

## 傾斜角拘束を用いたエッジベース位置合わせの高速初期化手法

小竹 大輔 佐藤 清秀 内山 晋二 山本 裕之  
キヤノン株式会社 知覚システム開発センター

あらまし 傾斜角センサと線分特徴を利用したハイブリッドなカメラ位置姿勢推定手法を提案し、デモを実演する。提案手法は、カメラに装着したセンサから得られる傾斜角を拘束条件として利用することで、画像から検出した線分を用いて方位角候補を求めた後に位置候補を算出する 2 段階アルゴリズムにより、組み合わせ爆発の問題を回避する。その結果、画像から検出した線分と 3 次元モデル上の線分との対応関係に関する事前知識やカメラの位置姿勢に関する予測情報を一切用いることなしに、カメラ位置姿勢を高速に算出できる。この特徴は、複合現実感システムにおけるエッジベース位置合わせの初期化手法として有用である。提案手法の詳細を説明し、実験を通してその効果を示す。

### A Fast Initialization Method for Edge-based Registration Using an Inclination Constraint

Daisuke Kotake, Kiyohide Satoh, Shinji Uchiyama, and Hiroyuki Yamamoto  
Human Machine Perception Laboratory, Canon Inc.

**Abstract** – We propose a hybrid camera pose estimation method using an inclination sensor and line segments. While our method does not require any prior information on the camera pose and the correspondences between 2D and 3D line segments, it can calculate the camera pose fast using the two-step algorithm that calculates azimuth first and then position under the inclination constraint obtained from the sensor. These features meet the requirement of initialization for edge-based registration used in mixed reality systems. This paper describes the details of the method and shows its effectiveness with experiments. We show a demonstration of an AR task supporting application using this method.

#### 1. はじめに

複合現実感(Mixed Reality: MR)における仮想空間と現実空間との位置合わせの問題を解決するため、ビジョンに基づく多数の手法が提案されている[1-3]。シーン中に元来存在する点や線などの特徴を用いて位置合わせを行う「マーカレス位置合わせ」が実現できれば、MR の利用場面を大きく広げることが期待できる。

以下では、MR を実際に利用する場面として、オフィスや工場などの屋内シーンを想定する。このようなシーンは、天井、壁、床の境界、オフィス家具、組立て機械など、人工的な直線を基調とする物体が多い反面、テクスチャ情報に乏しいという特徴を有している。近年、このようなシーンに適した手法として、エッジベースの位置合わせ手法が提案されている[1-2]。これらの手法は「追跡」<sup>1</sup>に基づく手法であるため、その実用化のためには、過去の情報に依存せずにカメラ位置姿勢を推定し、追跡を開始/再開する位置合わせの「初期化」が必須となる。また、エンドユーザが MR システムを利用する際の初期化は、自動的に行われることが望まれる。しかし、エッジ情報を用いた自動初期化の研究は、これまでにほとんどなされていなかった。

本報告では、エッジ情報を用いた位置合わせの自動初期化手法として、現実物体(シーン)の 3 次元幾何モデルと、モデル中の 3 次元線分との対応が未知な入力画像上の線分とを用いて、物体に対するカメラ位置姿勢を高速に推定する手法を提案する。提案手法では、傾斜角センサをカメラに装着し、センサから得た傾斜角と画像から検出した線分をもとに、カメラの位置と方位角を算出する。提案手法は、以下の二つの要素によって成り立っている。

- ・ 傾斜角センサから得たカメラの傾斜角と、3 組以上の線分の 2D-3D 対応を利用して、カメラの位置姿勢を推定する幾何的解法(3 節)。
- ・ 線分の 2D-3D 対応が未知な状態から、上の幾何的解法を用いて組み合わせ問題を効率的に解き、カメラの位置姿勢を高速に推定する手法(4 節)。

以下、提案手法の詳細を説明し、実験を通してその効果を確認する。

#### 2. 前提条件

本手法における問題は、世界座標系におけるカメラの位置姿勢の推定である。提案手法は、傾斜角センサが計測するカメラの傾斜角と、画像から検出した線分と、後述する 3 次元幾何モデルの線分に基づいて、世界座標系におけるカメラの位置と方位角を算出する。

