

反射率画像を用いたVRモデルのカラー化と評価実験

大石 修士^{*1}, 倉爪 亮^{*2}, 岩下 友美^{*2}, 長谷川 勉^{*2}

Color Mapping of VR model using Laser Reflectivity and Performance Evaluation Experiments

Shuji OISHI^{*1}, Ryo KURAZUME^{*2}, Yumi IWASHITA^{*2}
and Tsutomu HASEGAWA^{*2}

^{*1} Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

^{*2} Graduate Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

A power of the reflected light (reflectivity) is available as a side product of the range value for most laser scanners. Additionally, a reflectance image that depicts reflectance values as a grayscale image has a similar appearance of the 3D geometric model with a color image by a camera. Focusing on the fact, we propose a new technique for mapping color on a surface of a 3D geometrical model utilizing laser reflectivity. The proposed technique colorizes a reflectance image based on the similarity between color and reflectance images at first. Then the pixel color on the colored reflectance image is copied to the corresponding pixel on the range image, and the colored 3D model is obtained. We carried out evaluation experiments using a laser scanner and showed the performance of the proposed technique in several conditions.

Key Words : Colorization, Reflectance image, Range image, Laser scanner

1. はじめに

本稿では、レーザスキャナ等により観測された実物体の3次元幾何モデルに対し、リフレクタンス画像を援用することで色やテクスチャ情報を付加する手法を提案する。これまで、写実性の高いモデルを生成する手法としてテクスチャマッピングが広く利用されてきた。テクスチャマッピングは、3次元幾何モデルにカメラ等のカラーセンサから得られた画像を張り付ける手法であり、見えを反映したより現実感の高いモデルを生成することができ、ヴァーチャルリアリティ(VR)や歴史的文化遗产等のデジタルアーカイブ⁽¹⁾において非常に重要な技術となっている。

一般に、幾何モデルとカラー画像はそれぞれ異なるセンサにより取得されるため、適切なテクスチャマッピングを行うにはセンサ間での厳密な位置合わせが必要である。そのためには両データ内に見られる特徴点の対応を決定すればよく、これまでに3次元幾何モデルと2次元画像の対応を人手で与え位置合わせを行

う手法が提案されている⁽²⁾。一方、この位置合わせを自動で行う手法も提案されている。野田ら⁽³⁾は3次元幾何モデルと2次元テクスチャ画像に互いに含まれる平面領域の共起性を用いた位置合わせ手法を提案している。Violaら⁽⁴⁾は統計的手法を用いた位置合わせ手法を提案している。これらの手法を用いて対象物全周に対してテクスチャマッピングを行う場合、視点の異なる多数枚のカラー画像が必要であり、またカラー画像毎に3次元幾何モデルとの位置合わせを行わなければならない。さらに、位置合わせの僅かなずれや、カラー画像間の照明条件の変化によって、生成されたモデルに不連続な継ぎ目が生じ、人に違和感を与える原因となる。

そこで我々は、レーザスキャナを用いた距離計測時に副産物として得られるレーザ反射強度に着目した新たな彩色手法を提案する。本手法はカラリゼーション手法を援用し、カメラ等から得られた色情報を基にリフレクタンス画像を直接カラー化することで、従来のテクスチャマッピングのような厳密な位置合わせを必要とせずに、彩色された3次元モデルを生成することが可能である。また、リフレクタンス画像に対しカラリゼーションを行う際に、距離画像を用いたコスト関

^{*1} 九州大学大学院システム情報科学府情報知能工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744) oishi@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp

^{*2} 九州大学大学院システム情報科学研究科 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744) {kurazume, yumi, hasegawa}@ait.kyushu-u.ac.jp

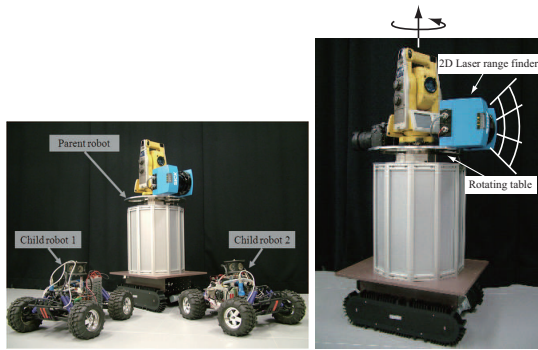


Fig. 1 Acquisition system of a panoramic range image⁽⁷⁾

数を導入することで、高精度にカラー化を実現する手法を提案する。さらに、実物体に対する評価実験を行い、複数カラー画像を用いた場合でも、幾何モデルとカラー画像の相対位置を推定することなく、幾何モデルのカラー化が実現できることを示す。

