九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 形状復元による実時間自由視点画像生成における画像品質の向上について

上田, 恵
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

鍋嶋, 累
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

有田, 大作
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

谷口, 倫一郎
九州大学システム情報科学研究院知能システム学部門

https://hdl.handle.net/2324/5968

出版情報：映像情報メディア学会誌. 61 (2), pp.237-240, 2007-02. 映像情報メディア学会
バージョン：
権利関係：

研究速報

# 形状復元による実時間自由視点画像生成における画像品質の向上について

Real-Time Free-viewpoint Video Generation Based on 3D Shape Reconstruction for High-fidelity Video Generation

上田 恵[†*], 鍋嶋 累[†], 正会員 有田大作[††**], 正会員 谷口倫一郎[††]

Megumu Ueda[†*], Rui Nabeshima[†], Daisaku Arita[††**] and Rin-ichiro Taniguchi[††]

**Abstract** We present a method that uses 3D shape reconstruction and texture mapping to improve the image quality of free-viewpoint video. Three-dimensional shape refinement is used to represent 3D object shapes more accurately without increasing the processing time or the required memory space. We describe how our video generation method uses 3D shape smoothing and voxel space deformation and show some experimental results.

**キーワード**：自由視点画像生成，多視点画像処理，実時間処理，3 次元形状復元，変形ボクセル空間

## 1. まえがき

金出らが “Virtualized Reality” のコンセプトを提案して以来 [1]，様々な自由視点画像に関する研究が行われてきた．自由視点画像生成のアプローチは大きく二つに分類することができる．一つは 3 次元形状を復元するアプローチであり，もう一つは 3 次元形状を復元しないアプローチである．3 次元形状を復元するアプローチは，単に自由な視点の画像を生成できるだけでなく，複合現実感の実現など，様々な応用に活用できる利点がある．

3 次元形状を復元するアプローチでは，多視点のカメラ画像から対象の 3 次元形状を復元し，復元した対象形状の色情報を獲得し，コンピュータグラフィックスの技術を用いて自由視点画像を生成する．従来より，3 次元形状を実時間で復元する手法は提案されているが，実時間で正確な色を付け，映像を生成することは難しかった [2)~5)]．

2006 年 8 月 7 日受付，2006 年 11 月 20 日再受付，2006 年 12 月 11 日採録

† 九州大学大学院システム情報科学府
（〒 819–0395 福岡市西区元岡 744, 092–802–3580）
†† 九州大学大学院システム情報科学研究院
（〒 819–0395 福岡市西区元岡 744, 092–802–3594）
* 現在，(株) リコー
** 現在，(財) 九州システム情報技術研究所
† Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
(744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, 819–0395, Japan)
†† Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
(744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, 819–0395, Japan)
* Currently, Ricoh Company
** Currently, Instutute of Systems & Information Technologies/Kyushu

我々は，文献 6) で高速な色情報獲得手法を提案し，PC クラスタを用いることにより，3 次元形状復元から色情報取得，自由視点画像生成までを実時間で処理可能なシステムを開発した．本稿では，この手法を発展させ，対象表面の平滑化および変形ボクセル空間を導入することにより，より品質の高い自由視点画像の生成を実時間で行う手法を提案する．

## 2. 自由視点画像生成の概要

本研究で用いた，自由視点画像生成アルゴリズムの概要は以下の通りである．

（1） カメラ画像の取得
（2） 背景差分による対象領域抽出
（3） 視体積交差法 [7)] による対象物体の 3 次元形状の復元（ボクセル表現の獲得と離散マーチングキューブ法 (DMC)[8)] によるパッチ表現への変換）
（4） カメラ画像からの色情報の取得
（5） 各カメラ画像から取得した色情報の統合
（6） 自由視点画像の表示

## 3. 3 次元形状の高精度化

自由視点画像の画像品質を決定する要素の一つとして，3 次元形状復元の精度が挙げられる．復元の精度が低いと，表示される対象物体形状が不正確になるだけでなく，対象表面への誤った色情報の付加によって対象物体色も不正確になってしまうからである．例えば**図 1** に示すように，二つのカメラ $C$ と $C'$ から可視である復元された対象表面 $v_1$ には画像上の点 $t$ および $t'$ の画素値を基に色付けされる．

