

## 回転対称空間におけるステレオ復元と仮想造形

滝 雅也                      佐藤 淳

名古屋工業大学 情報工学専攻

〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

taki@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

概要：近年、3次元形状復元や任意視点映像の生成法が複合現実感等の実現に応用されつつある。本稿では、回転対称な3次元物体を仮想生成したり仮想変形するための、回転対称空間における3次元形状復元・変形法を提案する。カメラ画像により形状復元したり任意視点映像を生成するためには、基底点を基準にカメラの校正を行うのが一般的であるが、本稿では、回転対称空間においては1つの基底直線のみからカメラを校正し形状復元や任意視点映像の生成が可能であることを示す。さらにこれを応用することにより、回転対称空間において仮想粘土を自由に変形させることのできる仮想造形システムを示す。

キーワード：複合現実感, 回転対称空間, 3次元形状復元, 仮想造形

## 3D Reconstruction and Virtual Forming in Rotationally Symmetric Space

Masaya Taki                      Jun Sato

Nagoya Institute of Technology

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, JAPAN

taki@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

Abstract : The reconstruction of 3D objects and generation of arbitrary views of the scene are very important for achieving mixed reality. In this paper, we propose a method for reconstructing 3D objects and for deforming them virtually in rotationally symmetric space. For reconstructing 3D objects and for generating arbitrary views of the scene, camera calibration is very important. In this paper, we show that in rotationally symmetric space, cameras can be calibrated from a single basis line reliably. The proposed method is applied for deforming virtual clay in rotationally symmetric space.

Keywords : mixed reality, rotationally symmetric space, 3D reconstruction, virtual forming

## 1 はじめに

近年、医療、教育、建築など、各種産業用シミュレータをはじめ、様々な分野で仮想現実感 (Virtual Reality) が研究され、応用されている。また、さらにこれを発展させ、現実空間と仮想空間を自由に融合することのできる複合現実感 (Mixed Reality) が各分野において注目されてきている [1, 2, 3, 4]。このような複合現実感を実現するにあたり、より違和感なく複合現実映像を生成するために必要な技術として、任意の視点における映像生成や、複数カメラ映像による 3 次元形状復元、及び映像合成といった技術が非常に重要となる。これらの技術については、これまでも数多くの研究がなされているが [5, 6]、本論文では、特に回転対称な 3 次元物体特有の性質に着目し、回転対称空間における複数カメラによる 3 次元形状生成とその変形法を提案する。さらにこれを応用することで、仮想的に作成した 3 次元仮想粘土の形状を自由に變形させることが可能な、インタラクティブ性の高い仮想造形システムであるバーチャルろくろシステムを実現する。

以下、回転対称空間におけるステレオ復元の手法について述べる。次に、この手法を仮想粘土の變形に応用する。さらに、実際に実験を行うことでその有効性を示す。最後に、シミュレーションにより本手法の安定性を評価する。

## 2 回転対称空間におけるステレオ復元

ステレオ復元を行う場合に重要なのは、各カメラ間の幾何学的関係 (位置、姿勢) を安定に求めることである。従来、カメラ間の幾何学的関係を求めるためには、あらかじめ設置した基底点が画像にどのように映ったかによって計算するという手法が多く用いられてきた [7]。

しかしこの方法では、基底となる各点について両方の画像中で対応が取れていなくてはならないという問題がある。このような一方の画像中に映った基底点が他方の画像中のどの点に対応するか、という対応点問題は、基底点を基にしたステレオ復元において非常に重要な課題となる。しかし、ここでステレオ復元する空間を回転対称空間に限った場合、一般的な基底点ではなく一直線上の基底点を基に射影直線を計算し、その直線の対応からステレオ復元することが可能となる。このとき、基底点には一直線上に並んでいるという拘束がある

ため、一般的な配置の場合に比べてより簡単かつ安定に画像中から基底点を抽出することが可能となる。また、実際に対応させるのは基底点ではなく基底点から計算した射影直線であるため、この直線を計算することができるならば必ずしも両方のカメラに同じ点が映っている必要はなく、より柔軟なカメラ配置が可能となる。さらに、一般に直線は点よりも安定に抽出することができるため、基底直線を使ったステレオ復元は、基底点を使ったステレオ復元に比べはるかに安定に復元できることが期待できる。