提案手法では、カメラに傾斜角センサを装着する。カ

<sup>1</sup> 本報告では、過去の位置合わせ結果を使って現在のカメラの位置姿勢を推定することを「追跡」と呼ぶ。

メラと傾斜角センサの相対的な姿勢は既知であるとし、傾斜角センサによりカメラの傾斜角が計測できるものとする。文献[5]で述べられているように、一般的なレートジャイロベースの3自由度姿勢センサは、内蔵する加速度センサが計測する重力方向により、傾斜角計測値のドリフト誤差を補償する機能を有している。重力加速度は人間の動きに対して十分大きいと仮定できるため、MRの位置合わせではこれが有効に機能して、信頼性が高い傾斜角を得ることができる。一方、方位角の計測値にはドリフト誤差の問題が残されている。以上の特徴を鑑みて、本手法ではこのような姿勢センサを傾斜角センサとして利用する。

現実物体の幾何構造は、線分の集合によって表現されているものとする。3次元幾何モデルは、各線分に関する情報として、二つの端点の世界座標系における位置および方向ベクトルを保持している。また、陰線消去の問題を取り扱うために、面の情報も保持している。

なお、画像上で検出された線分の端点は、必ずしも3次元幾何モデルの線分の端点とは一致しないものとする。これは、線分検出を行う際に、実際の画像処理では端点を精度よく検出することが困難なためである。

以下では、カメラ座標系の $x$ 軸、 $y$ 軸をそれぞれ画像の水平、垂直方向にとる。また、カメラ座標系の $z$ 軸をカメラの光軸方向にとる。カメラの光軸と画像平面は直交するものとし、その交点を画像座標系の原点とする。カメラは校正済みであると仮定し、焦点距離を1として画像平面をカメラ座標系における $z=-1$ にとる。

### 3. 幾何的解法

本節では、傾斜角センサから得たカメラの傾斜角と、3組以上の線分の2D-3D対応を利用して、カメラの位置姿勢を推定する幾何的解法を提案する。この手法は、Liuらの手法[4]にセンサから得られる傾斜角の拘束を導入したものと位置付けることが可能であり、次のような特徴を有している。

- センサから得たカメラの傾斜角を拘束条件として用いることで、未知パラメータをカメラの方位角と位置の4つに限定できる。
- カメラの方位角を、位置とは独立に求めることができる。さらに、方位角は1組の線分の2D-3D対応から算出できる。

以下では、3次元直線と画像上の直線との間に一般的に成立する幾何的関係[4]を述べる。さらに、傾斜角の拘束を導入した場合の幾何的関係を求め、線分の2D-3D対応が既知の場合のカメラ位置姿勢算出方法を述べる。

#### 3.1 3次元直線と画像上の直線との幾何的関係

世界座標系におけるカメラの位置を表す3次元ベク

トルを $t_{wc}$ 、姿勢を表す $3 \times 3$ 回転行列を $R_{wc}$ とすると、世界座標系 $x_w$ からカメラ座標系 $x_c$ への座標変換は次式のように表される。

$$x_c = (R_{wc})^{-1}(x_w - t_{wc}) \quad (1)$$

式(1)は次のようにも書ける。

$$x_c = R_{cw}x_w + t_{cw} \quad (2)$$

ここで、 $R_{cw} = (R_{wc})^{-1}$ 、 $t_{cw} = -R_{wc}t_{wc}$ である。

図1は、3次元空間中の直線と画像上の直線との幾何的な関係を示している。一般に、3次元直線は画像上に直線として投影される。この図では、2次元直線 $l$ は、3次元直線 $L$ を画像上に含む平面 $\pi$ とすると、2次元直線 $l$ は平面 $\pi$ と画像平面との交線と定義できる。

ここで、3次元直線と2次元直線との関係の定式化を行う。点 $P, Q$ を3次元直線 $L$ 上の任意の点として、それらの世界座標系における位置を $p = [p_x, p_y, p_z]^T$ 、 $q = [q_x, q_y, q_z]^T$ とすると、 $L$ は $p$ と $q$ によって記述される。また、直線 $L$ の方向ベクトルであるベクトル $PQ (= q - p)$ を $d = [d_x, d_y, d_z]^T$ で表す。式(2)より、ベクトル $CP, CQ, PQ$ は、カメラ座標系においてそれぞれ $R_{cw}p + t_{cw}$ 、 $R_{cw}q + t_{cw}$ 、 $R_{cw}d$ と表される。

