

修士論文

実世界環境モデル化による 屋外複合現実感のための頑健な位置合わせ

平成 24 年度

指導教員 池内 克史 教授

東京大学大学院 情報理工学系研究科
電子情報学専攻 48116407

稲葉 正樹

内容梗概

複合現実感（MR: Mixed Reality）、拡張現実感（AR: Augmented Reality）と呼ばれる技術をよく耳にするようになった。MRとは、現実世界上に仮想コンテンツを重畳表示させる技術のことであり、幅広い分野で利用されている。しかし、現在のMRアプリケーションは屋内の狭い環境で行われるものが多い。屋内環境だけでなく、屋外環境においてもMRを応用することで、より様々なアプリケーションが考えられるようになる。

MRを実現するためには、所望の位置に仮想コンテンツを重畳する位置合わせを行う必要がある。位置合わせを行うためには、カメラの視点位置姿勢を取得し、現実世界と仮想世界の座標系を常に一致させる必要がある。従来の位置合わせ手法として、事前に取得した画像特徴点デプスマップ等とカメラ画像との特徴点マッチングを行うという手法がある。しかし、屋外では光源環境が変化するため、事前取得した画像の見えと現在の見えが異なってしまう、単純な特徴点マッチングを用いた従来の手法では上手く動作しない場合がある。そこで本研究では、モデル化した実世界環境から現在の見えを再現することで、頑健に動作する位置合わせ手法を提案する。

本稿で指す実世界環境モデルとは実物体の3次元形状モデル、色彩モデル、光源環境モデルから構成される。形状モデルは実物体の3次元幾何構造であり、レーザレンジセンサを用いて取得する。色彩モデルは実物体の表面反射率（アルベド）であり、形状モデルと全方位カメラ画像から推定する。光源環境モデルは現在の光源輝度分布であり、魚眼カメラや全方位カメラを用いて天空画像を撮影し取得する。しかし、光源輝度分布を取得するにあたり、屋外では輝度のダイナミックレンジが大変大きいため、シャッタースピードを変化させながら撮影したHDR（High Dynamic Range）画像だとしても太陽光周辺でサチュレーションを起こしてしまう。つまり、太陽光周辺の輝度分布が得られないという問題が発生する。そこで、本研究では既存の太陽光・天空光モデルを用いて、サチュレーション部分の輝度分布推定を行う。

このようにして得られた光源環境モデルを用いて形状モデルの陰影付けを行い、色彩モデルと掛け合わせることで現在の見えを生成することができる。生成した見えはマッチング対象であるカメラ画像の見えに近いと考えられるため、特徴点マッチングが容易になると考えられる。また、前フレームの画像特徴量を形状モデルに投影し、毎フレームで3次元特徴点マップを生成する。もし生成した見えとの特徴点マッチングが失敗した場合は、この3次元特徴点マップを利用し、相対的な視点位置姿勢の動きを推定する。このようにして頑健な位置合わせ手法を実現することができる。

本稿では以上のような手法を提案、実装し、実験により有効性を確認する。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	2
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	関連研究	5
2.1	はじめに	6
2.2	位置合わせ手法	6
2.2.1	センサベース手法	6
2.2.2	マーカベース手法	7
2.2.3	トラックベース手法	8
2.2.4	モデルベース手法	9
2.3	まとめ	11
第 3 章	実世界環境のモデル化	12
3.1	はじめに	13
3.2	3次元形状モデル化	13
3.3	色彩モデル化	14
3.4	光源環境モデル化	16
3.4.1	天空輝度分布	17
3.4.2	天空輝度分布の推定	19
3.5	まとめ	23
第 4 章	光源環境変化に頑健な位置合わせ	24
4.1	はじめに	25
4.2	グローバル位置合わせ	25
4.2.1	再現画像生成	25
4.2.2	対応点探索	25
4.2.3	カメラパラメータ推定	26
4.2.4	モデル座標変換	27
4.3	ローカル位置姿勢追跡	27
4.3.1	カメラトラッキング	27
4.3.2	グローバル再位置合わせ	29

4.4	まとめ	30
第5章	実験	31
5.1	はじめに	32
5.2	光源環境モデル化	32
5.2.1	屋外光源環境推定	32
5.2.2	陰影付け	32
5.3	光源環境変化に頑健な位置合わせ	40
5.3.1	グローバル位置合わせ	40
5.3.2	ローカル位置姿勢追跡	45
5.4	まとめ	48
第6章	結論	49
6.1	本研究の成果	50
6.2	今後の課題及び展望	50
付録A	太陽光スペクトル	52
	謝辞	54
	参考文献	55
	発表文献	60

図目次

1.1	位置合わせ	2
2.1	センサベース手法	6
2.2	マーカベース手法	7
2.3	Parallel Tracking And Mapping [18]	8
2.4	AbS アルゴリズムに基づく位置合わせ [35]	9
2.5	Taketomi らによる手法 [36]	10
3.1	形状モデル化手法	13
3.2	形状モデル (時計台)	14
3.3	方位角 ϕ , 天頂角 θ 及び光源放射輝度 $L(\theta, \phi)$ の定義	14
3.4	アルベド推定結果 (12月16日, 11時30分, 曇り)	15
3.5	アルベド形状モデル (時計台)	15
3.6	サチュレーションが起こっている例	17
3.7	基準点及びサンプリング点	20
3.8	太陽の位置	21
4.1	グローバル位置合わせの流れ	26
4.2	自然特徴点の投影	27
4.3	ローカル位置姿勢追跡の流れ図	28
4.4	グローバル再位置合わせにおける語対応点除去	29
5.1	魚眼カメラで撮影した天頂画像による光源推定結果 (10月16日, 15時30分, 晴れ, 左上: 露光大, 右下: 露光小) turbidity = 2.44, 太陽方位角 = 242.7°, 太陽天頂角 = 19.1°, 太陽輝度 RGB = 1.54e6, 1.17e6, 6.95e5(Wsr ⁻¹ m ⁻²)	33
5.2	全方位カメラで撮影した天頂画像による光源推定結果 (12月08日, 11時30分, 快晴, 左上: 露光大, 右下: 露光小) turbidity = 1.95, 太陽方位角 = 180.6°, 太陽天頂角 = 58.4°, 太陽輝度 RGB = 2.12e6, 1.77e6, 1.30e6(Wsr ⁻¹ m ⁻²)	34
5.3	全方位カメラで撮影した全方位画像による光源推定結果 (12月08日, 11時30分, 快晴, 左上: 露光大, 右下: 露光小) turbidity = 1.96, 太陽方位角 = 180.6°, 太陽天頂角 = 58.4°, 太陽輝度 RGB = 2.12e6, 1.76e6, 1.30e6(Wsr ⁻¹ m ⁻²)	35
5.4	全方位カメラで撮影した全方位画像による光源推定結果 (12月06日, 09時30分, 曇り, 左上: 露光大, 右下: 露光小) turbidity = 2.07, 太陽方位角 = 211.2°, 太陽天頂角 = 64.9°, 太陽輝度 RGB = 1.92e6, 1.55e6, 1.06e6(Wsr ⁻¹ m ⁻²)	36

5.5	従来手法：シャッタースピードを変化させて取得した HDR 全方位画像による光源環境（左上：露光大，右下：露光小）	37
5.6	陰影付け結果（12月08日，11時30分，快晴，上：露光大，下：露光小）	38
5.7	陰影付け結果（12月06日，09時30分，曇り，上：露光大，下：露光小）	39
5.8	再現画像の生成結果（12月08日，11時30分，快晴）	40
5.9	再現画像の生成結果（12月06日，09時30分，曇り）	41
5.10	対応点探索の結果（カメラ画像：12月06日，09時30分，曇り；テクスチャ画像：12月16日，11時30分，曇り）	42
5.11	対応点探索の結果（カメラ画像：12月08日，11時30分，快晴；テクスチャ画像：12月16日，11時30分，曇り）	43
5.12	従来手法：グローバル位置合わせの失敗例（再投影誤差 = 5.94）	44
5.13	提案手法：グローバル位置合わせの成功例（再投影誤差 = 2.58）	45
5.14	ローカル位置姿勢追跡の結果	46
5.15	グローバル再位置合わせの結果	47
6.1	光学的整合性	50

表目次

5.1	対応点探索の比較（カメラ画像：12月06日，09時30分，曇り；テクスチャ 画像：12月16日，11時30分，曇り）	41
5.2	対応点探索の比較（カメラ画像：12月08日，11時30分，快晴；テクスチャ 画像：12月16日，11時30分，曇り）	41
5.3	ループ中の各ステップにおける処理時間の平均	46
A.1	太陽光スペクトル及び各係数スペクトル [27]	53

第1章

序論

1.1 本研究の背景

複合現実感（MR: Mixed Reality）とはコンピュータグラフィックス（CG: Computer Graphics）等で作られた仮想コンテンツを現実世界に重畳することで、現実世界と仮想世界を融合させる技術である。MR 技術を用いることで、ユーザはヘッドマウントディスプレイ（HMD: Head Mounted Display）やスマートフォン等のカメラを通して、実際には存在しない仮想物体があたかも現実世界に存在するかのように見ることができる。MR 技術は、教育・建築・医療・広告・ナビゲーションシステム・エンターテインメント等幅広い分野への応用が期待されており、研究が盛んに行われている [2, 3]。

近年、このような応用を考える中で、屋内環境だけでなく、屋外環境においても MR を実現したいという欲求が高まっている。屋外 MR 技術を用いたアプリケーションとしては、屋外建造物の仮想完成図展示や、屋外仮想広告展示等がある。また、失われてしまった屋外文化財の仮想復元展示も関心を集めている。遺構や過去の文献、想像を元に CAD によって復元された 3 次元 CG モデルを、MR 技術を用いて現実世界に重畳することにより、ユーザは見ている現実の風景と同時に仮想復元された文化財を鑑賞でき、高い臨場感を得ることができる [16, 25, 40]。

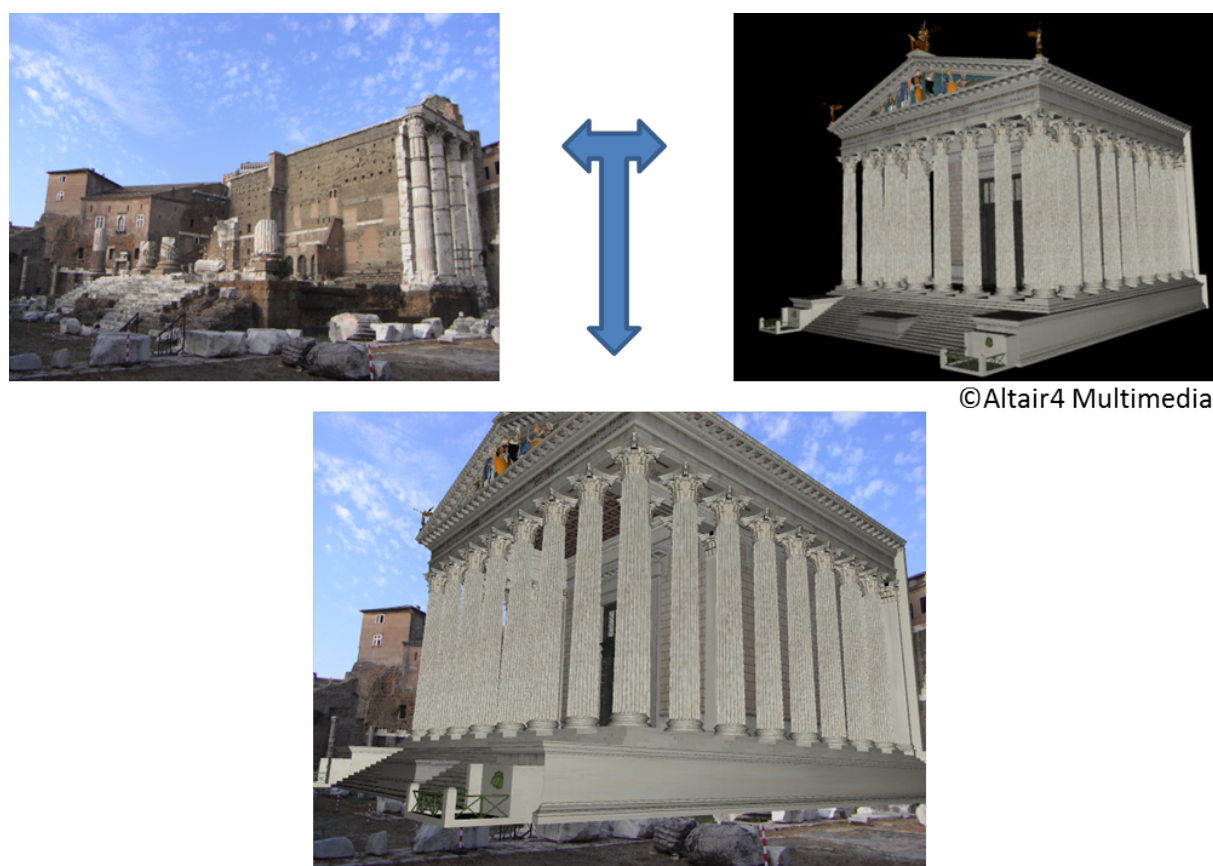


図 1.1: 位置合わせ

MRにおいて重畳表示される仮想物体をより実物体に近いものとして体感するためには、現実世界と仮想空間の整合性を満たすことが重要である。MRで解決すべき整合性課題の一つとして、幾何学的整合性が挙げられている[50]。幾何学的整合性とは現実世界と仮想世界の座標系を一致させることで、空間的ずれを解消することである。幾何学的整合性の実現のために、ユーザの視点位置及び視線方向を推定し、仮想コンテンツの位置を求める位置合わせを行わなければならない(図1.1)。絶対的な視点位置姿勢を求める処理をグローバル位置合わせと呼び、相対的な視点位置姿勢を求める処理をローカル位置姿勢追跡と呼ぶこととする。グローバル位置合わせは事前に取得した特徴点の集合のようなデータベースを利用した位置合わせであり、ローカル位置姿勢追跡はカメラ画像の各フレーム間の変化を利用した位置合わせである。

1.2 本研究の目的

本論文では実世界環境モデルを利用して、光源環境変化に頑健な位置合わせ処理を行う手法を提案する。ここでいう実世界環境モデルとは実世界物体の3次元形状モデル、色彩モデル、光源環境モデルのことである。形状モデルは3次元形状モデル化技術[12]を用いて、レンジセンサによって取得し、色彩モデルは形状モデルと全方位画像によって表面反射率(アルベド)を推定する[49]ことで取得し、光源環境は全方位カメラまたは魚眼カメラを用いて天空画像を撮影することで取得する。

以下、提案手法の要旨を述べる。グローバル位置合わせ処理を行う際には、実世界環境モデルを用いて、現在の光源環境における見え画像を再現し、カメラ画像と自然特徴点による対応点探索をする。これにより、照明条件の違いに頑健な対応点探索が可能となり、正確な視点位置姿勢を推定することができる。

ローカル位置姿勢追跡では、密な3次元形状モデル上に、前フレームカメラ画像の自然特徴量を投影することによって、リアルタイムに3次元特徴点マップを生成する。現在の見えにおける自然特徴量であるため、現フレームカメラ画像との対応点探索は安定して行え、視点位置姿勢を求めることができる。このような特徴量の投影と視点位置姿勢の推定を繰り返すことによって、頑健なローカル位置姿勢追跡が可能となる。しかし、ローカル位置姿勢追跡のみでは誤差の蓄積によって、徐々にずれが生じる。そこで、実世界環境モデルから簡易な陰影付けをすることによって再現画像をリアルタイムに生成し、グローバル再位置合わせも追跡と同時に試みる。再現した見え画像とカメラ画像との対応点探索が上手くいった場合には、グローバル再位置合わせが行われ、溜まった誤差を解消することができる。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、位置合わせ処理の関連研究を紹介し、既存手法の問題点について説明し、本研究の意義を述べる。第3章では、実世界環境モデルを構成する形状モデル、色彩モデル、光源環境モデルの取得方法について説明する。第4

章では，実世界環境モデルを利用した光源環境変化に頑健なグローバル位置合わせ処理及びローカル位置姿勢追跡処理手法を説明する．第 5 章では，提案手法の有効性を評価実験によって示す．第 6 章では，まとめと今後の課題，展望について述べる．

第2章

関連研究

2.1 はじめに

本章では，本研究に関連する先行研究について述べ，本研究の意義を明らかにする．位置合わせ処理を実現するためには，現実世界を写すカメラの位置姿勢を常に取り得し，現実世界と仮想世界との座標系を一致させ続けることが必要となる．視点位置姿勢を推定する手法については様々な研究がなされており，大別するとGPSやジャイロ，磁器等のセンサを用いるセンサベース手法，予め設置した既知のマーカを認識するマーカベース手法，画像中の特徴点を追跡するトラックベース手法，あらかじめ作成した3次元モデルを利用するモデルベース手法に分けられる．

2.2 位置合わせ手法

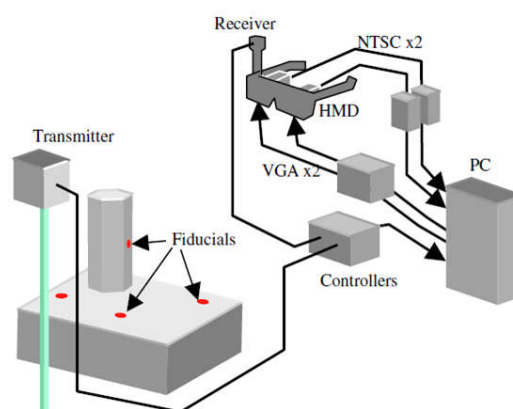
2.2.1 センサベース手法

センサを用いた手法では，現実世界に関する事前知識を必要とせず，センサ情報に基づいた視点位置姿勢推定を行うことができる．

特に屋外環境では位置推定にGPS (Global Positioning System)，姿勢推定にはジャイロセンサや慣性センサを利用した位置姿勢推定が広く研究されている [4, 48] (図 2.1(a))．しかし，GPSは屋内環境では使用できないという問題があり，ジャイロセンサや慣性センサは相対的な動きを取得するので，時間とともに誤差が溜まってしまうという問題がある．したがって，長時間のデモは行うためには，何らかの方法で絶対的なグローバル位置合わせをして，誤差を解消する必要がある．



