

# 線分要素に基づく画像列からの3次元形状モデルの生成

## 3-D Model Generation from Image Sequences based on Line Segments

藤村 一之<sup>†</sup>, 椋木 雅之<sup>†</sup>, 浅田 尚紀<sup>†</sup>

K. Fujimura, M. Mukunoki, and N. Asada

### 1. はじめに

本論文では、線分要素に基づく全周囲3次元モデルの生成手法を述べる。我々は、これまで多様な物体に対して適用可能である“特徴点”を用いて3次元形状を復元し、モデル生成を行う手法を提案してきた[1]。しかし、この手法では生成モデルの線分要素に歪みを生じてしまうことがあった。線分を要素として3次元モデルを生成することにより、直線状の輪郭をもった人工物などに対して、線分要素の歪みを抑えた良好なモデル生成が期待できる。特徴線による形状復元は従来から検討されており、因子分解法の拡張[2]などが提案されている。本論文では、文献[1]の手法を拡張し、“特徴線”を用いて形状復元する手法を提案する。復元された3次元特徴線は端点がなく、そのままでは3次元モデル生成が行えない。そこで、3次元特徴線の接続関係から物体を構成する端点をもった線分要素を推定し、それらを用いてテクスチャを付加した3次元モデルを生成する。これにより、点ではなく線による形状復元から3次元モデルが生成可能となる。

### 2. 全周囲画像列からの形状復元

図1に示すように第 $f$ 画像( $1 \leq p \leq N_f$ )で観測された第 $p$ 特徴点の座標を、 $u_{fp} = (u_{fp}, v_{fp})^T$ と書く。第 $p$ 特徴点の世界座標系における3次元座標を $s_p =$

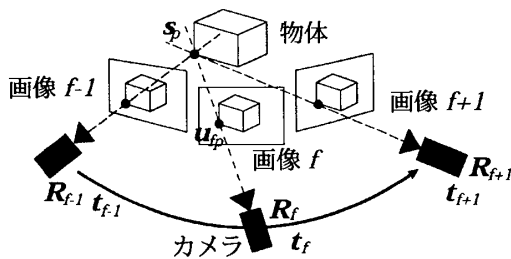


図1: 画像と特徴点の関係

$(x_p, y_p, z_p)$  ( $1 \leq p \leq N_p$ ), 第 $f$ 画像のカメラ位置・姿勢を表すパラメータを $R_f$ (回転成分),  $t_f$ (並進成分)とする。投影モデルを透視投影とし、焦点距離は全画像を通じて一定の既知の値 $l$ とする。これらのパラメータを用いて、形状復元問題は次のように定式化される。

$$\arg \min_x E(x) \quad (1)$$

$$E(x) := \sum_{(f,p)} |u_{fp} - \mathcal{P}[R_f s_p + t_f]|^2$$

$$x := (s_p, q_f, t_f \text{ を並べたベクトル})$$

$$\text{ただし, } \mathcal{P}(x, y, z)^T := \frac{l}{z}(x, y)^T$$

<sup>†</sup>広島市立大学 情報科学部 知能情報システム工学科

ここで、 $\mathcal{P}$ は透視投影を表す。また、 $R_f$ は自由度3の回転行列であり、 $q_f$ は $R_f$ のパラメータを並べたベクトルである。非線形最適化により式(1)を解くことで、特徴点の3次元空間中の座標 $s_p$ が復元されるとともに各画像のカメラ位置・姿勢 $t_f, R_f$ が得られる。

### 3. 線分要素に基づく3次元形状モデルの生成

#### 3.1 特徴線による形状復元

特徴線は3次元空間中の直線であり、画像列上に観測された特徴線は線上の位置 $u_{fp}$ と方向ベクトル $a_{fp}$ をもつ(図2)。即ち、特徴線は $a_{fp}$ 方向への自由度をもつ点 $u_{fp}$ として表現される。