そこで、本論文では回転対称空間固有の性質に着目し、対称軸となる基底直線の対応をとることでより安定にステレオ復元する方法を提案する。

### 2.1 ステレオ復元

回転対称空間におけるステレオ復元では、必ずしも各カメラのすべての外部パラメータが求まっている必要はない。回転対称空間で意味をなすのは対称軸  $L$  からの距離とその軸に沿った高さのみである。そのため、カメラの外部パラメータに軸  $L$  についての回転 1 自由度の不定性が残った状態でも、ステレオ復元することが可能である。

今、復元する点  $P$  が図 1 のように、点  $m_1$  としてカメラ  $C_1$  に投影されているとする。このとき、 $C_1$  のカメラパラメータが既知であれば、画像中の投影点  $m_1$  から点  $P$  の存在範囲を直線  $l_1$  上に絞ることができる。ここで、もしもカメラの外部パラメータのうち対称軸  $L$  に対する回転 1 自由度が定まっていなかったときは、 $P$  の存在範囲は直線  $l_1$  を軸  $L$  について回転させてできる曲面  $\Sigma_1$  となる。このように、直線のある軸に対して回転させてできる曲面は一般に双曲面となることが知られている。すなわち、この場合の 3 次元点  $P$  の存在範囲は、双曲面  $\Sigma_1$  となる。

次に、この点  $P$  が先とは異なるカメラ  $C_2$  の画像中に  $m_2$  として投影されたとする。すると、先と同様に  $m_2$  より  $P$  の存在範囲を表す双曲面  $\Sigma_2$  を得ることができる。このとき、 $P$  の存在範囲は図 2 に示すように 2 つの双曲面  $\Sigma_1$  と  $\Sigma_2$  の交わる円  $\gamma_1$  及び  $\gamma_2$  に限定することができる。このような円周上の点は無数に存在するが、回転対称空間において意味を持つのは対称軸からの距離と軸に沿った高さだけであるから、 $\gamma_1$  および  $\gamma_2$  それぞれの円周上の点はすべて同値であるとみなすことができる。したがって、回転対称空間においては、点  $P$  の存

在範囲を2点に絞ることが可能となる。さらにここでカメラの位置関係に何らかの定性的な制約を加えれば、点  $P$  を一意に決定することが可能となる。たとえば、2台のカメラがともに点  $P$  よりも上にあり、かつどちらのカメラに対しても点  $P$  が軸よりカメラ側に存在する場合は、 $\gamma_1, \gamma_2$  のうちで上にあるものが解となる。また、カメラが3台以上存在する場合には3つの双曲面が重なる円として解を一意に決定することができる。

以上のように、回転対象空間では、直線  $l_i$  ( $i$  はカメラ番号) を表す式が計算できれば、各カメラの外部パラメータのうち軸  $L$  に対する回転1自由度が定まっていない場合であっても、点  $P$  の復元が可能であることが分かる。そこで、次節では基底直線を基に各カメラの外部パラメータを、軸  $L$  まわりの回転の不定性を残して求め、さらに直線  $l_i$  を計算して点  $P$  を復元する方法を述べる。

