スーパーピクセル上の接平面に対する光線追跡を用いた 距離画像の補間*

松 尾 清 史 ** 青 木 義 満 ***

Distance Image Interpolation Using Ray-tracing for Tangent Planes on Superpixels

Kiyoshi MATSUO and Yoshimitsu AOKI

This paper proposes a fusion technique that takes noisy low-resolution distance information and high-resolution color information, and produces accurate and high-resolution 3D measurements. In our method, first, tangent planes on each superpixel of the high-resolution color information are estimated from the low-resolution distance information. Then, using ray-tracing calculation, these tangent planes are divided into groups consisting of smooth-connectable tangent planes. Finally, the interpolation of distance value is performed using an upsampling filter on each region consisting of superpixels that have smooth-connectable tangent planes. The clustering of tangent planes using ray-tracing calculation achieves efficient and noise-robust smooth surface segmentation, and a high completion rate is achieved in noisy situations without decreasing the interpolation accuracy. In additional, ray-tracing calculation for tangent planes makes it possible to estimate distance information of surfaces behind occlusions. In experiments on images from the Middlebury stereo datasets with added simulated Gaussian measurement noise, our method interpolates each image at a high completion rate, and achieves low error when compared with existing techniques.

Key words: distance image interpolation, ray-tracing, multi-echo measurement, image segmentation, superpixel

1. 緒 言

近年、三次元情報に対する処理技術は物体の認識¹⁾やモデル化²⁾などの応用を目的とした分野へと広がりを見せている。応用的な三次元情報技術の発展に伴い、さまざまな環境での高解像度かつ高精度な三次元計測への需要はより高まりをみせている。しかしながら、ステレオカメラやレーザレンジファインダなどの三次元計測用センサ単体では解像度と精度を両立した計測を行うことは難しいため、複数のセンサ情報を融合する技術、センサフュージョン技術が提案されてきている^{3)~5)}。本稿ではその中のカラー画像を用いた距離画像の高精度な補間技術について議論を行う。我々はレーザレンジファインダなどにより計測された低解像度な距離情報を、カメラから得られた高解像度な色の情報によって正確に補間することで、高解像度かつ高精度な三次元計測を実現することを目指している。本稿ではこの目的のために、計測されたデータの補間技術のみを取り扱う。個々のハードウェアに依存するセンサ間での位置や計測タイミングの校正に起因する問題を切り離し、補間技術を確認することを目指す。

本稿と同じ枠組みの補間技術^{6)~7)}の中で、近年では色の情報や距離の情報から推定される物体の領域分割の情報を利用する手法が注目されてきている^{8)~9)}。これらの手法では画像平面を物体ごとの領域に分割し、“同じ物体の領域に属する画素での距離

Fig.1 Left: Color image. Right: Resulting segmentation. Different colors represent different segments. The smooth surface segmentation information is generated for the distance interpolation. The occluded wall was estimated as a single segment by using ray-tracing calculation. This image is generated using $\times 4 \times 4$ upsampling

の値は類似する”という仮定を用いて補間を行う。しかしカラー画像、距離画像のどちらかにより決まる領域分割を用いるため、色のにじみや距離情報の解像度の低さによって生じる領域分割の誤りにより補間精度が低下するという問題が存在した。この問題に対して、Kimらは色情報におけるエッジと距離情報におけるエッジが合致しない領域を推定することによって色から生じる領域の曖昧さを反映した局所フィルタを提案した¹⁰⁾。KimらはGarciaらの提案した局所フィルタ⁸⁾を拡張し、色と距離の情報について互いにエッジが合致しない領域における距離情報の重みを下げる項を導入し、補間精度を向上させた。しかしながら、この手法では、低解像度な距離情報を元にエッジを推定するため、Garciaらの手法⁸⁾と同じく元にする距離情報の解像度が低い場合や計測誤差が大きい場合には、距離情報によるエッジの推定精度が下がり、補間精度が低下する。一方で松尾らは、色の情報と距離の情報の両方を協調的に利用した領域分割処理を経由する手法を提案した^{5)~11)}。この手法ではスーパーピクセル分割によりカラー画像を色の均質な小領域に分

* 原稿受付 平成 26 年 4 月 1 日

掲載決定 平成 26 年 6 月 27 日

** 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (神奈川県横浜市港北区吉 3-14-1)

*** 正 会 員 慶應義塾大学大学院理工学研究科

Fig.2 Interpolation result of the scene *Art* (upsampling rate $\times 4 \times 4$). Points that are estimated as the multi-echo point are colored green

割し、低解像度な距離情報を用いて各小領域における形状の接平面を推定する。その後隣接する小領域において接平面のつながりを調べ、接平面が滑らかにつながる小領域を連結し、形状が滑らかな領域による領域分割を行う。最後に、得られた領域分割結果を用いて領域ごとに補間を行う。低解像度な距離情報を接平面として利用するため、効率的に形状情報を利用した領域分割が実現され、解像度に依存しない高精度な補間が実現される。しかしながら、この手法では色の均質な小領域における形状情報が、接平面として近似可能な程度に滑らかであるという仮定を用いているため、計測誤差により不連続な形状を持った小領域を適切に処理することができない。そのため、補間の精度を向上させる目的で、これらの小領域を連結処理の対象から除外し補間を行わない。この除外処理により、計測誤差の影響が大きい場合は連結されない小領域が増え、補間率が低下するという問題が存在した。

本稿では、接平面の連結性を用いた松尾らの議論⁵⁾¹¹⁾を発展させ、計測誤差が大きい場合でも高い補間率で高精度な補間が可能な距離画像の補間手法を提案する。提案手法では、はじめにスーパーピクセル分割¹²⁾により得られた色の均質な小領域(スーパーピクセル)に対して形状の接平面を推定する。接平面を用いて形状が不連続な領域を抽出し、色の変化量を重みとする形状情報の主成分分析を用いた接平面の再計算によって、計測誤差が原因で形状が不連続になった領域と、真に形状が不連続な領域を分別する。その後、各画素における計測光と各接平面との衝突点を計算し、各接平面の三次元空間における位置関係を把握する。この位置関係を元に接平面間の連結性を評価し、接平面が滑らかにつながる小領域を連結することで、形状が滑らかな領域によって画像平面を分割する。接平面を再計算し真に形状が不連続な領域を区別することにより、計測誤差に頑健な領域分割を実現する。こうして得られた個々の形状が滑らかな領域に対して Joint Bilateral Upsampling (JBU) フィルタ¹³⁾を適用することで、距離情報を補間する。画素ごとの光線追跡を用いるため、並列化により効率的に領域分割処理を行うことができる。さらに各接平面に対する光線追跡の結果を用いることで、遮蔽された領域における形状の情報を推定することが可能となる。この特性を用いて提案手法は、Time-of-Flight方式のレーザレンジファインダに実装されているマルチエコーを用いた距離計測機能¹⁴⁾と類似した単一方向に対する複数の距離値の推定を行う。図1に提案手法により得られる形状が滑らかな領域による領域分割の結果を示す。この図では各領域に

