

ウォークスルーを実現する自由視点映像合成方式

石川 彰夫 メヒルダド パナヒプル テヘラニ 酒澤 茂之 小池 淳

KDDI 研究所 〒356-8502 埼玉県ふじみ野市大原 2-1-15

E-mail: {ao-ishikawa, te-mehrdad, sakazawa, koike}@kddilabs.jp

あらまし 複数カメラで撮影した映像から、任意の視点における映像を合成する自由視点映像合成技術が注目されている。本稿では、その中でも特に、スポーツやダンスのように広い空間に複数の被写体が散在するような状況を複数カメラで取り囲んで撮影した映像から、被写体の間を通り抜ける視点の（ウォークスルー）自由視点映像を合成する方式を提案する。光線空間の手法を用いつつ、新しいアプローチとして、被写体空間を多数の小領域に分割し、個別に映像合成を行い、全体の統合を行う方式を採用した。また、統合時に問題となる縦方向視差の補正も導入している。これにより、真に自由な視点移動を可能とする臨場感の高い映像合成が実現できた。

キーワード 自由視点映像, ウォークスルー, 画像ベースレンダリング, 光線空間, 円筒記録光線空間

Free Viewpoint Video Generation Method for Walk-through Experience

Akio Ishikawa Mehrdad Panahpour Tehrani Shigeyuki Sakazawa Atsushi Koike

KDDI R&D Laboratories Inc. 2-1-15 Ohara, Fujimino-shi, Saitama, 356-8502 Japan

E-mail: {ao-ishikawa, te-mehrdad, sakazawa, koike}@kddilabs.jp

Abstract "Free Viewpoint Video" generating technology enables audiences of TV program to choose their own viewpoints. We propose a novel method to realize "walk-through" experience in which the viewpoint can fly into the phalanx of sports game players in a large arena, where the scene is captured by video cameras surrounding the arena. The proposed method employs a local ray-space concept. It divides the 3D space into small subspaces to generate a local ray-space, generates local images, and integrates them to reconstruct the scene. Furthermore, the proposed method solves a vertical disparity problem that might cause a border discontinuity in the integration process. A computer simulation shows that the proposed method achieves highly flexible viewpoint generation with high fidelity.

Keyword Free Viewpoint Video, Walk-through, Image-Based Rendering, Ray-space, Cylindrical Ray-space

1. はじめに

近年、超臨場感テレビが注目されており、その基盤技術の1つとして、ユーザが見たい視点にあわせて3次元の空間を表示することができる自由視点映像合成技術が研究されている。我々は、特に、ユーザ側の機能として、自由視点映像合成を駆使したウォークスルーに着目している。例えば、スポーツ中継における選手の視点など、カメラを設置できない位置から見た映像生成は有効なアプリケーションである。

ウォークスルーを実現する技術的な要件として、被写体空間の中の仮想的な視点（以下、仮想視点）から見た画像合成の実現がある。即ち、広範囲に複数の被写体が分散して存在する空間において被写体と被写体の間の仮想視点からの画像を合成する必要がある。このような画像では、正面の離れた位置からは見えない被写体側面が見えることになるため、被写体空間の

周囲を複数のカメラで取り囲み撮影した多視点映像が必要となる。一般にスポーツ中継では、カメラは地面や観客席に設置され上空から撮影する場合は少ない。そこで本稿では、複数のカメラがほぼ同じ高さで被写体空間を取り囲んで輻輳撮影した多視点映像を用いることとする。

多視点映像から自由視点映像を合成する技術として、画像ベースレンダリング [1](Image-Based Rendering, 以下, IBR) がある。IBRは、撮影映像の光線情報（画素）の再配置や補間により映像を合成する手法である。しかし、代表的なIBRの単純適用では、被写体空間を取り囲む配置の多視点映像を扱うのに適していなかったり、仮想視点の位置が被写体空間の外などに制限されていたりして、上記の要件を満足できない。また、ほぼ同じ高さで撮影した多視点映像を用いているため、縦方向の視差を

