

美観と頑健性を両立させた複合現実感用 半人為的幾何位置合わせマーカの研究 (第 9 報) ～TT 方式におけるトラッキングと位置姿勢推定の並列化～

Visually Elegant and Robust Semi-Fiducials for Geometric Registration in Mixed Reality (9)
- Parallelization of Tracking and Geometric Registration for SFINCS-TT Markers -

栗田真輔, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行

Shinsuke Kurita, Fumihisa Shibata, Asako Kimura and Hideyuki Tamura
立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Abstract: As a registration method in mixed reality (MR), we have developed the SFINCS-TT (Two-Tone colored marker) method using small markers whose color is similar to that of the background object. This paper describes the tracking algorithm newly introduced into the SFINCS-TT method. The SFINCS-TT method requires image processing which takes much time to calculate position and orientation based on the vertices of the four corners of the marker. Therefore, we introduce the tracking process which tracks the vertices of the marker detected in the previous frame to improve the performance of the marker detection. However, the tracking process cannot detect a newly appeared marker in the scene. Therefore, we have implemented a parallel algorithm which executes both marker tracking and geometric registration simultaneously. This algorithm enables the system not only to track detected vertices efficiently but also to find newly appeared markers.

Key Words: mixed reality, semi-fiducial marker, tracking

1 はじめに

複合現実感 (Mixed Reality; MR) では幾何学的整合性の達成が非常に重要な課題であり, 様々な手法が研究されている. 近年では画像ベースの手法を中心に広い分野で研究が進められており, 中でも自然特徴点を用いた手法が主流となりつつある. 一方で, 人為的マーカを用いた手法も, マーカを設置するだけで容易に使用できる点, マーカを移動させた場合にも位置合わせが可能な点などから, 広く用いられている. しかし, これらの人為的マーカは検出精度向上のために, 特徴的で目立つ色や形状にデザインされていることが多く, マーカの設置により周辺的美観を損ねるという問題もあわせ持っている. そこで我々は, SFINCS (Semi-Fiducial INvisibly Coded Symbols) [半人為的, 目立たないよう符号化された記号群の意] という概念を提案し, 美観と頑健性を両立させた半人為的マーカの研究を行っている. この概念に沿った位置姿勢推定手法として, 我々はマーカを貼付する面と同系色のマーカを利用する「ツートンカラー方式 (Two-Tone colored marker 方式, 以下, TT 方式)」を提案した[1]. この方式では初期位置合わせで画像全体を走査してマーカ検出を行い, マーカの四隅の頂点を基準として位置姿勢を推定している. 初期位置合わせ以降は走査範囲を限定してマーカ検出処理を行う事で位置姿勢推定までの処理時間を短縮していたが, 位置姿勢推定の頑健性に課題があった. そこで我々は前フレームに検出したマーカの頂点を追跡するトラッキング処理を導入する事で, 単一マーカによる位置姿勢推定処理の頑健性向上

と効率化を実現した. また, トラッキング処理とマーカ検出処理を 2 本のスレッドを用いて並列実行する事により, 処理の効率化と複数のマーカの同時利用を実現した. 本稿では, この TT 方式に新たに導入したトラッキング処理およびトラッキング処理とマーカ検出処理の並列化について報告する.

2 TT 方式

2.1 概要

TT 方式は設置面と同系色の小型マーカ (マーカ・エレメント) の組みからなるマーカ・ユニットを用いてカメラの位置姿勢を推定する手法である. 同系色とは色相が同一で明度と彩度が異なる色を指し, 同系色マーカを用いることでマーカの設置による周辺的美観への影響を抑えている. 同様に, マーカ・エレメントには実物体の隅に設置しても視覚的に違和感を覚えにくい単純な形状を用いる事で周囲との調和を図っている. カメラ位置姿勢は図 1 のようにこのマーカ・エレメントを 4 つもしくは 6 つ組み合わせた集合であるマーカ・ユニットを検出し, マーカ・ユニットの四隅の頂点を利用して推定する. マーカ・エレメントには形状の異なる 7 種類を用いており, これらの組み合

