

# IR 反射強度画像を用いたガイドフィルタによる距離画像の高品質化

長谷川昂宏† 富澤凌二† 山内悠嗣† 山下隆義† 藤吉弘亘†

†中部大学

E-mail: hf@cs.chubu.ac.jp

## Abstract

本稿では、ガイドフィルタによる距離画像の高品質化において、IR 反射強度画像をガイド画像に導入することを提案する。ガイドフィルタは、距離画像に付与されたノイズをガイド画像を用いることで高速に除去することができる。しかし、ガイド画像に RGB 画像を用いると、距離画像には存在しないテクスチャ情報(物体の模様、影など)により距離画像が劣化するという問題がある。本研究では、テクスチャ情報が無く距離画像との相関が高い IR 反射強度画像をガイド画像に導入し、距離画像の高品質化を目的とする。IR 反射強度画像を用いることで、材質の異なる物体間のエッジ情報を保持しつつ、物体表面のテクスチャの影響を受けにくいフィルタリングが可能となる。評価実験により、IR 反射強度画像を用いることで、RGB 画像をガイドとした結果より高いデノイズ効果であることを確認した。さらに、アップサンプリングの実験結果から、RGB 画像をガイドとした場合と同等以上の PSNR 値が得られることを確認した。

## 1 はじめに

距離情報を取得するセンサとして、Time-Of-Flight(TOF)[1]方式のカメラがコンピュータビジョン分野の研究で幅広く使われている。中でも Kinect カメラは、距離画像から人体の姿勢推定結果をゲームのジェスチャ入力として実利用化されている [2]。TOF カメラは、LED から投光される赤外光が物体に反射してカメラに到達するまでの時間を位相差から求めて物体までの距離を計測する。TOF カメラの距離画像は、赤外光の飛行時間が長くなるほどそのエネルギーが小さくなるため、外乱光の影響を受けやすくノイズが発生しやすいという問題がある。ノイズが発生した距離画像では、物体認識や物体検出の性能低下を招く原因となるため、ノイズ除去等の前処理を必要とする。また、一般に距離画像はカメラセンサのハード的な制約から低解像度であるため、幅広い用途のために高解像度化が期待されている。

距離画像のノイズ除去にはガウシアンフィルタ、バイラテラルフィルタ [3]、ガイドフィルタ [6] 等が用いられる。ガウシアンフィルタはノイズを低減する一方で、物体間の必要なエッジまで平滑化されてしまう。バイラテラルフィルタを拡張したジョイントバイラテラルフィルタ [4][5] は、ノイズの多い入力画像とノイズの少ない参照画像の 2 種類の画像を用いて、参照画像の画素値に基づいて決定したフィルタにより入力画像のノイズ除去を行う。ジョイントバイラテラルフィルタはエッジを保持した平滑化が可能である一方で、計算コストが高いため処理時間が遅いという問題がある。ガイドフィルタ [6] は、入力画像と同一シーンで撮影した画像を用いてノイズ除去を行うフィルタ手法である。ガイドフィルタではガイド画像のエッジ情報を用いるため距離画像のエッジを保持することができ、計算コストも低いため高速な処理が可能である。さらに、高解像度のガイド画像を用いることで、低解像度の入力画像を補間してアップサンプリングすることも可能である。しかし、ガイド画像に RGB 画像を用いると、距離画像には存在しないテクスチャ情報(物体の模様、影など)により距離画像が劣化するという問題がある。

そこで、本稿では Infrared(IR) 反射強度画像を用いたガイドフィルタによる距離画像の高品質化を提案する。提案手法では、不要なテクスチャ情報がなく距離画像と相関が高い IR 反射強度画像をガイド画像として用いることで、テクスチャ情報が影響しない高品質な距離画像を生成する。

## 2 ガイドフィルタ

本章では、ガイドフィルタの処理とガイドフィルタを用いたデノイズとアップサンプリングについて述べる。

### 2.1 ガイドフィルタの処理

ガイドフィルタは、対象となる距離画像と同一シーンで撮影したガイド画像を用いて距離画像をフィルタリングすることで、エッジを保持したノイズ除去を行う手法である。ガイドフィルタの出力画像は、ガイド画像の線形変換で表されるという考えに基づいている。ガイドフィルタの処理の流れを図 1 に示

