

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

大石 修士[†] 辻 徳生^{††} 岩下 友美^{††} 倉爪 亮^{††} 長谷川 勉^{††}

[†]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

^{††}九州大学大学院システム情報科学研究院

〒 819-0395 福岡市西区元岡 744

E-mail: †oishi@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp, ††{tsuji,yumi,kurazume,hasegawa}@ait.kyushu-u.ac.jp

あらまし 本稿では、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 3 次元幾何モデルの彩色手法を提案する。従来、見えを反映した現実感の高いモデリングを実現する有効な手段として、幾何モデルにカラー画像を張り付けるテクスチャマッピングが盛んに研究されてきた。しかし、一般的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。これに対し、本論文ではカメラ等のセンサ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し、対応する 3 次元点に色を転写することで幾何モデルの彩色を行う新たな手法を提案する。キーワード レーザスキャナ, リフレクタンス画像, カラリゼーション

1. はじめに

レーザスキャナ等を用いた観測に基づく実物体の 3 次元幾何モデリングは、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である。また同時に、幾何モデルに“見え”の情報を付加し、より写実性の高いモデルを生成する手法として、カメラ画像を 3 次元幾何モデルに張り付けるテクスチャマッピングも広く利用されてきた。

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。

これに対し、本稿で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。倉爪ら [5]、梅田ら [6] はカ

メラ画像とリフレクタンス画像の対応関係を決定することで 3 次元幾何モデルへのテクスチャマッピングを実現している。一方で、本稿で提案する手法は、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し 3 次元幾何モデルを彩色するもので、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、ユーザの簡単なインストラクションのみでカラー情報を付加した 3 次元モデルを生成することができる。さらに、カメラ画像とリフレクタンス画像の局所領域の類似度に基づきいくつかの対応点を求め、色度情報を転写することで、人手を介さず自動で彩色された 3 次元モデルを生成する手法についても検討する。

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 [7] 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

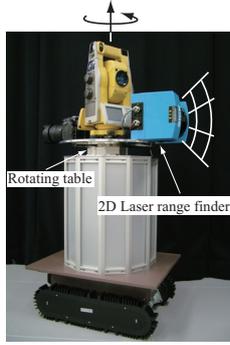


図 1 全周囲距離画像の計測システム [7]



(a) 距離画像



(b) リフレクタンス画像

図 2 距離画像とリフレクタンス画像

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 [8]．

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 [9] [10]．

Yatziv ら [11] 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 [12] 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 は以下のように決定される．

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

$$w(i, j) = r_{ij}^{-6} \quad (2)$$

ただし Ω_c は色度情報を持った画素の集合， r_{ij} は画素 i, j 間のダイクストラ距離である．式 (2) より，色度情報を持つ画素のうち，注目画素までの輝度変化の少ない経路を有するものはその色推定に大きく寄与する．一方で，経路中にエッジが存在している色情報は注目画素の色推定には用いられない．提案手法では，上述した Yatziv らの手法 [11] 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カラリゼーションを実現する．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手動，あるいは自動で求め，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，Yatziv らの手法により，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 [13] によりセグメンテーションされた各領域に対し，HOG [14] 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 [14] 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)

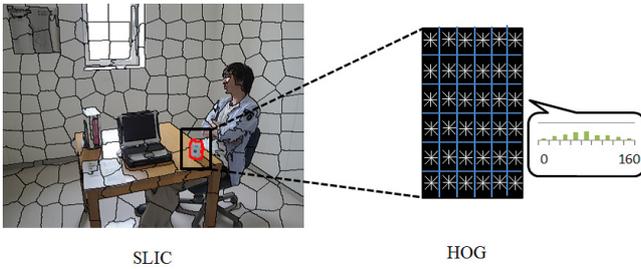


図 3 SLIC と HOG による領域の記述

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) で示した Yatziv らの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

