

設備保守支援向け AR のための部分テンプレート検出と vSLAM の併用によるオブジェクト座標系へのレジストレーション

島村 潤† 森本 正志† 小池 秀樹†

† 日本電信電話株式会社 NTT サイバースペース研究所
神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: †{shimamura.jun,morimoto.masashi,k.hideki}@lab.ntt.co.jp

あらまし 本稿では、オブジェクトの部分テンプレート検出と vSLAM を併用するオブジェクト座標系へのレジストレーション手法を提案する。提案手法で対象に関する事前準備は、オブジェクト座標系を定義するオブジェクト上の一部を示す最低 3 枚の部分テンプレート情報のみである。提案手法では vSLAM で推定するシーンの三次元点群と、同時刻のフレーム画像から検出した部分テンプレート位置を対応付け、オブジェクト座標系への並進・回転パラメータを推定する。これにより基準座標系が未定義である vSLAM の三次元点群及びカメラ位置・姿勢を、オブジェクトを基準とした座標系へ変換することが可能になるといった特徴を持つ。加えて、我々が提案した初期フレームの三次元構造不要で、シーン内の動オブジェクトの存在に対応する動的シーン対応 vSLAM 手法を適用することで、利用時のユーザ操作を低減し、かつユーザによるオブジェクト操作の許容も可能となるといった特徴も持つ。配線架設備を対象とした実験を通じ、本手法により、オブジェクト座標系へのレジストレーションを正しく行えることを確認した。

キーワード 幾何レジストレーション, オブジェクト座標系, vSLAM, 設備保守支援向け AR

1. はじめに

現実環境を仮想情報で補強する拡張現実感 (AR) は、ナビゲーション、メンテナンス支援、景観シミュレーションなど幅広い用途で利用される [1]。拡張現実感を用いれば、ユーザは自身が属する実世界に則して所望の仮想情報を享受できるため、直観的なインタフェースを実現できる。我々はこの拡張現実感を用い、設備オペレータの保守支援や配線支援を実現する設備保守支援向け AR の研究開発を行っている。図 1 に想定する例を示す。図 1 に示すとおり、ユーザであるオペレータがカメラを対象オブジェクトである配線架設備にかざすと、カメラ画像上にオブジェクトの部位説明や、操作説明内容が部位近傍に実時間で表示されることを想定している。この設備保守支援向け AR の実現に向けては以下 3 点が要件となる。

(1) オブジェクト座標系でのレジストレーション

オブジェクトに応じてカメラ画像上に仮想情報を付与するには、オブジェクトに対するカメラの位置・姿勢を推定し、これに合わせて仮想情報を重畳する幾何レジストレーション (以下、レジストレーション) が必要となる。

(2) 利用時のユーザ操作の低減

ユーザは必ずしも情報リテラシが高くないことを想定しているため、システム利用時に必要なユーザ操作は少ないことが望ましい。

(3) ユーザによるオブジェクト操作の許容

オブジェクト自体は固定されていることを想定するが、その保守や配線時にはオブジェクトの部位に対する操作

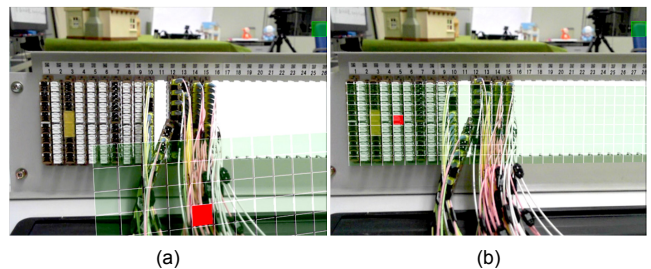


図 1 配線架設備を対象とした設備保守支援向け AR の一例。
(a) 初期時刻では、付加情報である CG (オブジェクト手前右下のグリッド) は適当な位置に設定される。(b) レジストレーションが完了すると以降の時刻では設備の部位に合致した状態で合成表示される。

を行う可能性が高い。このため、レジストレーション時には動オブジェクトの存在を考慮する必要がある (a)。また、配線を繰り返していくとオブジェクト自体の形状が変化することも考慮する必要がある (b)。

美観維持や広範な移動に対応するために人工的なマーカーを配置することなく、カメラ画像によってレジストレーションする方法はモデルベース [2], [3], 特徴点ベース [4], [5] に大別される。前者の方法は、CAD 等によって予め作成された三次元モデルを用い、これが入力画像上に矛盾なくあてはまるようにカメラの位置・姿勢を推定する。例えば Drummond [2] や Comport [3] の方法では、三次元モデルのワイヤフレームを入力画像に投影し、投影された輪郭と画像上のエッジ間の距離を最小化することでカメラの位置・姿勢を算出している。この処理によって、三次元モデルで表現されたオブジェクトに

