立てと記録を支援する

Fig. 1 Flow of toy block work. StudI/O can build toy blocks and also save models as data.

タをインターネット上に投稿している愛好家が増加している。主にキット組み立てを行うユーザ層は、このデータをダウンロードして、組み立てを楽しむことができる。この流れを図 1 の「創作」「データ」「組み立て」を結ぶ矢印で示す。しかしながら、創作した LEGO 作品をコンピュータデータに変換する作業は煩雑である。LEGO 作成 CAD アプリケーションで、コンピュータ内の 3D 世界をマウスとキーボードで操作して、コンピュータ内で作品を正確に組み立て直す必要があるためである。一方、コンピュータデータから LEGO 作品を再構成する作業も多くのユーザにとって面倒である。この作業のために、コンピュータデータから図 12 のような組立手順を俯瞰図として自動生成する機能が提供されている。しかし俯瞰図と実際のブロックを見比べながら組み立てる作業は、3 次元の空間把握能力を要するため多くの初心者にとって困難である。以上のように、LEGO 作品を創作するユーザのために、簡単な操作で正確に構成ブロックを記録する機能（図 1 に示す「記録支援」）が求められている。また、LEGO 作品を組み立てるユーザのために、直感的な操作で分かりやすく組み立て支援を行う機能（図 1 に示す「組み立て支援」）が求められている。組み立て支援機能は、LEGO で創作活動を行うユーザにとっても有用である。図 1 の「組み立て」から「創作」への矢印で示すように、過去に保存された作品全体や部分を短時間で正確に復元できれば、これに対して創造的な作業を引き続き行うことが容易になるからである。創作した作品を容易にデータ化し、それを保管・配布し、必要に応じてデータからブロック作品に簡単に実体化させることができれば、創作活動を行うユーザは、創作に専念し、様々な組合せや可能性を試すことが可能になる。本研究では、次に作業するブロックの情報をユーザの手元に逐次表示することで、ブロックの記録と組み立ての支援を目指す。

トイブロックに限らず、機械や家具などの立体物の組み立て作業を支援するシステムはこれまで多数研究されている（文献 [13] など）。これらの研究では、透過型の頭部装着型ディスプレイ（HMD）やカメラを内蔵し作業空間とコ

ンピュータ情報を表示する携帯端末などを利用しているものが多い。しかし、実世界の状況を反映したリアルな AR を実現するためには、物体や人の正確な位置検出が必要であり、高価、複雑で、設置が困難なシステムとなるという問題点がある。実世界にコンピュータ情報を投影する手法は、作業支援にとどまらず、各種の情報提示やエンタテインメントに応用されている。実世界の立体的な建物や物体に映像を投影するプロジェクションマッピングではあらかじめ立体物の形状を補償した映像を投影することで、歪みのない映像投影を可能にしている。StudI/O ではこの手順を逆にし、正しく組み立てた場合にのみ歪みなく見える映像を投影することで、空間内の部品の位置や大きさを提示し、LEGO ブロックの組み立て支援を行う。

また本研究では、LEGO 作品を立体的に記録するシステムの開発も行った。市販されている 3D スキャナ製品^{*2}や画像から 3D モデルを作成する無料のソフトウェア^{*3}などを用いて LEGO 作品の 3D データを作成することもできるだろう。しかしながら、このような製品は装置が高価で 3D スキャンに関する専門知識を要するため LEGO 愛好家の人にとっては困難をとまなう作業となるだろう。さらに、これらの製品では外部から隠れているブロックの大きさや位置を検出することが不可能である。StudI/O では、前述の LEGO 組み立て支援に加えて、内部のブロックも記録する機能を実装した。これは、ユーザがブロックを 1 つずつ作品から外していく過程を、組み立て支援の際と同様のプロジェクション方法を用いて記録することで、ブロック作品を構成するそれぞれのブロックの位置や大きさを保存する機能である。

2. StudI/O

StudI/O は安価で小型軽量なプロジェクタを使用したブロック作業支援システムである。図 2 のように、ユーザが作業を行う机の上方に、光軸を鉛直方向にあわせて真下に投影するようにプロジェクタを設置する。これをコンピュータと接続し、作業支援のための情報を表示する。

StudI/O のシステム構成を図 2 を用いて説明する。プロジェクタには 854 × 480 画素、投射距離 20~300 cm の小型プロジェクタ^{*4}を使用した。使用している PC の制約のため 720p の映像を 854 × 480 の解像度にダウンコンバートして投影をしている。プロジェクタは自在アームを使って作業机上 47.5 cm に固定した。このとき机上への投影画面は 29.4 cm × 16.5 cm になる。投影画面中央には 12.6 cm × 12.6 cm の突起を備えた作業基板を置き、ユーザはこの上で LEGO 作品の組み立て、または分解を行う。

*2 <http://www.artec3d.com>

*3 <http://www.smoothie-3d.com>

*4 サンワサプライ社 400-PRJ014BK. DLP 方式。光源は LED, 85 ルーメン

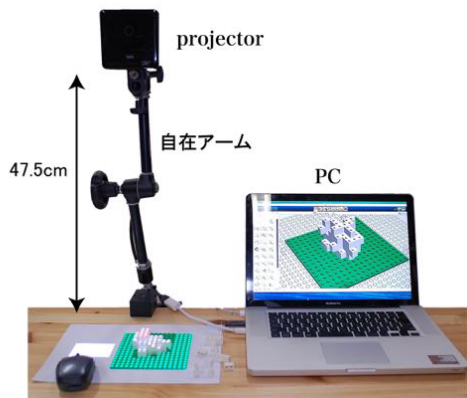


図 2 本システムの概観

Fig. 2 Overview of the system.

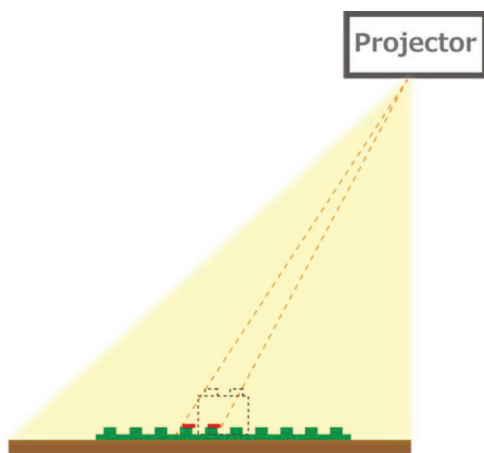


図 3 プロジェクタの光軸

Fig. 3 Optical axis of the projector.