異なる色を塗り提案手法による領域分割の結果を示した。この例では、物に遮蔽された壁が一つの領域として推定された。提案手法では接平面の連結性を光線追跡により評価するため、手前の物体に遮蔽された壁領域における形状の連続性を考慮することができる。図2に提案手法による補間結果を三次元点群により示す。マルチエコー推定処理によって推定された三次元点を緑色に塗り、その他の三次元点に対してはカラー画像における対応画素での色を塗った。形状が滑らかな領域の境界付近において、手前と奥の複数の距離値が推定されている。

提案手法の有効性を調べるために Middlebury stereo datasets¹⁵⁾を用いた実験を行った。ここで実験環境に近い実験を行うため、データセットに含まれる距離情報に仮想的な計測誤差を加えて実験を行った。本稿ではこの実験結果を元に、事前情報として領域分割の情報を用いない手法⁶⁾と、事前情報として低解像度な距離画像から決まる物体の領域分割の情報を利用する手法⁸⁾、そして松尾らの手法¹¹⁾との比較を行う。今回の実験ではもっとも高精度な松尾らの手法に対して、提案手法では RMSE が最大で 2mm 程度増加するが、補間率は増加し、大きな計測誤差を含んだ場合でも全てのシーンに対して画像全体の 84 パーセント以上の距離値を高精度に補間することができた。つまり提案手法では計測誤差が大きい場合でも、高精度な手法と同等の精度で高い補間率を実現できることを確認した。本論文の技術的な貢献をまとめると以下ようになる：

- ・ 計測誤差に頑健な接平面の推定を行うために、スーパーピクセル分割と色の変化量を重みとした形状情報の主成分分析を用いる手法を提案した。
- ・ 形状が滑らかな領域を推定するための効率的な接平面のクラスタリング手法として、光線追跡を用いた手法を提案した。
- ・ スーパーピクセル分割と接平面に対する光線追跡により、前景物により遮蔽された領域の形状情報を利用する枠組みを提案した。
- ・ 計測誤差が含まれる低解像度な距離画像に対して、提案手法により高い精度かつ高い補間率の補間を実現できる事をデータセットを用いた実験により示した。

本稿の構成は以下の通りである。2. 章では提案手法についての解説を行う。3.章ではデータセットを用いた実験方法と、その実験により得られた結果を示す。続く 4.章において実験結果に

Fig.3 Overview of the processing flow of clustering of tangent planes for smooth surface segmentation

関する考察を行い、提案手法の特性や限界を論じ、その有効性を示す。最後に 5 章において本稿が明らかにした新しい技術的な知見をまとめる。

最後に本稿で用いる言葉の定義を行う。「領域」という言葉は一般的な意味での「画像平面での連結している画素の集まり」として用いる。「形状が滑らかな領域」とは「距離の情報から定まる三次元形状が、滑らかな領域（画素の集まり）」を意味し「物体の領域」とは「画像平面での個々の物体が占める領域（画素の集まり）」を意味する。「形状が滑らかな領域」の滑らかさの度合いは、2.1.3 節にて解説される「接平面の間の連結性」によって定義される。また「各画素での距離の値」を「距離値」と表し、「各画素に距離の値をもった画像」を「距離画像」という言葉により表す。また「一般的な意味での距離に関する情報」を表す言葉として「距離情報」という言葉を用いる。後述する画素の集合「スーパーピクセル」に対して「形状」という言葉を用いる場合は、「スーパーピクセルに含まれる画素での距離の情報が定まる三次元形状」を表し、「スーパーピクセル」に対して「接平面」という言葉を用いる場合は「スーパーピクセルに含まれる画素での距離の情報が定まる三次元形状の接平面」を表す。

2. 提案手法

提案手法は松尾らの手法¹¹⁾と同じく、低解像度な距離画像と高解像度なカラー画像を用いて、形状が滑らかな領域によって画像平面を分割し、領域ごとに距離情報を補間する。ここでは形状が滑らかな領域による領域分割処理(2.1 節)及び、領域ごとの距離情報の補間処理(2.2 節)について述べる。

2.1 形状が滑らかな領域による領域分割

接平面が滑らかにつながるスーパーピクセルを連結し、形状が滑らかな領域による領域分割を実現する。図 3 に提案手法における形状が滑らかな領域による領域分割の処理フローの概略を示す。この図では Middlebury stereo datasets¹⁵⁾に含まれるシーン Art に対する処理結果を用いた。提案手法では三次元空間における接平面に対してクラスタリングを行うが、各段階におけるクラスタリング結果を示すために、同じクラスとして分類された接平面を同じ色で塗り分けている。詳細な処理フローは 2.1.4 節において述べる。

2.1.1 スーパーピクセル上の接平面

スーパーピクセル分割とはカラー画像を色が均質な小領域に分割する領域分割であり、スーパーピクセルとはその中の分割された一つの領域を表す。近年、スーパーピクセル分割は画像応用の前処理として利用され¹⁶⁾、さまざまな手法が提案されている¹²⁾¹⁷⁾。本稿における実験では、隣接する画素間の色の変化量を用いて効率的にスーパーピクセル分割を行う手法である

Fig.4 Tangent plane on superpixel

Felzenszwalb らの手法¹²⁾を実装し利用した。

松尾らはスーパーピクセルを形状が滑らかな局所領域とみなして、そこに含まれる距離情報を JBU フィルタ¹³⁾によって増やし、主成分分析を用いて接平面を推定した¹¹⁾。具体的にはまず、スーパーピクセル S に含まれる距離の情報を JBU フィルタにより増やし、得られる三次元点群 $d(S)$ に対して分散共分散行列 $A(d(S))$ を以下のように定義する。

$$A(d(S)) = \frac{1}{|d(S)|} \sum_{\mathbf{x} \in d(S)} (\mathbf{x} - \mathbf{c}(S))(\mathbf{x} - \mathbf{c}(S))^T, \quad (1)$$

