

S3D 化に伴う MR-PreViz システムの機能拡張と性能向上 (2) -ICP アルゴリズムを利用したステレオカメラ・トラッキング法-

森 尚平 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: mori@rm.is.ritsumeai.ac.jp

あらまし 複合現実感技術を用いてステレオスコーピック 3D (S3D) 映画制作を支援する S3D MR-PreViz の研究では、ランドマーク DB (LMDB) に基づくステレオカメラを用いたカメラ位置姿勢決定法の開発に取り組んできた。このMR-PreViz前に行われるLMDBの構築は、可能な限りの高速化が図られてきたが、十数分という時間を要していた。本稿では、MR-PreViz実行中に、ステレオカメラのエピポーラ拘束を利用して特徴点の3次元位置を逐次推定し、フレーム間での位置姿勢を Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムによって推定することで、LMDB構築を行わずにMR-PreVizを可能にする。これらの処理を高速に実行させるため、S3D映画制作におけるステレオカメラの設定ルールを踏まえて、ステレオマッチングにおける探索範囲の限定することに加え、マルチスレッド技術を活用した。最後に、本手法の実用上の有効性に関して実験し、考察した。

キーワード 複合現実感, カメラトラッキング, 3次元復元, 両眼立体視, ICP アルゴリズム

S3D Extension and Performance Improvement of MR-PreViz System (2) --- Stereo Camera Tracking Using ICP Algorithm ---

Shohei MORI, Fumihisa SHIBATA, Asako KIMURA, and Hideyuki TAMURA

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

E-mail: mori@rm.is.ritsumeai.ac.jp

Abstract This paper presents a method of real-time 6-DOF stereo camera tracking using Iterative Closest Point (ICP) algorithm used in our mixed reality based Pre-Visualization (PreViz) system for stereoscopic 3D filmmaking. We eliminate the time-consuming preparation processes required for improving the robustness in our previous work. On the assumption that the camera repeatedly passes along a path roughly determined at the rehearsal, multiple maps is created along the path using stereo vision technologies and is continuously added and refined during a PreViz shooting. The rule of stereo rig setting, called "1/30th rule," is introduced for reduce stereo search range in stereo matching and multi-threading technology is actively used for acceleration. Finally, experiments with real data in a miniature set and full scale set for filmmaking were conducted.

Keyword Mixed Reality, Camera Tracking, 3D Reconstruction, Stereoscropy, ICP Algorithm

1. はじめに

我々は、複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術を映画制作の PreViz (Pre-Visualization) に活用する MR-PreViz 技術の研究プロジェクトを推進してきた [1]。MR-PreViz システムは、対象シーンやカメラワークに合理的な制約を与えられる場合には、十分に実用に耐える水準に達し、既に劇場公開映画の制作にも貢献している。数年前からの 3D 映画ブームの中で、映画制作業界からは、MR-PreViz の Stereoscopic 3D (S3D) 対応を求める声が強くなってきた。その期待に応えるべく、我々は 2 台のカメラを固定し、両眼立

体視の基線長 (ベースライン) と輻輳角 (コンバージェンス) を変更できるステレオリグを導入したシステムの開発を行った [2] (図 1)。

この S3D MR-PreViz システムの開発では、実用性のある機器構成であることを最重要視し、まずハードウェア面での拡張を行った。本システムの利用により、撮影現場で基線長や輻輳角、CG キャラクタの動きを変えながら、3D 映画の立体感をどう演出するかの検討を、3D 映像で MR-PreViz することで可能となった。

これに成功したので、次なる展開として、S3D 化に伴うソフトウェア面での充実に挑戦している。その第

1 弾として、2 台のカメラによるステレオ視であるという条件を積極利用し、単眼カメラ向けであった手法の高精度化を図った[3]. 続く第 2 弾として本稿で述べるのは、これまでの MR-PreViz で必要とされてきたオフライン処理であるランドマーク DB (LMDB) 構築を、MR-PreViz 撮影時に、カメラ位置姿勢推定と同時に達成するということである. 以下、2 章では関連研究を、3 章ではステレオリグの設定ルールから生じる拘束条件の利用を、4 章では提案手法を、5 章では提案手法の実利用性と考察について述べる.