す。局所領域  $\omega_k$  において、線形変換に用いる係数  $(a_k, b_k)$  は次式のコスト関数  $E$  を最小化するように最適化される。

$$E(a_k, b_k) = \frac{1}{|\omega_k|} \sum_i ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a^2) \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon$  は平滑化係数、 $\omega$  は局所領域、 $I_i$  はガイド画像の画素値を表し、 $p_i$  は入力画像の画素値を表す。求められた係数  $(a_k, b_k)$  を用いて式 (2) の線形変換により出力画像の画素  $q_i$  を推定する。

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k:i \in \omega_k} a_k I_i + b_k \quad (2)$$

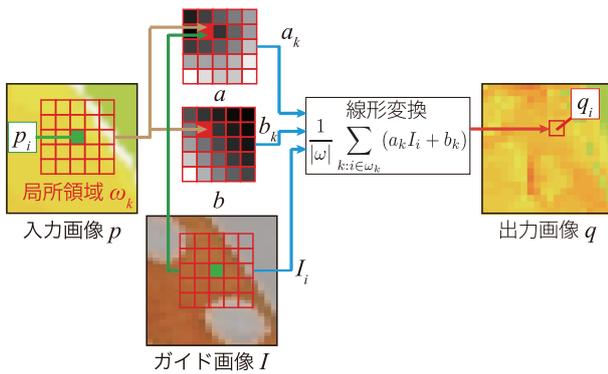


図 1 ガイデットフィルタの処理

## 2.2 デノイジング

ガイデットフィルタは、バイラテラルフィルタと同様にエッジを保持したノイズ除去が可能である。バイラテラルフィルタでは入力画像のみからの情報を用いてノイズ除去を行う。一方、ガイデットフィルタはノイズのないガイド画像の情報を加えることで、より効果的なノイズ除去を可能とする。図 2 にノイズを含む距離画像を入力した際のデノイジング例を示す。

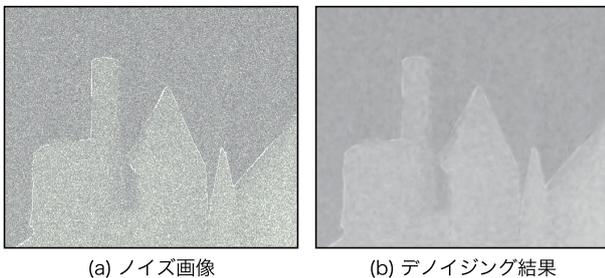


図 2 ガイデットフィルタによるデノイジング

## 2.3 アップサンプリング

ガイデットフィルタは、入力画像よりも解像度が高い画像をガイドとして用いることでアップサンプリングが可能となる。低解像度の入力画像を拡大して得られたスパースな入力画像に対して、ガイド画像から全

画素の係数  $(a_k, b_k)$  を算出し、入力画像の信号成分を有さない画素に対して、式 (2) より画素値を算出する。これにより、低解像度な画像から補間によるアップサンプリングが可能となる。図 3 に、 $320 \times 240$  画素の距離画像をガイデットフィルタにより、 $640 \times 480$  画素にアップサンプリングした例を示す。

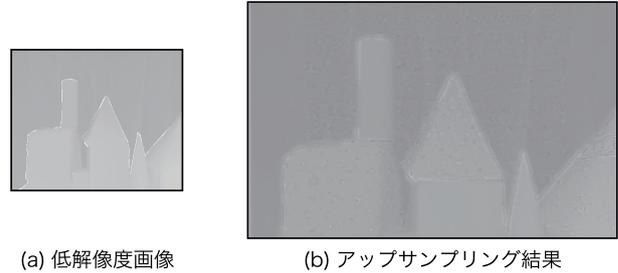


図 3 ガイデットフィルタによるアップサンプリング

## 2.4 ガイデットフィルタの問題点

ガイデットフィルタは、エッジを保持したフィルタ処理が可能であるが、RGB 画像をガイド画像とした際、図 4 に示すように距離画像にはないテクスチャによる影響を受けるといった問題がある。これは、距離画像に本来存在しないテクスチャ情報を用いてフィルタリングするからである。

