

## ランドマーク DB を利用するビジョンベース MR トラッキング法の性能向上に向けての諸方策 (2)

井上 敬介 北村 一博 一刈 良介 柴田 史久 木村 朝子 田村 秀行

立命館大学 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: k\_inoue@rm.is.ritsumeai.ac.jp

**あらまし** 我々は、複合現実感技術を用いて映画制作を支援する MR-PreViz の研究を行っており、カメラトラッキング手法としてリハーサル・パス法を採用している。このようなビジョンベースの手法を実問題に適用すると、全てのシーンで高精度なトラッキングが行えるわけではない。そこで、本稿ではリハーサル・パス法を実問題へ適用したことで遭遇した 2 つの問題の対処法を提案している。広域な範囲のデータベースを構築する場合に発生する累積誤差の軽減方法として、局所的なデータベースを ICP アルゴリズムを用いて統合する手法を提案し、効果を実験により確かめた。また、監督の要望等によるトラッキング中のカメラワーク変更への対応方法として、SLAM の導入によるデータベースの更新を提案する。

**キーワード** カメラトラッキング, リハーサル・パス法, ICP アルゴリズム, SLAM

## Various Efforts Towards Performance Improvement of Vision-based MR Tracking Method Using the Feature Landmark Database: Part 2

Keisuke Inoue, Kazuhiro Kitamura, Ryosuke Ichikari,  
Fumihisa Shibata, Asako Kimura, and Hideyuki Tamura

Ritsumeikan University 1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

E-mail: k\_inoue@rm.is.ritsumeai.ac.jp

**Abstract** We are researching MR-PreViz that assists filmmaking using Mixed Reality, and we adopted the Rehearsal path method (RPM) as a camera tracking method. If vision based camera tracking methods including the RPM are employed for solving actual problems especially uses in outdoor locations, they sometimes encounter problems for estimating an accurate camera position and pose since they are imposed various restrictions. This paper describes some efforts against the restrictions of the RPM method. First one is the effort by merging separately constructed databases for tracking in wide space. The second is the effort of real-time updating the database by adopting SLAM into the RPM for improving tolerance of change of camera-path in the MR-PreViz shooting phase.

**Keyword** Camera Tracking, Rehearsal path method, ICP algorithm, SLAM

### 1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality; MR) において、現実世界と仮想世界の幾何学的整合は最重要課題であり、活発に研究され、数多くの手法が提案されてきた[1]。近年では対象シーン中の特徴点を利用するマーカレス法の研究が活発化し、高い追跡性能や計算量の軽減を達成したものが登場している[2][3]。しかし、これらは相対的には優れた手法ではあるものの、必然的に対象シーンの内容や複雑さに依存するので、あらゆるシーンに通用する万能の方法とは言い難い。

我々は、MR 技術の困難な実問題への応用として、映画制作における事前可視化 (Pre-Visualization) を発展させた MR-PreViz[4]の研究開発と実用化に取り

組んできた。MR-PreViz で用いる位置合わせ手法として、武富らのランドマークデータベース (LMDB) を用いる手法[5]を映画撮影用に改良し[6]、これをリハーサル・パス法 (RPM) [7]と名付けた。RPM はトラッキングを行う際に、LMDB を構築するリハーサルフェーズと、実際にトラッキングを行う実行フェーズに分けて処理を行う点に特長がある (図 1)。

MR-PreViz 技術自体は既に実用域に達しているが、すべての場合において高精度にカメラトラッキングが達成できた訳ではなく、PreViz という目的の性格上、撮影対象に制限を設けたり、カメラワークを限定する等の妥当性のある制約を課した結果である。トラッキングが破綻する場合のほとんどは、マーカレス・ト

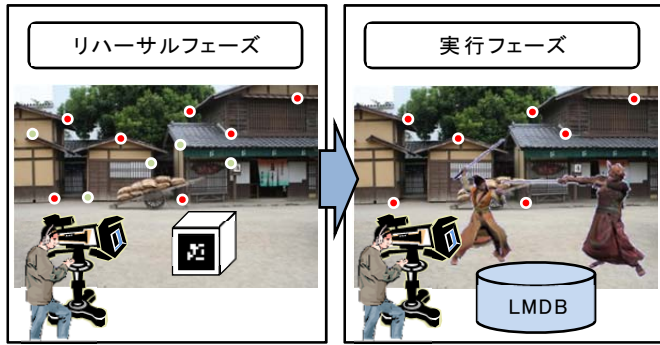


図 1 : 2つのフェーズからなるRPM

ラッキング法自体の限界に起因するものであった。

映画制作が主目的とはいえ、実問題を対象にした問題解決の方策はAR/MR研究一般に役立つものと考え、我々が日々の改善から得た知見と一般性のある方策を報告してきた[7]。本稿は、その第2弾である。2章では、広い範囲のLMDBを構築する際に生じる累積誤差の蓄積を回避する方法を、3章ではトラッキング時のカメラパス変更、SLAMを用いることで改善する方法について報告する。