対するカメラの位置・姿勢を推定することができ（要件（1））、オブジェクトに応じた仮想情報提示が可能となる。しかし三次元モデル作成の人的コストが問題となることに加え、要件（3-b）記述のユーザ操作によるオブジェクト形状変化が生じた場合、システム起動時に観測するオブジェクト形状と予め準備した三次元モデルに差異が生じるため、その適用が困難もしくは三次元モデルの再準備が必要となるといった問題がある。

後者の特徴点ベースの方法では、シーンの初期フレームにおいてステレオ法などによって計測された簡易な三次元構造が得られていること及び、シーンが静的であることを前提に i) 特徴点の追跡、ii) カメラの位置・姿勢の推定、iii) 特徴点の三次元位置の推定・更新を繰り返す。この方法はカメラの位置・姿勢推定と特徴点の三次元位置推定を同時に行うことから、visual Simultaneous Localization and Mapping（以下、vSLAM）と呼ばれる。vSLAM は初期フレームでの三次元構造を用いて時々刻々のカメラの位置・姿勢推定を行えるため、システム起動時に観測するシーンの三次元構造と初期値である三次元構造の差異は生じない。しかし vSLAM で利用する特徴点には位置合わせの基準となる座標系が定義されていないため、オブジェクトと仮想情報の相対的な位置関係を決定することができず要件（1）の実現が難しい。またユーザ操作を要さない初期フレームの三次元構造獲得（要件（2））、ユーザ操作などの動オブジェクトへの対応（要件（3-a））が課題となる。

以上の問題に対して本稿では、オブジェクトの部分テンプレート検出と vSLAM を併用するオブジェクト座標系へのレジストレーション手法を提案する。提案手法で対象に関する事前準備は、オブジェクト座標系を定義するオブジェクト上の一部を示す最低3枚の部分テンプレート情報のみである。提案手法では vSLAM で推定するシーンの三次元点群を、同時刻のフレーム画像から検出した部分テンプレート位置と対応付け、オブジェクト座標系への並進・回転パラメータを推定する。これにより基準座標系が未定義である vSLAM の三次元点群及びカメラ位置・姿勢を、オブジェクトを基準とした座標系へ変換することが可能となるといった特徴を持つ（要件1）。加えて、我々が提案した初期フレームの三次元構造不要で、シーン内の動オブジェクトの存在に対応する動的シーン対応 vSLAM 手法 [6] を適用することで利用時のユーザ操作を低減し、かつユーザによるオブジェクト操作の許容も可能となるといった特徴を持つ（要件2、要件3）。

同様の目的を持つ研究としては大江らの方法 [7] や、Bleser らの方法 [8]、Castle らの方法 [9] が挙げられるが、大江らの方法は予め多数のランドマークデータベースを計測する必要がある。また Bleser らの方法では予め準備した三次元モデルと vSLAM を組合せることで基準座標系設定の問題を解決しているが、モデルベース法同様

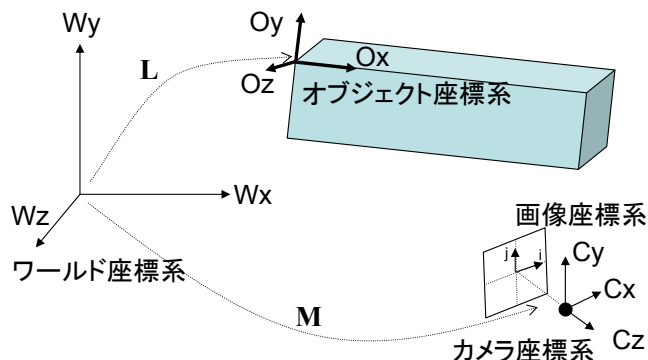


図2 本稿で用いる座標系。

に三次元モデル作成の人的コストと、オブジェクト形状変化への対応が問題となる。また、Castle らの方法 [9] は対象が平面物体に限られるといった問題がある。これに対して提案手法では、オブジェクト座標系定義にオブジェクト上の特定箇所のみ部分テンプレートを用いることで、準備に要する人的コストの削減と、三次元オブジェクトへの対応を可能とした。

以下2章では提案する部分テンプレート検出と vSLAM を併用するオブジェクト座標系へのレジストレーション手法の詳細について、3章では配線架設備を対象とした実験結果について述べる。最後に4章で本稿をまとめる。