ここで三次元点群 $d(S)$ に対して $|d(S)|$ は三次元点の個数を表し、 $\mathbf{c}(S)$ は点群の重心を表す。松尾らは点群の重心 $\mathbf{c}(S)$ と分散共分散行列 $A(d(S))$ の固有値と固有ベクトルの情報をスーパーピクセル上の接平面として利用した¹¹⁾。一般的に分散共分散行列 $A(d(S))$ の最小固有値に対応する固有ベクトル $\mathbf{n}(S)$ は点群の法線ベクトルとして利用され、その他の固有値に対応する固有ベクトル $\mathbf{t}_2(S)$, $\mathbf{t}_1(S)$ は点群に対する接ベクトルとして利用される¹⁸⁾。ここで、最大固有値と二番目に大きい固有値の平方根を $w_1(S)$ と $w_2(S)$ により表す。提案手法では、点群の重心 $\mathbf{c}(S)$ を中心とする、接ベクトルの方向 $\mathbf{t}_2(S)$, $\mathbf{t}_1(S)$ に各々長さ $6w_1(S)$, $6w_2(S)$ の幅をもった二次元平面 $T(S)$ を、スーパーピクセル上の接平面として利用する。図 4 にスーパーピクセル上の接平面の概念図を示す。ここで主成分分析によれば、分散共分散行列の固有値の平方根は固有ベクトル方向の点群の分散と同等の意味を持つ。提案手法では重心から $\pm 3\sigma$ までの範囲に含まれる点群の情報を利用するために固有値の 6 倍の幅をもった二次元平面を利用する。

提案手法では、このスーパーピクセル上の接平面を用いて不連続な形状をもつスーパーピクセルを判定する。ここで接平面の奥行き方向への幅 $w_z(S)$ が長さのしきい値 d_{th} よりも大きい、もしくはスーパーピクセルに含まれる画素の個数がしきい値 n_{small} より小さい場合に不連続な形状をもつスーパーピクセルと判定する。画像平面に対して垂直な方向である奥行き方向への形状の変化は計測が困難であるため、奥行き方向への幅が大

Fig.5 Length in the depth direction.

きい接平面をもつ場合に形状が不連続であるとみなす。図5に奥行き方向への幅 $w_z(S)$ の概念図を表す。次段の処理において不連続な形状をもつスーパーピクセルに対しては、周辺の形状情報と色情報を用いて接平面を再計算する(2.1.2 節)。そのため、距離情報を持たない小さなスーパーピクセルも便宜的に不連続な形状をもつスーパーピクセルとして判定し、接平面を再計算する対象に含める。以降では不連続な形状をもつスーパーピクセル以外のスーパーピクセルを、形状が連続なスーパーピクセルと呼称する。

2.1.2 色の变化量を重みとした主成分分析

計測誤差により形状が不連続になったスーパーピクセルと、真に形状が不連続なスーパーピクセルを区別するために接平面を再計算する。ここでスーパーピクセル S に対してその境界の近傍にある画素を加えた領域 $\tilde{S}$ 上の形状情報 $d(\tilde{S})$ ¹¹⁾ と色の情報を利用する。まず通常のスーパーピクセル上の接平面の計算の場合と同じく $d(\tilde{S})$ に対して以下の行列を計算する。

$$\frac{1}{W} \sum_{\mathbf{x} \in d(\tilde{S})} w(|\mathbf{i}(\mathbf{x}) - \mathbf{i}_S|_1) (\mathbf{x} - \mathbf{c}_{\text{color}}(\tilde{S})) (\mathbf{x} - \mathbf{c}_{\text{color}}(\tilde{S}))^T. \quad (2)$$

ここで w は重み関数、 $\mathbf{i}(\mathbf{x})$ は三次元点 $\mathbf{x}$ における色を表し、 $\mathbf{i}_S$ はスーパーピクセル S における平均の色を、 $\mathbf{c}_{\text{color}}(\tilde{S})$ は点群 $d(\tilde{S})$ の色の变化量を重みとした重心を表している。分母 W は全ての重みの総和 $W = \sum_{\mathbf{x} \in d(\tilde{S})} w(|\mathbf{i}(\mathbf{x}) - \mathbf{i}_S|_1)$ を表し、記号 $|\mathbf{i}|_1$ は色を表すベクトル $\mathbf{i}$ の L^1 ノルムを表す。色の变化量を重みとした重心 $\mathbf{c}_{\text{color}}(\tilde{S})$ は以下のように定義する。

$$\mathbf{c}_{\text{color}}(\tilde{S}) = \frac{1}{W} \sum_{\mathbf{x} \in d(\tilde{S})} w(|\mathbf{i}(\mathbf{x}) - \mathbf{i}_S|_1) \mathbf{x}. \quad (3)$$

式(2)が定める行列を $\mathbf{A}_{\text{color}}(d(\tilde{S}))$ により表し、三次元点群 $d(\tilde{S})$ に対する色の变化量を重みとした分散共分散行列と呼称する。式(1)と比較することで、色の变化量を重みとした分散共分散行列の意味が解る。点群に含まれる各三次元点に対して色の違いによって寄与の強さを変更することで、スーパーピクセルの平均色に近い色の三次元点群の空間分布が強く反映されるように定義されている。通常のスーパーピクセル上の接平面と同じく(2.1.1 節)、このようにして定義した行列 $\mathbf{A}_{\text{color}}(d(\tilde{S}))$ の固有値と固有ベクトルを用いて、接平面を改めて定義する。これによりスーパーピクセルの周辺の形状情報から、平均色に近い色をもつ領域の形状情報を選択的に利用した接平面を計算することができる。そのため形状が不連続になる境界付近であっても色の情報を用いて正しい接平面を計算できる可能性がある。今回

 Fig.6 Conceptual diagram of distance at a pixel $d_p(T_1, T_2)$

の実験では重み関数として $w(t) = \exp(-t)$ を利用した。

2.1.3 光線追跡による接平面間の連結性評価

カメラ中心から各画素に向けた光線ベクトルと接平面との交点を計算し、三次元空間における位置関係を把握することにより、接平面の間の連結性を評価する。カメラ中心から画素 p 方向に伸びる直線(計測光の光線)を $\mathcal{L}_p$ とする。この $\mathcal{L}_p$ と交点をもつ二つの接平面 $\mathcal{T}_1$ と $\mathcal{T}_2$ に対して画素 p での距離 $d_p(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2)$ を以下の式で定める。

$$d_p(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) = |\mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1, \mathbf{l}_p|. \quad (4)$$

