

複合現実空間操作対話デバイスのための ハイブリッド型位置姿勢決定法

石黒 祥生, 木村 朝子, 柴田 史久, 田村 秀行

A Hybrid Method of Tracking Hand-held Devices for Interacting with Mixed Reality Space

Yoshio Ishiguro, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

Abstract — Several types of hand-held devices have been developed in order to enable interactive manipulations in mixed reality space. Position and posture estimations of the device are required for direct manipulation with virtual objects. Fiducial markers or large-scale motion capture systems are usually used for these estimations because they can be identified easily. However, they encounter problems with estimation stability, and the device shows decreased portability due to system scale, determining area, and disturbances. To avoid these problems, we propose a hybrid method for tracking hand-held devices that combines vision-based registration with pose information obtained from a physical 3DOF orientation sensor. In vision-based methods, estimations are performed with device forms and LED active markers. We confirmed that the new device tracking method can provide tracking stability.

Keywords: Mixed Reality, Registration, Tracking, Interaction Device

1. はじめに

本研究は、現実世界と仮想世界を融合した複合現実 (Mixed Reality; MR) 空間を操作するために対話デバイスの位置姿勢を検出・追跡するための新規方法を提案し、その有効性を実証することを目的としている。仮想空間全体を CG で描画する従来の人工現実感 (Virtual Reality; VR) に対して、複合現実感では自分の手や手にした対話デバイスをそのまま視認できることが大きな特長である。このため、MR 空間とのインタラクションには、ジェスチャ操作や対話デバイスを有効に駆使できる魅力的な実世界指向インタフェースの研究が行われている[1][2]。我々の場合、既存の道具のメタファを利用し、直観的にその利用法が理解できるアフォーダンスを有する「道具型デバイス」の研究開発を推進している[3]。

ところが、この種の対話デバイスの高度利用を図ろうとすると、その位置姿勢決定に適した手法やセンサ類が殆どないことが障害となってくる。体験者の頭部や手の位置姿勢の検出は、VR 研究の黎明期より不可欠の課題で、磁気センサ、超音波センサ等

の物理的なセンサ類がよく用いられてきた。MR システムもこれらを踏襲していたが、現実空間と仮想空間の幾何学的整合性の達成には、VR の場合よりも遥かに高い精度を要求される。精度が低いと細かい作業が難しいというように、対話デバイスの場合には利便性にも影響を与えてしまうなど、MR 研究の最重要事項はこの幾何学的整合問題であり、様々な手法の提案がなされている[4]。

最近の研究の主流は、物理的なセンサなどの利用よりも、現実世界に配置した人為的なマーカや光景中の特徴点を画像認識する Vision-Based な方法である。前者の代表例は ARToolKit [5] でその利便性の高さから広く用いられている。一方、後者の自然特徴や対象形状の情報を用いる手法では、近年、多数の自然特徴点を高速に処理してカメラ位置姿勢推定を可能にしている[6]。この流れを汲みながら、ジャイロ等の姿勢センサをカメラに取り付け、その姿勢情報を利用することで、位置姿勢推定精度を補強するハイブリッド手法[7][8]の研究も行われている。

ここで「カメラ位置姿勢」と書いたように、こうした方法は HMD 内蔵のカメラやそれを模した用途を想定している。即ち、体験者視点での頭部位置姿勢を追跡することが主眼であり、手にした対話デバイスの位置姿勢に対する配慮はない。対話デバイス

にカメラを装着／内蔵する方法もあり得るが、対話デバイスの設計上の制約が大きく頭部位置姿勢との整合も別の問題として上がっている。

本論文では、こうした状況を鑑み、美観や安定性等、複数の条件を考慮した上で、手で把持する対話デバイスに適した位置姿勢推定法を提案する。2章で対話デバイス位置姿勢決定の問題点とそれを考慮した推定手法について述べ、3章で提案手法の詳細を、4章で提案手法の評価実験について述べる。

2. 空間操作対話デバイスの位置姿勢決定

2.1 対話デバイス特有の問題

本研究の対象とするMR空間操作と対話デバイスは、図1のような形態を想定している。即ち、利用者はビデオシースルー型のHMDを装着し、手にした対話デバイスでMR空間内のCGオブジェクト（時には実物も）を直接操作し、選択・移動等のタスクを実行する。この時、対話デバイスの位置姿勢は利用者の手の動きに追従して実時間で検出・追跡でき、その動きはHMDで視認できるものとする。そのためには、次の(a)から(d)の制約条件や付帯条件を考慮した手法が望ましい。

(a) 磁気センサ、超音波センサ等は不適

VR分野でよく利用された磁気センサ(Polhemus社3SPACE FASTRAK等)は、対話デバイス筐体にソレノイドやスピーカ等を内蔵する場合(図2)、磁界が乱され、著しく精度が低下する。超音波センサも絶対精度が低いが、それを複数センサで補っている場合(InterSense社IS-900等)、天井一面にセンサ・バーを取り付ける等の大掛かりな装置となり、可搬性が低くなる。

(b) 大きな人為的マーカの付着は避けたい

ビデオシースルー型HMD利用であれば、ARToolKit等の人為的なマーカを対話デバイスに貼り付け、それを認識できさえすれば、6自由度の位

置姿勢は得られる。しかし、大きなマーカを毎度付着するのは美的には好ましくなく、手や腕の回転によってマーカが見えにくくなり、追跡を失敗する場合も少なくない。赤外光と再帰性反射材を利用した突起物を付着する場合も、同様に美観と手や腕の回転に弱いという問題は同様である[10]。進歩が著しいモーションキャプチャ装置は、精度的には十分で実時間利用も可能になってきたが、装置が高価で大掛かりになるのと、美観の両方で難点がある。