プロジェクタは PC^{*5}に接続する．本研究では，この PC 上の Processing 2^{*6}によりアプリケーションプログラムを開発した．また，ユーザ操作のために，2つのボタンとスクロールホイールを備えたワイヤレスマウスを使用した．

2.1 投影による位置指定

本システムでは，作業基板と基板の上に組み立てられたブロックの突起先端部分の場所に，突起を正確に照射する大きさの円をプロジェクタから投影し，ブロックの位置を指定する．今回使用したプロジェクタの光軸は，図 3 に示すように投影面中央を通らず，下辺にオフセットした光学系を採用している．ブロックの組み立てを進めることで突起面がプロジェクタに近づくとき，突起面に投影される映像は縮小される．そこで，上段のブロック突起面を照射するためには，拡大したイメージを表示する必要がある．すなわち上段のブロックには，下段より拡大した円形のマークを，下段より間隔を広げて投影する必要がある．上段にブロックが設置されていない場合は，この映像は下段に投影

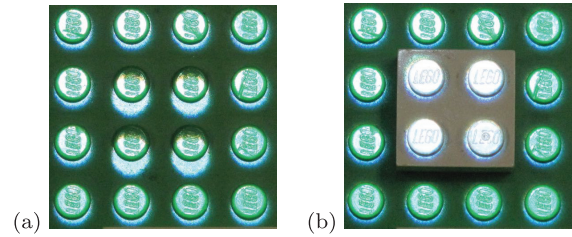


図 4 LEGO 突起への円形マーカー投影（組み立て支援）．(a) 中央の 4 突起への投影がずれている，(b) ブロックを置くと上面の 4 突起に正しく投影される

Fig. 4 Projecting round markers to LEGO studs to build. (a) Projection to central four studs is shifted. (b) When the user places the block in an appropriate location, four studs are exactly illuminated without distortion.

されるが，その場合，下段の突起とはずれた場所に投影される．このずれは，光軸から離れるほど，また，プロジェクタに近づくほど大きくなる．投影する円形マーカーは水平方向は光軸からの距離に，垂直方向はプロジェクタからの距離に比例する．これにより，組み立てたブロック作品の段数が増えるにつれて，光軸に最も近い辺を中心に投影する円のマーカーが拡大していく．よって，光軸に一番近い突起部分の最下段から 1 段目にかけてのずれが一番小さいことになる．さらに上段に進むほど，ずれは大きくなり，識別が容易になる．

LEGO 製品は，突起のある組み立て基板やブロックの上に，別のブロックを固定することで組み立てを行っている．そこで，作業エリア上方のプロジェクタから，LEGO 組み立て基板やブロックの突起 (stud) の先端部に円形マーカーを投影し，ブロック作業を行うユーザとインタラクション (I/O) することで組み立てと記録作業を支援する．組み立てを支援する投影例が図 4 である．図 4(a) は組み立て基板の突起の先端部に白い円が多数投影されているが，中央にある 4 つの突起への投影が，基板の突起位置からずれている．ユーザがずれの生じている場所にブロックを置くと，図 4(b) のように組み立てたブロックの突起先端部に正しく投影される．このように，投影が正しく行われるようにユーザがブロックを配置することで，指示に従った組み立てを進めることができる．

LEGO ブロックを記録する際は，ブロックを 1 つずつ作品から取り外しながら，ブロックの位置や大きさを記録する．組み立て支援の際に投影した白い円形のマーカーを応用して，目的のブロックの高さを記録することが可能である．組み立て基板中央部分に置かれた 2×2 の大きさのブロックの高さを記録する際の投影例を図 5 に示す．図 5(a) では，投影された白い円形マーカーが組み立て基板の突起に正しく投影され，中央のブロックへの投影がずれている．これは，組み立て基板の高さと，ブロックの高さが異なることを意味している．ユーザが中央のブロックに高さを合わ

*5 MacBook Pro. OS は Mac OS X 10.9.4

*6 <http://www.processing.org/>

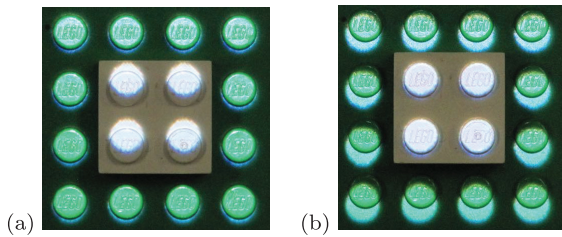


図 5 LEGO 突起への円形マーカー投影（保存支援）. (a) 中央の 4 突起への投影がずれている, (b) マウスホイールを上に乗ると上面の 4 突起に正しく投影される

Fig. 5 Projecting round markers to LEGO studs to scan. (a) Projection to central four studs is shifted. (b) When the user scrolls up to adjust the markers, four studs are exactly illuminated without distortion.

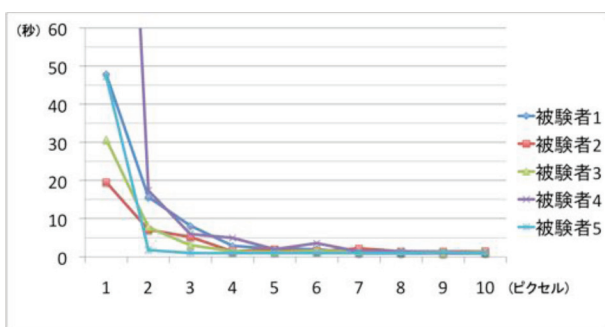


図 6 実験結果

Fig. 6 Result of the test.

せると、図 5(b) に示すようにブロック上面の 4 突起のみに正しく投影される。このように、投影が正しく行われるように調節することで、ブロックの高さを記録することが可能である。

2.2 ずれ認知実験

前述のように本システムは投影のずれを使用して作業すべきブロックの位置を提示する。そこで、ずれを利用してブロックの位置を提示できる作業空間の大きさを計るために今回の構成において人がどのくらいのずれを認知できるのか実験を行った。被験者 5 名（20 歳代の情報系学科大学生および大学院生）に以下に示す実験を行った。本システムで使用している作業基板の 256 個の突起のうち、図 4(a) のような任意の 4 つの突起において 1 ピクセルから 10 ピクセルのずれを不規則な順で 10 回表示し、提示してからずれを発見するまでの時間を計測した。この試行を被験者 1 人あたり 5 回ずつ計 50 回行い、5 名の被験者がずれを発見するのに要した平均時間を図 6 に示す。図 6 では、縦軸はそれぞれの被験者の所要時間の平均値（秒）、横軸はずれを生じさせたピクセル数を示している。被験者 1 と 2 は 5 回行った試行のうち、3 回は 1 ピクセルのずれを発見できなかった。また、被験者 4 は 5 回とも 1 ピクセルのずれを認識することはできたものの、平均で約 4 分の時間を要し