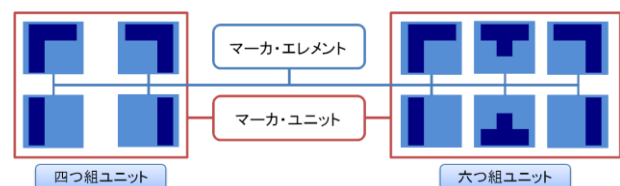


図 1 マーカ・エレメントとマーカ・ユニット

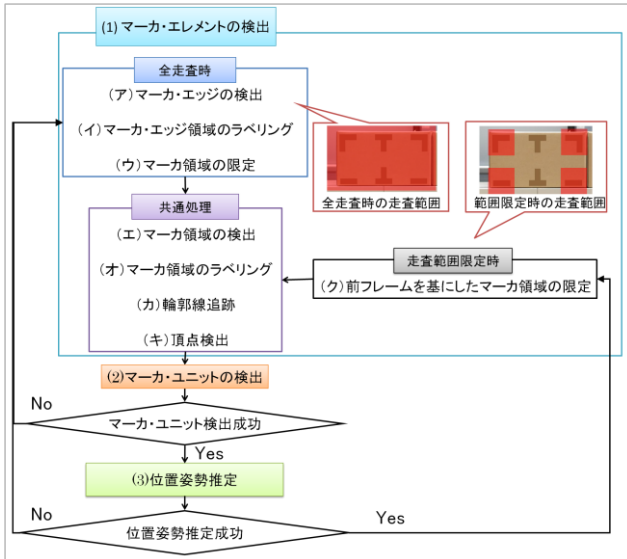


図 2 従来の位置姿勢推定処理

わせに対して ID を付与している[2].

2.2 従来の位置姿勢推定処理の流れ

TT 方式の処理の流れを図 2 に示す。本手法では位置合わせの処理を(1)マーカ・エレメント検出, (2)マーカ・ユニット検出, (3)位置姿勢推定の 3 つのプロセスの順に処理を行っている。(1)マーカ・エレメント検出のプロセスでは, 初期位置合わせ時に入力画像を全走査してマーカ・エレメントの検出を行うため, 図 2 中の (ア) から (キ) までの処理後に, (2), (3)の処理を実行し初期位置合わせを行う。位置姿勢推定が成功した場合, それ以降のフレームでは (ア) から (ウ) の処理を, (ク) の処理に置き換えることで処理の高速化を実現している。(ク) では, 走査範囲を限定した上でマーカ・エレメントの検出処理を実行しているが, マーカ・エレメントが一部でも走査範囲外に出た場合には, 位置姿勢を推定できない問題があった。

3 トラッキング処理

3.1 概要

従来の走査範囲を限定したマーカ・エレメント検出処理の課題を, マーカ・ユニットの頂点を検出・追跡するトラッキング処理を導入する事で解決する。

この処理では以下の TT 方式の特徴を考慮している。

- (1) トラッキング処理時は前フレームに検出したマーカのスクリーン座標系中の位置情報を保持している
- (2) マーカと設置面は HSL 色空間において色相が同一で彩度と明度が異なる同系色である

マーカ・ユニットの頂点検出は特徴(1)から走査範囲を限定した上でコーナ検出法を用いる。コーナ検出法には頂点の検出精度が高い Harris オペレータを使用する[2]。この処理により, マーカ検出処理の省略が可能となり, 処理速度の向上を実現した。また, 特徴(2)を考慮し, コーナ検出に用いる入力画像に L 値画像を使用する事で, 頂点の検出精度が向上した。更にカメラが瞬間的に大きく移動し, 限定した走査範囲から検出対象である頂点を外れる場合があるが, コーナ検出の範囲を拡大する事でこの問題を解決