(c) 手持ちの小型デバイスであることを積極利用

以上を考慮すると、対象物そのものの視覚的な特徴を認識する方法を採用せざるを得ない。対話デバイスの形状はリモコンのような単純な直方体や、もっと複雑な形状もあるが、ほとんどが剛体である。その上、形状は既知であるのでModel-based Vision(MBV)による推定手法を採用しやすい。ただし、頭部追跡手法のように画面全体の特徴点を使うことはできず、この小さな対話デバイスの形状だけに頼ることは検出の安定性の問題がある。追跡が破綻した場合を考えれば、物理的な姿勢センサ等の併用や高度な安定化対策が必要となる。

(d) 対話デバイスを検出・追跡に好都合な仕様に

操作性・デザイン・対話機能を重視したものではあるが、我々が想定する対話デバイスは我々自身が製作する人工物であるので、そこに位置姿勢決定のために好都合な細工を施しておくことは可能である。ここで重視するのは、対話デバイスの用途や形状は多様であっても、一般性を失わずかつ大幅なコストアップにならない注文であれば、検出や追跡に適したデバイス改造は許される。そう大きくない姿勢センサを埋め込むことや、LEDを配しておいて必要な時に光らせる等の上策は、その範囲内で思いついた方法である。

2.2 位置姿勢の推定方法

前述の条件を考慮し、可搬性が高く視覚的違和感

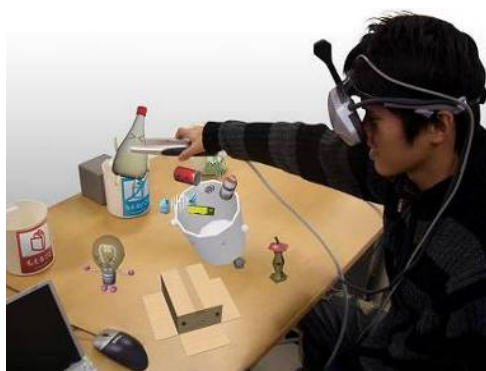


図1 MR空間での対話デバイス利用
Fig. 1 Using a hand-held device in MR space

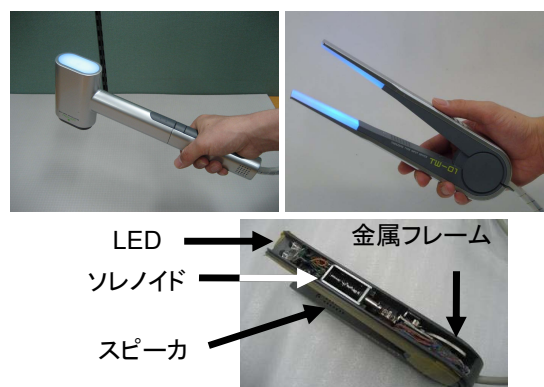


図2 MR空間で用いられるデバイスの例(左上:ハンマ型, 右上:ピンセット型)とその内部構造(下)
Fig. 2 Examples of devices, clockwise from top left: hammer type, tweezer type, inner workings

の少ない位置姿勢推定方法を考案した。これは、既に予備的な検討を行い、試行錯誤を繰り返した上で、安定した追跡結果を見込める方法で、次の (1) から (3) のような特長を有している。

(1) マーカを認識し位置を取得

(HMD 内蔵の)カメラで認識したマーカから位置姿勢を取得する。隠れ等の見え方による誤差は、次項の形状情報による推定を行うことで、誤差を減少させる。なお、マーカとして美観と調整のしやすさから、対話デバイスに LED を備える方式を採用する。

(2) 形状情報を利用し追跡

形状情報を利用した追跡のためにエッジ情報を用いた MBV を採用する。追跡に初期位置情報が必要のため、(1)のマーカにより得られた位置を利用する。

(3) 姿勢センサの利用

マーカや形状情報を利用した推定の際に、姿勢センサを併用することで精度を向上させ、姿勢の算出が必要ないことから、計算量を削減する。姿勢センサは磁気式、超音波式位置姿勢センサに比べ小規模であり、外乱にも強い。

また、モーションブレンダー等、形状情報を用いた位置姿勢推定では解決が困難な問題もある。そこで単純なマーカを利用した推定により、高速移動時の破綻から回復を瞬時に行う。

2.3 位置姿勢追跡を考慮した対話デバイス

大きな人為的マーカや再帰性反射材の利用を避けることは前述したが、LED が常備の場合も赤外域に及ぶものは避け、通常のカメラと可視光 LED を利用する。これは、これから製作する対話デバイスに多少の付加条件を課すことはそう大きな障害ではないが、位置姿勢決定のために MR 利用環境が特殊なものになりすぎることを避けるためである。

誤差を減少させるために複数の LED を搭載することが考えられるが、多すぎると利便性を損ねてしまう。姿勢情報は専用の姿勢センサから得られるため、LED は最低限必要な 2 つとする。この 2 つの LED を把持部以外のカメラで観察しやすい部分に設置する。カメラで観察しやすい位置は利用者自身が見やすい位置でもあり、ユーザフィードバックとしても利用できると考える。

