# スクリブルを用いた1枚の画像からの 対話的なレイヤ状3次元モデルの生成

-Scribble-based Modeling for Layered 3D Scenes from a Single Image-

飯塚里志遠藤結城<sup>1</sup>金森由博三谷純福井幸男Satoshi IIZUKA, Yuki ENDO, Yoshihiro KANAMORI, Jun MITANI and Yukio FUKUI

筑波大学 University of Tsukuba

E-mail: {iizuka,endo}@npal.cs.tsukuba.ac.jp, {kanamori,mitani,fukui}@cs.tsukuba.ac.jp

# 1 はじめに

2次元静止画像からの3次元モデルの生成は,コンピュー タビジョンやコンピュータグラフィックスにおいて多く研 究されている.特に1枚の画像のみからの3次元モデル生 成は,奥行きの曖昧性や前景物体による遮蔽のために困難 な問題である.近年では,1枚の画像から自動または単純 なユーザ入力で少数の平面ポリゴンから構成される3次元 モデルを効率的に生成する手法[8,5,6,10,7,16]や,さ らに細かいユーザ制御によって自由形状の3次元モデルを 作成する手法が提案されている[13,20].しかし,前者の 手法が適用できるのは平坦な地面をもつ広いシーンに限ら れ,生成されるモデルも少数の平面ポリゴンから構成され る単純なものである.また,後者の手法は滑らかに変化す る表面形状をもつモデルを作成できるが,複雑なユーザ入 力を多く必要とする.

本稿では1枚の画像を入力とし,画像上でユーザがデプ スを粗いブラシストローク(スクリブル)で指定すること で,前景レイヤと背景レイヤから構成されるレイヤ状3次 元モデルを生成するシステムを提案する.このスクリブル をもとに重み付き測地距離とエネルギー最適化によって画 像全体のデプスを計算する.これにより,少ないユーザ入 力で物体領域を考慮した滑らかなデプスマップを高速に生 成することができる.さらに,算出したデプスマップの勾 配や色特徴が均質な領域(スーパーピクセル)の境界など から奥行きが大きく変化する不連続箇所を抽出し,この部 分では3次元モデルを構成するポリゴンを分割すること で画像領域の連続性を考慮したモデルを生成する.また, この不連続箇所から遮蔽領域を推定し,遮蔽領域のテクス チャとデプスを含む背景レイヤを生成することで,遮蔽領 域まで考慮したレイヤ状3次元モデルを生成する.

本稿の貢献をまとめると以下のようになる.

- スクリブルからレイヤ状3次元モデルを生成するためのワークフローの提案
- スクリブルからの測地距離とエネルギー最適化によるデプスマップの計算

<sup>1</sup>現在は NTT 研究所に所属.

 不連続箇所の抽出とそれにもとづく遮蔽領域の推定 と合成

提案システムによって単純な操作のみで十分な3次元効 果を得られるモデルが生成できることを示す.

#### 2 関連研究

1枚の静止画像から3次元モデルを生成するためにさま ざまな手法が提案されている. Horry らや Criminisi らは ユーザが指定した消失点や平行線を指定することで,平面 ポリゴンから構成される3次元モデルを生成する手法を提 案している [8, 5]. Kang らはこれを発展させ, 消失線に もとづき3次元モデルを生成することでより多くのシーン のモデリングを行えるようにし,パノラマ画像にも応用で きることを示している [10]. Iizuka らは Kang らの手法を もとに,地面領域とそれ以外の領域(建物や空など)を分 割する境界線を用いて3次元座標を計算し,同時に前景物 体やその背景領域を効率的に生成することで,さまざまな シーンモデルを効率的に生成できるシステムを提案してい る [9].また,画像上の建物の輪郭などをユーザが指定し, あらかじめ用意した基本立体を当てはめることで建築物の モデリングを行うシステムも提案されている [6]. 近年で は,入力画像がいくつかの大きな領域で構成されていると 仮定し,自動で3次元モデルを生成する手法も提案されて **いる**. Hoiem らの手法では画像が地面,空,垂直領域の3 つから構成されると仮定し,領域分割によって得られた均 質領域 (スーパーピクセル)を機械学習したパラメータに もとづき統合していくことで3次元シーンを生成している [7].また, Saxena らは画像のテクスチャの色や勾配など の特徴量とデプスの関係を機械学習によって推定し,自動 で3次元モデルを生成する手法を提案している[16].これ らの手法は,入力画像は少数の平面ポリゴンから構成され るシーンに制約しているため,滑らかに変化するような表 面形状を生成することはできない.