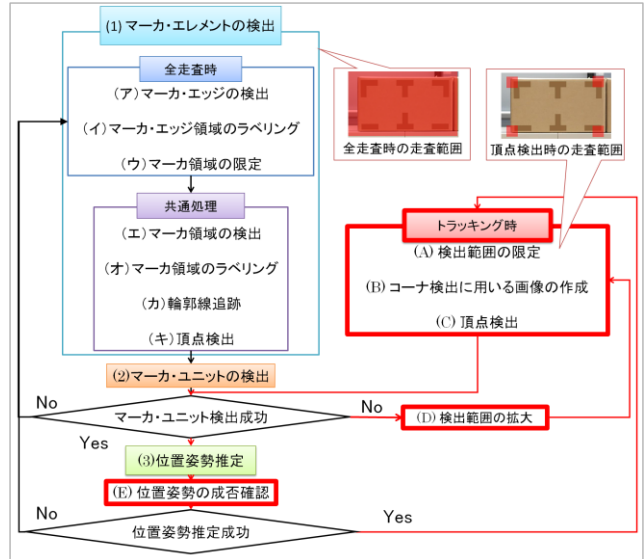


図 3 トラッキング導入後の位置姿勢推定処理

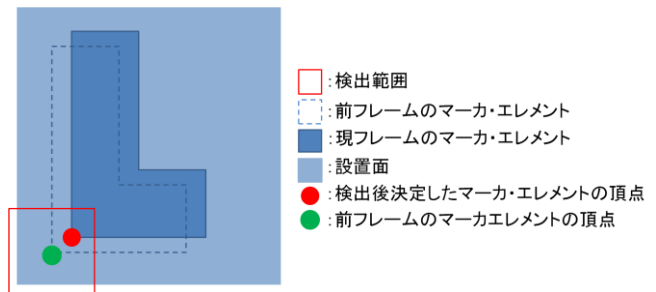


図 4 頂点の検出範囲

している。

3.2 処理の流れ

トラッキング処理では, まず図 3 の (A) ~ (C) までの処理によって, マーカ・ユニットの頂点の検出を行う。検出に失敗した場合は (D) の検出範囲の拡大処理後に再度頂点を検出する。頂点検出に成功した場合は, 頂点の位置を基準にカメラの位置姿勢を推定し, 推定した位置姿勢が正しいかの成否判定を行う。成功と判定した場合はその位置姿勢を使用し, 失敗と判定した場合はトラッキング破綻とする。以下に, (A) ~ (E) までの具体的な処理を以下に示す。

(A) 検出範囲の限定

前フレームで検出したマーカ・ユニットの各頂点の座標を利用し, 図 4 に示すように各頂点周辺に走査範囲を絞ってコーナ検出を行う。走査範囲は, 頂点を中心とした正方形の範囲となっており, 入力画像の解像度によって変更が可能である。

(B) コーナ検出に用いる画像の作成

コーナ検出には単一チャンネルの画像を使用する。ここでは L 値画像を使用する。

(C) 頂点検出

L 値画像を作成した後に Harris オペレータを用いてマーカ・ユニットの各頂点の検出を行う。

(D) 検出範囲の拡大

上記の処理によって頂点検出に失敗した場合に 1 度だけ走査範囲を拡大し再度頂点検出を行う。走査範囲の拡大

は最初に設定した正方形の一辺の長さを 1.5 倍にした範囲とする。

(E) 位置姿勢の成否判定

位置姿勢推定の成否判定には、前フレームと現フレームのカメラ座標系から世界座標系への位置姿勢変換行列の差異を使用する。変換行列の構成の変化量が経験則により決定した閾値よりも大きかった場合、その時点でトラッキングは破綻とする。もし、変化量が小さく一定の閾値内で変化し続けていた場合はトラッキング成功とする。

3.3 トラッキング処理の課題

TT 方式の新たなトラッキング処理としてコーナ検出法を用いたマーカ・ユニットの頂点追跡処理の実装を行ってきた。その結果、従来のトラッキング処理と比較して高速で頑健性の向上した位置姿勢の推定処理を実現した。しかし、このトラッキング処理は初期位置合わせで検出したマーカの追跡を前提とした処理であるため、入力画像中に新たに出現したマーカの検出には対応できない。

4 マーカ検出処理とトラッキング処理の並列化

考案したトラッキング処理はシーン中に新たに出現したマーカの検出には対応しておらず、またトラッキング破綻時の復帰にも多くの時間を要する。そこで 2 つのスレッドを用意し、トラッキング処理中にマーカ検出処理を並列実行する事で、新たに出現したマーカの検出とトラッキング破綻からの復帰処理の高速化を実現した。本処理では初期位置合わせ以降の処理をマルチスレッド化し、検出したマーカのトラッキング処理を行うトラッキングスレッドと、画像全体を走査してマーカ検出を行うマーカ検出スレッドの 2 つのスレッドを並列実行している。また、各スレッドで共有可能な構造体を用意しており、マーカ検出スレッドで検出したマーカの情報はこの構造体に格納し、トラッキングスレッドはこの構造体から随時検出したマーカの情報を取得する。尚、マーカ検出スレッドは検出したマーカの情報を構造体に格納する処理のみを実行し、トラッキングスレッドではそれ以外のすべての処理を受け持つ。

4.1 複数マーカのトラッキング

マーカ検出スレッドで検出したマーカのスクリーン座標中の位置情報をトラッキングスレッドと共有し、その情報を利用して頂点を検出する事で複数マーカのトラッキング処理を実現している。