形状情報を用いたトラッキングでは、類似形状や、複雑なテクスチャが背景にある場合、トラッキングが困難になる。そこで、搭載した LED をアクティブマーカとしてコンピュータでコントロールする。これにより、たとえ背景に同形状の物体があったとしても、点灯、消灯をコントロールすることにより、一意に対象を特定することが可能であり、不要な場合に消灯しておくことも可能である。

形状情報は、CAD などの 3D モデルがあればよ

く、カメラで観察できる（把持部以外の手に収まらない）部分があれば位置姿勢推定が可能である。形状が変化する場合、デバイスが軟体で構成されると形状情報取得することは困難だが、ほとんどの対話デバイスは剛体で構成されており、また、関節のような構造がある場合でも、回転角センサなどを内蔵すればその変化量を高精度に取得することも可能である。

また、姿勢センサをデバイス把持部に配置することで、手首の回転動作を姿勢センサにより取得する。我々のグループが提唱する「道具型デバイス」[3]は、本研究の以前から、情報提示機構として、先端に LED を内蔵し、位置姿勢取得のために、磁気センサを内蔵している (図 2)。その実利用での経験から、本研究では磁気センサを廃し、姿勢センサと MBV の併用法を考案した訳だが、各種小型電子機器のなかにも LED や LCD などの表示機器とインタラクションのために姿勢（加速度）センサを内蔵しているものも増えているなど、LED の利用自体は対話デバイスの設計上、十分想定し得る無理のない実用的なデザイン許容範囲であると考えられる。

3. ハイブリッド型位置姿勢推定方法の詳細

本手法では、前述のように推定の状態に応じて

- ・ LED マーカと姿勢センサによる推定
- ・ 対象形状と姿勢センサによる追跡

の 2 手法を併用することで、相互に不安定な要素を補い、高速で安定した推定を行う (図 3)。

3.1 LED と姿勢センサによる推定

1 台のカメラと姿勢センサを用いて、空間中の物

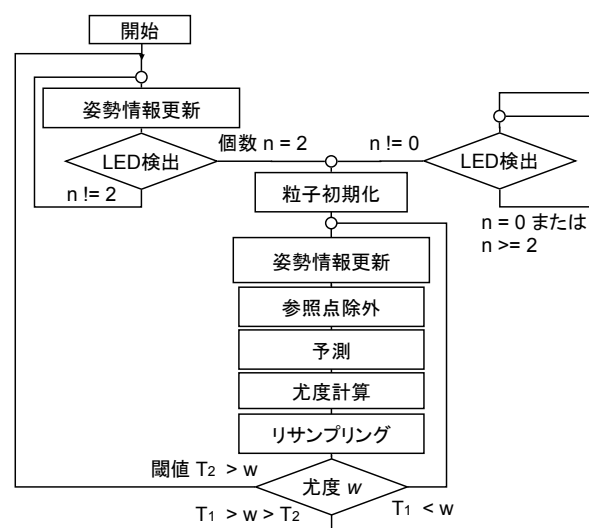


図 3 提案手法の処理手順
Fig. 3 Flow diagram of proposed method

体の位置を取得するためには、カメラ位置姿勢、その画像平面上での既知の2点とその位置関係、及び2点を結ぶ直線の姿勢が分かればよい(図4)。

位置姿勢が既知のカメラと、デバイスに内蔵した2つのLED、姿勢センサを用いて次の1から5の手順で位置姿勢を推定する。

- ステップ 1: LED 点灯色と同色の領域を除外
- ステップ 2: LED を点灯
- ステップ 3: 画像中の LED 点灯色の領域を抽出
- ステップ 4: 2点あれば領域の重心を求め、センサから基準座標系での姿勢 \mathbf{r}_{world} を取得
- ステップ 5: 2点間のスクリーン平面上での距離、姿勢を元に空間中の位置を計算

LED 間の実際の距離 d と姿勢センサから得られる姿勢ベクトル $\mathbf{r}_{world} = \{roll, pitch, yaw\}^T$ から、カメラ位置姿勢推定により既知である基準座標原点までのカメラからの距離にデバイスがあると仮定して LED が点灯した場合のスクリーン平面上での LED 2点間の距離 d_{zero} を予め求めておく。カメラからデバイスまでの距離と画像上の2つのLEDの距離は正比例の関係が成り立つため、観測した画像平面上でのLED2点間の距離 d_{proj} と、原点とカメラの距離 d_{cam} からカメラからデバイスまでの距離 D を求める。

$$D = \frac{d_{cam} \cdot d_{proj}}{d_{zero}} \quad (1)$$

観測画像平面での位置と距離 D からカメラからデバイスまでのベクトル、つまりカメラ座標系でのデバイスの位置 \mathbf{P}_{cam} が求まる。基準座標系でのカメラ位置姿勢 \mathbf{C}_{world} は既知であり、座標変換することで基準座標系でのデバイス位置 \mathbf{P}_{world} を求めることができる。最終的に姿勢センサから得られる姿勢ベクトル \mathbf{r}_{world} と算出した \mathbf{P}_{world} を組み合わせた $\mathbf{T}_{LED} = \{\mathbf{P}_{world}, \mathbf{r}_{world}\}^T$ が推定結果となる。

これにより、点灯したLED2点を認識することで、

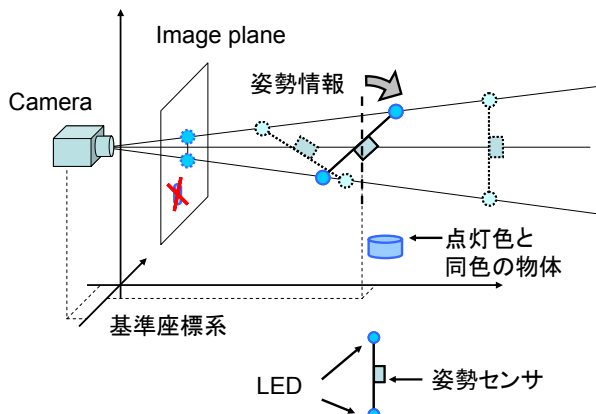


図4 2点と姿勢情報によるデバイス位置推定
Fig. 4 Measuring the device using pose information and LED.

