

修士論文

奥行き差の補償に基づく形状の類似度を用いた
デプスマップの修復

森 剛基

2018 年 3 月 14 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

森 剛基

審査委員：

清川 清 教授	（主指導教員）
加藤 博一 教授	（副指導教員）
横矢 直和 学長	（奈良先端科学技術大学院大学）
佐藤 智和 客員教授	（副指導教員）
河合 紀彦 助教	（副指導教員）

奥行き差の補償に基づく形状の類似度を用いた デプスマップの修復*

森 剛基

内容梗概

カメラの撮影位置と撮影対象間の奥行き距離を表すデプスマップは、現実環境内の物体の3次元モデル化などに利用される。しかし、3次元モデル化の仮想化対象となる物体とカメラの間に木や電柱などの遮蔽物が存在する場合、対象物体の一部がオクルージョンにより計測されないため、対象の完全な3次元モデルを生成するには、取得したデプスマップ上から遮蔽物を取り除いた後、欠損領域を埋める修復処理が必要となる。従来、デプスマップ内の欠損領域の修復に関しては、欠損の周囲から類似したデプスパッチを探索しそれを合成するパッチベースの修復手法が提案されているが、三次元空間では類似形状であるにも関わらずデプスマップ上では奥行き値の差により類似形状とはみなされず、そのようなパターンが有効に利用できないという問題があった。

本論文ではこの問題に対して、奥行き差を補償した類似形状の探索によりデプスマップの修復を行う手法を提案する。本研究ではパッチ内の奥行き値を相対的な値として保持し、欠損領域を含むパッチと類似したデプスパッチをデプスマップ全体から探索したのち、そのパッチの奥行き値に基づき欠損領域内の最適な奥行き値を算出することで修復を行う。実験では、様々なシーンを計測し取得したデプスマップの欠損領域を修復し、従来手法との比較を行う。また、いくつかのシーンではデプスマップに欠損を与え、取得したデプスマップと修復結果の差を定量的に評価することで、提案手法の有効性を示す。平均二乗誤差を取った結果、提案手法が有効であることがわかった。

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1651111, 2018年3月14日.

キーワード

デプスマップ修復，エネルギー最小化，奥行き差の補償

Depth Map Inpainting Using Shape Similarity Based on Compensation for Difference in Depth*

Tsuyoki Mori

Abstract

A depth map representing the depth distance between the camera position and a target object is used for 3-D modeling of the object in the real environment. However, when there are obstacles such as trees and utility poles between the camera and the target object, a part of the object is not measured due to the occlusion. To generate a complete 3-D model of the target object, it is necessary to fill in the missing regions after removing obstacles from the acquired depth map. In previous studies for filling in missing regions of a depth map, patch-based inpainting methods have been proposed that search for similar depth patches from the surrounding regions and synthesize them in the missing regions. However, such methods have a problem that the patterns that are actually similar in 3-D space cannot always be used effectively because such patterns may appear differently due to the difference in depths.

To solve this problem, this thesis proposes a method that inpaints a depth map by searching for similar patches on the basis of the compensation for the difference in depth. In this study, depth values in patches are converted to relative ones and the missing regions are filled in by searching for similar depth patches from the entire depth map and calculating optimum depth values in the missing regions. In experiments, to show the effectiveness of the proposed method, we compare the proposed method is compared with a conventional method by inpainting missing regions of depth maps obtained by measuring various scenes. In addition, the proposed method is quantitatively evaluated

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651111, March 14, 2018.

on the basis of the difference between the estimated values and the ground truth by giving missing regions assuming that some scenes contain unnecessary objects. It was confirmed through the experiments that the proposed method yields smaller MSE (Mean Squared Error) than a naive method without depth compensation.

Keywords:

Depth map inpainting, Energy minimization, Compensation for difference in depth

目次

図目次	vi
第 1 章 はじめに	1
第 2 章 従来研究および本研究の位置づけ	3
2.1 3次元点群を直接利用する形状修復手法	3
2.1.1 形状の連続性を考慮した手法	3
2.1.2 形状当てはめによる修復手法	5
2.1.3 類似形状パターンの探索と合成により修復を行う手法	5
2.2 デプスマップを用いた形状修復手法	6
2.3 本研究の位置づけと方針	8
第 3 章 奥行き値の差を補償したデプスマップの修復	10
3.1 提案手法の概要	10
3.2 エネルギー関数の定義	10
3.3 エネルギー関数の最小化	13
3.3.1 欠損領域の初期値設定	13
3.3.2 類似パッチの探索	13
3.3.3 奥行き値の更新	14
3.4 粗密法による局所解の回避と高速化	14
第 4 章 実験と考察	17
4.1 実験概要	17
4.2 実験結果と考察	18
第 5 章 まとめ	25
謝辞	26
参考文献	27

図目次

2.1	Wang ら [6] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例	4
2.2	Davis ら [7] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例	4
2.3	Sharf ら [13] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例	6
2.4	Breckon ら [14] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例	7
2.5	Ikehata ら [20] の手法を用いたデプスマップ修復の例	8
3.1	提案手法の処理の流れ	11
3.2	デプスマップ上の各領域	12
3.3	奥行き差を補償した類似度計測方法. 図の場合では上のパッチと 下のパッチは奥行き値に違いがあるが, 補償した結果の SSD の値 は 0 となる	13
3.4	奥行き値の更新方法. 欠損がある画素 $\mathbf{x}_i$ を更新するために $f(\mathbf{x}_i +$ $\mathbf{p}_0) - \mathbf{p}_0$ や $f(\mathbf{x}_i + \mathbf{p}_1) - \mathbf{p}_1$ など, $\mathbf{x}_i$ 周辺のパッチと類似したデー タ領域 Φ 内のパッチの奥行き値を使い重み付き平均を取る.	15
3.5	粗密法による欠損修復の反復処理	16
4.1	シーン (A) によるデプスマップ修復実験	19
4.2	シーン (B) でのデプスマップ修復実験	20
4.3	シーン (C) でのデプスマップ修復実験	21
4.4	シーン (D) でのデプスマップ修復実験	22
4.5	シーン (E) でのデプスマップ修復実験	23

第 1 章 はじめに

バーチャルリアリティ技術の発展にともない、仮想的に観光地を体験できるウォークスルーアプリケーション等、現実環境内の物体に基づく 3 次元モデルを利用したアプリケーションの開発が近年盛んに行われている [1]. このようなアプリケーションでは実物体の 3 次元モデルを用意する必要があるが、手動でのモデリングには高度な技術や人員が必要となるため、コンピュータビジョンの技術による自動的なモデリングを行う手法が求められている. これに対して、近年では、RGB カメラで得られるテクスチャ画像やレーザレンジファインダのような距離センサなどで得られるデプスマップを使用することで実物体から 3 次元モデルを自動生成し、仮想空間上に再現する 3 次元仮想化技術 [2, 3] の研究が行われている. しかし、距離センサ等による仮想化対象の実物体の計測において物体とカメラの間に木や電柱などの遮蔽物が存在する場合、対象物体の一部がオクルージョンにより計測されないため、生成した実物体の 3 次元モデル上に欠損が生じる場合がある. このような問題に対して、3 次元モデル中の欠損を修復する様々な手法が提案されている.

3 次元モデルの修復手法は、3 次元点群を直接用いて修復する手法と 3 次元点群をデプスマップで表現しデプスマップ上で修復する手法に大別できる. 3 次元点群を直接用いて修復する手法として、欠損領域の周辺の情報をもとに微分方程式や符号付距離場を用いる手法 [4, 5, 6, 7, 8] が提案されている. これらの手法は 3 次元モデル中の小さな欠損に対しては有効であるが、詳細な形状を原理上再現できないため、比較的大きな欠損に対して修復を行うと違和感が生じる場合がある. これに対して、大きな欠損に対応できる手法として、欠損を含む 3 次元形状に平面や円筒などのプリミティブ形状を当てはめることで欠損を修復する手法 [9, 10, 11, 12] や形状の類似度に基づき修復する手法 [13, 14, 15, 16] も存在する. これらは比較的大きな欠損に対しても効果的であるが、これらの手法に共通して計算コストが高いという問題がある.

