

レゴブロックによる影のトリックアート生成システム —光源位置探索によるジャギーの低減—

生田寛和^{†1} 高井昌彰^{†2} 高井那美^{†3}

芸術作品の一つに影を用いたトリックアートがある。これは作品の立体形状を見ても、それが何を意味するものか容易に判別できないが、ある方向から作品に光をあて、背景に影をつくることによって、意図する様々な形状を映し出すものである。本研究では、目標とする異なる複数の影画像を入力として与え、これをもとに一般的なレゴブロックを用いて実際に立体造形可能な 3D モデルを出力するモデリングシステムを開発した。この 3D モデルに対して異なる方向から光を当てることにより、複数の目標を近似した影画像を映し出すトリックアートとなる。異なる 4 方向の光源を用いたアート作品の生成が可能であるが、ブロックサイズに起因する影画像のジャギーを最小化するため、最適な光源位置を探索する手法を導入している。本システムにより実際に構築したレゴブロック作品をもとに、システムの有効性及び影画像の形状再現性について評価する。

LEGO Block Modeling System to Make Trick Art Using Shadows - Minimizing Jaggies by the Light Source Position Search -

HIROKAZU IKUTA^{†1} YOSHIAKI TAKAI^{†2} NAMI TAKAI^{†3}

Trick art using shadows is a kind of modern work of art. Looking at the three-dimensional shape of the work object, it is not easy for spectators to visually understand what the work means. But, by lighting the work object from the certain directions, its shadows on the background represent some different meaningful shapes. In this paper, we have developed a LEGO block modeling system to make trick art using shadows. The system is given the shadow images of three or more different targets, and then generates a 3D model which can be actually realized by using general LEGO blocks. By lighting the object from different directions, the different shadows appear which approximates the target images. To minimize jaggies of shadow boundary which stems from the LEGO block resolution, we have introduced a greedy search method for the best lighting positions. We have evaluated shape similarity and effectiveness of the system.

1. はじめに

近年、影を用いたトリックアートが注目を集めている。これは、その立体形状を直接見ただけではどのようなものか容易に判別できないが、作品にある方向から光を当て、背景に影を作ることにより、意味のある形状を創出するのである。日本では福田繁雄の“ランチはヘルメットを被って”[1]、海外では Tim Nobel と Sue Webster の HE/SHE [2] や Gödel, Escher, Bach の Shadow Cube [3] が有名である。しかし、影のトリックアートを実際に製作する場合、立体形状を構成する素材の選択や構築作業等の困難さから、興味を持った初心者が容易に製作し得るとは言い難い。

本研究では、目標とする異なる複数の影画像を入力として与え、これを基にレゴブロックを用いて立体造形可能な 3D モデルを出力するモデリングシステムを開発した。形成された 3D モデルに対し、いくつかの方向から光を当てることにより、目標とする影を映し出すトリックアートとなる。

2. 先行研究との関連性

異なる複数の影画像を入力として与え、それを影として映し出す 3D モデルを製作するシステムには、Niloy J. Mitra と Mark Pauly の Shadow Art がある [4]。



図1 Shadow Art

この Shadow Art では、はじめにユーザが光源の位置、大きさ、向きを対話的に設定した後、ある初期形状の 3D モデルに対して入力画像によるくり抜き処理を行う。形成された 3D モデルから実際に得られた影と元の入力画像に形状の違いが見られる場合には、違和感がない範囲内で入力画像を変形させる。このような入力画像の修正処理によって、1つのモデルから複数の影を映しだしている。

得られた 3D モデルを実際のトリックアートとして製作する具体的方法としては、3D プリンタを用いる、個別の 3D

^{†1} 北海道大学大学院情報科学研究科
Graduate school of Information Science and Technology, Hokkaido University
^{†2} 北海道大学情報基盤センター
Information Initiative Center, Hokkaido University
^{†3} 北海道情報大学
Hokkaido Information University

モデルを糸で吊るす、透明なキューブに3Dモデルを埋め込む等の手法が示されているだけであり、トリックアートに興味を持った初心者が実際にこれらを作るにはハードルが高いと言える。