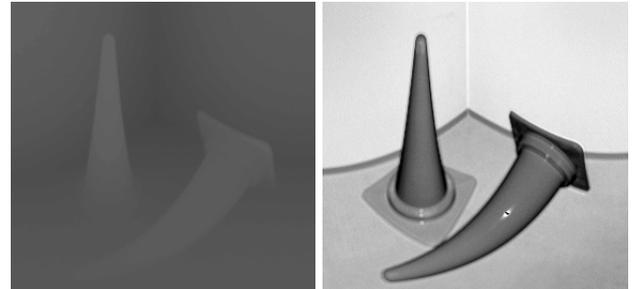
図 1 に示す 3 次元形状計測ロボット CPS-V [7] を用いて，図 4 に示す環境下で実機実験を行った．それぞれの環境における距離画像，リフレクタンス画像を図 5 に示す．ただし，図 1 のロボットはスリット状のレーザスキャナ (SICK LMS151) を載せた回転テーブルを回転させながら全周の距離データを取得しており，画像サイズは距離画像，リフレクタンス画像ともに 760×1135 画素である．図 5 ではそのうちの一部を拡大して示している．

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)

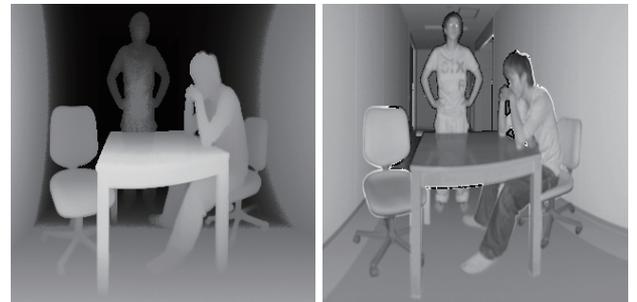


(a) Scene1 (b) Scene2

図 4 実験環境



(a) 距離画像 (Scene1) (b) リフレクタンス画像 (Scene1)



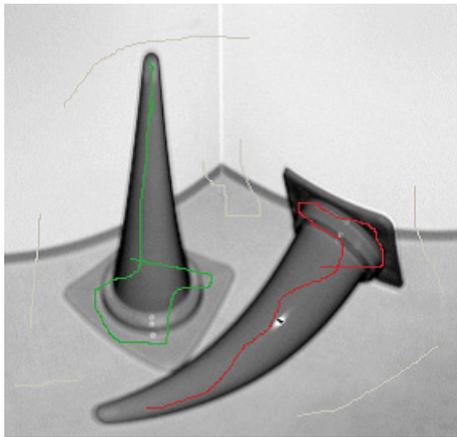
(c) 距離画像 (Scene2) (d) リフレクタンス画像 (Scene2)

図 5 実機実験

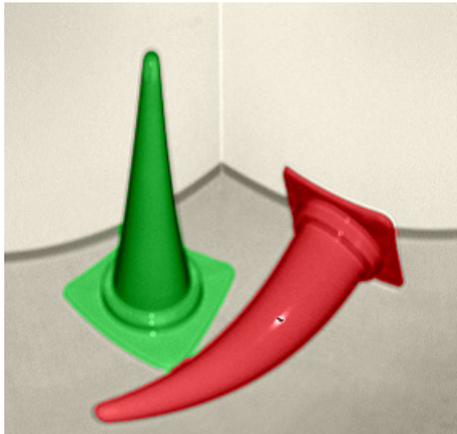
に示す．さらに，図 6(a) を初期画像とし Yatziv らの手法によりカラリゼーションを行った結果を図 6(b) に示す．また，HOG を用いて図 4(a) のカメラ画像と図 5(b) のリフレクタンス画像の対応を決定した結果，およびその結果を基にカメラ画像から色度情報を一部転写したリフレクタンス画像をそれぞれ図 7(a)，図 7(b) に示す．図 7(b) に対し Yatziv らの手法によりカラリゼーションを行った結果は図 7(c) の通りである．

