

多視点の画像と形状情報による高画質な自由視点画像生成

土田 純[†] 陳 凡[†] 井澤 純子[†] 小谷 一孔[†]

[†]北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

〒923-1292 石川県能美市旭台 1-1

E-mail: [†]{i.tsuchida, chen-fan, jiwamoto, ikko}@jaist.ac.jp

あらまし 自由視点画像生成手法にModel Based RenderingとImage Based Renderingがある。本稿ではこれらの長所を組み合わせ、オクルージョンが軽減された高画質な自由視点画像生成手法を検討する。多視点の高精度、高分解能な3次元形状情報があれば、高画質な自由視点画像を生成できる。本稿では対象シーンの3次元形状情報取得にレーザーレンジファインダ（光切断方式）を用いる。このとき取得される3次元形状情報は計測方式の特性等によりレンジデータが欠落する。カメラパラメータを推定し、多視点の3次元形状情報統合と多視点画像を用いた奥行推定を行い、レンジデータ欠落を軽減する。最後に、オクルージョンが軽減された高画質な自由視点画像を生成し本手法の有効性を示す。

キーワード 自由視点画像, 多視点画像, 奥行推定, 3次元形状, 光切断, レンジデータ, オクルージョン

1. はじめに

任意の視点、方向から見た画像を生成する自由視点画像生成手法は画像情報およびシーンの3次元形状情報を用いる Model Based Rendering(MBR)[1]-[3]と画像情報のみを用いる Image Based Rendering(IBR)[4]-[9]に大別できる。

MBRは、多視点画像から3次元形状（モデル）を推定し、これにテクスチャマッピングを行い自由視点画像を生成する。MBRはIBRに比べて生成画像の解像度が高く、高画質であるが、例えば、視体積交差法[10]では多視点のシルエット画像を用いてオブジェクトの3次元形状を推定するため、3次元形状情報はシルエットのオブジェクトに限られ、自由視点画像中にオブジェクトの欠落やオクルージョンが生じる。

IBRは2次元カメラアレイ等を用いて多視点画像を取得し、任意の視点に対応した光線（画素）を多視点画像から集めてきて自由視点画像を生成する。カメラ間を通過する光線を補間し画像を生成しているためオクルージョンを生じにくい。補間により画像の高周波成分が損なわれ、画像解像度が低下する。

MBRの自由視点画像がオブジェクトに限定される問題は広範囲のオブジェクトをカバーする複数の3次元形状情報の統合により軽減できる。MBRにおいて高精度、高分解能な3次元形状情報を用いれば、高画質な自由視点画像が生成できる。但し、全てのオブジェクトをカバーするのは困難であり、欠落部分をIBRによって補うことにより高画質かつ欠落、オクルージョンが軽減された自由視点画像を生成できる。

本稿ではオブジェクトを限定しない高画質な自由視点画像生成手法を与える。本手法では複数のレーザーレン

ジファインダによりオブジェクトを特定せず3次元形状を計測し、これら複数の3次元形状情報を統合する。加えてオクルージョンやオブジェクト表面でのレーザー反射特性によるレンジデータの欠落を多視点画像により補完する。本手法はMBRとIBRの長所を活かしたハイブリッドな手法と見なせる。

2. 3次元形状情報の取得と補完

MBRにおいてオクルージョンを軽減した高画質な自由視点画像を生成するため下記の3つが必要となる。

- (1) 画像
- (2) 複数の3次元形状情報
- (3) 高精度、高分解能な3次元形状情報

本章ではこれらの取得方法について述べる。

2.1 3次元形状情報と画像の取得

本研究では3次元形状情報をレーザーレンジファインダにより取得する。レーザーレンジファインダは光切断法の原理を用いたものと、光飛行時間測定法（TOF）の原理を用いたものがある。

光切断法の長所は、

- (1) 高分解能な3次元形状情報を取得可能
- (2) 画像とレンジデータを同時に取得可能
- (3) 3次元空間の点座標と2次元画像平面の点（画素）座標の対応関係が既知

