

StudI/O : プロジェクションマッピングを用いたトイブロック組み立て 支援システム

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、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。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 : Supporting Toy-block Assembly by Projection

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

Abstract: Projection mapping uses a compensating technique to project images correctly even on three-dimensional buildings or real-world objects, other than ordinary flat projection screens. In this study, we reverse this procedure to provide toy-block assembling instructions to a user. Our "StudI/O" system projects round markers on studs of a target toy-block to indicate the mounting position and direction. When the user places the block in an appropriate place, the stud areas are exactly illuminated without distortions. This is an effective and practical system that uses only a projector, and no sensing devices to detect the position of the user and toy-blocks are required, because the user adjust the positions manually during the assembly task.

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や説明書を同梱したキットとしても販売されるようになり、子供だけでなく大人も楽しめるものになってきた。これにより、ブロックの使用目的は単なる積み木玩具の域に留まらず、巨大な彫像作品やモザイクで絵を作ったり、実際に機能する複雑な機械を作ったりと表現の幅が広がっている。しか

し、紙やコンピュータ画面上の説明書を見ながらの作業は多くの初心者にとって煩雑で面倒であり、キットやアート作品などの作成を困難にしている。一方、コンピュータ上で LEGO 作品を作成するソフトウェアの普及に伴い、このソフトウェアにより自作した作品データをインターネット上に投稿している愛好家も多い。組み立て手順を支援するインタラクティブシステムが提供されれば、初心者でも容易に LEGO 組み立てが可能になるとともに、インターネット上で共有されている膨大な LEGO 作品を短時間で再現することが可能になるであろう。

トイブロックをはじめとする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

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) siiio@acm.org

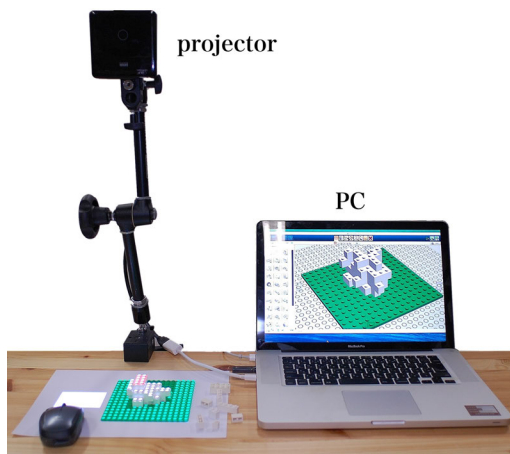


図 1 本システムの概観。LEGO 設計ソフトで設計した作品の組み立て手順を投影する。

Fig. 1 Overview of the system. Projecting assembly procedure of the model designed by LEGO building software.

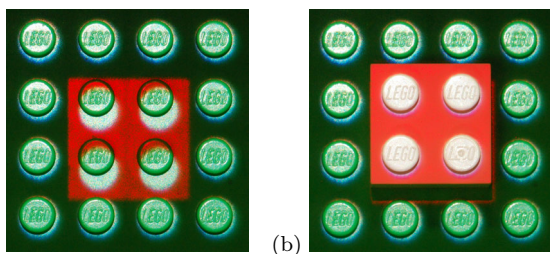


図 2 LEGO 突起への円形マーカー投影。(a) 中央の 4 突起への投影がずれている。(b) ブロックを置くと上面の 4 突起に正しく投影される。

Fig. 2 Projecting round markers to LEGO studs. (a) A projection to central 4 studs is shifted. (b) When the user places the block in an appropriate place, 4 studs are exactly illuminated without distortions.

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保証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。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、空間内の部品的位置や向きを提示する方法を提案し、LEGO ブロックの組み立て支援を行う StudI/O を実装した。

2. StudI/O

StudI/O は安価で小型軽量のプロジェクタを使用した LEGO 組み立て支援システムである。図 1 のように、ユーザが組み立て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、組み立て支援のための情報を表示する。

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、組み立て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作業を支援する。投影の様子を示したものが図 2 である。図 2(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 2(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。

本システムでは、これから設置するブロックの突起に投影を行った。一方で、設置するブロックの土台になる下のブロックの突起にマーカーを投影し、手順を指示することも可能である。土台ブロックに投影する方式では、突起に合致した正しいプロジェクションがブロック設置前に行われ、本方式では、設置後に正しくプロジェクションされる。本方式は、ブロック設置後に作業が正しかったことを確認できる利点があると考えている。また、実際に使用したところ、ずれた投影状態をブロックの設置により正していく作業には達成感が伴い、組み立て作業を気持ち良く行えるという意見を多くのユーザから得ることができた。

3. 実装

LEGO 作品の組み立てを支援する StudI/O のシステム構成を図 1 に示す。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^{*1}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 48.5cm 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、ユーザはこの上に LEGO 作品を組み立てる。

プロジェクタは PC ^{*2} に接続し、この PC 上の Processing 2 ^{*3} によりアプリケーションプログラムを開発した。Processing2 によるアプリケーションは、組み立て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に、突起と同じ大きさの円をプロジェクタから投影する。市販のプロジェクタの多くは、光軸が投影面中央を通らず、投影

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

*2 MacBook Pro. OS は Mac OS X 10.9.4.