2. 関連研究

これまで我々が採用してきたのは、対象シーンの自然特徴点の集合 (LMDB) を事前取得し、これを MR-PreViz 撮影の実行時に利用する RPM (Rehearsal Path Method) である[4]. この Structure from Motion (SfM) の原理とバンドル調整を利用した事前準備には、作業時間も合わせて約 15 分要する. 本手法では、Stereo Vision [5] と Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズム[6]を用いて DB の拡大と更新を逐次実行し、LMDB 構築なしに MR-PreViz を行う.

Stereo Vision は予てより 6-DOF カメラ位置姿勢推定に利用されてきた. ロボット工学分野における Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) はその代表である. 中でも両眼もしくは複眼のカメラを用いる方法はステレオ SLAM と呼ばれている [7-9]. これらの手法は移動ロボットを対象としたものであるため数秒の処理時間がかかったとしても問題にならない. しかし、24 [FPS]での動作を必要とする PreViz 用途には実時間性の面で適さない. これは、SIFT 特徴量の利用[7, 8]やエッジ情報の利用[9]により、処理時間が増大するためであると考えられる. また、適用範囲が数百メートルのループする廊下や部屋全体等、我々が想定するものよりも遥かに広い. よって、上記のロボスタ性を高めるための処理はより簡単なものに置き換えることができると考える.

近年の有名な実時間カメラ位置姿勢推定法には、ハードウェア・アクセラレータを積極利用するものが多い. Parallel Tracking and Mapping (PTAM) では、バンドル調整を含むマッピングとトラッキングをマルチコア CPU により並列処理させることで実時間処理を達成している [10]. Dense Tracking and Mapping (DTAM) では、RPM のようにシーンの幾何情報の取得に事前準備が必要になるものの、密に記述されたテクスチャ付き幾何情報と実画像とのマッチングに GPGPU を用いている [11]. 同様に、KinectFusion ではレンジファインダを利用してボクセル形式で密に記述された空間を、GPGPU を用いて高速に処理して



図 1 S3D MR-PreViz のイメージ (左) とステレオリグ (右上: ビームスプリッタリグ, 右下: 平行リグ). ステレオリグには Sony PMW-EX3 が搭載されており、HD (1280x720 [pixels]) での MR 合成が可能.

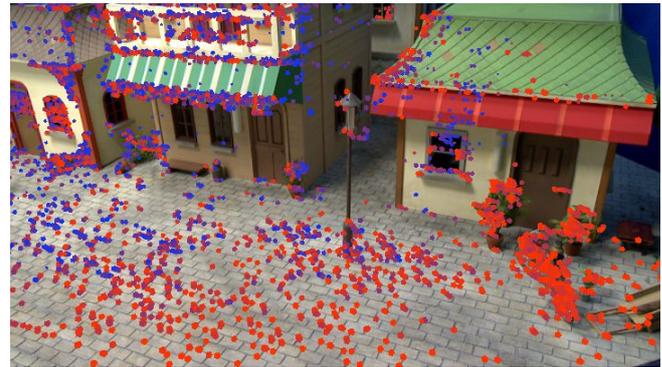


図 2 分割して保存されたミニチュアセット中の特徴点の投影 (保存された順番で赤色から青色に色付け)

いる[12]. 我々が提案する手法においては、特徴点毎の処理や、再構築するシーンの幾何形状を分割して保持することで、マルチコア CPU を用いた並列処理を積極的に取り入れ、また撮影方法から生じるステレオリグの設定における拘束を利用する (図 2).

3. ステレオマッチングにおける拘束条件

ステレオリグには、手動で、もしくは機械的に基線長と輻輳角を設定する機構が備えられており、これら进行操作することで S3D のルック (S3D 効果) を調節する. これらの設定には、“3 パーセントルール”と呼ばれる指針を用いるのが一般的である. これは「多くの場合に、基線長をカメラから前景までの距離の 1/30 (1メートルにつき 3センチメートル程度) に設定すると無難であるというルール」である[13]. 本手法では、このルールによってステレオカメラの設定が行われることを想定し、ステレオマッチングにおける視差の探索幅 (d_{min} , d_{max}) を決定する (以後、 d_{min} を最小の視差、 d_{max} を最大の視差と呼ぶ). これにより、処理時間の短縮を図ると同時に、これらのパラメータの設定に要する作業時間の短縮も望める.