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．

さらに，図 4(b) のような人を含むより複雑な環境下で実験を行った．手動で色の初期値を与えたリフレクタンス画像，それに対し Yatziv らの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．



(a) 手で初期値を与えたりフレクタンズ画像



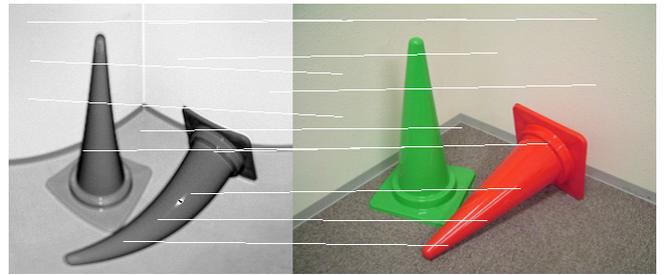
(b) カラリゼーション結果

図 6 提案手法 1(Scene1)

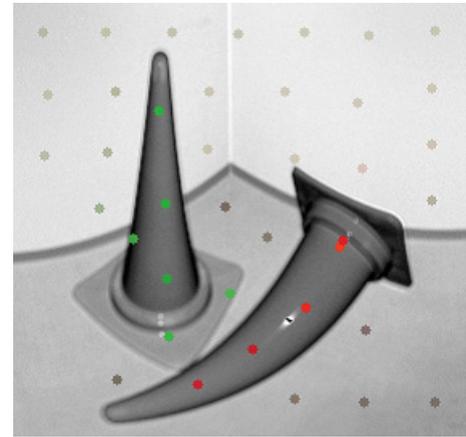
図 11(a), 図 11(b) はそれぞれ図 9(b), 図 10(c) のリフレクタンズ画像を基に図 11(a) の 3 次元幾何モデルへ彩色を行った結果である。人手により初期値を与える提案手法 1 では全体が適切に彩色されているが, HOG に基づき初期値を決定する提案手法 2 では, リフレクタンズ画像とカメラ画像間の誤対応による彩色への悪影響が一部の領域で見られる。

4. ま と め

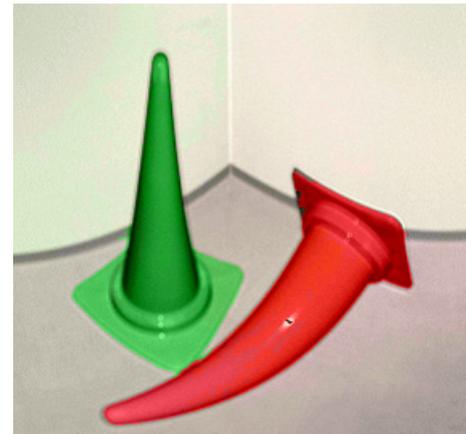
本論文では, Time-of-Flight 式レーザスキャナによる距離計測時に副産物として得られるレーザ反射強度に着目した 3 次元モデルの彩色手法を提案した。本手法は, エッジやテクスチャなどの豊富な幾何光学情報をもつリフレクタンズ画像とカラー画像の対応を決定し, カラリゼーションを施すことで, 従来のテクスチャマッピングのような 3 次元幾何モデルとカメラ画像の厳密な位置合わせを必要とせず, 3 次元モデルへの彩色を実現するものである。提案手法で用いているリフレクタンズ画像は, 照明条件に関係なく夜間でも計測可能であるという優れた特徴を有しており, 距離画像とリフレクタンズ画像をレーザスキ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



(a) カメラ画像とリフレクタンズ画像の対応



(b) 自動で初期値を与えたりフレクタンズ画像



(c) カラリゼーション結果

図 7 提案手法 2(Scene1)