そこで、本研究では Mitra らの Shadow Art とは別のアプローチ方法として、一般的なレゴブロックを素材に形状を構築することを前提に、入力画像ではなく3Dモデル側を変形させ入力画像に対して影を近づけていく手法を提案し、そのモデリングシステムの実装と評価を行う。

ブロック配置の最適化には、レゴブロックの連結性を考慮した焼きなまし法を適用し、異なる4方向からの影画像生成に対応可能である。本システムにより実際に構築したレゴブロック作品をもとに、システムの有効性や形状再現性について評価する。また、使用するブロックサイズに起因する影画像のジャギーを低減するため、最適な光源位置を探索する手法を実現している。

更にシステムによって得られた3Dモデルを実際にレゴブロックとして作成するための製作支援として、ブロックの層ごとの設計図出力やブロック単位のエディット機能等を実現している。

3. 再現率の定義

本システムでは得られた影と入力画像がどの程度相似であるかを評価するため、再現率(0~100の範囲を有する)を定義した。この再現率はテンプレートマッチングに基づいており、画像のエッジ部分のマッチングを重視するとともに、画像の枠外にブロックが置かれる場合のペナルティを考慮している。これは、画像が似ているかどうかを判断する際、エッジ部分の正否は画像の内側部分の正否よりも重要であると考えたためである。

個々の入力画像に対する再現率の積を3Dモデル全体の再現率とし、この値が高まるように3Dモデルの生成とブロックの追加・削除による修正を行い、得られる影を入力画像に近づけていく。



図2 再現率

4. システムの構成

本システムの全体の構成を図3に示す。入力として複数の二値画像データと、3Dモデルの大きさ(ブロックの解像度)が与えられると、球形の初期形状で構成された3Dモデル

に対し、システムによって最適な光源の位置を自動決定し、その位置からシルエット法を適用する。次に、シルエット法で残った共通部分に対して、全体の再現率が高まるようブロックの追加・削除による配置の最適化を行った後、実際にレゴブロックで組み上げることが出来るようにするためのレゴブロック化処理を行う。以上の3つのステップを行い、トリックアートの3Dモデルと設計図を出力する。

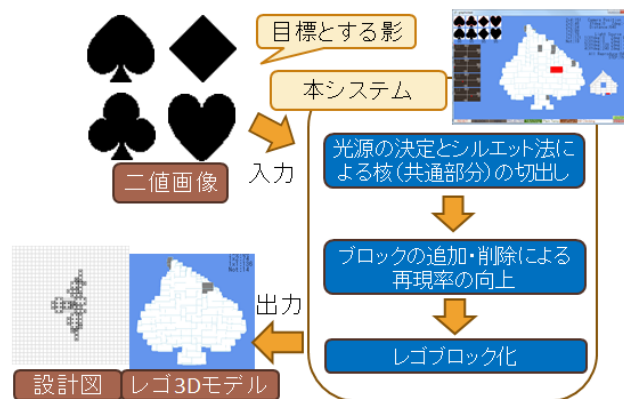


図3 システムの構成

4.1 光源の位置決定とシルエット法の適用

はじめにレゴブロックの1×1ブロックを最小単位とした球の3Dモデルに対して、光源位置からシルエット法を適用する。この際光源は、複数の光源の干渉が最も少なくなる位置、もしくは探索によってシルエット法で得られる全体の再現率が最も高くなる点に自動決定される。

・光源の干渉が最も少なくなる位置

入力画像の枚数に応じて光源位置を決定する。図4のように、入力画像が2~3枚の場合は各光源からの光線が直交するように、4枚の場合は正四面体の各頂点から中心へ向かうような光源の配置となる。なお、直交する光源設定だけでは、影のジャギーが大きくなる場合がある。