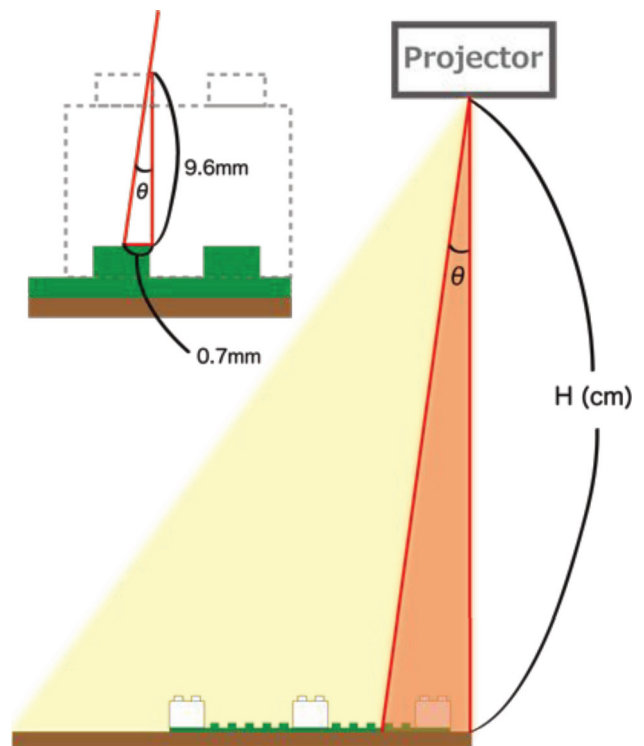


図 7 盲点となる投影範囲

Fig. 7 Blind projection area.

ていた。ずれを明らかに認知すれば、遅れることなくそれを指摘できるであろう。そこで、発見所要時間が十分短くなるずれの値を、人が容易に認知できる値と考えた。図 6 では、4 から 5 ピクセル以上のずれは遅れることなく発見されていることから、3 ピクセル（0.7 mm に相当）以内のずれは容易には認知できないと判断した。

2.3 本システムで扱える作業空間

本システムで扱える作業空間は図 3 のようにプロジェクタが照射する四角錐の中である。しかし、プロジェクタの光軸に近い範囲はずれが起こりにくいため、投影のずれを用いた指示ができない。このずれが認識できない盲点となる投影範囲は、図 7 に示す光軸の真下を中心とした半円錐形となる。盲点となる投影範囲の頂角を θ 、プロジェクタの設置高さを H とする。最下段においてずれを認識できない範囲は $H \tan \theta$ を半径とする半円の面積、つまり $\frac{1}{2}\pi(H \tan \theta)^2$ となる。本システムで使用している LEGO ブロックの高さは 9.6 mm であり、前述の実験より認識できるずれは 0.7 mm 以上であるため、 $\tan \theta$ の値は $0.7/9.6$ となる。以上より、盲点となる投影範囲の底面積は $\frac{1}{2}\pi(0.073H)^2$ となる。本システムでは $H = 475$ mm、投影面積は $294 \times 165 \text{ mm}^2$ であることから、投影面積の約 3.9% が盲点となる投影範囲であり、残りの 96.1% は作業空間として利用できる。

作業空間の底面と高さを大きくするためには、プロジェクタをより高い位置に設置すればよい。しかしながら、そ

の場合プロジェクションの解像度は低下する．前述の実験より，0.7mm 程度のずれは容易には認知されないことから，この程度の解像度，すなわち 36 dpi の解像度が得られれば十分であろう．現在の構成では約 74 dpi の解像度となっているため，現在の 2 倍（底面 58.8 cm × 33.0 cm，高さ 95 cm）の作業空間まで広げることが可能である．

以上のことから，画素数のより多いプロジェクタを使用すれば，より広い作業空間を得ることができる．一方，同じ画素数であっても画角のより狭いプロジェクタを使用すれば，作業空間を高くできる．しかし，前述の盲点となる投影範囲の割合は増加する．

3. ユーザインタフェース設計

3.1 組み立て支援

本システムを起動すると，ブロック組み立て基板の突起先端を照射する多数の白い円がプロジェクタから投影される．図 8(a) に示すように，ユーザは，組み立て基板を机上に置き，投影された円と突起先端が合うように位置を調整する．システムには机上に置かれた基板やブロックの位置を検出する機能はないが，ユーザが手で動かして位置合わせすることで，正しい位置への投影が可能になる．

次に，ユーザがマウスクリックもしくはキー押下すると，基板に最初に置くブロックの突起先端を照射する円が表示される．この段階ではブロックは置かれていないので，図 8(b) に示すように突起位置からずれた場所に円が表示される．ユーザはこの位置にブロックを置き，図 8(c) に示すように突起先端が正しく照射されることを確認する．ここでマウスクリックすると，次のブロック設置作業に進む．このようにして，再下段のブロックから順次上の段のブロックを組み立てていく．高さのある大型の作品や，下に支えのない部分などは，分割して作成することになる．このような作業手順は，従来の印刷物による組み立て説明書でも採用されており，本システムも採用した．これにより，下の段から上の段にブロックを積み上げることで組み立てを行う LEGO 作品に対応する．また，支えのない部分の組み立てに関しては，3D プリンタで使われているサポート材のように，足場となるブロックを積み上げ，後にそれを取り外す方法も可能であろう．

今回のシステムでは，設置すべきブロックの上部突起に合わせて円盤を投影している．これとは逆に，ブロックを載せる下のブロックの突起に合わせて投影することで，組み立て指示を行うことも可能である．これに対して，本システムで採用した投影方法は，ブロックを設置した後に正しい投影が行われるため，設置後に正しく設置したことを容易に確認できるというメリットがある．

3.2 作品の記録支援

LEGO ブロックの組み立て支援に加えて，StudI/O では

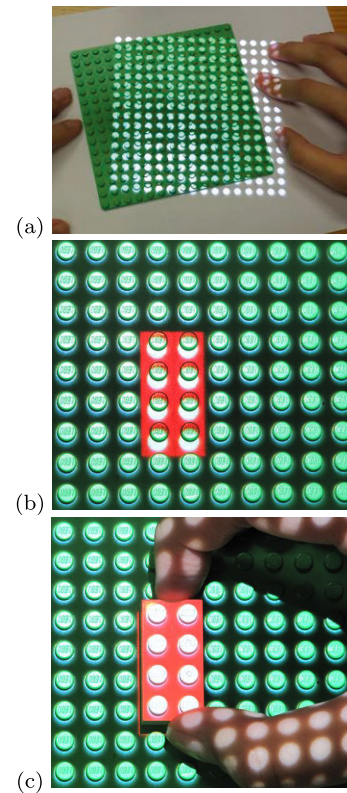


図 8 StudI/O による LEGO 組み立て手順．(a) 基板の位置合わせ，(b) ブロック位置の指示，(c) ブロック設置

Fig. 8 The LEGO assembly procedure by StudI/O: (a) the user positions a plate, (b) instructions for a block position, and (c) the user sets a block.

