環境3Dモデルによるカメラトラッキングを用いた温度分布のAR表示システム

AR Display System of Temperature by Camera Tracking based on 3D Environmental Model

中川 航[†], 松本一紀[†], フランソワドゥソルビエ[†], 杉本麻樹[†],
正会員 斎藤英雄[†], 仙田修司^{††}, 柴田剛志^{††}, 池谷彰彦^{††}

Wataru Nakagawa[†], Kazuki Matsumoto[†], Francois de Sorbier[†], Maki Sugimoto[†], Hideo Saito[†], Shuji Senda^{††},
Takashi Shibata^{††} and Akihiko Iketani^{††}

あらまし 近年、温度カメラは、機械設備・建築物の検査や、人間や動物の体温の検査等、多くの目的に利用されるようになってきた。本論文では、RGB-D カメラで取得した3次元環境モデルを利用して、このモデル上に温度分布をレンダリング表示することにより、対象環境の温度分布を自由な視点から観察可能なシステムを提案する。本システムでは、3D環境モデルを利用したカメラ位置姿勢のトラッキング手法に基づき、事前に取得しておいた温度分布に対して、現在の温度変化を表示することも可能である。提案システムの有効性を検証するために、幾つかのシーンに対して本システムを利用して表示した温度分布や温度変化分布を示す。

キーワード：キャリブレーション、トラッキング、3D温度マップ

1. ま え が き

温度の状態を知ることは、機械設備・建築物の検査や、人間や動物の体温の検査等において、非常に重要である。温度画像とカラー画像の両方が撮影できるカメラが販売されているように、温度情報とカラー情報を併用して用いることは一般的に行われている。近年では、温度カメラとデプスカメラを併用することの研究が盛んに行われている。例えば、温度カメラとデプスカメラを併用し、3Dの温度マップを生成することで、2次元的な温度画像からは得られない幾何学的な情報などを得るための研究がされてきた¹⁾²⁾³⁾。Demisse⁴⁾らは、3D温度マップを用いて、可視光だけでは判定できない、窓の開閉状況等、室内環境の状況把握を行った。また、温度情報を手術の対象物体上に投影することで、医療分野に応用しようとする研究もあり、温度情報をAR表示することは、様々な応用があると考えられる⁵⁾。

本論文では、環境の3D温度モデルを手持ち可能なデバイスを用いてAR表示するシステムを提案する。このシステムでは、RGB-Dカメラと温度カメラを用いて広範囲の3次元形状モデルとその表面温度分布をあらかじめ取得しておき、RGB-Dカメラでその環境の一部を観察した際に、

事前に取得した温度分布をAR表示するものである。また、同時に温度カメラで温度分布を取得することにより、事前に計測してあった温度分布との違いを検出・AR表示することもできる。

2. 関 連 研 究

本章では、提案手法を構成する重要な要素である、3D温度マップ、カメラトラッキングの先行研究について述べる。

2.1 3D温度マップ

Borrmannらは、車輪付きのロボットにレーザースキャナと温度カメラを載せ、3D温度マップを生成する手法を提案した¹⁾。Vidasらは、比較的安価なRGB-Dカメラと温度カメラを用い、正確な3D温度マップを生成する手法を示した。彼らはKinectFusion⁶⁾が推定するカメラの位置・姿勢を元として、RGB-Dカメラと温度カメラの正確な幾何学的・時間的キャリブレーションに基づき温度情報を3Dモデルに付加していき、3D温度マップを生成した³⁾。我々は、Vidasら同様、KinectFusionで再構成される3Dモデルを用いて温度マップを生成し、モデルベースのトラッキングを用いることで、この温度マップをカラー画像上にAR表示するというシステムを提案する。

2.2 トラッキング

Dissaphongらは、視点生成型学習を用いて3次元物体のトラッキングをする手法を提案した⁷⁾。彼らのトラッキング手法は、視点生成型学習を用いて対象物体から、3次

2014年11月30日受付, 2015年2月18日再受付, 2015年3月4日採録

[†] 慶應義塾大学 大学院 理工学研究科

(〒223-0011 横浜市港北区日吉 3-14-1, TEL 045-563-1141)

^{††} 日本電気株式会社

(〒211-0011 川崎市中原区下沼部 1753, TEL 044-433-1111)

図 1 撮影装置，互いに固定された RGB-D カメラと温度カメラからなる

元点と対応する複数の特徴量のデータベースを生成し，現在の画像から抽出される特徴量との対応関係から毎フレームカメラの位置・姿勢を推定するというものである，しかし，彼らのトラッキング手法では，現在の画像からよい特徴が検出されなかった場合，トラッキング精度が不安定になるという問題があった．そこで我々は，Dissaphong らの手法にフレーム間トラッキングを組み込むことで，より安定してトラッキングを行える手法を提案する．

