

複雑な物体の複数画像からのレゴブロックによる再構築

林慧^{†1} 前川卓^{†1}

レゴブロックは楽しみながら作品を組み立てることを通じて創造力を養うことができることから、子供から大人まで幅広い世代の人々に親しまれている。中でも、基本ブロックのみで組立てられる大きな立体作品はレゴスカulptチャーと呼ばれ、世界中の人々を魅了している。しかし、初心者が同じようなものを組立図なしに組立てることは困難である。本研究では、複雑な形状の物体を多視点から撮影した複数の画像から、レゴの単位ブロックである縦、横、高さの比が5:5:6の直方体を単位ボクセルとしてShape From Silhouette法を用いて色情報を含んだボクセルモデルを構築し、レゴブロックに変換する。その際、表面ボクセルからの厚さが一様となるように、内部ボクセルを削除し、出来る限り最少ブロック数で組立図を自動的に生成する方法を提案する。

Reconstruction of complex objects from multiple photographic images using LEGO blocks

HUI LIN^{†1} TAKASHI MAEKAWA^{†1}

We introduce a system to reconstruct LEGO models from multiple two-dimensional images of complex objects taken from different views. We employ a unit voxel with edge length ratios 5:5:6 for the Shape from silhouette method, and convert the resulting voxel models with color information to LEGO sculptures. In order to minimize the number of LEGO blocks, we remove inside voxels as much as possible before the conversion so that the thickness of the voxel model is uniform from the surface voxels.

1. はじめに

レゴブロックはプラスチック製の組み立てブロック玩具であり、楽しみながら複雑な立体作品を思うままにすることができるところから、子供から大人まで幅広い世代の人々に親しまれている。また、創造力を育てる教育的効果が高いため、小学校の授業から大学の講義にいたるまで教育の分野にも多く導入されている。また、基本ブロックのみで構成される大きな立体作品は、レゴスカulptチャーと呼ばれ、インターネットなどを介して世界中の人々を魅了している。しかし一般の初心者が複雑な立体作品を組立図なしで作成することは非常に困難である。そこで熟練したレゴビルダーが試行錯誤を積み重ねて作成した組立説明書が一般向けに付属品としてレゴセットに入っている。本研究では、複雑な物体を多視点から撮影して取得した複数の2次元画像から、レゴブロックの単位ブロックである縦、横、高さの比が5:5:6の直方体を単位ボクセルとしてShape From Silhouette (SFS)法を用いて色情報を含んだボクセルモデルとして再構築し、基本ブロックに変換する。その際、表面ボクセルからの距離が一定になるように内部ボクセルを削除し、出来る限り最少ブロック数で組立図を自動的に生成する方法を提案する。

2. 従来研究

ボクセルモデルから自動的にレゴブロックの組立図を生成する研究は盛んに行われている[1,3,4,7]。Gowerら[4]は、レゴブロックモデルの各層の輪郭が与えられ場合に、コスト関数にペナルティ関数を組み込み、組み合わせ最適化問題として解くことを提案しているが、実装はしていない。Zijlら[7]はセル・クラスタリングによるセル・オートマタの手法を適用し、レゴスカulptチャーを生成している。

形状が複雑な作品をいくつかのパーツに分割して作成し、最後にパーツを繋ぎ合わせる方法[3]や、奇数層と偶数層で縦横に単位ブロック分だけ格子をずらして2x2のマスクを走査することでブロックの配置を決め、さらに上下方向の連結判定を行い再配置を行う方法[1]が提案されている。

これらの方法はいずれも入力ポリゴンデータをボクセル化してボクセルを構築しているため、内部の厚み付け処理を層ごとに実施する必要がある。ローカル処理であるため、表面ボクセルからの距離は必ずしも一定とはならず、強度面でも、過大あるいは過小設計になる恐れがある。さらに、ポリゴンデータに色情報が含まれていない場合は、対象物の色はユーザーが試行錯誤しながら選択しなければならない等の問題がある。