図 2 と同じ装置を使用して LEGO 作品の 3 次元計測を行うことができる．ユーザは，作成した作品をプロジェクタの下に置き，作品からブロックを 1 つずつ取り外しながらブロックの位置や大きさを記録していく．システムを起動すると，組み立て基板の突起先端を照射する多数の白い円がプロジェクタから投影される．図 9(a) に示すように，ユーザは作品の置かれた組み立て基板を机上に置き，投影された円と突起先端が合うように位置を調整する．組み立て基板の上に置かれた 2 つのブロックの大きさと位置を指定する方法を，図 9(b)，(c) に示す．

まず，ユーザは組み立て基板やブロックに投影されている白い円形のマークが，目的のブロックの高さに正しく投影されるように，マウスの中央部に備え付けられたホイールを上下に動かす．ユーザがホイールを上部に動かすと，図 9(b) に示すように，白い円形のマークが 1 つ上の段のブロックの高さに投影される．図 9(b) では，2 × 2 の大きさのブロックと 2 × 4 の大きさのブロックが配置されている中央 12 突起にのみ正しく投影されている．このような操作で，ユーザはブロックの高さを指定することができる．

次に，図 9(c) に示すように，マウスのドラッグ操作により赤色に強調させた部分を変更することで，ブロックの 2 次元の位置を指定する．2 つのブロックのうちの右側に

置いてある 2×4 の大きさのブロックが選択されていることを図 9(c) に示す. このように, ユーザはブロックの大きさと 2 次元の位置を指定することができる. ブロックの高さ, 2 次元の位置, 大きさを指定した後, 右クリックをしてこれらの情報をデータとして保存し, 組み立て基板からブロックを取り外す. これらの操作を繰り返し, すべてのブロックの大きさや位置を記録する. 組み立て支援で述べたようなサポート材となるようなブロックを用いれば, オーバハングしているような作品も記録することができると思われる.

3.3 データ構造

本システムが LEGO ブロックを表現するデータ形式として, LEGO 設計プログラムのオープンスタンダードである LDraw^{*7}の形式を使用した. 組み立て作業の際は, このデータから LEGO 突起部分の座標を得て, そこを照射すべく投影を行う. 作品の記録作業の際には, 指定したブロックの 3 次元の位置を LDraw のデータ形式でコンピュータ上に保存する. LEGO 作品を設計したりレンダリングするためのオープンソースプログラムは様々なものが提供さ

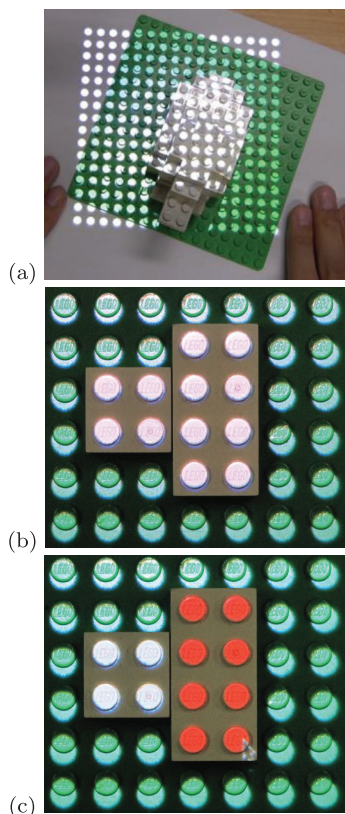


図 9 StudI/O による LEGO 作品保存作業. (a) 基板の位置合わせ, (b) 高さ調節, (c) ブロックのサイズと位置を指定

Fig. 9 Scanning LEGO procedure by StudI/O: (a) the user positions a plate, (b) adjusting the height, (c) specifying the size and location.

^{*7} <http://www.ldraw.org/>

れている. LEGO 社も図 14 に示す無料の LDD (LEGO Digital Designer) を提供しており, これも広く利用されている. LDraw と LDD ではデータ形式が異なるが, その差は軽微であり変換機能が提供されている. 本システムでは, これらの普及しているアプリケーションでデータを作成でき, またすでに流通している LEGO ブロック作成データを使用して LEGO 作品を作成することができる.

4. ユーザ実験

StudI/O の有用性を確認するために, LEGO 作品の組み立て作業と作品の記録作業の 2 つのユーザ実験を行った. 組み立て作業の実験では, 従来の紙の説明書と本システムを使って組み立てた場合を比較した. 作品を記録する作業の実験では, LEGO 作品を設計するための無料のソフトウェア LDD と本システムを比較した.

4.1 組み立て実験

組み立て支援システムの有用性を確認するために, 従来の紙の説明書と本システムを使って組み立てを行うユーザ実験を実施した. 被験者 8 名 (20 歳代女性の情報系学科大学生および大学院生) に, 図 10(a), (b) に示す LEGO 作品の組み立て作業を依頼した. 実験後に行ったアンケートの中で, 被験者のうち A, D の 2 名は LEGO ブロックを用いた組み立て作業を行ったことはこれまでないと回答した. また, 最後に LEGO の組み立て作業を行ったのが E~H の 4 名は 15 年以上前, C は 3 年前, そして B は 8 カ月前と回答した. 以上のことから, 被験者 8 名は日頃から組み立て作業を行っている LEGO 愛好家ではないといえる. それぞれの LEGO 部品数はどちらも 21 個であり, 4 段の高さの意味のない形状をした同程度の難易度の作品である. 図 11 に実験の様子を示す. 実験に先立って, 使用するプロジェクトの焦点位置を作業基板に合わせ, 基板の位置合わせを行い, そのままのフォーカス位置で実験を行った. このため上方のブロックに対してフォーカスが外れたものの, その量は微小であり, 作業に支障をきたすとの被験者からの指摘はなかった. 被験者の正面に組み立て基板を置き, その左側に組み立てに必要な LEGO 部品群を箱に入れて置いた. また, A4 用紙サイズに印刷した完

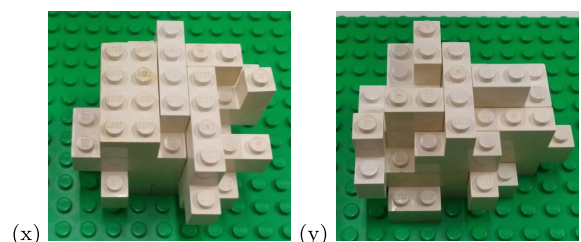


図 10 作業を依頼した LEGO 作品

Fig. 10 LEGO models we asked the participants to assemble and scanning.



図 11 組み立て実験の様子. (a) 説明書による組み立てと, (b) 本システム

Fig. 11 Assembly evaluation using (a) paper-based manual and (b) StudI/O.

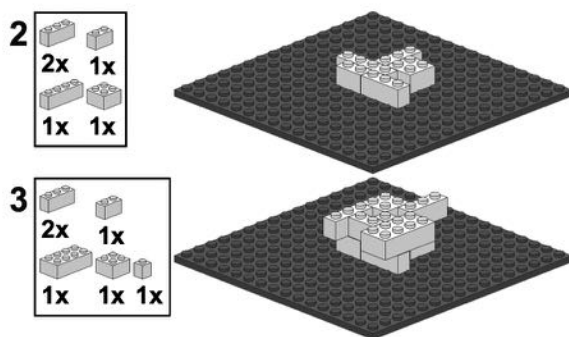


図 12 使用した組み立て説明書

Fig. 12 Example of paper-based assembly instructions.