一方、3 次元点群をデプスマップで表現しデプスマップ上で修復を行う手法では、テクスチャ画像を対象として類似パターンの探索とそのパターンの合成により欠損を修復する Inpainting 手法 [21, 22] を応用することで、デプスマップ上の欠損の奥行き値を推定している. その手法の一つとして Ikehata ら [20] は Inpainting を

テクスチャ画像およびデプスマップの両方に対し同時に適用することでデプスマップを修復する手法を提案し，比較的高速に大きな欠損に対しても違和感の少ない修復を行っている．しかし，一般にデプスマップは点群をある投影中心から投影面に透視投影して生成されるため，三次元空間では類似形状であるにも関わらずデプスマップ上では奥行き値の差により類似形状とは見なされず，そのようなパターンが有効に利用できないという問題があった．

本論文では，計算コストの低いデプスマップを用いた修復手法に着目し，当該手法における上記の問題を解決するために，奥行き値の差を補償をしたデプスマップの修復を行う手法を提案する．提案手法では，デプスマップの各パッチ内の奥行き値をパッチの中心を基準とした相対的な値として保持し，相違度 SSD(Sum of squared Differences) によるデプスパッチの類似度に基づいて定義されるエネルギー関数を最小化することで，奥行き値の差に影響を受けないデプスマップの欠損領域の修復を行う．

以降，2 章では，3 次元形状の欠損修復に関する従来研究と本研究の位置づけについて述べる．3 章では，奥行き差を補償したデプスマップの修復法について述べる．4 章では，様々な環境によって計測されたデプスマップについて欠損領域の修復を行い，従来手法との比較を行うことで，提案手法の有効性を示す．最後に 5 章で，本論文のまとめと今後の課題について述べる．

第 2 章 従来研究および本研究の位置づけ

実物体の 3 次元仮想化などで用いる 3 次元点群にはオクルージョンが原因で欠損を生じることがあり，この欠損の修復を行う手法が近年盛んに研究されている．これらの手法は 3 次元点群を直接用いて修復する手法と，3 次元点群をデプスマップで表現しデプスマップを用いて修復する手法に大別できる．本章では，3 次元モデルの欠損修復に関する従来研究について概観し，関連研究に対する本研究の位置付けについて述べる．

2.1 3 次元点群を直接用いる形状修復手法

3 次元点群を直接用いる形状修復手法は，形状の連続性を考慮し欠損領域周辺から形状を滑らかに補間することによって修復を行う手法，既存点群に特定の形状を当てはめることで修復を行う手法，類似形状パターンを探索し欠損領域に合成することによって修復を行う手法に大別できる．以下では，それぞれの従来研究について述べる．

2.1.1 形状の連続性を考慮した手法

3 次元点群中の欠損を修復する手法として，Castellani ら [4] は，欠損領域の境界におけるエッジを直線的に伸ばすことで，3 次元点群中のエッジや角に発生した欠損を違和感なく修復する手法を提案したが，この手法では曲面形状の修復ができない．これに対して，Verdera ら [5] は微分方程式を，Wang ら [6] は点群に二次曲面などを用いることで滑らかな曲面形状の修復を行う手法を提案している (図 2.1)．しかし，これらの手法は小さな欠損領域に対しては良好な修復を行うことが可能であるが，比較的大きな欠損領域を修復した場合，複雑な形状を欠損内部に再現できず，対象物体によっては違和感が生じる結果になる．

また，形状の連続性に着目する別のアプローチとして，符号付距離場を用いた欠損領域の修復手法が提案されている．Davis ら [7] は，符号付距離場を欠損領域の境界から生成し，その値を欠損領域内に伝搬させ，値が零値となった三次元位置をモ

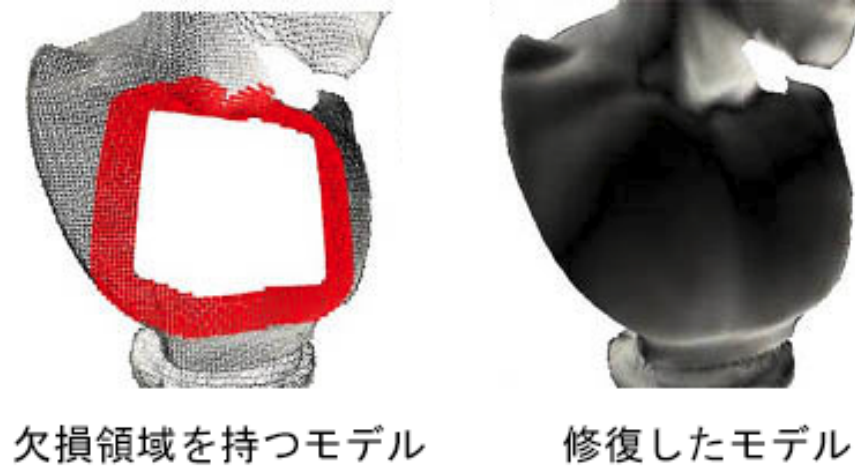


図 2.1 Wang ら [6] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例

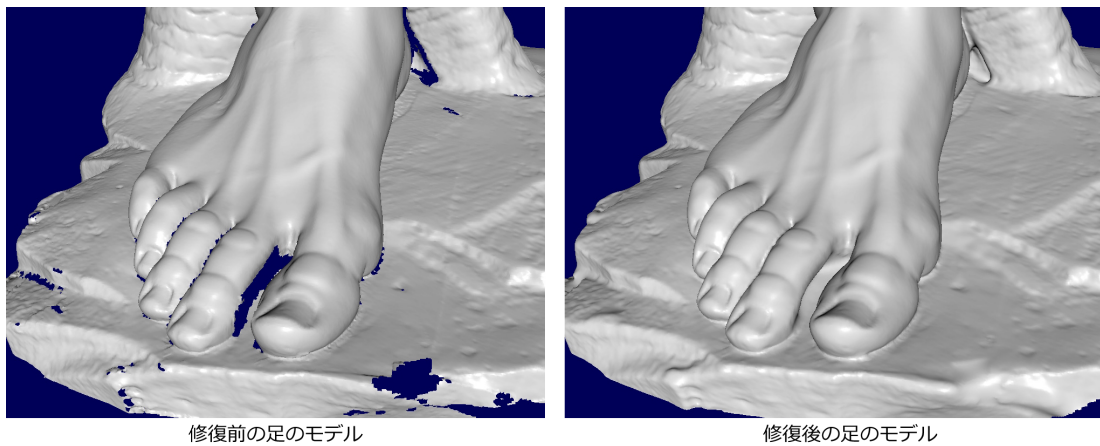


図 2.2 Davis ら [7] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例

デルの境界とすることで修復を行う手法を提案した (図 2.2). さらに, Masuda[8] は, 符号付距離場に対して逐次的に二次曲面を当てはめることで, 清らかな面を生成する手法を提案している. しかし, これらの手法においても, 欠損領域の周辺の情報のみによって修復するため, 欠損が比較的大きな 3 次元点群を修復すると, 欠損領域内部の複雑な形状を再現することは困難であり, 違和感が生じることがある.

2.1.2 形状当てはめによる修復手法

3次元点群中に比較的大きな欠損がある場合でも比較的高品質な修復を行うために、Stulp ら [9] は計測領域の点群に平面，円筒，球といった単一のプリミティブ形状を当てはめ，それを欠損領域に伸長して貼り付けることで修復する手法を提案した．さらに Schnabel ら [10] は計測領域の点群に平面，円筒，円錐，球，円環といった複数のプリミティブ形状を当てはめ，欠損領域の修復を行う手法を提案した．これらの手法では比較的大きな欠損に対しても大局的に違和感のない修復を行うことが可能であるが，詳細な形状を再現することができず，違和感が生じる場合がある．また，Kraevoy ら [11] や Pauly ら [12] は，事前に様々な形状に関するテンプレートを含んだデータベースを利用する手法を提案している．この手法では，データベース中から対象物体と類似したテンプレートを選び，テンプレートを対象物体の形状に合わせるように変形し，欠損に対応する箇所をコピーすることで修復を行っている．しかし，事前に対象物体と類似した物体のモデルをデータベース内に用意しておく必要があり，データベースの構築にコストを要する．

2.1.3 類似形状パターンの探索と合成により修復を行う手法

欠損に存在すべき形状と類似した形状が同一モデル内にも存在するという仮定のもと，類似形状パターンを探索することで，欠損領域内に詳細な形状を再現することができる手法が提案されている．Sharf ら [13] は，3次元モデルの欠損領域周辺と類似したパターンを3次元モデル全体から探索し，そのパターンを欠損領域に貼り付けることによって修復を行う (図 2.3)．しかし，欠損全体に対応する類似形状がモデル内に存在しない場合には，高品質な修復は難しい．これに対して，Breckon ら [14] は単一のプリミティブ形状を点群に当てはめ，それを欠損領域に伸長して貼り付けたあと，欠損領域の境界の形状と計測領域の形状との類似度を算出し，逐次的に最類似形状を合成する．これにより，モデル全体の様々な部分形状を修復に利用することができ，欠損領域内部にも詳細な形状を再現している (図 2.4)．しかし，逐次的に修復を行うため，直前に欠損領域へ貼り付けたパターンに大きく依存し，修復結果に違和感が生じることがある．このような問題を解決するために，河合ら [15, 16] は，類似度に基づくエネルギー関数を定義し，欠損領域全体を最適化する