2. 提案手法

2.1 座標系の定義と提案手法の処理手順

まず本稿で扱う座標系について定義する。図2に示すように、カメラの位置・姿勢を表すカメラ座標系と、物体の位置・姿勢を表すオブジェクト座標系は両者共にワールド座標系からの相対位置・回転で表現される。ワールド座標系からカメラ座標系への変換行列 M 、ワールド座標系からオブジェクト座標系への変換行列 L を、それぞれ以下のように定義する。

$$M = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_c & \mathbf{t}_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

$$L = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_o & \mathbf{t}_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

式1, 2において、 $\mathbf{R}_c, \mathbf{R}_o$ は 3×3 の回転行列であり、 $\mathbf{t}_c, \mathbf{t}_o$ は並進ベクトルを意味する。

続いて提案手法の処理手順を図3に示す。提案手法への入力データは、カメラで撮像したある時刻 t のフレーム画像 $F(t)$ と、オブジェクト座標系を定義する部分テンプレートと、カメラの内部パラメータである。ここで部分テンプレート及びカメラの内部パラメータは既知で

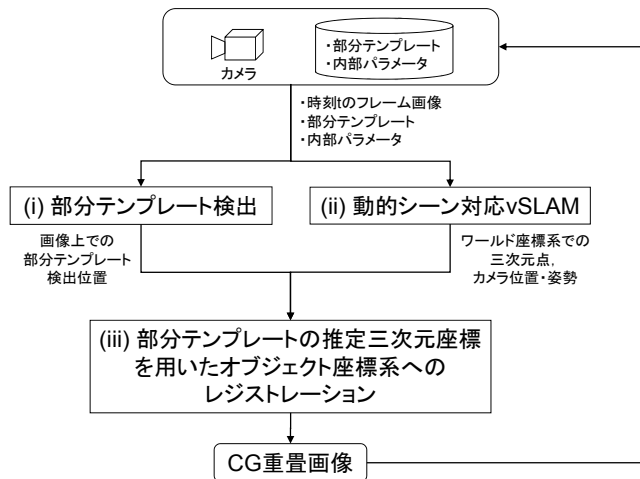


図 3 提案手法の処理手順.

あるものとする. 本手法ではまず, 部分テンプレート検出 (i) によって $F(t)$ 上での部分テンプレート位置を推定する. 並行してシーン内の動オブジェクトの存在に対応する vSLAM 手法 [6] によって, $F(t)$ 内での特徴点追跡に基づき時刻 t の特徴点の三次元点及びカメラ位置・姿勢パラメータを推定する (ii). このカメラ位置・姿勢と, 三次元点は vSLAM で適当に設定されたワールド座標系で表現される. 最後に (i) で推定した部分テンプレートの検出位置と, (ii) で推定した三次元点とカメラ位置・姿勢から, 部分テンプレートの三次元座標値を推定し, これと部分テンプレートに関連付けられたオブジェクト座標系の情報を用いて付加情報である CG 情報を三次元 CG 空間内でオブジェクト座標系へとレジストレーションする (iii). (i)~(iii) の処理を各時刻で繰り返すことで, 動画像としての設備保守支援向け AR を実現する.

以下では処理ステージ (i)~(iii) について詳述する.

2.2 部分テンプレートの検出

本節では部分テンプレートに対する要件と, フレーム画像 $F(t)$ からの部分テンプレート検出, 部分テンプレートの誤検出防止手法について述べる. ここで誤検出防止手法は本稿で用いる対象オブジェクトに依存した手法である. 本件で想定する設備保守支援 AR では高い精度が要求されるため後述の実験では利用したが, 提案手法の枠組みにおいてその利用はこの限りではない.

まず部分テンプレートに対する要件について図 4 をもとに述べる. 図 4 で示すオブジェクトが本稿でアルゴリズムの説明に用いる配線架設備の概観である. この対象オブジェクトのオブジェクト座標系は, 図 4 の Ox, Oy, Oz 軸で構成されるものとする. 本手法で設定する部分テンプレートの位置は, 1 つはオブジェクト座標系の原点 (図 4(a)), 1 つは Oy 軸上 ($Oz = 0$) の任意の点 (図 4(b)), 1 つは $Ox - Oy$ 平面上の任意の点 (図 4(c)) とする. これら少なくとも 3 点上のテンプレートを予め作成し, それぞれ前述の原点位置, Oy 上, $Ox - Oy$ 平面上といっ