1フレームで位置姿勢を推定することが可能になる。

3.2 形状情報と姿勢センサによる推定

LED と姿勢センサによりデバイスの位置姿勢推定を行うことができるが、デバイスに取り付けたLEDは見え方が姿勢により不均一であり計測した d_{proj} の誤差が大きい。また、常にカメラで観察できるとは限らず、不安定である。そこで、デバイス形状情報と姿勢センサを用い、トラッキングを行う。

形状情報を用いた位置姿勢推定として、粒子(Particle)フィルタ[10][11]を用いる。粒子フィルタは粒子(仮説)群の尤度から逐次的に推定を行う手法で、フィルタの計算にGPUを用いて高速化を図る工夫[12]も行われる等、単純で、並列処理向きの手法である。

本手法では、姿勢センサから姿勢情報を取得できるため、姿勢を推定する必要が無い。粒子フィルタの処理で、位置のみを推定後、姿勢センサの値を組み合わせて、最終的な位置姿勢推定結果とする。

粒子フィルタを用いた場合、時刻 t における状態 \mathbf{X}_t は N 個の離散的な粒子 $\mathbf{x}^{(i)}_{t-1}$ ($i = 1, \dots, N$) の状態と各粒子の尤度 $w^{(i)}_{t-1}$ から求めることができる。粒子フィルタは次の3ステップを繰り返すことで推定処理を行う。

- ステップ 1: 状態予測
- ステップ 2: 尤度計算
- ステップ 3: リサンプリング

粒子フィルタを用いる場合、初期状態での粒子分布(初期分布)を適切に行う必要がある。粒子数と処理速度はトレードオフの関係であるため、空間全体に粒子を分布させることは難しい。そこで本手法ではLEDと姿勢センサから求めた位置姿勢情報を利用する。LEDと姿勢センサから位置姿勢を推定した場合、画像平面における上下左右の誤差に対し、カメラの奥行き方向の誤差が大きい。そこで粒子をカメラの奥行き方向に広く、左右に狭い範囲に様に分布させることで、効率よく推定を行う(図5)。

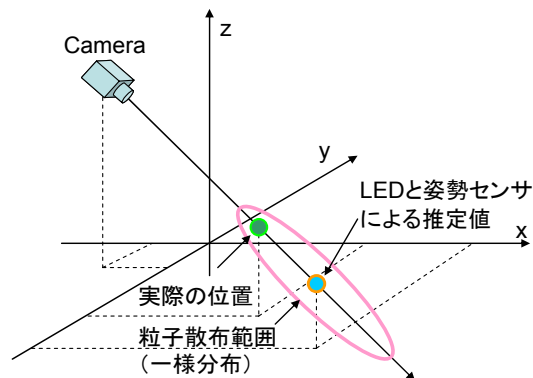


図5 粒子初期化時の分布範囲
Fig. 5 Distribution range of particle initialization

粒子の状態予測には移動ベクトルを用いる。時刻 t における分布は時刻 $t-1$ における位置 $\mathbf{p}_{t-1} = (x_{t-1}, y_{t-1}, z_{t-1})^T$ と時刻 $t-2$ の位置 $\mathbf{p}_{t-2} = (x_{t-2}, y_{t-2}, z_{t-2})^T$ から求め、その移動量 \mathbf{v}_{t-1} を粒子群に反映させる。

$$\mathbf{v}_{t-1} = \mathbf{p}_{t-1} - \mathbf{p}_{t-2} \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_t^{(i)} = \mathbf{x}_{t-1}^{(i)} + \mathbf{v}_{t-1} + r \quad (3)$$

なお、 r は平均 0 、標準誤差 σ^2 の正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従う正規乱数によるランダム移動量である。

次に、粒子の尤度 $w_{t-1}^{(i)}$ の計算に、画像から抽出するエッジとモデル上の M 個の参照点との距離 l を利用する (図 6)。

$$w_t^{(i)} = \sum_{j=1}^M \frac{1}{l_t^{(j)} + 1} + C^{(j)} \quad (4)$$

さらに、対象の色情報は既知であり、カラーカメラを用いることから、検出したエッジ近傍の色と予め各参照点に設定した対照色の HSV 値をもとに類似度 $C^{(j)}$ を算出し尤度を求める。なお、前状態の位置推定結果を元にデバイス自身で隠れる、または画面外になる参照点は隠れ参照点として除外する処理を行う (図 7)。