3. 温度分布の AR 表示システム

本システムでは，図 1 のような互いに固定された，RGB-D カメラと温度カメラからなる撮影装置を用いる．

本システムの処理は，オフライン処理とオンラインから処理なる．まず，複数のカメラから得た情報を統合するため，カメラキャリブレーションを行う．キャリブレーション後，3Dモデルを生成する．生成中の各フレームでカラー情報，温度情報を保存し，モデル生成後これらの情報を付加し，3Dカラーモデル，3D温度マップを生成する．温度モデルは，オンラインでの温度と比較するための，基準温度マップとして利用する．視点生成型学習⁷⁾をカラーモデルに適用することで特徴量のデータベースを生成し，オンライン処理でカメラの位置・姿勢を推定するために用いる．

オンライン処理では，まずカメラの位置・姿勢を推定する．オフラインで生成した特徴量とオンラインで得たカラー画像から抽出した特徴量の対応から初期カメラ位置・姿勢を推定し，その後はフレーム間トラッキングを行う．推定されたカメラの位置・姿勢情報を用いて，オフラインで生成した色のついていない3Dモデルに，オンラインで得られる温度情報を付加し，オンラインの3D温度マップを生成する．トラッキングにより，オフラインとオンラインで生成した2種類の温度マップをカラー画像上にAR表示することが可能となり，2つの温度マップの差分を取ることで，温度変化分布を可視化することも可能である．図2に提案手法の流れを示す．

3.1 カメラキャリブレーション

Hilsenstein らは，キャリブレーションパターンを回路基板の上に圧延することで，高精度なキャリブレーション手

図 2 処理の流れ

法を提案した．彼らは，物質による放射率の違いを利用し，鮮明なチェッカーボードパターンを生成した⁸⁾．Ng らは，金属と樹脂からなるチェッカーパターンを提案し，熱を当てたときの，材質による熱吸収率の違いを利用した⁹⁾．しかしこれらはいずれも，コストがかかり，また，精緻な準備，キャリブレーション作業が必要となる．Cheng らは，通常のキャリブレーションボードを白熱電球で温めるというシンプルな手法でキャリブレーションを行った¹⁰⁾．そこで我々は，シンプルかつ容易な手法で，正確にキャリブレーションをすることを目標とした．

本システムで用いるキャリブレーション手法では，サークルグリッドボードを用いる．しかし，キャリブレーションボードは温度が一樣なため，温度カメラで撮影した画像では，キャリブレーションパターンを検出することができない．我々は，カラーカメラ，温度カメラどちらからもパターンが検出可能な新たなキャリブレーションボードを提案する．提案ボードは，3Dプリンターを用いて生成した二つの樹脂版からなる．片方の樹脂版は，図3(a)に示すように，一定の規則で並んだ突起を持つ平面で，キャリブレーションパターンの黒い部分に対応する．もう1つは，図3(b)に示すように，1つ目の樹脂版に隙間なく埋め込むように作られており，黒い部分が見えるように，円形の穴が開いた平面である．キャリブレーションの際には，埋め込まれる側の樹脂版をドライヤーなどで暖めることで，図3(c)に示すように，温度についても，キャリブレーションパターンが検出できる．2つの理由から，チェッカーボードではなくサークルグリッドを使用している．一つは，円形の方がはめ込む作業が容易であること．もう1つは，撮影された画像が不鮮明であったり，暖められた樹脂版の熱が，もう一方の樹脂版に様に伝搬しても，頑強に円の中心を検出できるからである．

内部パラメータは，Zhang¹¹⁾らの手法を用いて推定される．キャリブレーションボードを複数の視点からキャプチャし，焦点距離，光学中心，アスペクト比を推定する．カ

メラの歪みはないとしている。これらの値を求めるために、openCV ライブラリの `calibrateCamera` という関数を用いている。この関数を使う上で光学中心に初期値を入れないと、出力される内部パラメータが不安定な値となってしまう。そのため光学中心に近い値を持つ画像中心を初期値として与え、キャリブレーション中に光学中心の推定精度を向上させている。