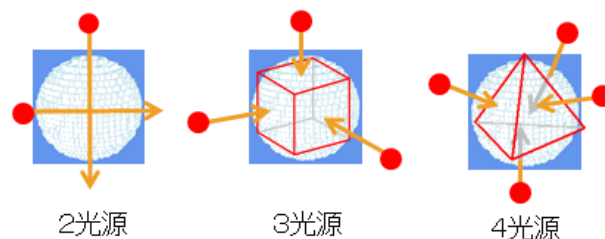


図4 干渉の少ない光源の位置

・シルエット法で得られる再現率が最も高い光源位置

まず1枚目の二値画像を用いて、図5左の斜線部の範囲内に光源を設定してシルエット法を適用した際に最も再現率が高くなる場所を探索し、これを最初の光源位置とする。次に残り全ての二値画像を用いて、周囲45度間隔でシルエット法のみを用いて最も全体の再現率が高くなる光源の位

置を探索する。最後に得られた光源位置の周囲を、間隔を狭めて更に探索し、最も全体の再現率が高くなる位置の組み合わせを光源の位置とする。

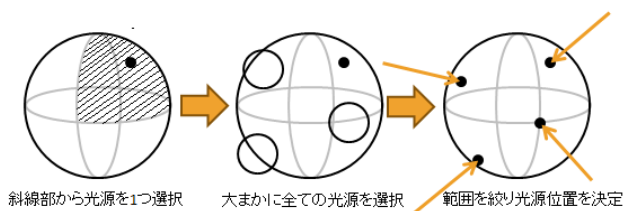


図5 最適な光源位置の探索

決定された光源を用いてシルエット法によって得られた3Dモデルは、全二値画像の共通部分となっているため、この3Dモデルを出発点としてブロックの追加・削除を行い、配置の最適化を進める。

図6はシルエット法を適用した初期段階の結果を示している。図の右上のアルファベット(A, B, C, D)は入力として与えられた二値画像であり、右下は3Dモデルから得られた影のイメージとそれらの再現率である。

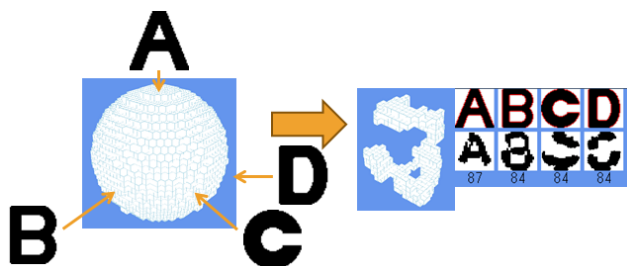


図6 シルエット法の適用

4.2 ブロックの追加・削除による最適化

シルエット法で得られた3Dモデルに対して、レゴブロックの1×1ブロックに相当する大きさのブロックを単位とした追加・削除を繰り返し行うことで、モデルの影を入力画像に近づけていく。

ブロックの配置場所の探索においてはブロックの連結性を考慮する。各ブロックに六方向で隣接している部分を追加可能な場所、削除してもブロックが空間に孤立しない部分を削除可能な場所とし、これを近傍とみなした探索問題として再現率が最も高くなるよう最適化を行う。最適化手法には焼きなまし法を用いた。焼きなまし法のパラメータは更新回数を500、初期温度を1とし、更新ごとに係数0.996を温度に乗じてアニーリングを行う。

4.3 レゴブロック化

最適化された3Dモデルはレゴブロックの1×1サイズを基本として構築されているため、実際の作品を組み立てるには様々な形状のレゴブロックに変換する必要がある。本研究ではレゴブロックの制作に一般的な1×1, 1×2, 1×3, 2×2, 2×3, 2×4の6種類のレゴブロックを扱う。

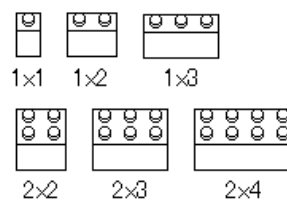


図7 使用するレゴブロックの種類

本システムは、3Dモデルをレゴブロック化する研究[5]の手法をもとに、2×2幅の格子状に区切られた空間を奇数層・偶数層で1×1だけシフトし、この格子を基準に2×2以上の大きさのブロックを配置する。奇数層・偶数層で配置するブロックの向きを変え、未接続部分が減少するようレゴブロックへの変換と連結判定を行う。未接続部分が残った場合には、ブロックの向きの変更や未接続部分の周辺のレゴブロックを組み換えることで未接続部分を減らす。