これらの手法とは異なり, Oh らは画像中のそれぞれの 物体に対話的に奥行きを与えていくことで3次元シーンモ デルを生成するシステムを提案している[13].この手法で



(a) 入力画像とユーザ入力

(b) レイヤ情報の生成

(c) 3 次元モデル

図 1: 提案システムの処理の流れ.(a) まずユーザが入力画像にスクリブルで粗くデプスを指定する.スクリブルの色は 濃いほどデプスが小さいことを表している,(b) デプスマップ*U* や不連続箇所のマップ*E*<sub>d</sub>,遮蔽領域を含む背景のデプ ス*U*<sub>b</sub> やテクスチャ*T*<sub>b</sub> が生成され,(c) 3 次元モデルが構築される.なお,入力は文献[17]の画像を利用している.

は単純な平面ポリゴンだけでなく,ブラシや平滑化フィル タによってピクセル単位でデプスを割り当てていくことが できる.また Zhang らは入力画像にデプスや法線方向,平 面形状の保持などの制約を指定していくことで自由形状を もつ3次元モデルを生成する手法を提案している[20].こ れらの手法は詳細な表面形状をモデリングできるが,複雑 なユーザ入力を多く必要とし手間がかかる.

Assa と Wolf はユーザが画像の背景領域を指定し, テク スチャの変化や大気拡散などから相対的な奥行きを抽出す る従来手法を組み合わせてデプスマップを生成し,ユーザ が奥行きを感じるジオラマモデルを生成する手法を提案し ている [1].この手法は,他の手法のような3次元モデルを 生成するのではなく,奥行きが大きく変化する箇所を強調 し,少しの視点移動によってユーザが奥行きを感じられる ようにしている.しかし,この手法はピンぼけや大気散乱 などが起こる広大な屋外画像のみを対象としており,デプ スの計算にも時間がかかるため対話的な編集は行えない.

より単純で対話的なデプスマップの生成手法として, Wang らはスクリブルでデプスを指定していくことで,1枚の画像 からステレオ視画像を生成する手法を提案している[17].こ の手法では画像上でまばらに指定したデプスをエネルギー 最適化によって画像全体に伝播させることでデプスマップ を生成している.このようなスクリブルによるデプスマッ プの生成は Ribera らによって動画を入力とした 3 次元モ デルの生成にも利用されている[15].これらの手法は粗く デプスを指定する単純な操作のみで画像全体のデプスを計 算できるが,入力画像に対して1枚のデプスマップしか生 成できないため,前景物体による遮蔽領域などは考慮でき ない.また,エネルギー最適化のみによるデプスの伝播は 計算コストが高く,多くのデプス入力が必要になる場合も ある.そこで提案システムでは,ユーザが指定したスクリ ブルからの重み付き測地距離にもとづき画像全体のデプス を計算する.これにより,既存手法よりも少ないスクリブ ルで効果的にデプスを伝播させることができる.また,測

地距離はピクセル数に対し線形時間で計算できるため[18], 対話的な速度でデプスマップが生成できる.ただし,測地 距離のみで計算したデプスマップは局所的に粗くなってし まう.そこで提案手法では,測地距離によって計算したデ プスをデータ項としてエネルギー関数を定義し,最適化処 理を行うことで滑らかなデプスマップを生成する.測地距 離ベースのデプスをデータ項として用いることで,エネル ギー最適化はすぐに収束するため,対話的な速度を保った まま滑らかなデプスマップが生成できる.さらに遮蔽領域 のテクスチャとデプスを推定して背景レイヤを生成するこ とで,遮蔽領域も考慮した3次元モデルを構築できる.