^{†1} 横浜国立大学大学院
Yokohama National University

3. 研究方法

3.1 色情報を含んだボクセルモデルの再構築

近年、3次元物体をレーザースキャナ等で測定し3D-CADデータとして対象物体を復元する、形状のリバースエンジニアリングの研究が盛んに行われている。一般的に形状のリバースエンジニアリングに用いられる計測機器には、レーザースキャナやCMM, CTスキャナ等がある。しかし、これらはいずれも高価であり、色情報を取得することができない。また、昆虫のような複雑な対象物の全体形状を復元するためには、物体を上から見た場合と下側から見た場合など互いに補完し合う二つの異なる視点からモデルを構築し、それらを統合する必要がある。

本研究では異なるオリエンテーションで復元された二つのボクセルモデルをボクセル形式のまま統合し、全体形状を各モデルの色情報を引き継いだ単一のボクセルモデルを復元する[2]。ここで、レゴブロックの単位ブロックの縦、横、高さの比を考慮し、5:5:6の単位ボクセルを用いてそれぞれのボクセルモデルを再構築する。基準となるボクセルモデル V_P と、統合させたいボクセルモデル V_Q の座標系は一般には異なる為、 V_Q を V_P へ一致させるためには、三次元剛体変換パラメータである回転行列 R 、並進ベクトル T を算出する必要がある。Nanyaら[2]はIterative Closest Point (ICP)法による V_P と V_Q の位置合わせを行っている。その際、局所最小解に陥ることを防ぐために Spin-Image を用いて、初期位置合わせを行った後、ICP法で正確な剛体変換パラメータを求める。最後に、 R 、 T を用いて、ボクセルモデル V_P 、 V_Q を統合し、単一のボクセルモデル V_I として三次元形状を復元する。

画像の取得には、三脚で固定したデジタルカメラ(EOS Kiss X4, 2100×1400pixels)とステッピングモーターで制御されたターンテーブルを用いる(図1参照)。

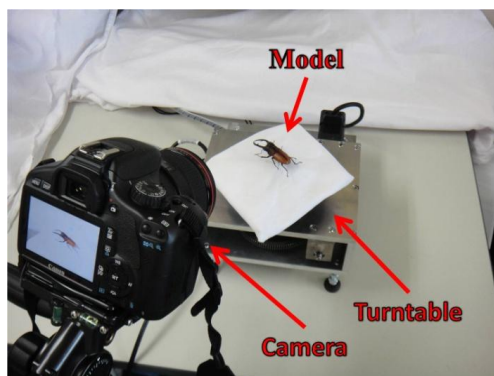


図1 撮影装置

3.2 内部ブロックの削除

しかしこのままでは、再構築されたモデルの内部にもブロックが形成されるため、ブロック数が某大となり、製作工数も増える。そこで頑強性を保持したまま余分な内部ブ

ロックを取り除く必要がある。我々は、シェル構造物にならない表面ボクセルからの距離が一定以上となるブロックを削除する方法を採用した。距離場の算出には Eikonal 方程式を高速に解く数値解法として提案されたレベルセット法の一手法である Fast Marching Method (FMM) [5]を用いた。三次元の距離場を表示するのは困難であるため、再構築されたボクセルモデルの xy 平面に平行に切断した断面の距離場を境界からの距離に応じて赤色から青色にグラデーションをかけることによって示した(図2(a), (b)参照)。図2(c), (d)は一定の距離(8ボクセル)で内部ボクセルを削除した例を示している。