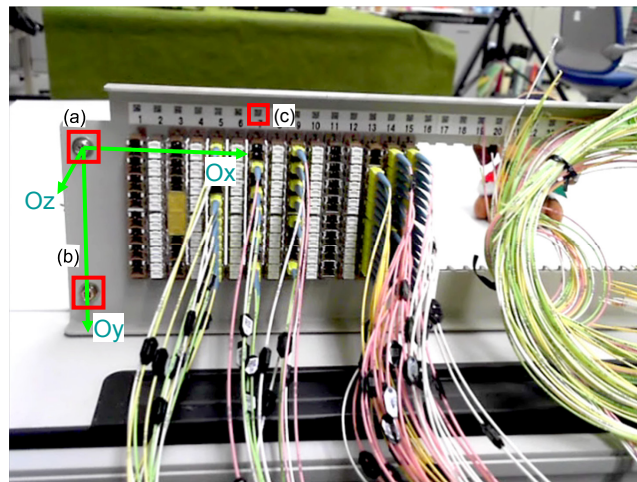


図 4 部分テンプレートの設定. (a) オブジェクト座標系の原点位置, (b) Oy 軸上, (c) $Ox - Oy$ 平面上の点にそれぞれ設定する.

た ID を付与して準備しておく.

次にフレーム画像 $F(t)$ からの部分テンプレートの検出手法について述べる. 部分テンプレートの検出は, 部分テンプレートを基準画像, $F(t)$ を参照画像としたテンプレートマッチングにより実施する. その際, マッチングの評価尺度には SSD (Sum of Squared Difference) を用いる.

続いて誤検出防止手法について述べる. 部分テンプレートのフレームアウトや画像上のノイズ, 類似パターンの存在に起因した誤検出を防ぐため, 部分テンプレート (a), (b) についてはその検出後に検出領域内で楕円当てはめを行い, 推定された楕円の円形度に対する閾値処理を適用する. 加えて, 部分テンプレート (c) については対象オブジェクトにおいて類似パターンが $Ox - Oy$ 平面上で直線状に存在するため, テンプレートマッチング時に複数候補検出し, 検出された候補点に直線を当てはめ, 推定した直線に対する候補点の距離総和に対する閾値処理を適用することで正確に検出できたかどうかを判定する. 部分テンプレート (c) は $Ox - Oy$ 平面上の任意点で良いため, 後述の実験では候補点全てを三次元座標推定対象とした.

2.3 動的シーン対応 vSLAM

部分テンプレート検出と並行して, vSLAM により三次元点及びカメラ位置・姿勢を推定する. その際, 我々が提案した初期値不要かつ, 動的シーンに対応した三次元点及びカメラ位置・姿勢推定手法を用いる. 詳細については文献 [6] に記載されているため, 本節では概要記載に留める.

本手法では, 予め適当に設定したシーンの三次元構造及びカメラ位置・姿勢を暫定的な初期値とし, 数時刻後に全フレームの再投影誤差をフレーム毎に重み付けしたもとの最小化して三次元点及びカメラ位置・姿勢を修正

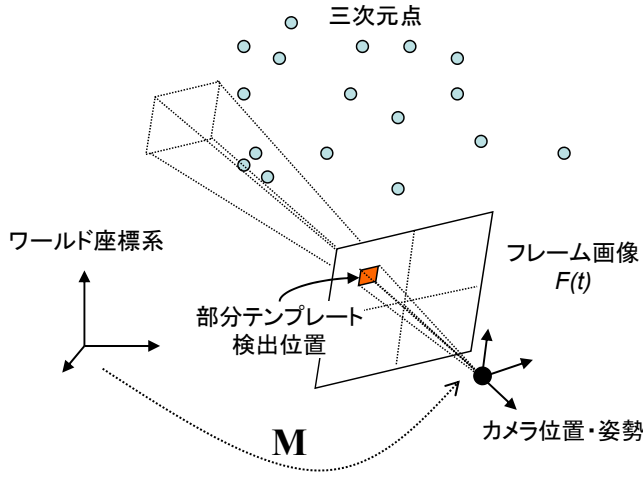


図5 部分テンプレートの三次元座標推定.