成図を用意した。完成図、紙の説明書、ワイヤレスマウスは、被験者が作業しやすい場所に置いてもらうことにした。被験者は本システムと紙の説明書を使って、それぞれ1回ずつ、合計2回の組み立て作業を行った。従来のLEGO組み立てキットでは、紙に印刷された組み立て説明書が使われる。そこで図11(a)に示す従来方式の組み立て作業では、図12と同様の紙の説明書(全2ページ)を提供した。それぞれの組み立てに先立って、StudI/Oと紙の説明書を使って1段だけの組み立てを行う1分程度の練習を行った。紙の説明書を使って組み立てた場合と比べて、本システムではどのくらい早く間違いなく組み立てることができるのか検証した。

8名の被験者(A~H)のうちA~Dの4名は先に本システムを使い、次に説明書を使って組み立てを行った。残りの被験者のE~Hの4名は説明書を使って組み立てた後で、本システムにより組み立てた。組み立てを依頼した2つの作品の難易度は同等と考えているが、念のためにA, B, E, Fには図10の作品を(x)(y)の順に、また、C, D, G, Hには(y)(x)の順に組み立ててもらった。

8名の被験者が組み立てに要した時間を表1に示す。表では、それぞれの被験者の作業時間(s)と、本システムに

表 1 組み立て作業時間(秒)

Table 1 Assembly work time (in sec).

	Order	Manual	StudI/O	Improve
A	StudI/O → Manual	136*	135	1
B	StudI/O → Manual	148	131	17
C	StudI/O → Manual	166	148	18
D	StudI/O → Manual	371	195	178
E	Manual → StudI/O	150	120	30
F	Manual → StudI/O	214*	147	67
G	Manual → StudI/O	435	160	275
H	Manual → StudI/O	267	139	89
Ave.		235.9	146.9	84.4

* 組み立て位置に間違いあり。

より短縮された時間(s)と、これらの平均を示している。8名の被験者全員が、程度の差はあるものの、本方式においてより短い時間で作業を終了している。作業の様子から、どの被験者も2回目の作業のほうが、ブロックの取り扱いに慣れ、1回目よりスムーズに作業を進めていることが観察された。それでも、先に本方式を行った4名を含め、すべての被験者が本方式でより短時間に作業を終えている。さらに、紙の説明書による平均組み立て作業時間と本システムを用いた平均組み立て作業時間の差が統計的に有意であるか確かめるために、有意水準5%で両側検定のt検定を行った。その結果、 $t(8)=2.59$, $p=0.035$ であり、平均組み立て時間の差は有意であるといえる。

被験者A, D, Hは手順を先読みできる紙の説明書の利点を生かし、その段で使用するブロックをすべて集めたうえではめ込み作業を行っていた。それにもかかわらず、3名の被験者とも本方式の方がより短時間に作業終了した。さらには、被験者Aは第2段において位置ずれが生じており、正しく組み立てられていなかった。被験者DとFはブロックをしっかりとめ込まないで組み立てるなど、ブロック組み立て作業に不慣れな様子が観察された。特に、被験者Dにおいては最初に行った説明書による組み立ての際に、ブロックの位置を再度確認するなどして長時間の作業となった。紙の説明書による組み立ては、図12のように1方向のみからの視点に基づいた設計図を使用して組み立てるため、ブロックの位置に迷いが生じたためであると考えられる。しかしながら、次に行った本方式では手を止めることもなく順調に作業を進めたため、作業時間が劇的に改善されている。以上から、本方式は組み立てに被験者D, Fのような組み立てに不慣れなユーザに対して、作業時間短縮の効果が特に高いと考えられる。また、被験者Aのような組み立てに慣れたユーザに対しては、作業時間短縮効果は期待できないものの、組み立て間違い防止効果があり有用であるといえる。

実験終了後に被験者にアンケートとインタビューを行った。机上で組立基板の位置を手作業により調整することが

容易であったかどうかを、(1:非常にそうである, 2:そうである, 3:どちらともいえない, 4:そうではない, 5:まったくそうではない) の5段階で回答してもらったところ, A, D の2名は2:そうであると回答し, その他の6名は1:非常にそうであると回答した. 組立基板の位置調整は容易であったと判断できる. 本システムによる LEGO 組み立ては従来の印刷説明書に比べて容易であったかどうかを, 同じく5段階で解答してもらったところ, A, C の2名が2:そうであると回答し, 残りの6名が1:非常にそうであると回答したさらに, 本システムは従来方式より作業の負担が少ないかどうかを, 同じく5段階で回答してもらったところ, A が2:そうであると回答したのに対し, その他の7名は1:非常にそうであると回答した. これにより, 本システムは使いやすく負担の少ないシステムになっていたと考えられる.

本システムについて自由記述で質問したところ, 紙の説明書を用いた組み立てと比較して, ブロックを組み立てるべき場所をすぐに理解することができ, 簡単に間違いなく組み立てることができたという回答を複数得られた. また, ずれた表示を正しながら作業を進めることになるので, 間違いを正していくことの達成感が得られたとの意見もあった. 一方で, 上段でブロックの一部がオーバーハングする場面では, 配置する場所を理解するに戸惑ったという意見もあった. オーバーハングする部分に対しては投影場所のずれが大きくなり, 深い部分へ投影され, 見難くなったのが原因である. 今後は, オーバーハングであることの表示を何らかの方法で追加することで, 状況把握が容易になるよう対応したい.

また, 紙の説明書が1段ごとに組み立ての指示をまとめて行っているのに対し, 本システムではブロックを1個ずつ組み立てるよう逐次的に指示していくため, 機械的で単調な作業に陥りやすく, 組み立てることの楽しさを感じられないという意見もあった. 今回, 実験に用いた作品が意味のない形状をしていたことも, 単調作業と感じられた原因であろう. しかしブロック組み立てには, 作品を組み立てる楽しみのほかに, どこに配置するのか考えながら作業するパズル的な楽しみがあるのも事実である. 今後は, 紙の説明書のように1段ずつ組み立てるよう指示する方法も実装し, 現在の逐次的な指示方式と比較したい.