3.1. ステレオマッチング

本手法では、ステレオリグが S3D MR-PreViz のワークフロー[2]において事前にキャリブレーションされており、入力画像が平行化されているものとする。よって、カメラ位置姿勢推定に用いる特徴点の3次元位置 $\mathbf{p} = (X, Y, Z)$ は、左画像上での位置 (u_L, v_L) と右画像上での対応点 (u_R, v_R) を用いて、以下の式 (1) より計算される。

$$\mathbf{p} = \left(\frac{B(u_L - c_u)}{d}, \frac{B(v_L - c_v)}{d}, \frac{fB}{d} \right)^T \quad (1)$$

ここで、 B は基線長、 f は焦点距離、 (c_u, c_v) は光学中心の位置、 d は視差 ($= u_L - u_R$) そして、 $v = v_L = v_R$ である。尚、本手法では問題の簡単化のために輻輳角は0度とする。

3.2. Native Pixel Parallax (NPP)

S3D 撮影において、不快感を伴う両眼視野闘争の領域の発生を避けるために設定される最大の視差は Native Pixel Parallax (NPP) で計算される。これにより、NPP 以上の視差を持つ物体は入力画像中に存在しないと仮定できる。よって、式 (2) に示される NPP を最大の視差 d_{\max} とする。

$$\text{NPP} = d_{\max} = \left(\frac{W_{\text{interocular}}}{W_{\text{screen}}} \right) W_{\text{px}} \quad (2)$$

ここで、 $W_{\text{interocular}}$ は人間の両眼間の距離 ($= 2.5$ [inches]), W_{screen} はインチでのスクリーンサイズ、 W_{px} は入力画像の幅である。この d_{\max} を用いて、推定される最小の奥行き Z_{\min} を式 (1) より変形して得られる以下の式 (3) より計算する。

$$Z_{\min} = \frac{fB}{d_{\max}} \quad (3)$$

3.3. Stereo Uncertainty

ステレオマッチングにおける奥行き値推定には、式 (4) に示される曖昧さ (Stereo uncertainty, ΔZ) が存在する。

$$\Delta Z = \frac{Z^2 \delta d}{fB} \quad (4)$$

ただし、 δd はサブピクセル推定精度とする。

この計算に基づき、最大の奥行き Z_{\max} と最小の視差 d_{\min} が以下の式によりそれぞれ計算される。

$$Z_{\max} = \sqrt{\frac{2\delta Z f B}{\delta d}} \quad (5)$$

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{\delta d f B}{2\delta Z}} \quad (6)$$

ただし、 δZ は $\Delta Z/2$ である。

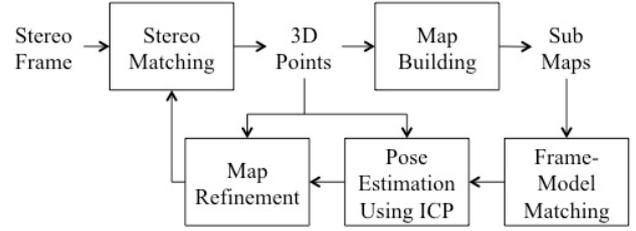


図2 提案手法の処理手順

これらの拘束により、ステレオマッチングにおける探索範囲が (d_{\min}, d_{\max}) に制限され、計算時間の短縮につながる。また、キャリブレーション結果とディスプレイサイズを入力するだけなので、パラメータの設定が容易になると考える。

4. ステレオカメラ・トラッキングとマッピング

本手法では、S3D MR-PreViz 中に、ICP アルゴリズムを用いてカメラ位置姿勢を推定し、求めた位置姿勢とステレオマッチングの結果を用いてマップ構築を行う。図2は本手法の流れである。以下に、各ブロックの詳細を述べる。