ここで $\mathbf{q}_1$ と $\mathbf{q}_2$ は各々 $\mathcal{T}_1$ と $\mathcal{L}_p$ の交点と $\mathcal{T}_2$ と $\mathcal{L}_p$ の交点としベクトル $\mathbf{l}_p$ は光線 $\mathcal{L}_p$ の方向を表す単位ベクトルとする。また表記 $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ はベクトル $\mathbf{x}$ と $\mathbf{y}$ の内積を表し $|(\mathbf{x}, \mathbf{y})|$ はその絶対値を表す。図6に画素 p での接平面間の距離の概念図を示す。これは二つの交点の光線上における距離である。ここで $\mathcal{T}_1$ もしくは $\mathcal{T}_2$ が光線 $\mathcal{L}_p$ と交点を持たない場合や、無限個の交点を持つ場合は便宜的に $d_p(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) = \infty$ と定義する。この距離を全ての画素に対してまとめ、接平面の間の距離 $d(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2)$ を以下のように定義する。

$$d(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) = \max \{d_p(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) \mid p : \text{pixel}, d_p(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) \neq \infty\}. \quad (5)$$

ここで正数の集合 $\{d_p(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) \mid p : \text{pixel}, d_p(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) \neq \infty\}$ が空集合である場合、接平面 $\mathcal{T}_1$ と $\mathcal{T}_2$ は同一の光線と交わらない。この場合は便宜的に $d(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2) = \infty$ と定める。この量は各画素で光線追跡により計測された接平面の三次元空間における位置を全て集約したものであり、この量によって接平面の空間的な位置関係を把握することができる。またこの量は数学的な意味での距離ではないが、接平面の間の空間的な近さを表す量であるため、本稿ではこの量を「距離」と呼称する。提案手法では、接平面間の距離 $d(\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2)$ が長さのしきい値 d_{th} よりも小さい場合に、接平面 $\mathcal{T}_1$ と $\mathcal{T}_2$ は滑らかにつながるとみなす。どちらも三次元空間における点群の広がり長さの評価するためのしきい値であるため、ここで用いるしきい値は、形状が不連続なスーパーピクセルの判定に用いたしきい値と同じものを利用することができる。

2.1.4 形状が滑らかな領域による領域分割

形状が滑らかな領域による領域分割を生成する処理を解説する。図3に処理フローの概略を示す。

はじめにスーパーピクセル上の接平面を計算する。この接平面を用いて、不連続な形状をもつスーパーピクセルと、連続な形状をもつスーパーピクセルに分類する(2.1.1 節)。まず連続な形状をもつスーパーピクセルの接平面を、光線追跡により計算される距離(2.1.3 節)を用いてクラスタリングする。ここ

Fig.7 Process flow of graded clustering of tangent planes

で距離が長さのしきい値 d_{th} より小さい接平面を同じクラスに属するとしてクラスタリングする。次に、不連続な形状をもつスーパーピクセルに対して色の変化量を重みとする主成分分析 (2.1.2 節) を用いて接平面を再計算する。再計算された接平面を用いて、スーパーピクセルを、連続な形状をもつスーパーピクセルと不連続な形状をもつスーパーピクセルに分類する。ここで、形状が連続なスーパーピクセルの接平面は、既にクラスタリングした接平面との距離を計算し、しきい値 d_{th} よりも小さい距離にある接平面の中で、もっとも小さい距離をもつ接平面のクラスに加える。提案手法では形状が連続 (shape-stable) なスーパーピクセルの接平面群から始めて、接平面を段階的にクラスタリングする。はじめに形状が連続なスーパーピクセルの接平面群のクラスタリングを行うことで、対象物の大雑把な形状情報を決定し、その結果をもとに形状が不連続なスーパーピクセルの接平面群をクラスタリングする。多数の接平面を一挙にクラスタリングしないことにより、効率的な接平面のクラスタリングを行う。図 7 に段階的なクラスタリングの処理フローを示す。最後に、段階的クラスタリングによって同じクラスに属すると判定された接平面をもつスーパーピクセルを連結する。ここで、再計算された接平面を用いても形状が不連続と判定されたスーパーピクセルは、真に形状が不連続なスーパーピクセルとみなし、連結処理から除外する。

2.2 形状が滑らかな領域による領域分割

2.1 節において紹介した、形状が滑らかな領域による領域分割を利用し距離画像の補間を行う。まず、形状が滑らかな領域による領域分割を行い、低解像度な距離画像において距離値を持つ画素の個数を各領域において数える。距離値を持つ画素の個数がしきい値 n_{th} よりも大きいならば、その領域に制限した JBU フィルタ¹³⁾を用いて距離値を補間する。滑らかにつながらない領域間で距離情報を混合させないために、各領域に JBU フィルタを制限し距離情報を補間する。また距離画像の補間を高精度に行うため、元にする距離値の個数がしきい値 n_{th} 個より多い領域でのみ補間を行う。

さらに、滑らかな形状の境界付近においては、接平面に対する光線追跡の結果を利用し、複数の距離値を推定する。これはレーザレンジファインダに実装されているマルチエコーを用いた距離計測機能¹⁴⁾に類似した推定処理である。一般的に

Fig.8 Multi-echo estimation

Time-of-Flight 方式のレーザレンジファインダでは、投光したレーザ光が対象物に反射して戻ってくるまでの時間を用いて距離を計測する。レーザ光は幅を持つため細い対象や形状が不連続である境界付近では、一回の投光に対して手前と奥とで二回以上の反射光が戻ってくる場合がある。このとき複数の反射光に対して各々距離値を計測することができるため、一つの方向に対して複数の距離値が出力される。複数の距離値を出力することで、利用する側は用途に応じて距離値を選択することができる。提案手法においても滑らかな形状の境界付近ではこのマルチエコーを用いた複数の距離推定処理を導入する。まずマルチエコーを考慮すべき画素を選定し、出力する複数の距離値を計算する。図 8 にマルチエコー推定処理の概念図を示す。ここでまず、各画素に対して、その方向の光線と接平面群との衝突点を光線上にてクラスタリングする。ここでは距離がしきい値 d_{th} より近い点を同じクラスに属するものとしてクラスタリングする。得られた衝突点のクラスが複数ある画素を滑らかな形状の境界とみなす。図 1 に示すように、提案手法によって推定される形状が滑らかな領域による領域分割 (2.1 節) では、局所的に形状が不連続だが、大域的には連続に形状がつながる画素を同じ領域に属するものとして推定する。そのため、ここでは各画素での衝突点の状況を用いて形状の境界を推定する。