## 2. 複数のLMDSの統合による誤差軽減

撮影対象が広範囲にわたり、カメラパスが長くなると、特徴点の3次元位置とカメラ位置姿勢に推定誤差が蓄積し、累積誤差が増大する。累積誤差の発生は、ビジョンベース・トラッキング手法の共通の問題である。その軽減手法には様々な提案があるが、我々は映画の撮影現場での運用を想定しているため、以下の条件を満たす必要がある。

- ・ 屋内外で使用可能
- ・ 運用前の事前準備が短時間かつ容易
- ・ (映画撮影機材以外の) 特殊な装置が不要

そのため、[5]で用いられているような、トータルステーションで事前に求めた基準点の3次元位置を誤差軽減に使用する手法は、基準点の設定に時間と人的コストがかかることから適していない。また、GPSの測位値を用いるような手法も提案されているが、屋内などの電波を受信できない場所での利用が困難なことや、精度がGPSの測位精度に依存などの点で問題がある。

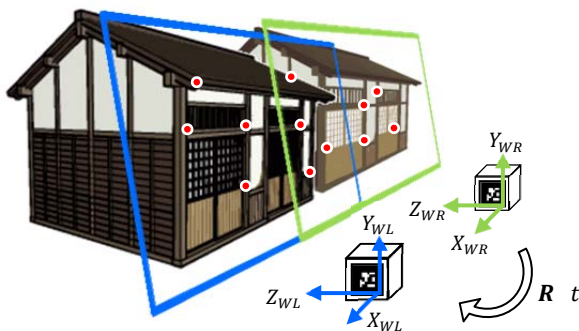


図 2 : LMDSの統合の概念

そこで、なるべく短い移動距離で取得した局所的な特徴点群を統合してLMDBを構成する方法を採用することにした。統合後の完成したものをLMDBと呼ぶために、統合前の特徴点群はランドマークデータセット(LMDS)と呼ぶものとする。短移動距離のLMDSの利用で累積誤差を小さくし、同時にトラッキング可能な範囲を拡大することを達成目標とした。

LMDSの統合手法の処理手順は次の通りである。

- (1) LMDS間で対応している点を選択
- (2) LMDS間のスケールを調整
- (3) LMDS間の変換行列を推定
- (4) LMDSの統合

以下で、各処理について詳述する。

### 2.1. 対応点の選択

本手法では短時間でLMDSの統合を実現するために、どちらのLMDSにも含まれている点の3次元位置を利用する。そのため、図2のように共通の特徴点を含むようなLMDSを事前に構築しておく。この各LMDSに共通して登録されている点をこれ以降、対応点と呼び、まずはLMDS間で対応点の選択を行う。現在は背景画像に点を再投影したものに対し、GUIを利用して手動で3点以上選択する。

### 2.2. スケールの調整

各LMDSは構築時にARToolKitPlusマーカ[8]を用いて現実世界とのスケールを合わせ、絶対的な座標値への変換を行っている。ただし、変換精度がマーカの認識精度に依存するため、統合を行うにあたりLMDS間でスケールを合わせる必要がある。そこで、選択した対応点間の3次元ユークリッド距離を用いて、LMDS間のスケール合わせを行う。対応点数を $n$ とすると、対応点間を結ぶ距離の数が $nC_2$ あるので、LMDS間でこれらの距離をそれぞれ比較することでスケール比を算出する。

### 2.3. 変換行列の推定

各LMDSは図2のように別の位置に配置したマーカにより、異なる世界座標系で構築されている。そのため、統合するには座標系間の位置関係、つまりマーカ間の相対的な位置関係を推定し、1つの座標系へ統一する必要がある。