4.1.1 複数のマーカ検出

マーカ検出スレッドでのマーカ検出には初期位置合わせ時と同様の処理を用いる。この初期位置合わせ時のマーカ検出処理は入力画像全体を走査するため、複数のマー

カ・ユニットの検出が可能である。この処理では、入力画像中からマーカ・エレメントを検出し、検出したマーカ・エレメントの形状種類の組み合わせの判定後、マーカ・エレメントの配置が長方形を形成するかの判定を経て、画像中のマーカ・ユニットを検出する。そして検出したマーカ・ユニットが形成する長方形の傾きからマーカとカメラの位置関係を推定する。カメラの世界座標中での絶対的な位置を求めたい場合には、マーカを任意の位置に固定して設置し、マーカの世界座標中の位置を設定する必要がある。

複数のマーカとカメラの相対的な位置関係を求める場合には、マーカ検出スレッドは複数のマーカのスクリーン座標系での位置情報を構造体に格納し、トラッキングスレッドは位置情報を共有した上でトラッキングを開始する。

一方、世界座標中でのカメラの絶対的な位置姿勢を求める場合には、検出した複数のマーカ・ユニットのうち、再投影誤差が最も小さな位置姿勢を検出する単一のマーカ・ユニットを用いてカメラの位置姿勢を推定する。この場合には単一のマーカのトラッキングのみを行ない、複数マーカのトラッキングは行わない。

4.1.2 マーカ情報の共有処理

マーカ検出スレッドで検出したすべてのマーカ・ユニットの ID やスクリーン座標中での位置などの情報は、スレッド間で共有する構造体に格納される。そしてトラッキングスレッド側で毎フレームこの構造体を確認し、新たに検出したマーカの有無を確認する。この際に構造体に格納されている各マーカの ID とトラッキングスレッドで既にトラッキングを行っている各マーカの ID を照合する。もし、一致する ID が存在する場合、その ID を持つマーカは既にトラッキングスレッドで検出されているマーカであるため、そのマーカの情報は取得しない。一致する ID が無い場合は、そのマーカは新たに検出されたマーカとしてマーカ頂点の位置情報を取得し、その情報を利用してトラッキングを行っていく。その様子を図 5 に示す

4.2 破綻からの復帰処理

考案したトラッキング処理では、トラッキングが破綻した際に初期位置合わせを再度行う必要があるため、トラッキング処理への復帰には多くの時間を要していた。破綻の主な原因としては頂点の欠落が考えられる。そこで本手法では破綻からの復帰処理にも、マーカ検出スレッドで検出したマーカの情報を利用して頂点を検出する事で高速化を実現している。なお、破綻からの復帰処理においても、マーカ検出スレッドは検出したマーカの情報を構造体に格納する処理のみを実行し、トラッキングスレッドではそ