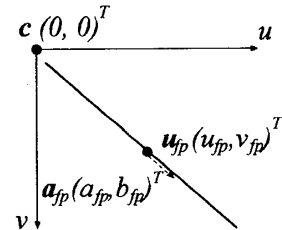


図2: 投影された特徴線

特徴線の3次元空間中の位置 $s_p$ 、及びカメラ位置・姿勢 $t_f, R_f$ は式(1)に重み行列 $W_{fp}$ をかけた式(2)を最小とするパラメータを非線形最適化により求めることで得られる。

$$\arg \min_x E'(x) \quad (2)$$

$$E'(x) := \sum_{(f,p)} h_{fp}^T W_{fp} h_{fp}$$

$$x := (s_p, q_f, t_f \text{ を並べたベクトル})$$

ただし、

$$\begin{cases} W_{fp} = [I - \mu a_{fp} a_{fp}^T] \\ h_{fp} = u_{fp} - \mathcal{P}[R_f s_p + t_f] \end{cases} \quad (0 \leq \mu \leq 1)$$

ここで $W_{fp}$ は、特徴点の最適化計算を行う際、方向ベクトル $a_{fp}$ に沿った方向へのズレを許容するように重み付けを施すものである(図3)。 $s_p$ を $R_f, t_f$ のカメラで投影したときの画像座標を $\tilde{u}_{fp} = \mathcal{P}(R_f s_p + t_f)$ とする。 $W_{fp}$ の重み付けを行わない場合、図3左のように、推定位置 $\tilde{u}_{fp}$ から観測位置 $u_{fp}$ に収束するような $h_{fp}^T h_{fp}$ の方向にパラメータの最適化が行われる。一方、 $W_{fp}$ の重み付けをすることにより、図3右のように特徴線の方向に対する修正量を軽減させ、直線 $\eta$ からのズレを減らす方向にパラメータ修正が行われる。また $\mu$ は、特徴線の伸縮性を表す重み係数であり、1に近いほど $a_{fp}$ の方向へのズレを無視するようになり、0の場合は特徴点の推定として扱うことができる。本論文では、一貫して $\mu = 0.99$ として適用する。

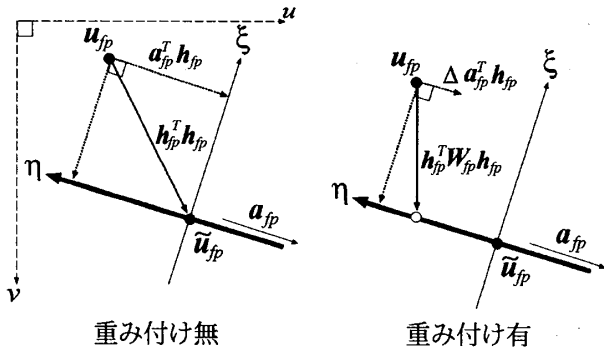


図3: 重み付けによる方向の2乗距離軽減

3次元上の特徴線は、世界座標系においてカメラ位置と画像上の特徴線を含む平面上に存在する。従って、その方向ベクトルは、観測された全ての画像におけるその平面の法線ベクトルに直交する方向となる。そこで、まず次式により  $V_p$  を計算する。

$$V_{fp} = [(a_{fp}^T | 0)^T \times U_{fp}]^T R_f^{-1} \quad (3)$$

$$V_p = [V_{1p}^T \quad V_{2p}^T \quad \dots \quad V_{Fp}^T] \quad (4)$$

ここで  $U_{fp}$  は、視点から画像上の特徴線の観測位置  $u_{fp}$  へ方向ベクトルであり、 $U_{fp} = (u_{fp}, v_{fp}, l)^T$  となる。特徴線の3次元上方向ベクトル  $A_p$  は、 $V_p V_p^T$  の最小固有ベクトルとして求められる。

### 3.2 3次元モデル生成

前節の処理によって推定された特徴線の3次元空間上の位置  $s_p$  と方向ベクトル  $A_p$  を用いて、物体形状を構成する線分要素に基づいた3次元モデルを生成する。

まず、復元された特徴線の交点を算出し、線分要素とその接続関係を検出する。平行に近い特徴線同士を除いた全ての2特徴線の組み合わせに対して交点を求める。この際、交差するはずの線がねじれの位置にある場合を想定し、2特徴線の最小距離の中点を交点とする。特徴線と交点との距離が一定範囲内の場合はその交点を線分要素の端点候補とする。3つの特徴線中の2つの組み合わせにより得られる3つの端点候補が一定範囲内にある場合、それら特徴線は一点で交差すると判定し、端点候補の重心をそれら特徴線の一端点とし、特徴線間に接続関係を与える。残った2特徴線のみからなる交点に対しては、最小距離となる点同士を結び、新たな線分を設定することで補完する。このようにして得られた端点間の線分を3次元モデルを構成する線分要素とする。