複数のセンサから得られた情報を統合するために、外部パラメータを推定する必要がある。外部パラメータを正確に求めるため、RGB-D カメラから得られるデプスマップを利用した。カラー画像から検出される円形グリッドの中心に対して、3次元点を求めることができる。温度画像から検出された2次元点と3D/2D対応から、Efficient Perspective-n-Point アルゴリズム¹²⁾を適用することで、外部パラメータを算出した。ここで、RGB-D カメラから得られるデプスマップは、ノイズを含むことが知られている。そこで我々は、検出された3次元点をボード平面上に投影し精度を向上させたデプス値を入力とすることで、ノイズ対策を行う。まず、検出された円形グリッド中心周辺から、ボード平面上の点を抽出する。抽出された点群に特異値分解を適用し、ボード平面に対する法線を求める。各3次元点は算出された平面上に投影されるので、より高精度な3次元点が得られる。

3.2 3Dカラーモデル、オフライン温度マップ生成

3Dカラーモデルの生成には、3次元点群の集合である3Dモデル、モデルを生成中各フレームで撮影したカラー画像、各フレームでのモデルに対するカメラの位置・姿勢が必要である。本システムでは、3Dモデルの生成に、PCLライブラリに実装されている、KinectFusion⁶⁾を用いた。また、KinectFusionからは、各フレームのモデルに対するRGB-Dカメラの位置・姿勢が得られる。モデル生成後、各フレームのカラー画像、RGB-Dカメラの位置・姿勢を用いて3Dのカラーモデルを生成した。

オフライン温度マップの生成には、3Dモデル、モデルを生成中各フレームで撮影した温度画像、各フレームでのモデルに対するカメラの位置・姿勢が必要である。本手法では、3.1章で求めたキャリブレーションデータを用い、温度画像をカラー画像座標系に変換したものと、KinectFusionから得られたRGB-Dカメラの位置・姿勢を用いて、オフライン温度マップを生成した。温度画像をカラー画像座標系に視点変換するためには、カラー画像の各画素と温度画像の各画素の正しい対応関係を求めることが必要である。正しい対応を求めるために、デプスマップの各画素と対応する3次元点を、温度画像上に投影している。複数の3次元点が温度画像上の同じ画素に投影された場合には、温度カメラの視点で最小のデプスを持つものが正しい対応点である。カラー画像の各画素と対応する温度画像の画素の温度情報を取得することで、座標変換を行っている。図4に、オフライン温度マップ生成の様子を示す。

図4 温度マップ生成の様子

図5 複数視点から3Dモデルをキャプチャする様子

3.3 特徴量データベース生成、カメラトラッキング

オンライン処理で、3Dモデルに対するカメラの位置・姿勢を推定するために、特徴量のデータベースを生成する。我々は、Dissaphong⁷⁾らの手法を用いた。Dissaphongらは、視点生成型学習という手法を用いている。以下視点生成型学習について述べる。図5に示すように、3.2章で生成した3Dカラーモデルを、OpenGL ライブラリを用いて複数の視点からキャプチャする。得られた各画像にたいして、SIFT 特徴¹³⁾を検出する。検出された点をモデル座標系に逆投影し、すでに逆投影された点とのユークリッド距離を計算する。距離が閾値以下のものがあった場合、同じ特徴点と見なし、その特徴点の信頼性を上げる。距離が閾値以下のものがなかった場合は、新たな特徴点として登録する。この処理を繰り返す。視点生成型学習では、信頼性が高い特徴点、つまり多くの視点で検出された特徴点のみを使用する。以下これを *stable keypoint* と呼ぶ。データベースとの照合にかかる計算コスト削減のため、k-means++を用い、特徴量をクラスタリングする。最終的に、データベースには、*stable keypoint* の3次元点と、クラスタリングされた複数の特徴量が格納される。

Dissaphongらは、オンラインで抽出した特徴量とデータベース特徴量の照合を行うことで3D物体のトラッキングを行った。しかし、データベースとの照合には計算コストがかかるという問題があり、また、特徴量のみの情報を用

図 3 (a)/(b) 提案キャリブレーションボード，穴の開いた樹脂版を，突起のある，暖められた樹脂版にはめ込むことで，温度カメラからもキャリブレーションパターンが検出される．(c) 温度カメラで撮影した提案キャリブレーションボード

いてトラッキングを行うには，オンラインで十分な特徴量が抽出できなかった場合に，トラッキング精度が不安定になってしまうといった問題があった．そこで，本システムでは，毎フレーム正確なオンライン温度マップを生成するため，視点生成型学習で生成した3Dモデルの特徴量データベースを用いる Dissaphong⁷⁾ らのトラッキング手法と，フレーム間トラッキングを組み合わせる手法を提案する．以下処理の流れを述べる．まず，Dissaphong らと同様の手法⁷⁾で，カメラ位置を初期化する．次に，初期位置に基づき，フレーム間トラッキングを行う．フレーム間トラッキングを続けるとモデルに対する位置・姿勢の正確性が下がるため，カメラ位置を初期化してからある閾値以上カメラが移動したとき，カメラ位置の再初期化を行う．フレーム間トラッキングを組み込むことで，すべてのフレームで正確性の高いカメラ位置・姿勢が推定され，高精度なオンライン温度マップを生成することができる．