(a) GPS+ジャイロセンサ [4]



(b) 磁気センサ [39]

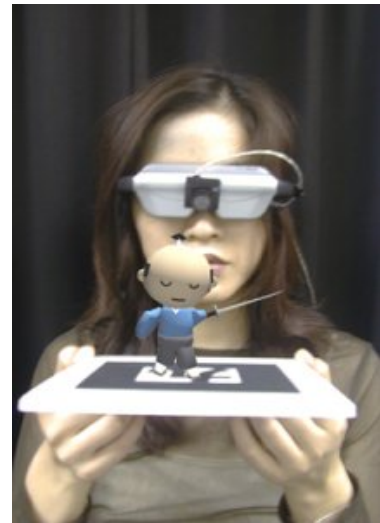
図 2.1: センサベース手法



(a) CyberCode マーカ [29]



(b) ARToolKit マーカ [17]



(c) MR 結果 [17]

図 2.2: マーカベース手法

また，6 自由度（回転・並進）の位置姿勢を取得できる磁気センサを利用する研究もある [39]（図 2.1(b)）．計測範囲内では非常に高い精度で位置姿勢を取得することができる．しかしながら，行動範囲が限られており，周囲に金属物体がある場合は磁界の歪みによる大きな誤差が発生してしまうという欠点がある．

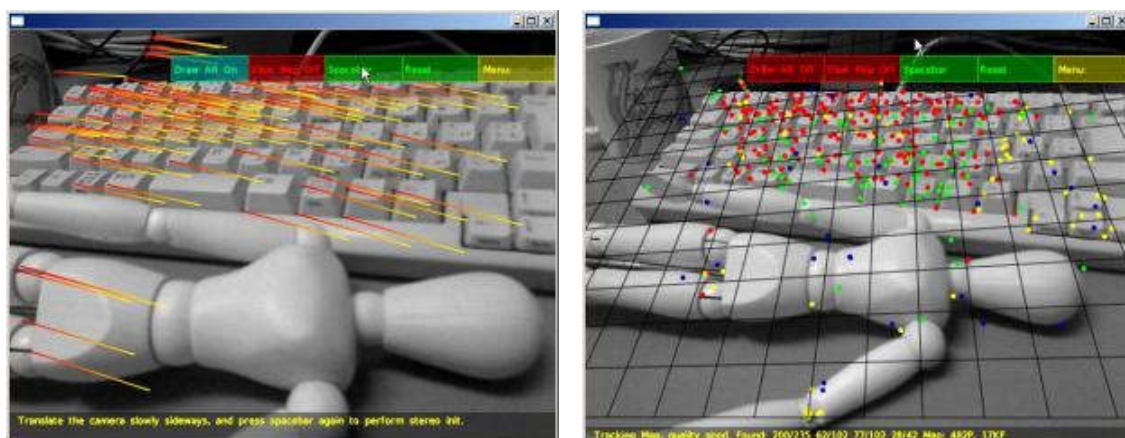
これらのセンサによる視点位置姿勢推定では，それほど高い計算コストを必要とせず，簡単に位置姿勢のトラッキングを行うことができるが，実世界とのグローバル位置合わせを手動で調整する必要がある等煩雑であるという問題点がある．また，一般的にセンサの精度とコストは比例関係にあるため，高精度な位置姿勢追跡を行うためには，高価格なセンサを導入しなければならない．

2.2.2 マーカベース手法

マーカベース手法は，カメラから得られる画像を利用した手法である．イメージベースの位置合わせ処理に必要な情報はカメラ画像の 2 次元座標と対応する仮想空間座標系の 3 次元座標である．この 2D-3D 対応点を正確に得ることに位置合わせの問題は帰着される．

Rekimoto らによる CyberCode [29]（図 2.2(a)）や，Kato らによる ARToolKit [17]（図 2.2(b)）は，マーカを使用した視点位置姿勢推定の代表的な例であり，広く利用されている．これらの手法では，現実世界上に既知のマーカを設置し，カメラがそのマーカを認識することで位置姿勢を推定する．事前に仮想空間上でマーカの 3 次元座標を決めておき，位置合わせの際にはカメラの入力画像から認識し易いマーカの角等の 2 次元座標を取得し，2D-3D 対応点を得ている．このようにして，頑健なグローバル位置合わせを実現している（図 2.2(c)）．

しかし，カメラにマーカが写されていないと位置合わせを行うことができないため，屋



(a) 特徴点追跡

(b) デプスマップ

図 2.3: Parallel Tracking And Mapping [18]

外環境において広範囲の様々な視点からの位置姿勢推定を可能とするためには巨大なマーカを複数設置しなければならない。また、マーカが現実世界の景観を損ねてしまう場合もある。

2.2.3 トラックベース手法

トラックベース手法は、画像中の特徴点をトラッキングすることで、視点位置姿勢を推定する手法である。カメラの回転成分（3自由度）のみを推定できる手法と、回転・並進成分（6自由度）両方を推定することができる手法がある。

3自由度の姿勢推定を行う手法は、一つの動いているカメラによってパノラマ画像を生成するためによく用いられている [10, 41]。これらの手法では、画像が立方体面、球面、円柱面のような2次元平面に投影できるものとして、回転成分を計算している。特徴点のトラッキング手法としては、FAST corner tracking [30] や good features [34] を用いた KLT [37] 等が用いられている。これらの手法では並進成分を求めることができないため、6自由度の位置合わせを実現しようとする場合、GPS や慣性センサ等と組み合わせる必要がある [7, 32]。

6自由度の位置姿勢推定を行う手法として、PTAM (Parallel Tracking And Mapping) [18] と呼ばれる手法がある (図 2.3)。これは入力画像の自然特徴点を追跡することでカメラ位置姿勢の推定と環境のモデル化を同時に行う visual SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) という技術を利用したものである。この手法では1つのカメラのみを用いて事前情報を与えることなく、おおよその位置合わせを行うことができる。このPTAMと同様な手法として、DTAM (Dense Tracking and Mapping) [22] が提案されている。PTAMは特徴点のみを用いた SfM (Structure from Motion) だが、DTAMでは全画素を用いた SfM であり、密なデプスマップを作成することによって、精度を向上させている。

しかし、これらのトラックベース手法では、事前情報が全くないため、仮想コンテンツは適当に配置するしかなく、現実物体と仮想物体の位置を厳密に合わせることは難しい。ま

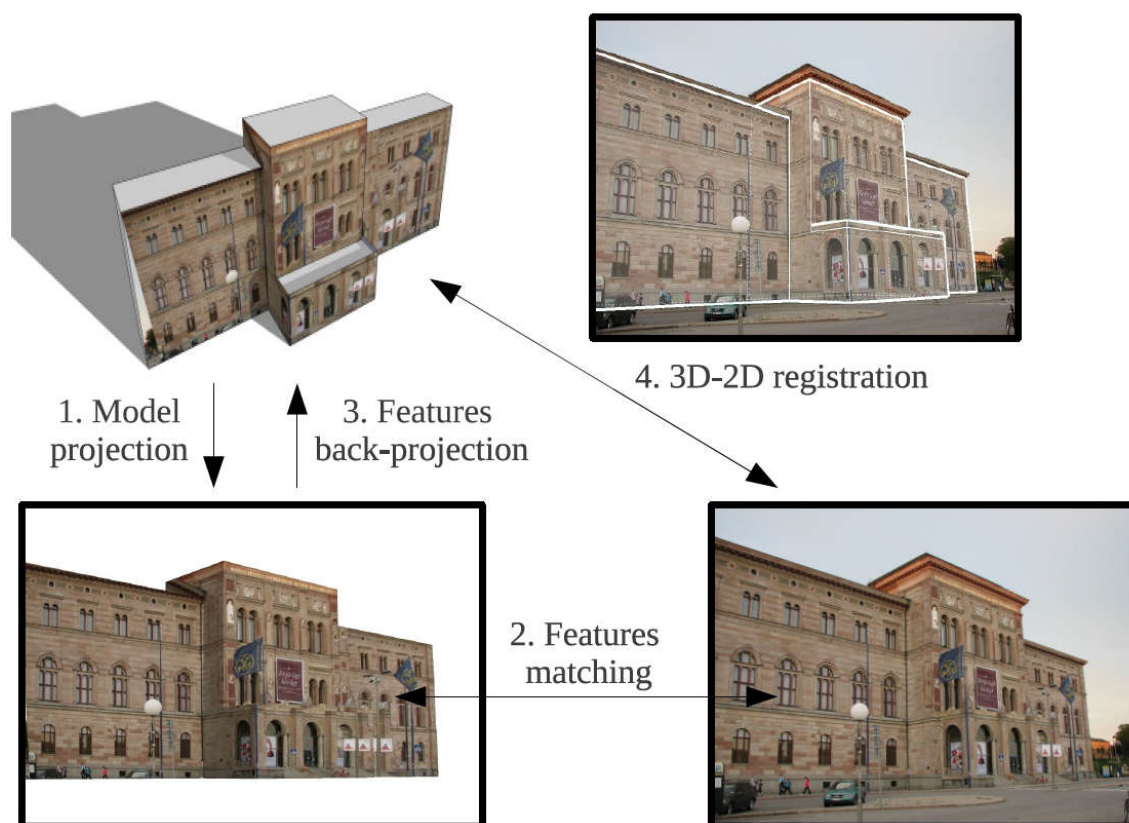


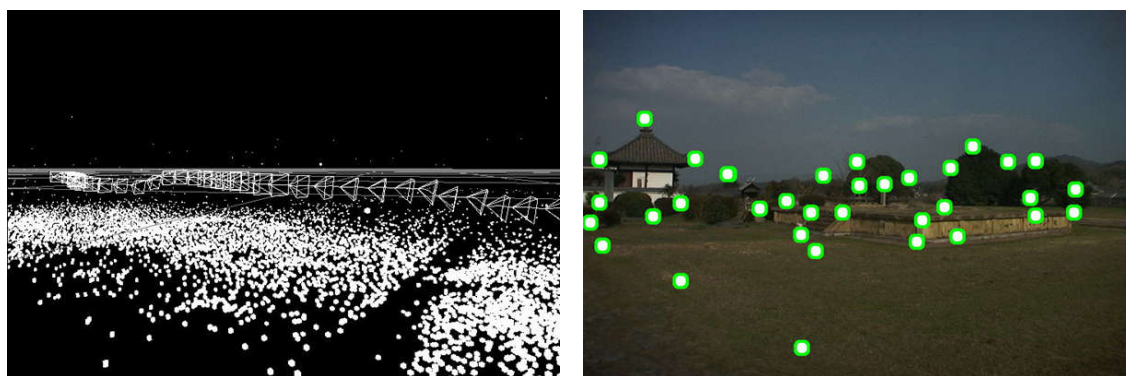
図 2.4: AbS アルゴリズムに基づく位置合わせ [35]

た、相対的なローカル位置合わせであるため、徐々に誤差が溜まってしまうという問題もある。

2.2.4 モデルベース手法

モデルベース手法は、事前に現実物体の3次元CADモデルや特徴点の3次元モデルを作成しておく手法である。モデルとカメラ画像とのマッチングを行うことによって、2D-3D対応点を得て、視点位置姿勢推定を行う。

3次元CADモデルを用いた、AbS (Analysis by Synthesis) アルゴリズムに基づいた手法がある。この手法では、3次元CADモデルのレンダリング、カメラ画像とレンダリング画像との特徴点マッチング、モデルへの特徴点の投影 (2D-3D 対応点の取得)、カメラ位置姿勢推定を繰り返すことでグローバル位置合わせを実現している (図 2.4)。Reitmayr ら [28] は、事前に撮影した画像をテクスチャマッピングした3次元CADモデルを使用して、AbSに基づいた位置合わせを行っている。また、3次元ラインモデルを利用している研究もある [44]。これらの手法では特徴として、エッジを使用している。しかし、エッジ



(a) 実世界環境の特徴点デプスマップ

(b) カメラ画像との特徴点マッチング



(c) MR 結果

図 2.5: Taketomi らによる手法 [36]

はオクルージョンに弱いと言う問題があり，そもそもエッジが少ない物体に対してはうまく働かない．

単純なエッジではなく局所特徴を用いた研究もある [19, 33, 35]．局所特徴を使用することで，計算コストは高くなるが，オクルージョンに強くなるという利点がある．しかし，これらの手法では，レンダリングの際に光源環境を考慮していない．光源環境が変化すると，見えが異なり特徴点の対応付けがうまくいかない場合がある．

Taketomi ら [36] は，事前に実環境の画像から抽出された自然特徴点を，SfM (Structure from Motion) によって 3 次元位置を求めてランドマークデータベースを作成する手法を提案している (図 2.5(a))．位置合わせを行う際はカメラの入力画像と自然特徴量の対応を取ることで 2D-3D 対応点を取得しカメラ位置姿勢の推定を行う (図 2.5(b))．この手法では実時間での高精度なグローバル位置合わせが実現出来ている (図 2.5(c))．しかし，この手法においても，データベース画像取得時と入力画像取得時で，時刻や天候などにより光源環境が大きく異なる場合，見えが異なってしまうため画像間の対応関係を与えることが難しいという問題がある．特に，屋外環境では，光源環境が時々刻々と変化するため，これは大きな問題となる．

2.3 まとめ

位置合わせ手法について大きく4つに分け、先行研究を紹介した。屋外MRでは時刻や天候による光源環境の変化が大きく、データベース画像と入力画像で陰影が異なる可能性があり、自然特徴点による対応点探索が機能しない場合があるという問題点がある。そこで本研究では、AbS アルゴリズムを用いたモデルベース手法に基づき、モデルレンダリングの際に、光源環境を考慮することで、光源環境の変化に頑健な位置合わせ手法を実現する。

第3章

実世界環境のモデル化

3.1 はじめに

本研究では，実世界環境モデルから見えを生成することで頑健な位置合わせを実現する．そこでまず本章では，実世界環境のモデル化について説明する．実世界環境を決定する要素として，形状モデル，色彩モデル，光源環境モデルがある．

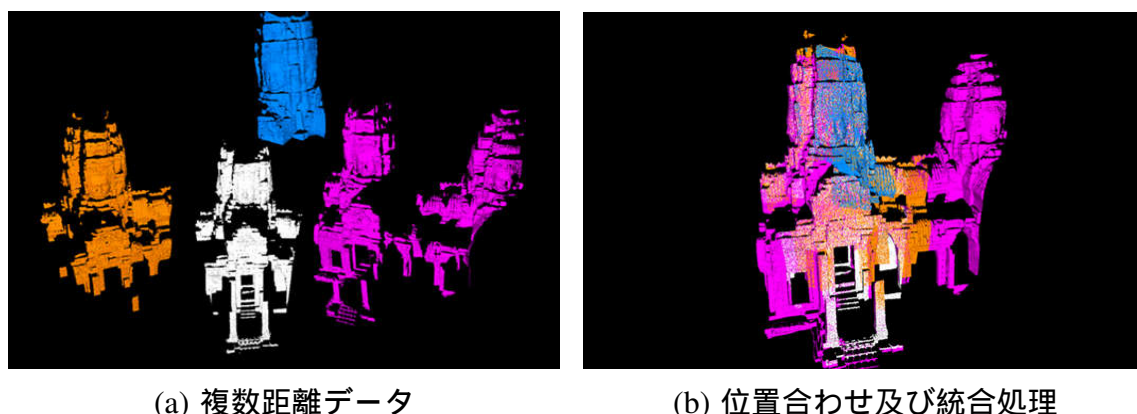
3.2 3次元形状モデル化

形状モデルとは，3次元幾何構造のことであり，物体の3次元位置，法線方向をモデル化したものである．形状モデルはレーザレンジセンサを使用した複数の距離データの取得，位置合わせ [23]，統合処理 [46] の3工程を行うことで得られる（図 3.1）．

まず，レーザレンジセンサを用いて対象物体全面の距離データを取得する．計測可能範囲はセンサの可視範囲であるため，3次元の全体形状を取得するためには，様々の位置からの複数の部分データを取得する必要がある．対象物体を移動・回転させながら，またはそれが不可能であればセンサを移動させながら撮影する．

次に，取得した複数の部分データの位置合わせを行う．様々な位置姿勢から取得したデータであるため，座標系がそれぞれで異なっている．したがって，部分データの重なりから座標系が一致するような移動・回転行列を推定する位置合わせを行う必要がある．このような位置合わせは ICP (Iterative Closet Point) 法 [6] を基盤とした手法を用いて行われる．この際，逐次処理を行うと誤差が溜まってしまうため，同時処理により全体最適化を行う．

最後に，複数の重なった部分データを統合し，単一の距離データにする．Zipper 法 [38] やボリユームトリック法 [8] を用いて行われる．Zipper 法では，重なり部分を除去した後，うまくつなぎ合わせることで統合処理を実現する．ボリユームトリック法では，ボクセル空間に投影した後，メッシュデータに変換することで統合処理を行う．結果，図 3.2 のような形状モデルが得られる．