平面 $\pi$ 上で定義される任意のベクトルは、平面 $\pi$ の法線ベクトル $n$ と常に直交する。そのため、ベクトル $CP, CQ, PQ$ は $n$ と直交する(図1)。法線ベクトル $n$ がカメラ座標系において表されているとすると、3つの直交条件(ベクトルの内積=0)は以下のように書ける。

$$n^T(R_{cw}p + t_{cw}) = 0 \quad (3)$$

$$n^T(R_{cw}q + t_{cw}) = 0 \quad (4)$$

$$n^T R_{cw}d = 0 \quad (5)$$

ここで $n^T$ はベクトル $n$ を転置したものである。

2次元直線 $l$ 上の任意の2点の画像平面における座標をそれぞれ $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ とすると、それらの座標はカメラ座標系において $x_{c1} = [x_1, y_1, -1]^T$ 、 $x_{c2} = [x_2, y_2, -1]^T$ と表される。ベクトル $x_{c1}, x_{c2}$ は共に平面 $\pi$ 上にあるため、 $x_{c1}, x_{c2}$ の双方に直交するベクトルとして平面 $\pi$ の法線ベク

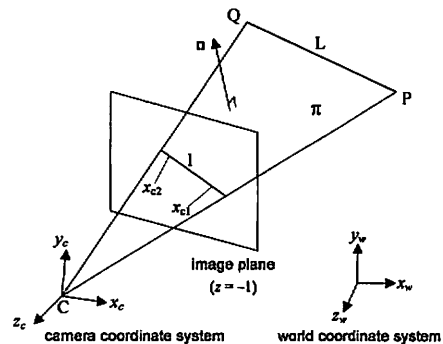


図1 3次元直線の画像への投影

ル  $\mathbf{n}$  を得ることができる。すなわち、直線  $l$  上の任意の 2 点の画像座標から、法線ベクトル  $\mathbf{n}$  を  $\mathbf{x}_{c1}$ ,  $\mathbf{x}_{c2}$  の外積 ( $\mathbf{x}_{c1} \times \mathbf{x}_{c2}$ ) として求めることができる。換言すると、法線ベクトル  $\mathbf{n}$  は 2 次元直線の情報を表しており、3 次元直線  $l$  と、その画像上への投影像である 2 次元直線  $l$  との関係が、式(3), (4), (5)によって表されている。

### 3.2 傾斜角拘束下での線形方程式

文献[5]では、センサから得られる傾斜角計測値を利用して、点情報を用いた PnP (Perspective  $n$ -Point) 問題を簡単にする手法が提案されている。本報告で述べる手法は、文献[5]のアイデアを直線に適用したものである。以下では説明を簡単にするために、世界座標系の  $y$  軸を鉛直上方向(すなわち重力軸の逆方向)にとる<sup>2</sup>。

世界座標系におけるカメラの姿勢  $\mathbf{R}_{wc}$  の傾斜角成分を表す回転行列を  $\mathbf{R}'_{wc}$ 、方位角成分を表す回転行列を  $\mathbf{R}^a_{wc}$  とすると、 $\mathbf{R}_{wc}$  は  $\mathbf{R}_{wc} = \mathbf{R}^a_{wc} \mathbf{R}'_{wc}$  のように分解できる。よって、 $\mathbf{R}_{wc}$  は以下のように分解できる。

$$\mathbf{R}_{wc} = (\mathbf{R}_{wc})^{-1} = (\mathbf{R}'_{wc})^{-1} (\mathbf{R}^a_{wc})^{-1} \quad (6)$$

一方、方位角を  $\theta$  とし、 $\alpha = \cos\theta$ ,  $\beta = \sin\theta$  と表すと、 $(\mathbf{R}^a_{wc})^{-1}$  は式(7)のように表される。

$$(\mathbf{R}^a_{wc})^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & -\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \beta & 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