4.4 制作支援

実際に影のトリックアートを製作する上で作業支援となる以下の機能を実装している。

・ブロックのクラスター分けと未接続部分表示

レゴブロックのモデルがいくつかのクラスターに分断されたり、未接続部分が現れた場合、これらを色分けによって可視化し、作品の組み立て作業を視覚的に支援する。

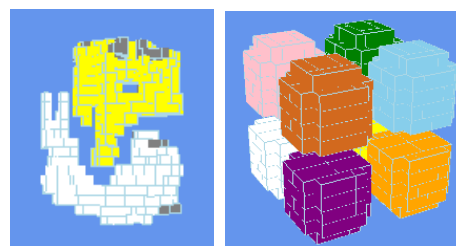


図8 未接続部分及びクラスター毎の色分け

・ブロック単位のエディット機能と設計図出力

得られた3Dモデルに対してポインタを用いてブロック単位の追加・削除処理を行い、ユーザが未接続部分を修正することができる。またモデルの層ごとのブロック配置図の出力も可能であり、この設計図を利用することで容易にトリックアートの組み立てを行うことができる。

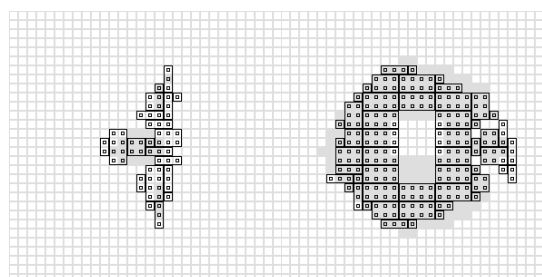


図9 トリックアート作品の設計図

・ 3D プリンタ対応形式での出力

モデルデータの STL 形式での出力も可能であり、得られた 3D モデルを 3D プリンタによって構築することもできる。図 10 左は本システム上での 3D モデル、右は XYZprinting[6]の提供している 3D プリンタ (ダヴィンチ 1.0) 用のソフトウェア (XYZware) 上にこの 3D モデルを読み込んだ結果である。

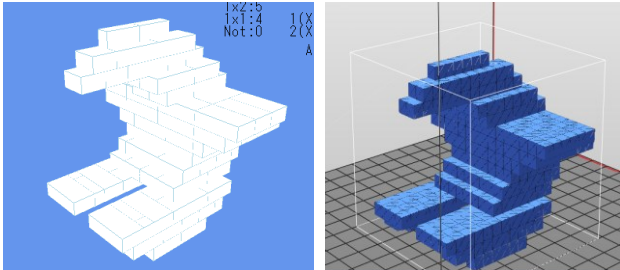


図 10 3D プリンタ(XYZware)へのデータ出力

さらに、実際の影のように輪郭のぼけたリアルな影を表示する機能、層ごとのブロック配置表示機能や、得られた 3D モデルデータのファイル保存機能等を実現しており、影のトリックアート製作を支援する上で実用的な諸機能を提供している。

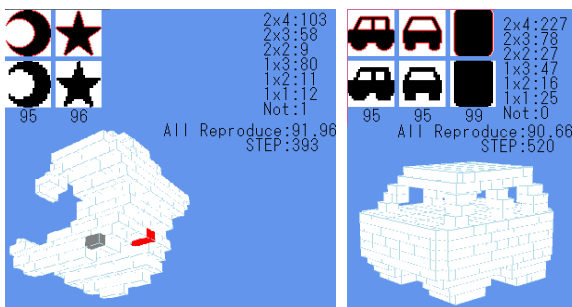
5. 実装と実行結果

本システムの実装は、開発言語に C# を、GUI 作成と 3D モデル描画に XNA4.0[7]を使用した。システムの実行環境は Windows7 Professional x64, CPU Xeon 5160 2.99GHz, RAM 12GB, GPU NVIDIA Quadro FX3500 である。