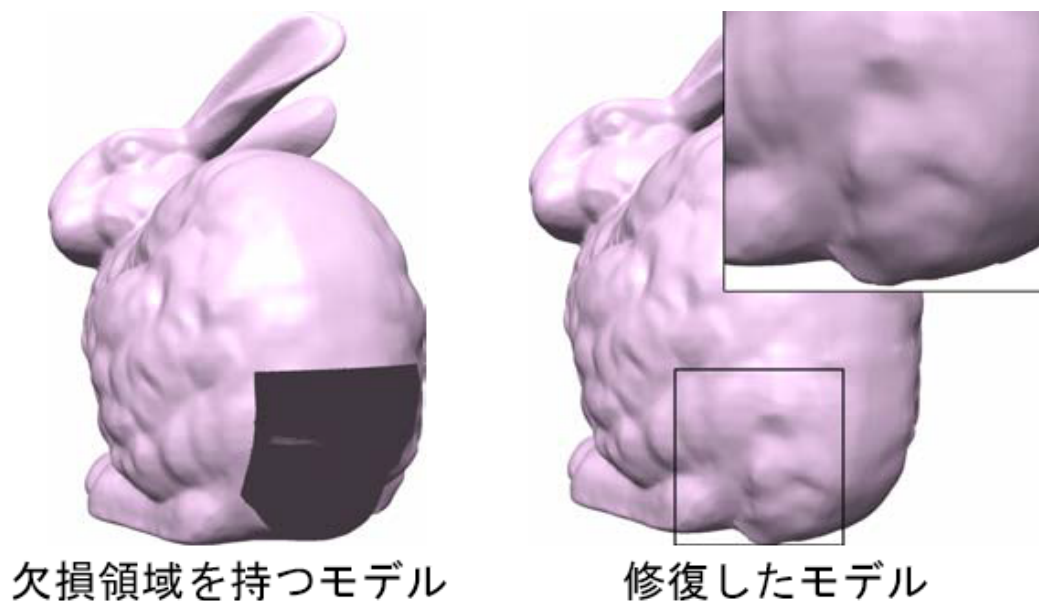


図 2.3 Sharf ら [13] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例

ことによって修復を行う手法を提案している．これにより，類似パターンの合成の順番に依存せず，欠損全体に最適な形状を生成している．しかし，この手法を含む，類似形状パターンを探索して合成することで修復する手法は，3 次元点群を直接扱うため，3 次元点群の配置や密度によっては類似度の算出が煩雑になり，計算コストが高くなるという問題がある．

2.2 デプスマップを用いた形状修復手法

類似形状パターンの探索と合成により修復を行う手法は概して計算コストが高いという問題に対し，3 次元点群をデプスマップで表現し，そのデプスマップを用いることで，計算コストを抑えた修復を実現する手法が提案されている．

Salamanca ら [17] は，Markov Random Field による画像修復手法 [18] を用いることでデプスマップの修復を行う手法を提案した．しかし，この手法は 2.1.1 項の問題と同様に欠損領域周辺の情報のみで修復を行うため，比較的大きな欠損のあるデプスマップを修復すると違和感が生じることがある．

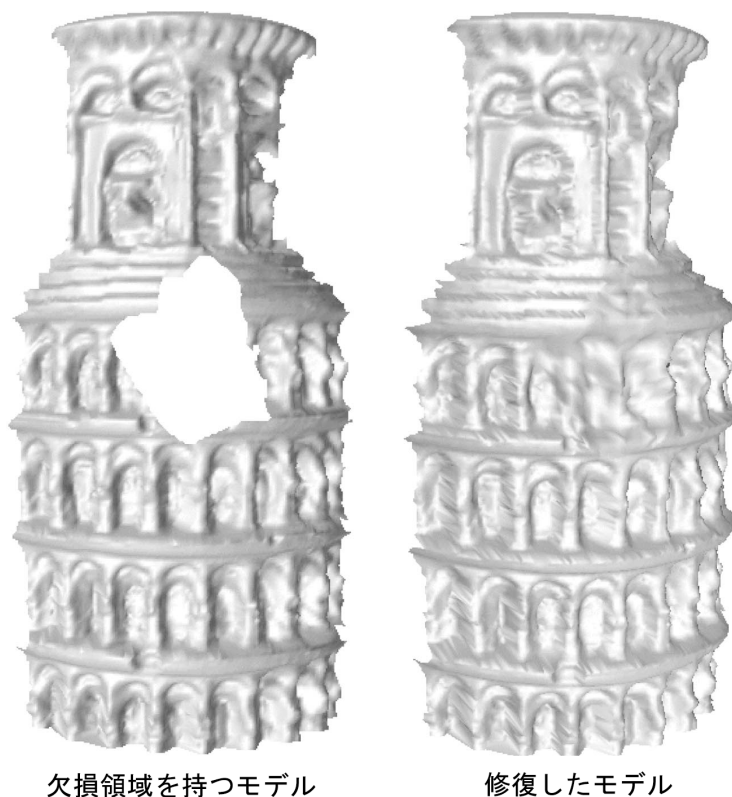


図 2.4 Breckon ら [14] の手法を用いた 3 次元欠損修復の例

これに対し、中尾ら [19] は、3 次元点群に対して Schnabel ら [10] の手法を適用した後、プリミティブ形状を基準とした正対デプスマップと正対テクスチャ画像を生成し、奥行き値と RGB 値に基づく類似度により欠損の修復を行う手法を提案した。Ikehata ら [20] は、テクスチャ画像を対象として類似パターンの探索とそのパターンの合成により欠損を修復する Image Inpainting 手法 [21, 22] をテクスチャ画像とデプスマップの両方に対し同時に適用することで、違和感のない修復を行う手法を提案した (図 2.5)。一般に、生成されるデプスマップは点群の投影中心と投影面の位置に大きく依存する。このため、これらの手法には共通して、3 次元空間では類似形状であるにも関わらずデプスマップ上では奥行き値の差により類似形状とは見なされず、そのようなパターンが有効に利用できないという問題がある。これに対し、Doria ら [23] は、テクスチャ画像の RGB 値およびデプスマップの x 軸方向および y 軸方向と奥行き値の勾配による 5 次元情報を利用し、類似したパター

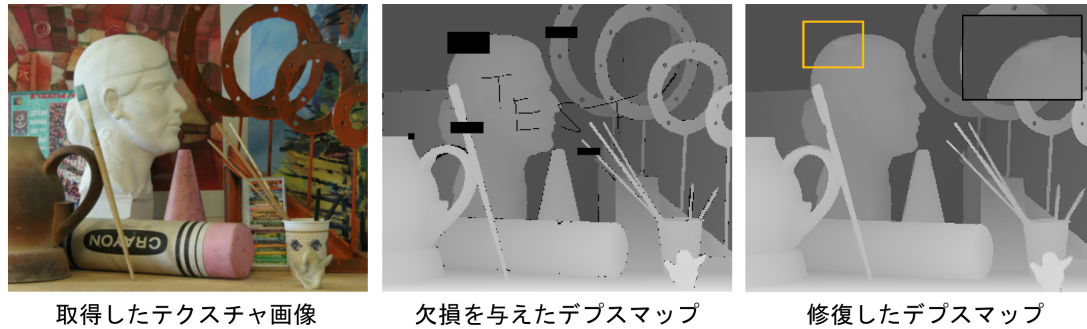


図 2.5 Ikehata ら [20] の手法を用いたデプスマップ修復の例

ンをデプスマップの中から貼り付けることによって欠損の修復を行う手法を提案した．勾配を用いることでデプスマップ上の奥行き値の差を補償することが可能であるが，逐次的なコピーにより欠損を修復するため，コピーの順に結果が大きく依存し，欠損全体で最適な形状が得られない場合がある．

2.3 本研究の位置づけと方針

これまでで概観したように，3次元点群に存在する欠損領域の修復に関する様々な手法がこれまでに提案されている．形状の連続性を考慮して修復を行う手法は，微分方程式や符号付距離場を用いることで小さな欠損領域に対しては有効な修復が可能であるが，欠損領域周辺の情報しか使用しないため，比較的大規模な欠損領域に関しては適切なパターンを再現できず違和感が生じる場合がある．また，形状の当てはめにより欠損を修復する手法では，比較的大きな形状に対しても大局的に違和感のない修復ができるが，欠損内部で詳細な形状は再現できない．これに対して，類似パターンを探索し合成することで修復する手法では，比較的大きな欠損領域に対しても内部で詳細な形状を再現でき，様々な欠損に対しても比較的違和感のない修復が可能である．しかし，3次元点群を直接用いて類似度を計算することはコストが高い．

一方，3次元点群を投影面に投影することでデプスマップを生成し，デプスマップ上の欠損を修復する手法では，比較的少ない計算量で3次元形状の欠損修復を

行うことが可能である。しかし、デプスマップの奥行き値は投影中心と投影面の位置関係に大きく依存するため、三次元空間では類似形状であるにも関わらずデプスマップ上では奥行き値の差により類似形状とはみなされず、そのようなパターンが有効に利用できないという問題があり、類似形状が同一デプスマップ中にあるにもかかわらず違和感のない修復が難しい場合がある。

本論文では、デプスマップの修復における上記の問題に対して、Inpainting を応用したデプスマップの修復を行う際、デプスマップの奥行き差を補償することで問題を解決したデプスマップの欠損修復手法を提案する。提案手法では、各画素を中心とするパッチごとに、パッチ内の平均奥行き値をパッチ内の各画素の奥行き値から引いた相対的な値を保持し、それを用いたパッチ間の類似度評価を行う。これにより、奥行き差による類似度の違いを補償し、奥行き値が異なる場合でも類似形状パッチを正しく探索する。また、このような類似度評価に基づくエネルギー関数を定義し、これを最小化することで、欠損領域全体に最適な形状を生成する。

