

StudI/O : 投影を利用したトイブロックの記録と組み立て支援

橋本 菜摘^{1,a)} 椎尾 一郎^{1,b)}

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無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、人やトイブロックの位置検出のためのセンサーは不要であるため、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。

StudI/O: Recording and Instructing Toy Block Work by Projection

HASHIMOTO NATSUMI^{1,a)} SHIO ITIRO^{1,b)}

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.

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が普及し、創作作品デー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」から「組み立て」への矢印で示す。しかしながら、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

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-ku, Tokyo 112-8610, Japan

^{a)} hashimoto.natsumi@is.ocha.ac.jp

^{b)} shio@acm.org

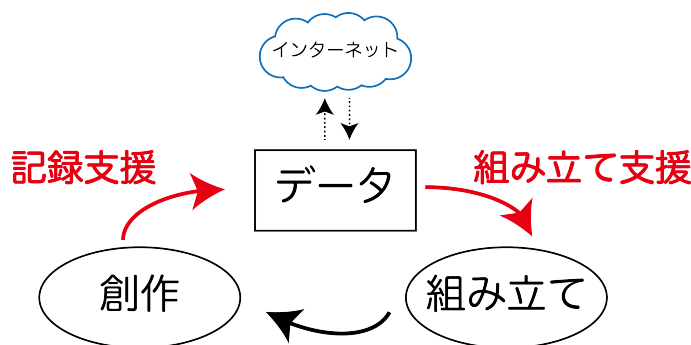


図1 ブロック作業の流れ。StudI/O はブロック作品の組み立てと記録を支援する。

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

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組立手順を自動生成する機能が、多くの LEGO ソフトウェアに提供されている。しかし、画面表示や印刷出力された手順を見ながらの組み立て作業は多くの初心者にとって困難である。そこで、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、直感的な操作でわかりやすく組み立て支援を行う機能が求められている。後者の機能は、LEGO 創作のためにも有用である。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。

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。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、作業支援に留まらず、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、歪みの無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のみ歪み無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 スキャナー製品^{*1}や画像から 3D モデルを作成する無料のソフトウェア^{*2}な

^{*1} <http://www.artec3d.com>

^{*2} <http://www.smoothie-3d.com>

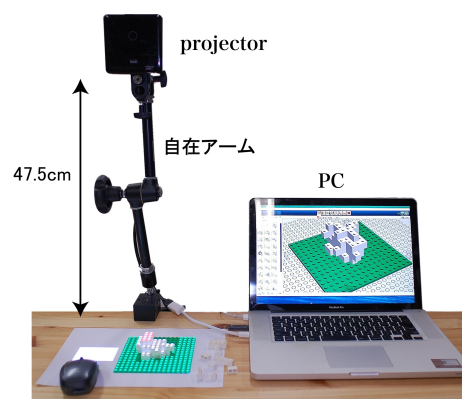


図2 本システムの概観。

Fig. 2 Overview of the system.

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伴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。

LEGO 組み立て支援を行うアプリケーション [5] に引き続き、今回、LEGO の記録を行うアプリケーションを開発し、図1に示す人々のユーザ体験を包括的に高めるシステムとして完成したので報告する。

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 x 480 画素、投射距離 20~300cm の小型プロジェクタ^{*3}を使用した。プロジェクタは自在アームを使って作業机上 47.5cm に固定した。このとき机上への投影画面は 30.0cm x 16.8cm になる。投影画面中央には 12.6 cm x 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。プロジェクタは PC^{*4} に接続する。本研究では、この PC 上

^{*3} サンワサプライ社 400-PRJ014BK. DLP 方式。光源は LED, 85 ルーメン。

^{*4} MacBook Pro. OS は Mac OS X 10.9.4.

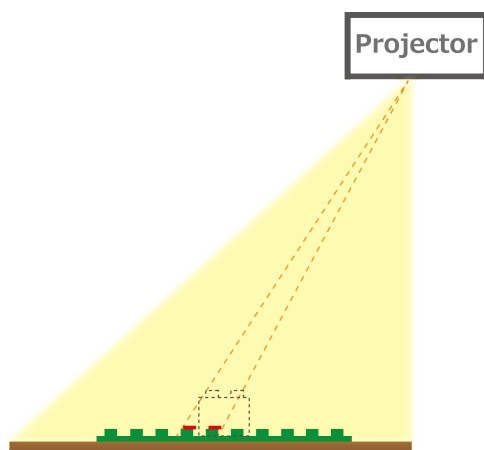


図 3 プロジェクターの光軸
Fig. 3 Optical axis of the projector.