次に、線分の接続関係を用いて3角面を構成する。接続する2線分に対して、交点に対向する辺を追加し、3角面とする。重複する3角面は除去する。

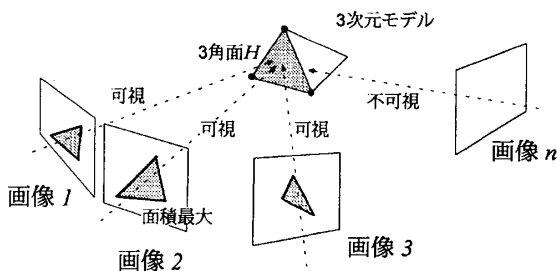


図4: 各3角面へのテクスチャ画像選択

最後に、3角面を構成した物体形状に対しテクスチャマッピングを行う。この際、各3角面に対しどの画像をテクスチャ画像として利用するか判定する。図4のように3角面  $H$  を全画像上に投影し、可視判定を行う。次に、可視である画像の中で投影結果が最大面積となる画像を3角面  $H$  の最適なテクスチャ画像として選択する。

### 4. 実験

屋外環境下の適用例として、大きさ約  $80 \times 120 \times 150$  cm の「椅子」の全周囲をデジタルカメラ (Canon EOS D30) を用いて、36枚からなる画像列 ( $720 \times 480$  画素) により撮影した。焦点距離は一定であり、撮影した画像の背景部分は除去した。図5に画像列中の2画像と、対応付けた特徴線を示す(図中の「楕円付き線」が特徴線を表す)。なお、特徴線はエッジ画像に対し入力を行っており、実際に入力した特徴線数は28本となった。

本手法を用いて生成した3次元モデルを図6に示す。物体の線分要素に大きな歪みが生じることもなく、良好な全周囲の3次元モデルが生成されていることがわかる。

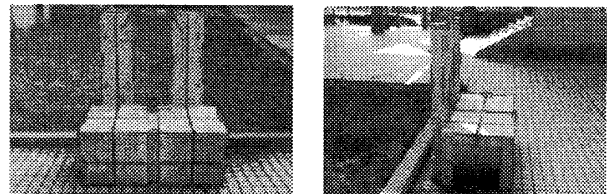


図5: 撮影した画像列の一部

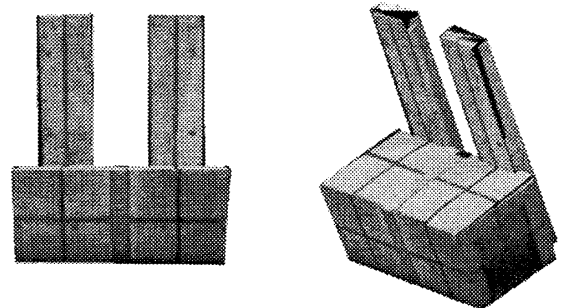


図6: 3次元モデルの生成

### 5. おわりに

本研究では、線分要素で構成された人工物を対象とし、全周囲を撮影した画像列から特徴線による形状復元を用いて3次元モデルを生成する手法について述べた。実験により、対象物の輪郭を表している線分要素に歪みが少ない良好な3次元モデルが生成できることを確認した。

今後の課題として、現在手作業で与えている特徴線の対応付けを自動化すること、および、3次元形状モデルの高精度化を行うことが挙げられる。

### 参考文献

- [1] 保田和隆, 椋木雅之, 浅田尚紀: “大局的幾何制約を用いた特徴点追跡に基づく画像列からの3次元モデル生成”, 情報処理学会論文誌 15 (採録決定).
- [2] Daniel D. Morris and Takeo Kanade: “A Unified Factorization Algorithm for Points, Line Segments and Planes with Uncertainty Models,” *Proceedings of Sixth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'98)*, January, 1998, pp. 696-702.