第 3 章 奥行き値の差を補償したデプスマップの修復

本章では，奥行き値の差を補償したデプスマップの欠損修復の提案手法についての詳細を述べる．

3.1 提案手法の概要

提案手法の流れを図 3.1 に示す．提案手法では，取得したデプスマップ上で修復対象領域を欠損領域として指定する．次に，欠損領域に初期値を設定する．次に，欠損領域とそれ以外の領域間のデプスパッチの相違度 SSD に基づくエネルギー関数を最小化することで，欠損を修復する．具体的には，エネルギーが収束するまで，欠損領域と最も類似したパッチの探索と奥行き値の更新を繰り返す．ここで，類似パッチの探索においては，パッチ内の各画素値からパッチ内の平均画素値を引いた相対的な奥行き値による SSD での評価を行うことで，奥行き値の差を補償する．また，局所解の回避と高速化のため，提案手法では粗密法を用いる．

以下，3.2 節でエネルギー関数の定義について，3.3 節でエネルギー関数の最小化について，3.4 節では粗密法による局所解の回避と高速化について述べる．

3.2 エネルギー関数の定義

本節では，デプスマップ中の欠損領域内の画素を含むパッチとそれ以外の領域のパッチ間の SSD によるエネルギー関数を定義する．提案手法では，このエネルギー関数を最適化することによってデプスマップの修復を行う．ただし，奥行き値は実際の距離に対して線形であると仮定する．

入力するデプスマップの各領域を以下の 3 つに分割する (図 3.2 参照)．

- Ω : 欠損領域
- Ω' : 一定サイズの正方パッチ W の一部が欠損領域 Ω を含んだ時の中心画素の集合
- Φ : Ω および Ω' 以外の領域

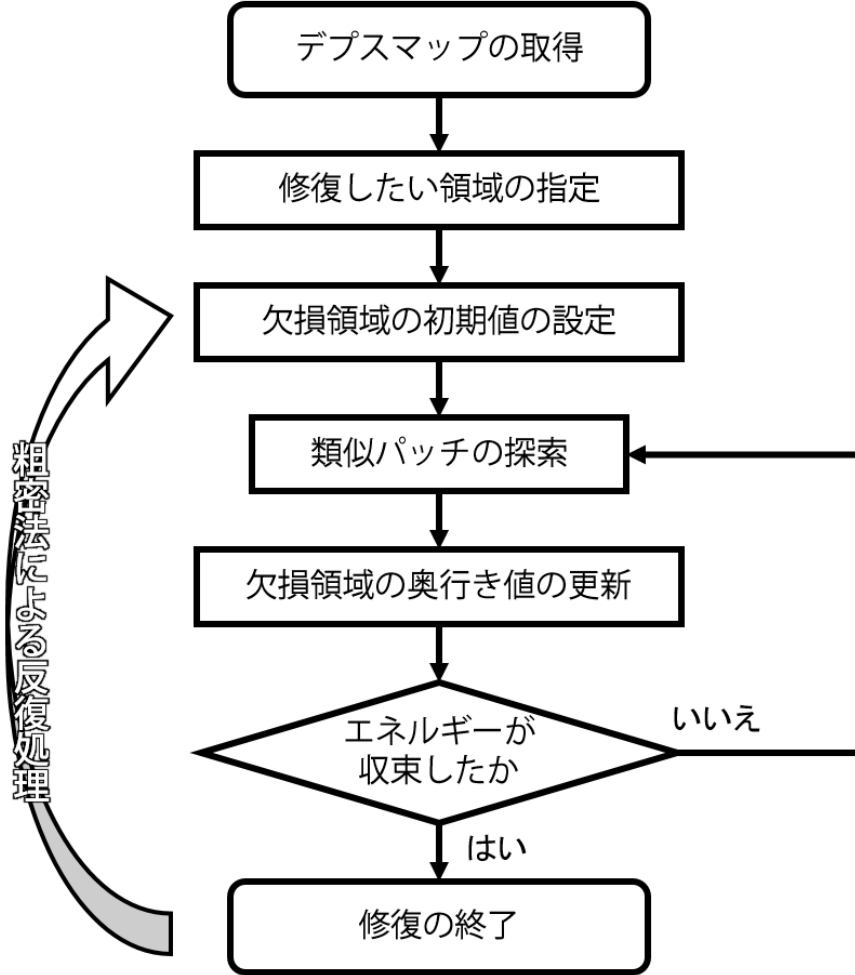


図 3.1 提案手法の処理の流れ

また，欠損領域の奥行き値の尤もらしさに基づくエネルギー関数 E を以下のように定義する．

$$E = \sum_{\mathbf{x}_i \in \Omega'} w_i SSD(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (3.2.1)$$

ここで， $w_i = 1/\gamma^\delta$ (γ : 正の定数, δ : 欠損領域からの距離) は欠損領域の各画素の距離に応じた重み, $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ はそれぞれ $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)^T \in \Omega'$, $\mathbf{x}_j = (x_j, y_j)^T \in \Phi$ と

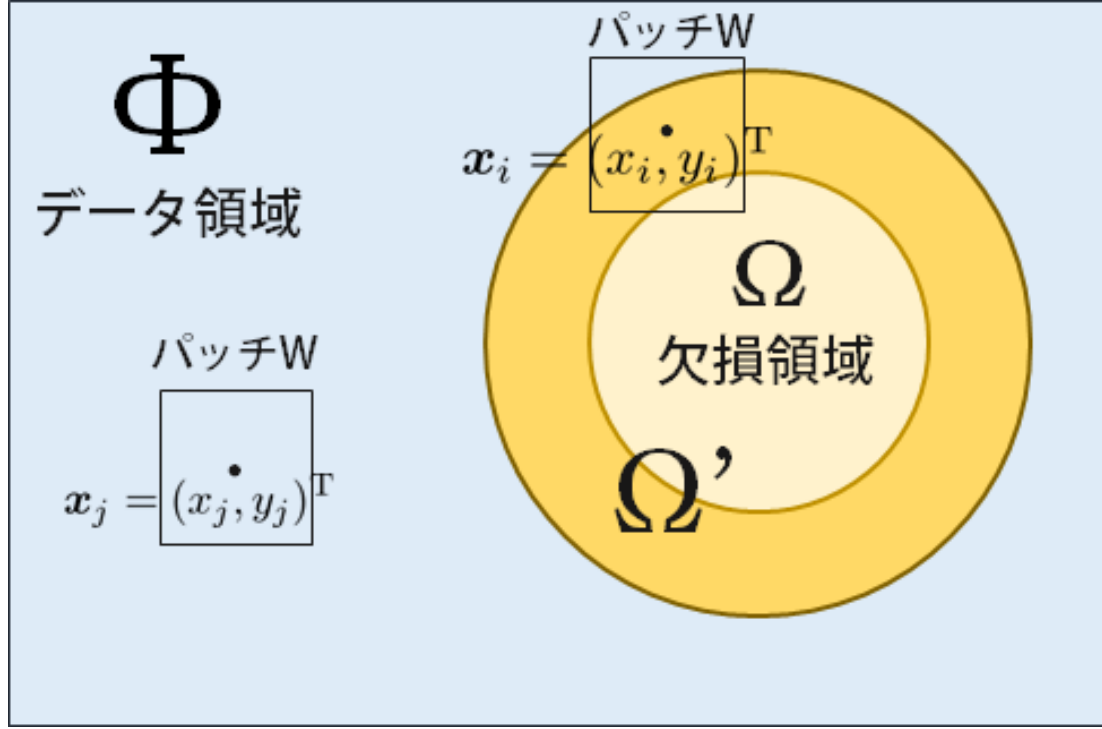


図 3.2 デプスマップ上の各領域

なる画素位置を表す．また，パッチ間の奥行き差を補償した SSD は以下のように定義する．

$$SSD(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sum_{\mathbf{p} \in W} \{(d(\mathbf{x}_i + \mathbf{p}) - Avg(\mathbf{x}_i)) - (d(\mathbf{x}_j + \mathbf{p}) - Avg(\mathbf{x}_j))\}^2 \quad (3.2.2)$$

ここで， $d(\cdot)$ はある画素の奥行き値を表し， $Avg(\cdot)$ はある画素を中心とするパッチ内の奥行き値の平均値であり，以下のように定義される．

$$Avg(\mathbf{x}) = \frac{1}{|W|} \sum_{\mathbf{p} \in W} d(\mathbf{x} + \mathbf{p}) \quad (3.2.3)$$

ただし， $|W|$ はパッチ内に存在する画素の合計数である．

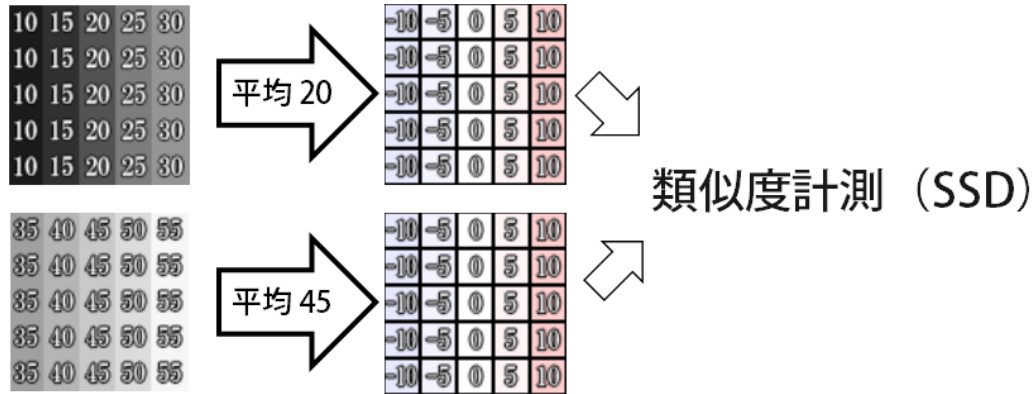


図 3.3 奥行き差を補償した類似度計測方法．図の場合では上のパッチと下のパッチは奥行き値に違いがあるが，補償した結果の SSD の値は 0 となる

3.3 エネルギー関数の最小化

式 (3.2.1) で定義されたエネルギー関数を最小化することによってデプスマップの欠損修復を行う．具体的には，3.3.2 項の探索と 3.3.3 項の修復を繰り返し，一反復前のエネルギー E' と現在の反復のエネルギー E が $|E - E'| < \epsilon (\epsilon > 0)$ となるように値が収束するまで処理を続ける．