$(\mathbf{R}'_{wc})^{-1}$  の各要素は、傾斜角のセンサ計測値により決定できる。ここでは、 $(\mathbf{R}'_{wc})^{-1}$  の各列ベクトルを  $\mathbf{r}_1$ ,  $\mathbf{r}_2$ ,  $\mathbf{r}_3$  として、 $(\mathbf{R}'_{wc})^{-1}$  を次式のように表す。

$$(\mathbf{R}'_{wc})^{-1} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3] \quad (8)$$

式(6)の回転行列の分解を用いると、式(3), (4), (5)は次のように書き直すことができる。

$$\mathbf{n}' (\mathbf{R}'_{wc})^{-1} (\mathbf{R}^a_{wc})^{-1} \mathbf{p} + \mathbf{n}' \mathbf{t}_{cw} = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{n}' (\mathbf{R}'_{wc})^{-1} (\mathbf{R}^a_{wc})^{-1} \mathbf{q} + \mathbf{n}' \mathbf{t}_{cw} = 0 \quad (10)$$

$$\mathbf{n}' (\mathbf{R}'_{wc})^{-1} (\mathbf{R}^a_{wc})^{-1} \mathbf{d} = 0 \quad (11)$$

ここで  $\mathbf{t}_{cw} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$  とおくと、式(9), (10), (11)に式(7), (8)を代入することにより、未知変数  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $t_x$ ,  $t_y$ ,  $t_z$  に関する次の 3 本の線形方程式が得られる。

$$p'_1 \alpha + p'_2 \beta + n_x t_x + n_y t_y + n_z t_z = p'_3 \quad (12)$$

$$q'_1 \alpha + q'_2 \beta + n_x t_x + n_y t_y + n_z t_z = q'_3 \quad (13)$$

$$d'_1 \alpha + d'_2 \beta = d'_3 \quad (14)$$

ここで、 $p'_1$ ,  $p'_2$ ,  $p'_3$ ,  $q'_1$ ,  $q'_2$ ,  $q'_3$ ,  $d'_1$ ,  $d'_2$ ,  $d'_3$  は、 $(\mathbf{R}'_{wc})^{-1}$ 、法線ベクトル  $\mathbf{n}$ 、3 次元直線上の点の位置  $\mathbf{p}$ ,  $\mathbf{q}$  及び方向ベクトル  $\mathbf{d}$  によって定まる定数であり、次式により算出される。

$$\begin{bmatrix} p'_1 \\ p'_2 \\ p'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}' \mathbf{r}_1 p_c + \mathbf{n}' \mathbf{r}_2 p_c \\ \mathbf{n}' \mathbf{r}_1 p_c - \mathbf{n}' \mathbf{r}_2 p_c \\ -\mathbf{n}' \mathbf{r}_2 p_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \\ q'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}' \mathbf{r}_1 q_c + \mathbf{n}' \mathbf{r}_2 q_c \\ \mathbf{n}' \mathbf{r}_1 q_c - \mathbf{n}' \mathbf{r}_2 q_c \\ -\mathbf{n}' \mathbf{r}_2 q_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} d'_1 \\ d'_2 \\ d'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}' \mathbf{r}_1 d_c + \mathbf{n}' \mathbf{r}_2 d_c \\ \mathbf{n}' \mathbf{r}_1 d_c - \mathbf{n}' \mathbf{r}_2 d_c \\ -\mathbf{n}' \mathbf{r}_2 d_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

### 3.3 直線の対応からの位置姿勢算出

式(12), (13), (14)は、すべての直線の 2D-3D 対応について立式される。これらの式には 5 個の未知変数が存在するが、3 本の方程式のうち 2 本が独立であるため、画像上の直線と 3 次元直線との対応が 3 組以上与えられれば、線形連立方程式を解くことで、カメラの位置及び方位角を算出できる。しかし、すべての直線が一点で交わる場合や、すべての直線が平行である場合には、一意な解を得ることができない。

この連立方程式の解き方には 2 種類ある。一つは、式(12)と式(13)を用いて、カメラの位置と方位角を同時に算出する方法であり、もう一つは、最初に式(14)を用いて方位角を算出した後に、式(12)または式(13)からカメラ位置を算出する方法である。式(14)を用いて方位角を求めるには、 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$  ( $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$ ) であることを利用して、1 組の 2D-3D 対応から方位角候補値 (0~2 個得られる) を算出し、異なる対応から共通に算出された方位角候補値を解として選択すればよい。