(a) 複数距離データ

(b) 位置合わせ及び統合処理

図 3.1: 形状モデル化手法

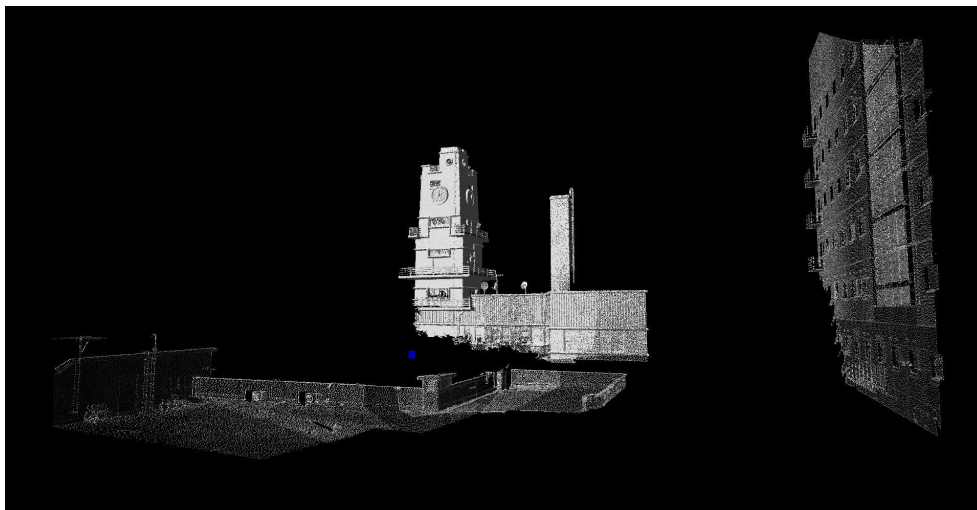
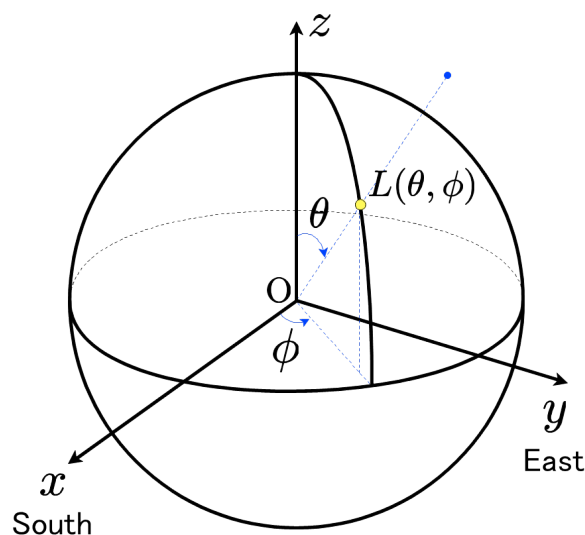


図 3.2: 形状モデル (時計台)

図 3.3: 方位角 ϕ , 天頂角 θ 及び光源放射輝度 $L(\theta, \phi)$ の定義

3.3 色彩モデル化

色彩モデルとは、物体の表面反射率（アルベド）のことであり、物体そのものの色をモデル化したものである。物体のアルベドは、Okura らの手法 [24] を用いて推定する。

物体のアルベドを推定するためには、対象物体の3次元幾何構造、テクスチャ及び光源環境が必要となる。3次元幾何構造は前節の形状モデル化手法を用いて取得し、対象物体と光源環境は全方位カメラを用いて同時取得する。全方位カメラでシャッタースピードを変えながら複数回撮影して幅広い輝度範囲を持つHDR (High Dynamic Range) 全方位画像

(a) テクスチャ画像 I_k (b) 照度値 E_k (c) アルベド値 S_k

図 3.4: アルベド推定結果 (12月16日, 11時30分, 曇り)

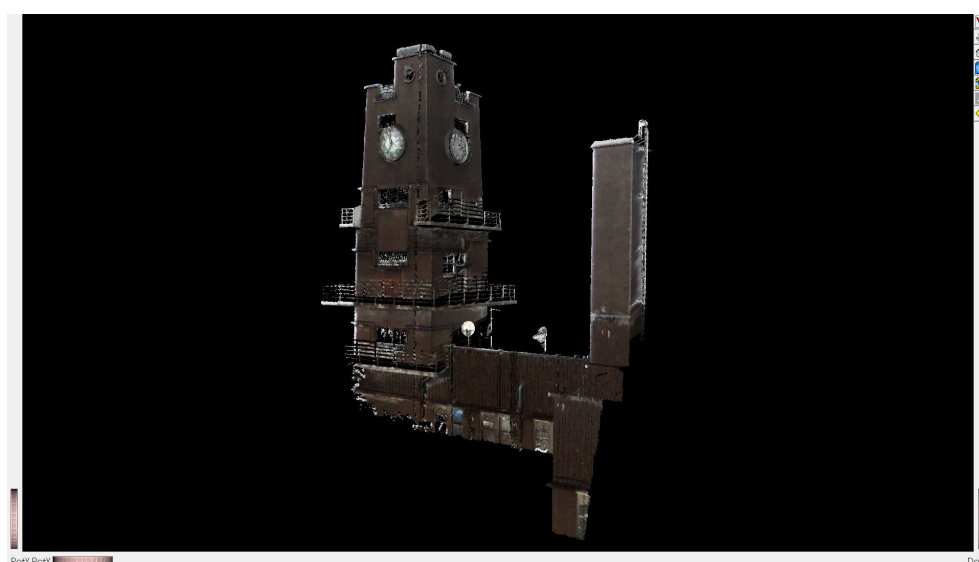


図 3.5: アルベド形状モデル (時計台)

を取得する．対象物体と光源環境を同一のカメラ感度で取得するため，物体と光源の幾何学的校正と光学的校正は不要である．全方位画像と形状モデルから手動で 2D-3D 対応点を与え，画像を撮影した際のカメラパラメータは事前に推定する [47]．

図 3.3 のように，中心 O に全方位カメラを置いて撮影するものとする．単位球上の点を方位角 ϕ と天頂角 θ ，光源の放射輝度を $L(\lambda, \theta, \phi)$ で表す．ここで λ は光源の波長を表す．光源は無限遠にあると仮定すると，カメラと対象物体間の距離は光源までの距離に比べて十分に小さいことから，カメラと物体の表面の位置は同じであると近似できる．

このとき，対象物体の表面における照度 E は，全光源方向からの光源放射輝度を積分し

た値であり，次のように表される．

$$E(\lambda) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta d\theta d\phi \quad (3.1)$$

ここで，対象物体の表面を Lambertian 面であると仮定すると，反射点における輝度 I は，アルベド S と照度 E の積によって表すことができる．

$$\begin{aligned} I(\lambda) &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} S(\lambda) L(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta d\theta d\phi \\ &= S(\lambda) E(\lambda) \end{aligned} \quad (3.2)$$

カメラの narrow-band 仮定を用い，カメラ感度が Dirac のデルタ関数によって近似できるとすると，光源の波長 λ は一定となる [43]．RGB のチャンネルを k とすると，画像輝度 I_k は次式で表される．

$$I_k = \tau_k S_k E_k \quad (k = \{r, g, b\}) \quad (3.3)$$

ここで， τ_k はカメラゲイン， S_k はアルベド値， E_k は照度値である．

上式よりアルベド値 S_k を推定するためには，対象物体表面の照度値 E_k を求める必要がある．照度値 E_k は，レイトレーシング法に基づく IBL (Image-Based Lighting) [9] を行い計算する．この際，撮影した HDR 全方位画像を光源環境マップとして IBL を行う．レンダリング時には形状モデルの全ての表面においてアルベド値を 1.0 と設定することにより，次のような照度値が得られる．

$$I'_k = \tau_k E_k \quad (3.4)$$

同一の全方位カメラによって対象物体と光源環境を取得しているため，式 (3.3) と式 (3.4) のカメラゲイン τ_k は等しい．したがって，対象物体表面のアルベド値 S_k は次式で得られる．

$$S_k = \frac{I_k}{I'_k} \quad (3.5)$$

アルベド推定の結果を図 3.4 に示す．テクスチャ画像では前面と側面の輝度の違いが現れているが，アルベド画像では差がほぼ無くなっていることが分かる．このようにして得られたアルベド値をテクスチャマッピングし，アルベド形状モデルを作成する (図 3.5)．

3.4 光源環境モデル化

光源環境モデルとは，現在の実世界光源環境のことであり， $L(\theta, \phi)$ をモデル化したものである．光源推定手法として，前節のように全方位カメラや魚眼カメラ等を用いて天空画像を取得し，直接光源環境を取得する手法がある [15, 31]．しかし，屋外環境は特に晴れの場合太陽光の影響によりダイナミックレンジが非常に大きいので，通常の LDR (Low Dynamic Range) カメラでは画像中の太陽周辺がサチュレーションを起こしてしまう．そのため，特に

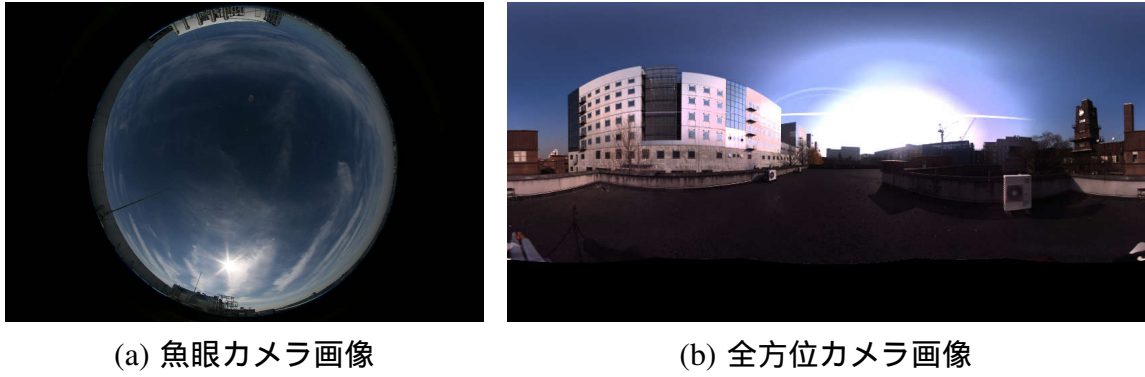


図 3.6: サチュレーションが起こっている例

太陽付近の輝度が正確に取得できないという問題がある（図 3.6）。特殊な減光 (ND: Neutral Density) フィルタを用い、様々なシャッタースピードで撮影することで、HDR (High Dynamic Range) 画像を取得する手法も考えられるが、それでも太陽光部分がサチュレーションがしないようにするのは難しく、実時間で HDR 画像を合成するのも難しい。そこで、太陽光モデルと天空光モデルを用いて、LDR 天空画像から実光源環境をシミュレーションするという手法を提案する。

3.4.1 天空輝度分布

まず、天空輝度分布をシミュレーションする太陽光モデル、天空光モデルについて説明する。

太陽光モデル

Iqbal による太陽光モデル [14] について説明する。Iqbal のモデルではオゾン層の厚さ、水蒸気、turbidity（混濁度）を独立なパラメタとして定式化されている。このモデルの結果を太陽光の輝度として用い、光源推定結果とする。太陽の天頂角を θ_s とすると Iqbal のモデルにおける各影響は以下のような式で表される。

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{1}{\cos \theta_s + 0.15 \left(93.885 - \theta_s \frac{180}{\pi} \right)^{-1.253}} \\
 \tau_{r,\lambda} &= \exp(-0.008735 \lambda^{-4.08} m) \\
 \tau_{a,\lambda} &= \exp(-\beta \lambda^{-\alpha} m) \\
 \tau_{o,\lambda} &= \exp(-k_{o,\lambda} l m) \\
 \tau_{g,\lambda} &= \exp \left(\frac{-1.41 k_{g,\lambda} m}{(1 + 118.93 k_{g,\lambda} m)^{0.45}} \right) \\
 \tau_{w,\lambda} &= \exp \left(\frac{-0.2385 k_{w,\lambda} \omega m}{(1 + 20.07 k_{w,\lambda} \omega m)^{0.45}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

$\tau_{r,\lambda}$ はレイリー散乱による影響, $\tau_{a,\lambda}$ は turbidity による影響, $\tau_{o,\lambda}$ はオゾン層による影響, $\tau_{g,\lambda}$ は複合ガスによる影響, $\tau_{w,\lambda}$ は水蒸気による影響である. λ はそれぞれの光の波長 (μm) であり, $k_{o,\lambda}, k_{g,\lambda}, k_{w,\lambda}$ はそれぞれオゾン, ガス, 水蒸気による影響の係数であり表 A.1 に示す値をとる. 各パラメタは α, β, l, ω である. α は波長の累乗定数項であり 1.3 を通常用いる. β は turbidity T に依存する係数であり $0.04608T - 0.04586$ という数式によっておおよそ表される. l, ω は標準状態におけるオゾン量, 水蒸気量であり 0.0035m, 0.02m がそれぞれ一般的に用いられる. 太陽スペクトル S_λ (表 A.1) にこれらの影響を掛け合わせることで地球が太陽光によって受ける影響を求めることができる.

天空光モデル

Perez らによる天空光モデル [26] について説明する. Perez らのモデルでは, turbidity T によって決まる A, B, C, D, E 5 つのパラメタによって定式化されており, それぞれが物理的な意味を持っている. A は地平線の明暗, B は地平線周辺の輝度勾配, C は太陽周囲の相対輝度, D は太陽周囲領域の大きさ, E は後方散乱光の相対輝度に関係している. このモデルは様々な屋外光源環境データにフィッティングするとされている. 太陽の方位角, 天頂角を ϕ_s, θ_s , 天空上のある点の方位角, 天頂角を ϕ, θ とすると, Perez のモデルは以下のような式で表される.

$$\begin{aligned} \gamma &= \arccos(\sin \theta_s \cos \phi_s \sin \theta \cos \phi + \sin \theta_s \sin \phi_s \sin \theta \sin \phi + \cos \theta_s \cos \theta) \\ F(\theta, \gamma) &= \left(1 + A \exp\left(\frac{B}{\cos \theta}\right)\right) (1 + C \exp(D\gamma) + E \cos^2 \gamma) \end{aligned} \quad (3.7)$$

γ は太陽方向ベクトルとある方向ベクトルとが成す角度を求めている. このモデル式より, 天空城のある点における天空光輝度 Y 及び色度 x, y は, 天頂方向 $\theta = 0$ の天空光輝度 Y_z 及び色度 x_z, y_z を基準とすれば, 次のように表される.

$$Y = Y_z \frac{F_Y(\theta, \gamma)}{F_Y(0, \theta_s)}, \quad x = x_z \frac{F_x(\theta, \gamma)}{F_x(0, \theta_s)}, \quad y = y_z \frac{F_y(\theta, \gamma)}{F_y(0, \theta_s)} \quad (3.8)$$

ここで, F_Y, F_x, F_y と表記されているのは, Y, x, y それぞれにおいて係数 A, B, C, D, E の値が異なるためである. 係数 A, B, C, D, E は turbidity T から以下のようにして求められ

る [13] .

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} A_Y \\ B_Y \\ C_Y \\ D_Y \\ E_Y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.1787 & -1.4630 \\ -0.3554 & 0.4275 \\ -0.0227 & 5.3251 \\ 0.1206 & -2.5771 \\ -0.0670 & 0.3703 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} A_x \\ B_x \\ C_x \\ D_x \\ E_x \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.0193 & -0.2592 \\ -0.0665 & 0.0008 \\ -0.0004 & 0.2125 \\ -0.0641 & -0.8989 \\ -0.0033 & 0.0452 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 1 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} A_y \\ B_y \\ C_y \\ D_y \\ E_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.0167 & -0.2608 \\ -0.0950 & 0.0092 \\ -0.0079 & 0.2102 \\ -0.0441 & -1.6537 \\ -0.0109 & 0.0529 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

また，天頂方向 $\theta = 0$ の天空光輝度 Y_z 及び色度 x_z, y_z (Kcdm^{-2}) は，太陽の天頂角 θ_s と turbidity T から次のようにして計算することができる．

$$\begin{aligned}
 \chi &= \left(\frac{4}{9} - \frac{T}{120} \right) (\pi - 2\theta_s) \\
 Y_z &= (4.0453T - 4.9710) \tan \chi - 0.2155T + 2.4192 \\
 x_z &= \begin{bmatrix} T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0017 & -0.0037 & 0.0021 & 0.0000 \\ -0.0290 & 0.0638 & -0.0320 & 0.0039 \\ 0.1169 & -0.2120 & 0.0605 & 0.2589 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s^3 \\ \theta_s^2 \\ \theta_s \\ 1 \end{bmatrix} \\
 y_z &= \begin{bmatrix} T^2 & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0028 & -0.0061 & 0.0032 & 0.0000 \\ -0.0421 & 0.0897 & -0.0415 & 0.0052 \\ 0.1535 & -0.2676 & 0.0667 & 0.2669 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_s^3 \\ \theta_s^2 \\ \theta_s \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

3.4.2 天空輝度分布の推定

LDR 天空画像から天空輝度分布を推定する手法について説明する．

Turbidity 推定

太陽光・天空光モデルは非常に複雑な式によってモデル化されているが，影響を与えるパラメタとしては天空の turbidity (混濁度) の1つである．従って，turbidity を LDR 天空画