4.2 記録実験

本システムを使った作品の保存作業の有用性を確認するために, LEGO 社の LDD と本システムを使って記録作業を行うユーザ実験を実施した. 被験者8名(20歳代女性の情報系学科大学生および大学院生)に, 図10(x), (y)に示す, 前述の組み立て実験と同一のLEGO作品における, すべてのブロックの種類, 位置, 向きを記録する作業を依頼した. 実験後に行ったアンケートの中で, 被験者の

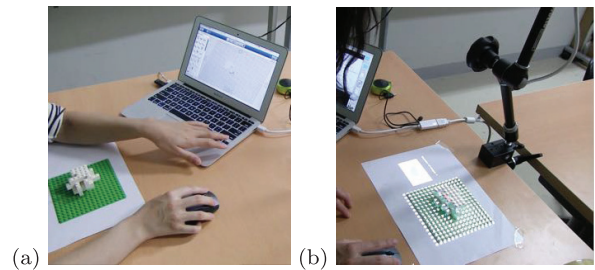


図13 記録実験の様子. (a) 無料ソフトウェアLDD と, (b) StudI/O
Fig. 13 Scanning evaluation using (a) LDD and (b) StudI/O.

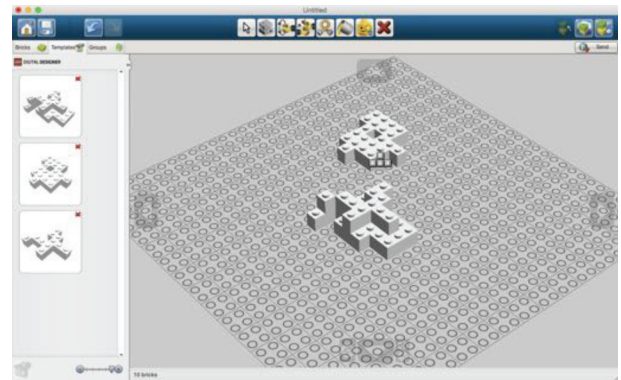


図14 LDD での使用例

Fig. 14 Example of the graphical user-interface in LDD.

うちJとLの2名はLEGOブロックを用いた組み立て作業を行ったことはこれまでないと回答した. また, 最後にLEGOの組み立て作業を行ったのがK, M, O, Pの4名は15年以上前, Iは1年前, そしてNは半年前と回答した. 以上のことから, 被験者8名は日頃からLEGO組み立て作業を行っていないため, 作業に慣れていないユーザといえる. 被験者は2つのLEGO作品をLDD(図13(a))と本システム(図13(b))を使って, それぞれ1回ずつ, 合計2回の記録作業を行った. なお, 使用するプロジェクタの焦点位置は前述の組み立て実験と同様の設定で実験を行った.

それぞれの作業に先立って, 被験者に簡単な練習を行った. LDDでは, 図14のようなGUI(グラフィカルユーザインタフェース)によってマウス操作とキーボード操作を併用して作業を行う. また, LEGO作品を上層から崩しつつ, そのブロックをLDDで記録する場合, 各層のブロック配置を「テンプレート」として一時的に保存しておくこと効率的である. そこで, 実験に先立って, ブロックを選択して移動する基本操作に加え, ブロックの一部分の配置をテンプレートとして保存しておく方法などLDDでブロックを記録する際の操作方法について被験者に説明を行った. そのうえで被験者は, 2から3個のブロックが2段に重なった状況を記録する練習を, 本システムとLDDを使って行った.

8名の被験者のうちI~Lの4名は先に本システムを使

表 2 保存作業時間 (秒)

Table 2 Saved work time (in sec).

	Order	LDD	StudI/O	Improve
I	StudI/O → LDD	364	191	173
J	StudI/O → LDD	350	197	153
K	StudI/O → LDD	683	218	465
L	StudI/O → LDD	956	211	745
M	LDD → StudI/O	510	226	284
N	LDD → StudI/O	812	160	652
O	LDD → StudI/O	731	179	552
P	LDD → StudI/O	902	259	643
Ave.		663.5	205.1	458.4

表 3 間違えたブロック数 (個)

Table 3 Number of mistake blocks.

	Order	LDD	StudI/O
I	StudI/O → LDD	5	2
J	StudI/O → LDD	5	6
K	StudI/O → LDD	1	0
L	StudI/O → LDD	11	1
M	LDD → StudI/O	13	1
N	LDD → StudI/O	0	0
O	LDD → StudI/O	0	1
P	LDD → StudI/O	5	2
Ave.		5	1.6

い、次に LDD を使って記録作業を行った。残りの被験者の M～P の 4 名は LDD を使って作品を保存した後で、本システムにより記録した。作業を依頼した 2 つの作品の難易度は同等と考えているが、念のために I, J, M, N には図 10 の作品を (x)(y) の順に、また、K, L, O, P には (y)(x) の順に作業してもらった。

8 名の被験者が作業を終えるのに要した時間を表 2 に示す。表では、それぞれの被験者の作業時間 (s) と、本システムにより短縮された時間 (s) と、これらの平均を示している。本システムを使うことで 8 名の被験者全員が、LDD を使用した場合に比べて半分程度以下の時間で作業を終えている。さらに、LDD による平均作業時間と本システムを用いた平均作業時間の差が統計的に有意であるか確かめるために、有意水準 5% で両側検定の t 検定を行った。その結果、 $t(8)=5.66$, $p=0.00076$ であり、平均時間の差はきわめて有意であるといえる。

また、間違えて登録されたブロックの数を表 3 に示す。表より、今回の評価実験において、両方の作業とも間違いなく終えた被験者は 1 名のみであった。本システムでは、マウスでのドラッグ操作によってブロックのサイズを指定する際に間違いが多く見られた、たとえば、 4×1 の大きさのブロックを 3×1 の大きさとして間違えて登録してしまうユーザもいた。このような間違いを防止するために、本システムでは、選択したブロックの形を机 (組み立て基板

の外側) に投影している。しかし、作品の記録作業が進むにつれて注意力が低下し、記録すべきブロックの形と投影されたブロックの形をあまり照合せずに作業を進めるユーザもいた。ユーザが注意深く投影されたブロックと実際に取り外したブロックを比較できるよう投影方法を工夫することでこのような種の間違ひは減らすことができるだろう。

一方で、LDD を使用した際には、LDD のユーザインタフェースを用いてブロックを他のブロックに積み重ねるときに、最も多く間違いが見られた。多くの被験者は、上段から 1 層ごとのブロックをテンプレートとして保存してから、これを積み重ねることで作品を記録していた。画面に見えている 1 層のブロックをテンプレートとして記録する作業は容易であるが、このブロックグループを重ね合わせる作業では、下部に配置されるブロックが画面から見えなくなるため、正しい位置へ配置するのが困難であったと考えられる。