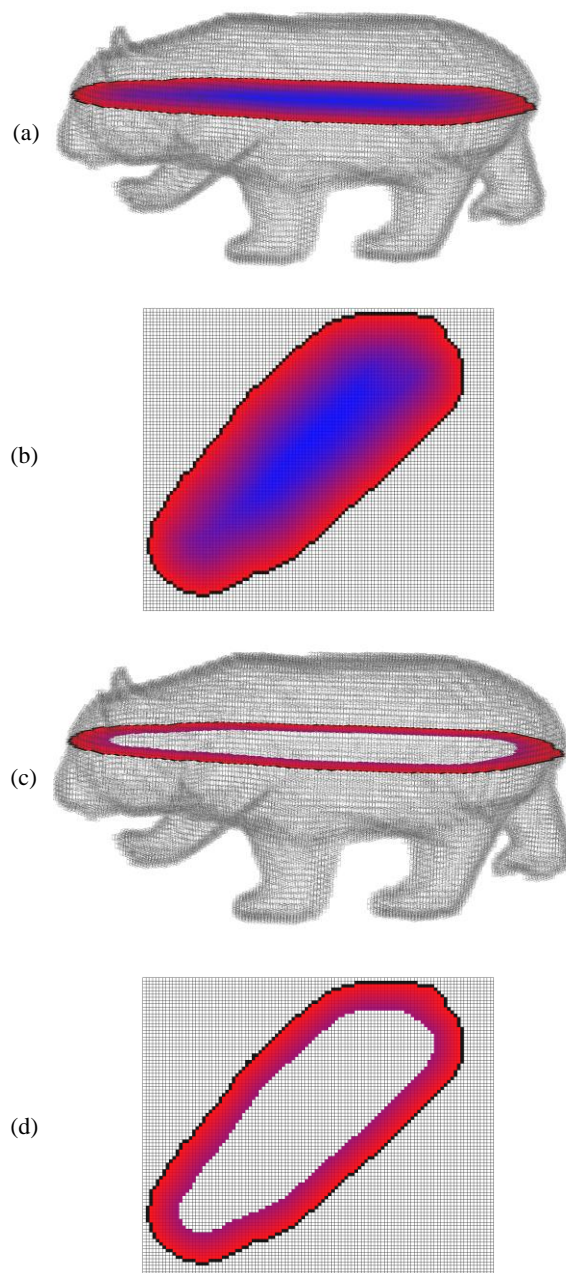


図2 FMMによる距離場の計算：(a) パンダモデルの xy 平面に平行に切断した距離場の断面図, (b) 図(a)の断面図, (c) 8ボクセル距離で内部ボクセルを削除した例, (d) 図(c)の断面図。

3.3 表面レゴブロックの色付け

生成された統合ボクセルモデル V_I の表面の各ボクセルの重心をカメラ中心位置から可視である画像にのみ再投影し、対応する画素およびその 1-ring の画素の色情報(RGB)を取得する。その際、シルエットの外に再投影された画素の色情報は無視する。また鏡面反射や影といったノイズを含んだものも含まれるため、各ボクセルの色情報群から色相($0^\circ \sim 360^\circ$)の最頻値区間(区間幅: 24°)の平均値を表面ボクセルの色とした。

3.4 レゴブロックの色の選定方法

レゴブロックの基本セット 6177 には以下の 9 色のブロックが入っている: 白(white), 鮮紅(bright red), 瑠璃色(bright blue), 山吹色(bright yellow), 黒(black), 深緑(dark green), 明るいオレンジ(bright orange), 明るい黄色がかった緑(bright yellowish green), 赤褐色(reddish brown). 従って SFS の際に取得したボクセルの RGB 値から、上記 9 色の中から最も近い色を選定する。まずボクセルと上記 9 色の RGB 値を人間が色を知覚する方法に近い CIE $L^*a^*b^*$ 表色系[6]に変換し、以下のような差を計算する。

$$\Delta E_i = \sqrt{(L_{bi}^* - L_v^*)^2 + (a_{bi}^* - a_v^*)^2 + (b_{bi}^* - b_v^*)^2}$$

ここで、 L^* は輝度、 a^* は赤み・緑み、 b^* は黄み・青みを表し、下付き文字の b と v は block と voxel を、 $i(1, \dots, 9)$ は上記の 9 色に対応している。 ΔE_i が最も小さい色 i をそのボクセルの色とする。これを全表面ボクセルに対して行うことにより、全表面ボクセルにレゴブロックの色を割り当てる。色彩をより正しく表現するには、可能な限り小さいブロックを表面ブロックに採用する必要がある。