することで、厳密な初期値設定が不要となる．加えて、vSLAMにおけるカメラ位置・姿勢推定時にアウトライヤとなる特徴点を検出し、このアウトライヤのベクトル角度を特徴量としてEMアルゴリズムを適用して動物体上の点を推定・除去することで、シーン内に動オブジェクトが存在する場合でも頑健に三次元点及びカメラ位置・姿勢 $\mathbf{M}$ を推定することが可能である．なお、この手法で推定される三次元点とカメラ位置・姿勢は、vSLAM起動時に適当に設定したワールド座標系で表現される．

2.4 部分テンプレートの推定三次元座標を用いたオブジェクト座標系へのレジストレーション

本節では2.2節で推定した部分テンプレート検出位置と、2.3節で推定した三次元点及びカメラ位置・姿勢情報から、部分テンプレートの三次元座標値を推定し、オブジェクト座標系への変換行列 $\mathbf{L}$ を算出しレジストレーションする方法について述べる．

部分テンプレートの三次元座標推定

まず部分テンプレート検出位置とvSLAMで推定した三次元点及びカメラ位置・姿勢を用いて、部分テンプレートの三次元座標を推定する方法について述べる．本手法では図5図解のとおり、カメラの位置と、部分テンプレート検出位置を中心としたテンプレートサイズからなる四角の4頂点から構成される四角錐内部に属する三次元点の座標を用い、部分テンプレートの三次元座標を推定する．具体的には以下Step1~3)の処理を全ての部分テンプレート検出位置について行なう．

Step1) 三次元点のフレーム画像 $F(t)$ への再射影

vSLAMで推定したカメラ位置・姿勢 $\mathbf{M}$ を用い、式3によって推定した三次元点全てを $F(t)$ に再射影する．

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{M} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

ここで $\mathbf{A}$ はカメラの内部パラメータを示す．

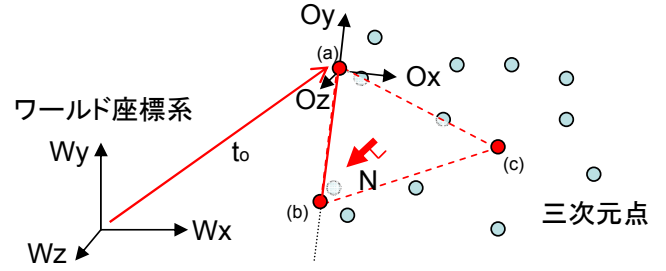


図6 オブジェクト座標系への変換行列算出．変換行列の並進成分 $\mathbf{t}_0$ は部分テンプレート (a) の三次元座標，回転成分は部分テンプレート (a),(b),(c) で構成される平面法線ベクトルと，部分テンプレート (a),(b) が成す直線ベクトルを用いて算出する．

Step2) 再射影点の部分テンプレートに対する内外判定

$F(t)$ 上で、部分テンプレートの検出位置を中心としたテンプレートサイズからなる四角形をマスクとし、Step1) で再射影した点がマスク内に属するかどうかを、再射影点の二次元座標値を使って判定する．マスク内に属する再射影点のみ Step3) へ出力する．

Step3) 部分テンプレート内の再射影点を用いた三次元座標算出

Step2) でマスク内に属すると判定された再射影点全ての三次元点の X 座標、 Y 座標、 Z 座標それぞれについて平均を算出し、この平均値 $(X_{ave}, Y_{ave}, Z_{ave})^T$ を部分テンプレートの三次元座標とする．

オブジェクト座標系への変換行列推定

続いて、前節で求めた部分テンプレートの三次元座標をもとに、オブジェクト座標系への変換行列 $\mathbf{L}$ を推定する．図6に示すとおり、変換行列の並進成分 $\mathbf{t}_0$ は部分テンプレート (a) の三次元座標，回転成分 $\mathbf{R}_0$ は部分テンプレート (a), (b), (c) で構成される平面法線ベクトルと，部分テンプレート (a), (b) が成す直線ベクトルを用いてそれぞれ算出される．

具体的な方法を以下に述べる．なおここでは、説明の簡略化のため、オブジェクト座標系からワールド座標系への変換行列 $\mathbf{L}^{-1}$ の算出について述べる．部分テンプレート (a) はオブジェクト座標系の原点位置を示すため、変換行列 $\mathbf{L}^{-1}$ の並進成分 $\mathbf{t}_0$ は $(-X_a, -Y_a, -Z_a)^T$ となる．ここで $(-X_a, -Y_a, -Z_a)^T$ は前節で求めた部分テンプレート (a) の三次元座標を示す．次に回転行列 $\mathbf{R}_0$ を推定する．まず部分テンプレート (a), (b), (c) の三次元座標に平面を当てはめ、この平面の法線ベクトル $\mathbf{N}$ を推定する．次に $\mathbf{N}$ をワールド座標系の W_z 軸ベクトル $\mathbf{W}_z$ と合致させる回転行列 $\mathbf{R}_z$ を求める．この回転行列は、回転軸ベクトル $\mathbf{A}$ と回転角 θ を算出することで決定できる．回転軸ベクトル $\mathbf{A}$ と回転角 θ はそれぞれ式4、式5で算出できる．

$$\mathbf{A} = \mathbf{N} \times \mathbf{W}_z. \quad (4)$$

$$\theta = \cos^{-1}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{W}_z / (|\mathbf{N}| |\mathbf{W}_z|)). \quad (5)$$