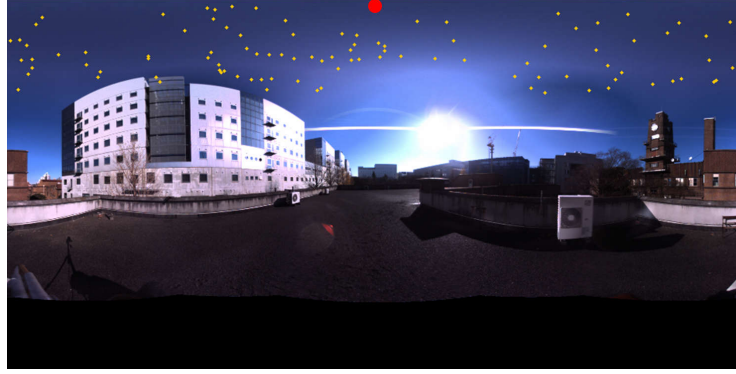


図 3.7: 基準点及びサンプリング点

像から推定することができれば，天空輝度分布をシミュレーションすることができる．LDR 天空画像において正確に取得できていると思われる天空輝度部分（20～200 程度）と天空光モデルの輝度との誤差が最小になるような turbidity を推定すればよい．ため，下記のような式を解けばよいことになる．

$$\arg \min_T \sum \left| \frac{J_i}{J_{i,ref}} - \frac{Y_s(T)}{Y_{s,ref}(T)} \right| \quad (3.11)$$

$$J_i = R_i + G_i + B_i \quad (3.12)$$

ここで， Y は XYZ 表色系における要素 Y であり， Y_i は LDR 天空画像中の輝度， Y_s は天空光モデルの輝度である．また，ref とは適当な基準点のことであり，サンプリングした点のうち適当なものを選択するか，今回の場合は天頂・全方位画像であるため天頂方向を基準としてもよい．なお，turbidity を推定するためには，LDR 天空画像から最低 1 個のサンプル点があればよいが，より正確な推定を行うために青みが強い部分（天空領域）から 100 個程度のサンプリングを行う（図 3.7）．カメラ画像はカメラの光学特性の影響を受けているため，輝度の単純比較ができない．そこで，カメラの光学特性が線形表現できるという仮定のもと，基準点との比の誤差を最小化している．平均的な turbidity 値である $T = 3.0$ を初期値とし，非線形最適化手法として Levenberg-Marquardt 法 [21] を使用する．一般的な turbidity 値は 1.5 から 20.0 であるため，定義域を $1.5 \leq T \leq 20.0$ に設定している．このようにして LDR 天頂画像推定した turbidity T_0 を用いて，天空輝度分布を太陽光・天空光モデルにより求める．

太陽の方位角・天頂角

太陽の方位角・天頂角が必要となるが，今回のような天頂・全方位画像の場合は太陽が写り込んでいるためサチュレーション領域を円，楕円でフィッティングし，中心を太陽の方位角・天頂角とすればよい（図 3.8）．その他，撮影した地点の時刻，緯度経度から太陽

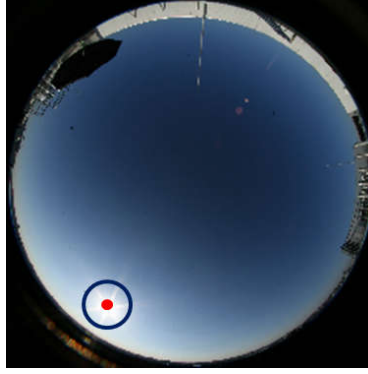


図 3.8: 太陽の位置

の方位角・天頂角 ϕ_s, θ_s を次の式のように求めることもできる．

$$\begin{aligned}
 t &= t_s + 0.170 \sin \left(\frac{4\pi(J-80)}{373} \right) - 0.129 \sin \left(\frac{2\pi(J-8)}{355} \right) + \frac{12(SM-L)}{\pi} \\
 \delta &= 0.4093 \sin \left(\frac{2\pi(J-81)}{368} \right) \\
 \phi_s &= \frac{\pi}{2} - \arcsin(\sin l \sin \delta - \cos l \cos \delta \cos \frac{\pi t}{12}) \\
 \theta_s &= \arctan \left(\frac{-\cos \delta \sin \frac{\pi t}{12}}{\cos l \sin \delta - \sin l \cos \delta \cos \frac{\pi t}{12}} \right)
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

ここで、 t は十進法の太陽時間、 t_s は十進法の標準時間、 SM は本初子午線、 l, L は緯度経度、 δ は赤緯、 J はユリウス日である．

魚眼・全方位カメラ画像の座標変換

魚眼・全方位カメラ画像の各ピクセルと方位角，天頂角との関係を説明する．以下，左上を原点とした画像の2次元ピクセル座標を u, v ，対応する方位角，天頂角を ϕ, θ ，画像の縦横のピクセル数を W, H ，立体球面の半径を r とする．まず，魚眼カメラで用いられる射影法式としては等距離射影方式，等立体角射影方式，正射影方式がある．ただ，ほとんどの魚眼レンズは等距離射影方式，等立体角射影方式を採用しており，正射影方式のものはほとんどない．等距離射影方式は弧を射影したものであり，

$$\begin{aligned}
 u &= r\theta \cos \phi + \frac{W}{2} \\
 v &= r\theta \sin \phi + \frac{H}{2} \\
 \phi &= \arctan \left(\frac{v - \frac{H}{2}}{u - \frac{W}{2}} \right) \\
 \theta &= \frac{\sqrt{(u - \frac{W}{2})^2 + (v - \frac{H}{2})^2}}{r}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

の関係がある．等立体角射影方式は弦を射影したものであり，

$$\begin{aligned}
 u &= 2r \sin \frac{\theta}{2} \cos \phi + \frac{W}{2} \\
 v &= 2r \sin \frac{\theta}{2} \sin \phi + \frac{H}{2} \\
 \phi &= \arctan \left(\frac{v - \frac{H}{2}}{u - \frac{W}{2}} \right) \\
 \theta &= 2 \arcsin \left(\frac{\sqrt{\left(u - \frac{W}{2}\right)^2 + \left(v - \frac{H}{2}\right)^2}}{2r} \right)
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

の関係がある．正射影方式は極座標系であり，

$$\begin{aligned}
 u &= \sin \theta \cos \phi + \frac{W}{2} \\
 v &= \sin \theta \sin \phi + \frac{H}{2} \\
 \phi &= \arctan \left(\frac{v - \frac{H}{2}}{u - \frac{W}{2}} \right) \\
 \theta &= \arcsin \left(\frac{\sqrt{\left(u - \frac{W}{2}\right)^2 + \left(v - \frac{H}{2}\right)^2}}{r} \right)
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

の関係がある．ただし，一般的な魚眼カメラ画像は $W = H = 2r$ である．一方，全方位カメラで用いられる射影方法は正距円筒図法であり，緯線経線がそれぞれ直角等間隔に並んでいる．したがって，単純な線形関係で表すことができる．

$$\begin{aligned}
 u &= W \left(1 - \frac{\phi}{2\pi} \right) \\
 v &= H \frac{\theta}{\pi} \\
 \phi &= 2\pi \left(1 - \frac{u}{W} \right) \\
 \theta &= \pi \frac{v}{H}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

サチュレーション部分の補完

推定した turbidity T_0 から太陽光・天空光モデルのみを用いて求めた天空輝度分布を光源推定結果としてもよいが，LDR 天空画像において正確に取得できている天空輝度部分はそのまま用いることができる方が望ましいと考えられる．周囲の建造物や雲等の影響も光源情報として得ることができるためである．しかし，前述のとおり LDR 天空画像の値はカメラの光学特性の影響を含んでいるため，式 (3.12) の評価関数が 0 に収束するとして補正を

行う．つまり，最終的に求める輝度を Y とすれば，

$$Y = \begin{cases} Y_s(T_0) & (Y_i > 200) \\ \frac{Y_{s,ref}(T_0)}{Y_{i,ref}} Y_i & (Y_i \leq 200) \end{cases} \quad (3.18)$$

のようにサチュレーション部分は天空光モデルで補完し，その他の部分は HDR 画像化する．他の要素 X, Z についても同様の処理を行う．

3.5 まとめ

実世界環境をモデル化する手法について，形状モデル，色彩モデル，光源環境モデルに分類して説明した．形状モデルは，レーザレンジセンサを用いて複数距離データを得て，位置合わせ，統合処理を行い，取得する．色彩モデルは，形状モデルと全方位カメラ画像からアルベド推定を行い，取得する．光源環境モデルは，魚眼カメラや全方位カメラを用いて天空画像を撮影し，取得するが，屋外のダイナミックレンジは非常に大きく，特に太陽光付近でサチュレーションを起こしてしまう．そこで，太陽光モデル，天空光モデルを利用して，LDR カメラ画像からサチュレーション部分の輝度を推定する．

第4章

光源環境変化に頑健な位置合わせ

4.1 はじめに

幾何学的整合性を実現するためには、カメラの視点位置及び視線方向を常に取り得る必要がある。カメラの入力画像と第3章の実世界環境モデルを用いて、グローバル位置合わせ、ローカル位置姿勢追跡を実現する。

事前取得したテクスチャ画像と形状モデルの校正ができている場合、カメラの入力画像と、テクスチャ画像との間で対応点を抽出することで、カメラパラメータを推定することができ、グローバル位置合わせが可能となる。既存の特徴点抽出法を用いることで、2つの画像から対応点を自動的に抽出できるが、光源環境が大きく異なる場合、正しい対応点探索が困難になる。このような場合、推定されるカメラパラメータの精度が下がり、所望の位置に仮想コンテンツを重畳することができなくなる。そこで提案手法では、単純にテクスチャ画像と入力画像から対応点を抽出するのではなく、両者の照明条件が同じになるよう、実世界環境モデルから生成した再現画像を利用する。再現画像は入力画像と似た光源環境となるため、2つの画像の見えが近づき、自然特徴点による対応点が得られ易くなると考えられる。

ローカル位置姿勢追跡は、グローバル位置合わせ完了後の入力画像の特徴点を形状モデルにマッピングすることによって、リアルタイムに3次元特徴点マップを生成することで解決する。現在の見えにおける自然特徴量であるため、対応点探索は安定して行えると考えられる。しかし、カメラパラメータ推定の誤差が蓄積し、徐々にずれが生じるため、単純な影付けによって毎フレーム再現画像を生成し、グローバル再位置合わせも同時に試みる。

4.2 グローバル位置合わせ

図4.1に提案手法による再現画像の生成からグローバル位置合わせまでの流れを示す。

4.2.1 再現画像生成

まず、3.4章の光源推定手法を用いて、グローバル位置合わせを行う時点の光源環境を取得する。推定した光源環境から、アルベド推定の際と同様に形状モデルの照度値を計算する。得られた照度値とアルベド形状モデルのアルベド値を用いて、式(3.3)より再現画像を生成する。

4.2.2 対応点探索

カメラの入力画像と再現画像に関して、自然特徴点による対応点探索を行う。対応点探索を行う際、カメラパラメータを精度良く求めるため、十分な数の正しい対応点を得る必要がある。そこで、エピポーラ拘束を利用したRANSAC(RANdom SAMple Consensus) [11]に基づく誤対応点除去処理を行う。

再現画像と形状モデルとの校正はとれているため、入力画像と再現画像の対応点探索の結果から、入力画像と計測モデルとの2D-3Dの対応点が得られる。

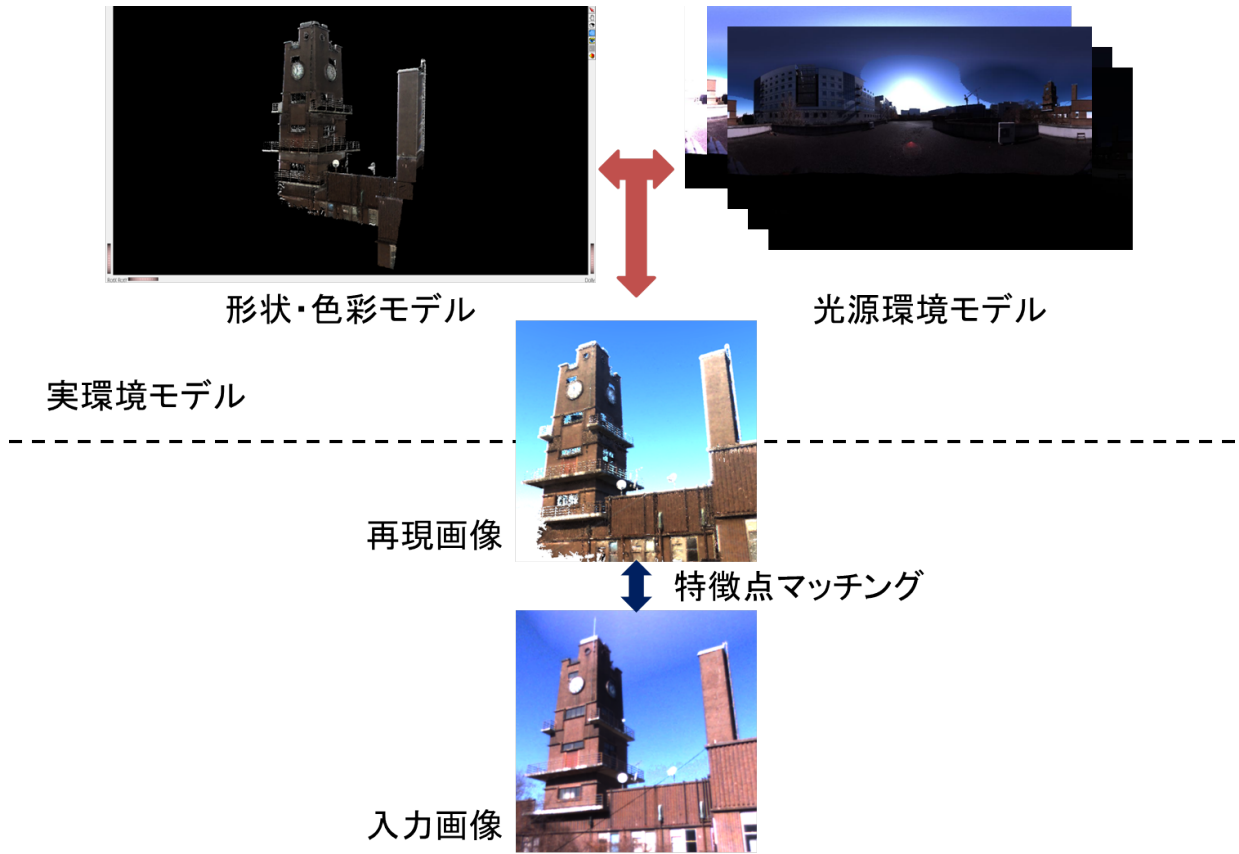


図 4.1: グローバル位置合わせの流れ

4.2.3 カメラパラメータ推定

得られた n 対の 2D-3D 対応点からカメラパラメータを計算する．カメラの内部カメラパラメータ P は Zhang の手法 [45] により既知であるとする．外部カメラパラメータ M はカメラの位置を表す並進成分 T と姿勢を表す回転成分 R によって構成される．外部カメラパラメータ M を求めるために，まず Weng らの手法 [42] にならって線形推定を行う．そして，その結果を初期解として再投影誤差 F_i の 2 乗和を最小化する外部カメラパラメータ M を求める．

$$F_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} - P \begin{bmatrix} R^\top & -R^\top T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\{R, T\} = \arg \min_{R, T, k_i} \sum_i^n \|F_i\|^2 \quad (4.2)$$

(u_i, v_i) は入力画像における 2 次元座標， (X_i, Y_i, Z_i) は計測モデルの対応する 3 次元座標である．なお，非線形最適化計算として，Levenberg-Marquardt 法 [21] を使用する．また，外

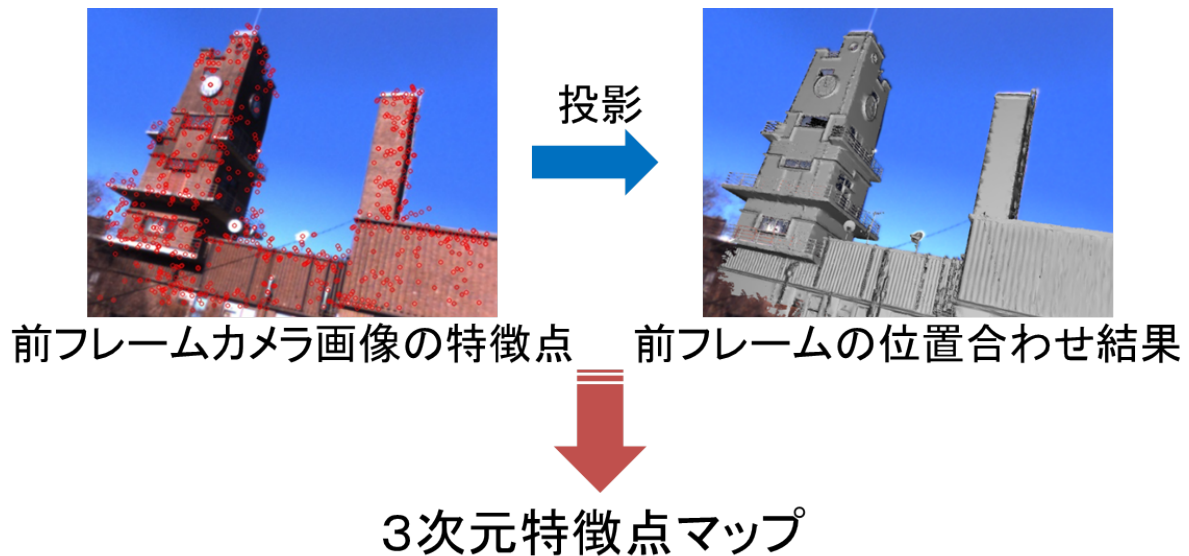


図 4.2: 自然特徴点の投影

部カメラパラメータ M は6自由度であるが、拘束関係があるため、対応点の数 n は最低4点あれば良い。しかし、もちろん6点以上が望ましく、精度は良くなる。

4.2.4 モデル座標変換

求められた外部カメラパラメータ行列 M を用いて形状モデル座標系を変換することで、実世界と仮想世界との座標系を合わせる。このような処理によって、実物体と仮想コンテンツとの絶対的な位置合わせを実現することができる。