再現できないという課題もある。

以上を踏まえ、本稿は、ウォークスルーの実現を目標に、IBRベースで上記要件を満足することが可能な自由視点映像合成方式を提案する。

2. アプローチ

1. で述べた要件を満たし課題を解決するアプローチを、以下に導入する。

まず、被写体空間を取り囲んで撮影した多視点映像を処理するためには、全方位の光線情報を扱える方式である必要がある。さらにウォークスルー時に正面の離れた位置からは見えない被写体側面が見えることも考慮すると、光線情報を補間して見え方の変化も緻密に再現できる必要がある。これらの要件を充たす方式として、光線空間法[2]が考えられる。

また、カメラがほぼ同じ高さに配置されており、直上に設置されたカメラが無いことから、円筒記録光線空間法[3]を用いれば充分である。直上に設置されたカメラがある場合は、円筒記録光線空間法では直上の光線情報を扱えないため、球面記録光線空間法を用いればよい。

しかし、通常の光線空間法は、図1(a)のように全ての被写体を含む領域を単独の被写体空間として扱うため、被写体空間の中に仮想視点を設置することが不可能であった。

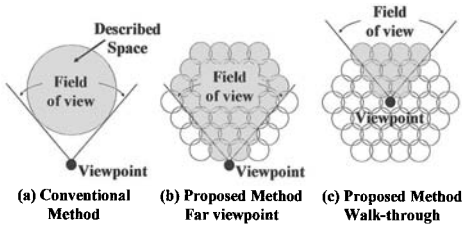


図1 ウォークスルーの実現方法

2.1. 局所領域分割

この問題を解決するため、被写体空間を多数の小さな領域（以下、局所領域）に分割する。局所領域分割方式を採用した。局所領域分割により、図1(b)や図1(c)のように仮想視点からの視野の中に納まる局所領域のみ自由視点映像を合成すれば、被写体空間の中に仮想視点が入った場合の自由視点映像を合成することができる。最後に、それらの局所的な自由視点映像を合成することによって、目的とする自由視点映像を得る。

以上のアプローチを用いることにより、複数の被写体が分散して存在し光線が遮蔽される場合でも、局所領域毎に光線の伝播に伴う変化を扱えるため、被写体と被写体の間を通り抜けるウォークスルーが実現できる。

2.2. 縦方向視差補正

局所領域分割によりウォークスルーは実現可能となる。しかし、ほぼ同じ高さで撮影した多視点映像を用いているため、縦方向の視差を正確に再現できない。その結果、仮想視点がウ

ォークスルーする際には、画像上の、異なる局所領域の境界に相当する位置に縦方向の段差が現れる課題が生じる。しかし、多視点映像から横方向の視差の情報は得られているので、この課題を、横方向の視差の値から縦方向の視差の値を推定して補正するというアプローチで解決する。

3. 提案方式の詳細手順

3.1. 円筒記録光線空間法

提案方式の詳細手順の説明に先立ち、円筒記録光線空間法の概要を説明する。図2に、円筒記録光線空間の座標系を示す。

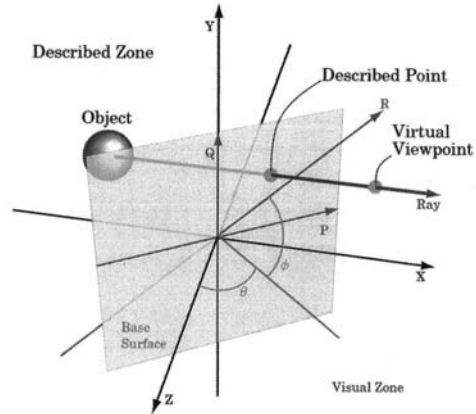


図2 円筒記録光線空間の座標系

円筒記録光線空間では、実空間中の点 $(X Y Z)$ を通り方位角 θ および仰角 ϕ の向きに伝播する光線の輝度や色の情報 $F(X Y Z \theta \phi)$ を、光線空間中の次式で与えられる点 $(P Q \theta \phi)$ に記録する。

$$\begin{cases} P = X \cos \theta + Z \sin \theta \\ Q = -X \sin \theta \tan \phi + Y + Z \cos \theta \tan \phi \end{cases} \quad (1)$$

画像の撮影とは、カメラの光学中心 $(X_c Y_c Z_c)$ を通過する光線の情報をサンプリングする行為に他ならない。従って、撮影した画像上の光線情報は、式(1)に $(X Y Z) = (X_c Y_c Z_c)$ を代入した領域に記録される。

