

光線空間情報を利用した三次元形状復元

日大生産工(院)○多田 裕志

日大生産工 山下 安雄

1 研究背景

近年、コンピュータの高性能化やグラフィックス性能の向上などにより、3次元計測や復元に必要な装置が低コストで実現できるようになってきている。それにより従来より工業分野で主に行われていた物体の三次元位置情報を非接触的に認識したり表面形状の計測や復元する研究が、医療やヒューマンインターフェース、アミューズメント、アパレルなどの幅広い分野においても注目され様々な研究が行われている。一般に空間コード化法やスリット光投影法などの三角測量を基にした復元手法が注目されている。しかしながらこの手法全体に挙げられている問題として、計測するための視点間距離が近いと奥行き情報を得にくく、離れているとオクルージョンが出てくるがよく知られている。

一方で光線空間法は、予め多視点から物体を撮影した画像を用いて任意の位置に視点を置いた画像を生成するために研究されてきた手法で自由視点テレビジョン技術などに用いられている。

本論文では、予め撮影しておいた画像群から光線空間法を利用して任意の視点画像を生成し、近傍画像同士で対応を取り合せて奥行き情報を求めることで三次元形状復元の精度を高めることが出来るのではないかと考えのもとに実験をおこなっていく。

2 基本原理

2.1 光線空間の生成

空間内の一点を通過する全ての光線を平面に投影するとその視点から見た画像となるので、そ

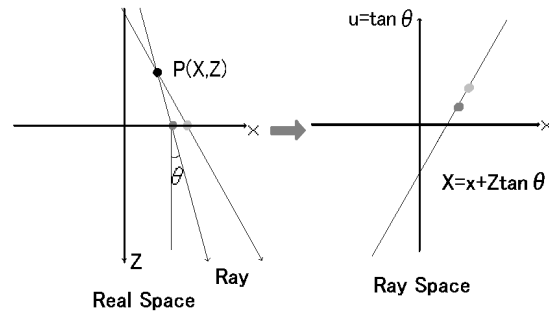


図1 光線情報の変換

の点を様々な方向に通過する光線群を集めると、その点を視点とする画像が得られる。そこであらゆる点毎にその点を通過する光線情報を取得すれば自由視点画像が得られることになる。3次元実空間の1本の光線を、それを表すパラメータを座標とする多次元空間の1点で表した仮想的な空間を光線空間といい、この手法を光線空間法と呼ぶ。実空間から光線空間への情報の変換を示すと図1のようになる。基準面に対して角度 θ をもち、視点 $P(X, Z)$ を通るある光線は基準面上への光線の投影位置 $(x, 0)$ と以下の式に拘束される。

$$X = x + Z \tan \theta \quad (1)$$

つまり、視点 $P(X, Z)$ を通る光線は光線空間上では傾き $Z \tan \theta$ の直線上に配置されるので、光線情報を近くの光線情報から補間によって作り出すことが出来、離散的に配置されたカメラ群による有限視点画像からでも自由視点画像を生成することが出来る。処理や考え方を簡単にするためにy軸方向の視差を無視し、カメラをx軸方向に直線上に配列した場合の直交座標光線空間を図2に示す。

2.2 自由視点画像の作成

光線空間から任意の位置での自由視点画像を生成する方法を図3に説明する。式(1)より、物体のある点 $P(X, Z)$ に注目したままで、基準面への光線の投影位置 $(x, 0)$ を変えると $\tan \theta$ は一意に決定される。よって(1)で求まる値で光線空間中の $X-u$ 平面に対して垂直に切断した面として自由視点画像が得られる。

後述の対応点の決定と奥行き情報の獲得精度を上げるために、ここでは仮想カメラの位置を x 軸方向に微小に移動させながら多視点の自由視点画像を作成する。

2.3 対応点の決定

作成された画像同士の対応点を決定するために面積相関法を行う。図4に示すように面積相関法では、注目している画素の周りをウィンドウで比較し、そのウィンドウの点それぞれについて左右の画像中で差をとり、その合計がもっとも小さいものを対応点とする。

具体的に説明すると、左画像 I_l の横方向に x 番目、縦方向に y 番目の画素の RGB 値をそれぞれ $I_l R[x][y]$ 、 $I_l G[x][y]$ 、 $I_l B[x][y]$ とおき、同じように右画像 I_r もそれぞれ $I_r R[x][y]$ 、 $I_r G[x][y]$ 、 $I_r B[x][y]$ とおく。色成分毎に差の絶対値を算出し総和 α を求めたときに、最も値が小さくなるような視差 d を求めればよいということになる。これを式にすると

$$\begin{aligned} \alpha = & \sum \sum |I_l R[x+i][y+j] - I_r R[x+i-d][y+j]| \\ & + |I_l G[x+i][y+j] - I_r G[x+i-d][y+j]| \\ & + |I_l B[x+i][y+j] - I_r B[x+i-d][y+j]| \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ウィンドウのサイズは、小さすぎるとご対応が多くなり大きすぎるとウィンドウ内の視差が同じであるという仮定が崩れてしまうなどの問題が生じる。