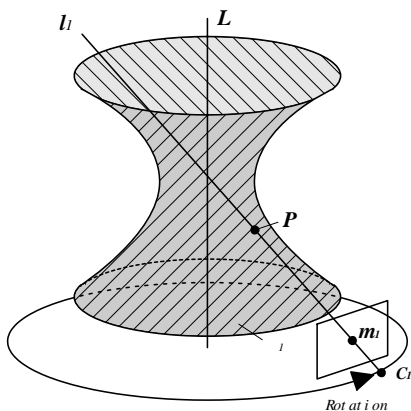


図 1: 双曲面

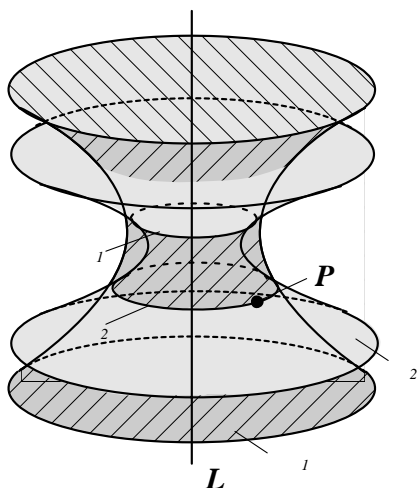


図 2: 2つの双曲面

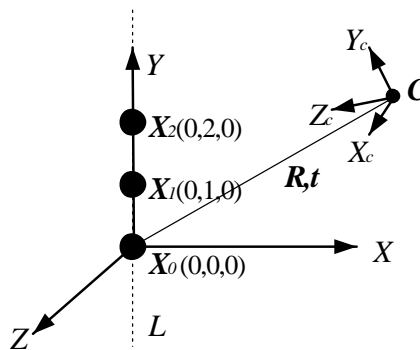


図 3: 対称軸を基にした座標系

### 3 基底直線に基づくカメラパラメータの計算

一般に画像より三次元復元を行うためには、各カメラのカメラパラメータが必要となる。ステレオカメラのうち、一方あるいは双方が運動する場合には、カメラの内部パラメータは予め校正しておくことができるが、カメラの外部パラメータはリアルタイムで常に計算する必要がある。

そこで、本節ではカメラの内部パラメータは既知であるが、カメラの外部パラメータは未知であると仮定し、基底直線を基にして外部パラメータを計算する方法を示す。

#### 3.1 カメラモデル

まず、射影基底となる空間直線  $L$  に基づきワールド座標系を定義する。この直線は回転対称空間における対称軸とし、図 3 に示すように、この対称軸が  $Y$  軸と一致するようにワールド座標系を定義する。今、ワールド座標系の座標軸が回転  $R$  と並進  $t$  によって、カメラ座標系の座標軸に変換されるものとする。このとき、ワールド座標系における点  $X = [X, Y, Z]^T$  と、カメラ座標系における点  $X_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$  の関係は次のように記述できる。

$$X_c = R^{-1}(X - t) \quad (1)$$

次に、本論文で扱うカメラモデルについて説明する。本論文で扱うカメラは透視カメラであり、3次元空間中の点  $X$  が画像中の点  $m = [u, v]^T$  に投影された時、次のようにモデル化できる。

$$\lambda \tilde{m} = P_p \tilde{X} \quad (2)$$

ここで、 $\tilde{\cdot}$  は斉次座標を表す。 $P_p$  は射影カメラ行列であり、内部パラメータ行列  $A$ 、及び回転  $R$ 、並進  $t$  により次のように表される。

$$P_p = A \begin{bmatrix} R^{-1} & -R^{-1}t \end{bmatrix} \quad (3)$$

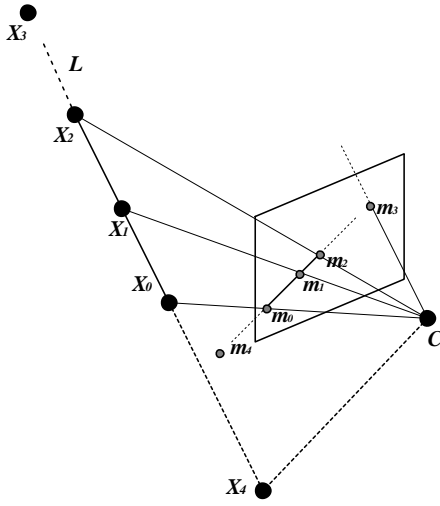


図 4: 対称軸上の点の投影

### 3.2 射影不変性を用いた消失点及び衝突点の計算

次に、カメラ外部パラメータの計算に必要な消失点  $m_3$  と衝突点  $X_4$  の導出について述べる。

今、図 3 のように、直線  $L$  上に等間隔に置いた 3 点  $X_0 = [0, 0, 0]^T$ 、 $X_1 = [0, 1, 0]^T$ 、 $X_2 = [0, 2, 0]^T$  が、図 4 に示すように、画像中にそれぞれ  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$  として投影されているとする。また、画像面と平行でかつカメラ視点  $C$  を通る平面を  $S$  とする。このとき、直線  $L$  上に存在する無限遠点  $X_3$  が消失点  $m_3$  として投影されており、さらに直線  $L$  が平面  $S$  と交差する点  $X_4$  (以下衝突点と称す) が、画像中に  $m_4$  として投影されているとする。なお、点  $X_4$  の存在する平面  $S$  とは、画像平面に平行でかつカメラ視点を通る平面であるから、その投影点である点  $m_4$  は、画像中の無限遠点となる。