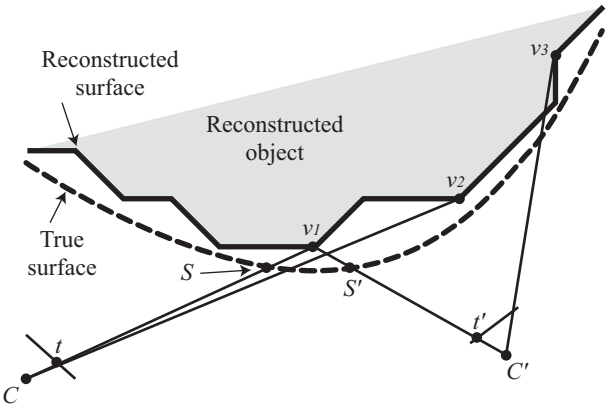



**図 1**　不正確な形状による色付け誤り
Coloring error caused by shape inaccuracy

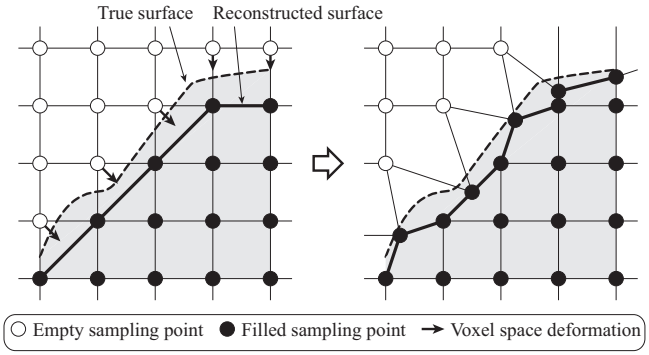



**図 2**　変形ボクセル空間の概要
Voxel space deformation

しかし，これらは実際には真の対象表面 $S$ と $S'$ の色であることから，$v$ にはこれらを混合した色が付けられてしまい，画像がぼけてしまうことになる．また，対象表面の凹凸によっては可視不可視判定（詳しくは文献 6) 参照）が不正確になってしまうという問題もある．例えば，対象表面 $v_2$ は可視と判定されカメラ $C$ による色が付けられてしまう．一方，対象表面 $v_3$ は不可視と判定されカメラ $C'$ による色が付けられなくなってしまう．本節では，前節のステップ 3 で復元する物体の 3 次元形状を少ない計算量で高精度化させる二つ手法について述べる．これらにより，自由視点画像の高品質化を図ることができる．

### 3.1　物体表面の平滑化

DMC による対象表面の三角パッチはその法線方向が離散的であるため，復元された対象表面は滑らかではない．このため，滑らかな対象表面を表現すると誤差が生じてしまうほか，可視不可視判定の誤りも発生しやすい．そこで，対象表面を平滑化することにより，色付け誤りが減少し，より高品質な自由視点画像が生成できると期待できる．

（1）　ラプラシアンスムージングによる平滑化

本研究では，実時間で平滑化を行う必要があるため，高速な手法であるラプラシアンスムージングによって三角パッチ頂点の平滑化を行う．ラプラシアンスムージングでは，平滑化後の頂点の位置は隣接する頂点の平均で求められ，

$$v_i^{new} = v_i^{old} + \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{v_j^{old} - v_i^{old}}{n}\right) \tag{1}$$

という式で表される．ここで，$v_i$ は平滑化される対象表面の頂点の 3 次元位置，$v_j$ は $v_i$ と三角パッチを共有する頂点の 3 次元位置であり，$n$ は $v_j$ の数である．平滑化を繰り返し適用するほど，形状はより滑らかになるが，特徴となる形状を失う可能性もある．本研究では，処理時間と平滑化効果の兼ね合いから，平滑化を 1 回だけ適用することとした．

（2）　3 次元空間と 2 次元カメラ画像平面との対応付け

本システムでは，対象表面への色付けを高速に行うために，3 次元空間上のボクセル（サンプリング点）とそれを 2 次元カメラ画像上に投影した点への対応関係を事前に求めて，ルックアップテーブル (LUT) に保持している．しかし，平滑化を行うと頂点位置が事前に定まらないので，LUT を事前に作成することがでない．その結果，2 次元カメラ画像上の投影位置ををオンラインで計算せねばならず，色付けに時間がかかってしまう．