サンプリングされた光線情報は光線空間中を疎に分布しているのみであるので、光線情報が取得されていない領域は近傍のサンプリングされた光線情報を参考にして内挿補間して求める。

被写体表面上の1点 $(X_o Y_o Z_o)$ から放射される光線の輝度や色は光線空間中を連続的に変化しているとみなせる。従って、光線空間中の式(1)に $(X Y Z) = (X_o Y_o Z_o)$ を代入して得られる軌跡に沿って光線情報を内挿補間することにより、サンプリングされなかった光線の情

報を求めることができる。

最後に、指定された仮想視点 (X_v, Y_v, Z_v) から見た画像を合成する。画像合成とは、仮想視点の位置を通過する光線の情報を光線空間から読み込み再構成することを意味する。従って、合成する画像上の光線情報は、式(1)に $(X, Y, Z) = (X_v, Y_v, Z_v)$ を代入した領域を光線空間中から読み込むことで得られる。

3.2. 詳細手順

提案方式のフローチャートを図3に示す。

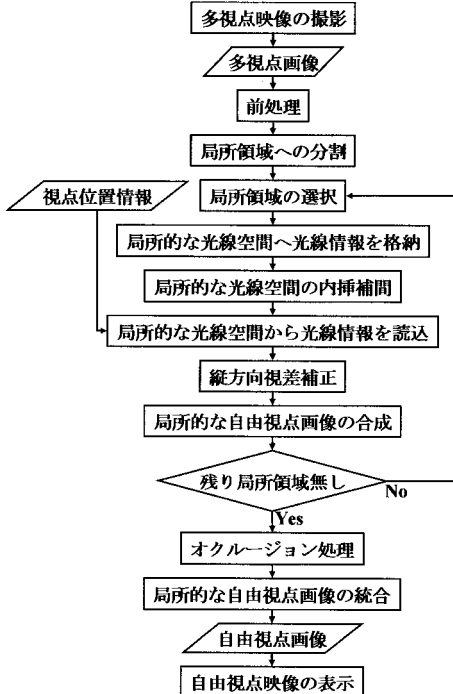


図3 提案方式のフローチャート

3.2.1. 前処理

前処理として、カメラのキャリブレーションと、被写体のマッピングおよびモデリングを行う。

多視点映像を撮影するに先立ち、予め全てのカメラで共通のキャリブレーションパターン（特徴点を配置した平面）を撮影しておき、Zhangのアルゴリズム[4]を用いて、カメラのキャリブレーションを行う。これにより、カメラの内部パラメータと外部パラメータ（位置ベクトルおよび回転行列）を算出する。

多視点映像を撮影した後は、マッピングを行い、各フレーム/各視点の画像において、被写体と背景を分離する。個々では、色ベクトルのスカラー長の差となす角度を用いた Bi-polar Radial Reach Correlation 法[5]を用いる。

次に、被写体のモデリングを行う。具体的には、分離した被写体の領域をマスクとみなして、

各カメラの位置と向きに基づく視体積交差法[6]を行い、被写体のボクセルデータを取得する。これにより、被写体の表面画素の3次元的な位置が判り、光線空間の内挿補間が容易になる[7]。

3.2.2. 局所領域分割

実空間中の被写体が存在する実空間を、局所領域に分割する。提案方式は局所領域の分割方法には依存しないため、分割方法はユーザが任意に設定できる。局所領域の形状も任意であるが、いずれの局所領域にも属していない領域が存在すると、その領域の光線情報がどこにも格納できないので、局所領域は少なくとも被写体の存在する領域を充填していなければならない。また、奥行きの違いによる視差をなるべく小さくする（局所領域を狭くする）目的から、各局所領域において中心と境界との距離が一定値以下になるために最適な領域分割であることが望ましい。そこで、本稿では、各局所領域の形状として、カメラの光軸に垂直な円筒を採用する。図4に、局所領域に分割した例を示す。