4.1. ステレオマッチングでのサブピクセル推定

本手法では逐次入力されるステレオ画像を用いて推定された特徴点の3次元位置を利用し、世界座標系でのマップと現フレーム間のカメラ位置姿勢推定とマップの追加を行っていく。この際、先述のステレオリグの設定における拘束条件を用いて、ステレオマッチングの計算時間を削減し、誤対応を減少させる。

S3D MR-PreViz 撮影中は、先述の3パーセントルールを適用することで基線長が短くなりがちである。よって、ステレオマッチングにおける精度向上のためにサブピクセル推定が必要となる。

本手法では、特徴点検出器に FAST [14]を利用して左画像における特徴点を検出し、その後 OpenCV で採用されているサブピクセル推定法を用いる。次に、右画像における対応点を、 11×11 [px]のテンプレート画像を用い、正規化相互相関 (NCC)により検出する。そして、計算された NCC の値を縦軸に、ピクセル位置を横軸に取り、2次曲線を当てはめることで右画像におけるサブピクセル \mathbf{p}_{subR} を計算する (式 (7))。

$$\mathbf{p}_{\text{subR}} = \left[\frac{R(u_R - 1, v) - R(u_R + 1, v)}{2R(u_R, v) - 4R(u_R - 1, v) + 2R(u_R + 1, v)} \right] \quad (7)$$

ここで、 $R(u, v)$ は (u, v) における NCC の値である。上記の一連の計算は OpenMP を用いたマルチスレッドキャッシングにおける各スレッドにて処理される。

4.2. マップと現フレームとのマッチング

本手法では、複数の小マップ (Sub-Map) を形成し、それらをまとめて1つのマップとして取り扱う。これは、マップ全体とのマッチングを行うのではなく、複数の小マップをマルチスレッド処理によって個別に扱うことで、高速に処理するためである。小マップの選択基準は小マップ登録時のカメラ位置姿勢と現フレームでのカメラ位置姿勢の距離であり、それが短いものから5つ選択するものとする。小マップ中の各3次元位置は現フレームに再投影され、小マップ作成時に登録された画像と現フレームとでテンプレートマッチングを行う事で対応付ける。

単純なテンプレートマッチングでは、小マップ登録時のカメラ位置姿勢から離れることによって発生する透視変換に脆弱であるため、テンプレート画像に対して射影変換を行う。現フレームで検出された各特徴点に対するテンプレート画像 I_{template} は i 番目のサブマップに登録された画像 I_i から射影変換を行う事で得られる (式 (8))。

$$I_{\text{template}} = \mathbf{H}(\phi_{n,i}(\mathbf{P}(x_j, y_j, f)), (x_j, y_j, f)) I_i \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{P}(\mathbf{p})$ は現フレームにおけるカメラ座標系の点 \mathbf{p} の世界座標系への変換、 $\phi_{n,i}(x, y)$ は i 番目のサブマップへの再投影、 $\mathbf{H}(\mathbf{p}, \mathbf{p}')$ は点 \mathbf{p} の点 \mathbf{p}' への射影変換行列である。この各点に対する処理もマルチスレッド処理で実行される。

尚、再投影するために必要なカメラ位置姿勢は Motion Model [10]により推定する。Newcombeら[11]は、この方法は速く動くカメラの位置姿勢推定に不向きであることを示唆している。しかし、映画撮影において、一般にまた経験上、雲台、ドリー、レール、ステディカムのようなカメラの動きを安定させる機材が導入されることがほとんどであるため、手持ちカメラのような動きを想定する必要はなく、Motion Modelの導入は妥当であると考えられる。

4.3. ICP アルゴリズムを用いた位置姿勢推定

本手法では、Arunらによる特異値分解 (SVD) を用いて3次元点群同士の位置姿勢を推定するICPアルゴリズム[6]を用いる。ICPアルゴリズムは、一般に以下の式で表される。

$$\min_i (\|\mathbf{p}'_i - \mathbf{p}_i\|) \quad (9)$$

入力として与えられる3次元点は、下記のヒューリスティックに則って選択される。

フレーム間での特徴点の3次元位置は静的であるという仮定から、ある3点によって形成される三角形の面積はフレーム間で一定である。よって、マッチング結果からランダムに選択した3点を利用し、その大き