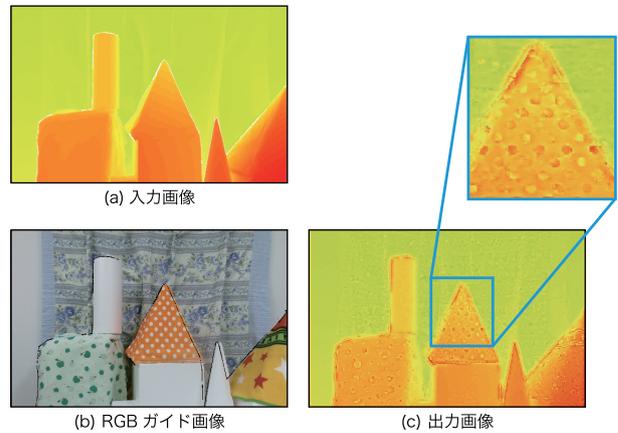


図 4 RGB ガイド画像を用いたガイデットフィルタの処理結果

## 3 IR 反射強度画像を用いたガイデットフィルタ

本研究では、IR 反射強度画像をガイドとして用いることで、不要なテクスチャ情報の影響による距離画像の劣化を防ぐ。本章では、まず赤外光の特性について調査し、提案手法である IR 反射強度画像の導入について述べる。

### 3.1 赤外光の特性

IR 反射強度は、対象物までの距離、反射面の向き、材質によって変化する。本節では、IR 反射強度の特性について調査する。

#### 3.1.1 距離変化の特性

IR 反射強度画像の画素値は赤外光の反射値であるため、カメラから対象物体までの距離により変化する。図5に距離変化に対するIR 反射強度値の変化を示す。図5から、IR 反射強度値は2mを超えると小さくなるため対象物体を画像上で判別できなくなる。これをガイド画像として用いると、カメラから遠方の物体を捉えた画素はフィルタリングの効果が得られないことになる。

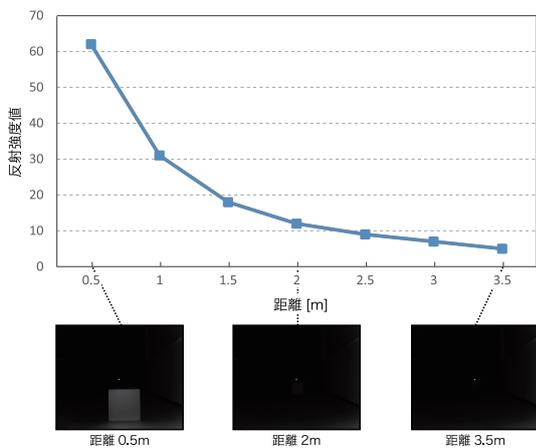


図5 距離と反射強度値の関係

#### 3.1.2 反射面の向きの特性

対象物体の反射面の向きが変化すると、光の反射量も大きく変化する。図6に同一距離に配置した対象物体の反射面の角度によるIR 反射強度値の変化を示す。図6から、反射面の向きの角度が大きくなるほどIR 反射強度値が減衰していることがわかる。これをガイド画像として用いると、反射面の角度が大きい画素はフィルタリングの効果が得られないことになる。

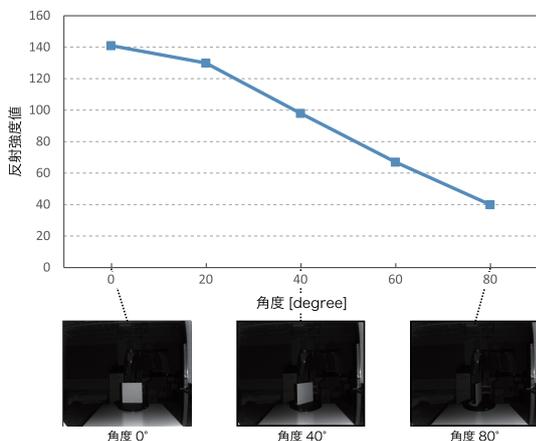


図6 反射面の角度と反射強度値の関係

#### 3.1.3 材質の特性

光の反射は、物体の材質が持つ反射特性により変化する。図7に同一距離に反射面の向きが0°となるように配置した材質の異なるIR 反射強度値を示す。

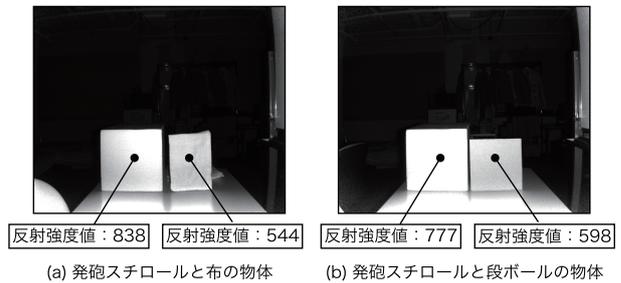


図7 IR 反射強度画像の材質による変化

図7から、物体の材質によってIR 反射強度値が変化していることがわかる。しかし、材質の推定は一般に困難な問題であるため、本研究では材質の変化については考慮しないこととする。