2.4 三次元座標の算出

決定された対応点から、三角測量の原理を用いて各点毎の三次元位置情報を取得する。

原理を説明すると、異なる視点から同一の対象物を観測し、それぞれの画像上への投影位

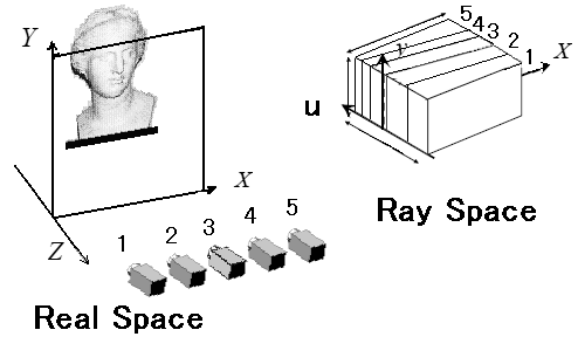


図2 実空間から直交空間への変換

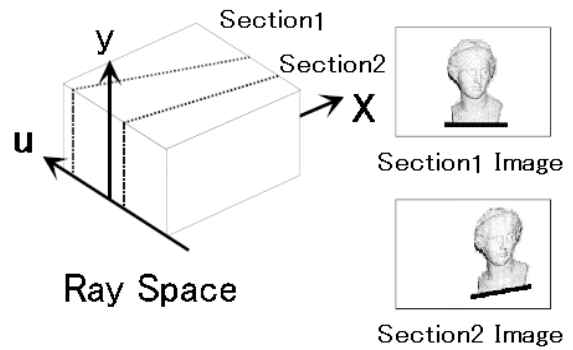


図3 自由視点画像の生成

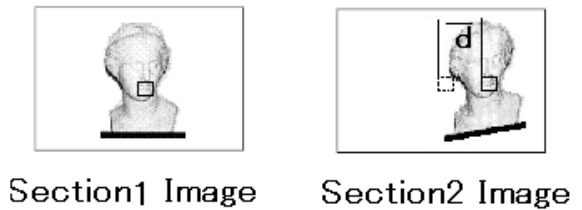


図4 面積相関法

置の違いから、対象物の3次元位置情報を得るものである。図5に示すように物体座標系 $[X, Y, Z]$ とそれぞれの画像 I_l および I_r におけるカメラ座標系 $[x_l, y_l]$ 、 $[x_r, y_r]$ を定めたとき、空間中にある点 $P(X, Y, Z)$ が左右画像面の $p_l(x_l, y_l)$ 、 $p_r(x_r, y_r)$ に投影されたとすれば、以下の関係式が成立する。

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d} \quad (3)$$

$$Y = \frac{b(y_l + y_r)}{2d} \quad (4)$$

$$Z = \frac{b \cdot f}{d} \quad (5)$$

ただし、 f は焦点距離、 b は基線長、 d は視差で、

$$d = x_l - x_r \quad (6)$$

である。

したがって、 f 、 b が既知のもとで左右の画像上の投影座標から元の3次元位置 $P(X, Y, Z)$ が計算できる。座標系を透視変換モデルであらわすと、視線はレンズ中心を通る1本の直線として定義される。

図6に左画像の結像面を示す。カメラ座標上でのある点 $p_l(x_l, y_l)$ は空間中のある一点 $P(X, Y, Z)$ を透視した点 $P'(X_c, Y_c, Z_c)$ であり、レンズ中心 O から測定点 P へ向かっている視線との交点は

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} X \\ Y \\ f + Z \end{bmatrix}, Z = 0 \quad (7)$$

で与えられる。また、同次座標系に表現を変えれば、

$$\begin{bmatrix} X_{ch} \\ Y_{ch} \\ Z_{ch} \\ W_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

の 4×4 の行列演算で記述することができる。ここで $[X, Y, Z, 1]^T$ と $[X_{ch}, Y_{ch}, Z_{ch}, W_{ch}]^T$ は同次座標系表現による点 P と p' の座標である。

式(8)では点 P と点 p' がともにカメラに固定した座標系で表現されているときに適用できる。しかし三次元形状計測ではカメラの位置、姿勢を測定物とは独立して自由に移動するためカメラ座標とは別に物体座標を設定する。この2つの座標を関係付ける行列 T は回転と平行移動を含め、次式のように表す。