本手法ではLMDS間の変換行列の推定に、2つの3次元形状データ間の位置合わせ手法としてよく用いられるIterative Closest Point (ICP) アルゴリズム[9]を使用する。このアルゴリズムは、異なる座標系で記述された3次元形状データに対し、点の座標値のみを用いて形状の統合ができるという特長がある。そのため、対応点の3次元座標を使用することでLMDSの統合が可能となる。ここで、本来ICPアルゴリズムは対応が与えられていない2つの点集合のマッチングをと

る手法であるが、本研究では、LMDS 間の対応点は事前に選択して既知であるため、対応が与えられた点集合のマッチング問題に置き換えることができる。それぞれの集合の対応する 2 点  $x_i, y_i$  は以下のように関係付けられる。

$$y_i = Rx_i + t \quad (1)$$

選択した対応点の 3 次元座標値を初期値として与え、以下の関数に適用する。対応点同士が完全に一致することはないため、以下の関数を最小化することで、位置合わせ残差が最小となる回転行列  $R$  と並進ベクトル  $t$  を推定する。なお、本手法では  $R$  の推定方法として、特異値分解 (Singular Value Decomposition; SVD) を用いた方法[10][11]を利用する。

$$\min_{(R,t) \in SE(3)} \sum_{i=1}^n \|y_i - (Rx_i + t)\|^2 \quad (2)$$

## 2.4. LMDS の統合

推定した変換行列を用いて座標系の統一、および LMDS の統合を行う。LMDS は複数のランドマークによって構成されており、各ランドマークは以下の情報を保持している。

- (1) ランドマークの 3 次元位置
- (2) 撮影地点ごとの情報
  - (a) SIFT 特徴量 (128 次元ベクトル)
  - (b) SIFT スケール決定係数  $a$
  - (c) 登録時のカメラ位置姿勢

統合にあたり、統合する側の LMDS のランドマークに対しては変換行列を掛け合わせ、もう片方の座標系での 3 次元座標に変換する。(c) はトラッキング時において、マッチングに使用するランドマークの選択時に用いる。変換後のランドマークとの相対的な位置関係を保つため、カメラ位置姿勢にも行列変換を行う。(a), (b) はトラッキング時に高精度なランドマークの対応付けを実現するためのものであり、これらの要素を 1 つの LMDS として出力する。

## 2.5. 提案手法の性能評価

2 つの LMDS 間における変換行列の推定精度と、LMDS 統合により累積誤差が軽減できているかを実験にて確認する。実験環境として、以下に示した性能の PC とカメラを使用し、カメラの内部パラメータは事前に求めた。

[PC] CPU: Core i7-2600 3.40GHz, メモリ: 8GB  
 [カメラ] SONY PMW-EX3, 解像度: 720×486pixels, プログレッシブ, 30fps

屋外環境において、シーンの左側 (図 3 (A)) と右側 (図 3 (B)) でそれぞれ LMDS (左側: LMDS<sub>L</sub>, 右側: LMDS<sub>R</sub>) を構築し、それらを統合する際に推定した変換行列を真値と比較した。今回は LMDS<sub>R</sub> の座標系から LMDS<sub>L</sub> の座標系への変換行列を推定した。それぞ