Fig.9 Experiments for accuracy evaluation. Pixels that have no distance values are colored black

衝突点のクラスタが複数ある画素では、しきい値より離れた位置に複数の接平面が存在するためマルチエコーを考慮する。衝突点のクラスタに対してクラスタ内での平均距離を計算し、滑らかな形状の境界においては、JBU フィルタによる補間結果の他に、クラスタ内での平均距離も距離値として出力する。

3. 実験

提案手法の特性を調べるため、データセットを用いた実験を行った。ここでは、まず実験の概要を紹介し (3.1 節)、実験の詳細な条件を項目ごとに紹介する (3.2 節)。最後に 3.3 節にて実験結果を示す。

3.1 実験概要

Middlebury stereo datasets¹⁵⁾ を用いて実験を行った。このデータセットはさまざまな対象のステレオ画像と視差画像の真値の組をまとめたデータセットである。ステレオ画像における視差は計測に用いたステレオカメラの焦点距離とベースラインの長さを用いて、以下の式により画素 p での距離値 $d(p)$ に変換することができる。

$$d(p) = \frac{(\text{焦点距離}) \times (\text{ベースラインの長さ})}{\text{視差} \times l_p^{(z)}} \quad (6)$$

ここで、 l_p は画像平面での画素 p における光線の方向ベクトルを表し $l_p^{(z)}$ はその奥行き方向の長さ (z 成分) を表す。データセットには、撮影に用いたカメラの焦点距離とベースラインの長さが与えられているため、視差画像を距離画像に変換し利用することができる。

比較のため、領域分割の情報を用いない手法 (MRF)⁶⁾ と、低解像度な距離画像から決まる物体の領域分割の情報を利用する手法 (PWAS)⁸⁾、そしてスーパーピクセル上の接平面を利用する手法¹¹⁾を用いた実験も行った。提案手法は既存の高精度な補間手法¹¹⁾と同等の精度だが、効率的にかつ計測誤差が大きい場合でも高い補間率で距離画像を補間できることを確認するため、本実験では提案手法に対して以下の三つの特性を調べる。

- ・ 計測誤差の大きさに対する領域分割結果、補間精度及び補間率の変化
- ・ 元にする距離画像の解像度に対する補間精度の変化
- ・ 処理にかかる計算時間

Fig.10 Examples of noised distance image. Pixels that have no distance values are colored black. These images are downsampled at the rate of (1/4, 1/4). (The noise coefficient $k = 3.0 \times 10^{-6}$)

ここで実環境での実験に近づけるため、後述する計測モデル (3.2.2 節) を元に、仮想的な計測誤差をデータセットの距離画像に加え実験を行った。図 9 に本実験の概要図を示す。誤差を加えた距離画像をダウンサンプリングして得られた低解像度な距離画像に補間アルゴリズムを施し、真値との比較を行うことで特性を評価する。

3.2 実験条件

本節では本実験における実験条件について紹介する。3.2.1 節では利用する画像とその解像度に関する条件を述べ、3.2.2 節にて実験に利用した計測誤差のモデルを導入し、誤差の大きさを制御する係数 k について述べる。続く 3.2.3 節にて実験に用いた提案手法のパラメータ設定を示し、3.2.4 節にてマシンスペックなどの計算時間に関連する実験条件を示す。

3.2.1 利用する画像とその解像度

Middlebury stereo datasets¹⁵⁾ 中の *Art, Books, Dolls, Moebius* と呼ばれる四つのシーンの、解像度が 463×370 画素である距離画像をダウンサンプリングし実験を行った。ここでカラー画像はデータセットに含まれるものをそのまま利用する。複雑な形状の変化に対する補間性能を調べるため、もっとも解像度の低い画像に対して実験を行った。ここで、さまざまなダウンサンプリングの状況での精度を評価するために、画像の縦軸と横軸に対して、個別のダウンサンプリングレートを設けた。本実験では以下の六種類のダウンサンプリングレートを用いた。(縦 1/4, 横 1/4) (縦 1/4, 横 1/2) (縦 1/2, 横 1/4) (縦 1/2, 横 1/2) (縦 1/2, 横 1) (縦 1, 横 1/2)。ここで縦軸、横軸ともに等間隔でのダウンサンプリングを行った。

3.2.2 計測誤差のモデルと誤差の大きさ

本実験では計測誤差による補間精度、補間率及び領域分割結果の変化を調べるため、データセットに含まれる距離画像に仮想的な計測誤差を加える。ここでは Anderson らが提案した Flash lidar におけるモデル¹⁹⁾を利用した。このモデルは計測される距離値の分散が、真の距離値の二乗に比例し光線の入射角の余弦に反比例するというモデルである。本実験では計測される距離値の分散 σ が、以下の式に従うと仮定した。

$$\sigma(p, d_{\text{true}}) = k \frac{d_{\text{true}}^2}{\cos(\alpha)} \quad (7)$$

ここで角度 α は画素 p における光線の入射角であり、 d_{true} は画素 p における計測距離の真値である。係数 k は計測誤差の大きさを決定するパラメータである。Anderson らのモデル¹⁹⁾

Fig.11 Resulting segmentations for various noise level (Art). Lower Previous tangent based method ¹¹⁾. Upper: Our method.