2. 提案手法

2.1 リフレクタンス画像 レーザレンジファインダなど Time-of-Flight 式距離センサは、センサから能動的に発射された光（レーザ光など）が、対象物表面に反射して再びセンサに戻るまでの時間を計測することで、対象物までの距離を得るものである。一例として、図 1⁽⁵⁾に示すように、2次元レーザレンジファインダを回転テーブル上に固定し、テーブルを回転させながらスリット状レーザにより計測を行い、全周囲の距離データを取得した結果を図 2(a) に示す。このように距離データを濃淡値として2次元表示した画像を距離画像という。一方、一般的な Time-of-Flight 式距離センサでは、レーザ光の反射時間とともにレーザ光の強度（リフレクタンス値）を計測することができる。図 2(b) にリフレクタンス値を濃淡値として表示した画像（リフレクタンス画像、あるいは反射率画像）を示す。ここで重要な点は、このレーザ光の反射強度は、距離画像のそれぞれの画素に対して一意に決定できる、すなわち一つの奥行き値に対して一つの反射強度が決まることである。言い換えれば、距離画像とリフレクタンス画像は原理的に厳密に位置合わせされた画像であるとも考えられる⁽⁶⁾。

2.2 リフレクタンス画像を用いた3次元モデルの彩色 本研究ではレーザスキャナにより得られた距離画像とリフレクタンス画像、および他視点のカメラから得られたカラー画像を用いて3次元幾何モデルの彩色を行う。ここで、距離画像とリフレクタンス画像は原理的に厳密に位置合わせされているため、3次元



(a) Range image



(b) Reflectance image

Fig. 2 Range and reflectance images

幾何モデルに彩色を施すには、リフレクタンス画像をカラー化（カラリゼーション）し、その各画素に対応する3次元点に色を転写すればよい。

本章ではまずリフレクタンス画像のカラリゼーション手法について説明し、次に HOG を用いたリフレクタンス画像とカラー画像の対応点の決定手法について述べる。

2.2.1 リフレクタンス画像のカラリゼーション

近年、電子顕微鏡や X 線写真のような濃淡画像のカラー化を行うカラリゼーションが盛んに研究されている。カラリゼーションは輝度情報のみを持つ濃淡画像に対し、一部の色度情報を他の画像や人手により与えることで画像全体の色推定を行うもので、これまでに様々な手法が提案されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本研究では、Yatziv らの手法⁽¹⁰⁾を援用し、レーザスキャナから得られたリフレクタンス画像のカラリゼーションを図る。

Yatziv ら⁽¹⁰⁾は、色度情報を一部含む濃淡画像において、注目画素と色度情報を有する画素とのダイクストラ距離⁽¹¹⁾を求め、その距離に応じた重みづけ平均を算出することで注目画素の色推定を行う手法を提案している。ダイクストラ距離は、濃淡画像中のピクセル間の輝度差を基に算出され、輝度変化の微小な経路を有する画素間のダイクストラ距離は小さくなる。一方で、エッジを跨ぐような輝度変化の大きな経路ではダイクストラ距離も大きくなる。従って、ダイクストラ距離が小さい、すなわち似た輝度値を有している領域ではその色も似ていると考えられ、色推定に大きく寄与することになる。注目画素 i における色度 $c_i(Cb, Cr)$ は以下のように決定される。

$$c_i = \frac{\sum_{j \in \Omega_c} w(i, j) c_j}{\sum_{j \in \Omega_c} w(i, j)} \quad (1)$$

$$w(i, j) = r_{ij}^{-\alpha} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \operatorname{argmin} E_{ij} \quad (3)$$

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^{n-1} |Y_{p_{k+1}} - Y_{p_k}|_{p_{k+1} \in N(p_k), p_1=i, p_n=j} \quad (4)$$

ただし Ω_c は色度情報を持った一部の画素の集合, r_{ij} は画素 i, j 間のダイクストラ距離, α は重みづけ関数 $w(i, j)$ におけるダイクストラ距離 r_{ij} の影響を制御するパラメータ, Y_{p_k} と $N(p_k)$ はそれぞれ画素 p_k における輝度値と近傍画素を示している.

上述した Yatziv らの手法を用いてリフレクタンス画像をカラリゼーションすることで, 3次元モデルへの彩色が実現可能である⁽¹²⁾⁽¹³⁾. 具体的には, リフレクタンス画像の画素 p_k におけるリフレクタンス値を Y_{p_k} として用いることでリフレクタンス画像のカラリゼーションを行う.

一方, リフレクタンス画像では図 2(b) に示すように法線方向の変化が大きいルーフエッジは容易に検出可能であるが, 奥行き値の変化により生じるジャンプエッジは明確に表れないことがあり, カラリゼーションにおいて過度な色の拡散が起きる可能性がある. それに対し, 距離画像(図 2(a))ではジャンプエッジが鮮明に表れる. そこでエネルギー関数 E_{ij} (式 (4)) に距離値に基づく重みづけ項を加え, 式 (4) に代えて以下のエネルギー関数 E'_{ij} を定義する.

$$r_{ij} = \operatorname{argmin} E'_{ij} \quad (5)$$

$$E'_{ij} = \sum_{k=1}^{n-1} \{\beta(D_{p_{k+1}} - D_{p_k})^2 + 1\} |Y_{p_{k+1}} - Y_{p_k}| \quad (6)$$

ただし, D_{p_k} は画素 p_k における距離値, β は式 (6) における距離値に基づく重みづけ項の影響度を制御するパラメータである. この手法ではリフレクタンス画像中のルーフエッジと距離画像中のジャンプエッジの双方を考慮することができる.