3.5 色情報を考慮してレゴブロックへの変換

内部ボクセルを削除後、各層ごとに樹脂やインクを噴射して形状を造形する 3D プリンティングのようにレゴブロックを層毎に重ねて組み立てることを考える。この段階では各層における形状を形成するボクセルの 2 次元配列があり、これらにレゴブロックを割り当てる必要がある。本研究では、ブロックの上面についているポッチと呼ばれる突起の数によって分類される $1 \times 1, 1 \times 2, 1 \times 3, 1 \times 4, 2 \times 2, 2 \times 3, 2 \times 4$ の 7 種類の基本ブロックを使用する。

3.6 レゴブロックへの変換アルゴリズム

● 第 1 ステップ

表面ボクセルの色をより正しくレゴブロックに割り当てるために $1 \times 1, 1 \times 2$ と 2×2 の小さい 3 種類の基本ブロックをボクセルモデルに割り当てることを考える。ボクセルの各層に 2×2 のマスクをかけて、マスク内の 4 つのボクセルの配置に応じて、 $1 \times 1, 1 \times 2$ と 2×2 のブロックを配置する。

L 字型の 3 つのボクセルが存在する場合は 1×1 と 1×2 のブロックで対応する。尚、強度を増すために、図 3 に示すように奇数層と偶数層において、 2×2 のマスクの位置を縦横 1 ブロックずつずらす必要がある[1]。

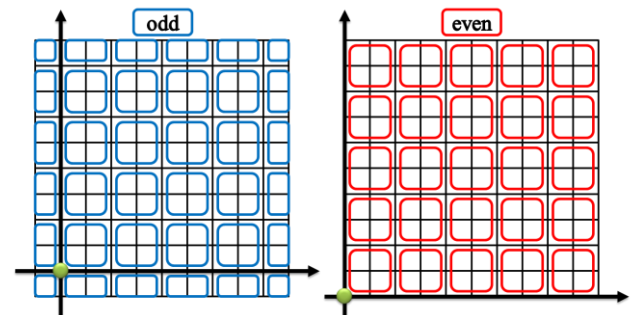


図 3 奇数層と偶数層のマスク

● 第 2 ステップ

周囲のブロックとのつながりを多くすることにより強度を上げるために、第 1 ステップにおいて生成された $1 \times 1, 1 \times 2$ と 2×2 の 3 種類のブロックをこの優先順位で可能な限り $1 \times 2, 1 \times 3, 1 \times 4, 2 \times 2, 2 \times 3, 2 \times 4$ のブロックで置き換える。ただし、表面ボクセルでは強度に影響がない限り同じ色を優先する。

① 1×1 ブロックの合成

1×1 と 1×1 を 1×2 のブロック、 1×1 と 1×2 を 1×3 のブロック、 1×1 と 1×3 を 1×4 のブロック、 1×1 と 2×2 を 1×3 と 1×2 のブロックで置き換える。

② 1×2 ブロックの合成

1×2 と 1×2 を 1×4 または 2×2 のブロック、 1×2 と 2×2 を 2×3 のブロック、 1×2 と 2×3 を 2×4 のブロックで置き換える。

③ 2×2 ブロックの合成

2×2 と 2×2 を 2×4 のブロックで置き換える。

● 第 3 ステップ

以上の 2 つのステップを適用しても、上下ともにブロックが存在しない孤立ブロックがある場合は、これらを削除する。

3.7 組立ガイド (LEGO Digital Designer)

図 4 にボクセルからレゴブロックへ変換されたパンダモデルの断面図を示す。ここで青の枠線の四角形が一つ一つの基本ブロックを表す。白の基本ブロックは、パンダ表面の白い部分、黒の基本ブロックはパンダ表面の黒い部分、赤の基本ブロックは内側のブロックに相当する。この層毎の情報を元にモデルを組み立てることは可能であるが、容易ではない。そこで我々は、総ブロック数、各レゴブロックの種類(1×2 等)、色、原点からの並進移動量及びオリエン

ーションを記載したデータをファイル形式(.lxm)のファイルに出力し、レゴ社が開発したフリーの Virtual building software, LEGO Digital Designer (LDD)にインポートし Building guide mode を用いることにより動画形式の組み立てガイドを作成した。さらに、Export BOM コマンドを用いて必要なブロックの種類と色のブロック数をエクセルファイルに出力するようにした。