(1) カメラ位置・姿勢初期化

初期化処理では，まず，RGB-D カメラによってオンラインでキャプチャされたカラー画像から SIFT 特徴¹³⁾を検出し，その特徴量を抽出する．抽出された各特徴量に対して，Fast Library for Approximate Nearest Neighbors (FLANN) アルゴリズムを用いて，最も特徴量のユークリッド距離が近い二つの特徴量をデータベースから探索する．探索した2つのディスクリプターとのユークリッド距離の比が0.5以下の場合，すなわち最近傍の特徴量が2番目に近い特徴量よりも半分以下の距離の場合，正しい対応と見なす．この処理の結果，データベースに格納されている3次元点とRGB-Dカメラから得られる3次元点の対応組が得られる．最終的にカメラの位置・姿勢は，特異値分解によって次のようにして算出される．得られた3次元点の対応組 ($A_0 \cdots A_9, B_0 \cdots B_9$ とする) に対するそれぞれの重心を求める (A_{mean}, B_{mean} とする)． $A_0 \cdots A_9$ と A_{mean} を 3×1 の行列 $\mathbf{A}_0 \cdots \mathbf{A}_9$ と $\mathbf{A}_{mean}$ に， $B_0 \cdots B_9$ と B_{mean} を 1×3 の行列 $\mathbf{B}_0 \cdots \mathbf{B}_9$ と $\mathbf{B}_{mean}$ に変換し， $\mathbf{H} = (\mathbf{A}_0 - \mathbf{A}_{mean})(\mathbf{B}_0 - \mathbf{B}_{mean}) + \cdots + (\mathbf{A}_9 - \mathbf{A}_{mean})(\mathbf{B}_9 - \mathbf{B}_{mean})$ を求める．得られた

図 6 RANSAC 処理により外れ値として除外される点の例 (X 方向から見た様子)．この例では，12 個の 3 次元点のうち 6 個が外れ値として除外されている．

3×3 の行列 $\mathbf{H}$ に特異値分解を適用し， $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T$ の形に分解する．ここで， $\mathbf{D}$ は 3×3 の対角行列であり $\mathbf{U}, \mathbf{V}^T$ は $\mathbf{U}^T\mathbf{U} = \mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I}$ (単位行列) となる 3×3 の行列である．この時，カメラの回転行列 $\mathbf{R}$ は， $\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{U}^T$ ，並進ベクトル $\vec{t}$ は， $\mathbf{T} = \mathbf{B}_{mean}^T - \mathbf{R}\mathbf{A}_{mean}$ から得られる．算出の際，誤対応に頑強に位置・姿勢を推定するため，RANSAC アルゴリズムを用いている．図 6 に，RANSAC 処理により外れ値として除外される点の例を示す．赤・緑・青色の線が X・Y・Z 軸，赤色の点が外れ値として除外される点，青色の点がインライアとして位置・姿勢算出に用いられる点である．この例では，12 個の 3 次元点のうち 6 つが外れ値として除外されている．

初期化の精度は，オンラインのカラー画像から検出された特徴点のうち，データベースとの正しい対応が得られたものの割合で評価される．オンラインのカラー画像から抽出した特徴量に対して，視点生成型学習によって生成した特徴量データベースから2近傍までの特徴量を探索し，最近傍の特徴量とのユークリッド距離が，2番目に近い特徴量とのユークリッド距離の半分以下の時に，オンラインとデータベースで正しい特徴量の組 (正しい対応) が得られたと判定している．この正しい対応が得られたものの割合が3%以上の時に，カメラ位置初期化処理は成功したと判定され，フレーム間トラッキングが開始される．

(2) フレーム間トラッキング

フレーム間トラッキングでも、まず RGB-D カメラのカラー画像から特徴量を抽出する。フレーム間では、移動量が小さいという仮定のもと、現在フレームで検出した各特徴点の周辺から、前フレームの特徴点を探索する。複数の対応点が探索された場合、最も特徴量のユークリッド距離が近いものを対応点の候補として保存しておく。これらの対応点候補のうち、さらにデプス値の変化が大きいもの (3cm とした) を誤対応と判定して除去し、残った対応点を正しいものとみなす。デプスを比較するのは、同じようなテクスチャが多く 3 次元的に複雑なシーンでは、幾何学的拘束と特徴量を用いたマッチングでは正しいと対応付けられた誤対応を、デプス情報を用いて除くことができると考えるためである。この処理で得られた対応点の候補のデプスを比較し、デプスの差が閾値以下のもののみを正しい対応点とする。