なお、式 4 において $\times$ は外積を、式 5 において $\cdot$ は内積を表す。同様に部分テンプレート (a), (b) からなるオブジェクト座標系の O_y 軸ベクトル O_y をワールド座標系の W_y 軸ベクトル W_y と合致させる回転行列 R_y を求め、 R_z と R_y を乗算したうえで L^{-1} の回転行列 R_o とする。

変換行列推定の終了条件

vSLAM の推定三次元座標には誤差が含まれる。そのため、提案手法では基線長の延伸による推定精度向上を図り、起動時から毎時刻変換行列 L の推定とこれを用いたレジストレーションを行う。しかしながら、部分テンプレート検出はフレーム画像内を全探索するため計算処理量が多く、最終的にユーザー提示する CG 重畳画像のフレームレートを悪化させる。このため提案手法では、連続する 2 時刻のフレーム画像間において変換行列の変化が十分小さくなった場合には、以降時刻での部分テンプレート検出と変換行列推定を中止する。この終了条件には $|t_t - t_{t-1}| < th_1$ 、かつ $|\theta_t - \theta_{t-1}| < th_2$ 、かつ $|\phi_t - \phi_{t-1}| < th_3$ を用いる。ここで添字の $t, t-1$ はフレーム $F(t), F(t-1)$ での推定値であることを表す。また t は変換行列 L の並進ベクトルを、 θ と ϕ はそれぞれ W_z 軸、 W_y 軸へ合致させるための回転角を、 th_1, th_2, th_3 は所定の閾値を示す。時刻 t で終了条件を満たした場合、以降の時刻では動的シーン対応 vSLAM のみ動作し、オブジェクト座標系への変換行列 L は時刻 t のものを用いる。

3. 実験結果

提案手法の有効性を確認するために、図 1 で示した配線架設備を対象オブジェクトとした実験結果について述べる。なお配線作業を繰返したことにより、図 1 の時からオブジェクト自体の形状が変化した状態で実験を行った。

提案手法の実装はノート PC (VAIO VPCZ12AGJ) 上に C++ で行った。カメラには Microsoft 社製の USB カメラ (LifeCam Studio, 640×480 , 30fps) を用い、その内部パラメータは予め Zhang の方法 [10] によって求めたものを用いた。部分テンプレートは図 4 に示した (a), (b), (c) を用いた。そのサイズは (a), (b) はともに 39×39 [pixel]、(c) は 13×13 [pixel] である。2.4 節で述べたレジストレーションの終了条件の閾値は th_1 を 0.1、 th_2, th_3 を 0.3 [deg.] とした。これらの値は予備実験を通じて決定した。

図 7 にフレーム画像 $F(t)$ での部分テンプレート検出結果を示す。部分テンプレート (a), (b), (c) それぞれの検出位置を赤枠で示している。本実験において部分テンプレート (c) については、2.2 節で述べたとおり複数個所検出している。図 7 から、部分テンプレートはほぼ正しく検出できていることが分かる。図 8 にオブジェクト座標系へのレジストレーション結果を示す。図 8 中、(a1) はレジストレーション完了前の CG 合成画像、(b1)