では対象物の反射率も考慮する必要があるが、データセットにおける対象物の反射率は不明であるため、反射率は一定であると仮定した。このように定義した分散値を用いて、本実験では画素 p における距離の真値が d_{true} である場合に、計測された距離値 d として、以下の確率分布 $p(d | d_{\text{true}})$ に従う正規乱数を利用した。

$$p(d | d_{\text{true}}, p) \propto \exp \left(-\frac{(d - d_{\text{true}})^2}{2\sigma(p, d_{\text{true}})^2} \right). \quad (8)$$

この正規乱数により生成される距離値によって計測誤差を加えた距離画像を生成する。計測誤差を加えダウンサンプリングを行った距離画像の例を図 10 に示す。左側がデータセットの距離画像であり、右側が計測誤差を加え縦方向 1/4、横方向 1/4 にダウンサンプリングした距離画像である。ダウンサンプリングした距離画像は元の画像と同じ大きさで表示している。距離画像は 1360 mm から 2300 mm までの距離値を 256 階調で表したヒートマップを用いて示した。ここでは分散の係数 k は 3.0×10^{-6} とした。この例では、カメラの正面 1 m 遠方に対象がある場合に、計測値の分散が 3.0 mm となる計測誤差が加えられている。本実験では係数 k は 3.0×10^{-6} から 0.0 まで 0.5×10^{-6} 刻みに変化させ、計測誤差に対する補間精度、補間率及び領域分割の結果の変化を確認した。ここで係数の最大値は、測域センサ(URG-04LX、北陽電機製)とレーザレンジファインダ(LMS200、SICK 社製)の性能評価結果²⁰⁾を参考に、実際のセンサにおけるものよりも大きな値として設定した。

3.2.3 実験に用いた提案手法のパラメータ

提案手法のパラメータは、全ての実験を通して表 1 に示すパラメータを用いた。補間に用いる JBU フィルタのサイズと分散係数は、比較対象である PWAS でのパラメータと同一にした。接平面の間の滑らかさのパラメータ d_{th} は、補間後の距離画像における滑らかさを直接的に制御するパラメータであり、実際には補間後の距離画像の用途に応じて決定する必要がある。今回は真値の距離画像における滑らかさを元に決定した。形状が不連続なスーパーピクセルの判定に利用する画素数のしきい値 n_{small} は、最もデータの量が少ない場合でも形状が連続なスーパーピクセルには平均的に複数(2 個以上)の距離情報が含まれるように $2 \times 16 = 32$ 画素として設定した。距離情報の個数のしきい値 n_{th} は今回用いたフィルタのサイズが 8 画素 $\times$ 8 画素であり、最もデータの量が少ない場合は 1/16 のデータ量であるため、フィルタ内の平均的な距離情報の個数 $64/16 = 4$ より大きい値として 5 画素と設定した。この値も補間後の距離画像の用途と計測データの量に応じて変更する必要がある。

Fig.12 Resulting segmentations for various noise level (Dolls). Lower Previous tangent based method ¹¹⁾. Upper: Our method.

Table 1 Parameters in our experiments

d_{th}	n_{small}	n_{th}
28.0 mm	32 pixel	5 pixel

3.2.4 実験に用いた計算機と実装

処理の効率性を調べるため、同じ枠組みであるスーパーピクセル上の接平面を用いる手法¹¹⁾と提案手法における処理時間の比較を行う。ここでは 16 GB RAM を搭載した Intel Core i7-2600 CPU (3.40GHz) による処理時間を用いて比較を行う。本論文は、部分的に並列化可能な距離画像の補間手法を提案するものであり、並列化の実装方法については取り扱わない。実験にあたっては既存手法、提案手法ともに簡易的に OpenMP を用いて並列化した実装を用いた。

3.3 実験結果

本節では実験の結果を項目ごとに述べる。まず、計測誤差の大きさに対する領域分割の結果と補間率の変化を示す(3.3.1 節)。次に解像度や計測誤差の大きさに対する補間精度の変化を示す(3.3.2 節)、処理にかかった計算時間を示す(3.3.3 節)。本節で示す全ての実験結果のグラフにおいて、提案手法による結果は赤色の実線、MRF⁶⁾による結果は紫色の破線、PWAS⁸⁾による結果は青色の破線、スーパーピクセル上の接平面を用いる手法¹¹⁾による結果は緑色の破線を用いて示す。補間精度(RMSE)のグラフにおいては計測誤差を加えた距離画像自身の精度を水色の破線により示す。

3.3.1 領域分割の結果と補間率

図 11 と図 12 に提案手法による形状が滑らかな領域による領域分割の結果を示す。下段に既存のスーパーピクセル上の接平面を用いる手法¹¹⁾による領域分割の結果を示し、上段に提案手法による結果を示す。領域ごとにランダムに色を塗ることで領域分割の結果を表示する。元にする距離情報が最も少ない状況、つまり補間時のアップサンプリングレートが最も大きい状況(縦 $\times$ 4 横 $\times$ 4)で、計測誤差を加えない場合($k = 0.0 \times 10^{-6}$)、弱い計測誤差を加える場合($k = 1.5 \times 10^{-6}$)、強い計測誤差を加える場合($k = 3.0 \times 10^{-6}$)という三つの状況における処理結果を示す。計測誤差を加えない場合において、提案手法は領域の境界を既存手法よりも正確に検出できた。弱い計測誤差を加えた場合においては既存手法では孤立した小さな領域が見られるが、提案手法では計測誤差を加えない場合と遜色ない領域分割が実現された。強い計測誤差を加えた場合においては、既存手法では小さな領域が連結されずに多く残ったが、提案手法では計測誤差が無い場合と同様に大きな領域が形成された。また既存手法では隣接するスーパーピクセルに対してのみ連結処理が

Fig.13 Completion rate for various noise levels (upsampling rate $\times 4 \times 4$). The green lines show the results of the previous tangent plane based method ¹¹⁾

行われるため、背景の壁のように実際は滑らかにつながる形状だが遮蔽物により画像上では隣接していない領域は分割された。しかし提案手法では、背景の壁を同じ領域として連結することができた。

図 1 3 にスーパーピクセル上の接平面を用いる手法 ¹¹⁾ と提案手法の各シーンに対する補間率を示す。ここでは最も距離情報が少ない状況で計測誤差を変化させた場合の結果を示す。上段に対象シーンのカラー画像、下段に計測誤差に対する補間率の変化を表すグラフを示す。全ての場合において、提案手法の補間率は既存手法の補間率より大きかった。加える計測誤差が大きくなるほどこの差が大きくなる傾向があり、加える計測誤差が最も大きい場合 ($k = 3.0 \times 10^{-6}$) において提案手法は 20 パーセント以上の領域をより多く補間することができた。複雑なテクスチャをもつシーン *Dolls* に対して、既存のスーパーピクセル上の接平面を用いる手法 ¹¹⁾ では、強い計測誤差を加えた場合 ($k = 3.0 \times 10^{-6}$) に全体の 58.6 パーセントの領域しか補間することができなかったが、提案手法では 90.1 パーセントの領域を補間することができた。

3.3.2 補間精度

距離画像の補間精度は RMSE を用いて評価を行う。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{p \in P(d)} |d(p) - d_{\text{true}}(p)|^2}{N}} \quad (9)$$