このとき、点  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  と、点  $X_0$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  とが射影変換の関係にあることから、以下の射影不変量の式が成り立つ。

$$\frac{l_{02}l_{13}}{l_{01}l_{23}} = \frac{L_{02}L_{13}}{L_{01}L_{23}} \quad (4)$$

ここで、 $l_{ij}$  は点  $m_i$ 、 $m_j$  間の距離を、 $L_{ij}$  は点  $X_i$ 、 $X_j$  間の距離を表すものとする。

いま、点  $X_0$ 、 $X_1$ 、 $X_2$  は等間隔に配置されているため、 $L_{02} = 2L_{01}$  であり、また点  $X_3$  は無限遠点であるから  $L_{13} = L_{23} = \infty$  である。これらを式 (4) に代入すれば、次式を得る。

$$l_{03} = \frac{l_{01}l_{02}}{2l_{01} - l_{02}} \quad (5)$$

点  $m_3$  は点  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$  と同一直線上に存在するので、式 (5) より消失点  $m_3$  が求まる。

次に、衝突点  $X_4$  の計算方法について述べる。衝突点  $X_4$  とその投影点  $m_4$  も射影空間中の点であるから、先と同様に、点  $X_0$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_4$  及びそれぞれの投影点  $m_0$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_4$  の間には、射影不変量を用いて次のような関係が成り立つ。

$$\frac{l_{02}l_{14}}{l_{01}l_{24}} = \frac{L_{02}L_{14}}{L_{01}L_{24}} \quad (6)$$

ここで、衝突点  $X_4$  は、画像面中に無限遠点として投影されるため、 $l_{14} = l_{24} = \infty$  である。これらを式 (6) に代入すれば、次の式を得ることができる。

$$L_{04} = \frac{2(l_{02} - l_{01})}{2l_{01} - l_{02}} \quad (7)$$

点  $X_4$  は直線  $X_0X_1$  上の点であるので、 $L_{04}$  より、点  $X_4$  の座標を計算することができる。

### 3.3 カメラ外部パラメータの計算

以上により、消失点  $m_3$  及び衝突点  $X_4$  を求めることができた。そこで、次はこれらの点をもとにカメラの外部パラメータを計算することを考える。

今、点  $m_i$  の物理座標  $\tilde{x}_i$  を、カメラ座標系での 3 次元ベクトルと考えると、 $\tilde{x}_i$  はカメラの視点  $C$  から画像中の点  $m_i$  へ向かうベクトルとなる。この  $\tilde{x}_i$  は、内部パラメータ  $A$  と画像座標  $m_i$  を使って以下の式により表すことができる。

$$\tilde{x}_i = A^{-1}\tilde{m}_i \quad (8)$$

#### 3.3.1 回転行列の計算

外部パラメータ行列の中のカメラの回転  $R$  は、対称軸  $L$  をカメラ座標系の  $Y_c$  軸に変換するような回転となる。このとき、図 4 に示すように対称軸  $L$  とカメラの視点  $C$  から消失点  $m_3$  へ向かうベクトル  $\tilde{x}_3$  とは平行であるから、回転  $R$  は  $\tilde{x}_3$  をカメラの  $Y$  軸方向に回転させる 3 次元回転に等しい。従って、カメラ座標系におけるカメラの  $Y_c$  軸方向の単位ベクトルを  $n_y$  と置いたとき、求める回転行列  $R$  は  $\tilde{x}_3$  方向の単位ベクトル  $n'_y = \tilde{x}_3 / \|\tilde{x}_3\|$  を  $n_y$  へ変換するような回転行列となり、以下のようにして求める事ができる。

まず、 $n'_y$  と直行する任意の単位ベクトルとして、点  $C$ 、 $m_3$ 、 $m_0$  の 3 点が乗る平面の法線ベクトル  $n'_x$  を考える。このベクトルは、点  $m_0$ 、 $m_3$  の物理座標  $\tilde{x}_0$ 、 $\tilde{x}_3$  により以下のように求まる。

$$n'_x = \frac{\tilde{x}_3 \times \tilde{x}_0}{\|\tilde{x}_3 \times \tilde{x}_0\|} \quad (9)$$