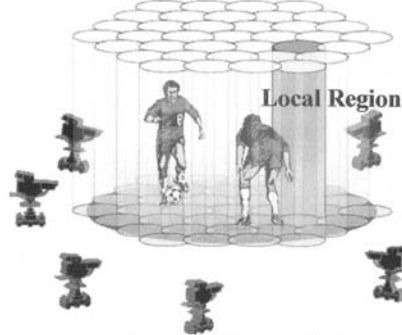


図4 局所領域分割の例

各局所領域の底面の半径は、被写体の存在する領域を充填する最小限の大きさとなっている。また、局所領域への分割の段階で、局所領域同士に最小限の重複を残しておいたため、局所領域の境界に隙間が残ることも無い。局所領域に分割することにより、どの光線がどの局所領域から放射されているか判断するため、局所領域間のオクルージョンを処理する必要が生じる。オクルージョンの処理方法については後述する。

それぞれの局所領域について、円筒記録光線空間を構築する。提案方式では、着目する局所領域を基準にした座標系を設定して、光線空間を構築する。具体的には、着目する局所領域が $(X_i, 0, Z_i)$ を中心軸とする半径 R の円筒であるとすると、中心軸上の点 $(X_i, 0, Z_i)$ を原点とし中心軸を y 軸とする新たな座標系を設定する。この新たな座標系では、式(1)は、

$$\begin{cases} P = (X - X_i) \cos \theta - (Z - Z_i) \sin \theta \\ Q = -(X - X_i) \sin \theta \tan \phi + Y - (Z - Z_i) \cos \theta \tan \phi \end{cases} \quad (2)$$

と書き直される。

3.2.3. オクルージョン処理

局所領域に分割することにより、オクルージョンの問題が発生する。例えば、異なる複数の局所領域とカメラがほぼ同一直線上に存在すると、カメラから遠い方の局所領域に含まれる被写体から放射された光線がカメラに近い方の局所領域の被写体に遮られてカメラに撮影されない場合がある。そのため、撮影画像上の各画素がどの局所領域から放射された光線に由来するか識別し、遠い方の局所領域において、光線が遮られた範囲（オクルージョンの範囲）を把握する必要がある。

3次元の円筒記録光線空間（あるいは球面記録光線空間）において、特定の θ, ϕ に対応する PQ 平面上の光線情報は、その PQ 平面に対し被写体の像を正射影した画像に相当する。そこで、この性質を用いて、各局所領域においてオクルージョンの範囲を把握することができる。本稿では、3次元の円筒記録光線空間を用いているため仰角 ϕ は無視できるので、方位角 θ についてのみ考えればよい。方位角 θ において、局所領域1（中心の位置 $(X_1, 0, Z_1)$ ）による局所領域2（中心の位置 $(X_2, 0, Z_2)$ ）のオクルージョンの範囲を求める方法を考える。局所領域1の光線空間中の点 (P_1, Q_1, θ) が、局所領域2の光線空間中の点 (P_2, Q_2, θ) を遮るとすると、両者には次の関係式が成り立つ。

$$\begin{cases} P_2 = P_1 + (X_1 - X_2)\cos\theta - (Z_1 - Z_2)\sin\theta \\ Q_2 = Q_1 \end{cases} \quad (3)$$

この式(3)を用いて、局所領域1の光線空間中の被写体の範囲が局所領域2の光線空間中のどの範囲に対応するか求められ、オクルージョンの範囲が得られるので、その範囲の光線情報を消去すればよい。自由視点画像を合成する際にも、仮想視点から見て奥から手前へと局所領域を上書きして合成することにより、オクルージョンを処理する。この方式により、オクルージョン領域は上書きされて見えなくなる。

3.2.4. 縦方向の視差補正

本稿では、ほぼ同じ高さで撮影した多視点映像を用いているため、縦方向の視差の情報が得られていない。そのため、光線空間を構築する際にも、縦方向の視差を無視した形式で（被写体の奥行きを無視して）構築しており、縦方向の視差を正確に再現できない。その結果、仮想視点ウオークスルーの際には、画像上の、異なる局所領域の境界に相当する位置に縦方向の段差が現れる課題が生じる。特に、仮想視点の位置が縦方向に移動する場合（ $Y_v \neq 0$ ）、局所領域間の視差が増大する（仮想視点に近い局所領域ほど大きく移動して見える）。

そこで、光線空間法を用いる際に得られる横方向の視差の情報を蓄積しておき、画素毎に表示位置を最適化する。

参照元と記録された横方向の視差の値とから、その視点位置での被写体の厚み（奥行き）を算出できるので、その縦方向の視差も推定できる。それにより、縦方向の段差を解消し、縦方向の視差を正確に再現できる。