ここで d は補間された距離画像とし、 d_{true} は真の距離画像とする。そして $P(d)$ は補間された距離画像 d において距離値を持つ画素の集合とし、 N は $P(d)$ に含まれる画素の個数とする。真の距離画像には遮蔽物の向こう側における距離の情報が含まれていないため、マルチエコー推定処理により複数の距離値が推定された画素に対しては、真の距離値に最も近い距離値との差を用いて評価を行う。

図 1 4 に補間精度に関する実験結果を示す。ここで図の最上段が対象にしたシーンのカラー画像、二段目と三段目は計測誤差を加えない場合 ($k = 0.0$) と加えた場合 ($k = 3.0 \times 10^{-6}$) におけるアップサンプリングレートに対する RMSE の推移を示すグラフである。最後に四段目はアップサンプリングレートを縦 4 倍 横 4 倍 ($\times 4 \times 4$) に固定した場合の計測誤差の大きさに対する RMSE の変化を示すグラフである。赤色の実線で示した

提案手法の RMSE は、緑色の破線で示した高精度な既存手法 ¹¹⁾ の RMSE に対して、最も精度が悪い場合において 2mm 程度の違いがあった。計測誤差を加えない場合では、提案手法の方が既存手法よりも補間精度が向上する場合があった。スーパーピクセル上の接平面を用いる既存手法 ¹¹⁾ と提案手法では、MRF ⁶⁾ や PWAS ⁸⁾ と異なり、元にする距離情報の解像度に依存しない高精度な補間が実現された。図 1 5 にシーン *Art* に対して縦 4 倍、横 4 倍のアップサンプリングを施した場合の各画素での距離値の真値からの誤差の値を示す。ここでは各画素での 0mm から 20mm までの誤差を 256 階調のヒートマップにより表現し、補間が行われていない画素は黒色で表している。MRF ⁶⁾ と PWAS ⁸⁾ では形状が不連続となる境界付近に大きな誤差が生じている。特に境界を跨いで類似した色を持つ領域において大きな誤差が生じている。接平面を用いる既存手法 ¹¹⁾ では、このような境界付近の領域における補間が行われていない。形状が不連続になる境界線上では、周辺の画素での距離値から正確な距離値を推定することが困難であり、補間精度を担保するため既存手法は補間を行わない ¹¹⁾。提案手法においても形状の境界線上において、補間が行われていない。しかし提案手法では既存手法 ¹¹⁾ に比べて、境界付近まで多くの領域が補間され、その上境界部分における誤差が抑えられていた。図 1 6 にマルチエコー推定処理によって、複数の距離値が推定された画素と推定された点群を示す。複数の距離値が推定された画素を緑色で塗った画像と、補間結果の点群においてマルチエコー処理により推定された三次元点を緑色で塗った画像を示す。形状が滑らかな領域の境界付近にてマルチエコーが生じ、マルチエコー処理により遮蔽された領域の形状情報が推定されていることが解る。

3.3.3 計算時間

図 1 7 にスーパーピクセル上の接平面を用いる既存手法 ¹¹⁾ と提案手法の処理時間を示す。アップサンプリングレートが縦 4 倍、横 4 倍の場合の各シーンにおける処理時間を棒グラフにて表示している。緑色の領域がスーパーピクセル分割にかかった時間、紫色の領域が接平面を用いたスーパーピクセルの結合処理にかかった時間、そして水色の領域が領域ごとの補間にかかった時間を表している。今回の実装ではスーパーピクセルの連結処理の時間を、既存手法に比べて 3sec 以上短縮した。

Fig.14 Quantitative comparisons. The scenes, RMSEs ($k = 0.0$, $k = 3.0 \times 10^{-6}$), and RMSEs in case of various noise level (upsampling rate = $\times 4 \times 4$)

Fig.15 Errors of interpolated distance images (Art). Pixels that have no depth value are colored black

Fig.16 Estimated results of multi-echo (Dolls and Moebius). Points that are estimated as the multi-echo point are colored green

Fig.17 Processing times (on an upsampling of $\times 4 \times 4$). The bars labeled “tangent” show the processing time of the previous tangent based method¹¹⁾

4. 考 察

提案手法では形状が不連続なスーパーピクセルに対して、色の変化量を重みとする主成分分析を利用して接平面を再計算し、計測誤差によって形状が不連続になったスーパーピクセルと真に形状が不連続なスーパーピクセルを区別することにより、図11と図12に示した通り形状が滑らかな領域の境界を、計測誤差に対して頑健に推定することができたと考えられる。計測誤差が大きい場合でも接平面を適切に連結することができるため、図13に示すように、実験に用いた全てのシーンに対して84パーセント以上の領域を補間することができ、図14に示す通り、高精度な既存の手法¹¹⁾と同等の精度で距離画像を補間することができた。提案手法では各画素における光線追跡を用いて接平面を段階的にクラスタリングするため、遮蔽された領域での形状の連続性を考慮することができる。これにより図16に示すように形状の境界付近に対してマルチエコーを考慮して複数の距離値を推定することが可能になり、図15に示す通り形状が不連続になる境界線の極めて近い領域でも高精度な距離値を推定することができた。また並列化を行いやすい画素単位での光線追跡を利用し、段階的な接平面のクラスタリングを利用することで図17に示すように、既存手法に比べて効率的にスーパーピクセルの連結処理を行うことができた。以上の理由により提案手法では、計測誤差が大きい場合でも既存の高精度な補間手法¹¹⁾と同等の精度で効率的にかつ高い補間率で距離画像を補間することができたと考えられる。

提案手法は距離値をもつ画素をしきい値個より多く含む形状が滑らかな領域に対してのみ補間を行う。そのため、図15に示すように、滑らかな形状の境界線上などの形状が不連続となる画素において補間が行われない。補間されない領域が存在することは、提案手法の制限である。しかしながら、補間精度の高さによって、補間が行われた情報の精度を担保することができるため、精度が求められる地物計測などの用途では意味がある。ここで補間が行われない領域は、形状が滑らかな領域の境界線上に現れやすい。このような形状が不連続となる画素においては、マルチエコー推定処理によって複数の距離値が出力される。これは、Time-of-Flight方式のレーザレンジファインダに実装されているマルチエコーを利用した複数の距離値の計測機能¹⁴⁾と同じく、原理的に単一の距離値を決定できない領域においても、候補となる距離値を複数出力することで、用途に応じて手前の距離値もしくは奥の距離値を選択する余地を与える。また、同じ環境での計測を再び行うことが可能であれば、補間が行われなかった領域や、マルチエコーが推定された領域を、