本システムを評価するために、いくつかの二値入力画像群からモデルを生成し、光源の位置探索が製作結果に及ぼす影響を考察した。また実際にレゴブロックを用いて、本システムによって得られた 3D モデルをトリックアート作品として製作した。それらの結果を本章で示す。

5.1 3枚以下の入力画像を用いた例

入力画像が 3 枚以下の場合、光線同士の干渉がほとんどないため、図 11 に示すように、概ね入力画像通りの影が得られている。

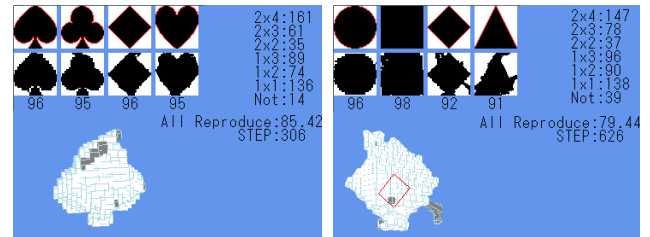


(a) 月と星 (b) 自動車

図 11 入力画像が 3 枚以下の実行例

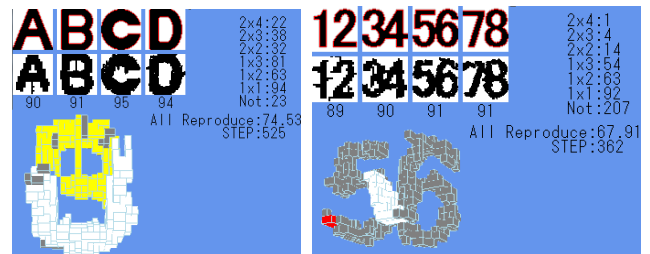
5.2 4枚の入力画像を用いた例

光源同士の干渉が大きい 4 枚の入力画像を使用した例を図 12 に示す。この場合でも概ね類似した影画像が得られている。しかし図 12(c)は入力画像がやや複雑であるため、3D モデルが二つのクラスターに分割され、図 12(d)では殆どのブロックが未接続状態となっている。複雑な入力画像でも類似した影画像は得られるが、複雑さが増すにつれ実際にトリックアートを制作することは困難になっていくことが分かる。このような場合、再現率の向上よりもブロックの連結性を優先した配置の最適化を行う必要がある。



(a) トランプのスイート

(b) 丸四角ダイヤ三角



(c) アルファベット

(d) アラビア数字

図 12 入力画像が 4 枚の実行例

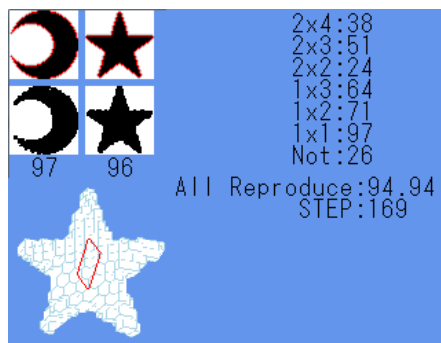
5.3 影のジャギーの発生と低減

使用されるレゴブロックは直方体であるため、3D モデルからの影の輪郭部分にジャギーが発生することがある。このジャギーは光源方向がレゴブロックの各面に垂直の場合に強く発生するため、光源を鉛直方向からずらし、ブロックの奥行き方向のならびを利用してブロックの段差を補間することで影輪郭のジャギーを低減することができる。この結果、影の再現率も向上する。本システムでは、4.1 で示した光源の最適位置の探索処理によって、このようなジャギーの低減が実現されている。

図 13 は 2 枚の入力画像 (月と星) から作られたモデルの影のジャギーを示している。図 13(a)では、2つの光源の方向とブロックのエッジの方向を一致させるよう直交に光源を配置しているため、強いジャギーが発生している。一方、図 13(b)は光源の最適位置を探索してジャギーを軽減した場合であり、影の輪郭が滑らかで再現率も高い。また、図 14 は「GCAD」のアルファベットを 4 枚の入力画像としてシステムに与え、3D モデルを生成した例である。最適な光源位置を探索することで、輪郭のなめらかな影が得られることがわかる。