次に  $n'_x$  と  $n'_y$  の両方に直行する単位ベクトル  $n'_z$  を次のように求める。

$$n'_z = n'_x \times n'_y \quad (10)$$

このようにして求めた  $n'_x$ 、 $n'_y$ 、 $n'_z$  より、求める回転行列  $R$  が次のように求まる。

$$R = \begin{bmatrix} n'_x & n'_y & n'_z \end{bmatrix}^{-1} \quad (11)$$

ただし、この回転行列  $R$  は一意には定まらず、対称軸についての回転 1 自由度の不定性を残した回転行列となる。しかしながら、今回扱う空間は回転対称空間であるため、この不定性を取り除く必要はない。

### 3.3.2 並進ベクトルの計算

カメラの回転行列  $R$  が求まったので、次に  $R$  を基にカメラの並進ベクトル  $t$  を求める。

今、ワールド座標系における原点は点  $X_0$  であるから、図 4 に示すように、三角形  $X_0 X_4 C$  と三角形  $C x_3 x_0$  との相似性より、並進ベクトル  $t$  について以下の式を得る。

$$t = \overrightarrow{X_0 C} = -\frac{L_{04}}{|R\tilde{x}_3|} R\tilde{x}_0 \quad (12)$$

ここで、各ベクトルに回転  $R$  がかけられているのは、カメラ座標におけるベクトルをワールド座標におけるベクトルに変換するためである。

以上より、カメラの回転行列  $R$  及び並進ベクトル  $t$  を計算することができるので、これらから以下に述べるように回転対称空間におけるステレオ復元が可能となる。

## 4 ステレオ復元

今、三次元中の点  $P$  がカメラ  $C_1$  に図 5 のように投影されているとする。このとき、点  $P$  の存在範囲は直線  $l_1$  上に限定できる。この直線  $l_1$  は、カメラ  $C_1$  での点  $P$  の投影点  $m_1$  と、カメラ  $C_1$  の内部パラメータ行列  $A_1$ 、回転行列  $R_1$ 、並進ベクトル  $t_1$ 、及び媒介変数  $\alpha$  を使って以下の式により表すことができる。

$$l_1(\alpha) = t_1 + \alpha R_1 A_1^{-1} \tilde{m}_1 \quad (13)$$

今、投影点  $m_1$  と、カメラ  $C_1$  の内部パラメータ行列  $A_1$ 、回転行列  $R_1$ 、並進ベクトル  $t_1$  は、画像中より回転 1 自由度の不定性を残して計算できるので、 $l_1(\alpha)$  は  $\alpha$  と対称軸回りの回転角の関数となる。

ここで、この直線  $l_1(\alpha)$  の  $XZ$  平面への写像  $v_1(\alpha)$  を考える。このような  $v_1(\alpha)$  は以下の式により表せる。

$$v_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} l_1(\alpha) \quad (14)$$

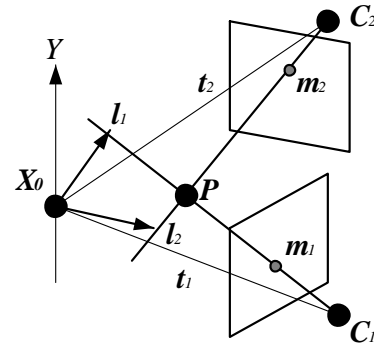


図 5: 回転対称空間におけるステレオ復元

このとき、直線  $l_1(\alpha)$  の対称軸  $L$  からの距離  $r_1(\alpha)$  は以下のとおり表せる。

$$r_1(\alpha) = (v_1(\alpha) \cdot v_1(\alpha))^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

この  $r_1(\alpha)$  が、直線  $l_1(\alpha)$  を回転させたときにできる双曲面の、対称軸 ( $Y$  軸) からの距離となる。対称軸からの距離は  $\alpha$  が一定であれば直線を回転させても変化しないため、回転 1 自由度の不定性が消える。したがって、 $r_1(\alpha)$  は媒介変数  $\alpha$  のみで記述される式となる。

また、対称軸に沿った高さを以下の式で計算することができる。

$$y_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} l_1(\alpha) \quad (16)$$