そして、算出した尤度を用いて、リサンプリングを行う。リサンプリングは全体の重み

$$W_t = \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} \quad (5)$$

に対する各 $\mathbf{x}_t^{(i)}$ の重み $w_t^{(i)}$ の確率

$$\tilde{w}_t^{(i)} = \frac{w_t^{(i)}}{W_t} \quad (6)$$

で $\mathbf{X}_{t|t-1} = \{\mathbf{x}_{t|t-1}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}_{t|t-1}^{(N)}\}$ から復元抽出することで $\mathbf{X}_{t|t} = \{\mathbf{x}_{t|t}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}_{t|t}^{(N)}\}$ を生成する。この粒子群の重心が位置推定結果 $\mathbf{P}_{\text{world}}$ となる。最終的に姿勢センサから得られる姿勢ベクトル $\mathbf{r}_{\text{world}}$ と組み合わせた $\mathbf{T}_{\text{particle}} = \{\mathbf{P}_{\text{world}}, \mathbf{r}_{\text{world}}\}^T$ が推定結果となる。

粒子フィルタは単純で高速な手法だが、対象が粒子群 $\mathbf{X}_{t|t}$ の範囲を大きく外れるような場合、追跡が破綻する場合がある。この場合、粒子の再分布を行い、追跡を再開する必要があるが、本手法では、その際に LED を再点灯することで、分布範囲を限定することが可能になり、トラッキングの安定性を向上させると考える (図 3)。

3.3 破綻検出と再位置決定

破綻した場合、それを正しく認識する必要がある。本手法では、最大尤度や粒子の分散等を用いて安定度を求め、破綻を検出する。安定性向上のため、破

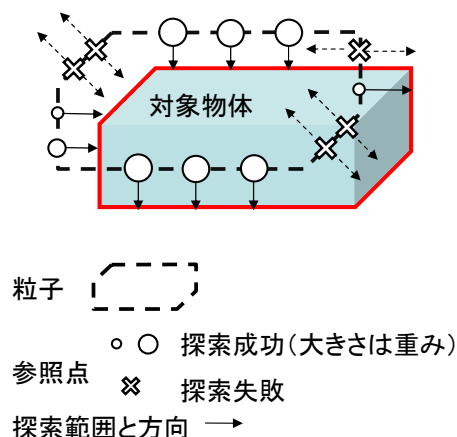


図 6 尤度決定法
Fig. 6 Likelihood estimation

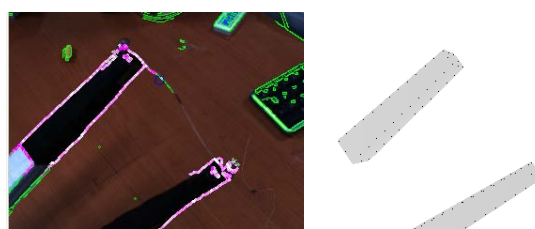


図 7 参照点除外処理 (黒点が参照点)
Fig. 7 Deselecting reference point

綻後の再位置決定に 2 段階の処理を行う。

第 1 段階： 安定度が閾値 T_1 を下回った場合、LED を点灯し、2 点の LED のうち 1 点でも検出した場合、スクリーン平面上でのその点と、尤度が T_1 を下回る直前のカメラからデバイスまでの距離を元に粒子を再散布し、尤度を計算する。

第 2 段階： 安定度が閾値 T_2 を下回った場合、LED を点灯し、2 点検出後、その位置姿勢をもとに粒子を再散布する (3.1 LED と姿勢センサの利用)。

2 段階に分けることにより、第 1 段階では、LED が 2 つ検出できない場合でも再推定を可能にし、それでも粒子フィルタが安定しない場合に LED と姿勢センサのみで位置姿勢推定を行うことで、完全な破綻を防ぐことができると考える。

4. 提案手法の適用結果とその評価

4.1 実験機器構成

カメラは Point Gray Research 社製 IEEE1394 カメラ FLEA2 を利用し、入力幅 320、高さ 240 pixel の 8 bitRGB 画像を用いる。カメラ位置推定誤差の影響を排除するため、実験ではカメラは固定とし、予め ARToolKit を用いてその位置姿勢情報を取得する。また姿勢センサは InterSense 社製 InertiaCube3 を利用する。角度分解能は roll, pitch 角 0.25 deg, yaw 角

1.0 deg である。LED マーカには2つの一般的なLED と、点滅コントロールのためにシリアル制御の IO ボードを用いる (図 8)。推定処理には CPU に Intel Pentium D 3.0 GHz, 1.0 GByte のメモリ, GPU として NVIDIA GeForce 7600 GS を搭載した PC を使用する。粒子フィルタの粒子数 $N = 150$ で実験を行った。

4.2 LED と姿勢センサによる初期位置推定

【目的】視野外からデバイスが入ってきた場合、どの程度の時間で粒子フィルタによる推定を開始できるか確認する。

【方法】デバイスを手に把持した状態でカメラ視野を出入りさせる。視野に入ってから粒子フィルタの結果が安定するまでのフレーム数を測定する。

【結果】図 9 に示すように、デバイスが視野に入ってから 30 フレーム程度で推定結果が安定した。処理速度は 1 フレームあたり平均 43 msec であった。

【考察】LED 2 点がカメラ視野内に入り、認識すると同時にその位置姿勢を推定している (4 フレーム目)。その結果を元に粒子の初期分布を決定し、18 フレーム目には粒子フィルタにより、ほぼ安定した

推定結果を出力している。33 フレーム目には視覚的ずれも減少しており、デバイスが画面に入ってから約 1 秒で安定した推定が行われていることが確認できる。姿勢によっては LED がすぐに認識できず、視野に入ってから認識するまでに時間がかかる場合もあったが、可視 LED を使用しているため、認識できていないことが視覚的にすぐに分かるというメリットもあった。