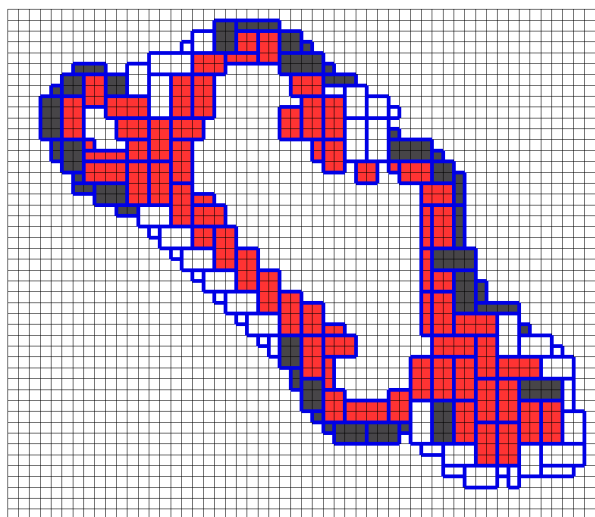


図 4 断面図

4. 実験・結果

本手法をノコギリクワガタ、パンダのフィギュア、トラのフィギュアに適用し、本研究の有効性を確認する。

4.1 ノコギリクワガタ



図 5 ノコギリクワガタ

全長 85mm のノコギリクワガタの全体形状が復元できるように、図 5 (a), (b) のような姿勢でターンテーブル上にピンを用いて固定し、SFS 法によりオリエンテーションの異なる二つのボクセルモデル V_P , V_Q を作成する。Spin-image により初期位置合わせを行い、ICP により詳細な位置合わせを行うことによって R , T の情報を元に統合ボクセルモデル V_I を生成する。この時、撮影画像より色情報を取得し、ボクセルモデルの色づけ処理を行った(図 6 参照)。このボクセルモデルをレゴブロックモデルに変換したものを図 7 に示す。



図 6 ノコギリクワガタのボクセルモデル(SFS 法における八分木の最大深さ 8)

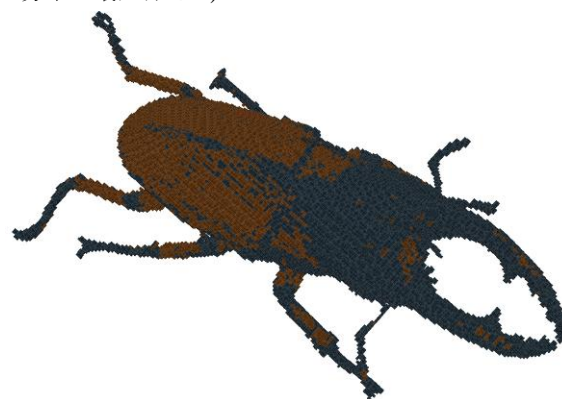


図 7 ノコギリクワガタのコンピュータ上のレゴブロックモデル(SFS 法における八分木の最大深さ 8)

4.2 パンダのフィギュア

ノコギリクワガタと同様に全体形状を統合したパンダのボクセルモデルとコンピュータ上のレゴモデルを図 8 と図 9 に示す。黒色の模様の中に存在する白色のブロックは、鏡面反射によるものであり、完全に取り除くことができなかった。

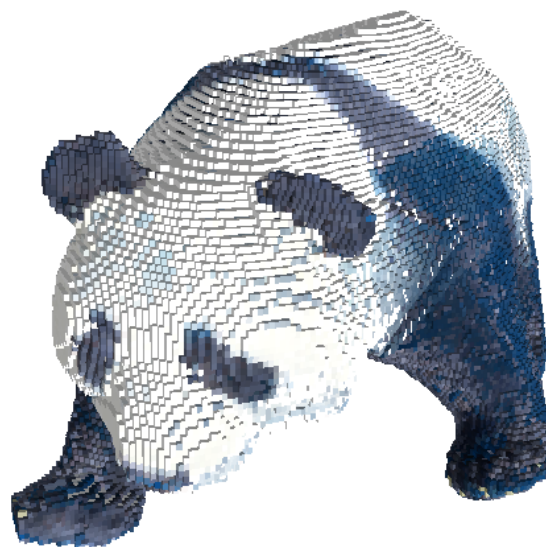


図 8 パンダの色付きボクセルモデル(SFS 法における八分木の最大深さ 8)