$y_1(\alpha)$  も回転によって変化しないため、媒介変数  $\alpha$  のみの式となる。

同様にカメラ  $C_2$  から距離  $r_2(\beta)$  及び高さ  $y_2(\beta)$  が  $\beta$  を媒介変数として求まる。このとき、点  $P$  について以下の式が成り立つ。

$$r_1(\alpha) = r_2(\beta) \quad (17)$$

$$y_1(\alpha) = y_2(\beta) \quad (18)$$

ここで、式 (17) は  $\alpha$ 、 $\beta$  に関する 2 次式であり、式 (18) は 1 次式である。未知数 2 つに対して式の数も 2 つであるため、式 (17)、(18) より未知数  $\alpha$  及び  $\beta$  が求まり、軸からの距離及び高さを計算することが可能となる。式 (17) が 2 次式であることから、このような解は一般に 2 つ導出されるが、第 2 節で述べたように、ここでさらにカメラの配置に何らかの制約を加えることにより、点  $P$  の三次元位置を一意に決定することができる。

## 5 バーチャルろくろシステムへの応用

次に、以上に述べた回転対称空間におけるステレオ復元を応用することにより、バーチャルろく

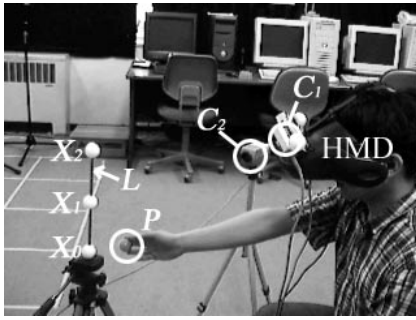


図 6: システム構成

るシステムを実現する方法について述べる。バーチャルろくろシステムは、仮想的に作成した仮想粘土をユーザーが手で変形することができるもので、インタラクティブ性の高い複合現実感を得ることができるシステムである。

このバーチャルろくろシステムでは、空間中に固定したカメラとユーザのHMDに取り付けたカメラの合計2台のカメラを用いる。ユーザーのHMDに取り付けたカメラは常に位置や姿勢が変化するため、予め対称軸上に設置した3つの基底点をもとに、3節の手法によりリアルタイムでカメラの外部パラメータを計算する。この情報をもとに、4節の手法によりユーザーの手の3次元位置をステレオ復元することで、仮想粘土の変形を可能とする。仮想粘土は回転対象物体であるから、実際にはこの変形は、粘土の断面形状を2次元的に変形し、それを対称軸について回転させることで行う事が可能である。

さらに、ユーザーの視点となるカメラの位置姿勢情報も、3節の手法により対称軸を基準として求めることができる。ユーザーカメラの位置姿勢情報が分かれば、変形後の仮想粘土をユーザーの視点へ投影することが可能となる。3節の手法により求まる外部パラメータには対称軸についての回転の不定性が残るが、仮想粘土は回転対称物体であるため仮想粘土を違和感なく投影でき、リアルな複合現実感を得ることが可能である。

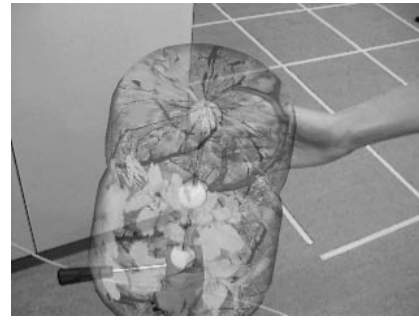
## 6 実験

実際に回転対象空間におけるステレオ復元法を使って、バーチャルろくろシステムを作成した。

### 6.1 システム構成

はじめに、本システムの構成について述べる。

まずろくろの回転軸を対称軸として、その軸上に3点の基底点を用意する。さらにユーザーの視点



(a) ユーザーカメラ



(b) 補助カメラ

図 7: 仮想粘土を変形している様子

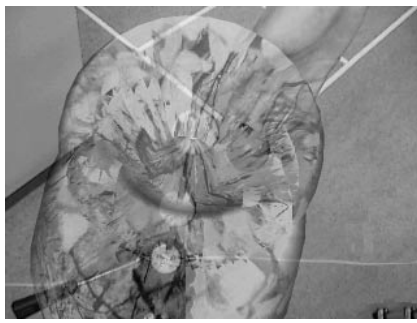
となるHMD上のカメラ  $C_1$  と、ステレオ復元用にもう一台の補助カメラ  $C_2$  を用意する(図6参照)。 $C_1$  は常に運動するが、 $C_2$  は固定されている。