3.3.1 欠損領域の初期値設定

3.4 節で述べる粗密法で，最初に修復を行う最も解像度の低い階層においては，デプスマップ全体より中央値を取得し，それを欠損領域 Ω 内の各画素の奥行き値の初期値として設定する．2 段階目以降の解像度では，1 段階低い解像度での修復結果を拡大したものを，当該段階の欠損領域の初期値として用いる．

3.3.2 類似パッチの探索

領域 Ω' 内の画素を中心とする各パッチ W と最類似したパッチを領域 Φ から探索し，各画素 x_i がそれに最類似した画素 x_j へ写像する関数 $f(\cdot)$ を以下の通り算

出する.

$$f(\mathbf{x}_i) = \arg \min_{\mathbf{x}_j \in \Phi} (SSD(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)) \quad (3.3.1)$$

ここでは, Barnes ら [24] が提案した PatchMatch アルゴリズムを使用することで, 高速な探索を行う.

3.3.3 奥行き値の更新

欠損領域のある画素は, 図 3.4 のようにその画素を含むパッチ全てについて, 前項で探索した最類似パッチ内の, 当該画素に対応する画素の奥行き値の重み付き平均をとることによって最適な奥行き値が決定される. 具体的には, $\mathbf{x}_i$ を中心とするパッチと最も類似したパッチの中心画素 $f(\mathbf{x}_i)$ および, 各パッチの平均奥行き値を用いて, $\mathbf{x}_i$ の奥行き値 $d(\mathbf{x}_i)$ を以下の式で算出を行い, 奥行き値を更新する.

$$d(\mathbf{x}_i) = \frac{\sum_{p \in W} w_i (d(f(\mathbf{x}_i + p) - p) - (Avg(f(\mathbf{x}_i + p)) - Avg(\mathbf{x}_i + p)))}{\sum_{p \in W} w_i} \quad (3.3.2)$$

3.4 粗密法による局所解の回避と高速化

本研究では, Greedy Algorithm の枠組みを用いているため, 局所解問題が存在する. このため大域最適解に近い解を得るために, 初めは元のデプスマップの解像度を下げたデプスマップで欠損修復を行い, 順次解像度を高くして処理を行う粗密法を採用する. 具体的には, 図 3.5 で示すように, $1/2, 1/4, \dots$ と段階的に縮小したデプスマップを用意し, 解像度の小さなデプスマップから順に欠損修復を行う. 解像度の小さなデプスマップの修復結果を拡大したものを次の段階でのデプスマップの初期値として用いることによって, 比較的良好な初期値を与えることができ, 処理の高速化にもつながる.

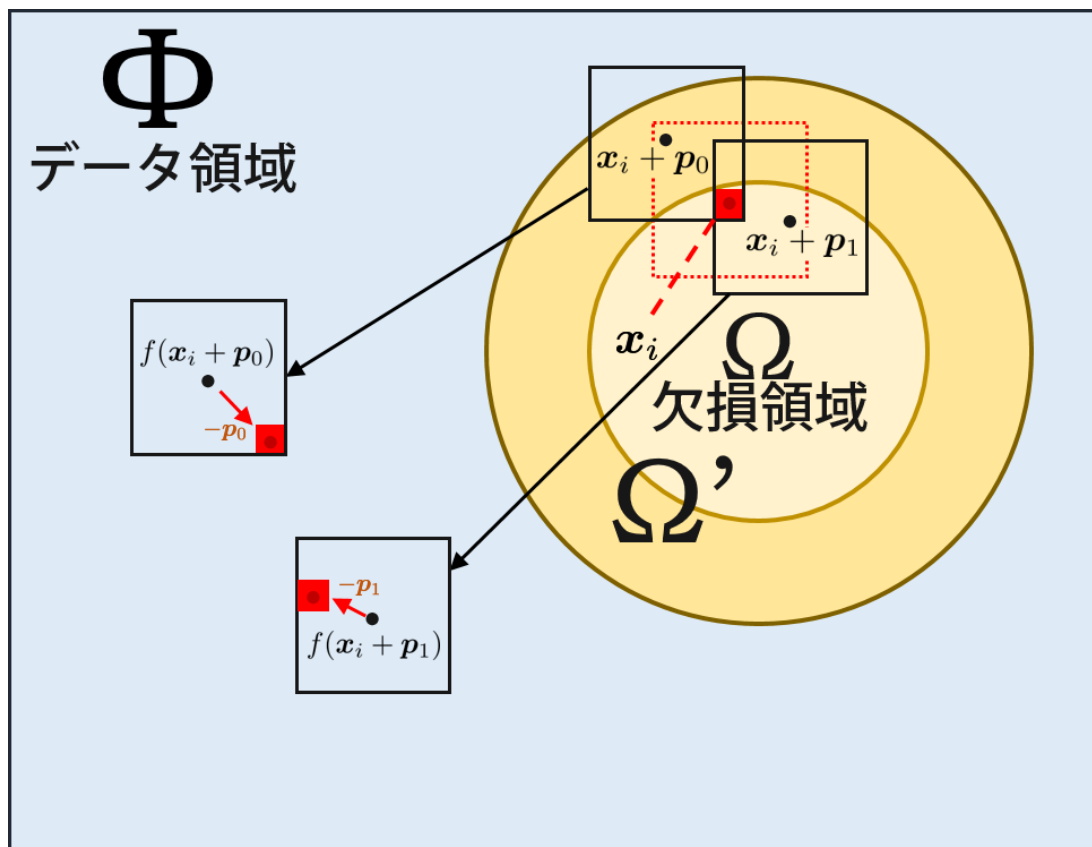


図 3.4 奥行き値の更新方法. 欠損がある画素 x_i を更新するために $f(x_i + p_0) - p_0$ や $f(x_i + p_1) - p_1$ など, x_i 周辺のパッチと類似したデータ領域 Φ 内のパッチの奥行き値を使い重み付き平均を取る.

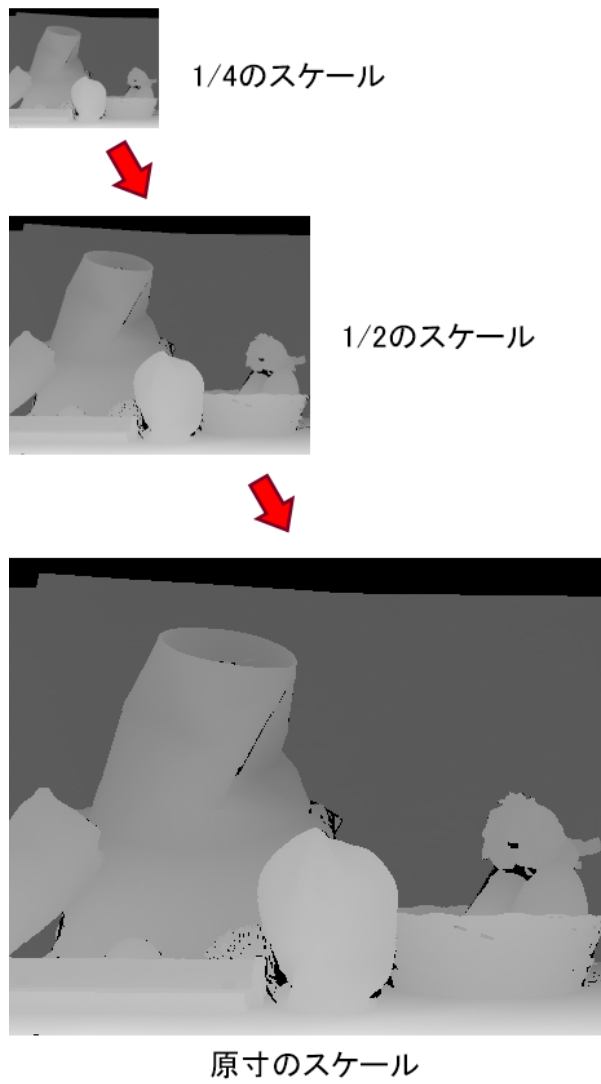


図 3.5 粗密法による欠損修復の反復処理

第 4 章 実験と考察

本章では，提案手法の有効性を示すために行った実験について述べる．実験では，マイクロソフト社の RGB-D カメラである Kinect v2 を用いて現実環境を観測することでデプスマップを取得した．そして，取得した奥行き値を実際の距離と比例するよう補正した後，デプスマップ内の修復対象領域を手動で指定することで欠損修復実験を行った．