また、本実験ではカメラを固定して行った。実際の利用において測定用に高々 1 台のカメラを別途追加することは困難ではない。MR 利用では、HMD に内蔵するカメラを利用することも可能である。この際、実験で確認したように本手法では高速な初期位置推定を実現していることから、カメラの動きによるモーションブラーの影響でトラッキングが破綻しても、即座に復帰することが可能であることが十分考えられる。

4.3 提案手法を用いた実験

【目的】実際に LED と姿勢センサによる推定、形状情報と姿勢センサによる推定の 2 手法を併用し、ハイブリット型位置姿勢決定法がどの程度安定して推定できるか実験で確認する。

【方法】デバイスを把持した状態で実空間中の複数の位置が既知の対象と接触させ、軌跡を計測する。

空間中の既知の点は、基準座標系における座標 (x, y, z) が A (35, -38, 85), B (-65, -18, 190), C (-120, 18, 110), D (-175, -125, 105) (単位は mm) の 4 点で、その位置に実際に基準を設置し、A, B, C, D の順で接触させる。参考として、磁気位置姿勢センサシステムの中では比較的小型の Polhemus 社製 Patriot を用いて同様の操作を行う。その際、デバイスの内蔵機構 (ソレノイド, 図 2)

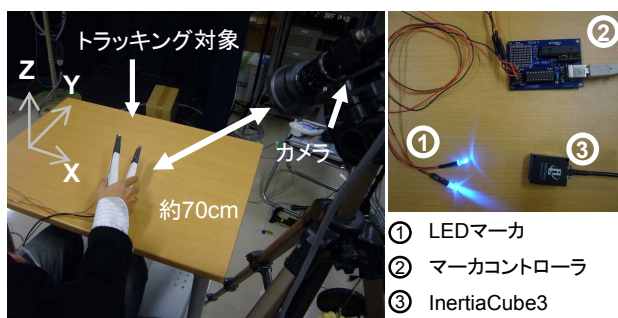


図 8 実験風景
Fig. 8 Experimental environment

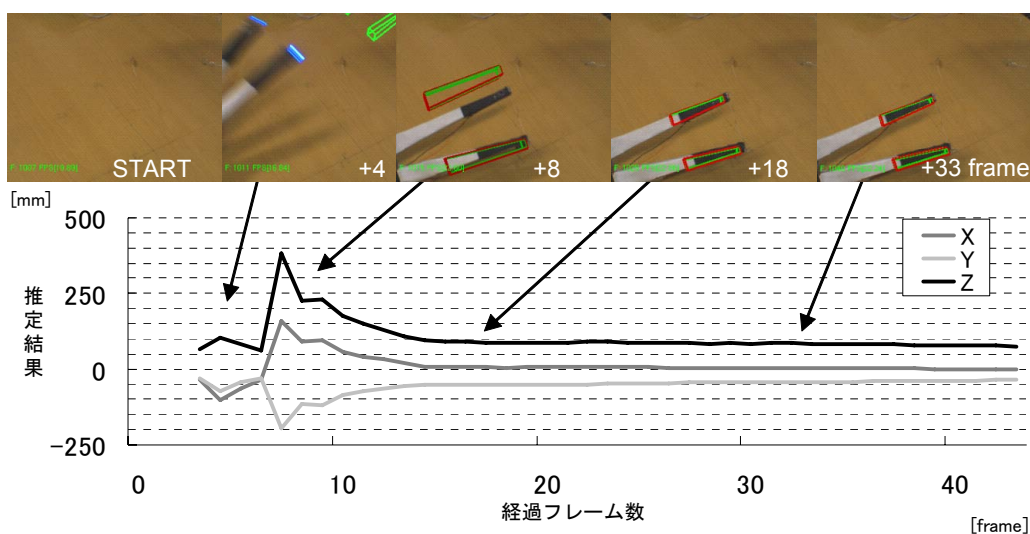


図 9 初期位置姿勢推定実験の結果
Fig. 9 Result of initializing speed experiment

を動かし、どの程度の乱れが発生するか測定する。

【結果】実際に提案手法、磁気センサ単体 (Patriot (only)), デバイスに内蔵し、他の内蔵機構を動作させた状態で計測した磁気センサ (Patriot (built-in)) のトラッキングの様子を X-Y, X-Z 平面にプロットしたものを図 10 に示す。また、その際の各フレームの様子を図 11 に示す。カメラ座標 (x, y, z) は (342.3, -327.5, 457.7) (単位は mm), 原点までの距離 658 mm である。

【考察】図 10 より、A から D の各点を中心とした直径 30 mm 程度の誤差で選択できていることが分かる。点 C から点 D に移動する際、図 11(a) のフレーム 240 では 25 mm 程度の誤差が発生している。しかし、視覚的ずれは小さく、さらに点 D に達し移動速度が下がると再び推定結果が安定している。また、フレーム 55 では、推定した結果と実際の位置がずれているが、フレーム 66 で再びデバイスを追跡していることが分かる。結果は ARToolKit によるカメラ位置姿勢推定誤差を内包するが、実際の MR 利用