### 3.2 IR 反射強度画像の利用

IR 反射強度画像を用いてガイドフィルタを施すことで、距離画像を高品質化する。IR 反射強度画像は、RGB 画像に含まれる模様テクスチャがなく、距離画像との相関が高いため、ガイドフィルタのガイド画像に適していると考えられる。しかし、IR 反射強度画像は3.1に示す特性によりRAW データをそのままガイド画像として扱うことができない。そこで、IR 反射強度画像に特性を考慮した正規化を施す。光源からの光  $L$  の物体表面での照度  $E$  は、図8に示すように物体との距離  $d$  と光の角度  $\theta$  により減衰することが知られている。

$$E = \frac{L}{(2 * d)^2} \cos \theta \quad (3)$$

本研究では、距離と反射面の角度を用いてIR 反射強度画像を正規化する。

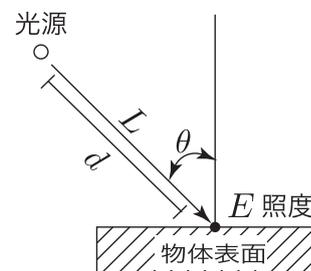


図8 物体との距離と光の角度による光の減衰

### 3.2.1 距離による正規化

TOF カメラの赤外光は式 (3) に示すように距離が遠くなるほど光が減衰するため、IR 反射強度値が小さくなる。そこで、距離データを用いて IR 反射強度画像  $I$  を式 (4) により正規化する。

$$G(i, j) = I(i, j) * (2 * d(i, j))^2 \quad (4)$$

$d(i, j)$  は座標  $(i, j)$  の距離値であり、 $G$  は正規化後の IR 反射強度画像である。光の減衰量は距離の二乗に反比例するため、式 (4) を用いることで距離によって減衰した IR 反射強度値を復元することができる。図 9 に式 (4) を用いて正規化した IR 反射強度画像例を示す。

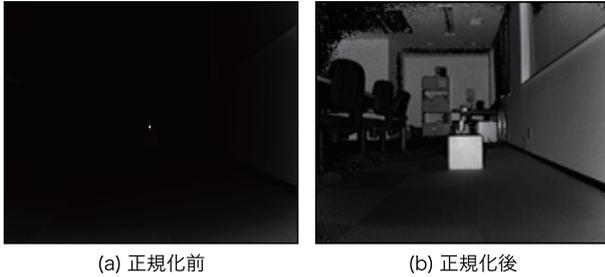


図 9 距離による正規化

### 3.2.2 距離と反射面の向きによる正規化

IR 反射強度画像は、物体の反射面の向きにより値が変化する。そこで、距離画像から算出した反射面の向きを用いて、IR 反射強度画像を正規化する。式 (3) より、座標  $(i, j)$  の角度における反射面の向きによる正規化は式 (5) のようになる。

このように正規化した IR 反射強度画像をガイドとしたガイデットフィルタを用いる。

$$G(i, j) = \frac{I(i, j) * (2 * d(i, j))^2}{\cos \theta_x * \cos \theta_y} \quad (5)$$

$$\theta_x(i, j) = \tan^{-1} \frac{d(i+1, j) - d(i-1, j)}{(i+1) - (i-1)} \quad (6)$$

$$\theta_y(i, j) = \tan^{-1} \frac{d(i, j+1) - d(i, j-1)}{(j+1) - (j-1)} \quad (7)$$

$\theta_x, \theta_y$  は IR 反射強度画像の近傍画素から推定した  $x$  方向と  $y$  方向における反射面の角度である。式 (5) によりカメラから物体までの距離  $d(i, j)$  と反射面の向き  $\theta_x, \theta_y$  を用いて正規化を同時に行う。図 10 に距離と反射面の向きを併用して正規化した IR 反射強度画像例を示す。反射面の向きによる正規化を行うことで、物体表面の角度による IR 反射強度の減衰を抑えることができる。