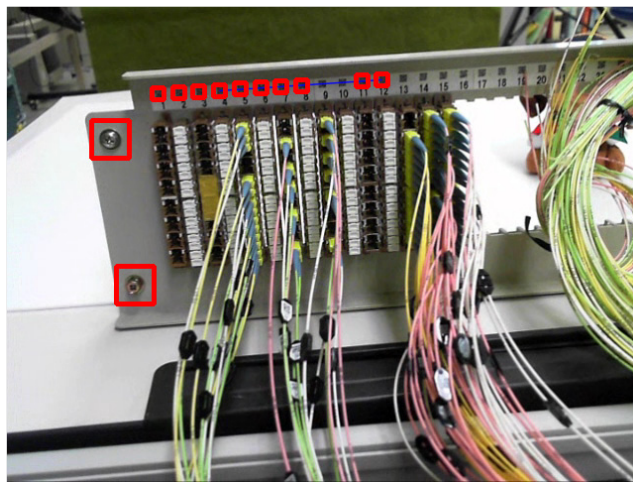


図 7 部分テンプレートの検出結果。

はレジストレーション完了後の CG 合成画像をそれぞれ示す。図 8 から、時刻 (a1) では CG 重畳時の基準となるオブジェクト座標系が未定のため、オブジェクトに併せた CG 合成が失敗していることが分かる。対して時刻 (b1) では提案手法によってオブジェクト座標系が推定され、オブジェクトに併せた正確な CG 合成に成功していることが分かる。また、図 8 の (a2), (b2) は時刻 (a1), (b1) 時の三次元点の分布を示したものである。レジストレーションの正確性を確認するため、図 8(a2), (b2) ではオブジェクト座標系への変換行列推定に成功した場合、オブジェクト座標系がワールド座標系と合致するように変換した結果を示している。図 8(a2) の時刻ではオブジェクト座標系が未定のため、白線で示すワールド座標系と合致していないが、図 8(b2) の時刻ではオブジェクト座標系推定の結果、変換行列によってオブジェクト座標系とワールド座標系が合致していることが確認できる。

4. ま と め

本稿では、オブジェクトの部分テンプレート検出と vSLAM を併用するオブジェクト座標系へのレジストレーション手法を提案した。提案手法で対象に関する事前準備は、オブジェクト座標系を定義するオブジェクト上の一部を示す最低 3 枚の部分テンプレート情報のみである。提案手法では vSLAM で推定するシーンの三次元点群と、同時刻のフレーム画像から検出した部分テンプレート位置を対応付け、オブジェクト座標系への並進・回転パラメータを推定する。これにより基準座標系が未定義である vSLAM の三次元点群及びカメラ位置・姿勢を、オブジェクトを基準とした座標系へ変換することが可能になる。加えて、我々が提案した初期フレームの三次元構造不要で、シーン内の動オブジェクトの存在に対応する動的シーン対応 vSLAM 手法を適用することで、利用時のユーザ操作を低減し、かつユーザによるオブジェクト操作の許容も可能となる。配線架設備を対象とした実験を通じ、本手法により、オブジェクト座標系へのレジ