フレーム間トラッキングでは、マッチングと位置・姿勢推定の精度を評価する。マッチングの精度は、現在フレームで検出された特徴点のうち、前フレームとの正しい対応点が探索されたものの割合によって評価される。正しい対応点とは、幾何学的拘束、特徴量によるマッチング後、デプス情報を用いて絞り込まれたマッチング点のことである。また、マッチング精度は、前フレームの全特徴点のうち、現在フレームの特徴点から正しい対応が得られたものの割合で評価される。マッチング精度が 10 % 以上の時に、フレーム間で正しい対応組が取れたと判定される。マッチング精度が 10 % 以下の場合、つまりフレーム間で大きな移動やモーションブラーがあった場合、フレーム間トラッキングは失敗したとみなされ、再び初期化処理を行う。マッチング精度が閾値以上の場合、RANSAC による外れ値除去処理を含む、特異値分解によって、カメラの位置・姿勢を算出する。図 7 に、RANSAC 処理により外れ値として除去される点の例を示す。赤・緑・青色の線が X・Y・Z 軸、赤色の点が外れ値として除去される点、青色の点がインライアとして位置・姿勢算出に用いられる点である。この例では、16 個の 3 次元点のうち外れ値として除外されたものはなかった。

ここで、フレーム間のカメラの移動距離・回転角によって、フレーム間トラッキングの精度を算出する。フレーム間のカメラの移動距離・XYZ 方向すべての回転角が 5° 以下の場合、フレーム間トラッキングは成功したと判定される。閾値以上であった場合、算出した値が妥当でないと見なし、一時刻前のフレーム間速度と同じ速度で移動したと仮定し、次のフレームの処理に進む。

(3) カメラ位置・姿勢再初期化

フレーム間トラッキングを続けると、モデルに対する位置・姿勢の精度は次第に低下し、オンラインの温度マップの精度が下がる。そこで、カメラの位置・姿勢を初期化した位置から 50cm 距離以上カメラが移動したときに、カメ

図 7 RANSAC 処理により外れ値として除外される点の例 (Y 方向から見た様子)。この例では、16 個の 3 次元点のうち外れ値として除外されたものはなかった

(a) オンラインで取得するカラー画像 (b) トラッキング可視化例

図 8 トラッキング可視化例。トラッキングの状態が文字として表示され、推定されたカメラの位置・姿勢を RGB の棒で AR 表示している

ラ位置の再初期化を行う。

フレーム間トラッキングを組合せることで、オンライン全フレームで高精度にカメラの位置・姿勢を推定することができる。4 章で、フレーム間トラッキングありの方が、オンライン温度マップを生成するのに優れていることを示した。図 8 に、オンラインで取得する RGB-D カメラのカラー画像と、システムの実用性を高めるために、トラッキングの状態を可視化したものを示す。可視化ウィンドウには、トラッキングの精度、状態などが文字として出力され、さらに推定されたカメラの位置・姿勢を RGB の矢印で AR 表示している。

3.4 オンライン温度マップ生成

オンライン温度マップを生成するために、3.2 章でオフライン処理で生成した、色のついていない 3D モデルを利用する。まず、図 9(a)/(b) に示すように、推定されたカメラの位置・姿勢と事前に推定されたキャリブレーションデータから、オンラインで得られる温度画像の各画素を、3D モデル座標系に投影する。各投影点について、3D モデルの最近傍頂点を探索する。モデルの頂点は数十万～数百万点あり、計算コストは膨大になってしまう。そのため、FLANN アルゴリズムを用いて高速な探索を行っている。探索されたモデルの頂点を対応する温度画像の画素の明度値で色付けしていく。既に色のついている頂点が探索された場合は、新たな色で更新する。そのため、オンライン温度マップを生成中に対象シーンの温度分布が変わっても、温度マップも更新することができるため対応可能である。

3.5 温度変化分布 AR 表示

温度変化分布のAR表示は、推定されたカメラの位置・姿勢から温度マップをキャプチャすることで得られる。まず、推定されたカメラ位置姿勢から、オフライン/オンラインの温度マップをキャプチャする。図9(c)に示すように、得られた画像から温度変化分布画像を生成し、カラー画像上にAR表示する。温度が上がったところは赤系の色、下がったところは青系の色で、直観的に温度変化の状況を理解できるようにしている。温度の変化量に応じてRGB-Dカメラのカラー情報と温度変化情報のブレンド率を変化させ、対象物体の問題箇所特定を容易に出来るようにしている。