## 3 システム概要

本システムの処理の流れを図1に示す.本システムでは, はじめにユーザがデプスをスクリブルで粗く入力する.こ れをもとに以下の情報が生成される:

- 画像全体のデプスマップ U
- 奥行きが大きく変化する不連続箇所のマップ Ed
- 遮蔽領域を含む背景テクスチャT<sub>b</sub>
- 遮蔽領域を含む背景デプスマップ Ub

画像全体のデプスマップを計算するため,本システムは まず各スクリブルからの重み付き測地距離を計算する.こ の測地距離に応じてスクリブルに割り当てられたデプス値 をブレンドすることで画像の全ピクセルのデプス値が算出 される.次にこのデプスマップを用いてエネルギー関数を 定義し最小化することで,画像中のエッジを考慮した滑ら かなデプスマップが生成される(図1(b),U).この提案手 法は既存手法[15,17]よりも少ないスクリブルで良好なデ プスマップを生成でき,さらに計算時間も高速である.デ プスマップの計算については4節で示し,既存手法との比 較結果は7節で示す. 次に生成されたデプスマップをもとに前景レイヤと背景 レイヤからなるレイヤ構造を構築する.まずデプスマップ のエッジと入力画像のエッジ,Mean Shift による領域分割 [4]によって得られたスーパーピクセルの境界からデプスが 大きく変化する箇所を表す不連続箇所のマップを抽出する (図1(b), $E_d$ ).この不連続のマップでは領域がつながって いないと考えられるため,この箇所を分割することで前景 レイヤと背景レイヤを生成する.この際,前景によって遮 蔽されている領域のテクスチャを推定し合成することで背 景テクスチャ(図1(b), $T_b$ )を生成し,このテクスチャを 用いて背景デプス(図1(b), $U_b$ )を計算することで背景レ イヤが生成され,遮蔽領域まで考慮した3次元モデルが生 成される.レイヤ構造の生成については5節で述べる.

# 4 デプスマップの生成

デプスマップ生成のため,提案システムではまず各スク リブルからの測地距離に応じてデプスを計算し,その後エ ネルギー最適化を行うことで最終的なデプスを算出する (図2).ここで重み付き測地距離とはあるピクセルから対 象ピクセルまでの重みを考慮した最短距離であり,重みの 設定によってグレイスケール画像の色付け[19]や前景領域 と背景領域の分離[2]などに利用されている.これらの手 法ではそれぞれ輝度勾配と前景/背景の尤度の差を重みと して設定している.提案手法では,重みをYuv 色空間の 距離として測地距離を計算し,この測地距離に応じてデプ スをブレンドさせることでデプスマップを生成する.

まずユーザが L 本のスクリブルを入力したとして,スク リブル l(=1,2,...,L) がもつデプスを  $d_l \in [0,1]$  とする. ここでスクリブル l に含まれるピクセルの集合を  $\Omega_l$  とし,  $\Omega_l$  内のピクセルはすべて同じデプス値  $d_l$  をもつものとす る.スクリブル l からピクセル t までの測地距離  $D_l$  は以 下の式で計算される.

$$D_l(t) := \min_{s \in \Omega_l} dist(s, t) \tag{1}$$

$$dist(s,t) := \min_{C_{s,t}} \sum_{x,y} W_{xy} \tag{2}$$

ここで $C_{s,t}$  はピクセルs とピクセルt をつなぐ経路であり, x, y は経路 $C_{s,t}$  に含まれる隣接ピクセルを表す.また,重 み $W_{xy}$  はYuv 色空間における距離  $d_c(x, y)$  を用いて定義 される.

$$W_{xy} = d_c(x, y)^2 \tag{3}$$

この測地距離は Yatziv らの手法 [18] により線形時間で計 算できる.

次に,算出した距離を重みとし,ピクセルtのデプスG(t)を計算する.これは以下の式で表される.



図 2: デプスマップの生成.(a) 入力画像上でデプスをスク リブルで指定すると,(b) 各スクリブルからの測地距離に 応じてデプスが計算される.(c) これを用いてエネルギー 最適化を行うことで滑らかなデプスマップが得られる.

$$G(t) = \frac{\sum_{l} D_{l}(t)^{-k} d_{l}}{\sum_{l} D_{l}(t)^{-k}}$$
(4)

ここでkは各スクリブルのデプスをどの程度混合するかを 決める定数であり、この値が大きいほど測地距離  $D_l$ が小 さいスクリブルのデプスの影響が強くなる.本システムで はk = 2としている.