システム開始時には、予め元となる円柱状の仮想粘土を用意しておき、それを  $C_1$  の画像に映る対称軸から  $C_1$  の外部パラメータを計算してHMDに投影する。開始後はユーザーカメラ  $C_1$  及び補助カメラ  $C_2$  の画像から、3節の手法により各カメラの外部パラメータを計算し、4節の回転対象空間におけるステレオ復元法を用いてユーザーの手に設置したマーカー  $P$  の位置を3次元復元する。復元したマーカーの位置を使って粘土の断面形状を2次元的に変形し、それを対称軸について回転させることで変形された仮想粘土を作成する。さらにその仮想粘土を再度HMDに投影することで、インタラクティブ性の高い複合現実感を実現する。また、仮想粘土には図7に示すように様々なテクスチャをつけることができる。

### 6.2 実験結果

実際に実験を行った映像を図7~図9に示す。(a)に示す画像が  $C_1$  で撮影した画像であり、(b)に示す画像が  $C_2$  で撮影した画像である。本来は仮想粘土は不透明に投影するが、ここでは対称軸の様子が分かるよう半透明に投影した。

図7が仮想粘土を変形させたときの様子であり、



(a) ユーザーカメラ



(b) 補助カメラ

図 8: 仮想粘土の内側を削っている様子

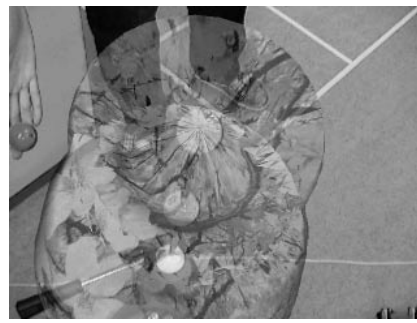
図 8 は粘土の内側を削っている様子を示している。これらの図から明らかなように、ユーザーの手の位置に応じて粘土が変形しているのが分かる。

また、図 9 は 2 次元的には削れるように見えても、3 次元的には削ることのできない位置に手がある場合の様子である。例えば 2 次元的には手の位置が粘土を変形できる位置に見えたとしても、3 次元的に削ることのできない位置であれば粘土の変形が行われない事が見て取れる。

さらに、これらの図から明らかなように、視点カメラがどのように動いても違和感なく安定に複合現実映像を作成できていることが分かる。

## 7 復元安定性の解析

次に、カメラの位置関係による復元安定性の変化について解析を行う。本手法では、ステレオ復元に用いるカメラの位置関係によって復元安定性が変化する事が予想される。具体的には、2 台のカメラの対称軸からの距離及び高さが近ければ近いほど、復元安定性が悪くなり、不確定領域が大きくなると考えられる。そこで、この節では実際にシミュレーションを行うことで、カメラの位置関係によって復元安定性がどのように変化するかについて解析を行う。



(a) ユーザーカメラ



(b) 補助カメラ

図 9: 仮想粘土が削られない場合の様子

### 7.1 対称軸からの距離、高さが変化した場合の復元安定性

まず、2 台のカメラ  $C_1$ 、 $C_2$  を仮想的に配置し、各カメラに仮想的に配置した基底点と復元点  $P$  を投影する。その後、標準偏差 1 [pixel] のガウシアンノイズを乗せて復元点  $P$  の位置を復元し、このときの  $3\sigma$  の不確定領域を計算した。ただし、各カメラの画像サイズは  $640 \times 480$  画素とした。これをカメラの配置を変えて再度行うことで、対称軸からの距離と高さが変化した場合の復元安定性の変化を解析した。

実際に計算した結果を図 10~図 13 に示す。図 10、図 11 では、灰色の 3 次元体が回転対称空間におけるステレオ復元の不確定領域を表している。また、図 10、図 11 を  $XY$  平面上に射影した結果が図 12、図 13 である。ただし、復元点  $P$  及び各カメラ  $C_1$ 、 $C_2$  の図 12、図 13 における位置  $P'$ 、 $C_1'$ 、 $C_2'$  については、各点の軸からの距離と高さから  $XY$  平面上においてそれぞれ点  $P$ 、点  $C_1$ 、点  $C_2$  と回転対象空間における同値関係にある点とした。また、不確定領域を灰色の楕円で表した。

図 10、図 11 を見ると、不確定領域は楕円を対称軸に対して回転させてできる立体となる事が分かる。また、図 12、図 13 より、各カメラが回転対象空間において離れるにつれて  $C_1'$  と  $C_2'$  が離れ