本研究では, カラリゼーションの枠組みを用い, レーザスキャナから得られたリフレクタンス画像の彩色を実現する. すなわち, まずカラー画像とリフレクタンス画像の間で少数の対応点を求め, カラー画像のカラー値をリフレクタンス画像の対応点に与える. その後, 上述した手法によりリフレクタンス画像全体のカラリゼーションを行う.

2.2.2 HOG を用いたリフレクタンス画像とカラー画像の対応点の決定 提案手法では, リフレクタンス画像とカラー画像の対応点を手動, あるいは自動で決定する必要がある. このうち, 自動で対応点を求めるために, 提案手法では SLIC⁽¹⁴⁾によりセグメンテーションされた各領域に対し, HOG⁽¹⁵⁾により特徴量を記述し, 対応点を決定する. SLIC は Achanta らにより提案された Superpixel の生成手法で, 対象画像を輝度

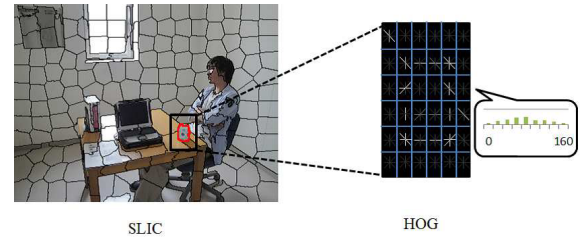


Fig. 3 Assignment of seed points by local features with SLIC and HOG

や色度などの属性が均質な小さな平面に分割することができる. 局所特徴量の記述子として用いる HOG⁽¹⁵⁾ は, Dalal らにより人検出のために開発されたもので, 局所領域における輝度勾配やエッジ方向をヒストグラムとして扱うことで, 対象物体の特徴的な形状を表現することができる. そこで, 本研究ではリフレクタンス画像とカラー画像に対し SLIC によるセグメンテーションを行い, 得られた領域の中心から一定サイズの窓を設け, 窓領域内の画像の特徴を HOG により記述する. 次に両者の HOG を比較し, HOG の類似度によって両者で対応する領域を決定する. (図 3)

2.2.3 提案手法 1: 手動で初期値を与える場合 上述した手法を用いた 3次元モデルの彩色手法を以下に示す. なお, 本研究では輝度と色度の分離のため $YCbCr$ 色空間を用いた.

1. レーザスキャナにより計測を行い, 各点の奥行き値及びリフレクタンス値を得る. このとき, 計測を行った環境のカメラ画像を別視点から 1 枚同時に取得しておく.
2. 得られた奥行き値及びリフレクタンス値から距離画像とリフレクタンス画像を生成する. ただしそれぞれの画像の輝度値は, 距離画像については奥行き値に, リフレクタンス画像についてはリフレクタンス値にそれぞれ比例したものとす.
3. リフレクタンス画像中の一部の画素に対し, 人が手動でカメラ画像で対応する領域のカラー値を初期値として与える.
4. 式 (1), (2), (5), (6) で示した提案手法によりリフレクタンス画像のカラリゼーションを行う.
5. カラー化されたリフレクタンス画像の各画素に対応する 3次元点に色を転写し, 彩色された 3次元モデルを作成する. ただし, 輝度 Y はリフレクタンス画像の輝度値を用いた.

2.2.4 提案手法 2: 自動で初期値を与える場合 提案手法 1 における手順 3. を以下の方法で代替する:

3. リフレクタンス画像とカラー画像を SLIC により小領域に分割し, HOG により両者の対応領域を求

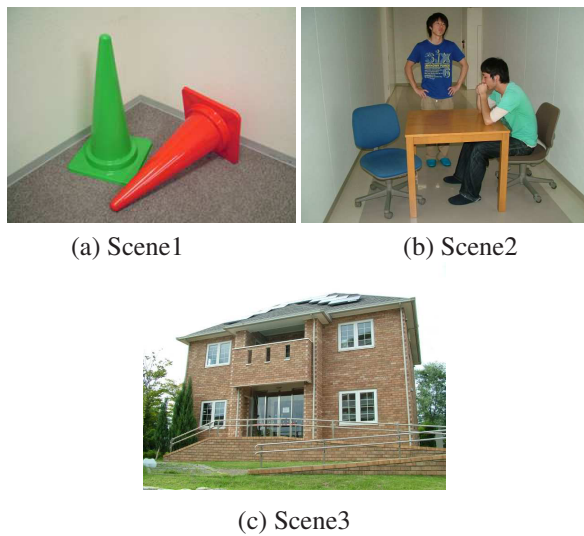


Fig. 4 Experimental setup

める．リフレクタンス画像の各領域の中心画素に，カラー画像の色度を転写し，初期画像を生成する．

3. 実験

図 1 に示す 3 次元形状計測ロボット CPS-V⁽⁵⁾ を用いて評価実験を行った．実験は図 4 に示すように，色の異なるカラーコーンが置かれた単純な環境 (Scene 1)，人を含む複数の物体が存在するより複雑な環境 (Scene 2)，およびレンガ住宅 (Scene 3) に対して行った．それぞれの環境における距離画像，リフレクタンス画像を図 5 に示す．ただし，図 1 のロボットはスリット状のレーザスキャナ (SICK, LMS151) を載せた回転テーブルを回転させながら全周の距離データを取得しており，画像サイズは距離画像，リフレクタンス画像ともに 760×1135 画素である．図 5 ではそのうちの一部を拡大して示している．また，計測を行った環境のカラー画像はデジタルカメラ (Fujifilm, FinePix S7000) を用いて人手により取得している．なお，距離画像およびリフレクタンス画像は 0~ 255 に正規化されており，式 (2)，(6) におけるパラメータの値はそれぞれ $\alpha = 6$ ， $\beta = 1.0$ とした．

まず，図 4(a) に示すカメラ画像の色を基に手動で一部領域の色の初期値を与えたリフレクタンス画像を図 6(a) に示す．さらに，図 6(a) を初期画像とし提案手法によりカラリゼーションを行った結果を図 6(b) に示す．また，HOG を用いて図 4(a) のカメラ画像と図 5(b) のリフレクタンス画像の対応を決定した結果，およびその結果を基にカメラ画像から色度情報を一部転写したリフレクタンス画像をそれぞれ図 7(a)，図 7(b) に示す．図 7(b) に対し提案手法によりカラリゼーションを行った結果は図 7(c) の通りである．

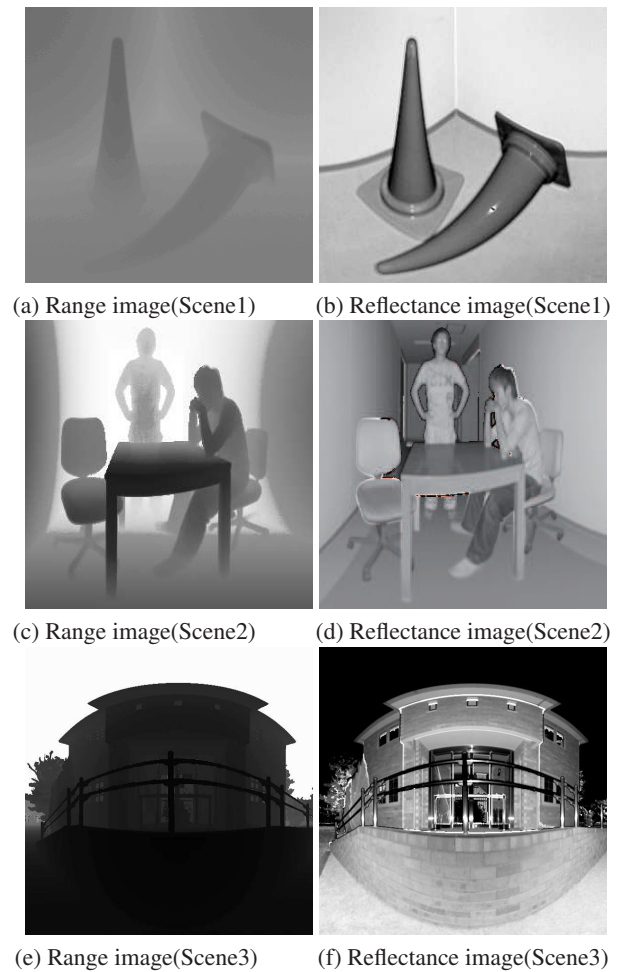


Fig. 5 Range and reflectance images

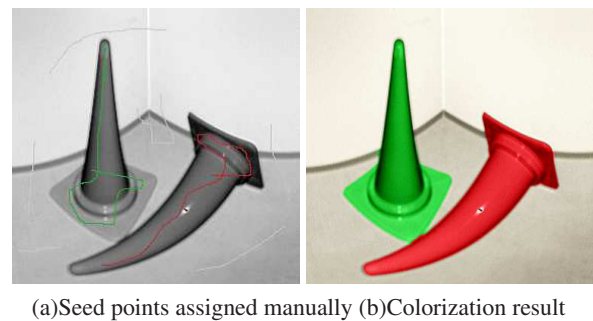
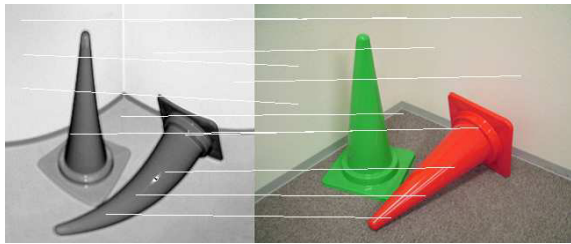