においてもカメラ位置姿勢推定誤差は発生するため、考慮しない。

誤差は移動時に大きく、誤差数 cm では、描画や仮想物体に対する加工等の常に高い精度が要求される用途によっては用いることが困難である。しかし、磁気センサを用いた場合、外乱が発生しない状況では高い精度で測定できるが、内蔵機構を動作させ、外乱が発生した状況では、常に値が大きく乱れている。このため、提案手法は、デバイスのように選択や移動等、操作によっては十分な精度であり、視覚的ずれが少ない点も対話デバイスの位置姿勢推定に適している。

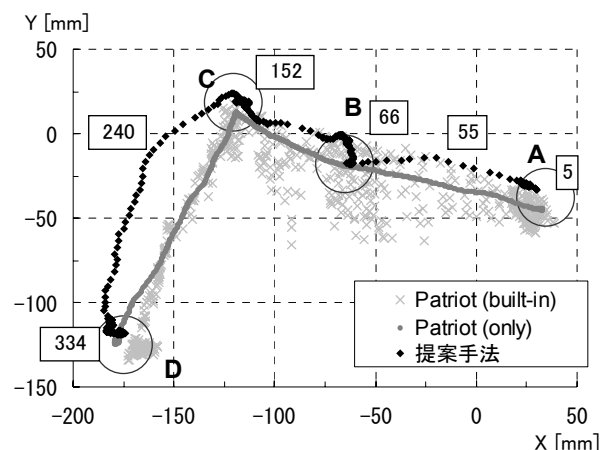
また、図 11(b) のように、素早く動くことでブーラーが発生し、粒子フィルタの追跡が破綻した場合、自動的に LED が点灯し再追跡する。さらに、図 11(c) のように他の形状や、背景に類似形状がある場合でも対象を一意に特定し、追跡が可能である。

4.4 仮想物体の選択・移動

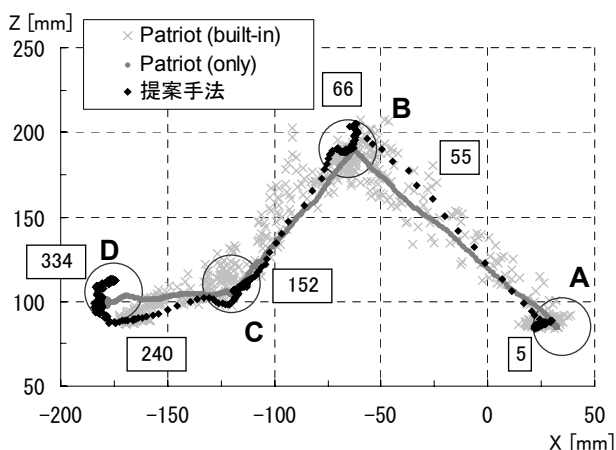
【目的】実際に仮想物体の選択・移動を行う。

【方法】机上に複数の仮想物体を配置する。仮想物体は約 4 cm の大きさのアヒルであり、ピンセット型のデバイスを利用して選択・移動を行う。処理用 PC の構成を Intel Core2 Duo 3.0 GHz, 2.0 GBytes のメモリ, GPU を NVIDIA GeForce 9800 GTX に変更し、粒子数 = 400 で実験を行った。

【結果】選択移動の様子を図 12 に示す。また、各処理時間を表 1 に示す。表中の処理時間は 300 フレー

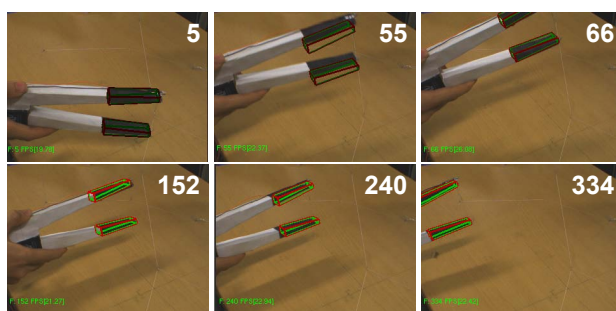


(a) x - y 平面



(b) x - z 平面

図 10 トラッキング実験結果
Fig. 10 Results of tracking experiment



(a) トラッキングの様子 (数字は経過フレーム数)



(b) ブーラーの発生と再推定



(c) ハンマ (左) や直方体 (右) の追跡

図 11 動作結果
Fig. 11 Results of experiment

ム計測し、1フレームあたりの平均処理時間を示す。

【考察】図12では、実際に仮想物体であるアヒルを複数の中から一意に選択している様子であり、選択移動に十分な精度を確認した。また、画像情報を用いた位置姿勢推定を行っているため、マスク処理を施すことで、デバイスと仮想物体の前後関係を正しく表現することができ、オクルージョン問題を高い精度で解決している。長時間使用した場合に姿勢センサのドリフト誤差が発生する可能性があるが、ドリフト誤差解決のために画像情報を用いて方位角を推定する手法などがあり、組み合わせることで容易に解決できる問題であると考えられる。



図12 仮想物体の選択移動
Fig. 12 Direct manipulation for CG objects

表1 処理速度
Table 1 Processing time

処理内容	処理時間 [msec]
画像入力, 姿勢センサ値更新	20.9
LED 検出処理	8.82
粒子フィルタ処理 (状態予測, 尤度計算, 復元抽出)	12.8
隠れ参照点除外処理	0.327

5. むすび

これまで磁気センサの利用などに止まっていたMR空間におけるデバイス利用のための位置姿勢決定法として、対話デバイスの特性を考慮し、姿勢センサとLEDマーカ、さらに形状情報を利用した、ハイブリッド型位置姿勢決定法を提案した。