4.1 実験概要

本実験では，修復結果に対する主観的な考察および，修復前のデプスマップを正解画像とした，修復結果と正解画像との平均二乗誤差による定量的な評価を行う．入力するデプスマップの解像度は 512×424 であり，奥行き値は $0 \sim 8000$ を取る．撮影対象までの距離が近いほど奥行き値が小さく，遠いほど奥行き値が大きくなる．なお，本論文で図示するデプスマップは，奥行き値を $0 \sim 255$ の数値に収まるよう正規化したグレースケール画像である．また，粗密法より，最初はデプスマップの解像度は四分の一にまで縮小する．本実験では表 4.1 に示す仕様を持つ計算機を用いた．

比較対象として，Ikehata らの手法 [20] を参考に，画像の奥行き値を補償せずに Inpainting を適用する手法 (以降，比較手法と呼ぶ) を用いる．ただし，今回の実験ではテクスチャ画像は使用しない．

表 4.1 実験に用いた計算機の仕様

項目	詳細
CPU	Intel Core i7-3930K 3.20GHz
メモリ	RAM 16.0GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 670
OS	Windows 10 64bit

4.2 実験結果と考察

図 4.1 から図 4.5 に、4 種類のシーン (A) から (E) における修復結果を示す。各図 (a) に入力デプスマップ、(b) に与えられた欠損領域、(c) に提案手法による修復結果、(d) に比較手法による修復結果、(e) に (c) のコントラストを上げた画像、(f) に (d) のコントラストを上げた画像を示す。シーン (A) からシーン (E) はそれぞれ以下のような特徴を持つ。

シーン (A): 奥行き異なる複数の平面が存在する。

シーン (B): 斜め方向より撮影し傾斜のついた平面が存在する。

シーン (C): 階段を正面から撮影することで、段階的に奥行き異なる複数の平面が存在する。

シーン (D): 階段を斜めから撮影することで、段階的に傾斜の付いた奥行き異なる複数の平面が存在する。

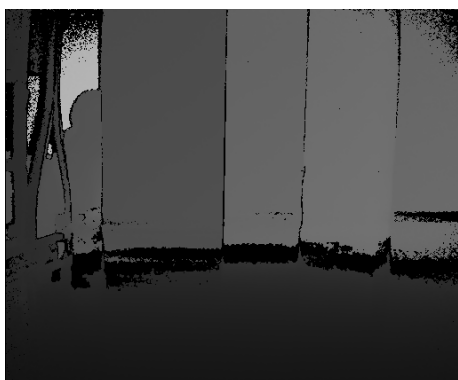
シーン (E): 曲面を持つ物体が奥行き異なる位置に存在する。

また、各シーンでの入力デプスマップと提案手法、比較手法それぞれの修復結果の平均二乗誤差の値を表 4.2 に示す。以下、各シーンについて考察する。

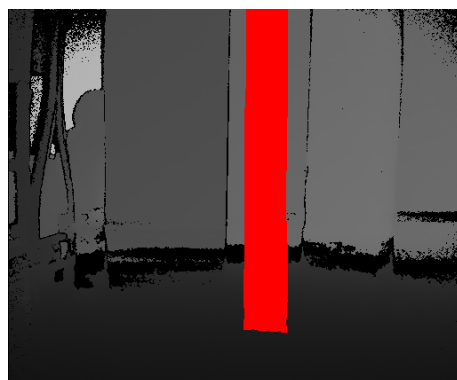
シーン (A) の実験 (図 4.1) では、奥行き異なるいくつかの平面において、図 (d) に示す比較手法による修復結果では壁と床の境界部分に違和感が生じているが、図 (c) に示す提案手法の修復結果では違和感が軽減されている。これは、奥行き差を補償しない比較手法では、壁と床の境界部分に類似するパッチを探索することが困難なため、欠損領域に適切なデプス値を生成することが難しいことに対し、提案手法では壁と床との境界部分に対応する適切なパッチを欠損領域周辺以外の場所から探索し、修復を行ったためだと考えられる。

シーン (B) の実験 (図 4.2) では、斜め方向より撮影し傾斜がついた壁に対して、比較手法による修復結果では奥行き値が滑らかにつながっていないが、提案手法では傾斜に対してなめらかに修復されている。平面に対して斜めから計測したシーンでは、奥行き差を補償することで同一平面状の傾斜した領域から類似度の高いパッチを取得できるため、より自然な修復が出来たと考えられる。

階段を正面から計測したシーン (C) の実験 (図 4.3) では、比較手法による修復結果と比較して提案手法では違和感の少ない修復が出来ている。また、階段を斜め前