しかし，3 次元空間と 2 次元カメラ画像との投影関係に弱透視投影を仮定すると，3 次元空間上の点と 2 次元カメラ画像上の点との間には線形な関係が成り立つので，平滑化後の 2 次元カメラ画像上への投影点についても，式 1 と同様の関係が成り立つことがわかる．すなわち，2 次元カメラ画像上への投影点は，平滑化の前後で以下のように表すことが出来る．

$$t_i^{new} = t_i^{old} + \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{t_j^{old} - t_i^{old}}{n}\right) \tag{2}$$

これは式 1 の $v$ が $t$ に変わるだけのものであり，$t$ は LUT に保存されている 2 次元カメラ画像上の座標値である．つまり，平滑化前の LUT を用いて，平滑化後の頂点の投影位置を高速に求めることができる．

### 3.2　変形ボクセル空間

本来，ボクセル空間解像度を上げれば視体積交差法の精度が向上し，対象形状もより正確に求めることができるが，$O(N^3)$ で計算コストが上昇してしまうため現実的でない．そこで，ボクセル空間を局所的に変形させることで，計算コストをあまり上昇させずに復元精度を向上させる手法を考案した．

**図 2** の左に示すように，DMC によって対象表面を生成すると，占有ボクセルの中心を結ぶように三角パッチが張られる．しかし，真の対象表面は占有ボクセルと空ボクセルの間にあるため，復元された対象表面は常に真の対象表面よりも内側になってしまう．そこで，ボクセル空間を適当に変形することにより，復元された対象表面をできるだけ真の対象表面に近づけることを考える．具体的には，復元した対象表面の外側でかつ，その対象表面の近傍に存在するサンプリング点を，図 2 の左における矢印のように，対象表面の方向に移動させるというものである．そして図

2 の右のように，局所的にサンプリング点が対象側に移動することにより，真の対象表面の外側だったサンプリング点が真の対象表面の内側になれば，復元される対象表面が真の対象表面に近くなるという簡単な原理に基づいている．このサンプリング点の移動は次の式で表される．

$$s_i^t = s_i^{ini} + \sum_{s_j \in Neighbor(s_i)} \lambda_{ij}^t (s_j^{ini} - s_i^{ini}) \qquad (3)$$

ここで，$s^t$ は時刻 $t$ におけるサンプリング点の座標であり，$s^{ini}$ は初期状態のサンプリング点の座標である．また，$s_i$ は非占有のサンプリング点である．$Neighbor(s_i)$ はサンプリング点 $s_i$ の 6 近傍に存在する占有のサンプリング点の集合である．$\lambda_{ij}^t$ はサンプリング点の現在位置に応じて動的に変化し，サンプリング点毎に値が異なっても良いが，

- 隣り合うサンプリング点が入れ替わってはならない
- 隣り合うサンプリング点同士が離れすぎてはならない

という制約を満たす必要がある．後述する実験では，

$$\lambda_{ij}^t = \begin{cases} \lambda_{ij}^{t-1} + a & \lambda_{ij}^{t-1} + \lambda_{ji}^{t-1} + a < 1 \\ \lambda_{ij}^{t-1} & \text{その他} \end{cases} \qquad (4)$$

というように時刻で変化する値として定義している（$a$ は 1 未満の正数である）．つまり，サンプリング点は各軸方向に単位時間ごとにサンプリング間隔の $a$ 倍だけ移動し，サンプリング点が占有になるか隣のサンプリング点と入れ替わってしまう直前になると停止する．ただし，$Neighbor(s_i)$ が空の場合はすべての $\lambda_{ij}^t$ を 0 とする（リセット条件）．また，$s_j$ と，$s_i$ をはさんで $s_j$ の反対側のサンプリング点 $s_{j'}$ が共に占有の場合は，$\lambda_{ij}^t$ と $\lambda_{ij'}^t$ は共に 0 とする．

ボクセル空間の変形も，先の平滑化と同様にサンプリング点がデータに依存して移動してしまうため，色付けのための 3 次元空間と 2 次元カメラ画像との対応付け LUT を事前に作成することができなくなる．しかし，平滑化と同様に，弱透視投影の仮定を置けば，式 3 と同様，変形後のサンプリング点の投影位置を変形前の投影位置（LUT が保持している位置）の重み付き平均で表すことができるので，その計算を高速に実現することができる．