### 4. 対応が未知な状態からの解法

本節では、線分の 2D-3D 対応が未知な状態から、カメラの位置姿勢を高速に推定する手法を提案する。この手法は、3.3 節で述べた方位角と位置を段階的に算出する解法を効果的に用いており、その結果として次のような特徴を備えている。

- 組み合わせ問題を解くことなく方位角の候補を投票によって限定可能であり、実質的に 3 自由度の未知変数(位置)を求める問題に帰着できる。
- 方位角の投票によって画像上の線分と 3 次元モデル中の方向ベクトルとの対応関係が推定されるため、可能性のある対応を大幅に削減できる。

本手法の処理は、以下のように行われる。

**ステップ 1:** 画像上の線分と、3 次元幾何モデル中の方向ベクトルとのすべての組み合わせについて方位角を算出し、方位角ヒストグラムに投票する(4.1 節)。

**ステップ 2:** 方位角ヒストグラムから上位  $n$  個の方位角を方位角候補として選択する(4.1 節)。

**ステップ 3:** 各方位角候補について、無作為に 3 つの対応を選択して位置を算出する処理を反復し、妥当性の高い位置を位置候補として選択する(4.2 節)。

**ステップ 4:** ステップ 3 で得られた方位角候補と位置候補の組み合わせの中から、最も妥当なものを選択する(4.3 節)。

<sup>2</sup> 世界座標系における鉛直上方向が  $y$  軸と異なる場合には、想定する座標系との間の変換を介することで提案手法が適用できる。

ステップ 3 では多数の位置が算出されるため、計算負荷の軽い処理によって妥当性の低い位置を棄却する。ステップ 4 では評価対象の組み合わせがステップ 3 である程度削減されているため、比較的計算負荷の重い反復計算を用いて妥当性の判定を行う。この戦略によって、全体としての計算時間が短くなるようにする。

#### 4.1 投票による方位角の推定

式(14)では、方向ベクトル  $\mathbf{d}$  のみが 3 次元線分に関する情報として含まれている。そのため、式(14)を用いてカメラの方位角を算出する際には、画像上の線分と 3 次元線分との対応ではなく、画像上の線分と 3 次元方向ベクトルとの対応を考えればよい。そこで、似たような方向ベクトルを持つ線分を事前にクラスタリングしておいて、各クラスを代表する方向ベクトル及びそのクラスに所属する線分の ID を、3 次元幾何モデルの一部として保持しておく。

まず、画像上で検出された各線分を、3 次元幾何モデル中の各方向ベクトルのクラスと組み合わせる(ただし、方向が鉛直方向であるクラスを除く)。各組み合わせについて、式(14)を用いて方位角を算出し、これらの方位角をヒストグラムに投票する(ステップ 1)。そして、投票結果が上位の方位角  $n$  個を、方位角候補として選択する(ステップ 2)。これは、画像上の線分と 3 次元幾何モデルの線分(方向ベクトル)の正しい対応からは、ほぼ同一の方位角が算出されるという仮定に基づいている。また、方位角を投票する際には、算出に用いた「画像上の線分と 3 次元方向ベクトルの組み合わせ」を、その方位角に投票した組み合わせとして保持しておき、後段の位置推定処理において利用する。

後段の位置推定処理では、算出された方位角を既知の値として利用するため、方位角にはある程度の精度が要求される。そのためヒストグラムの階級はなるべく細かく分割されている方がよい。しかし階級の分割が細かすぎると、ヒストグラムの各階級における投票数が少なくなり、尤もらしい方位角を求めることができなくなる。ここでは、算出された方位角に相当する階級だけではなく、周囲の階級にも投票することにより、投票数が少なくなることを防ぐ。具体的には、算出された方位角に相当する階級の代表値を平均値とした標準偏差 1 度のガウス分布を仮定し、隣接する 4 つの階級に、各階級におけるガウス分布の値を加算する。そのため投票数は整数とならず小数となる。