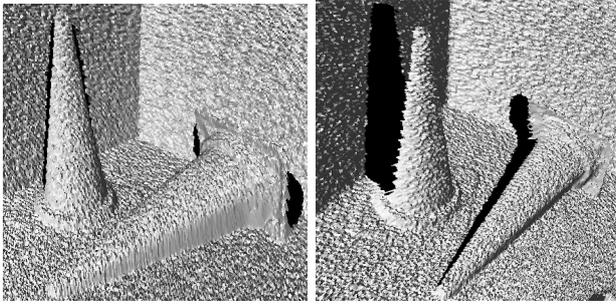
などを用いて後日彩色を行うことができる。

謝 辞

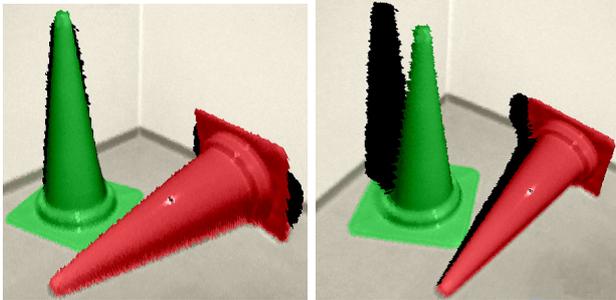
本研究の遂行にあたり, 日本学術振興会科学研究費補助金特別研究員奨励費および文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 23360115) の支援を受けました。

文 献

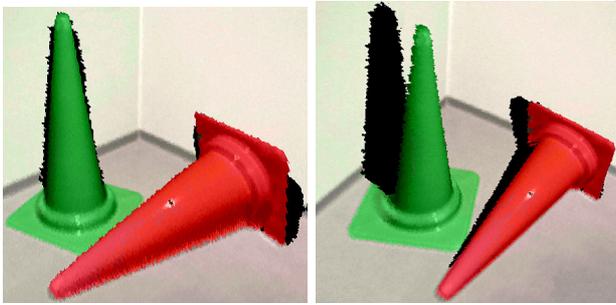
- [1] 野田裕介, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉. 移動ロボット群を用いた大規模文化遺産の幾何・光学モデリング. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, pp. 1A1-E06, 2009.
- [2] K. Yoshida and H. Saito. Registration of range image using texture of high-resolution color images. In *IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, pp.



(a) 彩色前

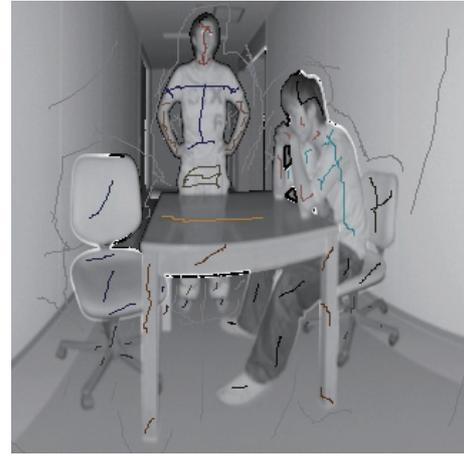


(b) 提案手法 1 による彩色



(c) 提案手法 2 による彩色

図 8 3次元幾何モデルの彩色 (Scene1)