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

この行列 T を用いて物体座標系の点 P からカメラ

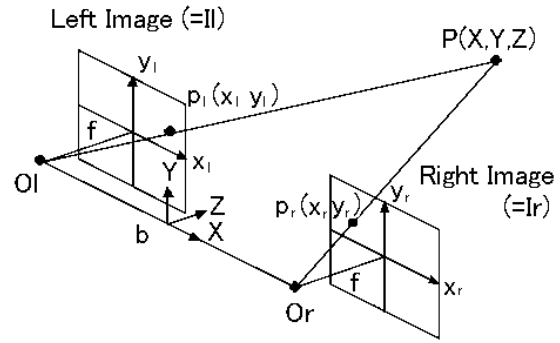


図5 三角測量法

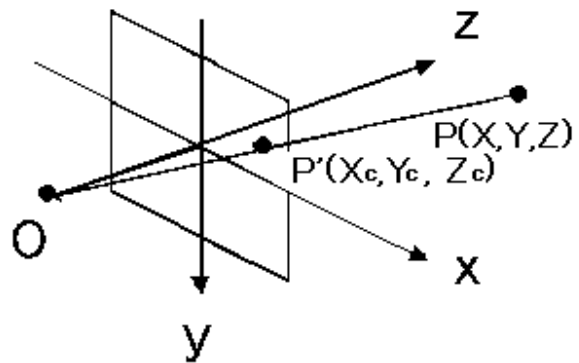


図6 カメラ座標

座標の点 p' への変換は、

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

となり、カメラ座標へ簡略化すると、

$$\begin{bmatrix} HX_c \\ HY_c \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

と記述できる。この 3×4 の C 行列をカメラパラメータと呼ぶ。このカメラパラメータにカメラの位置、姿勢などに関するデータが含まれている。

光線空間から仮想のカメラ視点の画像を用いて三次元座標を算出する場合、各々の仮想カメラのカメラパラメータは、光線空間上から自由視点画像を生成する際に指定できるので既知であると考えられる。したがってある仮想視点画像 I_r および I_l の

の注目画素から測定点 $P(X, Y, Z)$ を物体座標系で求めるとすると、式(11)にそれぞれカメラパラメータ C_r 、 C_l を代入し、

$$H_r = C_{r31}X + C_{r32}Y + C_{r33}Z + C_{r34} \quad (12)$$

$$H_l = C_{l31}X + C_{l32}Y + C_{l33}Z + C_{l34} \quad (13)$$

の関係が得られる。ここで、

$$F = \begin{bmatrix} C_{r34}X_r - C_{r14} \\ C_{r34}Y_r - C_{r24} \\ C_{l34}X_l - C_{l14} \\ C_{l34}Y_l - C_{l24} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Q = \begin{bmatrix} C_{r11} - C_{r31}X_r & C_{r12} - C_{r32}X_r & C_{r13} - C_{r33}X_r \\ C_{r21} - C_{r31}Y_r & C_{r22} - C_{r32}Y_r & C_{r23} - C_{r33}Y_r \\ C_{l11} - C_{l31}X_l & C_{l12} - C_{l32}X_l & C_{l13} - C_{l33}X_l \\ C_{l21} - C_{l31}Y_l & C_{l22} - C_{l32}Y_l & C_{l23} - C_{l33}Y_l \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$V = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (16)$$

とおけば、式(14)(15)(16)をまとめて

$$F = Q \cdot V \quad (17)$$

と行列演算の形で表現できる。したがって、

$$V = Q^{-1}F \quad (18)$$

から、交点座標 $P(X, Y, Z)$ が求められる。

3 実験

本手法による物体の三次元形状復元の有効性を検証するために、複雑な形状をもった物体の撮影画像を用意し、三次元形状の復元を行う。

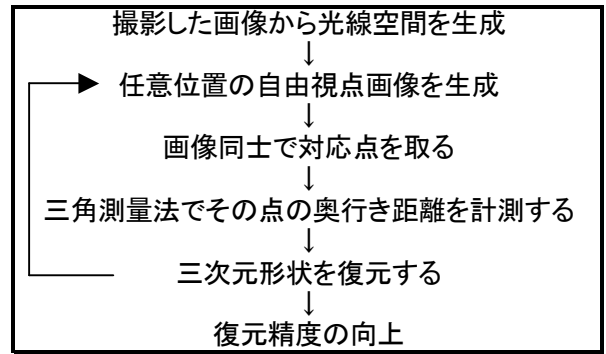
3.1 装置および対象

計測対象には石膏像を、計測装置には OLYMP US 社製の E-300 を使用(画素数 3264×2448 pixel 量子化 12bit)し、RAW データとして画像を保持する。

3.2 実験方法

三次元形状計測の手順を表1に示す。まず、直線上に配置されたカメラによって撮影された多視

表1 三次元形状計測の手順



点の画像から光線空間を作り出す。そして、その空間から任意の位置に視点を置いた画像を作成し、近傍視点の画像同士で対応を取って、奥行き情報を得る。視点を複数変えながら対応点の決定と奥行き情報の獲得を行うことで物体の三次元形状の復元精度を向上させる。

4 参考文献

- 1) 征士, 佐藤宏介、三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 2) T.Hamaguchi, T.Fuji and T.Honda
“Real-Time View-Interpolation System for Super Multi-View 3D Display”, IEICE Trans, Inf.&Syst., E86-D(1), PP.109-116, 2003.