組み立て実験と同様に、実験終了後に被験者に本システムの使い勝手などについてアンケートを行った。本システムによる LEGO 作品の記録作業は LDD に比べて容易であったか (1:非常にそうである, 2:そうである, 3:どちらともいえない, 4:そうではない, 5:まったくそうではない) の 5 段階で回答してもらったところ、被験者 J を除く 7 名が 1:非常にそうであると回答した。一方で被験者 J は 3:どちらともいえないと回答した。表 3 より、被験者 J のみ本システムを用いた記録作業の方が LDD を使用した場合に比べて間違いが多かった。被験者 J は実験の前に行った本システムを使用した記録作業の練習の際も、うまくブロックの形を保存できていない様子であった。J 以外の被験者も練習の段階で多少ミスはあったものの、実験の際には思うようにブロックの形を保存できていた。被験者のレベルに応じて練習量を変えることで、間違いは減ると考えられる。さらに、本システムによる LEGO 作品の記録作業は LDD に比べて作業の負担が少ないかどうかを同じく 5 段階で回答してもらったところ、J, L の 2 名が 2:そうであると回答し、残りの 6 名が 1:非常にそうであると回答した。これにより、本システムによる LEGO 作品の記録作業は、組み立て作業に比べてより使いやすく負担の少ないシステムになっていたと考えられる。また、表 3 より、本システムは LDD と比較してより正確に保存作業を行うことができるということが分かる。

また、本システムについて自由記述で質問したところ、LDD と比較してより直感的で簡単にブロックの位置を記録することができたという意見が複数得られた。LDD ではブロックを記録する際に、マウスとキーボードを組み合わせ、ズーム、回転、視点移動、ブロック指定などの複雑な操作を行う必要がある。マウスとキーボードを併用した操作により、視点やブロックを思いどおりの位置へ動かすことができないことにもどかしさを覚える被験者もいた。

一方で、現在のシステムではユーザが選択したブロックの形のみを投影しているため、すべてのブロックを取り外し終わるまで記録した作品の形を確認することができない。そのため、どこまで保存したか途中で確認することができないことに不安を感じるユーザもいた。さらに、右クリックをして保存をした際のフィードバックが現段階ではないため、保存できたかどうか分かりにくいという意見もあった。今後は保存した際に音などでフィードバックを行ったり、保存した形状を投影するなど工夫を凝らしてより良いシステムにしていきたい。

5. 関連研究

DuploTrack [2] は深度カメラ Kinect[®] を用いて大型の DUPLO[®] ブロックの組み立てを支援したり、記録したりするシステムである。Kinect の分解能の制約などにより、使用対象が固定サイズの大型ブロックに限定されているものの、ユーザが自由にテーブルに置き、手にした Duplo ブロックを検出し、前面に置いたディスプレイに CG 画像を表示して組み立て支援を行う。本研究ではブロック突起への投影を利用することで通常サイズのブロックの位置特定を行い、ブロックの組み立て・記録支援を実現した。

電子回路を内蔵した組み立てブロックを利用した研究も多数行われている。Anderson らは LEGO ブロックのように積み上げるブロックに電子回路を組み込み、3D 形状構築を支援するシステムを開発した [1]。このシステムは、電気的なプラグとジャックを兼ねたブロック接続機構を利用してブロック相互の位置を検出し、組み立てられたブロックから 3D モデルを構築し、壁や屋根などの装飾やテクスチャを加えた 3D グラフィックスを生成する。グラフィックスモデリングに不慣れなユーザでも、タンジブルなブロックを用いることで、容易に形状構築を行うことができる。ActiveCube [12] は立方体のブロックで、6 面に電極を兼ねたフックとコネクタが配置されている。ユーザがフックどうしを接続してブロックを組み上げると、ブロック形状が認識される。このシステムにより 3D モデルの検索 [3] や、人の 3D 物体認知評価 [9] などのアプリケーションが作られた。ブロック作品の形状認識や組み立て作業支援を行う目的に対して、本研究においてもブロックに電子回路を組み込むアプローチも可能であったが、通常のブロックを用いることで安価で実用的なシステムを目指した。またこれらの研究で示されたように、物理的なブロックは、3D グラフィックスのための形状構築、検索、認知を容易にするインタフェースとして有効である。通常のブロックを用いた本方式は、電子回路を組み込んだ能動的なブロックのようにリアルタイムで形状を把握できないものの、3D 形状を扱うための安価なインタフェース手段として有用であると考ええる。

パーソナルファブリケーションへの LEGO ブロック利用

も研究されている。faBrickation [6] は、3D プリンティングにおける低解像度部分を LEGO ブロックで組み立てて、高解像度部分のみを 3D プリンタ出力することでプリント時間を短縮し、ラピッドプロトタイピングを実現しようとするシステムである。3D プリンタが行うようにブロックを積み上げる作業を、本システムは効率的に行うことができるので、LEGO ブロックをファブリケーション利用する場面で有用なツールになるであろう。

AR を用いた LEGO 組み立て支援はこれまで多数研究されている。たとえば、Tang らは AR による LEGO 組み立て作業支援効果を評価し、AR システムにおいて dependent error (先に実施した手順でのエラーによって引き起こされるエラー) が減少することを示した [10]。また Robertson らは、HMD を装着した LEGO 組み立て作業において、仮想 LEGO ブロックを組み立て基板に正確に重ね合わせて表示した AR (fully registered AR) は、簡易的な AR に比べてより短い時間で組み立て作業を行えることを示した [8]。このように、実世界の位置を反映した現実感の高い AR を導入することで、より効果的な組み立て作業支援が可能になることが示されている。本方式は、位置合わせと正しいブロック操作の確認をユーザに任せることで、高精度な位置検出を必要とする AR システムに比べて装置が簡便で低コストで実現している。また透過型 HMD を使用するシステムでは、装着することを煩わしく感じるユーザも多い。これに対して、プロジェクタにより実世界の LEGO ブロックに作業手順を投影する本システムは、機器装着の負担が少なく実用的なシステムとなっている。

プロジェクタにより実世界に情報を投影して作業支援を行うシステムも多数提案されている。FabNavi [11] では、作業スペースの上にプロジェクタとカメラを置き、あらかじめ記録した組み立て手順を投影する。使用する部品を実物大で投影することで、実物と照らし合わせながら組み立てを行うことができる。しかしながら、FabNavi では遠隔作業を支援する目的で設計されているため、本システムのような正確に立体モデルを作成することには不向きである。本システムでは、部品の特徴的な部分 (ここでは突起) への投影を利用して、簡便な構成にもかかわらず精度の高い組み立て支援を行っている。また、Tojo ら [5] は、物体への投影像の歪みを利用して遠隔作業支援を実現している。Rivers ら [7] は、3 次元モデルからの粘土模型作成を支援する手法を提案している。ここでは、作成中の粘土模型をカメラを用いてスキャンし、プロジェクタにより模型上に造形の指示を投影している。これらのシステムは、本システムと同様に HMD を装着することなく利用できる特徴がある。しかしながら、物体を検出・指示するためにカメラ、センサ、プロジェクタなどの複数の機器を使用しており、使用前にこれらのキャリブレーションを実施する必要がある。本システムで使用する機器はプロジェクタのみである