## 4. 実　験

本手法を用いてオンラインで自由視点画像を生成し，その生成結果や処理時間に対する考察を行った．紙面の都合上詳細は省略するが，実験では，9 台の IEEE1394 カメラから入力された画像を 21 台構成の PC クラスタ（Pentium4 3GHz, 1GB メモリー）[9)10)] で処理を行った．なお，PC 間はスイッチ型ギガビット LAN である Myrinet によって相互に結合されている．カメラ画像の解像度は $640 \times 480$ で，空間解像度は $128 \times 128 \times 128$，ボクセルの一辺を 2cm として実験を行った．また変形ボクセル空間における定数 $a$ の値は 0.25 とした．つまり，各サンプリング点は各軸方向に 5mm ずつ 3 回まで移動することができることになる．

**図 3** に入力したカメラ画像の例を示す．**図 4** に平滑化の効果を示す．対象表面が滑らかになりより真の人体形状に近くなったため，(1) 輪郭形状および輪郭付近の色が正確になり，(2) 可視不可視判定が正確になり表面上の黒い点（どのカメラからも不可視と判定された三角パッチ）が少なくなり，(3) 服の縞模様の輪郭がはっきりしたことにより画像がより自然になっていることがわかる．さらに，自由視点画像を動画像として表示した場合，対象表面が滑らかでないと連続するフレーム間での色の変動が大きく，ちらつきの原因となっていたが，平滑化することによりこの問題が改善された．

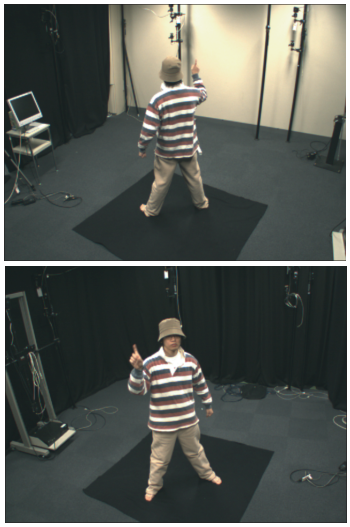


**図 3**　入力したカメラ画像
Input images

次に，**図 5** に変形ボクセル空間による効果を示す．人差し指のような細い対象形状がより正確に復元されていることがわかる．

平滑化，変形ボクセル空間の処理はそれぞれ 1 台の PC で実行され，およそ，15ms，60ms 程度要した．自由視点画像生成アルゴリズムの中では，変形ボクセル空間の処理が最も計算時間が長い処理となっている．また，システム全体としてのスループットは平均で約 10fps であった．レイテンシは 350ms 程度であり，主観的には遅延を感じるので，インタラクティブな応用に利用するには，さらにレイテンシの削減が必要である．

## 5. む　す　び

本稿では，形状復元に基づき，少ない計算コストで品質の高い自由視点画像を生成する手法を提案した．実験の結果，実時間で品質の高い画像を生成できることが確かめられた．今後の課題としては以下のようなものが考えられる．

（a） 変形ボクセル空間の改良

現在の方式では，変形ボクセル空間の処理時間が最も大きいため，高速化が必要である．今回示した実験では，ボクセル空間の変形は 1 フレームに 1 回としたため，動きの大きな部分についてはあまり効果が得られないが，ぼぼ静止

(a) 通常の色付け前の復元結果　(b) 平滑化した色付け前の復元結果

(c) 通常の色付け後の復元結果　(d) 平滑化した色付け後の復元結果

**図 4**　平滑化の効果
Effects of smoothing

(a) 変形なし　(b) 変形あり

**図 5**　変形ボクセル空間の効果
Effects of voxel space deformation

している部分については効果が得られる．人間の視覚的な性質を考えると，動いているものに対する知覚能力は多少低下するので，このような方式でも効果が期待できる．しかし，形状復元精度をさらに上げるには，同一フレーム内で複数回ボクセル空間を変形できるようにする必要がある．また，移動するサンプリング点の決定法や移動量などについても検討が必要である．

（b） 処理速度の平準化

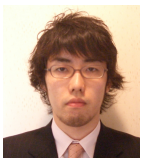
現在の方式では，各フレームにおける処理時間が一定ではないので，厳密な意味での実時間処理は実現できておらず，最悪の場合，バッファのオーバーフローが起こる可能性がある．したがって，各フレームの処理時間をほぼ一定にする必要がある．この問題は，形状復元を多重解像度で行うことである程度解決できると考えている [11]．