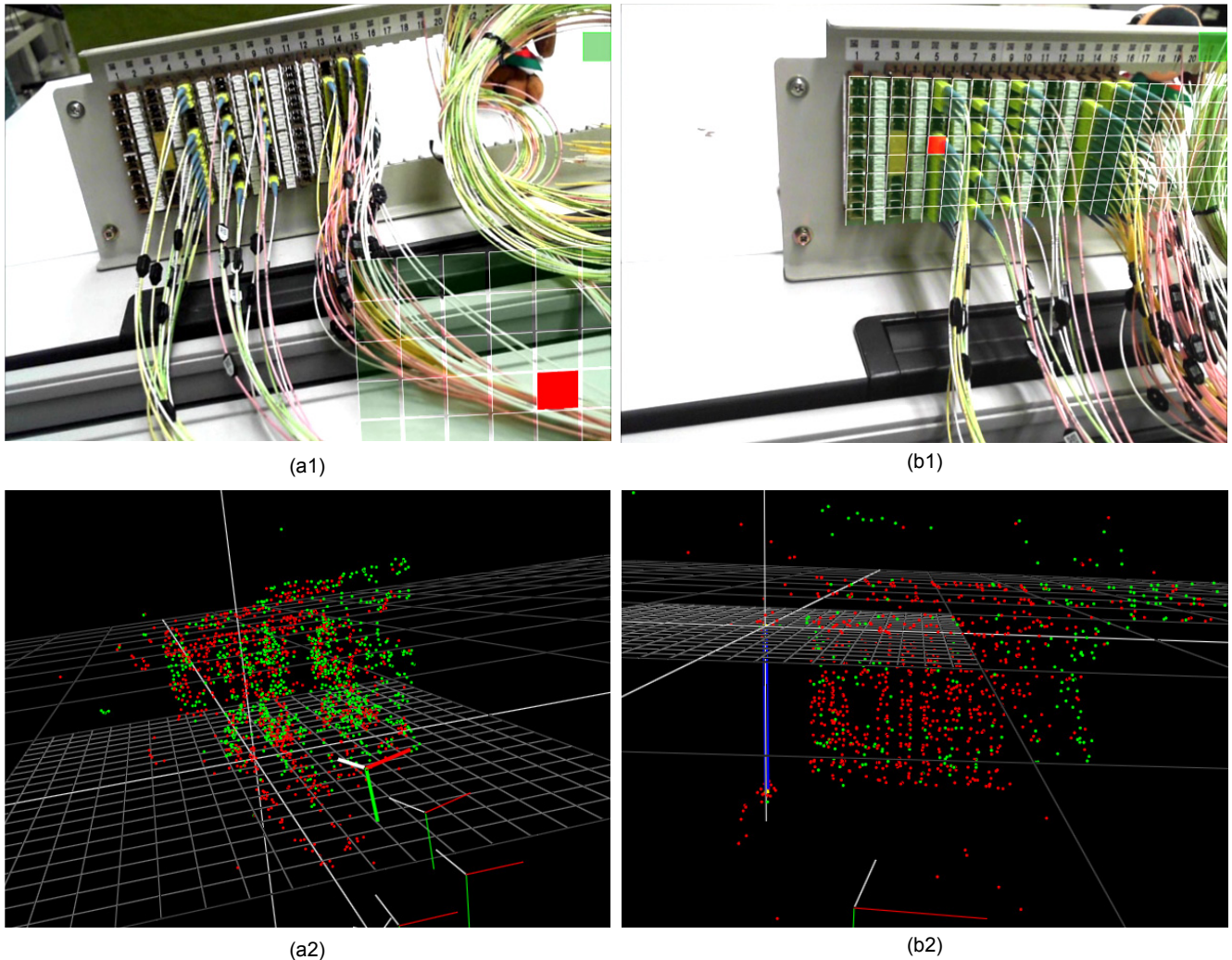


図 8 オブジェクト座標系へのレジストレーション結果. (a1) レジストレーション完了前の CG 合成画像, (a2) 時刻 (a1) での三次元点の分布. この段階ではオブジェクト座標系が未定のため, 白線で示すワールド座標系の適当な位置に配置される. (b1) レジストレーション完了後の CG 合成画像, (b2) 時刻 (b1) での三次元点の分布. オブジェクト座標系の推定に成功し, 変換行列によってオブジェクト座標系とワールド座標系が合致している. なお, 赤で示す三次元点は vSLAM においてインライヤと推定された点, 緑はアウトライヤを示す. 加えて, 図中手前の赤, 緑, 白からなる座標系は vSLAM によって推定されたカメラ位置・姿勢を示す. 本図はカラー閲覧が適している.

ストレーションを正しく行えることを確認した.

今後は提案手法の精度評価を行う予定である.

謝 辞

本研究は NTT アクセスサービスシステム研究所との共同による. 実験設備を提供して頂いた NTT アクセスサービスシステム研究所 アクセスメディアプロジェクトに感謝する.

文 献

- [1] Y. Ohta, and H. Tamura, Mixed Reality: Merging Real and Virtual Words, Springer-Verlag, 1999.
- [2] T. Drummond, and R. Cipolla, “Real-time visual tracking of complex structure,” Trans. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 7, pp. 932–946, July 2002.
- [3] A. Comport, E. Marchand, M. Pressigout, and F. Chaumette, “Real-time markerless tracking for augmented reality,” Trans. IEEE Visualization and Computer Graphics, vol. 12, no. 4, pp. 615–628, Aug. 2006.
- [4] A. Davison, I. Reid, N. Molton, and O. Stasse, “MonoSLAM: Real-time single camera SLAM,” Trans. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 29, no. 6, pp. 1052–1067, June 2007.
- [5] G. Klein, and D. W. Murray, “Parallel tracking and mapping for small AR workspaces,” Proc. 6th IEEE/ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 225–234, Nara, Japan, Nov. 2007.
- [6] J. Shimamura, M. Morimoto, and H. Koike, “Robust vSLAM for dynamic scenes,” Proc. 12th IAPR Int. Conf. on Machine Vision Applications, to appear, Nara, Japan, June. 2011.

- [7] 大江統子, 佐藤智和, 横矢直和, “幾何学的位置合わせのための自然特徴点ランドマークデータベースを用いたカメラ位置・姿勢推定,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 10, no. 3, pp. 285–294, Sep. 2005.
- [8] G. Bleser, H. Wuest, and D. Stricker, “Online camera pose estimation in partially known and dynamic scenes,” Proc. 5th IEEE/ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 56–65, Santa Barbara, USA, Oct. 2006.
- [9] R. O. Castle, and D. W. Murray, “Object recognition and localization while tracking and mapping,” Proc. 8th IEEE/ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp. 19–22, Florida, USA, Oct. 2009.
- [10] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” Trans. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 11, pp. 1340–1334, Nov. 2000.