4. 実験

本章では、提案手法の精度を評価する、2つの実験について述べる。まず、キャリブレーションについて評価を行った。キャリブレーションについて、3つの実験を行った。1つ目の実験では、内部パラメータの推定精度を従来手法と比較した。2つ目の実験では、キャリブレーションボードとカメラの距離を変化させながら外部パラメータの精度評価を行い、その精度を比較した。3つ目の実験では、デプス精度向上処理あり・なしの場合での外部パラメータの推定精度を比較した。次に、フレーム間トラッキングあり/なしの場合についてカメラの位置・姿勢を推定することで、トラッキングについて、精度・速度の評価を行った。

実験で使用したPC、撮影装置のスペックを述べる。PCは、OS:Windows7、メモリ:16GB、CPU:Core i7-4800MQ、Graphic Card:Nvidia Geforce GTX 780Mである。温度カメラは、Optris社のPI160で、解像度:160×120、水平/垂直画角:41°/31°、キャプチャ速度:120fpsである。RGB-Dカメラは、Microsoft社のKinectで、カラー画像、デプス画像ともに解像度:640×480、カラー画像の水平/垂直画角:58°/45°、キャプチャ速度はともに、30fpsである。

4.1 カメラキャリブレーション

実験1について述べる。Chengらは、紙に印刷したキャリブレーションボードに白熱電球を当て、温度カメラのキャリブレーションを行った¹⁰⁾。本実験では、Chengらの研究と本研究との精度比較実験を行い、提案キャリブレーションボードが他研究と比較してより正確に内部パラメータを算出できることを示すことを目的とする。実験の詳細について述べる。2つのキャリブレーションボードを白熱電球で4~5秒暖め、暖められたボードを温度カメラで撮影し、それぞれ20枚の画像を得た。カメラとボードの距離はどちらの手法の場合も1mとした。提案手法のキャリブレーションボードについては、3.1節第二段落で述べた手順でキャリブレーションボードを撮影している。得られた画像群に対してopenCVライブラリのcalibrateCameraという関数を用い内部パラメータを算出した。実験の結果、従来手法では、算出された画角が水平画角、垂直画角がそれ

ぞれ23°/15°、提案手法では38°/28°となり、提案手法の方が仕様書記載の値41°/31°に近い値となった。本実験から、提案手法の方がより正確に内部パラメータを算出できることを示した。提案手法の方が正確なキャリブレーションを行えた理由として、Chengらの手法では、白熱電球を用いて暖めすぎた場合に、黒い領域の熱が拡散しサークルグリッドの半径が大きくなってしまいうということが挙げられる。提案手法では、サークルグリッドの半径が大きくなってしまっても、温度の低い樹脂版をはめ込むために半径をほぼ一定に保つことができ、より正確にキャリブレーションを行えたと考えられる。

実験2について述べる。再投影誤差はサークルグリッドとカメラの距離に依存する。そこで本実験では、サークルグリッドとカメラ間の距離を動かしながら、再投影誤差の比較を行うことで、キャリブレーションを行う際のサークルグリッドとカメラの最適な距離を調べることを目的とする。実験の詳細を述べる。カメラとボード間の距離は、0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5mとした。各距離について、両カメラの視野にボードの全体が写る範囲で出来る限り広く動かしながら、50枚の画像を撮影した。実験の結果を、表1に示す。サークルグリッドとカメラの距離が0.5, 1.0mの場合に、再投影誤差が小さくなった。この実験から、カメラとサークルグリッド間の距離は0.5~1mが適切であると考えられる。0.25mの場合については、実験で用いたデプスセンサの測定可能距離が0.5m以上のため、デプス精度が悪くデプス精度向上処理が行えなかった（検出された点を含む平面を算出することが出来なかった）ことが、再投影誤差を算出できなかった原因として挙げられる。1.5m, 2.0m, 2.5mの場合については、カメラとボード間の距離が大きいためにデプス精度が低いこと、サークルグリッドの中心が正確に検出できなかったことが、再投影誤差が大きくなってしまった、または算出できなかった原因として挙げられる。

表1 距離による再投影誤差の比較

距離 (m)	再投影誤差 (pixel)
0.25	-
0.5	3.38
1.0	2.18
1.5	6.02
2.0	7.66
2.5	-

実験3について述べる。デプス精度向上処理により外部パラメータの推定精度が向上することが示すため、デプス精度向上処理あり・なしの場合での、再投影誤差の比較実験を行った。本実験では、事前にキャプチャした一組の画像列に対して、プログラムを変更して比較実験を行った。また、カメラとボードとの距離は0.5~1mの範囲で動かしながら50枚の画像を撮影した。実験の結果、再投影誤差は、デプ