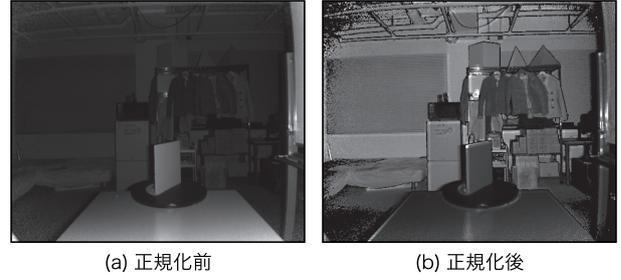


図 10 距離と反射面の向きによる正規化

## 4 評価実験

IR 反射強度画像を用いたガイデットフィルタの有効性を示すために評価実験を行う。評価実験では、デノイジングとアップサンプリングを対象とする。

### 4.1 実験概要

本実験では、従来法である RGB 画像をガイドとしたガイデットフィルタ (RGB ガイド) と提案手法 (IR ガイド) を比較する。評価には次式により求められる PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) を用いる。

$$PSNR = 20 \log_{10} \left( \frac{MAX}{\sqrt{MSE}} \right) [dB] \quad (8)$$

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (X(i, j) - X'(i, j))^2 \quad (9)$$

$MAX$  は真値となる画像 ( $m \times n$  画素) が取り得る最大値であり、 $MSE$  は元画像  $X$  とフィルタリング画像  $X'$  の平均二乗誤差 (Mean Square Error) である。真値には距離画像に  $5 \times 5$  のメディアンフィルタを施したものをを用いる。実験に使用する画像は、図 11 に示すように構造とテクスチャを変化させた画像を 178 枚使用する。画像サイズは  $512 \times 424$  画素である。デノイジングの実験では、距離画像にガウシアンノイズを付加させてノイズ除去の効果を確認する。アップサンプリングの実験では、まず距離画像の画素を間引くことで  $1/4$  にダウンサンプリングする。これを入力としてアップサンプリングした結果を評価する。

### 4.2 デノイジング効果の評価

表 1 にデノイジングにおける各手法の PSNR を示す。表 1 より、正規化した IR 反射強度画像の PSNR 値が RGB ガイドやメディアンフィルタよりも高いことが確認できる。距離と反射面の向きを併用して正規化した IR 反射強度画像は、距離のみで正規化した IR 反射強度画像よりも PSNR 値がやや低下している。これは、距離画像に付加されたノイズにより反射面の角度である  $\theta_x, \theta_y$  の推定が不安定になるためと考えられる。図 12 にノイズを付加した距離画像のガイデットフィルタによるノイズ除去例を示す。図 12 より、IR ガイドは RGB



図 11 評価用データセット

表 1 デノイジングにおける各手法の PSNR [dB]

テクスチャ	構造変化	メディアンフィルタ	ガイド画像			
			RGB 画像	IR 反射強度画像		
				正規化なし	距離	距離+向き
無	少	30.85	32.76	23.43	34.92	34.86
有	少	30.57	32.51	23.37	34.91	34.78
無	多	30.29	32.22	23.26	34.27	34.19
有	多	30.14	31.96	23.19	34.23	34.17