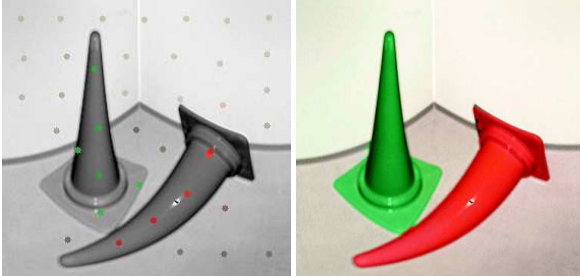
Fig. 6 Proposed method 1 in scene 1 (manual)

図 8(b)，図 8(c) はそれぞれ図 6(b)，図 7(c) に示すカラー化されたリフレクタンス画像から図 8(a) の 3 次元幾何モデルへ彩色を行った結果である．これらの図から，距離センサとカメラ間の相対姿勢の推定を行わずに，幾何モデルが適切に彩色されていることが分かる．

次に，図 4(b) のようなルーフエッジとジャンプエッジを多く含むより複雑な環境下での彩色実験を行った．また，リフレクタンス画像のみを用いた場合 (式 (4)) と，リフレクタンス画像と距離画像を用いた場合 (式

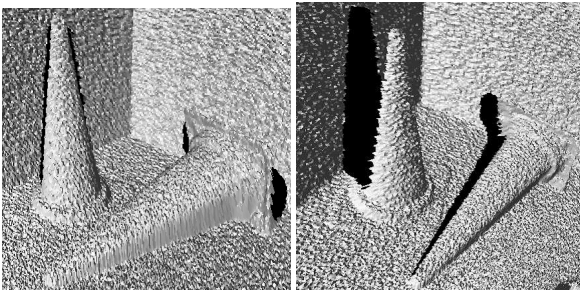


(a)The correspondence between Fig. 4(a) and Fig. 5(b)

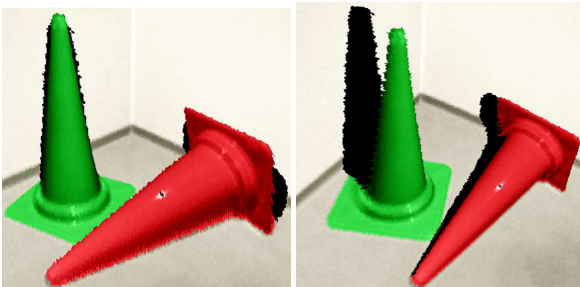


(b)Seed points assigned automatically (c)Colorization result

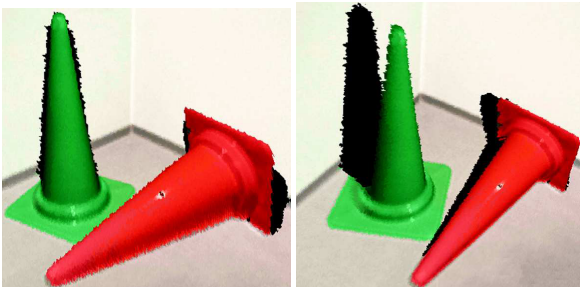
Fig. 7 Proposed method 2 in scene 1 (automatic)



(a)Original 3D mesh model



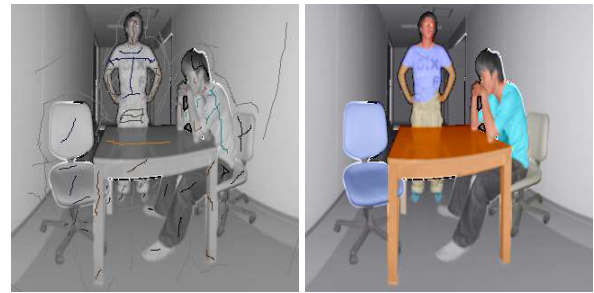
(b)Proposed method 1 (manual)



(c)Proposed method 2 (automatic)

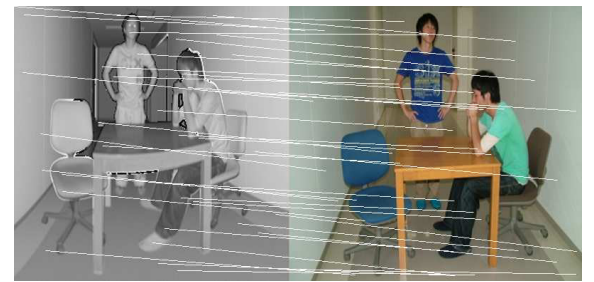
Fig. 8 Colorized 3D geometric model in scene 1