#### 4.2 仮説検証による位置の推定

次に、各方位角候補  $\theta$  ( $i=1, \dots, n$ ) について、カメラ位置を推定する方法について説明する。

##### 4.2.1 2D-3D ペアリストの生成

各方位角候補は、その候補に投票を行った「画像上の線分と 3 次元方向ベクトルの組み合わせ」に関する情報を保持している。これらの組み合わせはその方位角に同意したものであるため、その方位角が正しいとするならば、正しい対応がこの中に含まれていると考えられる。したがって、ある方位角候補を仮定して位置の算出を行う際には、その候補が保持する「画像上の線分と 3 次元方向ベクトルの組み合わせ」から得られる線分の 2D-3D ペアのみを用いればよい。

まず、各方位角候補について、組み合わせが可能な線分の 2D-3D ペアのリストを生成する。ここで、2D-3D ペアとは、画像上の線分と 3 次元幾何モデル中の線分との一対一の組み合わせを表すものとする。2D-3D ペアのリストには、対応する可能性のある画像上の線分と 3 次元線分のすべての組み合わせを保持しておく。この組み合わせは、該当する方位角候補に投票した「画像上の線分と 3 次元方向ベクトルとの組み合わせ」を基に生成する。具体的には、各組み合わせについて、その方向ベクトルのクラスに分類されているすべての 3 次元線分との画像上の線分との組み合わせをリストに登録する。一つの方向ベクトルには通常複数の線分が分類されているため、1 本の画像上の線分に対して複数の 2D-3D ペアがリストに登録される。また鉛直ベクトルの方向ベクトルクラスが存在する場合には、 $d_3 = 0$ (式(14))を満たす画像上の線分がこのクラスに対応する可能性がある。そのため、 $d_3 = 0$  を満たすすべての画像上の線分と鉛直ベクトルを方向ベクトルとして持つすべての 3 次元線分との 2D-3D ペアもリストに登録する。

##### 4.2.2 仮説検証による位置算出

以上のように生成された 2D-3D ペアのリストから 3 つの 2D-3D ペアを取り出して、位置を算出することを繰り返し行う。以下、その詳細なアルゴリズムを説明する。

###### (1) リストからの 2D-3D ペアの選択

リストから無作為に 3 つの 2D-3D ペアを選択し、以下の条件を満たすかどうかの判定を行う。

- ・ 同一の画像上の線分が含まれていない。
- ・ 同一の 3 次元線分が含まれていない。
- ・ 3 本の 3 次元線分がすべて平行ではない。
- ・ 3 本の 3 次元線分が一点で交わらない。
- ・ 過去に選択されていない組み合わせである。

これらの条件がすべて満たされるまで、無作為な選択を繰り返す。条件が満たされたら(2)の処理へと進む。

###### (2) 位置算出

(1)で選択された 3 つの 2D-3D ペアから、式(12)、(13)を  $t_x, t_y, t_z$  についての連立方程式として解くことにより、 $t_x, t_y, t_z$  を得る。さらに算出したカメラ位置及び方位角候補

$\theta_i$ , 傾斜角計測値にもとづいてカメラの位置姿勢を算出する。

### (3) 位置及び方位角の妥当性検証

次に、算出した位置の妥当性を検証する。(2)で算出したカメラ位置姿勢に基づき、位置算出に用いた3本の3次元線分を画像上に投影する。さらに、面による隠れを取り扱うために、3次元幾何モデルの各面をデプスマップ上に描画する。以下の条件のうち一つでも該当するものがあれば、算出された位置を棄却し、(1)に戻って対応の選択をやり直す。

- 投影された3次元線分を含む画像上の直線と、それに対応する画像上の線分のいずれかの端点との距離が閾値以上である。
- 投影された3次元線分と、それに対応する画像上の線分のオーバーラップが全くない。
- 画像上の線分の端点が3次元幾何モデルの面によって隠されている(端点の奥行きは、投影された3次元線分上で最も近い点の奥行きとする)。

### (4) 評価スコアの算出

(2)で算出したカメラ位置姿勢に基づいて、3次元幾何モデル中の陰線以外の各線分を画像上に投影する。そして、各投影された線分について、最も近い画像上の線分を探索する。投影された線分と画像上の線分の両端点との距離が閾値未満であれば、その3次元線分は算出された位置及び方位角候補に同意したものととして、その数を計数する。そして同意した3次元線分の数で算出された位置の評価スコアとする。