算出した測地距離ベースのデプス値をデータ項とし,注 目ピクセル *i* の 8 近傍 *N*(*i*) のピクセルの加重平均との差 が小さくなるようにエネルギー関数を定義する.

$$E(U) = \sum_{i} (U(i) - G(i))^{2} + \sum_{i} \gamma(i) \left( U(i) - \sum_{j \in N(i)} w_{ij} U(j) \right)^{2}$$
(5)

ここで  $w_{ij} = \exp(-d_c(i,j)/2\sigma^2)$  であり,  $\sigma$  は定数である. また,  $\gamma(i)$  は平滑化の度合いを調整する重みである.この エネルギー関数を最小化することでエッジを考慮した滑ら かなデプスマップが生成される.

# 5 レイヤ構造の生成

生成されたデプスマップにおいて,隣接ピクセル間でデ プスが大きく変化する箇所では領域がつながっていないと 考えられる.そのため,本システムではこの不連続箇所を 抽出し3次元モデルのポリゴンを分割することで,画像領 域の連続性を考慮したモデルを生成する.また,不連続箇 所の周りでは遮蔽が起きていると考えられるため,本シス テムでは遮蔽領域を抽出してそのテクスチャとデプスを生 成することで,背景のレイヤを構築する.この背景レイヤ をはじめに生成したデプスマップから作られるレイヤ(前 景レイヤ)を重ね合わせることで,最終的なレイヤ状3次 元モデルが完成する.以下 5.1 節では複数のエッジ特徴を 用いた不連続箇所の抽出,5.2 節では不連続箇所を利用し た遮蔽領域の抽出,5.3 節では遮蔽領域のデプスとテクス チャの生成について述べる.



(a)  $E_d$ 

(c)  $E_b$ 

(e) 不連続箇所

図 3: 不連続箇所の抽出.(a) デプスマップのエッジ  $E_d$  と(b) スーパーピクセルの境界  $E_s$ ,(c) 入力画像のエッジ  $E_b$  を 用いて (d) エッジ強度 Estrength を定義する.エッジ強度が大きいほどエッジの色が赤く表示されている.このエッジ強 度を閾値処理することで (e) 不連続箇所が抽出される.



(a) Trimap の生成

(b) 前景領域

図 4: 前景領域の推定.(a) 不連続箇所を膨張させ,その 領域内のデプスをもとに絶対前景(白)と絶対背景(灰), 未知領域(黒)からなる Trimap を生成する.これを用い て Geodesic segmentation [2] により (b) 前景領域が抽出さ れる.

#### 5.1不連続箇所の抽出

入力画像の領域の連続性を考慮するため,生成したデプ スマップをもとに奥行きが大きく変化し画像領域が不連続 な箇所を抽出する.このため,提案システムではまずデプ スマップのエッジ  $E_d$  とスーパーピクセルの境界  $E_s$ , 入力 画像のエッジ Eb をもとにエッジ強度 Estrength を定義す る.それぞれのマップ $E_d, E_s, E_b$ において,エッジのピク セルには1,それ以外のピクセルには0が割り当てられて いる. ピクセル t におけるエッジ強度  $E_{strength}(t)$  は以下 のように表される.

$$E_{strength}(t) = w_d E_d(t) + w_s E_s(t) + w_b E_b(t)$$
(6)

ここで  $w_d, w_s, w_b$  はそれぞれのエッジの重みである.それ ぞれのエッジ抽出には Meer の手法 [12] を用い, スーパー ピクセルは Mean Shift ベースの領域分割 [4] により算出す る.また,抽出座標のわずかなずれによる誤差を防ぐため, それぞれのエッジはモルフォロジ演算により1ピクセルの 膨張処理を行っている(図3).

算出したエッジ強度を閾値  $\lambda_{dis}$  で閾値処理することで最 終的な不連続箇所 E<sub>d</sub> (図 3(e))が得られる.現在の実装 では $w_d = 0.5, w_s = 0.25, w_b = 0.25, \lambda_{dis} = 0.7$  としてい る.本システムでは隣接ピクセルをつないでポリゴンをつ くり3次元モデルを構築しているが,この不連続箇所では



(a) 背景領域とスクリブル

(b) 背景デプス

図 5: 遮蔽領域を含む背景のテクスチャとデプスの生成. (a) 生成した背景画像上でスクリブルのデプスを伝播させ る.このスクリブルははじめにユーザが入力したスクリブ ルから前景領域に含まれるスクリブルを除外したものであ る.これにより,(b)背景領域のデプスマップが生成される.