最後に，本研究の一部は， 財団法人大川情報通信基金平成 17 年度研究助成「多視点映像からの自由視点映像の実時間生成」の補助を受けた．

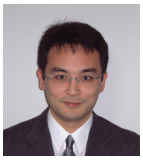
## 〔文　献〕


1）T. Kanade, P. W. Rander, P. J. Narayanan: “Concepts and early results”, IEEE Workshop on the Representation of Visual Scenes, pp. 69–76 (Jun. 1995)
2）M. Gross, S. Würmlin, M. Naef, E. Lamboray, C. Spagno, A. Kunz, E. Koller-Meier, T. Svoboda, L. Van Gool, S. Lang, K. Strehlke, A. Vande Moere, O, Staadt: “blue-c: A Spatially Immersive Display and 3D Video Portal for Telepresence”, ACM Trans. Graphics, **22**, 3, pp. 819–827 (Jul. 2003)
3）O. Grau, T. Pullen, G. A. Thomas: “A Combined Studio Production System for 3D Capturing of Live Action and Immersive Actor Feedback”, IEEE Trans. Circuits & Syst. for Video Technology, **14**, 3, pp. 370–380 (Mar. 2004)
4）T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, S. Nobuhara: “Real-Time 3D shape reconstruction, dynamic 3D mesh deformation, and high fidelity visualization for 3D Video”, Computer Vision and Image Understanding, **96**, pp. 393–434 (Dec. 2004)
5）J. Carranza, C. Theobalt, M. A. Magnor, H. -P. Seidel: “Free-viewpoint video of human actors”, ACM Trans. Graphics, **22**, 3, pp. 569–577 (Jul. 2003)
6）上田 恵, 有田 大作, 谷口 倫一郎: “多視点動画像処理による 3 次元モデル復元に基づく自由視点画像生成のオンライン化 –PC クラスタを用いた実現法–”, 情処学論, **46**, 11, pp. 2768–2778 (Nov. 2005)
7）W. N. Martin, J. K. Aggarwal: “Volumetric description of objects from multiple views”, IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., **5**, 2, pp. 150–158 (Mar. 1983)
8）剣持 雪子, 小谷 一孔, 井宮 淳: “点の連結性を考慮したマーチング・キューブ法”, 信学技報, pp. 197–204, (Jan. 1999)
9）吉本 廣雅, 有田 大作, 谷口 倫一郎: “1394 カメラを利用した多視点動画像獲得環境”, 画像センシングシンポジウム, pp. 285–290 (Jun. 2000)
10）有田 大作, 花田 武彦, 谷口 倫一郎: “分散並列計算機による実時間ビジョン”, 情処学論, **143**, SIG 11(CVIM5), pp. 1–10 (Dec. 2002)
11）鍋嶋 累, 上田 恵, 有田 大作, 谷口 倫一郎: “実時間自由視点映像生成のフレームレート安定化 –形状復元の多重解像度処理–”, 画像の認識・理解シンポジウム, pp. 642-647 (Jul. 2006)

**上田 恵**（うえだ めぐむ） 2006 年，九州大学大学院システム情報科学府修士課程修了．同年，（株）リコー入社．在学中に自由視点映像の実時間生成に関する研究に従事．修士（工学）．



**鍋嶋 累**（なべしま るい） 2005 年，九州大学工学部卒業．現在，同大学院システム情報科学府修士課程在学中．自由視点映像の実時間生成に 関する研究に従事．



**有田 大作**（ありた だいさく） 1992 年，京都大学工学部情報工学科卒業．1998 年，九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程修了．同年，同助手．2006 年，（財）九州システム情報技術研究所研究員．文書画像処理，画像処理における知識獲得，実時間並列画像処理，会話情報学，自由視点映像生成の研究に従事．博士（工学）．正会員．

**谷口倫一郎**（たにぐちりんいちろう） 1980 年，九州大学大学院工学研究科修士課程修了．同年，同総合理工学研究科助手．1989 年，同助教授．1996 年，同システム情報科学研究科（現システム情報科学研究院）教授．主としてコンピュータビジョン，多視点画像解析，並列処理，マンマシンインタラクション等に関する研究に従事．工学博士．正会員．