さの変化が大きい場合、その点を用いない。もし、大きさの変化が小さい場合はその重心をICPアルゴリズムの入力とする。こうして選択される3次元点は、ステレオマッチングにおける誤対応とマップと現フレームとのマッチングにおける誤対応を取り除く効果がある。

このランダム選択は、式 (10) に示した統計的に十分な数 S の3次元点の組み合わせが得られるまで続けられる。

$$S = \frac{N}{\left(\frac{e}{k}\right)^2 \frac{N-1}{P(100-P)} + 1} \quad (10)$$

ただし、 N は n が特徴点数であるときに ${}_n C_3$ で与えられる母数、 e はサンプリング誤差、 k は信頼度係数、 P は母数比で、それぞれ 0.5, 1.96, 50 を与えた。

上記に加え、2次元画像上での再投影誤差もICPアルゴリズムの入力値として用いる。具体的には、対応づけられた小マップと現フレームにおいて、「小マップ中の3次元位置を左画像に再投影した位置」と「左画像で検出された特徴点の位置を、求めた位置姿勢を用いて世界座標系に変換したもの」を入力値とする。ただし、前者はICPアルゴリズムでのループ中に更新される位置姿勢を用いて逐次更新される。

ICPアルゴリズムの初期値には、前フレームでのカメラ位置姿勢が与えられる。これにより、ループ回数を減らし、より信頼性の高い推定結果が得られる。

4.4. マップ構築

ICPアルゴリズムによって推定された i 番目のフレームにおけるカメラ位置姿勢 \mathbf{T}_i を使って、ステレオマッチングによって得られたカメラ座標系での特徴点の3次元位置 \mathbf{p}_i^c を世界座標系に変換し、小マップとして登録する (式 (11))。このマップ構築は、特徴点のマッチング数が一定以下 (マッチング数/用いた小マップ中の点数 < 0.5) になった場合に実行される。

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{T}_i \mathbf{p}_i^c \quad (11)$$

S3D MR-PreVizにおいて、ステレオリグ上のカメラはリハーサルパス上もしくはその近辺を往復すると想定している。そこで、登録した小マップにステレオマッチングの結果を反映させることで、小マップを修正していく。小マップ中の新たな特徴点の位置を以下の式 (12) によって求める。

$$\mathbf{p}'_i = \frac{n_{\text{ref}} \mathbf{p}_i^{\text{map}} + \mathbf{p}_i}{n_{\text{ref}} + 1} \quad (12)$$

ただし、 n_{ref} は特徴点の参照回数である。この n_{ref} は特徴点の削除にも用いられる。具体的には、フレームが進んだ後に、参照回数 n_{ref} が閾値以下の特徴点は小マップから削除される。

小マップ登録時のカメラ位置姿勢も同様に登録され、先述の小マップの選択基準に使われる。また、次節で述べる破綻処理にも用いられる。

4.5. 破綻処理

カメラ位置姿勢の推定結果が下記の基準を超えた場合、カメラ位置姿勢推定が破綻したとみなし、破綻処理を行う。破綻の判断の基準には ICP アルゴリズムによって推定したカメラ位置姿勢と Motion Model によって推定したカメラ位置姿勢を用いる。具体的には、これら 2 つの推定結果の回転と並進が、それぞれ 1,000 [mm/sec], 180 [deg/sec] 以上の変化を起こした場合に破綻とみなす。これらの基準は、S3D MR-PreViz で用いるステレオリグにより実験的に得られた値である。

カメラ位置姿勢が破綻した場合、前のカメラ位置姿勢と小マップに登録されたカメラ位置姿勢を用いて復帰を図る。各小マップ中の特徴点を使って 4.2 節に示した処理をより大きな探索範囲を用いて行うことで、復帰を図る。これらの処理は、小マップに保存された位置姿勢毎にマルチスレッド処理を用いて行われる。