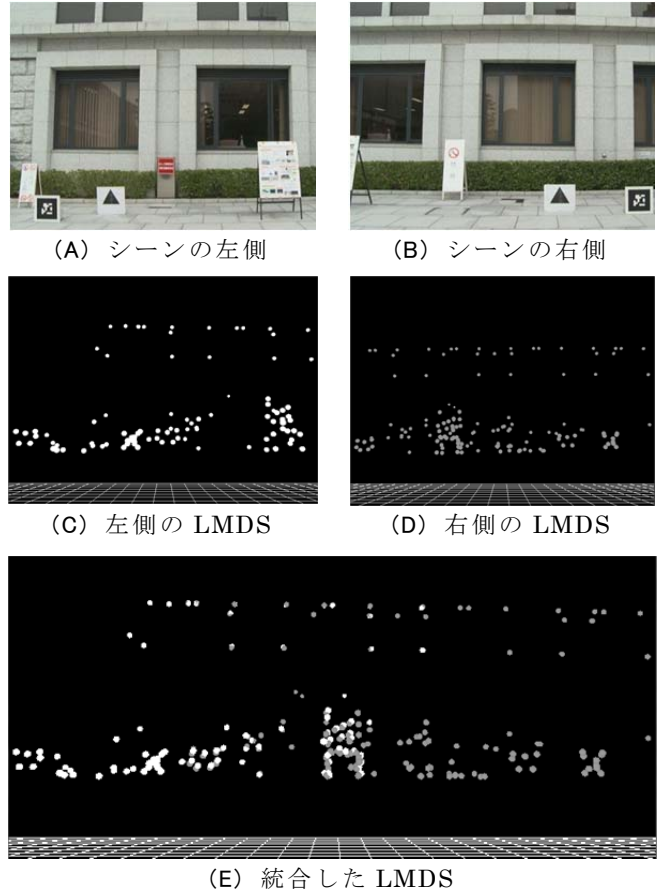


図 3: 統合結果

れの LMDS 構築に用いた画像シーケンスはカメラを手持ちで移動させて撮影した。表 1 に用いた画像シーケンスと構築時に得られたランドマーク数を示し、推定されたランドマークの 3 次元位置を図 3 (C) と図 3 (D) に示す。ARToolKitPlus マーカ間の距離と回転は以下のように設定および配置し、これらの値を真値とした。

[位置] X 軸方向: 9m, Y 軸方向: 0m, Z 軸方向: 0m  
 [回転] なし

なお、対応点は 12 点、LMDS 間のスケール比は 0.981 である。各軸における角度誤差と位置誤差を表 2 に示す。また、推定した変換行列を用いて統合した LMDS (LMDS<sub>Regi</sub>) を図 3 (E) に示す。

角度に関しては誤差も少なく、精度良く推定できていると言える。位置に関しては、Y 軸と Z 軸方向には誤差が数十 mm 程度であり、統合する上で十分な精度と考えられるが、X 軸方向には約 500mm の誤差が発生している。ここで、行列変換後の対応点間における距離の平均値を算出したところ、68mm であった。よって、ICP アルゴリズムの精度に問題はなく、実験に用いた短い移動距離のシーケンスにおいても多少の累積誤差が発生しており、位置誤差の中に LMDS<sub>L</sub> と LMDS<sub>R</sub> の累積誤差も含まれているものと考えられる。

表 1：用いた画像シーケンスと得たランドマーク数

LMDS	移動距離	フレーム数	ランドマーク数
LMDS <sub>L</sub>	約 7m	100	67
LMDS <sub>R</sub>	約 7m	100	97
LMDS <sub>Once</sub>	約 13m	300	192

表 2：変換行列の推定誤差

誤差	X 軸	Y 軸	Z 軸
角度 (°)	2.969	1.175	0.747
位置 (mm)	487.791	37.425	29.448

表 3：累積誤差の比較

LMDS	累積誤差 (mm)
LMDS <sub>Once</sub>	928.158
LMDS <sub>Regi</sub>	534.723

同じ屋外環境において、移動距離の長いカメラパス 1 回で構築した LMDS (LMDS<sub>Once</sub>) と、2 回に分けた短いカメラパスで構築および統合した LMDS (LMDS<sub>Regi</sub>) で、LMDS 構築時の累積誤差の平均値をそれぞれ計測した (表 3)。LMDS<sub>Once</sub> の構築に用いた画像シーケンスは表 1 に示している。累積誤差の計測には、ランドマークの 3 次元位置を、手動で計測した真値と比較する作業を計 6 点に対して行った。表 3 の結果より、LMDS<sub>Regi</sub> の方が LMDS<sub>Once</sub> よりも累積誤差が少なく、誤差が軽減されていることがわかる。

以上の結果より、短いカメラパスで構築した LMDS を統合することで、累積誤差が軽減できることを確認した。今後、より精度良く LMDS の統合を実現するためには、統合後の LMDS にバンドル調整などの全体最適化を行うことが挙げられる。

### 3. Visual SLAM の導入

#### 3.1. カメラパス変更とその対応

MR・PreViz 撮影時には事前に想定したカメラパスで PreViz 映像撮影を行うものの、監督の要望などにより撮影途中でパスが変更される可能性がある。しかし、現在の RPM ではパス変更を行う場合、LMDB の再構築が必要となり、即座にパスを変更することは困難である。そこで、トラッキングとマッピングを同時に行う Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を RPM へ導入することで、トラッキング中に LMDB を更新し、トラッキング範囲の変更を行えるよう手法を改良する。

RPM では、LMDB 構築時と異なるカメラパスであっても、入力映像中にランドマークが存在していればトラッキングを続けることは可能である。しかし、ランドマークが存在しない方向を向くようなパスで高精度にトラッキングを行うには LMDB を再構築する