図 9 パンダのコンピュータ上のレゴブロックモデル (SFS 法における八分木の最大深さ 8)



図 11 トラのコンピュータ上のレゴブロックモデル(SFS 法における八分木の最大深さ 8)

4.3 トラのフィギュア

全体形状を統合したトラのボクセルモデルとコンピュータ上のレゴブロックモデルを図 10 と図 11 に示す. トラのフィギュアは顔の部分の模様が複雑であるため, ボクセルモデルの色情報が十分に取得されていない. さらにこれを 9 種類の色に近似変換しているため, レゴブロックモデルの顔の部分の配色が不完全である.



図 10 トラの色付きボクセルモデル(SFS 法における八分木の最大深さ 8)

4.4 強度実験

3.2 節において解説した通り, 頑強性を保持したまま余分な内部ブロックを削除する為に, シェル構造物にならって表面ボクセルからの距離が一定以上となるブロックを削除した. 図 12 に示すパンダのレゴブロック作品においては, 距離が 3 単位ブロック以上の内部ブロックを削除し, 空隙率(削除した総単位ブロック数を削除しないモデルの総単位ブロック数で割って 100 倍した数値)を計算したところ, 35.6%であった. また使用ブロック数を表 1 に示す.

図 13 に示すように体重 65kg の人がモデルの上にも立っても全く問題はなかった.



図 12 パンダのレゴブロック作品(SFS 法における八分木の最大深さ 6)

表 1 図 12 のパンダの使用ブロック数

	Black	White	Other colors
1×1	159	236	80
1×2	86	78	40
1×3	65	57	22
1×4	28	24	22
2×2	54	65	78
2×3	133	173	181
2×4	148	267	309
Total	2305		



図 13 強度実験(実験者体重 : 65kg)

またこのパンダのデータファイル(.lxfml)を下記の URL に載せた.

データファイル : <http://maekawalab-ynu.com/research.html>

LDD へのリンク : <http://ldd.lego.com/ja-jp/>

5. おわりに

本研究において、昆虫やフィギュアなど、実在する物体を撮影した複数の画像から SFS 法により色情報を含めたレゴブロック作品を組み立てるための組立ガイドを自動的に生成する方法を提案した。さらに、シェル構造物にならない表面ボクセルからの距離が一定以上となるブロックを FMM により求め、削除した。強度実験を行った結果、この手法の有効性が確認できた。このことにより、初心者でも完成度の高いレゴ作品を作成することが可能となった。

今後の展望として、鏡面反射や影といったノイズを取り除く方法の改善や空隙率の増大が挙げられる。

謝辞 レゴブロックを作成するにあたり、研究室のメンバーの狐崎拓哉君と蓼沼周君の多大なる協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 北川佑樹, 高井昌彰, 高井那美: レゴブロックによる近似形状政策支援システム, 情報処理学会第 75 回全国大会, 2013.
- 2) Nanya, T., Yoshinara, H. and Maekawa, T.: Reconstruction of Complete 3D Models by Voxel Integration, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 7(3), pages 362-376, 2013.
- 3) 小野純明, Andre Alexis, 張英夏, 中嶋正之: 作りやすさを考慮したブロック玩具作品組立手順の自動生成に関する研究, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.36, No.16, 2012.
- 4) Gower, R. A. H., Heydtmann, A. E., Petersen, H. G.: LEGO: Automated model construction. 32nd European Study Group with Industry (1998) 81-94.
- 5) Sethian, J. A.: Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science, Cambridge University Press, 1999.
- 6) Szeliski, R.: Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer 2010.
- 7) Zijl, L. V. and Smal E. S.: Cellular automata with cell clustering, Proc. of AUTOMATA Workshop, pp. 425-440, 2008.