3次元モデルのポリゴンを生成しないことで,画像領域の 連続性を考慮したモデルが生成できる.

#### 遮蔽領域の抽出 5.2

領域が連続しない不連続箇所があるような画像では,前 景領域に遮られている領域(遮蔽領域)が存在する.遮蔽 領域は前景領域と一致するため, 遮蔽領域の推定は画像中 の前景領域を推定することと同じ問題になる.遮蔽領域は 不連続箇所を境界としているため,本システムでは不連続 箇所の情報を用いて遮蔽領域の推定を行う.すなわち,不 連続箇所のどちら側が前景または背景領域になるか,どの 範囲が前景領域に含まれるかを推定する.

まず抽出した不連続箇所(図3(e))をモルフォロジ演算 によって膨張させる.本システムでは膨張幅を5ピクセル に設定している.次に,この領域に含まれるピクセルのデ プス値からヒストグラムを作成し,このヒストグラムを2 つに分ける閾値を判別分析法 [14] により計算する.この 閾値よりも大きいデプス値をもつピクセル集合を絶対前 景領域,小さいデプス値をもつピクセル集合を絶対背景 領域,残りの領域を未知領域として分類する.このラベリ ング処理をそれぞれのつながった不連続箇所ごとに行い, Trimap を生成する (図 4(a)). この Trimap をもとに未 知領域を測地距離ベースの前景抽出手法である Geodesic



図 6: 前景レイヤと背景レイヤを重ね合わせた 3 次元モ デル.

Segmentation [2] と同様の処理により前景領域と背景領域 に分類する(図4(b)).この前景領域がそのまま遮蔽領域 と一致するため,画像中の遮蔽領域の抽出が可能となる.

#### 5.3 遮蔽領域のテクスチャとデプスの生成

抽出した遮蔽領域においてデプスとテクスチャの両方を 生成することで背景レイヤを生成する.このため,本シス テムではまず遮蔽領域のテクスチャを生成する.テクスチャ 生成には類似パッチ合成による高速なテクスチャ補完が可 能な PatchMatch[3]を用いる.これにより,遮蔽領域のテ クスチャを含む背景テクスチャが生成される.次に背景の デプスマップを生成するため,はじめにユーザが与えたス クリブルの内,前景領域に含まれるスクリブルを除外する (図 5(a)).残りのスクリブルを用いて背景テクスチャ上 で4節で示したようにデプスを伝播させることで,背景の デプスマップが生成される(図 5(b)).このようにして生 成された背景レイヤを前景レイヤを重ね合わせることで3 次元モデルが生成される(図 6).

# 6 ユーザインタフェース

提案システムにおいて,ユーザはスクリブルによってデ プス値を入力画像上で指定していく(図1(a)).デプスマッ プは数秒で生成されるため,ユーザは生成されたデプスマッ プを確認しながら試行錯誤が容易に行える.また,デプス を指定するほかにデプスが滑らかに変化する箇所を指定す るブラシも利用できる(図7(a)赤線).このスクリブル内 ではエネルギー関数の平滑化項の重み $\gamma$ と定数 $\sigma$ を大きく することで,色変化に影響されにくい滑らかなデプスマッ プを実現できる.



(a) ユーザ入力

(b) 3 次元モデル

図 7: 平滑化ブラシも含めたユーザ入力による 3 次元モデ ルの生成.(a) デプスと滑らかに変化する箇所(赤)を指 定することで,(b)より良好な 3 次元モデルを生成するこ とができる.



 (a) デプスの指定
 (b) 既存手法
 (c) 提案手法

図 8: デプスマップ生成の比較.(a)入力画像上でまばら にデプスを指定すると,(b)既存手法[11]ではうまくデプ スが伝播しないが.(c)提案手法では物体形状に沿ってデ プスが伝播し,良好なデプスマップが得られているのがわ かる.

このように,提案システムにおけるユーザ入力はブラシ インタフェースのみである.そのため,マウスを用いた入 力以外にタッチパネルなどのデバイス上でも効果的にモデ リングを行うことができる.