図 4：新しく発見したランドマークの登録

必要がある。実際の撮影現場では時間的制約がある場合が多く、変更後のパスが以前とあまり変わらない場合は LMDB を再構築する時間が他の PreViz 撮影に影響を与える。その際に LMDB を再構築することなく即座にパスが変更可能であれば、撮影を円滑に進めることが可能である。

パスを変更した場合、トラッキング映像は以下に示す 2 つの場合が考えられる。

- ・パス全体でランドマークが全く映らない
- ・パスの一部分でのみランドマークが映らない

前者の場合は全くトラッキングが不可能なため、LMDB を再構築するしかないが、パスの一部分のみでランドマークが登録されていない方向を向くといったような後者の場合、その時に使用している LMDB をそのまま使用しても、パスの大部分でトラッキングが可能である。その際に変更されたパスで映る新たなランドマークを LMDB へ追加すれば、パスの変更に対応可能である (図 4)。そこで本手法では、カメラパスの変更へ一時的に対応するために、新たに発見したランドマークをトラッキング中に LMDB へ追加する SLAM 機能を RPM へ追加する。なお、本手法ではセンサなどを用いずにビジョンベースで SLAM を行う Visual SLAM でこれを実現する。

#### 3.2. 変則的な Visual SLAM の導入

本手法では SLAM を単純に RPM へ導入するのではなく、変則的な SLAM を導入する。トラッキング開始と同時に SLAM を行って LMDB を一から構築するのではなく、トラッキング開始時にはリハーサルフェーズで構築した LMDB を使い、カメラパスの変更を行う時のみ SLAM を用いて LMDB の更新を行う。理由を以下に挙げる。

- ・DB の再利用
- ・必要な情報のみの取得
- ・処理量増加の防止

RPM ではリハーサルフェーズに構築した LMDB を外部に保存しているため、リハーサル時に決めたパスであれば、即時にトラッキングを開始することが可能



である。また、同じ DB を用いることで、座標の原点位置やスケールが変わることが無く、設定した CG の合成位置やスケールが何度でも再現可能である。それにより、PreViz 映像の撮り直しに即座に対応可能である。一方、完全な SLAM であると、トラッキングを行う度に DB を構築する必要があり、その都度座標が変更される。それにより、毎回 CG を調整しなければならず、手間がかかる。

また、本手法で想定しているシーンでは、DB の更新を常に行う必要が無い。LMDB には 2.4.項で示した情報が登録されており、事前に構築した LMDB に登録されている大部分の情報は変更後のパスでも利用可能である。カメラパスの変更に対応するには、新しいパスで撮影した入力映像で新たに発見したランドマークの情報のみを追加登録すればよい。

更に、必要な情報のみを取得することで、不要な情報の蓄積による処理量増加を防止することが出来る。常に更新を行うと、不要なランドマークが登録され、トラッキングの処理量が増加する。LMDB を更新するタイミングや、登録するランドマークの条件を指定することでその問題を回避する。

### 3.3. 処理概要

処理のフローを図5に示す。2つのフェーズで処理を行うことに変更は無く、実行フェーズ内の処理を変更している。実行フェーズではトラッキングのみが行われていたが、SLAM機能追加に伴い初期化処理とマッピングの処理を追加している。トラッキングは常に行われるが、マッピングはカメラパスの変更を行いたい際に任意のタイミングで行う。初期化処理では SLAM を行うために座標の初期化を行っている。本研究では2つのDBを保持しているため、2つの座標間の変換行列を求めている。2)では登録するランドマークの選別を行い、カメラパス変更の有効なランドマークのみをLMDBに登録するように処理を行う。3)ではランドマークを登録する際に必要な情報をリハーサルフェーズ時とは異なった方法で取得する。各処理の詳細な内容については以降で紹介する。

### 3.4. 登録するランドマークの条件

LMDBに追加登録するランドマークはカメラパスの変更の有効なものを登録しなければならない。また、ランドマークの3次元位置推定精度はトラッキングに大きく影響を与える。そこで、次の条件を満たしたランドマークを登録する必要がある。