4.3 ローカル位置姿勢追跡

グローバル位置合わせを行った後も、視点位置姿勢を常に追跡する必要がある。図 4.3 にローカル位置姿勢追跡の流れを示す。

4.3.1 カメラトラッキング

密な3次元形状モデル上に、前フレームのカメラ画像の自然特徴点を投影することによって、リアルタイムに3次元特徴点マップを生成する(図 4.2)。前フレームのカメラ画像は、帰納的に位置合わせが完了しており、形状モデルとの校正がとれているため、容易に画像特徴点の3次元座標を求めることができる。また、現在の見えにおける自然特徴量であるため、現フレームのカメラ画像との対応点探索は安定して行えると考えられ、式 4.2 より視点位置姿勢を求めることができる。

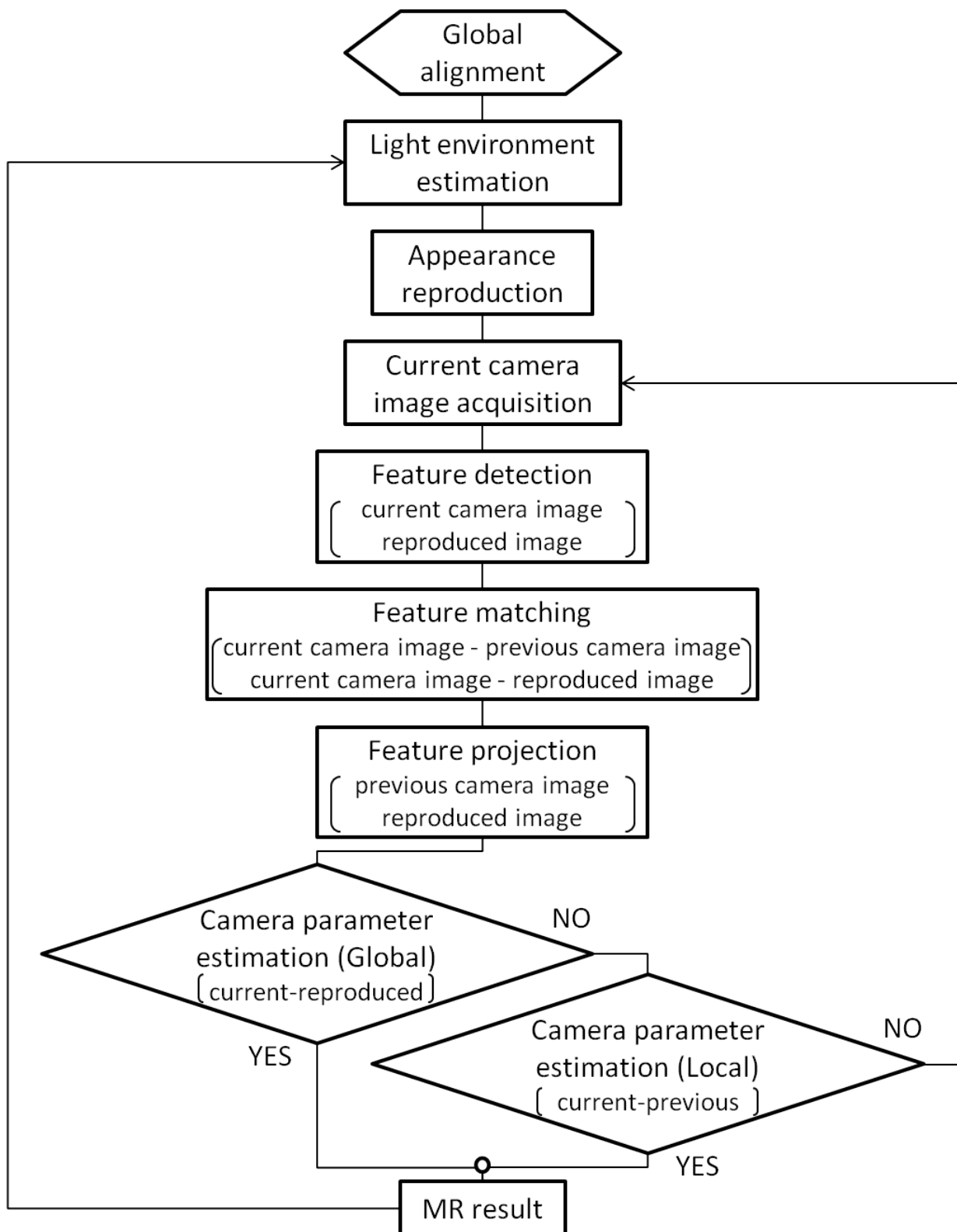


図 4.3: ローカル位置姿勢追跡の流れ図

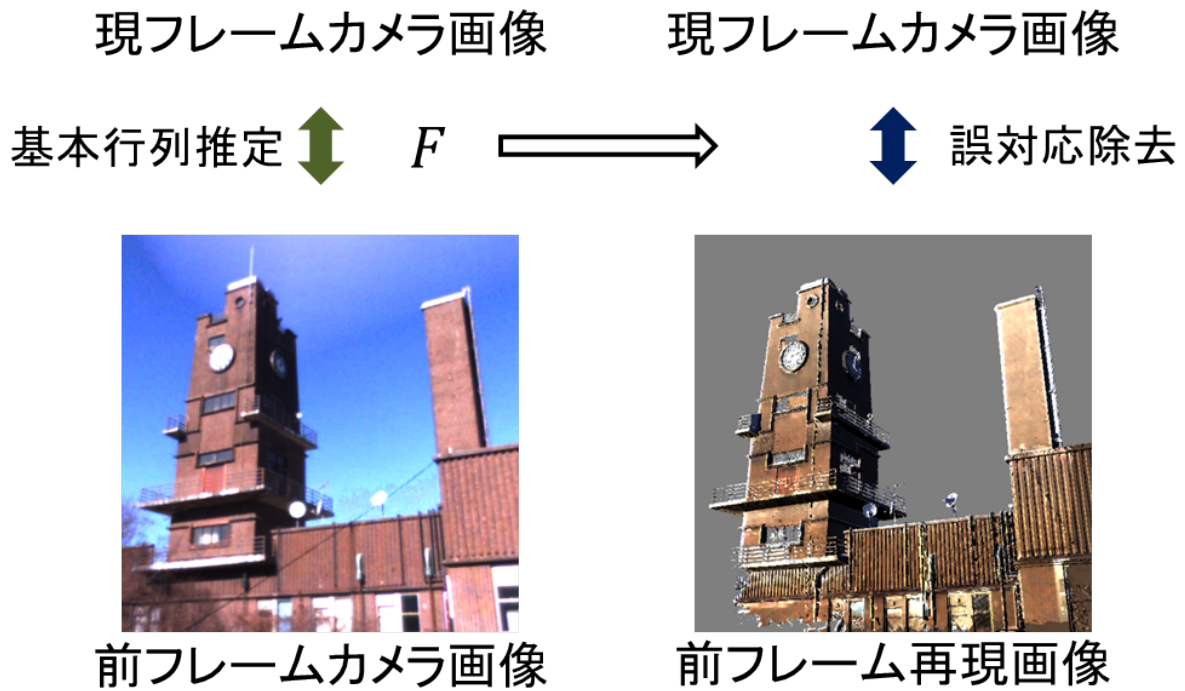


図 4.4: グローバル再位置合わせにおける誤対応点除去

このような特徴量のマッピングとカメラパラメータの推定を毎フレームで繰り返すことによって、頑健なローカル位置姿勢追跡が可能となる。しかし、この手法では毎フレームのカメラパラメータ推定における誤差が溜まってしまうため、徐々にずれが生じてくる。この誤差を解消するために、グローバル再位置合わせを行う必要がある。

4.3.2 グローバル再位置合わせ

誤差を解消するために、グローバル位置合わせと同様に再現画像を毎フレームにおいて生成し、対応点探索することで、絶対的な位置合わせを試みる。視点位置姿勢移動に合わせて再現画像を生成する必要があるため、実時間で行えなければならない。しかし、レイトレーシング法に基づくIBLによる再現画像生成は計算コストが高く、分単位の時間がかかってしまい実時間で行うのは困難である。そこで、ランバート反射に基づく簡易な影付けでリアルタイムに再現画像を生成する。この際、計算コストを下げるため遮蔽物体やに2次反射等は考慮しない。また、影付けを行うためには光源環境が必要であるが、屋外の光源環境は太陽や雲の動き等により常に変化するため、第3.4節の手法を用いて、光源環境も毎フレーム推定する。ここで推定された光源環境は、MRを実現する際に光学的整合性[50]を満たすためにも使用することができる。

推定したカメラパラメータと光源環境をもとに、アルベド形状モデルをレンダリングし、再現画像を生成する。生成した再現画像と現フレームのカメラ画像との間に十分な数の正

確な対応点が取得できた場合，再位置合わせが行われ，ずれを解消することができる．また，対応点探索の際は，前フレームのカメラ画像と再現画像の校正がほぼとれていることを利用し，現フレームのカメラ画像と前フレームのカメラ画像との幾何関係を用いて誤対応点除去を行う（図4.4）．このようにすることで，再現画像とのマッチングにおいて誤対応に対して正対応がかなり少ない場合でも，RANSACにより上手く正対応のみを抽出することができる．

4.4 まとめ

実世界環境モデルから見えを生成し，自然特徴点による対応点探索を容易にすることによって，光源環境変化に頑健なグローバル位置合わせ手法を提案した．また，毎フレームの画像特徴量を形状モデルに投影することで，リアルタイムに3次元特徴点マップを生成し，頑健なローカル位置姿勢追跡手法を提案した．さらに，ローカル位置姿勢追跡において蓄積する推定誤差はグローバル再位置合わせを毎フレーム試みることで，解消することができる．

第5章

実験

5.1 はじめに

屋外光源推定手法，位置合わせ処理の有効性を検証するため実験を行った．

5.2 光源環境モデル化

3.4 節の手法を用いた屋外光源環境推定実験を行い，結果を考察した．また，推定した光源環境を元に形状モデルの陰影付けを行い，結果を実際の物体の陰影及び通常の HDR 画像を用いた従来手法の陰影付け結果と比較した．

LDR 天空画像を取得するために，SIGMA 社の 4.5mm F2.8 EX DC CIRCULAR FISHEYE HSM¹ レンズを取り付けた CANON 社のデジタルカメラ EOS 5D MarkII² と Point Gray Research 社の Ladybug3³ を使用した．使用した SIGMA 社の魚眼レンズは等立体角射影方式を採用している．前者は魚眼画像を，後者は全方位画像を撮影することができる．撮影の際にはガンマ補正等一切画像処理は行っていない．また，比較のため，シャッタースピードを変化させながら撮影し，HDR 画像も取得した．

形状モデルは Leica Geosystems 社のレーザレンジセンサ HDS3000⁴ を用いて取得した図 3.2 を使用した．

5.2.1 屋外光源環境推定

LDR 天空画像を入力として，本手法を適用し光源推定を行った．LDR 天頂画像による結果を図 5.1，5.2，LDR 全方位画像による結果を図 5.3，5.4 に示す．太陽光スペクトルから RGB 表色系に変換する際は，標準 CIE1964CMF (Color Matching Function) に基づいて変換した．LDR 画像中でサチュレーションしている部分の太陽光，天空光が推定できていることが分かる．また，サチュレーションしている部分のみを太陽光モデル，天空光モデルで補完することにより，周囲の建造物や雲等の光源も取得することができている．

5.2.2 陰影付け

光源推定結果を用いて形状モデルの陰影付けを行い，実際の物体の陰影，通常の HDR 画像を用いた従来手法の陰影付けとの比較を行った．本手法として図 5.3(d)，5.4(d) の光源推定結果を使用した．従来手法はシャッタースピードを変化させながら撮影し，合成した HDR 画像を光源環境として使用した（図 5.5）．レンダリングソフトウェアとして Radiance⁵ を使用し，HDR 全方位画像を光源環境マップとして，物体のアルベド値を 1.0 としてレイトレーシング法に基づく IBL を行った．この際，太陽は点光源として別設定した．

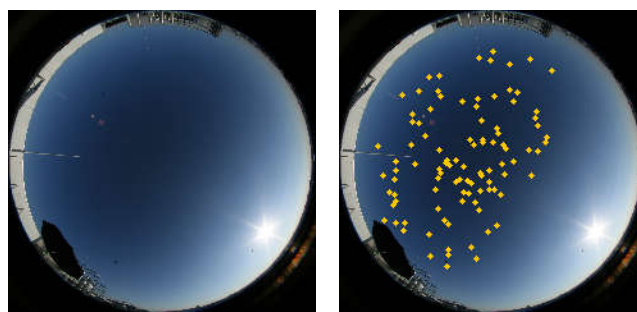
¹http://www.sigma-photo.co.jp/lens/wide/45_28/

²<http://cweb.canon.jp/e-support/faq/answer/eosd/45374-1.html>

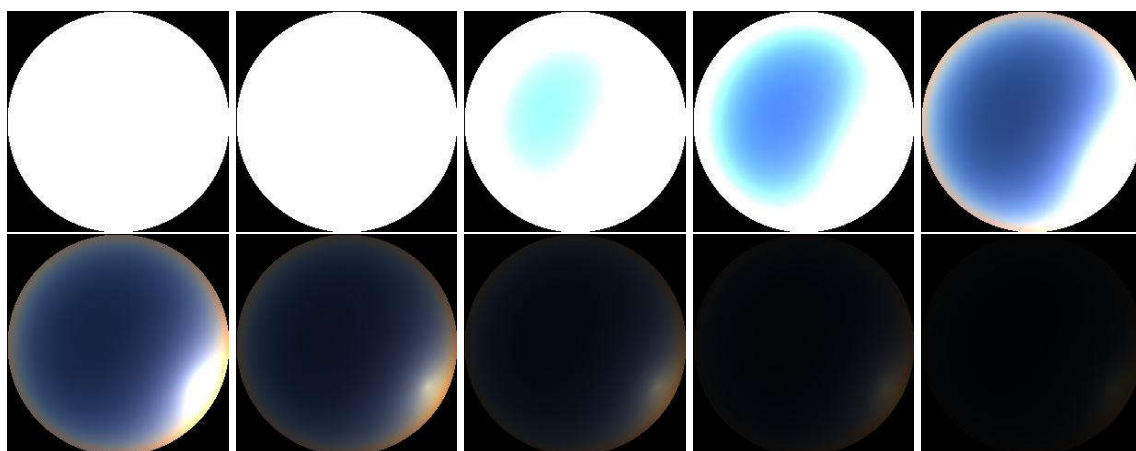
³<http://www.ptgrey.com/products/ladybug3/>