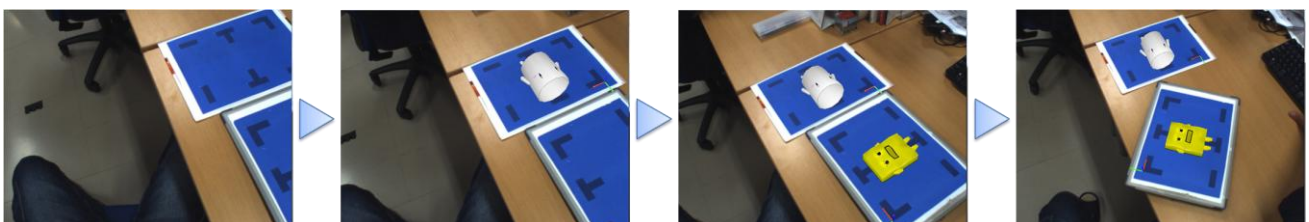


図 5 複数マーカ検出時のトラッキングの実行結果

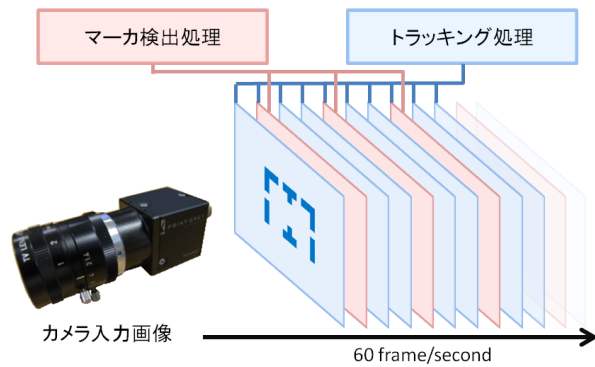


図 6 スレッド間の処理時間の違いのイメージ
れ以外のすべての処理を受け持つ。

4.2.1 概要

トラッキングが破綻した場合には、トラッキングスレッドは、まずマーカー検出スレッドにて検出したマーカー情報を共有の構造体から取得する。取得の際には、トラッキングスレッドはトラッキングが破綻したマーカーの ID と、構造体に格納しているマーカーの ID の照合を行う。照合の結果、破綻したマーカーの ID と一致する ID を持つマーカーが構造体中に存在した場合、そのマーカーの情報をトラッキングスレッド側で取得する。しかし、図 6 に示すように各スレッドが画像を取得する間隔には差があるため、構造体から取得したマーカーの位置情報と、トラッキングスレッドが追跡中のマーカーの位置情報には不整合が生じる場合があり、取得した情報はそのまま使用出来ない。そこで、不整合を修正し、正確な頂点位置を得るために取得したマーカーの頂点の再検出を行う。再検出には初期位置合わせやマーカー検出スレッドで使用しているマーカー検出処理を走査範囲を限定して行う。範囲を限定する際に、まず構造体から検出したマーカー・ユニットの頂点とトラッキングが破綻する前のフレームの頂点の位置情報を利用して頂点の移動ベクトルを求める。マーカーは取得したマーカー位置から求めた移動ベクトル方向に移動した可能性が高いので、その周辺に走査範囲を限定する。そしてマーカー検出処理により破綻した頂点を検出し、その頂点情報を利用して復帰を行う。頂点が検出出来なかった場合は再度初期位置合わせを行う。

5 動作検証

トラッキング処理およびマーカー検出処理の並列化を実現した新処理と、従来の処理との処理時間および位置姿勢推定の頑健性の比較を行う。

表 1 に示す環境でマーカーに対して 5 つのパターンで動かし、各パターンで 5 回撮影して検証を行った。処理時間はトラッキングによる位置姿勢推定が成功した時の時間の平均値を各回で算出し、5 回分の平均値を比較に利用した。一方、位置姿勢推定の頑健性に関しては、各回で位置姿勢が成功したフレームを撮影中の総フレームで割り、5 回分の平均を比較に利用した。結果は表 2 のようになっており、処理速度、頑健性共に向上した事が確認出来た。

また、トラッキング破綻時の復帰時間の比較も頂点が 1

表 1 実験環境

OS	Microsoft Windows 7 Professional
CPU	Intel Core i5 650 3.20GHz
グラフィックボード	NVIDIA GeForce 210
メモリ	4GB
カメラ	Point Grey Research FLEA2

表 2 新処理と従来処理の比較結果

カメラの動き	新処理	従来処理
ズームイン・アウト	5.19	12.01
左右煽り	5.76	8.56
左右平行	10.11	10.41
上下煽り	4.71	9.87
上下平行	10.19	9.91

(a) 処理速度 [ms]

カメラの動き	新処理	従来処理
ズームイン・アウト	96.8	73.93
左右煽り	97.42	72.27
左右平行	97.05	83.3
上下煽り	97.52	77.81
上下平行	98.26	73.15

(b) 位置姿勢推定の頑健性 [%]

表 3 復帰処理の時間の比較

	1点欠損	2点欠損	従来処理
処理時間 [ms]	7.3	14.45	154.3

点もしくは 2 点欠損した場合を想定し行った。結果は表 3 に示すように、従来の復帰処理と比較して時間の短縮が出来た事が確認された。

6 むすび

本稿では TT 方式における初期位置合わせ以降の処理の高速化手法を見直し、処理速度と位置姿勢推定の頑健性の向上に取り組んだ結果について報告した。また、新処理と従来処理との比較を行い、処理の高速化と位置姿勢推定の頑健性の向上を確認した。

今後は、照明による影響を受けやすい場面など、様々な場面での利用を想定してトラッキング処理を検証し、アルゴリズムの改善を進める事で、より頑健に位置姿勢を推定可能なトラッキング処理の開発を行う予定である。

参考文献

- [1] 海川真佑 他：美観と頑健性を両立させた複合現実感用半人為的幾何位置合わせマーカーの研究（第 2 報）～ツートンカラー方式の機能拡張～，電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会，信学技報，Vol. 107, No. 427, PRMU2007-186, pp. 169 - 174 (2008.1)
- [2] 茂地頭一郎 他：美観と頑健性を両立させた複合現実感用半人為的幾何位置合わせマーカーの研究（第 8 報）～TT 方式における ID 表現法 MOJI-Code の実現～，第 14 回日本バーチャリアリティ学会大会論文集，3A2-2 (2009.9)
- [3] C. Harris et al., "A combined corner and edge detector," Proc. 4th Alvey Vision Conf., pp. 147 - 151, 1999