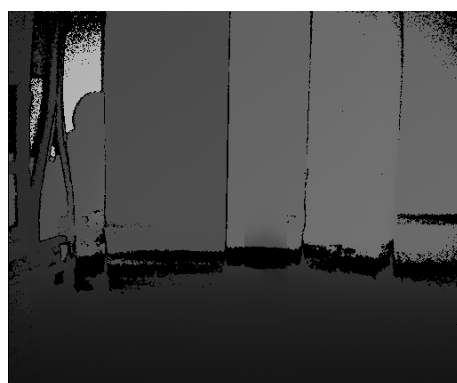
(a) 入力デプスマップ



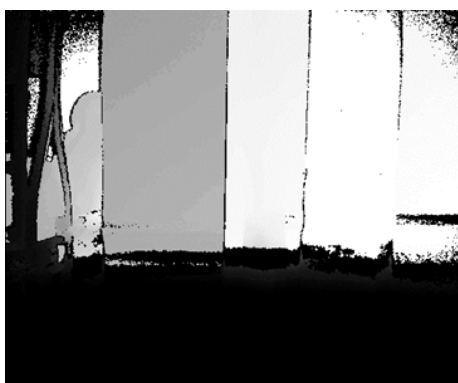
(b) 欠損領域を与えたデプスマップ



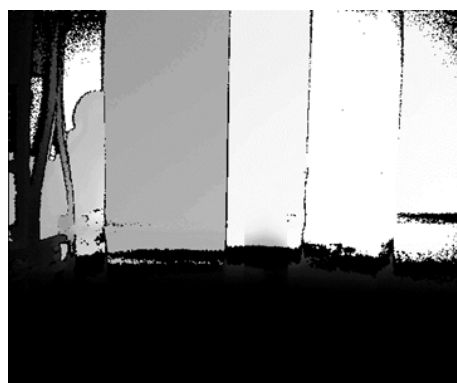
(c) 提案手法による修復結果



(d) 比較手法による修復結果

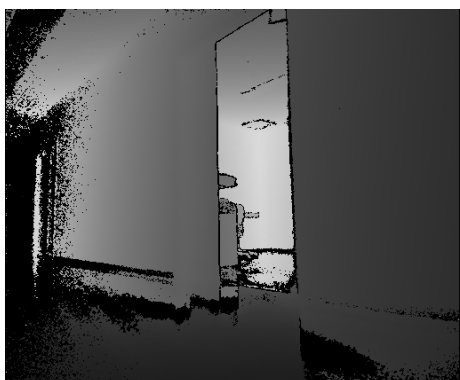


(e) (c) のコントラストを強調した画像

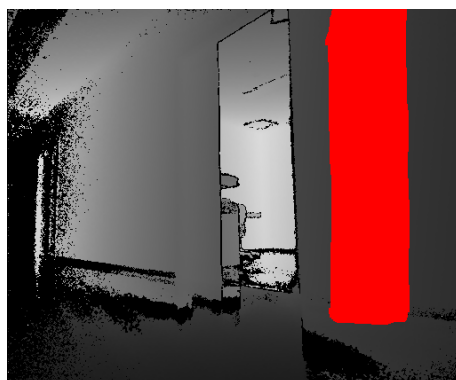


(f) (d) のコントラストを強調した画像

図 4.1 シーン (A) によるデプスマップ修復実験



(a) 入力デプスマップ



(b) 欠損領域を与えたデプスマップ



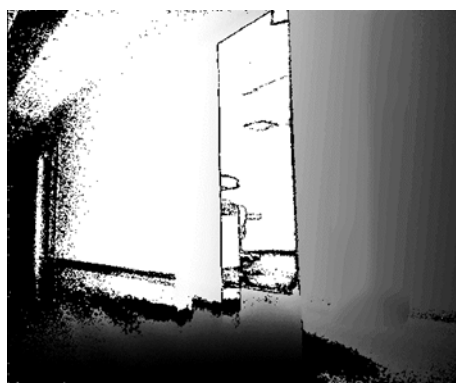
(c) 提案手法による修復結果



(d) 比較手法による修復結果

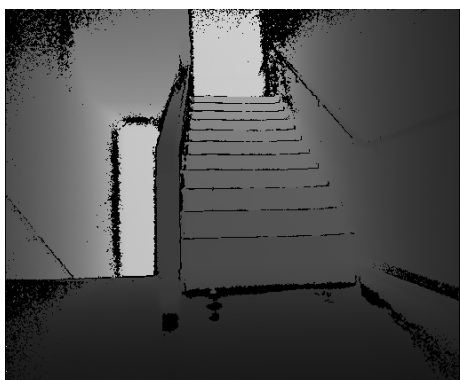


(e) (c) のコントラストを強調した画像

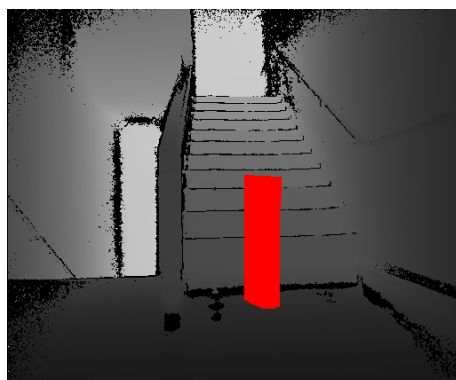


(f) (d) のコントラストを強調した画像

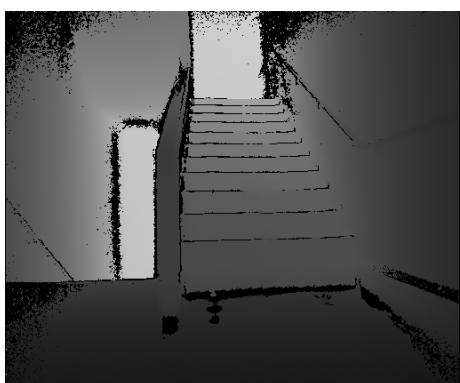
図 4.2 シーン (B) でのデプスマップ修復実験



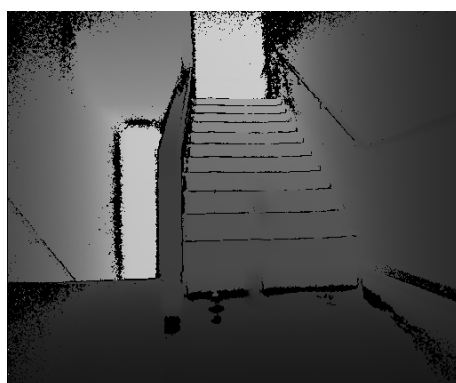
(a) 入力デプスマップ



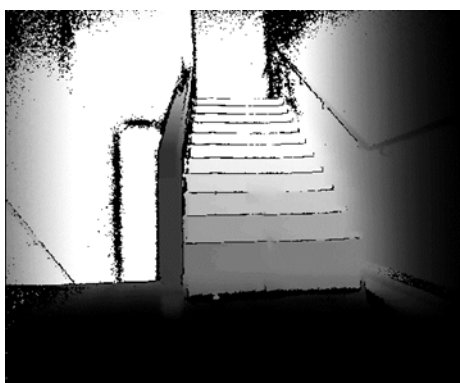
(b) 欠損領域を与えたデプスマップ



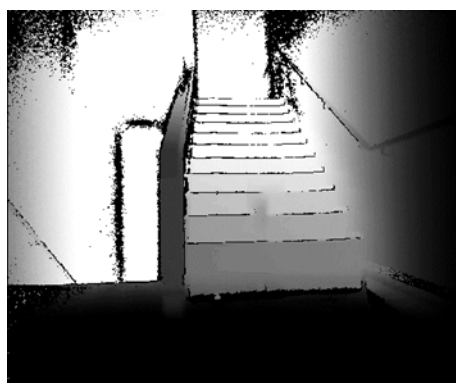
(c) 提案手法による修復結果



(d) 比較手法による修復結果

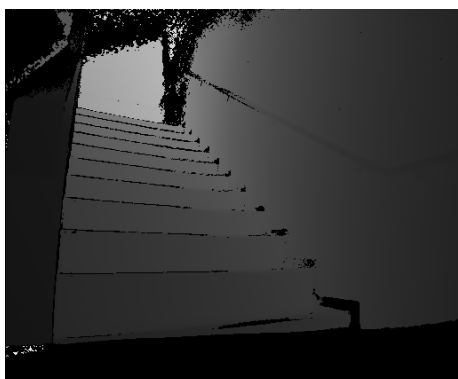


(e) (c) のコントラストを強調した画像

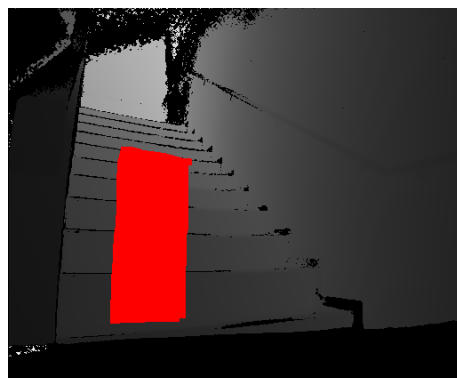


(f) (d) のコントラストを強調した画像

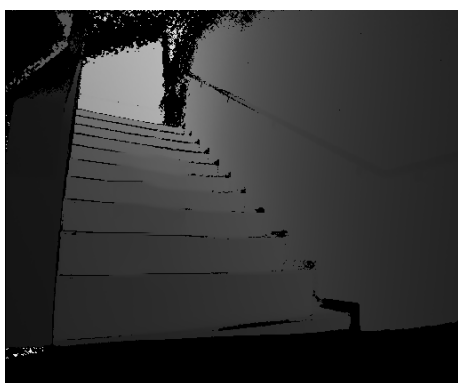
図 4.3 シーン (C) でのデプスマップ修復実験



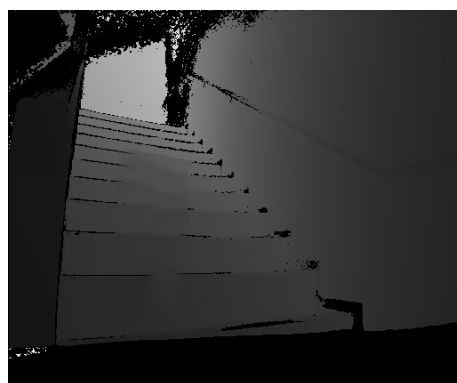
(a) 入力デプスマップ



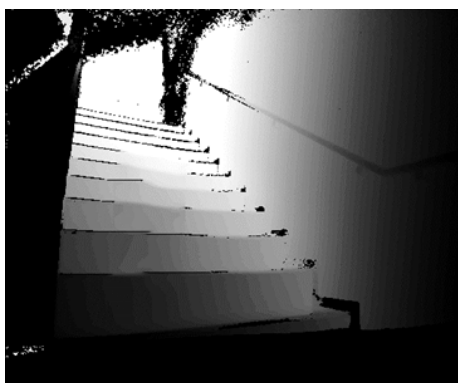
(b) 欠損領域を与えたデプスマップ



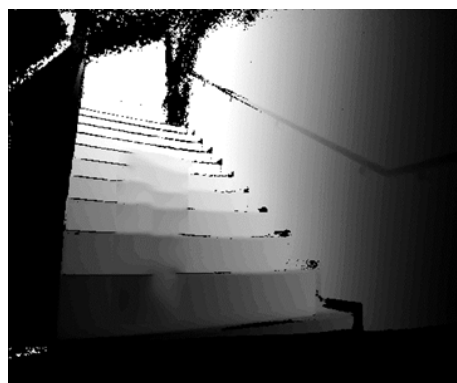
(c) 提案手法による修復結果



(d) 比較手法による修復結果

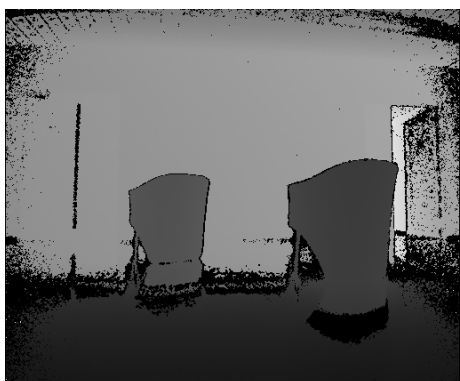


(e) (c) のコントラストを強調した画像

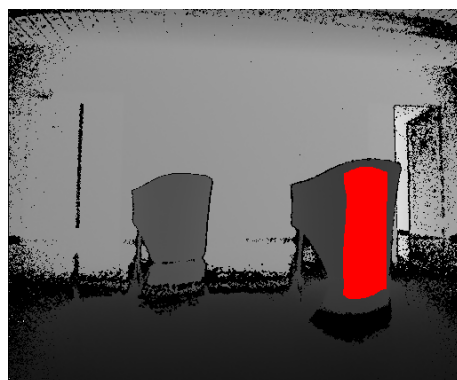


(f) (d) のコントラストを強調した画像

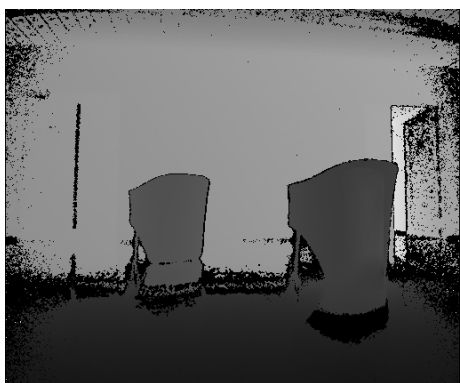
図 4.4 シーン (D) でのデプスマップ修復実験



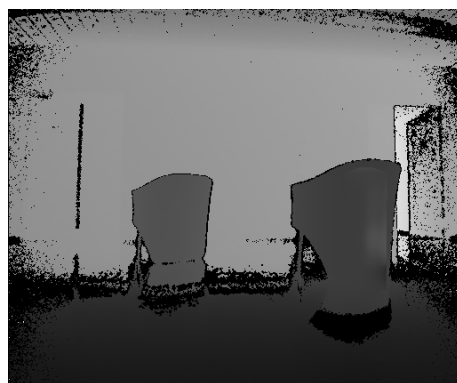
(a) 入力デプスマップ



(b) 欠損領域を与えたデプスマップ



(c) 提案手法による修復結果



(d) 比較手法による修復結果



(e) (c) のコントラストを強調した画像



(f) (d) のコントラストを強調した画像

図 4.5 シーン (E) でのデプスマップ修復実験

表 4.2 欠損修復の実験結果

シーン	欠損の画素数	実行時間 [秒]	手法	平均二乗誤差
シーン (A)	17409	96.3	提案手法	55521.10
			比較手法	63259.51
シーン (B)	31219	47.7	提案手法	5209.80
			比較手法	5394.67
シーン (C)	5956	26.3	提案手法	131398.60
			比較手法	197959.86
シーン (D)	15795	39.1	提案手法	153913.96
			比較手法	172293.63
シーン (E)	6840	17.9	提案手法	25040.04
			比較手法	42708.64