の Processing 2 ^{*5} 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。

現在のプロジェクタ位置では、作業基板のプロジェクタから最も遠い縁に LEGO ブロックを 12 段積み上げると、プロジェクタ投影範囲外になり投影ができない。中央寄りの部分では、さらに高く積み上げることができるが、プロジェクタの最短投影距離が 20cm であることから、これ以上プロジェクタに近づけると焦点が合わない映像になる。この制約は、高さ方向に分割して組み立てる、作業中に作業基板位置を変更する、プロジェクタの高さを上げるなどの手段で解決できると考えている。また、使用したプロジェクタは焦点合わせが必要な機種であるため、ブロックの高さによって合焦状態が異なる結果となる。しかし、本方式は突起上を照射する円形マーカを投影しており、文字や細線などの精細な投影を行っていないため、段数が上がり焦点が完全に合わなくなっても、作業に大きな支障は出なかった。

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、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カを、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

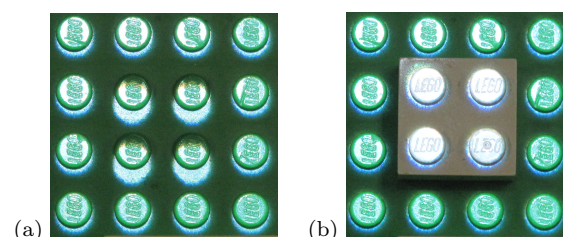


図 4 LEGO 突起への円形マーカ投影 (組み立て支援). (a) 中央の 4 突起への投影がずれている. (b) ブロックを置くと上面の 4 突起に正しく投影される.

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.

い場合は、この映像は下段に投影されるが、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。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。現在の設定では、最下段の光軸周辺 5 突起におけるずれは 0.05mm 程度である。作業者がこのずれを判定することは困難であるが、作業基板の縁部分を使用して組み立てる場面は多くはないと考えている。一方、光軸から離れた場所の最下段から 1 段目にかけてのずれは 2mm 程度であり、十分に判別可能である。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出来る。

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保存する。組み立て支援の際に投影した白い円形のマーカを応用して、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

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

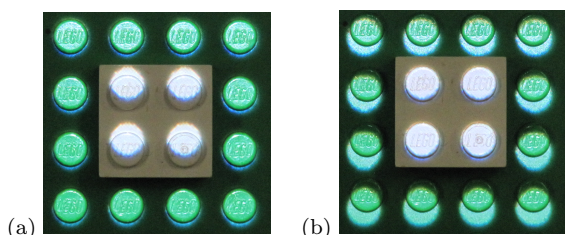


図 5 LEGO 突起への円形マーカ投影 (保存支援). (a) 中央の 4 突起への投影がずれている. (b) マウスホイールを上を動かすと上面の 4 突起に正しく投影される.

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.

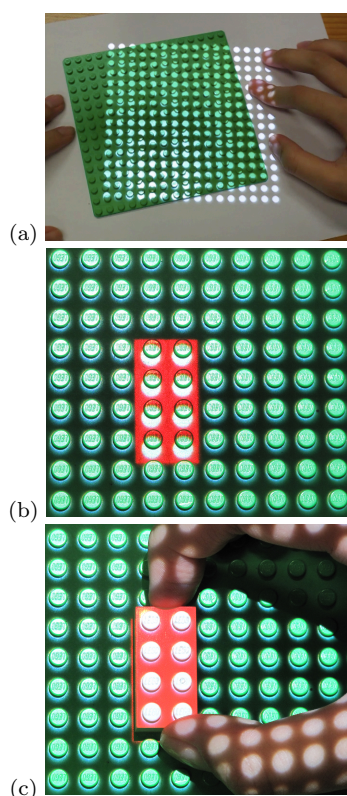


図 6 StudI/OによるLEGO組み立て手順. (a) 基板の位置合わせ, (b) ブロック位置の指示, (c) ブロック設置

Fig. 6 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.