(a)ジャギーの発生した場合

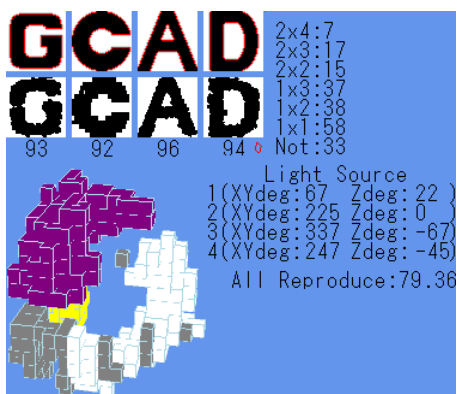


(b)ジャギーを低減した場合

図13 影輪郭に生じるジャギー



(a)光源位置を予め固定した場合



(b)最適な光源位置を探索した場合

図14 最適な光源位置探索の効果

5.4 実製作例

図15は図12(a)を実際のレゴブロックで構築したものである。制作例のパラメータは表1の通りである。ここでステップ数とはレゴブロックの追加・削除を行った回数である。このレゴブロック作品の立体形状を見ても、それがどのような影を映し出すかは容易には判別できない。

入力として与えた層数	25
最適化処理の計算時間[s]	49
ステップ数	305
使用したブロック数	556
完成した制作例の層数	18
制作例の大きさ[cm]	17.3
組み立て作業時間[h]	3

表1 制作例のパラメータ

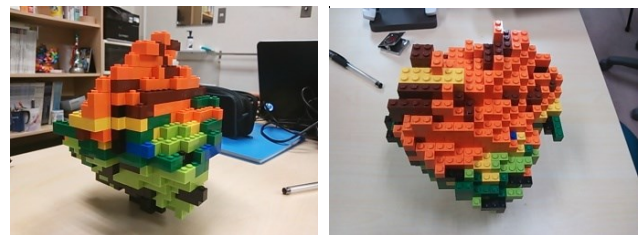


図15 レゴブロックで構築したトリックアート作品

このレゴブロック作品のオブジェに対し4方向から光を当てて得られた実際の影の様子を図16に示す。4つの影がそれぞれトランプのスイートを表しているのが分かる。

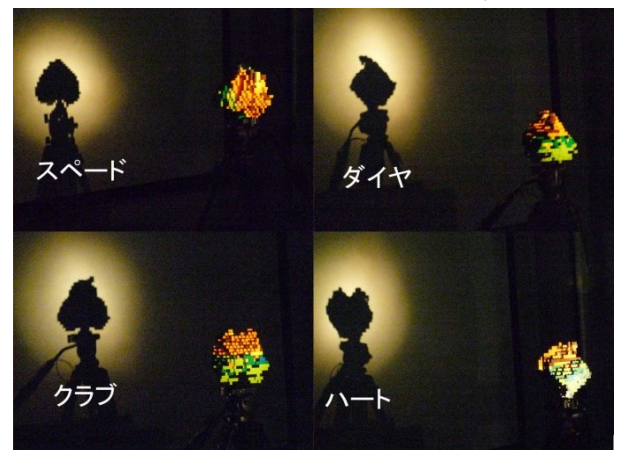
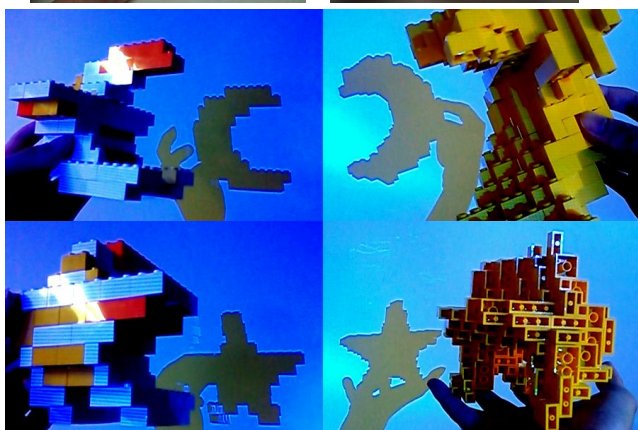
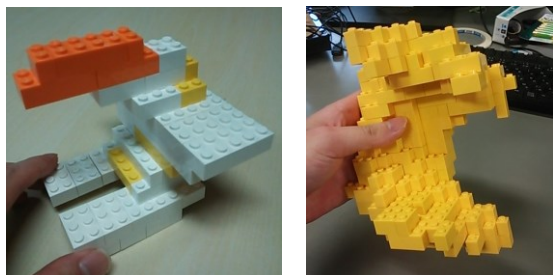