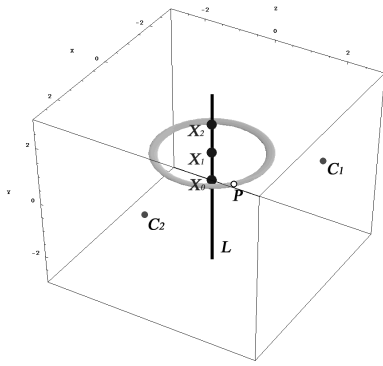


図 10: カメラの回転対称空間における位置関係が遠い場合

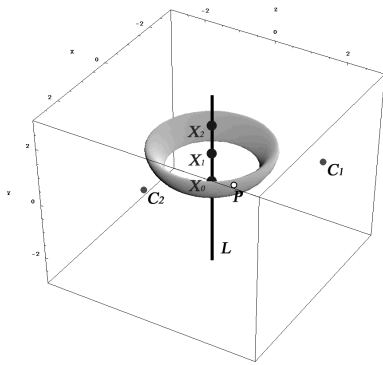


図 11: カメラの回転対称空間における位置関係が近い場合

るにつれて、不確定領域が小さくなり、復元が安定化することが分かる。

## 8 まとめ

本稿では回転対称空間におけるステレオ復元について示した。回転対象空間では、カメラの像から物体の存在範囲を双曲面上に限定することができ、これにより、複数台のカメラの像から双曲面の交わりとして対象物を 3 次元復元できることを示した。また、実際にバーチャルろくろシステムに応用し、安定な復元と映像生成が行えることを確認した。さらに、カメラの回転対称空間における位置関係が復元安定性にどのような影響をもたらすかについて、シミュレーションにより解析した。

今後の課題としては、カメラの内部パラメータが未知である場合への拡張が考えられる。現在は内部パラメータが既知であるという条件でステレオ復元を行っているが、カメラが完全に未校正の場合、回転対称空間においてどのような 3 次元復元が可能であるかについて今後検討していきたい。

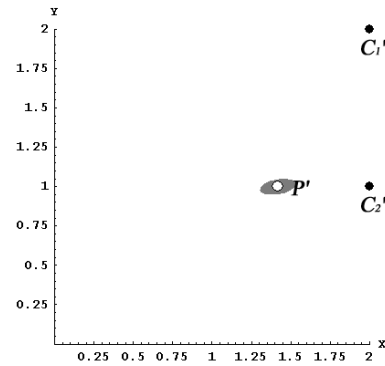


図 12: カメラの回転対称空間における位置関係が遠い場合

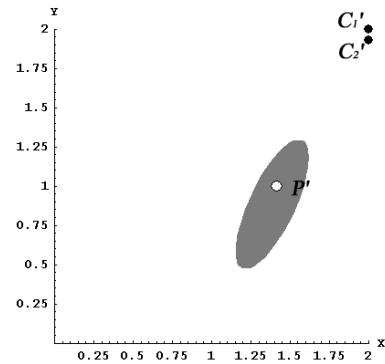


図 13: カメラの回転対称空間における位置関係が近い場合

## 謝辞

日頃ご指導頂いている名古屋工業大学佐藤幸男教授に感謝する。

## 参考文献

- [1] 田村 秀行, 大田 友一. 複合現実感. 映像情報メディア学会誌 vol.52, No.3, pp.266-272, 1998.
- [2] 田村 秀行. 複合現実システムの課題と可能性～画像センシングの観点から. 第 5 回画像センシングシンポジウム, pp.169-178, 1999.
- [3] 岩田 洋夫. 人工現実完成性技術とその応用. サイエンス社, 1992.
- [4] P.Milgram and F.Kishino. A taxonomy of mixed reality visual display. IEICE Trans.Inf.&Sys. Vol.E77-D No.12 pp.1321-1329 1994
- [5] R.I.Hartley, R.Gupta, and T.Chang. Stereo from uncalibrated cameras. Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.761-764, 1992.
- [6] 井上 剛毅, L.Quan, 大田友一. 複合現実感のための線形手法による仮想物体像合成. 信学技報 PRMU97-112, 1997.
- [7] 佐藤 淳. コンピュータビジョン 視覚の幾何学. コロナ社, 1999.