から計測したシーン (D) の実験 (図 4.4) では、比較手法の修復結果と比べると提案手法では違和感の少ない修復が出来ている。シーン (C), (D) の両方においては、階段は奥行きの異なる平面が連続している場面であるため、比較手法と比べると奥行き差を補償した提案手法の方がより類似したパッチの探索が可能となり、結果的に修復時の違和感が軽減できたと考えられる。

シーン (E) の実験 (図 4.5) では、曲面を持った奥行きの異なる物体に対して、比較手法による修復結果では違和感が生じていることに対し、提案手法による修復結果では違和感が低減されている。これによって、曲面を持った物体に対しても、奥行き差を補償できるならば比較手法よりも違和感の少ない修復が可能となることがわかった。

また、表 4.2 に示す通り、本実験における全シーンで提案手法の方が平均二乗誤差が小さく、定量的にも提案手法よりも良好な結果が得られており、主観的な考察と定量的な評価結果が一致していることを確認した。

第 5 章 まとめ

本論文では，距離センサ等による計測データ中に存在する遮蔽物を取り除くことで生じるデプスマップ内の欠損を修復する手法を提案した．提案手法では，パッチ内の平均奥行き値をパッチ内の各画素の奥行き値から引いた相対的な値を用いたパッチの類似度評価に基づくエネルギー関数を定義し，これを最小化することで，奥行き差を補償した修復を行った．

実験では，Kinect v2 により計測し生成した現実環境上のデプスマップに対して，修復対象の領域を手動で指定した後に欠損の修復を行う修復実験を，提案手法および従来手法を用いて行った．修復結果に対する主観評価および平均二乗誤差を用いた定量評価により，提案手法が従来手法と比較して正確で違和感の少ない修復が可能であることを確認した．

提案手法ではテクスチャ画像を使用しなかったが，テクスチャ画像から高品質な修復に有効である情報が得られると考えられる．このため，今後の課題として，テクスチャ画像とデプスマップを同時に利用するデプスマップの修復手法の開発が挙げられる．また，完全な 3 次元モデルを生成するためには複数視点からの計測が必要となるが，多視点において手動で遮蔽物を選択することは人員的なコストを要する．このため，今後，3 次元モデルの生成を容易化するためには，物体認識等による自動的な遮蔽物の選択とデプスマップの修復を統合することが必要であると考ええる．

謝辞

本研究の全過程を通して，懇親なる御指導，御鞭撻を頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 清川 清 教授に心より感謝致します．本研究を進めるにあたり，有益な御助言，御鞭撻を頂いたインタラクティブメディア設計学研究室 加藤 博一 教授に厚くお礼申し上げます．本研究を進めるにあたり，細やかな御助言，御鞭撻を頂いた 横矢 直和 学長に深く感謝致します．本研究を進めるにあたり，多大なる御指導，御鞭撻を頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 佐藤 智和 客員教授に心より感謝致します．本研究を進めるにあたり，細やかな御指導，御鞭撻を頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 河合 紀彦 助教に深く感謝致します．本研究を進めるにあたり，有益な御指導，御鞭撻を頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 酒田 信親 助教に厚くお礼申し上げます．また，研究室での生活を温かくご支援いただいた 中村 美奈 女史に心より感謝致します．最後に，研究生活だけでなく，日々の生活においても大変お世話になった旧視覚情報メディア研究室，サイバネティクス・リアリティ工学研究室内の諸氏に深く感謝致します．

参考文献

- [1] トップアン VR デジタルアーカイブ: 観光用途での活用, <http://www.toppan-vr.jp/bunka/vr/sight.shtml>
- [2] C. Fruh, A. Zakhor: "An Automated Method for Large-Scale, Ground-Based City Model Acquisition", Int. J. of Computer Vision, Vol. 60, No. 1 pp. 5-24, 2004.
- [3] T. Sato, M. Kanbara, N. Yokoya, H. Takemura: "Dense 3-D Reconstruction of an Outdoor Scene by Hundreds-Baseline Stereo Using a Hand-Held Video Camera", Int. J. of Computer Vision, Vol.47, No. 1-3, pp. 119-129, 2002.
- [4] U. Castellani, S. Livatino, R. Fisher: "Improving Environment Modelling By Edge Occlusion Surface Completion", Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, pp. 672-675, 2002.
- [5] J. Verdera, V. Caselles, M. Bertalmio, G. Sapiro: "Inpainting Surface Holes", Proc. Int. Conf. on Image Processing, Vol. 2, pp. 903-906, 2003.
- [6] J. Wang, M. Oliveira: "A Hole-Filling Strategy for Reconstruction of Smooth Surfaces in Range Images", Proc. SIBGRAPI, pp. 11-18, 2003.
- [7] J. Davis, S.R. Marschner, M. Garr, M. Levoy: "Filling Holes in Complex Surfaces Using Volumetric Diffusion", Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, pp. 428-438, 2002.
- [8] T. Masuda: "Filling The Signed Distance Field by Fitting Local Quadrics", Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, pp. 1003-1010, 2004.
- [9] F. Stulp, F. Dell'Acqua, R. Fisher: "Reconstruction of Surfaces Behind Occlusions in Range Images", Proc. Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling, pp. 232-239, 2001.
- [10] R. Schnabel, P. Degener, R. Klein: "Completion and Reconstruction with Primitive Shapes", Computer Graphics Forum, Vol. 28, No. 2, pp. 503-512, 2009.

- [11] V. Kraevoy, A. Sheffer, "Template-Based Mesh Completion", Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing, pp. 13-22, 2005.
- [12] M. Pauly, N. J. Mitra, J. Giesen, L. Guibas, M. Gross: "Example-Based 3D Scan Completion", Proc. Eurographics Symp. on Geometry Processing, pp. 23-32, 2005.
- [13] A. Sharf, M. Alexa, D. Cohen-Or: "Context-Based Surface Completion", ACM Trans. on Graphics, Vol. 23, No. 3, pp. 878-887, 2004.
- [14] T. Breckon, R. Fisher: "Three-Dimensional Surface Relief Completion via Nonparametric Techniques", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 30, No. 12, pp. 2249-2255, 2008.
- [15] 河合, 佐藤, 横矢: "局所形状の類似度を用いたエネルギー最小化による三次元欠損修復", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 1, pp. 83-92, 2010.
- [16] 河合, Zakhor, 佐藤, 横矢: "形状とテクスチャの相関を考慮した類似度に基づくエネルギーの最小化による三次元欠損修復", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 講演論文集, pp. 1480-1485, 2011.
- [17] S. Salamanca, P. Merchán, E. Pérez, A. Adán, C. Carrada: "Filling Holes in 3D Meshes using Image Restoration Algorithms" Proc. Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, pp. 1003-1010, 2008.
- [18] S. Roth, M. Black: "A Framework for Learning Image Prior", IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 806-867, 2005.
- [19] 中尾, 河合, 佐藤, 横矢: "点群へのプリミティブ当てはめに基づく形状とテクスチャの欠損修復", 電子情報通信学会技術研究報告, 信学技報 パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU), Vol. 113, No. 431, pp. 165-170, 2014.
- [20] S. Ikehata, J. Cho, K. Aizawa: "Depth Map Inpainting and Super-Resolution Based on Internal Statistics of Geometry and Appearance", Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, pp. 938-942, 2013.
- [21] A. Criminisi, P. Pérez, K. Toyama: "Region Filling and Object Removal by Exemplar-based Image Inpainting", IEEE Trans. on Image Processing, Vol. 13, No. 9, pp. 1200-1212, 2004.

- [22] B. Wohlberg: "Inpainting by joint optimization of linear combinations of exemplars", IEEE Signal Processing Letters, Vol. 18, pp. 75-78, 2010.
- [23] D. Doria, R. Radke: "Filling Large Holes in LiDAR Data by Inpainting Depth Gradients", Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp. 65-72, 2012.
- [24] C. Barnes, E. Shechtman, Dan B. Goldman, A. Finkelstein: "The Generalized PatchMatch Correspondence Algorithm", Proc. European Conference on Computer Vision, pp. 29-43, 2010.