TOFの長所は、

- (1) 広域の3次元形状情報を取得可能
- (2) 環境光に強い

本手法では複数の3次元形状情報と画像を必要とするため、光切断方式のレーザーレンジファインダ Vivid910 (コニカミノルタ社製) を用いる (図1)。Vivid910はカメラ部とガルバノミラー部に分かれている。ガルバノミラー部からレーザー光を対象シーンに投光し、これを基線長離れたカメラ部で受光し三角測量の原理でレンジを計測する。こうして画像と高精度、高分解能な3次元形状情報を取得する。

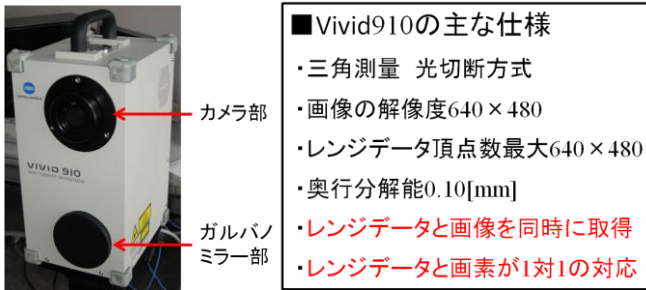


図1: Vivid910 と主な仕様

2.2 レンジデータの欠落と補完

レーザーレンジファインダにより対象シーンを計測する時、以下の原因によりレンジデータの欠落が生じる。

- (1) 物体の遮蔽等による未計測領域のデータ欠落
手前にある物体がレーザー光を遮蔽することでレンジデータの欠落が生じる。また、機器の計測範囲外のデータは得られない。多視点でレンジデータを取得し、これらを統合することでレンジデータの欠落を軽減する。
- (2) レーザー受光部カメラの光学特性による欠落
投光したレーザー光をカメラ部で受光する時、カメラの光学特性により被写界深度外はレーザー光がぼけるためにデータの欠落が生じる (図2)。これらのデータ欠落は、同時に取得された多視点画像を用いた奥行推定により補完する。

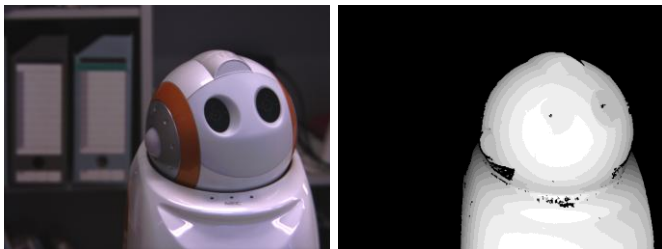


図2: カメラの特性によるデータの欠落 (左: 画像, 右: 可視化したレンジデータ)

- (3) 対象物の表面特性による欠落
投光したレーザー光をオブジェクトが吸収、透過屈折、反射するとレーザー光が反射してこず、データの欠落を生じる。例えば図3に示すようにレ

ーザー光が透過屈折するグラスやボトル、鏡面反射特性が強い金属でデータの欠落がみられる。これらのデータ欠落は、多視点レンジデータの統合や多視点画像を用いた奥行推定を行っても補完することは困難である。



図3: オブジェクト表面の光学特性によるデータの欠落 (左: 画像, 右: 可視化したレンジデータ)

レンジデータを統合する代表的な手法として ICP アルゴリズム等[11][12]があるが、本研究では光切断法で距離計測するため、3次元空間の点座標と画像平面の点座標(画素)は対応関係が既知であり、容易にカメラのパラメータを推定することができるため、ICP アルゴリズム等は用いない。六自由度のカメラ外部パラメータを求めることにより、計測した多視点間の相対的な3次元空間上の位置関係が定数倍の不定性なく決定できる。多視点の相対的な位置関係が分かれば、各カメラ座標系で計測したレンジデータを同一の世界座標系に統合することができる。

3. 多視点の画像と形状情報による自由視点画像生成

本章ではオクルージョンを軽減した高画質な自由視点画像生成をするため、多視点の画像と形状情報を用いた自由視点画像生成手法を与える。図4に本稿の自由視点画像生成手法の概要を示す。