図 9 (a)/(b): オフライン/オンラインの温度マップを、推定されたカメラ位置・姿勢からキャプチャし、RGB-D カメラのカラー画像上に AR 表示している。(c):(a), (b) から生成した温度変化分布を、カラー画像上に AR 表示している。わかりやすさのため、温度変化が大きい箇所を黄色い線で囲っている。

ス精度向上処理あり・なしでそれぞれ 2.84pixel/2.92pixel となり、デプス精度向上処理ありの方が、再投影誤差が小さい結果となった。この実験から、デプス精度向上処理を行うことでより正確な外部パラメータのキャリブレーションができることを示した。

4.2 カメラトラッキング

本実験では、あらかじめ図 10 に示すような 2 種類の 3D モデルを生成した。図 11 に、オンラインの温度モデルが復元されていく様子を示す。本実験では、事前に撮影したカラー画像、デプス画像を用いてフレーム間トラッキングあり・なしの 2 種類の方法でカメラのトラッキングを行うことで、トラッキング精度の比較を行った。実験者がカメラを手に持ち、フレーム間の移動距離が可能な限り等速直線運動になるように動かしながら撮影を行った。実験に用いた画像は 150 枚である。図 12 に、結果を示す。横軸はフレーム数、縦軸は、フレーム間のカメラの移動距離である。フレーム間のカメラの移動距離とは、連続するフレームで推定されたカメラ位置間のユークリッド距離を指す。

図 12 から、フレーム間トラッキングありの場合の方が、フレーム間トラッキングなしの場合と比較して直線に近く、より安定的にトラッキングを行えていることがわかる。このことから、フレーム間トラッキングを行うことで、より安定したカメラトラッキングが行えるといえる。この実験に用いた画像について、フレーム間トラッキングあり/なしの場合について、トラッキングの速度比較を行った。実験の結果、フレーム間トラッキングあり/なしの処理速度はそれぞれ 0.10/0.12sec となり、従来手法の 83% の処理速度でカメラトラッキングを行えることが示された。これは、フレーム間トラッキングなしでは、計算コストの高い、データベースの特徴量と現在の画像から抽出された特徴量のマッチングを、毎フレーム行っているためである。

システムの処理時間の内訳を表 3 に示す。トラッキング処理と、マッピング処理、可視化・3D モデル描画処理の別スレッド化¹⁴⁾、OpenGL ライブラリを用いた描画アルゴリズムの改善などで、高速化が望める。

表 2 処理時間内訳

処理内容	時間 (sec)
システム全体	0.46
カメラ位置・姿勢推定	0.10
オンライン温度マップ生成	0.12
可視化, 3D モデル描画	0.24

5. む す び

本論文では、モデルベースのカメラトラッキングを用いることで、温度変化をカラー画像上に AR 表示する手法を提案した。オフライン処理では、温度カメラと RGB-D カメラのキャリブレーション手法を提案し、3D カラーモデルと 3D 温度マップを生成した。オンライン処理では、視点生成型学習で生成したデータベースを用いたトラッキング手法とフレーム間トラッキングを組み込むことで、毎フレーム高精度にカメラの位置・姿勢を推定し、オンラインの温度マップを生成、温度変化分布を AR 表示することに成功した。実験では、正確にキャリブレーションができていること、フレーム間トラッキングあり/なしの場合で精度比較実験を行い、フレーム間トラッキングありの方がオンライン温度マップを生成する上で優れていることを示した。今後は、さらなるキャリブレーション精度の向上、スマートフォンやタブレット端末などと組み合わせることで、実用性を高めることが課題である。

〔文 献〕

- 1) D. Borrmann, A. Nuchter, M. Dakulovic, I. Maurovic, I. Petrovic, D. Osmankovic, and J. Velagic, "The project ThermalMapper thermal 3D mapping of indoor environments for saving energy" in Proceedings of the 10th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO), 10(2012).
- 2) Y. Ham and M. Golparvar-Fard, "Rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery" in Construction Research Congress. ASCE(2012)
- 3) S. Vidas, P. Moghadam, and M. Bosse, "3D thermal mapping of building interiors using an RGB-D and thermal camera" In Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation ICRA(2013)
- 4) Demisse, G.G, Borrmann. D, Nuchter.A, "Interpreting Thermal 3D Models of Indoor Environments for Energy Efficiency" Advanced Robotics (ICAR), 16th International Conference on (2013)
- 5) Szabo Z, Berg S, Sjkovist S, Gustafsson T, Carleberg P, Upp-