参照元の光線空間座標 (P, Q) 、視差値 ΔP 、参照元と参照先の方位角の差を $\Delta\theta$ とおくと、被写体の奥行き ΔD は次式で表される[8]。

$$\Delta D = \frac{P + \Delta P - P \cos \Delta \theta}{\sin \Delta \theta} \quad (4)$$

光線空間の原点と仮想視点の水平距離 D の時、縦方向視差 ΔQ は次式で表される。

$$\Delta Q = -\frac{P + \Delta P - P \cos \Delta \theta}{D \sin \Delta \theta} Q \quad (5)$$

4. シミュレーション実験

期待する成果が得られているか確認するため、シミュレーション実験を行った。使用した多視点映像は、半径584cmの円周上に 12° 間隔で30台のHDTVカメラ（解像度：1280pixel×720pixel、焦点距離：画素数に換算した値で1236.7pixel）を設置して撮影した。多視点映像の例を図5に示す。背景のカラーボックスの中に1台ずつHDTVカメラが格納されている。

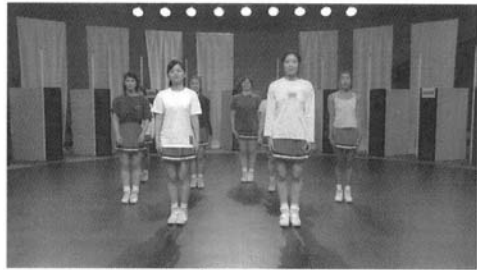


図5 多視点映像の例

まず、正確なウオークスルー画像が得られているか確認するシミュレーション実験を行った。

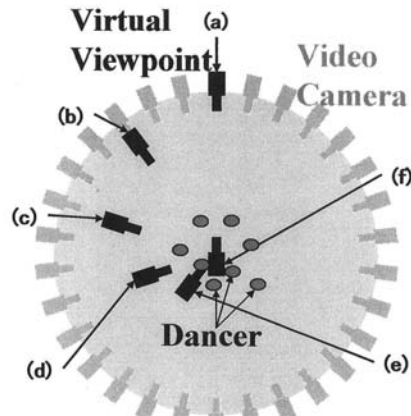


図6 視点の位置

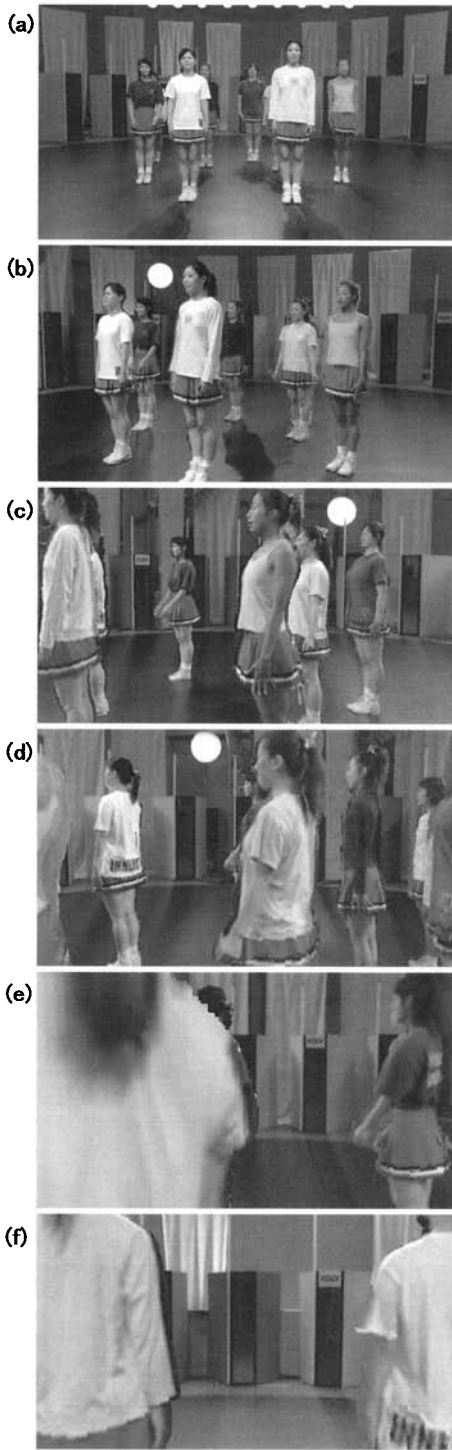


図7 シミュレーション実験の結果

この多視点映像に対して提案方式を適用し、自由視点映像を合成した。局所領域分割では、半径 584cm の被写体空間の全体を、半径約 5cm の局所領域で機械的に分割した。処理の対象となる局所領域（被写体の部分を含む局所領域）の個数は 634 個であった。シミュレーション実験を行い、図 6 で位置および向きを示した仮想視点のそれぞれ ((a)~(f) の 6 箇所) について、合成画像を図 7 に示す。