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

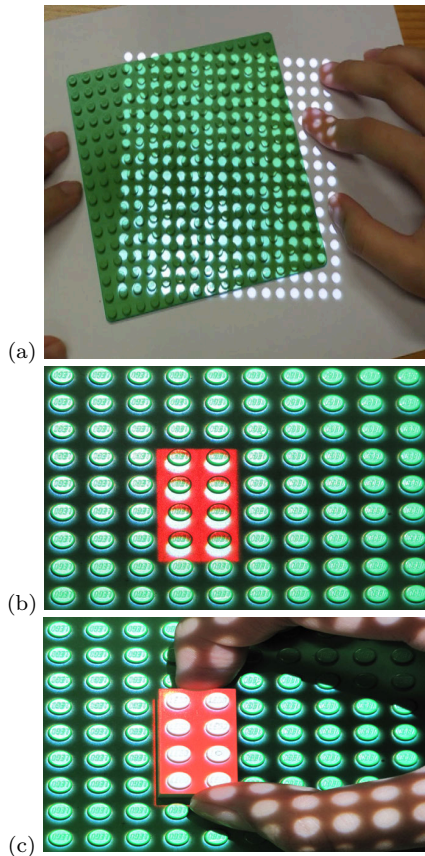


図 3 StudI/O による LEGO 組み立て手順. (a) 基板の位置合わせ, (b) ブロック位置の指示, (c) ブロック設置

Fig. 3 The LEGO assembly procedure by StudI/O. (a)Positioning a plate by the user. (b)Instructions of a block position. (c)Set a block.

面の下辺または上辺にオフセットした光学系を採用しているため、鉛直方向に設置したプロジェクタの光軸上以外の広い範囲で、高さ方向が異なると投影すべき場所が異なる。各突起から光軸までの距離を元に、突起先端に正しく投影するよう位置調整を行っている。

基板上に組み立てられた LEGO ブロックを表現するデータ形式は、LEGO 設計プログラムのオープンスタンダードである LDraw^{*4}の形式を使用した。このデータからブロックの突起部分の座標を計算し、投影を行う。LEGO 社も無料の LDD(LEGO Digital Designer)^{*5}を提供しており、広く利用されている。LDraw と LDD のデータ形式は異なるが、その差は軽微であり、互換性があるためデータ形式の変換も可能である。そこで、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作成され、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出来る。

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 3(a) に示すように、ユーザは組み立て基板を机の上に

*4 <http://www.ldraw.org/>

*5 <http://ldd.lego.com/>

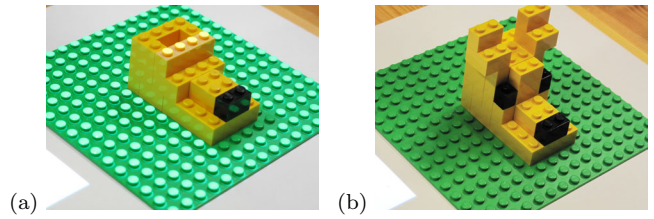


図 4 StudI/O により作成した作品例. (a) 制作過程 (b) 完成図
Fig. 4 An example made by StudI/O. (a)Making (b)Completion

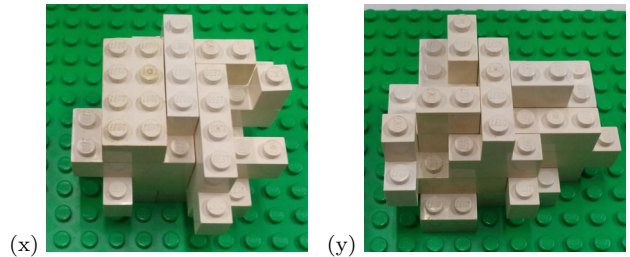


図 5 作成を依頼した LEGO 作品.
Fig. 5 The LEGO models I asked to assemble.