(a) 手動で初期値を与えたリフレクタンス画像

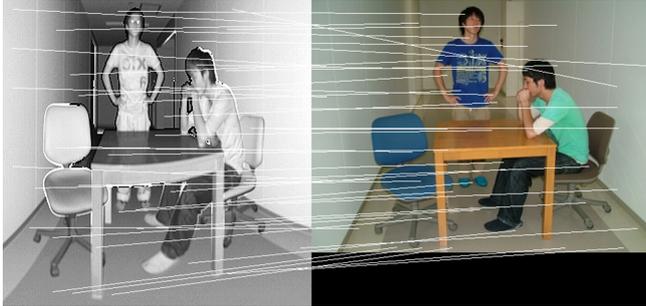


(b) カラリゼーション結果

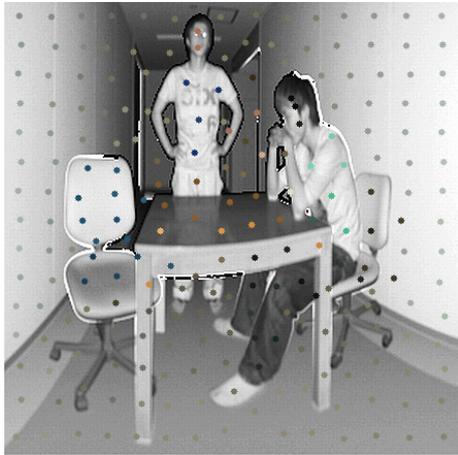
図 9 提案手法 1(Scene2)

- 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] Ryo Kurazume, Ko Noshino, Zhengyou Zhang, and Katushi Ikeuchi. Simultaneous 2d images and 3d geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute. In *Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, pp. 99–106, 2002.
 - [6] 梅田和昇, G. Godin, M. Rioux. こう配拘束と距離濃淡画像を用いた距離画像とカラー画像のレジストレーション. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J88-D-II, No. no.8, pp. pp.1469–1479, 2005.
 - [7] 倉爪亮, 戸畑亨大, 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ー計測システム-. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 8, pp. 1234–1242, 2007.
 - [8] 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.
 - [9] P. Lagodzinski and B. Smolka. Colorization of medical images. In *APSIPA ASC 2009*, 2009.

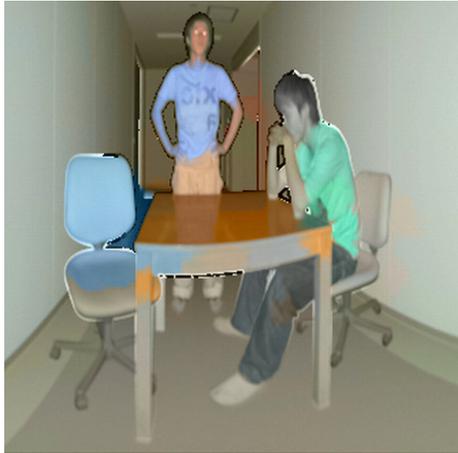
- [10] A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss. Colorization using optimization. In *SIGGRAPH2004*, 2004.
- [11] Liron Yatziv and Guillermo Sapiro. Fast image and video colorization using chrominance blending. In *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, Vol. VOL. 15, 2006.
- [12] E.Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. In *In Numerische Mathematik*, 1959.
- [13] Radhakrishna Achanta, Appu Shaji, Kevin Smith, Aurelien Lucchi, Pascal Fua, and Sabine Susstrunk. Slic superpixels. In *EPFL Technical Report*, No. No.149300, 2010.
- [14] Navneet Dalal and Bill Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. Vol.1, 2005.



(a) カメラ画像とリフレクタンス画像の対応

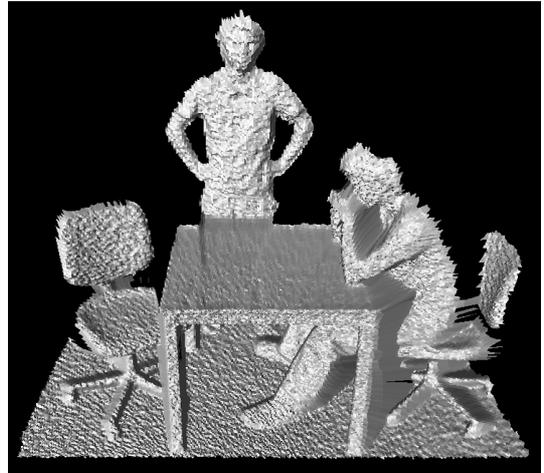


(b) 自動で初期値を与えたリフレクタンス画像



(c) カラリゼーション結果

図 10 提案手法 2(Scene2)



(a) 彩色前



(b) 提案手法 1 による彩色



(c) 提案手法 2 による彩色

図 11 3次元幾何モデルの彩色 (Scene2)