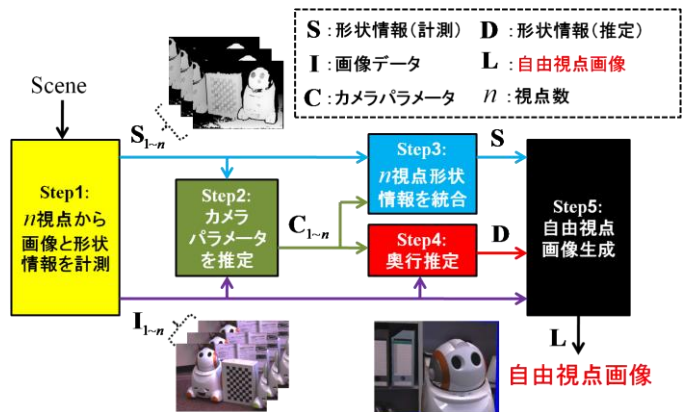


図4: 多視点の画像と形状情報を用いた自由視点画像生成手法

対象シーンの自由視点画像を生成する図 4 中の Step1 から Step5 までの処理について以下に要約する。

Step1: 対象シーンの画像と形状情報を n 個の視点から計測する。

Step2: カメラ部の内部パラメータを推定する。 n 視点間のカメラ外部パラメータを推定する。

Step3: 未計測領域のレンジデータ欠落を補完するため、 n 視点分のレンジデータを 1 つに統合する。

Step4: カメラの光学特性によるレンジデータ欠落に対して、多視点画像を用いて奥行推定を行い補完する。

Step5: 形状情報と画像を入力とし、自由視点画像を生成する。

各 Step の詳細を次節以降に示す。

3.1 多視点の画像と形状情報計測

Step1 では、光切断方式のレーザーレンジファインダを用い、対象シーンの多視点画像と多視点レンジデータを計測し、画像と 3 次元形状情報を n 個の視点から与える。

3.2 カメラパラメータ推定

Step2 では、レンジファインダカメラ部のカメラパラメータを推定する。カメラの外部パラメータは Step3 で 3 次元形状情報の統合に用いる。カメラの内部パラメータは Step4 で奥行推定に用いる。本稿では 3 次元形状情報の取得に光切断法を用いるため、3 次元空間上の点と 2 次元画像平面上の画素との対応関係が既知である。この関係からカメラパラメータを推定する。

式(1)と(2)にカメラの内部パラメータ行列 \mathbf{A} と外部パラメータ行列 \mathbf{M} を示す。外部パラメータ行列の \mathbf{R} は回転行列、 \mathbf{T} は並進ベクトルである。式(3), (4), (5), (6), (7)によりカメラの内部パラメータを推定する。最低 4 組の 3 次元対応点と、式(8)によりカメラの外部パラメータを推定する。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\lambda \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A} \mathbf{P}_f \tilde{\mathbf{X}} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda m \\ \lambda n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda m \\ \lambda n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_u x + s y + u_0 z \\ a_v y + v_0 z \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_u \\ s \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 z_1 \\ m_2 z_2 \\ m_3 z_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 & z_1 \\ y_2 & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_v \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 z_1 \\ n_2 z_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{11} \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{12} \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{13} \\ x'_4 & y'_4 & z'_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{22} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x'_3 & y'_3 & z'_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x'_4 & y'_4 & z'_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1 & r_{31} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1 & r_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_3 & y'_3 & z'_3 & 1 & r_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_4 & y'_4 & z'_4 & 1 & t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (8)$$

今回は対応点は、Canny オペレーターを用いてエッジ抽出した画像 (図 5) から手動で 2 次元対応点を求め、3 次元空間上の点と 2 次元画像平面上の画素との対応関係が既知である事を利用し、レンジデータの 3 次元対応点を決定した。今後、対応点決定は自動化したい。

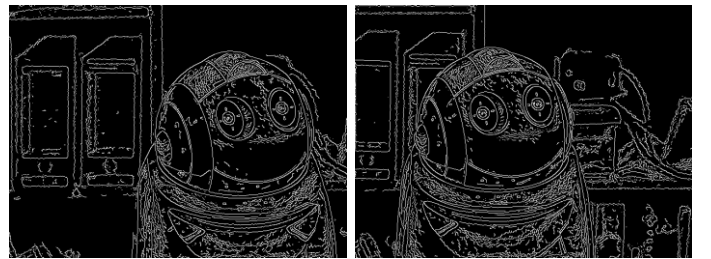


図 5: Canny オペレーターによるエッジ抽出画像

3.3 多視点形状情報（レンジデータ）の統合

Step3 では、多視点で計測したレンジデータを1つに統合し、未計測領域のレンジデータ欠落を補完する。多視点で計測したレンジデータは各々異なるカメラ座標系となる。このうちの1つを世界座標系に設定する。各カメラ座標系のレンジデータを世界座標系に統合する。