### 7 結果

本システムはライブラリとして OpenGL, GLUT を用い て C++言語で実装した.また, Intel Core i7 620M(2.67GHz, 4.00GB RAM) と NVIDIA Quadro NVS 3100M グラフィッ クカードが搭載された PC 上で実行した.使用した画像の サイズは全て 15 万画素から 100 万画素の範囲内である.結 果に示した画像において,デプスマップの計算に約2秒, 不連続箇所の抽出から背景のデプスとテクスチャの生成に は約8秒,ユーザ入力の試行錯誤も含めて全体でかかった 時間はすべて 5 分以内であった.本システムではこれらの 計算はすべてシングルコアで処理している.

#### 7.1 結果と比較

図 1, 7, 10 は提案システムによってレイヤ状 3 次元モデ ルを生成した結果である.それぞれの結果において,物体 の表面形状を考慮した滑らかなデプスマップが生成されて いることがわかる.また,領域が不連続な部分ではポリゴ



図 9: 提案システムが適用できない例. 複数の物体領域が 重なり合っていると,前景と背景の2つのレイヤだけでは うまくモデル化できない.

ンが生成されず,同時に遮蔽領域まで考慮した背景レイヤが生成されている.このように遮蔽領域のデプスやテクス チャを考慮したレイヤ構造を構築することで,よりユーザ に立体感を与えることができる.

図8はスクリブルによるデプスマップの生成について, 提案手法と Ribera らや Wang らの手法 [15, 17] との比較 である. 彼らは Levin らの手法 [11] にもとづき, エネル ギー最適化によって画像全体のデプスを計算している.既 存手法によって生成されたデプスマップではうまくデプス が伝播していないのに対し,提案手法では物体の表面形状 に沿ってデプスが伝播していることがわかる.また,提案 手法の計算時間は約2秒だったのに対し,既存手法の計算 時間は Levin らの実装による MATLAB の最小二乗法を用 いて約10秒だった.提案手法では測地距離にもとづきデプ スを伝播させた後,エネルギー最適化によって滑らかなデ プスマップを生成している.測地距離は線形時間で高速に 計算でき,これを初期値とすることでその後のエネルギー 最適化がすぐに収束するようになる.これにより,並列処 理なしに対話的な速度でデプスマップを生成できるだけで なく、少ないスクリブルで効果的にデプスを伝播させるこ とが可能になる.

#### 7.2 制約

提案手法では,3次元モデルは前景レイヤと背景レイヤ の2つで構成されている.そのため,図9のように複数領 域が重なり合っているようなシーンはうまくモデル化でき ない.また,連続していない領域同士の境目の色変化が小 さい場合,エッジ検出に失敗し不連続箇所が抽出できない 場合がある.このような画像ではより多くのデプススクリ ブルをユーザが入力する必要がある.

### 8 まとめ

本稿では,デプスをもったスクリブルを入力として1枚 の画像からレイヤ状3次元モデルを生成するシステムを提 案した.提案システムでは,ユーザが入力したデプススク リブルからの重み付き測地距離とエネルギー最適化を用い て画像全体のデプスを計算する.これにより,既存手法よ りも少ないスクリブルで良好なデプスマップを高速に計算 できる.また,生成したデプスマップから不連続箇所を抽 出しモデル上で分割することで,画像領域の連続性を考慮 したモデルを生成できる.さらにこの不連続箇所から遮蔽 領域を推定し,そのテクスチャとデプスを合成して背景レ イヤを生成することで,入力画像では未知の遮蔽領域まで つくられた3次元モデルを生成でき,よりユーザに3次元 効果を与えられる.

今後は,前景と背景の2つのレイヤだけでなく複数のレ イヤを生成する手法について検討していきたい.このため, ユーザが指定したスクリブルの情報を用いて入力画像を大 きく領域分割し,連続した領域はそれぞれ統合し,手前に 位置している領域からレイヤにしていくことで複数のレイ ヤを生成できないかと考えている.この際,画像領域の色 分布などを考慮した重み付き測地距離を定義することで, より良好なデプスマップが生成できると思われる.また, ユーザテストを行うことで提案システムの有効性を確認し, さらに使いやすいインタフェースを設計していきたい.

### 謝辞

本稿において使用した画像は以下の Flickr ユーザのも のである: longhorndave, isawnyu, yeowatzup, Lennart-Tange, PublicDomainPhotos, daverynin.