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 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 6(a) に示すように, ユーザは, 組み立て基板を机の上に置き, 投影された円と突起先端が合うように位置を調整する. システムには机の上に置かれた基板やブロックの位置を検出する機能は無いが, 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 6(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 6(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, 下に支えの無い部分などは, 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いて, 本システムもこの手順によりほとんどの LEGO 作品を組み立てることができると考えている. また, 支えの無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形のマーカを投影している. 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メリットがある. また, 多数のユーザを対象に操作を体験してもらったところ, 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, 作業を進める動機を向上させる効果があるとの意見を得た.

2.3 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 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 7(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の上に置き, 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 7(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カが, 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

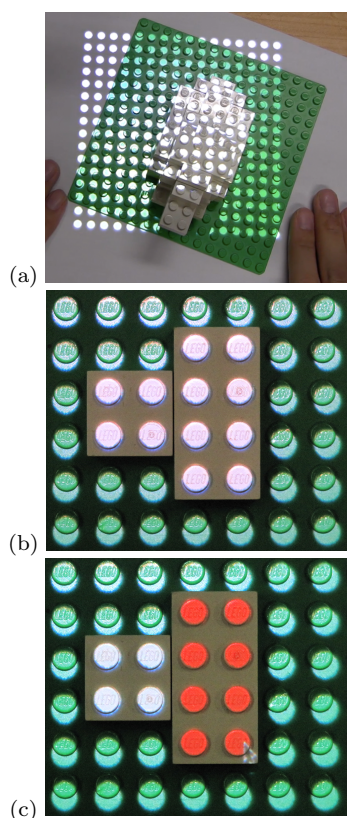


図 7 StudI/O による LEGO 作品保存作業. (a) 基板の位置合わせ, (b) 高さ調節, (c) ブロックのサイズと位置を指定

Fig. 7 Scanning LEGO procedure by StudI/O: (a)the user positions a plate, (b)adjusting the height, (c)specifying the size and location.

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 7(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 7(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 7(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 7(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, オーバーハングしているような作品も記録することができると考えられる.

2.4 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^{*6} 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れている. LEGO 社も無料の LDD(LEGO Digital Designer)^{*7} 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.

3. ユーザ実験

StudI/O の有用性を確認するために, 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, 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, 平均で 38% 作業時間が短縮した. また, 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, 平均で 69% 作業時間が短縮したことを確認した. 以上の結果から, 本システムは紙の説明書を使用した組み立て作業や GUI を使用した作品保存作業と比較して使いやすく負担の少ないシステムであると考えられる.

4. 関連研究

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 (先の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 [6]. 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 [4]. 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.

DuploTrack[1] 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,

^{*6} <http://www.ldraw.org/>

^{*7} <http://ldd.lego.com/>

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、プロジェクターにより実世界の 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。

プロジェクター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[7] 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出来る。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、東城ら [2] 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 [3] 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、作業中の粘土模型をスキャンし、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、これらのシステムは物体を検出するためにカメラやセンサを使用しており、使用前にキャリブレーションをする必要がある。

一方、3D データを作成する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を併用することで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。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 スキャナーでは、スキャナーを手に持ち、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。さらに一般的な 3D スキャナーでは、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。さらに、ブロックを取り外しつつ記録するので、3D スキャナーでは計測できなかった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。

5. 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、ミスを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。作品の記録機能においては、ブロックの色を効率良く保存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て、LEGO ブロックだけではなく、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へも展開したい。

参考文献

- [1] Gupta, A., Fox, D., Curless, B. and Cohen, M.: Duplo-Track: A Real-time System for Authoring and Guiding Duplo Block Assembly, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 389–402 (2012).
- [2] Kenji Tojo, S. H. 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).
- [3] Rivers, A., Adams, A. and Durand, F.: Sculpting by Numbers, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6, pp. 157:1–157:7 (2012).
- [4] Robertson, C. M., MacIntyre, B. and Walker, B. N.: An Evaluation of Graphical Context when the Graphics Are Outside of the Task Area, *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR '08, pp. 73–76 (2008).
- [5] 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, 第 22 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2014), 日本ソフトウェア科学会, pp. 37–42 (2014).
- [6] Tang, A., Owen, C., Biocca, F. and Mou, W.: Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pp. 73–80 (2003).
- [7] Tsukada, K., Watanabe, K., Akatsuka, D. and Oki, M.: FabNavi: Support system to assemble physical objects using visual instructions, *10th Fab Lab annual meeting*, Barcelona, Spain (2014).

^{*8} <http://www.smoothie-3d.com>

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