多視点形状情報（レンジデータ）統合のアルゴリズムを以下に示す。

- (1) n 視点形状情報のうち、任意の1つを基準となる世界座標系として設定する。
- (2) 残りの $n-1$ 視点形状情報は、 $n-1$ 個の異なったカメラ座標系で表されている。世界座標系へ変換するために $n-1$ 個のカメラ外部パラメータを求め、 n 視点の相対的な位置関係を決定する。
- (3) 回転行列と並進ベクトルを用いて各カメラ座標系の頂点群を世界座標系へ変換する。

式(9)と(10)に世界座標系の頂点、カメラ座標系の頂点を表す。式(11)を用いてカメラ座標系の頂点を世界座標系の頂点に変換し統合する。

$$\mathbf{v}_j^W = \begin{bmatrix} x_j^W \\ y_j^W \\ z_j^W \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_{nh}^C = \begin{bmatrix} x_{nh}^C \\ y_{nh}^C \\ z_{nh}^C \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_j^W = \mathbf{R}'_n \mathbf{v}_{nh}^C + \mathbf{T}'_n \quad (11)$$

\mathbf{R}' : カメラ座標系から世界座標系へ変換する3自由度回転行列

\mathbf{T}' : カメラ座標系から世界座標系へ変換する3自由度並進ベクトル

\mathbf{v}_{nh}^C : カメラ座標系の頂点

\mathbf{v}_j^W : 世界座標系の頂点

n : 視点数

h : カメラ座標系の頂点数

j : 世界座標系の頂点数

3.4 奥行推定

Step4 では、カメラの光学特性によるレンジデータの欠落部分を補完するため、多視点画像を用いて奥行推定を行う。

多視点画像を用いた奥行推定のアルゴリズムを以下に示す。

- (1) 図6に示すように画像の各点から対応点を決定する。カメラパラメータは既知である。カメラパラメータを用いて対応点の3次元空間上の座標を推定する。
- (2) 図7(a), (b)にある3次元空間中の3頂点 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ があれば平面（ポリゴン面）を定義できる。3頂点から平面の法線 \mathbf{N} を式(12)で推定する。
- (3) 3次元空間中の平面は法線 \mathbf{N} と式(13)で定義される。こうして、3次元空間における平面（ポリゴン面）を決定する。

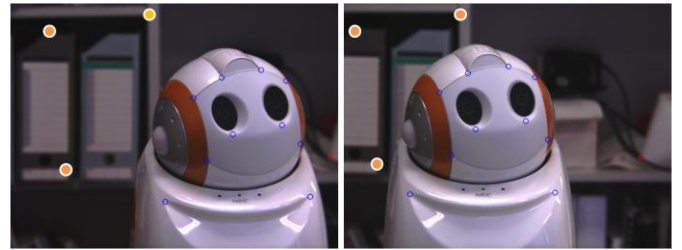
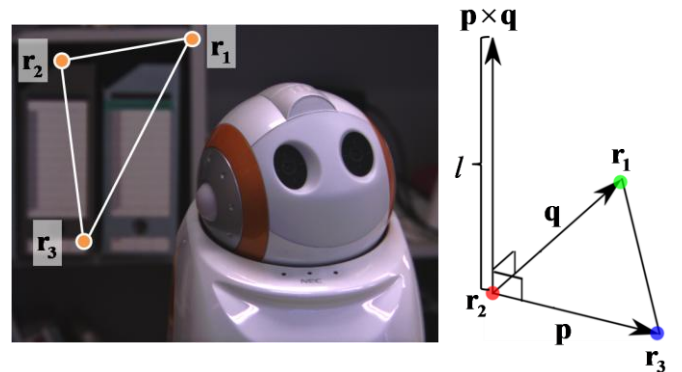


図6: 画像の対応点



(a) : 3頂点 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$

(b) : 3頂点と法線

図7: 奥行推定と平面定義

$$\mathbf{N} = \mathbf{p} \times \mathbf{q} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (13)$$