5. 実験と考察

本章では、これまでに述べてきた処理が実時間で実行可能かどうかを、実験を交えて検証し考察する。実験には、ミニチュアセットと実寸大セットで撮影した 2 つの入力画像シーケンス (720x405 [pxels], 30 [FPS]) を用いた (図 3)。前者は、ミニチュアセットの路上に CG キャラクターや小道具を重畳することを想定し、セットに対して正対した状態で直線レールに載せたビームスプリッターリグを約 1m 左右に移動させて撮影した 270 枚の入力画像シーケンスである。後者は、座布団の上に CG キャラクターを重畳することを想定し、直線レールに載せたビームスプリッターリグを約 3m 移動させて撮影した 150 枚の入力画像シーケンスである。基線長は、“3 パーセントルール” に則って、それぞれ 60 [mm] と 100 [mm] に設定し、FAST 特徴点検出器の閾値はそれぞれ 40 と 60 に設定した。尚、式 (2) で必要となるディスプレイサイズは、S3D MR-PreViz システムで利用するもの [2] を想定し 41.6 [inches] とした。以下、それぞれの入力画像シーケンスにおける実験結果である。

5.1. ミニチュアセットでの実験結果

LMDB 構築なしでトラッキングが可能であった。図 4 (a) は、推定したカメラ位置姿勢を用いて 3 次元空間に投影したマップ中の特徴点の 3 次元位置である。図 5 は、その構築したマップである。最終的に 345 点の特徴点がマップに登録され、その内参照回数の少な

かった 5 点が削除された。また、その後、5 往復させても破綻すること無くトラッキングが可能であった。フレームレートは平均 15.0 [FPS] であった。特徴点の検出数に応じて、また小マップ登録時に処理不可が増大し、6.2~19.6 [FPS] で動作した。

5.2. 実寸大セットでの実験結果

ミニチュアセットでの実験と同様、LMDB 構築なしでトラッキングが可能であり、5 往復させても破綻することなくトラッキングを継続した。図 4 (b) と図 6 は、その構築したマップとその投影結果である。最終的に 1,015 点の特徴点がマップに登録され、その内参照回数の少なかった 9 点が削除された。フレームレートは平均 11.8 [FPS] であった。先の実験結果と同様の原因で、6.0~13.2 [FPS] で動作した。

5.3. 実時間性と実用性に関する考察

いずれの実験結果においても、PreViz 撮影に求められる 24 [FPS] で動作させることができなかった。本手法で最も処理時間のかかった処理はステレオの入力画像に対するフィルタ処理 (パイラテラルフィルタ) であり、平均して 35.1 [ms] を要した。この処理を抜きにすれば、それぞれのそれぞれの入力画像シーケンスでのフレームレートは 29.9 [FPS] と 19.6 [FPS] となる。本手法で実時間処理を実現するには、この処理を S3D MR-PreViz のフレームワーク中の GPGPU での処理に割り当てるか、代替となるフィルタ処理を導入する必要がある。

本手法で処理時間とトラッキング精度を大きく左右させる要因となったもう 1 つの原因は、FAST による特徴点検出の検出数であった。この閾値設定によっては、後続のステレオマッチングと特徴点マッチングでの処理時間と精度に大きな影響を与えるため、トラッキングが継続不可能になったり、精度が向上しても処理速度が大幅に増加したりといったことが起きた。実用性を考慮した場合、特徴点の検出数を一定にする等、この閾値の設定に関して簡易化する必要があると考える。

また、実寸大セットでの実験のように、シーンから離れる、もしくは離れたところから近づく場合、ステレオマッチングの精度が遠くの被写体に対して悪くなるため、カメラ位置姿勢精度が低下し、重複して特徴点が登録されることも処理速度低下の原因と考える。

6. むすび

本稿では、ICP アルゴリズムを利用したステレオカメラの位置姿勢推定法について述べた。本手法では、マルチコア CPU を用いたマルチスレッド処理とステ



(a) ミニチュアセット



(b) 実寸大セット

図 3 入力画像シーケンスの一部



(a) ミニチュアセット



(b) 実寸大セット

図 4 入力画像に投影されたマップ

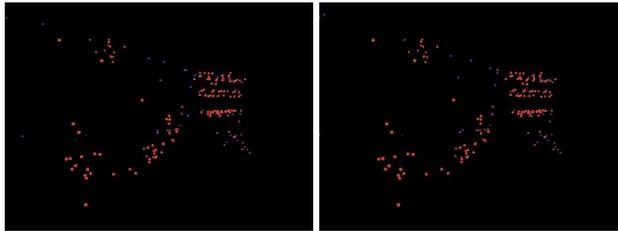


図 5 ミニチュアセットにて構築されたマップ (左: リハーサルパス上を 1 往復した結果, 右: リハーサルパス上を 2 往復した結果). 最終的に 4 つの小マップが登録され, 345 点中 5 点が削除された.