図16 トリックアートが映し出す影

図17は図13の「月と星」のモデルをレゴブロックで製作したものである。図17(a)はジャギーが発生したもの、図17(b)は光源位置を最適化してジャギーを低減したものである。これらを比較すると、図17(a)のレゴブロック作品ではそれ自体の形状からおおよそどのような影が得られるかが想起しやすいのに対し、図17(b)のレゴブロック作品ではブロックの立体配置が複雑化するため、それからどのような影が実際に得られるのかが分かりにくい。このように、最適な光源位置の探索処理は、影の輪郭部分のジャギ

一を低減するだけでなく、得られるレゴブロック作品のブロック配置を複雑化し、その立体形状を見ただけではどのようなものか判別できないというトリックアート本来の性質を強める効果がある。



(a) 光源位置最適化なし (b) 光源位置最適化あり

図 17 月と星のトリックアート

図 18 はジャギーを低減した「月と星」のモデルを 3D プリンタによって製作したものである。

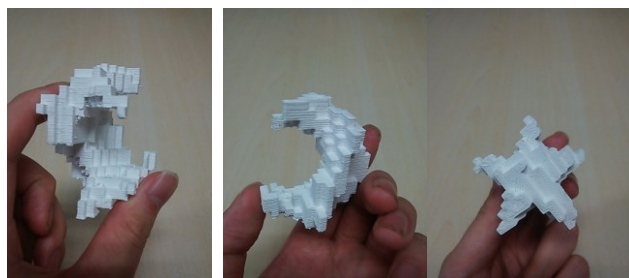


図 18 3D プリンタを用いて制作した月と星

6. まとめと今後の課題

本稿では、光を当てることで目標とする複数の影画像を映し出すトリックアートの制作支援として、レゴブロックを用いて連結性を考慮したトリックアート生成システムを構築し、実際にレゴブロック作品を構築することで本システムの有効性を示した。

今後の課題としてはレゴブロックの連結性を高める探索手法の改善、入力画像の回転や拡大・縮小への対応によるより柔軟な評価方法の追加、様々な入力の影画像の形と探索手法が得られる影に及ぼす影響の考察が挙げられる。

参考文献

- [1] 福田繁雄: “ランチはヘルメットをかぶって”, Shigeo Fukuda
Photo courtesy of Shizuko Fukuda cat.no.261.
- [2] Tim Noble and Sue Webster: *HE/SHE*, (Diptych)
http://www.timnobleandsuewebster.com/he_she_2004.html
- [3] Hofstadter, Douglas R : *Gödel, Escher, Bach*, 1999.
- [4] Niloy J. Mitra and Mark Pauly: Shadow Art. SIGGRAPH Asia 2009.
- [5] 北川佑樹, 高井昌彰, 高井那美: “レゴブロックのための 3 次元近似形状組み立て支援システム”, 第 12 回情報科学技術フォーラム(FIT2013)論文集, RO-001, Vol.4, pp.71-72, 2013.
- [6] XYZprinting http://us.xyzprinting.com/us_en/Home
- [7] XNA Developer Center,
<http://msdn.microsoft.com/en-us/aa937791.aspx>
- [8] 生田寛和, 高井昌彰, 高井那美: “レゴブロックを用いた影のトリックアート構築システムの開発”, 情報処理学会第 76 回全国大会, 1ZC-5, 2014.