3.5 自由視点画像生成

本稿の自由視点画像生成システムを図8に示す。Step5では、計測、推定した形状情報を統合し、テクスチャマ

ッピングを行う。光源、マテリアル、法線、カメラ等のパラメータを設定し、自由視点画像を生成する。レンダリングは OpenGL を用いた。

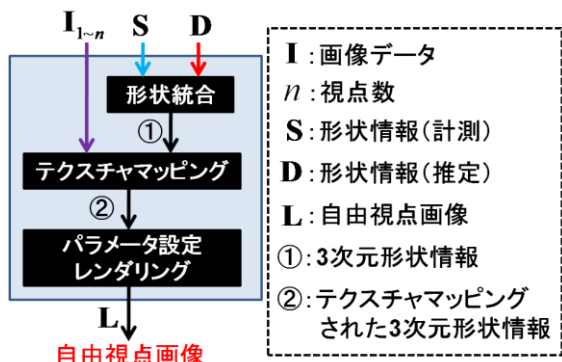


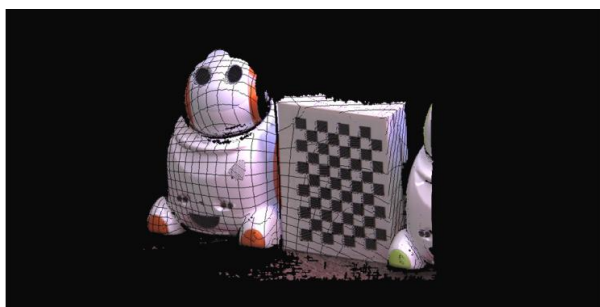
図 8: 自由視点画像生成

4. 形状統合・奥行推定・自由視点画像生成 実験結果

本章では本手法の各 Step での処理結果について示す。

4.1 3次元形状情報統合結果

未計測領域のレンジデータの欠落を軽減させる目的でカメラ座標系から世界座標系へ変換し統合した 3 次元形状を示す (図 9(a), (b), (c))。黒い領域はレンジデータが欠落している部分である。図 9 は可視化のためテクスチャマッピングを行い画像平面へ正投影した。図 9(a) は、カメラ座標系の 3 次元形状情報 (151004 頂点) であり、図 9(b) は、世界座標系の 3 次元情報 (190383 頂点) である。この世界座標系にカメラ座標系の 3 次元形状情報を統合する。図 9(c) は、カメラ座標系の形状情報を世界座標系に変換し統合した 3 次元形状情報 (341387 頂点) である。これを見ると世界座標系のオクルージョンが軽減している。形状情報が重複している部分は、自由視点画像生成時に Z バッファ法を用いて手前のものを選択している。これは、三角測量で取得したレンジデータは観察点に近いほど精度が高いためである。図 10 は、図 9(c) の 3 次元形状情報をカメラ内部パラメータ **A** と式(3)で画像平面へ射影した画像である。



(a) カメラ座標系の形状情報



(b) 世界座標系の形状情報



(c) 世界座標系において 2 視点の形状情報を統合

図 9: カメラ座標系と世界座標系の形状情報

統合結果(a), (b), (c)



図 10: 3次元形状情報を画像平面へ射影

4.2 奥行推定結果

カメラの光学特性によるレンジデータの欠落を補完するため、多視点画像を用いて奥行推定を行った。この処理結果が図 11 である。形状情報 (計測) と奥行推定した形状情報 (1 ポリゴンのみ) を統合したものと、比較のため形状情報 (計測) と奥行推定した背景全ての形状情報を統合したものである。オブジェクト上及び背景の画像が欠落している部分 (青い領域) が手法により補完されている。



図 11: 形状情報 (計測) と形状情報 (推定) の統合結果

4.3 自由視点画像生成結果

オクルージョンが軽減された高画質な自由視点画像を生成するのが目的である。12視点の自由視点画像生成結果が、図12(a)-(1)である。ロボットによって隠れていた背景の棚が、視点を移動させるとそれに応じて見える。オクルージョンが軽減されていることがわかる。