ため、キャリブレーション作業の負担は少ない。

一方、実世界の物体から 3D データを作成する研究や製品は多数存在する。LDD のような 3 次元 CAD ソフトでは、マウス操作とキーボード操作により視線と物体の位置関係を調整して、画面上の立体的なモデルを操作することができる。しかし、これらの操作は一般に複雑で初心者にとっては困難である。本システムでは、ブロックの 3 次元の位置はマウス操作のみで指定することが可能であるため、操作が簡単である。PHANTOM^{*8} のような 3 次元の入出力デバイスは高価であるが、3 次元の位置を指やペンにより直感的に入力することができる。しかしながら、アームの可動範囲が限られるため、入力できる位置に制限がある。Artec3D^{*9} のようなハンディ 3D スキャナでは、スキャナを手に持ち、スキャンしたい対象物に回り込んで撮影することでスキャンすることが可能である。3D スキャンの操作が簡単で直感的であるが、計測したものから立体モデルを作成する過程は初心者にとって困難な場合がある。KinectFusion [4] は、Kinect を用いて生活空間を手軽に 3D スキャンして、物体のセグメンテーションを行い、拡張現実感インタフェースを実現しようとした。本研究では、ブロック構造のスキャンに特化することで使いやすい記録システムを目指した。また、光学的な 3D スキャニング手法では、LEGO 作品内部に設置されたブロックの種類や位置を知ることができず、外から見えない内部の構造を把握することができない。本方式はブロックを取り外しつつ記録するので、3D スキャナでは計測できない内部構造もデータとして保存しておくことが可能である。

6. まとめ

プロジェクションを利用した立体的な作品における作業支援方法を提案し、LEGO ブロックの突起部分にマーカを投影することで組み立て作業と作品の記録作業の支援を行う StudI/O を実装した。

2 つの評価実験により、従来の紙の説明書や GUI を基本としたシステムと比較して、ミスが減らし作業時間を短縮できることが確認できた。

今後は、対象ブロックの周囲への情報表示を導入して、より効果的に作業を支援していきたい。たとえば、次の段で使用するブロックをあらかじめ表示することで、組み立てる前に必要なブロックを用意することができ、作業時間の向上につながるであろう。また、組み立て作業が完了した際に魅力的な映像をプロジェクションマッピングするなどエンタテインメント性を持たせることで、子供の興味を喚起させることもできるだろう。記録機能においては、ブロックの色を効率良く記録する機能も実装したい。また部品の特徴的な部分への投影を利用する本方式を発展させれ

ば、LEGO ブロックだけでなく、これ以外のトイブロック製品、さらには一般的な家具や装置の組み立て支援も可能であろう。

参考文献

- [1] Anderson, D., Frankel, J.L., Marks, J., Leigh, D., Sullivan, E., Yedidia, J. and Ryall, K.: Building Virtual Structures with Physical Blocks, *Proc. 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '99*, New York, NY, USA, ACM, pp.71–72 (online), DOI: 10.1145/320719.322587 (1999).
- [2] Gupta, A., Fox, D., Curless, B. and Cohen, M.: Duplo-Track: A Real-time System for Authoring and Guiding Duplo Block Assembly, *Proc. 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12*, New York, NY, USA, ACM, pp.389–402 (online), DOI: 10.1145/2380116.2380167 (2012).
- [3] Ichida, H., Itoh, Y., Kitamura, Y. and Kishino, F.: Interactive Retrieval of 3D Shape Models Using Physical Objects, *Proc. 12th Annual ACM International Conference on Multimedia, MULTIMEDIA '04*, New York, NY, USA, ACM, pp.692–699 (online), DOI: 10.1145/1027527.1027685 (2004).
- [4] Izadi, S., Kim, D., Hilliges, O., Molyneaux, D., Newcombe, R., Kohli, P., Shotton, J., Hodges, S., Freeman, D., Davison, A. and Fitzgibbon, A.: KinectFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera, *Proc. 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '11*, New York, NY, USA, ACM, pp.559–568 (online), DOI: 10.1145/2047196.2047270 (2011).
- [5] Tojo, S.H.K. and Inokuchi, S.: 3-D Tele-direction Interface using Video Projector, *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.7, No.2, pp.169–176 (2002).
- [6] Mueller, S., Mohr, T., Guenther, K., Frohnhofer, J. and Baudisch, P.: faBrickation: Fast 3D Printing of Functional Objects by Integrating Construction Kit Building Blocks, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, New York, NY, USA, ACM, pp.3827–3834 (online), DOI: 10.1145/2556288.2557005 (2014).
- [7] Rivers, A., Adams, A. and Durand, F.: Sculpting by Numbers, *ACM Trans. Graph.*, Vol.31, No.6, pp.157:1–157:7 (2012).
- [8] Robertson, C.M., MacIntyre, B. and Walker, B.N.: An Evaluation of Graphical Context when the Graphics Are Outside of the Task Area, *ISMAR '08*, pp.73–76 (2008).
- [9] Sharlin, E., Itoh, Y., Watson, B., Kitamura, Y., Sutphen, S. and Liu, L.: Cognitive Cubes: A Tangible User Interface for Cognitive Assessment, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '02*, New York, NY, USA, ACM, pp.347–354 (online), DOI: 10.1145/503376.503438 (2002).
- [10] Tang, A., Owen, C., Biocca, F. and Mou, W.: Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly, *CHI '03*, pp.73–80 (2003).
- [11] Tsukada, K., Watanabe, K., Akatsuka, D. and Oki, M.: FabNavi: Support system to assemble physical objects using visual instructions, *10th Fab Lab annual meeting* (2014).
- [12] Watanabe, R., Itoh, Y., Asai, M., Kitamura, Y., Kishino, F. and Kikuchi, H.: The Soul of ActiveCube: Implementing a Flexible, Multimodal, Three-dimensional

^{*8} <http://www.ddd.co.jp/phantom/>

^{*9} <http://www.artec3d.com>

Spatial Tangible Interface, *Comput. Entertain.*, Vol.2, No.4, p.15 (online), DOI: 10.1145/1037851.1037874 (2004).

- [13] Zauner, J., Haller, M., Brandl, A. and Hartmann, W.: Authoring of a Mixed Reality Assembly Instructor for Hierarchical Structures, *Proc. 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR '03*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, p.237 (online), available from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=946248.946783> (2003).



橋本 菜摘 (学生会員)

2014 年お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業。2016 年お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程修了。現在、大日本印刷株式会社マーケティング部門に所属。



椎尾 一郎 (正会員)

1979 年 3 月名古屋大学理学部物理学科卒業。1984 年 3 月東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年 4 月日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所に入社。1997 年 4 月玉川大学工学部助教授を経て、2002 年 4 月教授。2001 年 4 月～2002 年 3 月ジョージア工科大学客員研究員。2005 年 4 月よりお茶の水女子大学理学部情報科学科教授。ソフトウェア科学会，ヒューマンインタフェース学会，ACM 各会員。工学博士。