ガイドと比較して物体表面のテクスチャの影響を抑えつつノイズを除去できていることが確認できる。

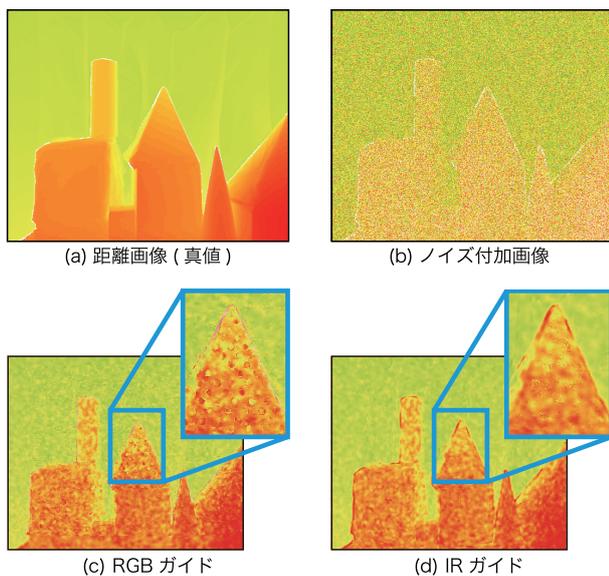


図 12 ガイデットフィルタによるノイズ除去例

### 4.3 アップサンプリング効果の評価

表 2 にアップサンプリングにおける各手法の PSNR を示す。デノイジングと同様に、従来用いられている RGB 画像よりも正規化した IR 反射強度画像の方が高い PSNR 値であることがわかる。また、距離と反射面の向きを併用して正規化した IR 反射強度画像は、距離のみで正規化した IR 反射強度画像と同等以上の PSNR 値である。これは、ノイズの影響が少ない入力画像の場合、物体反射面の角度  $\theta_x, \theta_y$  の推定が安定したため、反射面の向きの正規化を加えることで PSNR が向上したと考えられる。図 13 に、低解像度の距離画像とガイドデットフィルタによるアップサンプリング例を示す。図 13 から、1/4 のサイズの画像を元の画像サイズに復元できていることがわかる。また、RGB 画像をガイドに用いる場合、アップサンプリングした画像に物体表面のテクスチャが残っているが、IR 反射強度画像ではテクスチャの影響をほとんど受けないことがわかる。

表2 アップサンプリングにおける各手法の PSNR [dB]

テクスチャ	構造変化	ガイド画像			
		RGB 画像	IR 反射強度画像		
			正規化なし	距離	距離+向き
無	少	19.76	8.43	20.64	20.67
有	少	19.62	8.37	20.60	20.62
無	多	19.48	8.26	20.18	20.23
有	多	19.27	8.19	20.18	20.16

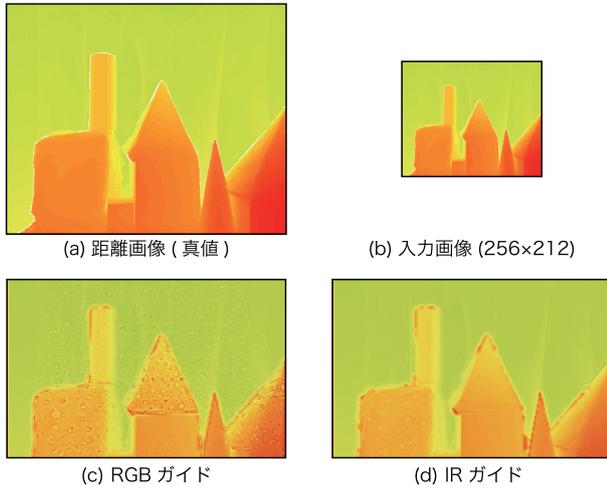


図13 ガイデットフィルタによるアップサンプリング例

## 5 おわりに

本稿では、ガイデットフィルタに IR 反射強度画像を導入することで距離画像の高品質化を実現した。IR 反射強度画像を物体の距離により正規化を行うことで、従来の RGB 画像をガイドとしたガイデットフィルタよりも高いデノイズング効果であることを確認した。また、ノイズの少ない距離画像をアップサンプリングした場合、距離と反射面の向きにより正規化した IR 反射強度画像をガイドとして用いることで、より高品質なアップサンプリングが可能であることを確認した。今後は RGB 画像と IR 反射強度画像を組み合わせることで、それぞれの画像の利点を活かした高品質化を検討する。

## 参考文献

- [1] R.Lange, and P. Seitz, “Solid-State Time-of-Flight Range Camera”, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 37, No.3, pp. 390-397, 2001.
- [2] J. Shotton, A. Fitzgibbon, M. Cook, T. Sharp, M. Finocchio, R. Moore, A. Kipman and A. Blake, “Real-Time Human Pose Recognition in Parts from Single Depth Images”, Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 1297-1304, 2011.

- [3] C. Tomasi, “Bilateral Filtering for Gray and Color Images”, IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 839-846, 1998.
- [4] J. Petschnigg, R. Szeliski, M. Agrawala, M. F. Cohen, H.Hoppe and K. Toyama, “Digital photography with flash and no-flash image pairs”, ACM Transactions on Graphics, vol. 23, No.3, pp. 664-672, 2004.
- [5] M. F. Cohen, M. T. Uyttendaele, D. Lischinski and J. Kopf, “Joint bilateral upsampling”, ACM Transactions on Graphics, vol. 26, No.96, 2007.
- [6] H. Kaiming, S. Jian and T. Xiaoou, “Guided Image Filtering”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.35, No.6, pp. 1397-1409, 2013.