- (1) リハーサルフェーズで登録されたランドマークから3次元位置が離れている
- (2) 3次元位置の推定精度が高い

カメラパスの変更に対応するために、リハーサルフェーズで構築したLMDBに登録されたランドマーク

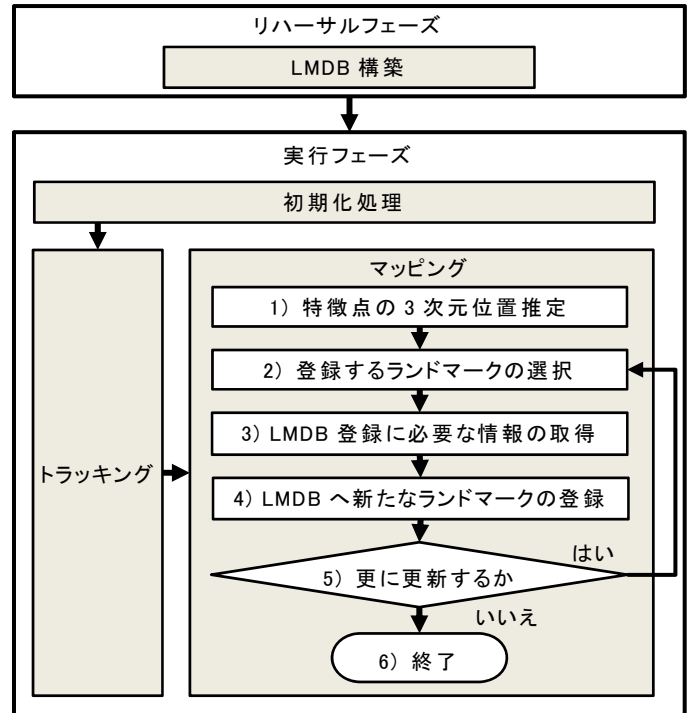


図5: ワークフロー

から、3次元位置が離れたものを登録する。それにより、LMDBに登録されているランドマークが撮影環境中に分散することになり、トラッキング可能な範囲が拡大できる。よって、カメラパスが変更可能になる。

また、登録したランドマークの3次元位置推定精度はトラッキングの精度に大きく影響する。登録されたランドマークの推定精度が低いとカメラの位置姿勢推定精度が低下してしまう。そこで、推定精度が高いランドマークをLMDBで保持するため、追加登録するランドマークに対してバンドル調整を行い、3次元位置を調整する。

### 3.5. LMDB登録に必要な情報の取得

本手法では SLAM によって新たに登録されたランドマークとリハーサルフェーズ時に登録したランドマークを同一のものとして扱う。よって、LMDBに新たなランドマークを登録する際には、リハーサルフェーズ時と同じ情報を取得する必要がある。これらの情報はリハーサルフェーズ時に取得していたが、SLAMを行うためトラッキング中に取得する必要がある。処理時間や情報量を考慮しなければならない。

リハーサルフェーズの LMDB 構築では高精度にトラッキングを行うために情報の取得を密に行っている。各ランドマークに対して、LMDB構築用映像中のそのランドマークが追跡された全フレームの情報を登録している。LMDB構築用映像は長さが有限であるため、映像中の全ての情報を取得しても情報量は限られる。しかし、トラッキング中に前述の条件で情報を取得すると情報量は無限に膨れ上がる。そこで、SLAM時に

表 4 : 各手法の処理内容と DB の性質

手法	処理内容	DB の性質
RPM	カメラ位置姿勢推定	絶対座標
PTAM	特徴点の 3 次元位置推定	相対座標

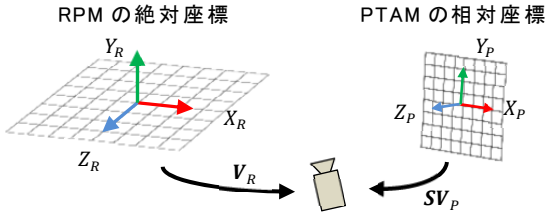


図 6 : 各座標のカメラ位置姿勢行列

登録する情報は限られたフレームのみで情報を登録することで対処する。今回はそのフレームに、新たに追加するランドマークの 3 次元位置推定に用いたフレームを使用する。

### 3.6. 実装で遭遇した問題

本研究では、提案する手法を実現するために RPM と PTAM[2] を併用して実装しており、併用するにはそれぞれの手法で保持している DB の差を考慮しなければならない。この座標間の差を吸収するために座標間の変換行列を初期化処理で求めている。