⁴<http://hds.leica-geosystems.com/en/5574.htm>

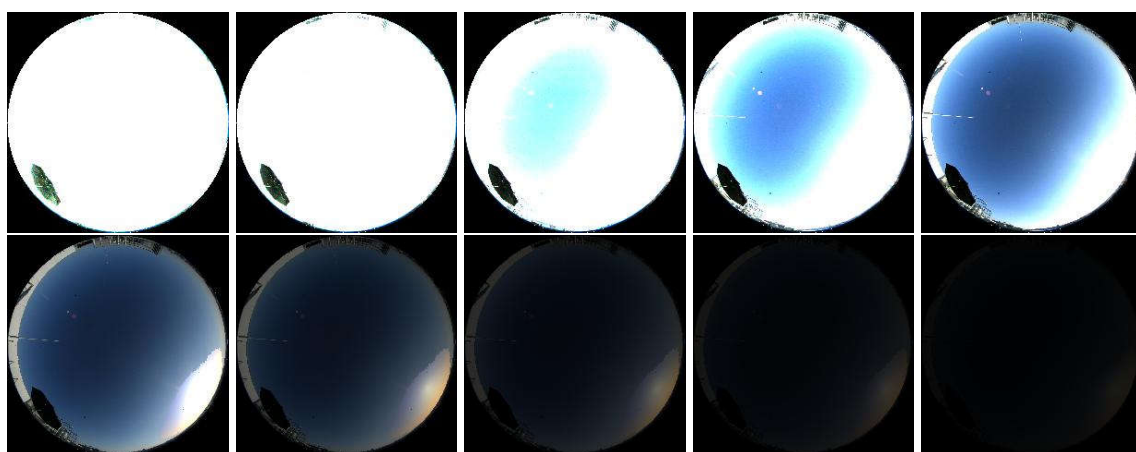
⁵<http://radsite.lbl.gov/radiance/>



(a) 入力 LDR 天頂画像 (b) サンプルング点

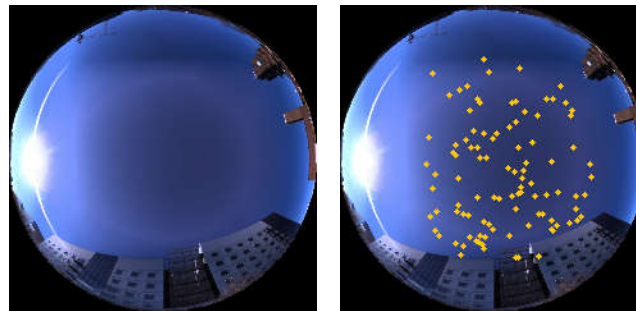


(c) 天空光モデルのみ

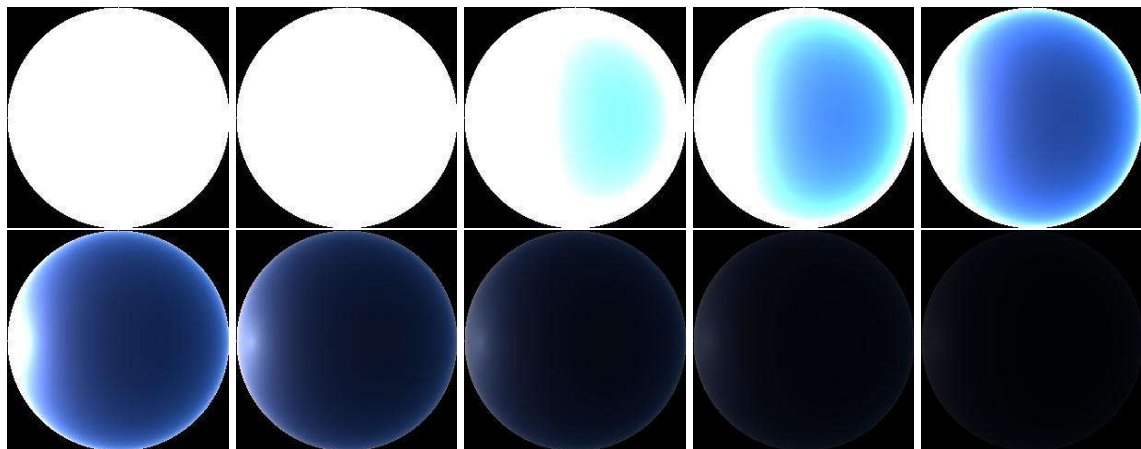


(d) サチュレーション部分を天空光モデルで補完

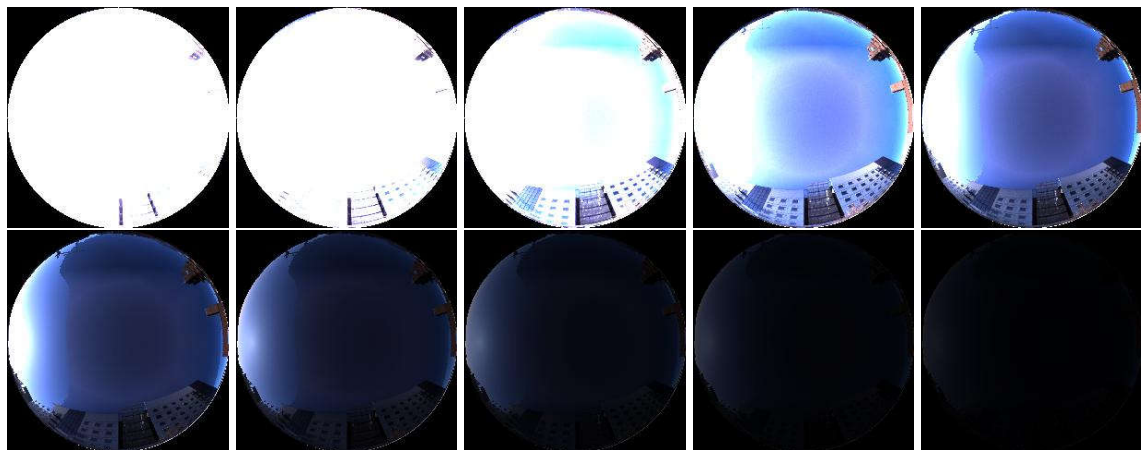
図 5.1: 魚眼カメラで撮影した天頂画像による光源推定結果 (10月16日, 15時30分, 晴れ, 左上: 露光大, 右下: 露光小) turbidity = 2.44, 太陽方位角 = 242.7°, 太陽天頂角 = 19.1°, 太陽輝度 RGB = 1.54e6, 1.17e6, 6.95e5 ($\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$)



(a) 入力 LDR 天頂画像 (b) サンプルング点

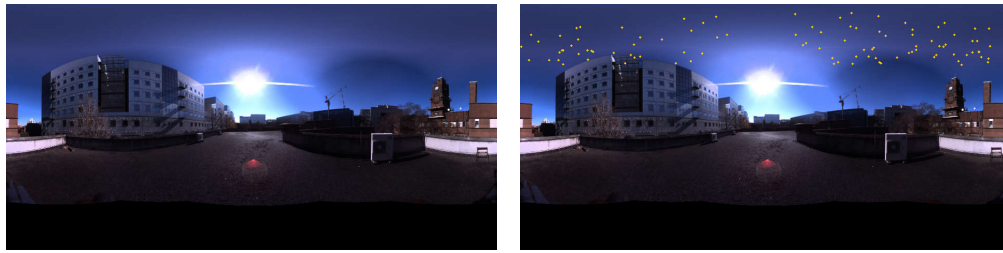


(c) 天空光モデルのみ



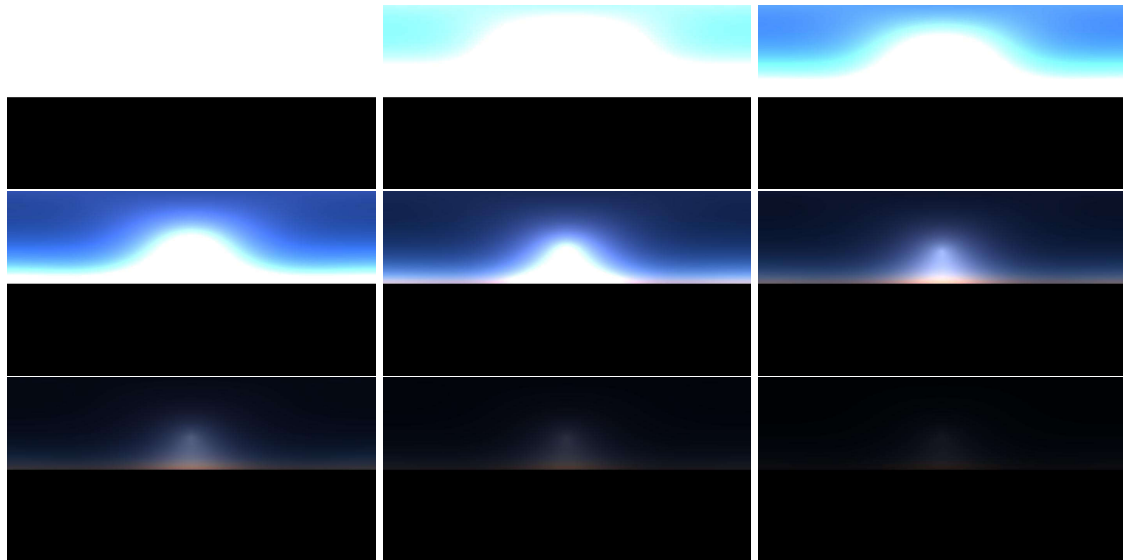
(d) サチュレーション部分を天空光モデルで補完

図 5.2: 全方位カメラで撮影した天頂画像による光源推定結果 (12 月 08 日, 11 時 30 分, 快晴, 左上: 露光大, 右下: 露光小) turbidity = 1.95, 太陽方位角 = 180.6°, 太陽天頂角 = 58.4°, 太陽輝度 RGB = 2.12e6, 1.77e6, 1.30e6 ($\text{Wsr}^{-1}\text{m}^{-2}$)

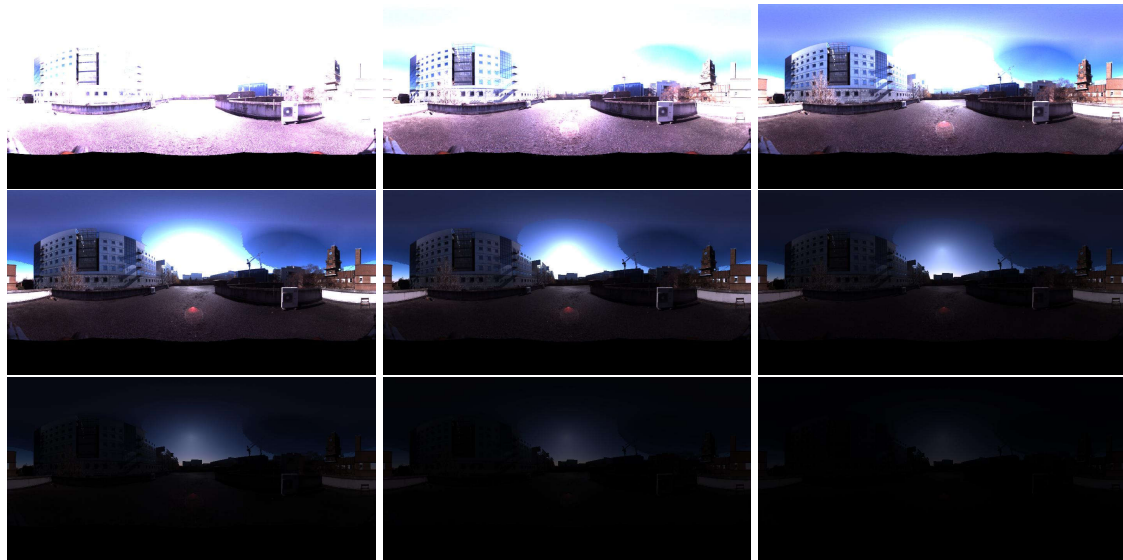


(a) 入力 LDR 全方位画像

(b) サンプルング点



(c) 天空光モデルのみ

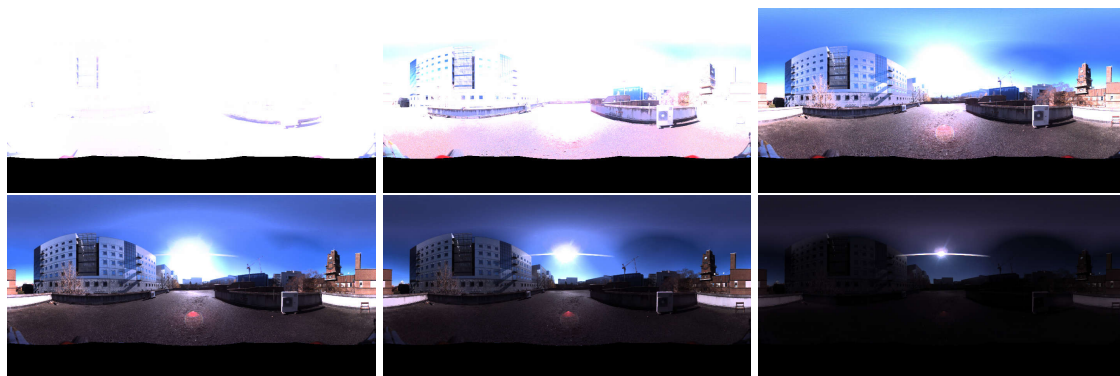


(d) サチュレーション部分を天空光モデルで補完

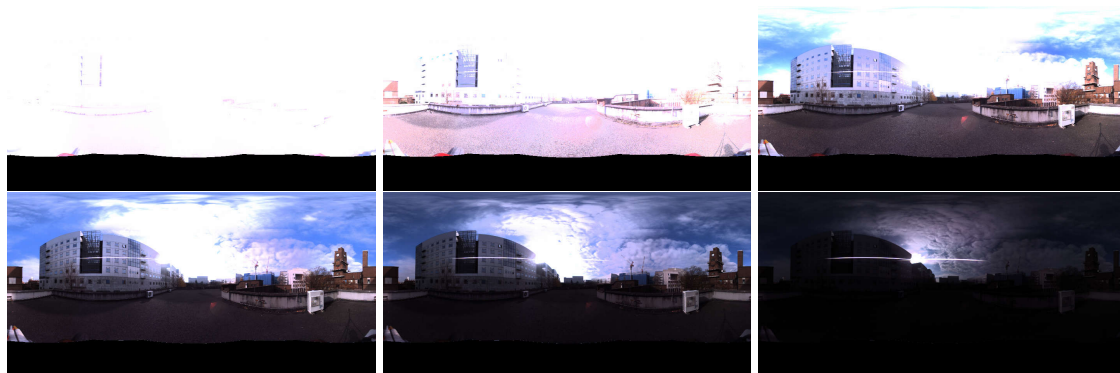
図 5.3: 全方位カメラで撮影した全方位画像による光源推定結果 (12 月 08 日, 11 時 30 分, 快晴, 左上: 露光大, 右下: 露光小) $turbidity = 1.96$, 太陽方位角 = 180.6° , 太陽天頂角 = 58.4° , 太陽輝度 RGB = $2.12e6, 1.76e6, 1.30e6 (W_{sr}^{-1}m^{-2})$



図 5.4: 全方位カメラで撮影した全方位画像による光源推定結果 (12 月 06 日, 09 時 30 分, 曇り, 左上: 露光大, 右下: 露光小) $turbidity = 2.07$, 太陽方位角 = 211.2° , 太陽天頂角 = 64.9° , 太陽輝度 RGB = $1.92e6, 1.55e6, 1.06e6 (W_{sr}^{-1}m^{-2})$



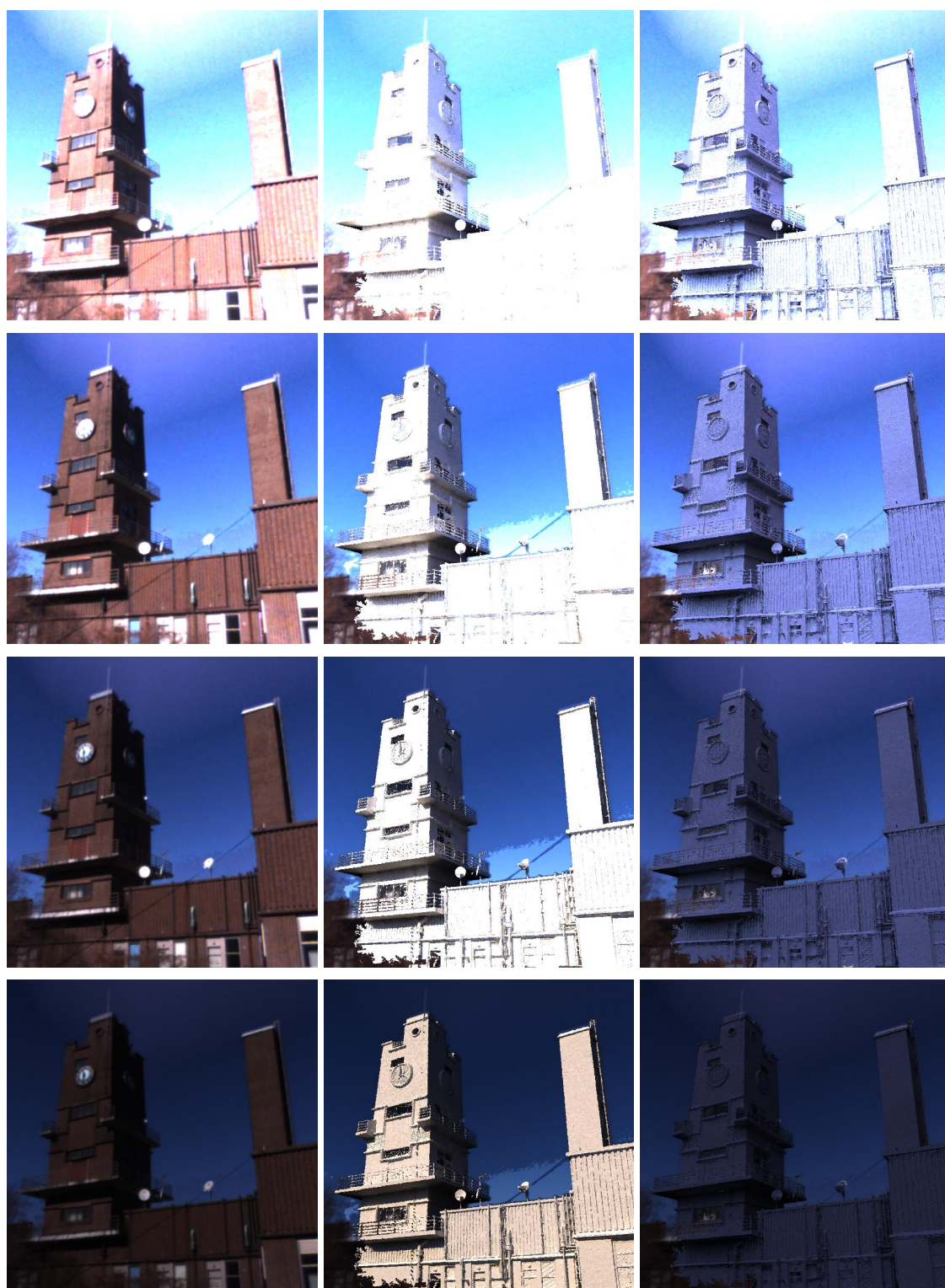
(a) 12月08日, 11時30分, 快晴



(b) 12月06日, 09時30分, 曇り

図 5.5: 従来手法: シャッタースピードを変化させて取得した HDR 全方位画像による光源環境 (左上: 露光大, 右下: 露光小)

陰影付け結果を図 5.6, 5.7 に示す. 従来手法では, 太陽光付近の輝度が取得できておらず, 全体的に暗い陰影付け結果となっている. 一方, 本手法では, 太陽光, 太陽周辺の輝度が推定できているため, 実物体と同様な濃い陰影が表現できていることが分かる.