(6)の比較実験の結果についても後述する。
手動で色の初期値を与えたリフレクタンス画像、そ

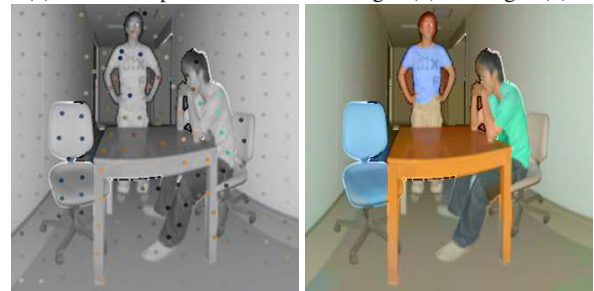


(a) Seed points assigned manually (b) Colorization result

Fig. 9 Proposed method 1 in scene 2 (manual)



(a) The correspondences between Fig. 4(b) and Fig. 5(d)



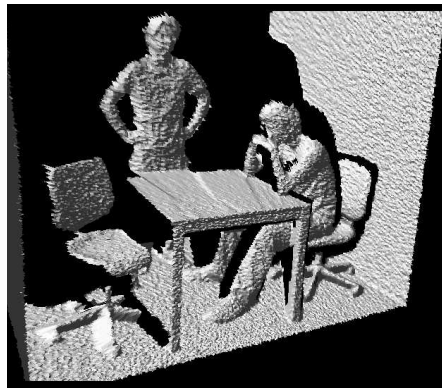
(b) Seed points given automatically (c)Colorization result

Fig. 10 Proposed method 2 in scene 2 (automatic)

れに対し提案手法でカラリゼーションを行った結果をそれぞれ図 9(a), 9(b)に示す. また, HOGに基づくカメラ画像とリフレクタンス画像の対応図, その対応から生成した初期画像, およびカラリゼーション結果は, それぞれ図 10(a), 図 10(b), 図 10(c)の通りである.

図 11(a), 図 11(b)はそれぞれ図 9(b), 図 10(c)のリフレクタンス画像を基に図 11(a)の3次元幾何モデルへ彩色を行った結果である. これらの結果から, より複雑な環境下であっても3次元幾何モデルへの適切な彩色が可能であることが分かる.

さらに, 図 10(b)を初期画像とし, リフレクタンス画像のみを用いた場合(式(4)), およびリフレクタンス画像と距離画像を用いた場合(式(6))のカラリゼーション結果をそれぞれ図 12(a), 図 12(b)に示す. リフレクタンス画像のみを用いる場合には, リフレクタンス画像中のエッジのみが考慮されているため, 距離の断絶がある領域であってもリフレクタンス値の変化が



(a)Original 3D mesh model



(b)Proposed method 1

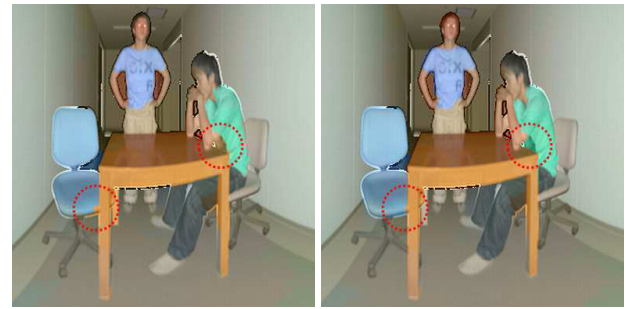


(c)Proposed method 2

Fig. 11 Colorized 3D geometric model in scene 2

小さい場合には色が過度に拡散している。一方で、距離画像中のエッジも加味した場合、ジャンプエッジの生じている部分で色の拡散が妨げられており、適切な彩色が行われていることが分かる。

さらに、図 4(c) に示すレンガ住宅に対する彩色実験を行った。本実験ではレンガ住宅全周をレーザスキャナを用いて計測し、その 3 次元幾何モデルを 1 枚のカメラ画像 (図 4(c)) からカラリゼーションする。計測された距離画像およびリフレクタンス画像の一部を図 5(e)、図 5(f) にそれぞれ示す。さらに、提案手法 1 および提案手法 2 を用いてリフレクタンス画像のカラリ



(a)Colorization with reflectance image (b)Colorization with reflectance and range images

Fig. 12 Comparison of Colorization results

ゼーションを行った結果を図 13 に示す。

図 13 のカラリゼーション結果を基に、図 14(a) に示す 3 次元幾何モデルの彩色を行った。提案手法 1、および提案手法 2 適用後の 3 次元モデルは、それぞれ図 14(b)、図 14(c) の通りである。さらに、提案手法 2 において複数視点 (3 視点) のカラー画像を用いた場合の彩色結果を図 14(d) に示す。図 14(c) の結果と比較して、用いるカラー画像の枚数を増やすことでより広範囲の彩色が行われていることが分かる。以上の結果から、提案手法により少数のカラー画像から 3 次元幾何モデル全周へのカラリゼーションが可能であることが確認できた。