### (5) 位置候補の選択

正しい位置を確実に求めるためには、リスト中のあらゆる組み合わせについて(1)から(4)の処理を行うことが望ましい。しかし、実時間で処理を可能にするため、位置算出の回数を制限し、その中で閾値以上の評価スコアを得た位置を候補として選択する。位置算出の回数(すなわち計算時間)と正しい位置が位置候補に含まれる可能性には、トレードオフの関係がある。

## 4.3 最も妥当な位置・方位角の選択

最後に、方位角候補 $\theta_i$ と、その方位角候補を用いて算出した位置候補との組み合わせの中から、最も妥当な位置候補と方位角候補の選択を行う(ステップ4)。

まず、方位角候補と位置候補を組み合わせることにより、複数の位置姿勢候補を生成する。次に、各位置姿勢候補を初期値として、エッジ情報を利用した位置姿勢の最適化を行う。その結果から、最良の位置姿勢候補を選択する。

エッジ情報を利用した最適化は、文献[2]と同様な方法により行う。ただし、文献[2]の最適化手法が6自由度

のカメラ位置姿勢を最適化するものであるのに対し、ここでは方位角成分にドリフト誤差がある3自由度姿勢センサの利用をしていることから、文献[6]のアイデアを利用し、4自由度のカメラの位置及び方位角のみを最適化する。

最適化された位置姿勢を、文献[3]で提案されている *quality-of-tracking test* の評価値を用いて評価する。もし評価値が閾値より大きければ、次の評価を行う。すなわち、最適化された位置姿勢を用いて3次元幾何モデル中の線分を画像上に投影し、文献[2]と同様に投影された線分を画像上で等間隔に分割する。そして、分割点の数  $N_1$  と、分割点のうち画像上で近傍にエッジが存在する分割点の数  $N_2$  を計数する。最後に、 $N_2/N_1$  の比が最も大きい位置姿勢を最も妥当な位置姿勢として選択する。*quality-of-tracking test* の評価値が閾値を超える位置姿勢が存在しない場合には、位置姿勢算出は失敗したと判定する。

## 5. 全自動エッジベース位置合わせ

本節では、4節で提案したカメラの位置姿勢推定手法を初期化手法として利用した、全自動のエッジベース位置合わせについて述べる。

図2は、提案手法と追跡型のエッジベース位置合わせを組み合わせた全自動エッジベース位置合わせのフローチャートである。最初期フレームでは、追跡を開始するためのカメラ位置姿勢がないため、提案手法を用いて初期化を行う。初期化の間にカメラが大きく移動してしまうと、初期化に成功したとしても以降の追跡に失敗する可能性が高まる。そのため、初期化はなるべく短時間で終わるのが望ましい。そこで、初期化処理時間を決める主要な要因である位置算出の回数(4.2.2節)を、この基準に基づいて決定する。すなわち、初期化に要する時間が数フレームに収まるように、位置算出の回数を設定する。位置算出の回数を少なくすると、正しい位置姿勢が得られない場合がある。そのような場合には初期化の失敗が検出されて、次に入力されるフ

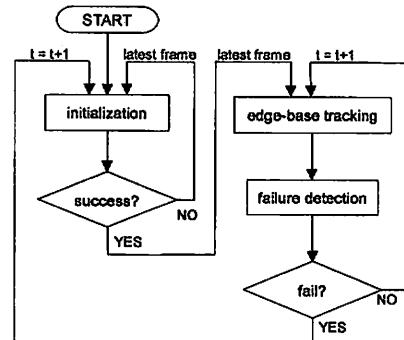


図2 全自動エッジベース位置合わせのフローチャート

フレームを用いた初期化が実行される。

一旦初期化が成功したら、得られた位置姿勢を初期値として追跡型のエッジベース位置合わせを行う。そのアルゴリズムは、前フレームで得られた位置姿勢を初期値とするという点を除き、4.3節で述べたものと同様である。この追跡型の位置合わせが成功し続ける限り、前フレームにおける位置姿勢推定結果に基づいたエッジベース位置合わせにより追跡を継続する。追跡の破綻は、前述した *quality-of-tracking test* の評価スコアに基づいて自動的に検出し、破綻している場合には自動的に初期化モードへ移行し、再度初期化を実行する。