5. まとめ

本稿では、多視点の画像と形状情報を用い、オブジェクト表示の欠落とオクルージョンが軽減された高画質な自由視点画像生成手法を検討した。以下に本稿をまとめる。

(1) オクルージョンが軽減された自由視点画像生成

- ・オクルージョンの問題を改善するため、複数の3次元形状情報が必要である。
- ・複数の3次元形状情報は光切断方式のレーザーレンジファインダを用いて取得した。
- ・推定したカメラパラメータを用い多視点レンジデータを統合した。

こうして、オクルージョンが軽減された自由視点画像を生成した。

(2) 高画質な自由視点画像生成

- ・画質改善するために、高精度、高分解能な3次元形状情報が必要と考えた。
- ・高精度、高分解能な3次元形状情報は光切断方式のレーザーレンジファインダを用い取得した。

こうして、高画質な自由視点画像生成を行った。

(3) レンジデータの欠落と奥行推定

- ・対象シーンの3次元形状情報を光切断方式のレーザーレンジファインダを用い取得した。
- ・光切断方式のレーザーレンジファインダで計測を行うとレンジデータの欠落が起こる。
- ・多視点レンジデータを統合し、未計測領域のレンジデータの欠落を軽減した。
- ・多視点画像とカメラパラメータを用いて対応点の奥行推定を行った。
- ・奥行推定した3次元点群からポリゴン平面を定義し、光学特性によるレンジデータ欠落を補完した。

こうして、レンジデータ計測時の欠落部分を補完した。

上記(1)~(3)により、本研究の目的であるオクルージョンとオブジェクト欠落を軽減した高画質な自由視点画像生成手法を示した。

今後の課題を下記に挙げる。

- (1) 信頼度を定義しレンジデータ統合やカメラパラメータの推定を行い精度向上の検討を行う。
- (2) 対応点探索を自動化する。
- (3) 対象シーンに時間軸を追加し、自由視点映像生成の検討を行う。

文 献

- [1] 吉本廣雅, 山口辰久, 牧淳人, 松山隆司: “能動カメラ群を用いた三次元ビデオのセル分割追跡撮影方式”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J92, no.9, pp. 1579-1590, Sept. 2009
- [2] 矢口悟志, 木村誠, 斉藤英雄, 金出武雄: “未校正多視点カメラシステムを用いた任意視点画像生成”, 情報処理学会論文誌, vol. 42, no SIG_6(CVIM_2), pp. 9-21, June. 2001
- [3] 稲本美穂, 斉藤英雄: “多視点スポーツ映像からの自由視点映像合成と提示”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J88, no. 8, pp. 1693-1701, Aug. 2005
- [4] 藤井俊彰, 金子正秀, 原島博: “光線群による3次元空間情報の表現とその応用”, テレビジョン学術誌, vol. 50, no 9, pp. 1312-1318, Sept. 1996.
- [5] M. Levoy and P. Hanrahan: “Light Field Rendering,” In Proc. AMC Siggraph'96 pp.31-42, Aug. 1996.
- [6] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. F. Cohen: “The Lumigraph,” In Proc. AMC Siggraph'96 pp.43-54, Aug. 1996.
- [7] 呂 磊, 圓道 知博, 谷本 正幸, 藤井 俊彰: “光線空間処理によるFTVシーンの編集”, 映像情報メディア学会技術報告, [オーディオビジュアル複合情報処理] 2008(124), pp. 53-57, Dec. 2008.
- [8] Yuichi Taguchi, Takafumi Koike, Keita Takahashi, and Takashi Naemura: “TransCAIP: Live Transmission of Light Field from a Camera Array to an Integral Photography Display”, ACM SIGGRAPH ASIA 2008 Emerging Technologies, Dec. 2008.
- [9] Yuichi Taguchi, Takafumi Koike, Keita Takahashi, and Takashi Naemura: “TransCAIP: A Live 3D TV System Using a Camera Array and an Integral Photography Display with Interactive Control of Viewing Parameters” IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, vol. 15, no. 5, pp. 841-852, Sept./Oct. 2009.
- [10] ウ小軍, 和田俊和, 東海彰吾, 松山隆司: “平面間透視投影を用いた並列視体積交差法”, 情報処理学会論文誌, vol. 42, no SIG_6(CVIM_2), pp. 33-43, June. 2001
- [11] Szymon Rusinkiewicz, Marc Levoy: “Efficient Variants of the ICP Algorithm”, Proceedings of International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, pp.145-152, 2001.
- [12] 池内克史, 倉爪亮, 西野恒, 佐川立昌, 大石岳史, 高瀬裕: “The Great Buddha Project -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.1, pp.103-113, 2002年1月.