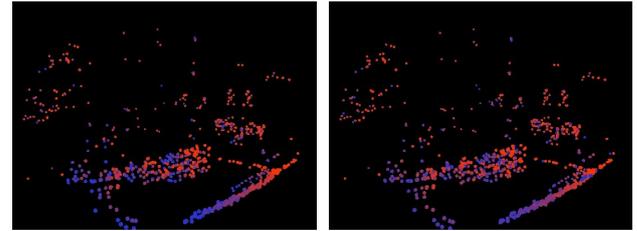


図 6 実寸大セットにて構築されたマップ (左: リハーサルパス上を 1 往復した結果, 右: リハーサルパス上を 2 往復した結果). 最終的に 7 つの小マップが登録され, 1015 点中 9 点が削除された.

レオリグの設定によって生じる拘束を利用した高速化を図った. これにより, 我々の従来手法である RPM ではオフラインで行っていた LMDB 構築を不要にし, RPM と同様, カメラがリハーサルパス上もしくはその近辺を移動することを前提に, 実時間でのマップ構築・拡張・修正, そして, 6-DOF のカメラ位置姿勢推定を行った.

今後の展開として, 本手法では問題の簡単化のために無視していた輻輳角の変更を考慮した手法の改良を予定している.

文 献

[1] 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.

[2] 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “実世界の撮影現場で 3D 映画演出を事前検討できる MR-PreViz システムの開発”, 日本 VR 学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 231 – 240, 2010.

[3] 森尚平, 豊原由規, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “S3D 化に伴う MR-PreViz システムの機能拡張と性能向上 (1) –ステレオ視拘束を積極利用したカメラ位置姿勢決定法–”, 信学技法, Vol. 111, No. 379, pp. 371 – 376, 2011.

[4] 一刈良介, 永仮貴浩, 津村勇毅, 北村一博, 柴田史久, 田村秀行: “マーカレス・カメラ・トラッキングを強化するリハーサル・パス法とその実世界運用”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 17, No. 3, pp. 241 – 252, 2012.

[5] M. Z. Brown, D. Burschka, and G. D. Hager: “Advances in computational stereo vision,” Proc. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 8, pp. 993 – 1008, 2003.

[6] K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein: “Least square fitting of two 3-D point sets,” IEEE Trans. Pattern Analysis Machine Intelligence, Vol. 9, No. 5, pp. 698 – 700, 1987.

[7] S. Se, D. Lowe, and J. Little: “Local and global localization for mobile robots using visual landmarks,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.414 – 420, 2001.

[8] P. Elinas, R. Sim, and J. J. Little: “ σ SLAM: Stereo vision SLAM using the Rao-Blackwellised particle filter and a novel mixture proposal distribution,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1564 – 1570, 2006.

[9] M. Tomono: “Robust 3D SLAM with a stereo camera based on an edge-point ICP algorithm,” IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4306 – 4311, 2009.

[10] G. Klein and D. Murray: “Parallel tracking and mapping for small AR Workspaces,” Proc. ISMAR 2007, pp. 225 - 234, 2007.

[11] R. A. Newcombe, *et al.*: “KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking,” Proc. ISMAR 2011, pp. 127 – 136, 2011.

[12] R. A. Newcombe, S. Izadi, O. Hilliges, D. Molyneaux, D. Kim, A. J. Davison, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges, and A. Fitzgibbon: “KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking,” Proc. ISMAR 2011, pp. 127 – 136, 2011.

[13] B. Mandebru: “3D movie making: Stereoscopic digital cinema from script to screen,” Focal press, 2009.

[14] E. Rosten and T. Drummond: “Machine learning for high-speed corner detection,” Proc. 9th European Conf. on Computer Vision, pp. 430 – 440, 2006.