重点的に再計測することによって、より広範囲に高精度な補間を行うことができる。

今回の実験において提案手法は最大で20sec程度の計算時間を必要とした。そのため現状の実装では計測に対してリアルタイムに距離情報を補間することはできない。しかし並列化の実装をGPUを用いた実装に改めることや、スーパーピクセル分割¹²⁾や領域ごとの補間処理¹³⁾を高速性に特化した手法¹⁷⁾に変更するなどの、実装上の改変により計算時間を短縮する余地が残されている。

今回の実験で用いた計測誤差の大きさは、実際のセンサの計測誤差の特性値²⁰⁾を元に決定されたものであるため、実環境で得られたデータに対しても提案手法は同程度の補間性能を発揮すると期待される。現在の実装ではセンサによる計測に対してリアルタイムに補間を行うことはできないため、提案手法は地物計測などの精度が求められるがリアルタイム性は求められない場面において有効な手法であると考えられる。しかしながら、実環境のデータを用いる場合は計測誤差やデータの補間精度以外の要素として、センサ間での位置や計測タイミングの校正に起因する問題を解決する必要がある。これらは個々のハードウェアに依存する問題であるため本稿では扱わなかったが、高解像度かつ高精度な三次元計測を実現するために解決すべき問題であると考えられる。

5. 結 言

本稿では、接平面に対する光線追跡を用いた計測誤差に頑健な領域分割を経由する、高精度な距離画像の補間手法を提案した。本稿により示された新しい知見は以下の通りである。

- (1) スーパーピクセル分割と、色の変化量を重みとした形状情報の主成分分析を用いることによって、計測誤差に頑健な接平面の推定を行うことができる。
- (2) 光線追跡を用いた接平面のクラスタリングによって、カラー画像と計測誤差を含んだ低解像度な距離画像を元に、形状が滑らかな領域を効率的に推定することができ、得られた領域分割を用いて高精度な距離情報の補間を行うことができる。
- (3) スーパーピクセル分割と接平面に対する光線追跡を用いることによって、前景物により遮蔽された領域の形状情報を推定することができる。

本稿では、ハードウェアに依存する問題を切り分けて、純粋に補間技術を確立することを目的としているため、色の情報と

距離の情報に空間的、時間的なずれの無い場合における提案手法の有用性を示した。高解像度かつ高精度な三次元計測を実現するためには、個々のセンサシステムに依存するセンサ間での位置や計測タイミングの校正誤差の影響を評価し、ハードウェアに依存した問題に取り組む必要がある。

参 考 文 献

- 1) S. Hinterstoisser, S. Holzer, C. Cagniard, S. Ilic, K. Konolige, N. Navab and V. Lepetit: "Multimodal templates for real-time detection of texture-less objects in heavily cluttered scenes", Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on, (2011) 858.
- 2) 伊達, 横山, 金井, 武田: "形状・コンテキスト特徴を用いた市街地レーザ計測点群からの柱状物体自動認識", ビジョン技術の実利用ワークショップ2012 予稿集 (2012).
- 3) Y. M. Kim, C. Theobalt, J. Diebel, J. Kosecka, B. Matusik and S. Thrun: "Multi-view image and tof sensor fusion for dense 3d reconstruction", Computer Vision Workshops (ICCVW), 2009 IEEE International Conference on, (2009) 1542.
- 4) Y. Bok, Y. Jeong, D.-G. Choi and I. Kweon: "Capturing village-level heritages with a hand-held camera-laser fusion sensor", International Journal of Computer Vision, **94**, 1, (2011) 36.
- 5) K. Matsuo and Y. Aoki: "Depth interpolation via smooth surface segmentation using tangent planes based on the superpixels of a color image", Computer Vision Workshops (ICCVW), 2013 IEEE International Conference on, (2013) 29.
- 6) J. Diebel and S. Thrun: "An application of markov random fields to range sensing", Advances in Neural Information Processing Systems 18, (2006) 291.
- 7) Q. Yang, R. Yang, J. Davis and D. Nister: "Spatial-depth super resolution for range images", Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2007 IEEE Conference on, (2007) 1.
- 8) F. Garcia, B. Mirbach, B. Ottersten, F. Grandjean and A. Cuesta: "Pixel weighted average strategy for depth sensor data fusion", Image Processing (ICIP), 2010 17th IEEE International Conference on, (2010) 2805.
- 9) J. Park, H. Kim, Y.-W. Tai, M. Brown and I. Kweon: "High quality depth map upsampling for 3d-tof cameras", Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on, (2011) 1623.
- 10) J. Kim, J. Lee, S.-R. Han, D. Kim, J. Min and C. Kim: "A high quality depth map upsampling method robust to misalignment of depth and color boundaries", Journal of Signal Processing Systems, **75**, 1, (2014) 23.
- 11) 松尾, 青木: "スーパーピクセル上の接平面を利用した奥行き画像の補間", 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), **134**, 4, (2014) 587.
- 12) P. Felzenszwalb and D. Huttenlocher: "Efficient graph-based image segmentation", International Journal of Computer Vision, **59**, 2, (2004) 167.
- 13) J. Kopf, M. F. Cohen, D. Lischinski and M. Uyttendaele: "Joint bilateral upsampling", ACM Trans. Graph., **26**, 3, (2007) 96.
- 14) 佐藤, 大矢: "マルチエコーを取得可能な測域センサの性質に関する研究", ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演録 (2012).
- 15) D. Scharstein and C. Pal: "Learning conditional random fields for stereo", Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2007 IEEE Conference on, (2007) 1.
- 16) A. Saxena, M. Sun and A. Ng: "Make3d: Learning 3d scene structure from a single still image", Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, **31**, 5, (2009) 824.
- 17) R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua and S. Süsstrunk: "Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods", Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, **34**, 11, (2012) 2274.
- 18) R. Rusu and S. Cousins: "3d is here: Point cloud library (pcl)", Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, (2011) 1.
- 19) D. Anderson, H. Herman and A. Kelly: "Experimental characterization of commercial flash lidar devices", International Conference of Sensing and Technology, **2** (2005).
- 20) L. Kneip, F. Tache, G. Caprari and R. Siegwart: "Characterization of the compact hokuyo urg-04lx 2d laser range scanner", Robotics and Automation (ICRA), 2009 IEEE International Conference on, (2009) 1447.