# 参考文献

- Assa, J. and Wolf, L.: Diorama Construction From a Single Image, *Comput. Graph. Forum*, Vol. 26, No. 3, pp. 599–608 (2007).
- [2] Bai, X. and Sapiro, G.: Geodesic Matting: A Framework for Fast Interactive Image and Video Segmentation and Matting, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 82, No. 2, pp. 113–132 (2009).
- [3] Barnes, C., Shechtman, E., Finkelstein, A. and Goldman, D. B.: PatchMatch: A Randomized Correspondence Algorithm for Structural Image Editing, ACM Transactions on Graphics (Proc. of SIG-GRAPH), Vol. 28, No. 3, pp. 24:1–24:11 (2009).
- [4] Comaniciu, D., Meer, P. and Member, S.: Mean shift: A robust approach toward feature space analysis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 24, pp. 603–619 (2002).



図 10: 提案システムによるレイヤ状3次元モデルの生成. 左の画像が入力画像とユーザによって指定されたデプススク リプル,中央の画像が生成されたデプスマップ,右の画像が生成された3次元モデルである.

- [5] Criminisi, A., Reid, I. and Zisserman, A.: Single View Metrology, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 40, No. 2, pp. 123–148 (2000).
- [6] Debevec, P. E., Taylor, C. J. and Malik, J.: Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach, *Pro*ceedings of SIGGRAPH '96, ACM, pp. 11–20 (1996).
- [7] Hoiem, D., Efros, A. A. and Hebert, M.: Automatic photo pop-up, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 24, No. 3, pp. 577–584 (2005).
- [8] Horry, Y., Anjyo, K.-I. and Arai, K.: Tour into the picture: using a spidery mesh interface to make animation from a single image, *Proceedings of SIG-GRAPH '97*, pp. 225–232 (1997).
- [9] Iizuka, S., Kanamori, Y., Mitani, J. and Fukui, Y.: Efficiently Modeling 3D Scenes form a Single Image, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 32, No. 6, pp. 18–25 (2011).
- [10] Kang, H. W., Pyo, S. H., ichi Anjyo, K. and Shin, S. Y.: Tour Into the Picture using a Vanishing Line and its Extension to Panoramic Images, *Computer Graphics Forum*, Vol. 20, No. 3 (2001). ISSN 1067-7055.
- [11] Levin, A., Lischinski, D. and Weiss, Y.: Colorization using Optimization, ACM Transactions on Graphics, Vol. 23, pp. 689–694 (2004).
- [12] Meer, P. and Georgescu, B.: Edge Detection with Embedded Confidence, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 23, No. 12, pp. 1351–1365 (2001).
- [13] Oh, B. M., Chen, M., Dorsey, J. and Durand, F.: Image-based modeling and photo editing, *Proceed*ings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '01, ACM, pp. 433–442 (2001).
- [14] Otsu, N.: A threshold selection method from graylevel histograms, *IEEE Transactions on Systems*, *Man and Cybernetics*, Vol. 9, pp. 62–66 (1979).
- [15] Ribera, R. B. i., Choi, S., Kim, Y., Lee, J. and Noh, J.: Video Panorama for 2D to 3D Conversion, *Comp. Graph. Forum*, Vol. 31, No. 7pt2, pp. 2213– 2222 (2012).
- [16] Saxena, A., Sun, M. and Ng, A. Y.: Make3D: Learning 3D Scene Structure from a Single Still Image, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 31, No. 5, pp. 824–840 (2009).
- [17] Wang, O., Lang, M., Frei, M., Hornung, A., Smolic, A. and Gross, M.: StereoBrush: interactive 2D to 3D conversion using discontinuous warps, *Proceedings of*

the Eighth Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling, SBIM '11, ACM, pp. 47–54 (2011).

- [18] Yatziv, L., Bartesaghi, A. and Sapiro, G.: O(N) Implementation of the Fast Marching Algorithm, *Jour*nal of Computational Physics, Vol. 212, pp. 393–399 (2005).
- [19] Yatziv, L., Yatziv, L., Sapiro, G. and Sapiro, G.: Fast image and video colorization using chrominance blending, *IEEE Transctions on Image Processing*, Vol. 15, p. 2006 (2004).
- [20] Zhang, L., Dugas-Phocion, G., Samson, J.-S. and Seitz, S. M.: Single View Modeling of Free-Form Scenes, *In Proc. of CVPR*, pp. 990–997 (2002).