置き、投影された円と突起先端が合うように位置調整を行う。本システムは、プロジェクタのみで組み立ての指示を行うため、机の上に置かれた基板やブロック、さらにユーザの手などの位置を検出するセンサーなどは無い。しかし、ユーザが組み立て基板を手で動かして位置合わせを行うことで、正しい位置への投影が可能になる。ユーザはマウスクリックをすることで設置作業を進め、最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。

本システムにより作成した作品例を図 4 に示す。これは、キットとして販売されている作品を元に作った犬の頭部である。

4. ユーザ実験

StudI/O 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行った。20 歳代の情報系学科大学院生 4 名の被験者に図 5(x)(y) に示す LEGO 作品の組み立て作業を依頼した。どちらの作品も部品数は 21 個で、4 段の高さからなる意味の無い形状をした同程度の難易度の作品となっている。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い、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出来るのか検証した。

被験者 A,B,C,D のうち A,B の 2 名は先に本システムを使い、次に紙の説明書を使って組み立てを行い、C,D の 2 名は先に紙の説明書を使い、次に本システムを使って組み立てを行った。組み立てを依頼した 2 つの作品はどちらも同程度の難易度の作品であると考えているが、念のため A,C には図 5 の作品を (x)(y) の順で、B,D には (y)(x) の

表 1 組み立て作業時間 (秒).
Table 1 Assembly work time(sec).

被験者	順序	紙 (従来)	投影 (本方式)	改善度
A	投影→紙	136*	135	1
B	投影→紙	166	148	18
C	紙→投影	150	120	30
D	紙→投影	435	160	275
平均		222	141	81

* ブロック取り付け位置に間違い有り.

順で組み立てを行ってもらった.

4名の被験者が組み立てに要した時間を表1に示す. それぞれの被験者の作業時間 (s) と本システムによる改善度 (s), これらの平均を表している. 4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.

被験者 A は, ブロック組み立て作業に慣れているのか, どちらのタスクも短時間で終わっている. 特に, 紙の説明書を使って組み立てを行った際に, 1段で使用するブロックを持ちながら, ブロックの配置作業を行っており, 効率的に組み立てを行っていた. それにも関わらず, 本方式の方が短時間に作業を終了しており, さらに紙の説明書の作品では, ブロックの取り付け位置に間違いがあり, 出来上がった作品は説明書とは異なったものであった. 被験者 D は, ブロック組み立て作業に不慣れな様子で, 紙の説明書による組み立てでは, 配置するブロックの位置に迷いが生じ, 長時間の作業となった. しかしながら, 本方式では手を止めることなく順調に作業を進めることが出来たため, 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不慣れな初心者に対して, 作業時間短縮の効果が特に高いと考えられる. また, 組み立てに慣れているユーザに対しては, 初心者ほどの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に効果があると考えられる.

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, 紙のアンケートを行った. 本システムによる LEGO 組み立て作業は従来の紙の説明書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:どちらとも言えない, 4:そうではない, 5:全くそうではない) の5段階で回答してもらったところ, B,C,D の3人は1:非常にそうであると回答し, A は2: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,B が1:非常にそうであると回答し, C,D が2: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.

5. 関連研究

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は多数提案されている. FabNavi[1] 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. ClayMore[2] は, 粘土による造形行為を支援するシステムである. 深度カメラとプロジェクタを組み合わせて, 手本となる粘土作品と比べて差異のある部分をプロジェクションによる光で知らせる. また, 東城ら [3] 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. 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という特徴があるが, 精密な位置指定, とくに立体的な位置指定が十分に実施されていない, もしくは精度が低い問題点がある. このため, 立体的な組み立てを行う必要のある LEGO 組み立てでは, 十分な効果や精度を期待できない. プロジェクションを利用して作業支援を行う従来研究と比較した本システムの特徴は, 部品の特徴的な部分 (ここでは突起) への投影を利用した点である. これにより, 組み立て設計図と実体の差を感度良く検出し, ユーザに伝えることが可能になり, 立体的な LEGO 組み立て作業を, 簡便な構成にもかかわらず効果的にかつ精度良く支援する.

6. まとめ

投影を利用した 3D 組み立て作業支援手法を提案し, 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支援を行う StudI/O を実装した. ユーザ実験により, 従来の紙の説明書に比べて使いやすく負担の少ない作業が可能であり, 作業時間が短縮されることを確認した. 今後は, ユーザ評価で得られた意見を参考に, 紙の説明書のように1段階ずつ組み立てるよう指示する方法も実装し, ユーザが組み立て方法を選択できるように改良したい. また, 組み立てを行っていくにつれ, 1つのストーリーが完成したり, 組み立てが完了した作品に対してプロジェクションマッピングを行うなどエンタテインメント性をもたせることも検討したい. そして, LEGO ブロックにとどまらず, その他のトイブロック製品や, 家具などの組み立ても支援していきたい.

参考文献

- [1] Koji Tsukada, Keita Watanabe, Daisuke Akatsuka and Maho Oki: *FabNavi: Support system to assemble physical objects using visual instructions* 10th Fab Lab annual meeting(2014)
- [2] 若園祐作 and 暦本純一: *ClayMore:粘土を用いた造形の支援情報処理学会シンポジウムシリーズ, インタラクション論文集* 147-152(2013)
- [3] 東城 賢司, 目浦 慎作 and 井口 征士: *プロジェクタを用いた 3次元遠隔指示インタフェースの構築* VR 学会論文誌, vol.7.2 169-176(2002)