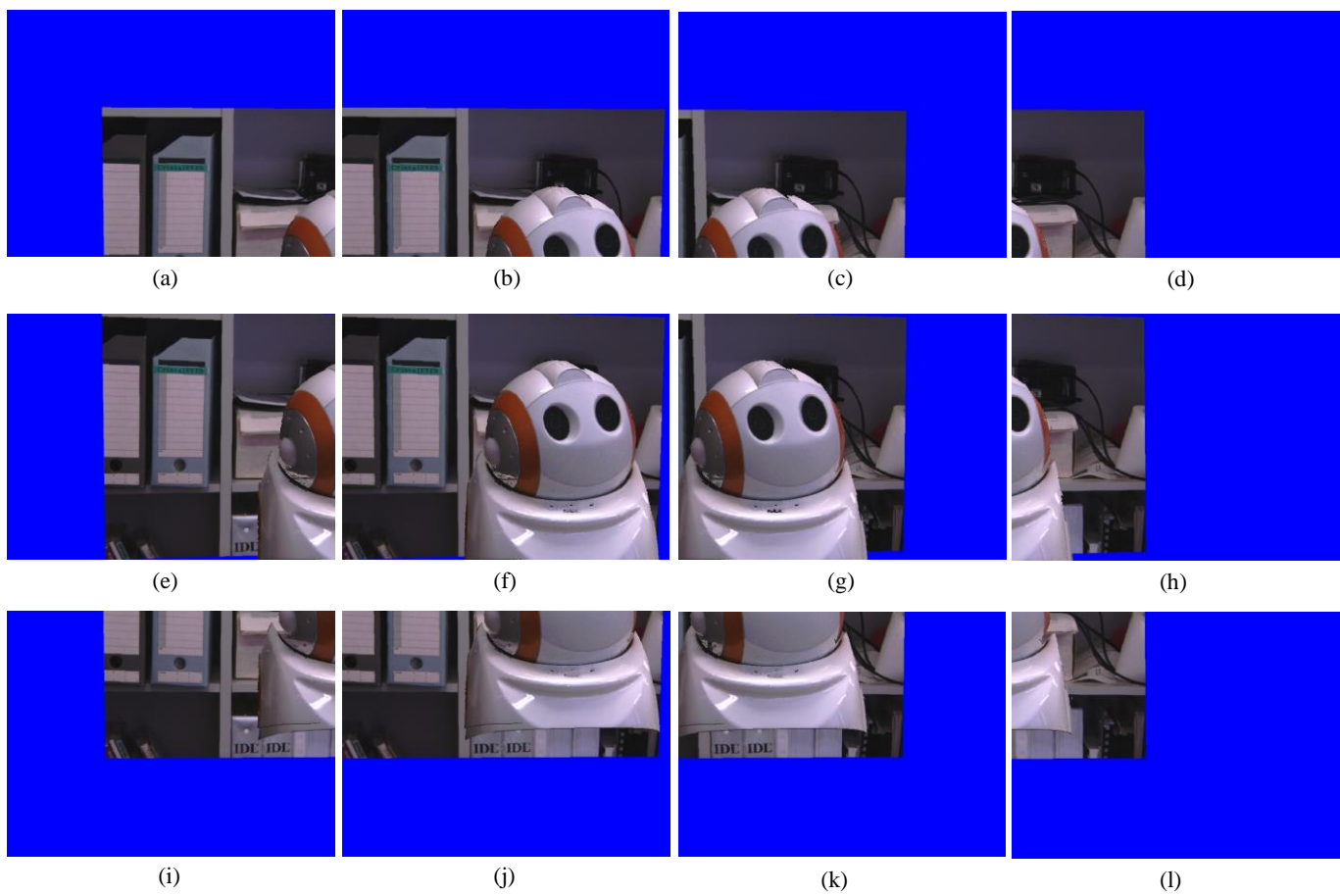


図 12: 本稿システムで生成した 12 視点の自由視点画像 (a)-(l)