各手法で行う処理内容は表 4 に示すように分けている。2 つの手法でそれぞれの処理を行うため、性質の異なる 2 つの DB を同時に保持することになる。

RPM では、実際の役者と同じ背丈の CG キャラクタを合成する必要や、セットの 2m 横に CG の役者を立たせたいといった要望に対応するため、現実世界に対応した絶対座標が必要となり、人為的マーカを用いて LMDB を現実世界のスケールに合わせている。一方、PTAM では現実世界に座標を合わせすることは考慮しておらず、マップ構築時の相対座標で処理を行っている。

今回は PTAM 座標系で推定された点を LMDB に登録する際に、RPM 座標系の値に変換して登録する。変換するためには座標間の変換行列を求めなければならない。その際に用いる基準として、あるフレームでのカメラ位置姿勢を利用している (図 6)。異なった座標であっても、カメラの同じ位置姿勢を計算しているため、変換行列を求めることが可能である。 $V_R$ ,  $V_P$ ,  $S$  はそれぞれ RPM 座標系でのカメラ位置姿勢行列、PTAM 座標系でのカメラ位置姿勢行列、座標間のスケールを統一するための値を格納した行列を意味する。これらを用いて求める変換行列を式(3)に示す。

$$\begin{aligned}
 [X_R, Y_R, Z_R, 1]^T &= V_R^{-1} S V_P [X_P, Y_P, Z_P, 1]^T, \\
 S &= \text{diag}(s, s, s, 1)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

この変換行列を使用し、PTAM 座標系で 3 次元位置が推定されたランドマークを RPM 座標系に変換する。

## 4. むすび

本論文では自然特徴点を利用したビジョンベース MR トラッキング法の実応用例として、MR-PreViz 撮影のための屋外 6 自由度カメラトラッキングで遭遇した課題に対して、その問題解決の方策を紹介した。

広域な LMDB の構築によって累積誤差が蓄積する問題に関しては、累積誤差の少ない局所的な LMDS を複数構築し、統合することで誤差の軽減を試みた。また、実験により累積誤差が軽減できることを確認した。

カメラパスの変更への対応する方法として、SLAM を導入することで LMDB をトラッキング時に更新し、トラッキング範囲を変更する方法を提案した。さらに、提案手法を実現する上での問題となる座標変換の解決方法について示した。

万能の方法がなく、実問題での様々な問題に対処する必要がある場合には、手法の使い分けや併用を考えざるを得ない。場合に応じて使い分けが可能な信頼性の高い手法を積み上げて行くことが肝要である。

## 文 献

- [1] 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行: “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.
- [2] G. Klein and D. Murray: “Parallel tracking and mapping for small AR Workspaces,” Proc. ISMAR 2007, pp. 225 - 234, 2007.
- [3] D. Wagner, G. Reitmayr, A. Mulloni, T. Drummond, and D. Schmalstieg: “Real-time detection and tracking for augmented reality on mobile phones,” *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No.3, pp. 355 - 368, 2010.
- [4] 田村秀行, 一刈良介: “映画制作を支援する複合現実型可視化技術”, 日本 VR 学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 32 - 36, 2010.
- [5] 武富貴史, 佐藤智和, 横矢直和: “拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定”, 信学論 (D), Vol. J92-D, No. 8, pp. 1440 - 1451, 2009.
- [6] 樋下航, 一刈良介, 天目隆平, 柴田史久, 田村秀行: “ランドマークデータベースに基づくカメラトラッキング法の高速度と安定化”, 信学技報, Vol. 109, No. 373, pp. 255 - 260, 2010.
- [7] 北村一博, 井上敬介, 露無將斗, 一刈良介, 柴田史久, 田村秀行: “ランドマーク DB を利用するビジョンベース MR トラッキング法の性能向上に向けての諸方策”, 信学技報, Vol. 110, No. 381, pp. 177 - 182, 2011.
- [8] D. Wagner, T. Langlotz, and D. Schmalstieg: “Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones,” Proc. ISMAR, pp. 121 - 124, 2008.
- [9] P. Besl and N. McKay: “A Method for Registration of 3D Shapes,” *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239 - 256, 1992.
- [10] K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein: “Least squares fitting of two 3-D point sets,” *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 5, pp. 698 - 700, 1987.
- [11] P. H. Schonemman: “A generalized solution of the orthogonal procrustes problem,” *Psychometrika*, Vol. 31, No. 1, pp. 1 - 10, 1996.