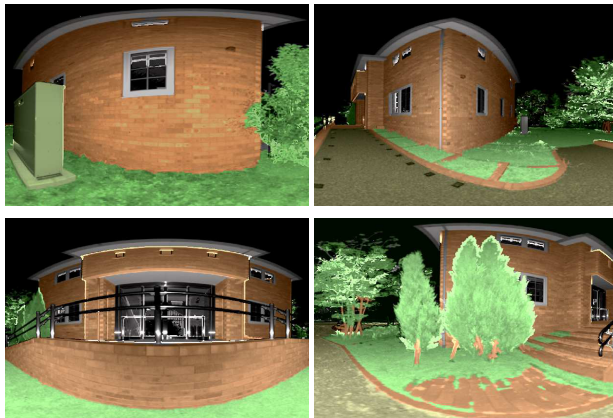
4. ま と め

本稿では、Time-of-Flight 式レーザスキャナによる距離計測時に副産物として得られるレーザ反射強度に着目した 3 次元モデルの彩色手法を提案した。本手法は、エッジやテクスチャなどの豊富な幾何光学情報をもつリフレクタンス画像とカラー画像の対応を決定し、カラリゼーションを施すことで、従来のテクスチャマッピングのような 3 次元幾何モデルとカメラ画像の厳密な位置合わせを必要とせず、3 次元モデルへの彩色を実現するものである。また、リフレクタンス画像をカラリゼーションする際に距離画像に基づくコストを導入することで、過度な色の拡散を防ぎ、適切な 3 次元幾何モデルの彩色が行えることを示した。

提案手法で用いているリフレクタンス画像は、照明条件に関係なく夜間でも計測可能であるという優れた特徴を有しており、距離画像とリフレクタンス画像をレーザスキャナにより計測しておけば、色情報のソースとなるカメラ画像を同時に取得することが困難な場合であっても、任意の画像、たとえば web 上に存在する画像などを用いて後日彩色を行うことができる。



(a) Reflectance images



(b) Proposed method 1 (manual)



(c) Proposed method 2 (automatic)

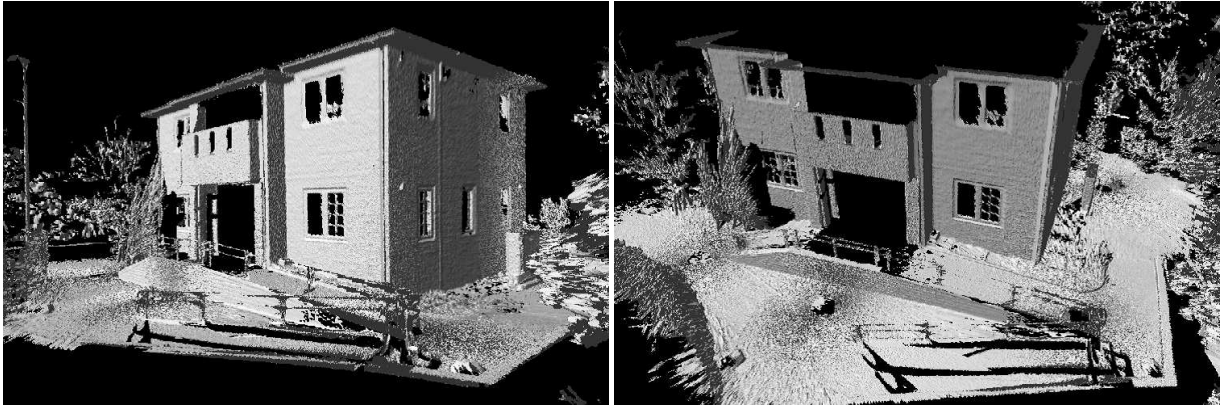
Fig. 13 Colorization of reflectance images from an only single picture

謝 辞

本研究の遂行にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費(課題番号 246404)および文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号 23360115)の支援を受けました。