本提案手法では、安定した推定が可能だが精度の低いLEDと姿勢センサを利用した位置姿勢決定法と、精度が高いが破綻することがある形状情報と姿勢センサを用いた位置姿勢追跡法という、2種類の位置姿勢推定法を組み合わせることで、

- ・追跡が破綻した際、自動的にLEDと姿勢センサによる位置決定に切り替えることで、十分な処理速度と安定した追跡を実現し、選択移動デバイスに必要な十分な精度を確認
- ・画像情報を用いた推定を行うことで、視覚的なずれの小さい処理を行うことができ、デバイスと仮想物体の前後関係を正しく表現することが可能という処理を実現し、この結果、デバイスの利便性の向上にも寄与できると考える。

本手法は環境設置型の大掛かりなセンサシステムを必要としないため、簡易な機器構成で対話デバイスの位置姿勢を推定することが可能である。このためカメラ位置姿勢推定法と組み合わせることで、可搬性が高く、インタラクション可能なMRシステムの構築が可能になり、対話機能の充実につながると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、JSTのCREST研究「映画制作を支援する複合現実型可視化技術」(研究代表者: 田村秀行)、並びに、さきがけ研究「空間型メディア作品を強化する7つ道具型対話デバイス」(研究代表者: 木村朝子)の支援によるものである。

参考文献

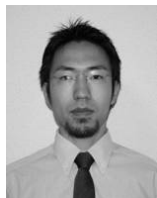
- [1] 暦本純一: “実世界指向インタフェース: 実世界に拡張された直接操作環境”, 情報処理, Vol. 43, No. 3, pp. 217 - 221, 2002.
- [2] 石井裕: “タンジブル・ビット—情報と物理世界を融合する, 新しいユーザ・インタフェース・デザイン—”, 同上, pp. 222 - 229, 2002.
- [3] 上坂, 木村, 柴田, 田村: “複合現実空間との対話操作のための道具型デバイス”, 信学技報, Vol. 107, No. 427, PRMU2007-170, pp. 81 - 86, 2008.
- [4] 佐藤, 内山, 田村: “複合現実感における位置合わせ手法”, 日本VR学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 171 - 180, 2003.
- [5] <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- [6] G. Klein and D. Murray, “Parallel tracking and mapping for small AR workspaces,” Proc. ISMAR'07, pp. 225 - 234, 2007.

- [7] 小竹, 佐藤, 内山, 山本: “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”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 183 - 194, 2008.
- [8] G. Klein and T. Drummond, “Tightly integrated sensor fusion for robust visual tracking,” Proc. BMVC’02, Vol. 2, pp. 787 - 796, 2002.
- [9] 中里, 神原, 横矢: “ウェアラブル拡張現実感のための不可視マーカと赤外線カメラを用いた位置・姿勢推定”, 日本 VR 学会論文誌, Vol.10, No.3, pp. 295 - 294, 2005.
- [10] 樋口知之: “粒子フィルタ”, 信学誌, Vol. 88, No. 12, pp. 989 - 994, 2005.
- [11] M. Isard and A. Blake, “CONDENSATION—Conditional density propagation for visual tracking,” *Int. J. Computer Vision*, Vol. 29, No. 1, pp. 5 - 28, 1998.
- [12] G. Klein and D. Murray, “Full-3D edge tracking with a particle filter,” Proc. BMVC’06, Vol. 3, pp. 1119 - 1128, 2006.

(2009 年 3 月 10 日受付)

[著者紹介]

石黒 祥生 (学生会員)



2005 年豊田工業高等専門学校情報工学科卒. 2007 年立命館大学理工学部情報工学科卒. 2009 年同大学院理工学研究科博士前期課程終了. 現在東京大学大学院学際情報学府博士課程在学中. 複合現実感, 実世界指向インタフェースの研究に従事. 情報処理学会, ACM 学生会員.

木村 朝子 (正会員)



1996 年大阪大学基礎工学部卒. 1998 年同 大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 同大学助手, 立命館大学理工学部助教授, 科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て, 2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授. 博士 (工学). 実世界指向インタフェース, 複合現実感, ハプテックインタフェースの研究に従事. 2001 年より 2002 年まで Mayo Clinic にて Special Project Associate. 電子情報通信学会, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会, ACM, IEEE 各会員. 本学会学術奨励賞, 情報処理学会山下記念研究賞等受賞.

柴田 史久 (正会員)



1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了. 1999 年同 研究科博士後期課程修了. 大阪大学産業科学研究所助手を経て, 2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授. 現在, 同情報理工学部情報コミュニケーション学科准教授. 博士 (工学). モバイルコンピューティング, 複合現実感等の研究に従事. IEEE, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会, 情報処理学会等の会員. 2005 年本学会学術奨励賞受賞.

田村 秀行 (正会員)



1970 年京都大学工学部電気工学科卒. 工業技術院電子技術総合研究所, キヤノン (株) 等を経て, 2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授. 現在, 同情報理工学部メディア情報学科教授. 工学博士. 1997 年より 2001 年まで, MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた. 本学会元理事, 現在, 評議員, 複合現実感研究委員会顧問. 編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer) 「コンピュータ画像処理」(オーム社) など. 電子情報通信学会フェロー, IEEE, ACM, 情報処理学会, 人工知能学会, 映像情報メディア学会等の会員. 情報処理学会論文賞, 人工知能学会功労賞等を受賞.