(a) カラーモデル

(b) オフライン温度モデル

図 10 実験に用いた3Dモデル

(a) 生成開始直後

(b) 途中経過

(c) オンライン温度マップ

図 11 オンライン処理で温度モデルが復元されていく様子, 300 フレームで対象シーン全体を復元するように撮影した

図 12 トラッキング精度比較

sall M, Wren J, Ahn H, Smedby O. "Real-time intraoperative visualization of myocardial circulation using augmented reality temperature display" In: The International Journal of Cardiovascular Imaging. 521-528.(2012)

- 6) S. Izadi, R. A. Newcombe, D. Kim, O. Hilliges, D. Molyneaux, S. Hodges, P. Kohli, J. Shotton, A. J. Davison, and A. Fitzgibbon, "KinectFusion: real-time dynamic 3D surface reconstruction and interaction" in ACM SIGGRAPH 2011 Talks, 2011, p. 23. 2, 4(2011)
- 7) Thachasongtham, D. and Yoshida, T. and de Sorbier, F. and

Saito, H, "3D Object Pose Estimation Using Viewpoint Generative Learning", SCIA (2013)

- 8) V. Hilsenstein, "Surface reconstruction of water waves using thermographic stereo imaging" in Proc. IVCNZ, 2005, pp. 102-107.
- 9) Y. M. Ng and R. Du, "Acquisition of 3D surface temperature distribution of a car body" in Proc. IEEE Int. Conf. Inform. Acquisition, pp. 16-20(2005)
- 10) S. Y. Cheng, S. Park, and M. M. "Trivedi Multiperspective Thermal IR and Video Arrays for 3D Body Tracking and Driver Activity Analysis" in Proc. IEEE CVPR, pp. 2-3(2005)

- 11) Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration" Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, **22**, 11, p. 1330-1334(2000)
- 12) Lepetit, V., Moreno-Noguer, F., Fua, P, "Epnp: An accurate o(n) solution to the pnp problem " Int. J. Comput. Vision 81(2) (feb 2009) 155-166(2009)
- 13) Lowe, D.G, "Distinctive image features from scale-invariant key-points" International Journal of Computer Vision.(2004)
- 14) Georg Klein and David Murray, "Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces", In Proc. International Symposium on Mixed and Augmented Reality (2007)

なかがわ わたる
中川 航 2013 年, 慶應義塾大学理工学部卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科前期博士課程に在学中。コンピュータビジョン, 特にデプスカメラと温度カメラを使った AR の研究に従事。

まつもと かずき
松本 一紀 2013 年, 慶應義塾大学理工学部卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科前期博士課程に在学中。コンピュータビジョン, 特にデプスカメラを使った自由視点映像生成の研究に従事。

ふらんそわ どうそる び え
フランソワドウソルビエ 2008 年, University Paris-Est 博士課程修了。Ph.D. 2009 年慶應義塾大学訪問研究員。2010 年より特任助教, 助教 (有期), 特任講師を歴任。2014 年よりマイクロソフト勤務。

すぎもと ま き
杉本 麻樹 2006 年, 電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程機械制御工学専攻修了。博士 (工学)。電気通信大学電気通信学部知能機械工学科特任助教, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科講師などを経て, 2014 年より, 慶應義塾大学理工学部情報工学科准教授。画像提示装置を用いた計測と制御等の研究に従事。

さいとう ひで お
斎藤 英雄 1992 年慶大院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年慶大助手。その後専任講師, 助教授を経て, 2006 年慶大理工情報工学科教授。この間, 1997 年-1999 年まで, 学術振興会海外特別研究員として, 米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所に滞在し, 主に Virtualized Reality の研究に従事。2000 年-2003 年, JST さきがけ研究「情報と知」領域研究員兼務。2006 年-2012 年, JST CREST 研究代表者。現在, 主としてコンピュータビジョンとその VR 応用に関する研究等に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会シニア会員。IEEEシニア会員。日本バーチャルリアリティ学会フェロー。情報処理学会, 画像電子学会, 計測自動制御学会各会員。

せんだ しゅうじ
仙田 修司 1996 年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。同年 NEC 入社。パターン認識, コンピュータビジョン, ユーザインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会会員。

しばた たかし
柴田 剛志 2005 年東北大・理・物理学科卒。2007 年同大学院博士前期課程修了。2008 年 NEC 入社。コンピュータビジョン, 画像処理に関する研究に従事。MIRU2010 ベストインタラクティブセッション賞。MVA2011 Best Application Paper Award 受賞。

いけに あきひこ
池谷 彰彦 1999 年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 NEC 入社。2008 年奈良先端科学技術大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2013 年より NEC Laboratories Singapore 所属。コンピュータビジョン, ビッグデータ分析の研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会会員。