(a) 実物体

(b) 提案手法

(c) 従来手法

図 5.6: 陰影付け結果 (12月08日, 11時30分, 快晴, 上: 露光大, 下: 露光小)



(a) 実物体

(b) 提案手法

(c) 従来手法

図 5.7: 陰影付け結果 (12月06日, 09時30分, 曇り, 上: 露光大, 下: 露光小)

5.3 光源環境変化に頑健な位置合わせ

提案手法による位置合わせ処理の有効性を検証するため，光源環境が異なる状況下での実物体と形状モデルの位置合わせ実験を行った．この実験においても，図 3.5 に示す建造物を対象物体とした．アルベド形状モデルは百万点の 3 次元点を持つ．本実験で用いた PC スペックは，CPU: Intel Core2Duo T8300 2.40GHz，RAM: 4GB，GPU: nVIDIA GeForce8800M GTX 512MB である．

5.3.1 グローバル位置合わせ

再現画像生成

図 5.3(c)，5.4(c) の光源推定結果から Radiance を使用して照度値を計算し，アルベド値と積を求め再現画像を生成した．

図 5.8，5.9 に再現画像生成の結果を示す．物体の陰影に注目すると，再現画像と入力画像の陰影がほぼ同様であるため，正しく陰影付けされた再現画像が生成できていることが分かる．

対応点探索

提案手法である再現画像と入力画像との対応点探索と，従来手法であるテクスチャ画像と入力画像との対応点探索の比較を行った．画像の解像度はすべて 600×600 ピクセルである．特徴点抽出法として，SIFT [20]，SURF [5] 及び光源に不変な特徴量である Colored SIFT (CSIFT) [1] を用いた．入力画像取得時と光源環境が異なるテクスチャ画像を使用し，対応点数の変化を確認する．

各特徴点抽出法での特徴ベクトルのユークリッド距離による対応点探索を行い，エピポーラ拘束に基づき RANSAC によって誤対応点を除去した結果を表 5.1，5.2，図 5.10，5.11 に

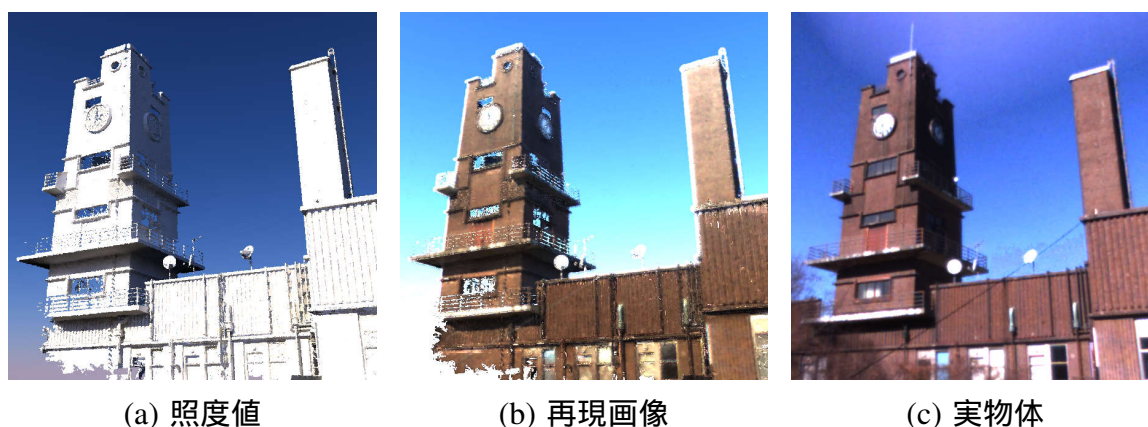


図 5.8: 再現画像の生成結果 (12 月 08 日，11 時 30 分，快晴)

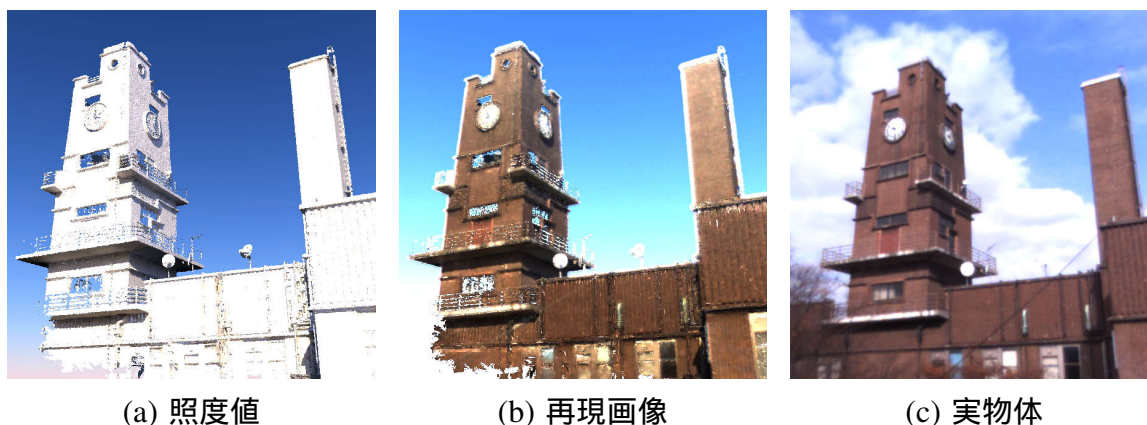


図 5.9: 再現画像の生成結果 (12月06日, 09時30分, 曇り)

表 5.1: 対応点探索の比較 (カメラ画像: 12月06日, 09時30分, 曇り; テクスチャ画像: 12月16日, 11時30分, 曇り)

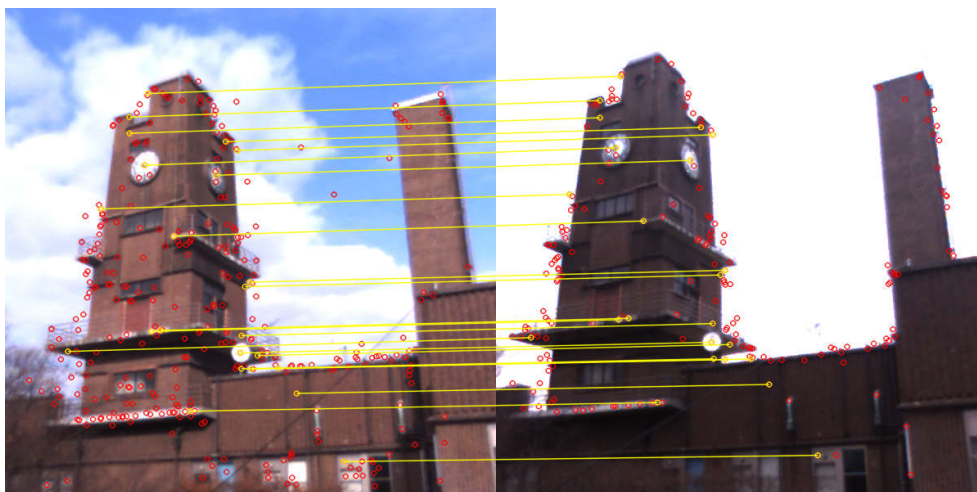
	SIFT + 従来手法	SIFT + 提案手法	SURF + 従来手法	SURF + 提案手法	Colored SIFT
correspondences	28	24	23	24	0
calculation time[sec]	0.24	0.30	0.39	0.38	0.20

表 5.2: 対応点探索の比較 (カメラ画像: 12月08日, 11時30分, 快晴; テクスチャ画像: 12月16日, 11時30分, 曇り)

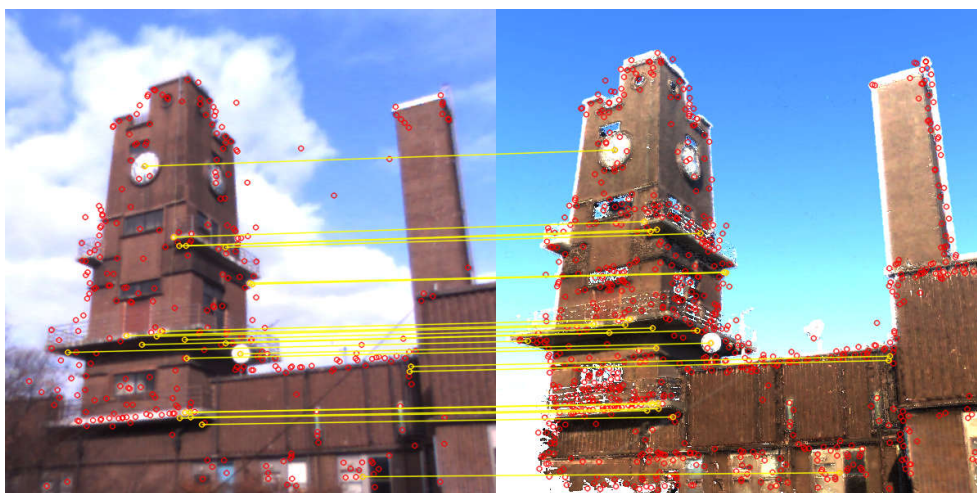
	SIFT + 従来手法	SIFT + 提案手法	SURF + 従来手法	SURF + 提案手法	Colored SIFT
correspondences	10	39	8	33	0
calculation time[sec]	0.28	0.30	0.36	0.48	0.29

示す。まず, 表 5.1, 図 5.10 では, 入力画像とデータベース画像との見えがそれほど違わないため, 従来手法, 提案手法共にカメラパラメータを推定するために十分な対応点を得られている。一方, 表 5.2, 図 5.11 では, 入力画像に深い陰影が付いており, 見えが大きく異なるため, 従来手法では正しい対応点が全く得られていない。正対応に対して誤対応が多過ぎるため, RANSAC による誤対応点の除去が上手く機能していないと思われる。しかし, 提案手法では, 入力画像と見えが近づき, 多くの対応点を得ることができており, 提案手法の有効性が確認された。また, どちらの場合でも CSIFT では正しい対応点は得られなかった。

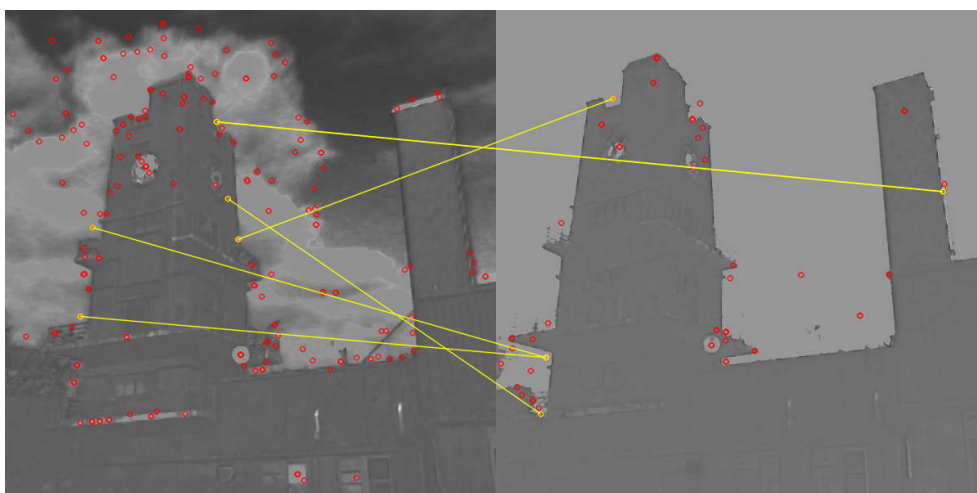
図 5.10(c), 5.11(c) のように CSIFT で対応点を得られなかった要因としては, CSIFT では光源の情報を落としてしまうため, 今回実験で用いた建造物のようにほとんど同様のテ



(a) カメラ画像とテクスチャ画像の SURF 対応点探索



(b) カメラ画像と再現画像の SURF 対応点探索

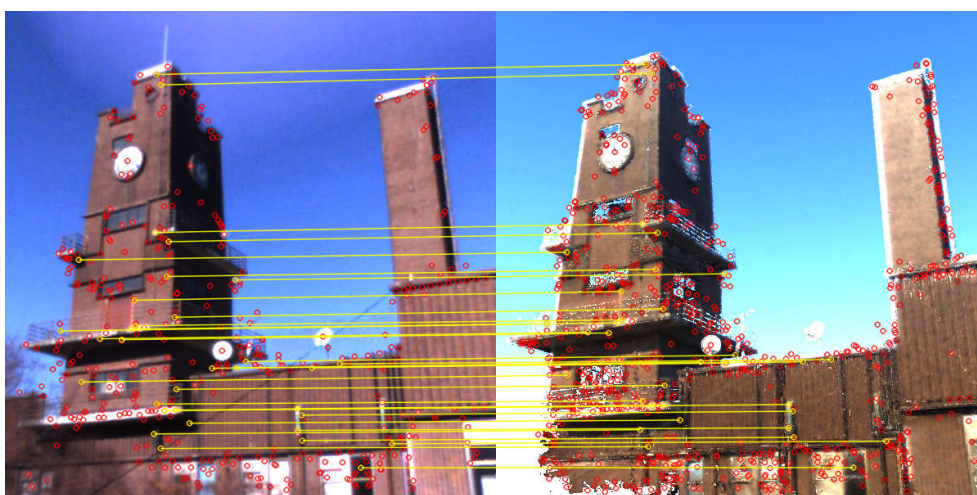


(c) カメラ画像とテクスチャ画像の CSIFT 対応点探索

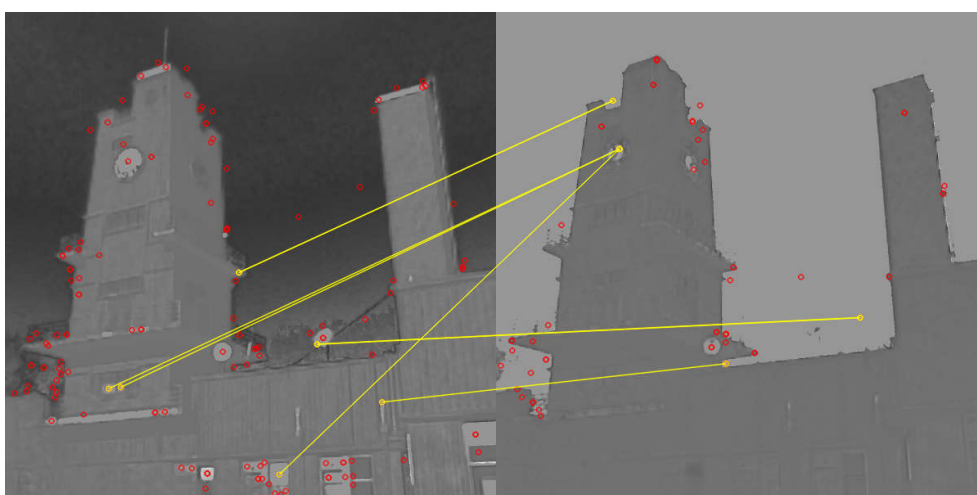
図 5.10: 対応点探索の結果 (カメラ画像: 12 月 06 日, 09 時 30 分, 曇り; テクスチャ画像: 12 月 16 日, 11 時 30 分, 曇り)



(a) カメラ画像とテクスチャ画像の SURF 対応点探索



(b) カメラ画像と再現画像の SURF 対応点探索



(c) カメラ画像とテクスチャ画像の CSIFT 対応点探索

図 5.11: 対応点探索の結果 (カメラ画像: 12 月 08 日, 11 時 30 分, 快晴; テクスチャ画像: 12 月 16 日, 11 時 30 分, 曇り)



(a) 事前取得したテクスチャ画像との対応点探索



(b) 位置合わせ結果画像

図 5.12: 従来手法：グローバル位置合わせの失敗例（再投影誤差 = 5.94）

クスチャで構成されている物体では特徴が現れ難いということが考えられる．つまり，今回のような場合，光源情報は対応点を得る上で非常に重要であり，光源環境を再現する提案手法は有効であるといえる．図 5.11(a)，5.11(b) の結果を見ても，陰影付けにより生じる全面側面のエッジ近辺の対応点が良く取れていることが分かり，物体の 3 次元構造情報も使ってマッチングできていることが分かる．

カメラパラメータ推定

再現画像に SURF を適用して得られた対応点を用いて推定されたカメラパラメータの精度を，式 (4.2) で表される再投影誤差及び位置合わせの成功率によって評価した．画像の解像度は 640×480 ピクセルである．再投影誤差が 3 ピクセル未満の場合，位置合わせが成功したとする．



(a) レイトレーシング法による再現画像との対応点探索



(b) 位置合わせ結果画像

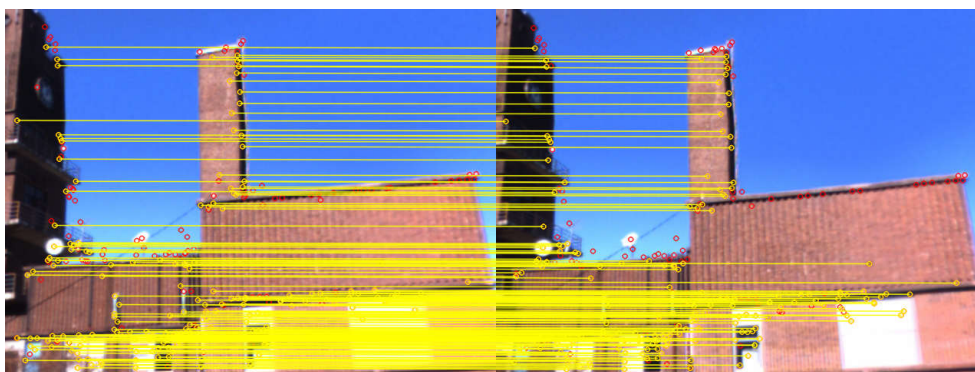
図 5.13: 提案手法：グローバル位置合わせの成功例（再投影誤差 = 2.58）

100 回の試行をした結果，従来手法では平均再投影誤差は 114 ピクセル，位置合わせ成功率は 4% であった．一方，提案手法では平均再投影誤差は 2.5 ピクセル，位置合わせ成功率は 89% であり，提案手法の有効性が確認された．図 5.12 に従来手法により位置合わせが失敗した場合，図 5.13 に提案手法により位置合わせが成功した場合の結果を示す．従来手法に比べ提案手法では特徴点マッチングが精度良く行えており，形状モデルの位置がより正確に合って重畳されている．実世界と仮想世界の座標系が一致していることが確認できる．