参 考 文 献

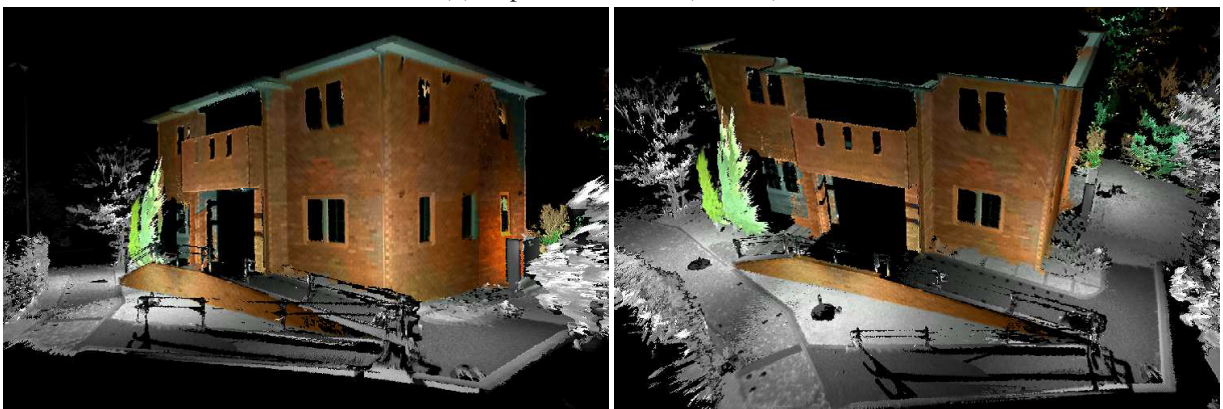
- (1) 野田裕介, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉. 移動ロボット群を用いた大規模文化遺産の幾何・光学モデリング. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, pp. 1A1-E06, 2009.
- (2) K. Yoshida and H. Saito. Registration of range image using texture of high-resolution color images. In *IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, pp. pp.150-153, 2002.
- (3) 野田裕介, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉. カラー画像の分割領域を用いた 2d/3d 位置合わせ. 画像の認識理解シンポジウム (MIRU2010), pp. IS2-11, 2010.
- (4) P. Viola and W.M.Well. Alignment by maximization of mutual information. *IJCV*, Vol. Vol.24, No. No.2, pp. pp.137-154, 1997.
- (5) 倉爪亮, 戸畑享大, 村上剛司, 長谷川勉. Cps-slam の研究-大規模建造物の高精度 3 次元幾何形状レーザ計測システム-. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 8, pp. 1234-1242, 2007.
- (6) 倉爪亮, 西野恒, M. D. Wheeler, 池内克史. リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのアラインメント. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J85-D-II, No. 6, pp. 1038-1046, 2002.
- (7) Ryo Kurazume, Yusuke Noda, Yukihiro Tobata, Kai Lingemann, Yumi Iwashita, and Tsutomu Hasegawa. Laser-based geometric modeling using cooperative multiple mobile robots. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3200-3205, 2009.
- (8) P. Lagodzinski and B. Smolka. Colorization of medical images. In *APSIPA ASC 2009*, 2009.
- (9) A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss. Colorization using optimization. In *SIGGRAPH2004*, 2004.
- (10) Liron Yatziv and Guillermo Sapiro. Fast image and video colorization using chrominance blending. In *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, Vol. 15, 2006.
- (11) E.Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. In *In Numerische Mathematik*, 1959.
- (12) 大石修士, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉. リフレクタンス画像とカラー画像の類似性に基づく 3 次元幾何モデルのカラリゼーション. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2012, 2012.
- (13) 大石修士, 辻徳生, 岩下友美, 倉爪亮, 長谷川勉. レーザ反射強度を用いた 3 次元幾何モデルのカラリゼーション. 画像の認識理解シンポジウム (MIRU2012), 2012.
- (14) Radhakrishna Achanta, Appu Shaji, Kevin Smith, Aurelien Lucchi, Pascal Fua, and Sabine Susstrunk. Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012.
- (15) Navneet Dalal and Bill Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. Vol.1, 2005.



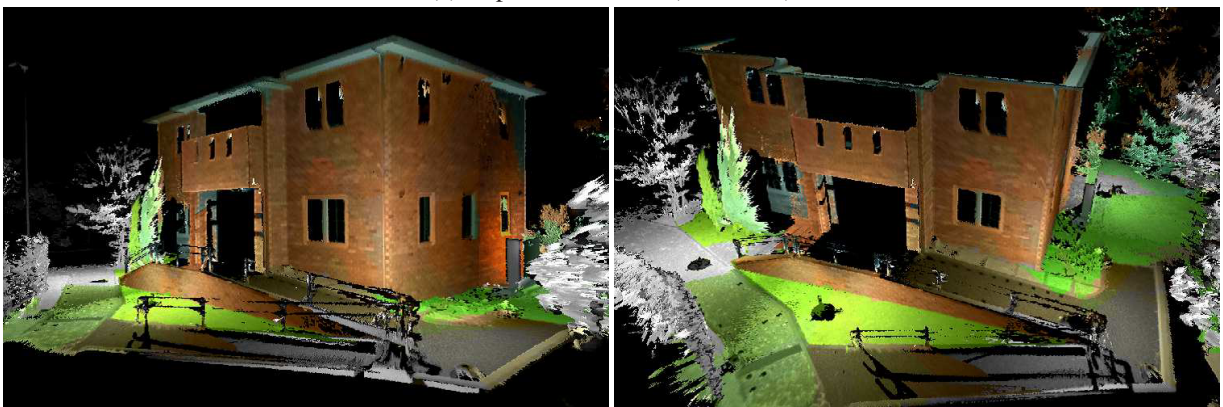
(a)Original 3D mesh model



(b)Proposed method 1 (manual)



(c)Proposed method 2 (automatic)



(d)Proposed method 2 using three pictures taken from difference viewpoints

Fig. 14 Colorization of the entire 3D geometric model