## 6. 実験

本節では、提案手法の有用性を評価するために行った実験の結果を示す。実験では、実画像及び実センサデータを用いて、リアルタイムで位置姿勢推定を行う。

本実験では、Intel Pentium 4 3.8GHz(CPU)、nVIDIA GeForce7800GTX(グラフィクスチップ)が搭載されたデスクトップPCを用いる。また、カメラとして、キヤノン製ステレオビデオシーンスルーHMD(VH-2002)に内蔵された2台のカメラのうち1台を用いる。傾斜角センサとして、InterSense社 InertiaCube3を用いる。傾斜角センサはHMDに装着されている。InertiaCube3の傾斜角精度は実験的に十分であることが分かっている。InertiaCube3は3自由度姿勢センサであるので、姿勢計測値から傾

斜角成分を抽出する。なお、レンズの放射歪みを含むカメラの内部パラメータ、傾斜角センサとカメラの相対姿勢は予め校正しておく。

本実験では、図4(b)に示すような、家庭用プリンタが置かれているシーンを位置合わせの対象シーンとする。プリンタの3次元幾何モデルは、Eos Systems社製写真測量ソフトウェアPhotoModeler Proを用いて予め作成しておく。プリンタは一般的なポリゴンベースのCGモデルと同様に、線分と面の集合としてモデリングされている(図3)。作成したモデルは149本の線分及び228個の面から構成されているが、簡単のため、実験ではプリンタの上側及び前側の25本の線分のみを使用する。

図4に位置姿勢推定の成功例を示す。図4(a)は、入力画像から検出された2次元線分を示している。また、図4(b)は、算出された位置姿勢によって入力画像上に3次元線分モデルを重畳描画した結果を示している。図5は、提案手法を用いた全自動エッジベース位置合わせによるMRアプリケーションの例を示している。図5(a)では、得られたカメラの位置姿勢に基づいて、実際のプリンタ上に各部のアノテーションを表示している様子が見られる。図5(b)では、プリンタのインク交換作業の一つである「フタを開ける」という行為の指示をMRにより行う様子が見られる。

## 7. おわりに

本報告では、画像上の線分と3次元幾何モデルの線分との対応が未知であっても、カメラの位置姿勢を高速に推定する手法を提案した。今後は、複雑な形状あるいは大規模な物体に対して提案手法を適用可能とすることを目指す。

### 参考文献

- [1] T. Drummond and R. Cipolla, "Real-time visual tracking of complex structures," *IEEE Trans. on PAMI*, vol.24, no.7, pp.932-946 (2002).
- [2] L. Vacchetti, V. Lepetit, and P. Fua, "Combining edge and texture information for real-time accurate 3D camera tracking," *Proc. ISMAR '04*, pp.48-57 (2004).
- [3] G. Reitmayr and T. W. Drummond, "Going out: robust model-based tracking for outdoor augmented reality," *Proc. ISMAR '06*, pp.109-118 (2006).
- [4] Y. Liu, T. S. Huang, and O. D. Faugeras, "Determination of camera location from 2-D to 3-D line and point correspondences," *Proc. CVPR '88*, pp.82-88 (1988).
- [5] 小竹, 佐藤, 内山, 山本, "傾斜角拘束を利用したハイブリッド位置合わせ手法", 信学論, vol.J90-D, no.8, pp.2070-2080 (2007).
- [6] 佐藤, 内山, 山本, "UG+B 法:主観及び客観カメラと姿勢センサを用いた位置合わせ手法", 日本VR学会論文誌, vol.10, no.3, pp.391-400 (2005).

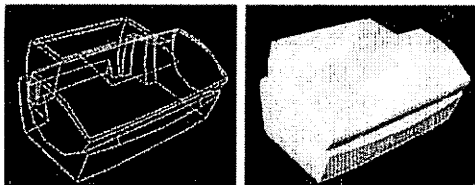


図3 3次元幾何モデル

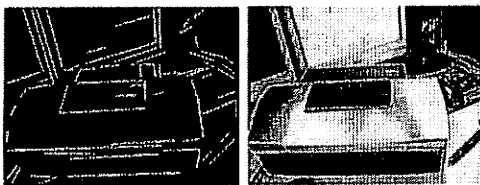


図4 位置姿勢推定の成功例



図5 エッジベース位置合わせを用いたARアプリ