(c) では仮想視点 が 2 人の人物の間に入り、(f) では仮想視点 が舞台の中心に入り込んで内側から人物を見ている画像を合成できている。(a)~(d) でも、仮想視点の位置に応じて、人物同士のオクルージョン関係が違和感無く変化している。以上のことから、本稿の目的であるウォークスルーの実現が、提案方式により達成されていることが分かる。

次に、縦方向視差補正の効果を見るために、縦方向視差補正を行わなかった場合と行った場合とで、同一仮想視点からの自由視点画像をそれぞれ合成し比較する試験を行った。それぞれ、合成画像の全体図と特徴的な領域の拡大図を図 8(a)(縦方向視差補正なし)と図 8(b)(縦方向視差補正あり)に示す。図 8(a)で生じている縦方向の段差が、図 8(b)では殆ど無くなっていることが分かる。



(a) 縦方向視差補正なし



(b) 縦方向視差補正あり

図8 縦方向視差補正の有無の比較
(縦方向視点移動なし)

また、図 8 の仮想視点の位置よりも 20cm 上に位置する仮想視点から見た場合の合成画像とその一部の拡大図をそれぞれ図 9(a)(縦方向視差補正なし)と図 9(b)(縦方向視差補正あり)に示す。図 8(a)と図 9(a)とでは、仮想視点 が縦方向に移動したことにより、段差が拡大しているのに対し、図 8(b)と図 9(b)とでは段差が殆ど拡大していない。

縦方向の視差が再現できることで、従来の様に局所領域を狭く設定しなくても高精度化が可能になり、局所領域数を減じて高速化にも貢献すると期待できる。



(a) 縦方向視差補正なし



(b) 縦方向視差補正あり

図9 縦方向視差補正の有無の比較
(縦方向視点移動あり)

5. おわりに

本稿では、自由視点映像の合成技術において、局所領域分割によりウォークスルーを違和感無く実現すると共に、光線空間法で得られた視差の値を蓄積しておくことにより、仮想視点がウォークスルーをした場合においても、縦方向の視差を正確に再現する方式を提案した。

これにより、ウォークスルーや自由視点映像の高精度化を実現した。

文献

- [1] H.Shum, S.Kang, and S.Chan, "Survey of Image-Based Representations and Compression Techniques," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., no.13, vol.11, pp.1020-1037, 2003.
- [2] 藤井, 金子, 原島, "光線群による3次元空間情報の表現とその応用," テレビジョン学会誌, Vol.50, No.9, pp.1312-1318, 1996.
- [3] 苗村, 柳澤, 金子, 原島, "光線情報による3次元実空間の効率的記述へ向けた光線空間射影法," テレビジョン学会技術報告, Vol.20, No.4, pp.49-56, 1996.
- [4] Z.Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration," Microsoft Research Technical Report, MSR-TR-98-71, 1998.
- [5] Y. Satoh, and K.Sakaue, "Robust Background Subtraction based on Bi-polar Radial Reach Correlation," Proc. of the IEEE International Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (TENCON05), pp.998-1003, 2005.
- [6] W.N.Martin and J.K.Aggarwal, "Volumetric Descriptions of Objects from Multiple Views," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, no.5, pp.150-158, 1983.
- [7] 石川彰夫, 酒澤茂之, 小池淳, "局所領域分割型光線空間を用いたウォークスルー映像の生成," IMPS2006, 12-03, pp.19-20, 2006.

- [8] 石川彰夫, メヒルダド・バナヒブル・テヘラニ, 酒澤茂之, 小池淳, "円周配置多視点映像から生成した自由視点映像における縦方向視差の再現手法," 映像情報メディア学会冬季大会, 7-11, 2007.