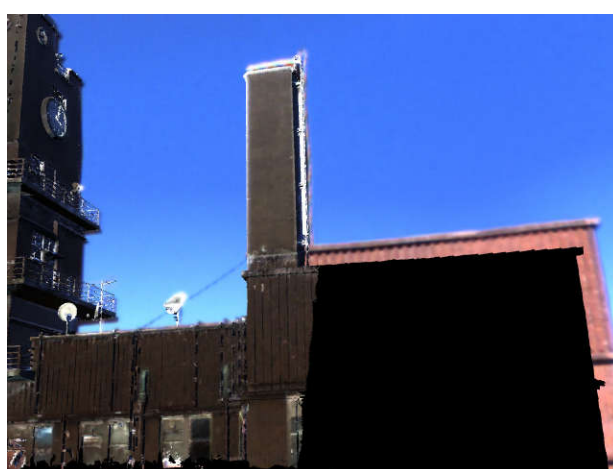
5.3.2 ローカル位置姿勢追跡

ローカル位置姿勢追跡はリアルタイムに行う必要があるので，実時間で特徴点マッチングを行う必要がある．そこで，SURF の GPGPU による実装である CUDASURF⁶を使用した．

⁶<http://www.d2.mpi-inf.mpg.de/surf>



(a) 前フレームカメラ画像との対応点探索

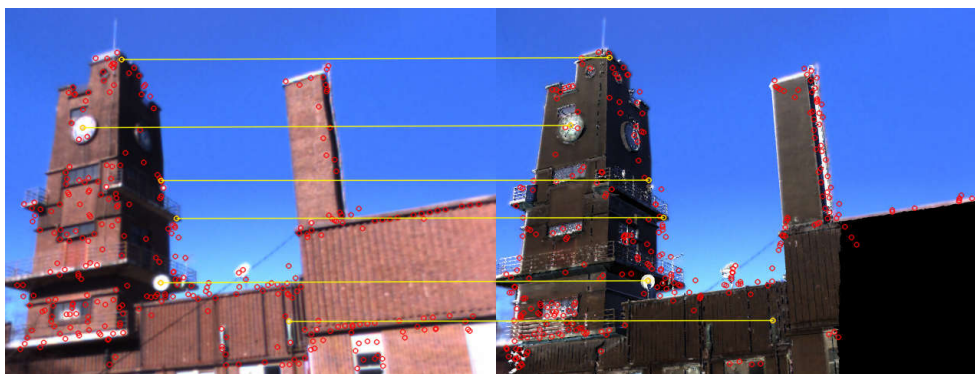


(b) 位置合わせ結果画像

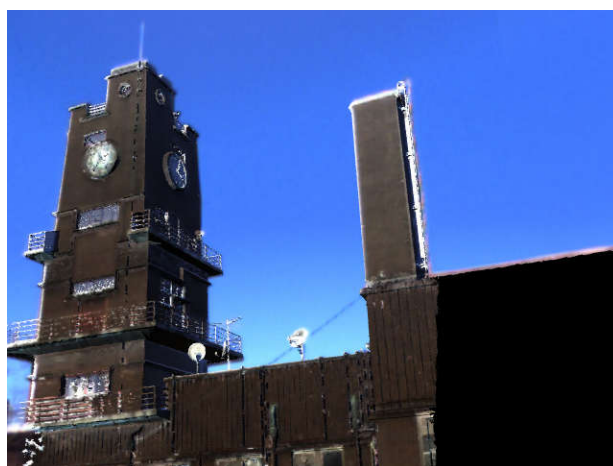
図 5.14: ローカル位置姿勢追跡の結果

表 5.3: ループ中の各ステップにおける処理時間の平均

each step	time[msec]
light environment estimation	20
appearance reproduction by simple shading	35
CUDASURF detection	30
feature-matching + RANSAC	80
feature projection	15
camera parameter estimation	10
total	190



(a) 簡易な影付けによる再現画像との対応点探索



(b) 位置合わせ結果画像

図 5.15: グローバル再位置合わせの結果

ローカル位置姿勢追跡の結果を図 5.14 に示す．現フレームのカメラ画像と前フレームのカメラ画像との対応点は十分にとれており，提案手法によるトラッキングが上手く機能している事が分かる（図 5.14(a)）．ただ，時間が経つにつれて誤差が溜まり，少しずつずれが生じてしまうことがある（図 5.14(b)）．しかし，簡易な影付けによる再現画像との対応点探索が上手く行った場合には，図 5.15 のようにグローバル再位置合わせが行われ，誤差の蓄積を防ぐことができる．前フレームカメラ画像との対応点探索を失敗することはなく，ローカル位置姿勢追跡の位置合わせ成功率は 100% であった．表 5.3 に各ステップの処理時間を示す．ローカル位置姿勢推定は約 5fps で動作しているが，これはリアルタイムであるとはいえず，MR を実現するためには不十分である．再現画像生成，特徴点検出，特徴点マッチングの効率化を行う必要がある．

5.4 まとめ

屋外光源環境推定において太陽光・天空光モデルを利用した3.4節の手法を用いることによって、通常のHDR画像を用いた従来手法ではサチュレーションを起こしてしまう太陽光付近の輝度を推定することができていることを確認した。また、推定した光源環境を元に形状モデルを陰影付けした結果、より実物体に近い陰影が表現できていることを示した。さらに、この光源推定手法を含めた実世界環境モデル化を利用した第4章の再現画像生成及び位置合わせ手法を用いることで、光源環境に頑健な特徴点マッチング及び位置合わせが実現できていることを確認した。従来手法と比較して、特徴点マッチングは0点から数十点と位置合わせを行うのに十分な数が得られ、グローバル初期位置合わせの成功率は4%から89%にまで向上した。位置合わせ精度を示す平均再投影誤差は2.5ピクセルと非常に小さく、精度の良い位置合わせが実現できていることを確認した。

第6章

結論

6.1 本研究の成果

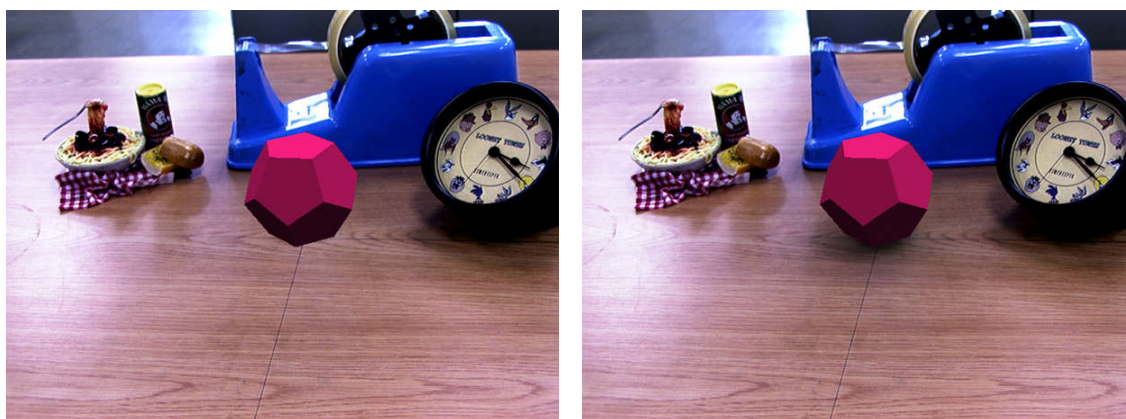
本論文では，光源環境が常に変化する屋外環境でも頑健に動作する位置合わせ手法を提案した．実物体の3次元形状，アルベド値，光源環境を持つ実世界環境モデルから現在の見えを再現することによって，光源環境変化に頑健な特徴点マッチングを実現した．これにより，照明変化が大きい屋外環境においても頑健なグローバル位置合わせが可能となった．結果，光源環境が大きく異なる場合，従来手法ではグローバル位置合わせ成功率が4%だったものが提案手法では89%にまで向上した．

また，本手法では密な形状モデル上に，前フレームのカメラ画像特徴点をリアルタイムに投影して3次元特徴点マップを作成することで，頑健なローカル位置姿勢追跡を実現した．ローカル位置姿勢追跡中も，簡易な陰影付けにより，グローバル位置合わせと同様に再現画像を生成することで，グローバル再位置合わせを行い，誤差の蓄積を防ぐことができる．

6.2 今後の課題及び展望

解決すべき課題，今後の展望について述べる．まず，様々な光源環境におけるデータを取得し，どのような光源環境でも頑健に動作するかをさらに評価する必要がある．また，実際のMRアプリケーションに実装し，評価することも必要である．

ローカル位置姿勢追跡においてグローバル再位置合わせを行うために，計算コストの問題上簡易な影付けを行っているが，もちろんレイトレーシング法やラジオシティ法で再現画像を生成した方が精度は良い．近年では，計算機の発達によりリアルタイムレイトレーシング・ラジオシティを行うことができるため，これらを組み込むことでより頑健な位置合わせが可能になると考えられる．しかし，現段階でも5fps程度であり，処理の高速化も課題である．



(a) 光学的に非整合

(b) 光学的に整合

図 6.1: 光学的整合性

本論文ではあまり触れなかったが，再現画像生成に使用した光源環境は光学的整合性（図 6.1）を満たすためにも使用することができる．しかし，現時点では太陽光・天空光モデルの値と実際のカメラ画像との光学的校正がとれておらず，カメラ感度が異なるという問題がある．これらのカメラ感度を合わせることで再現画像の再現性も高まり，光学的整合性も満たすことができると考えられる．

付録A

太陽光スペクトル

表 A.1: 太陽光スペクトル及び各係数スペクトル [27]

λ nm	S_λ $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$	$k_{o,\lambda}$ m^{-1}	$k_{g,\lambda}$	$k_{w,\lambda}$ m^{-1}
380	16559.0	-	-	-
390	16233.7	-	-	-
400	21127.5	-	-	-
410	25888.2	-	-	-
420	25829.1	-	-	-
430	24232.3	-	-	-
440	26760.5	-	-	-
450	29658.3	0.3	-	-
460	30545.4	0.6	-	-
470	30057.5	0.9	-	-
480	30663.7	1.4	-	-
490	28830.4	2.1	-	-
500	28712.1	3.0	-	-
510	27825.0	4.0	-	-
520	27100.6	4.8	-	-
530	27233.6	6.3	-	-
540	26361.3	7.5	-	-
550	25503.8	8.5	-	-
560	25060.2	10.3	-	-
570	25311.6	12.0	-	-
580	25355.9	12.0	-	-
590	25134.2	11.5	-	-
600	24631.5	12.5	-	-
610	24173.2	12.0	-	-
620	23685.3	10.5	-	-
630	23212.1	9.0	-	-
640	22827.7	7.9	-	-
650	22339.8	6.7	-	-
660	21970.2	5.7	-	-
670	21526.7	4.8	-	-
680	21097.9	3.6	-	-
690	20728.3	2.8	-	1.6
700	20240.4	2.3	-	2.4
710	19870.8	1.8	-	1.25
720	19427.2	1.4	-	100
730	19072.4	1.1	-	87
740	18628.9	1.0	-	6.1
750	18259.2	0.9	-	0.1
760	-	0.7	3.0	1e-03
770	-	0.4	0.21	1e-03
780	-	-	-	0.06

謝辞

素晴らしい研究環境を与えてくださいました池内克史教授に心より感謝いたします。海外出張等でお忙しい中、頻繁にミーティングをしていただき、本研究に対して的確なアドバイスをしてくださいました。また、研究発表練習をする機会を研究室セミナー等多く用意していただき、学内、学会発表を無事行うことができました。力不足から先生の期待に答えられない部分も多々ありましたが、先生の指導により成長することができたと感じています。

2年間の研究生生活を支えてくださいました大石岳史准教授に深く感謝いたします。研究方針や実装に関する相談、関連研究の紹介など多大なサポートをしていただき、発表資料や論文の添削も熱心にしてくださいました。また、お忙しい中にもかかわらず、国際会議に付き添っていただきました。不慣れな海外でしたが、楽しく過ごすことができました。

産業総合技術研究所の阪野貴彦さんには、研究に関する様々な質問にお答えしていただき、貴重な時間を割いて指導をしてくださいました。ご栄転された際にいただいたものはこれからも大切にに使わせていただきます。深謝いたします。

博士2年の吹上大樹さんには、研究の相談、日常の研究生生活等大変お世話になりました。2週間に渡る明日香出張も今では良い思い出となりました。大変感謝しています。

助教の影澤政隆さん、特任助教の小野晋太郎さん、特任研究員の佐藤啓宏さんをはじめ、池内研究室の職員、秘書の皆様にも大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

大学院での研究生生活を有意義なものとしてくれた研究室の同輩、後輩並びに卒業された先輩方、部活仲間、学科の友人たちにも本当に感謝しています。これからの人生においても、かけがえのない存在であることを確信しています。

最後に、大学生活だけでなくこれまでの人生を経済面、精神面で支えて続けてくれた家族には言葉では表せない感謝をしています。この家族の元に生まれて本当によかった。家族として最大限の貢献をしていくことを誓います。

2013年2月6日

稲葉 正樹

参考文献

- [1] Alaa E. Abdel-Hakim and Aly A. Farag. Csift: A sift descriptor with color invariant characteristics. In *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 2*, CVPR '06, pp. 1978–1983, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [2] Ronald T. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, August 1997.
- [3] Ronald Azuma, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier, and Blair MacIntyre. Recent advances in augmented reality. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 21, No. 6, pp. 34–47, November 2001.
- [4] Ronald Azuma, Bruce Hoff, Howard Neely III, and Ron Sarfaty. A motion-stabilized outdoor augmented reality system. In *Proceedings of IEEE VR '99*, pp. 252–259, 1999.
- [5] Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool. Speeded-up robust features (surf). *Comput. Vis. Image Underst.*, Vol. 110, No. 3, pp. 346–359, June 2008.
- [6] P.J. Besl and H.D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, feb 1992.
- [7] Gabriele Bleser and Didier Stricker. Technical section: Advanced tracking through efficient image processing and visual-inertial sensor fusion. *Comput. Graph.*, Vol. 33, No. 1, pp. 59–72, February 2009.
- [8] Brian Curless and Marc Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '96, pp. 303–312, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [9] Paul Debevec. Image-based lighting. In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, SIGGRAPH '05, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [10] Stephen Diverdi, Jason Withert, and Tobias Hillert. Envisor: Online environment map construction for mixed reality. In *In Proc. IEEE VR 2008 (10th Intl Conference on Virtual Reality)*, pp. 19–26, 2008.

- [11] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, June 1981.
- [12] Katsushi Ikeuchi, Atsushi Nakazawa, Kazuhide Hasegawa, and Takeshi Ohishi. The great buddha project: Modeling cultural heritage for vr systems through observation. In *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR '03, pp. 7–, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [13] Pierre Ineichen, Benoit Molineaux, and Richard Perez. Sky luminance data validation: Comparison of seven models with four data banks. *Solar Energy*, Vol. 52, No. 4, pp. 337–346, 1994.
- [14] M. Iqbal. An introduction to solar radiation. *Academic Press*, 1983.
- [15] T. Kakuta, T. Oishi, and K. Ikeuchi. Fast shading and shadowing of virtual objects using shadowing planes in mixed reality. *The Institute of Image Information and Television Engineers*, Vol. 62, No. 9, pp. 1466–1473, 2008.
- [16] Tetsuya Kakuta, Takeshi Oishi, and Katsushi Ikeuchi. Virtual kawaradera: Fast shadow texture for augmented reality. *Virtual Systems and MultiMedia*, pp. 141–150, 2004.
- [17] Hirokazu Kato and Mark Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality*, IWAR '99, pp. 85–, Washington, DC, USA, 1999. IEEE Computer Society.
- [18] Georg Klein and David Murray. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. In *Proc. Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07)*, Nara, Japan, November 2007.
- [19] Vincent Lepetit, Luca Vacchetti, Daniel Thalmann, Pascal Fua, and Cvlab Vrlab. Fully automated and stable registration for augmented reality applications. In *Proc. of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2003)*, pp. 93–102, 2003.
- [20] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110, November 2004.
- [21] Jorge J. Moré. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In G. A. Watson, editor, *Numerical Analysis*, pp. 105–116. Springer, Berlin, 1977.
- [22] R.A. Newcombe, S. Lovegrove, and A.J. Davison. Dtam: Dense tracking and mapping in real-time. In *Proc. of the Intl. Conf. on Computer Vision (ICCV)*, Barcelona, Spain, Vol. 1, 2011.

- [23] Takeshi Oishi, Atsushi Nakazawa, Ryusuke Sagawa, Ryo Kurazume, and Katsushi Ikeuchi. Parallel alignment of a large number of range images. In *PROC. OF THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON 3D DIGITAL IMAGING AND MODELLING, 2003*, pp. 195–202, 2003.
- [24] Sonoko Okura, Rei Kawakami, and Katsushi Ikeuchi. Simple surface reflectance estimation of diffuse outdoor object using spherical images. *Asian Conference on Computer Vision, Workshop on Multi-dimensional and Multi-view Image Processing*, 2007.
- [25] George Papagiannakis and Sebastien Schertenleib. Mixing virtual and real scenes in the site of ancient pompeii. *Journal of Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 16, pp. 11–24, 2005.
- [26] R. Perez, R. Seals, and J. Michalsky. All-weather model for sky luminance distribution - Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, Vol. 50, No. 3, pp. 235–245, March 1993.
- [27] A. J. Preetham, Peter Shirley, and Brian Smits. A practical analytic model for daylight. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '99, pp. 91–100, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [28] Gerhard Reitmayr and Tom W. Drummond. Going out: Robust tracking for outdoor augmented reality. In *Proc. ISMAR 2006*, pp. 109–118, Santa Barbara, CA, USA, October 22–25 2006. IEEE and ACM, IEEE CS.
- [29] Jun Rekimoto and Yuji Ayatsuka. Cybercode: designing augmented reality environments with visual tags. In *Proceedings of DARE 2000 on Designing augmented reality environments*, DARE '00, pp. 1–10, New York, NY, USA, 2000. ACM.
- [30] Edward Rosten and Tom Drummond. Machine learning for high-speed corner detection. In *European Conference on Computer Vision*, pp. 430–443, 2006.
- [31] Imari Sato, Yoichi Sato, and Katsushi Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5, pp. 1–12, 1999.
- [32] Gerhard Schall, Daniel Wagner, Gerhard Reitmayr, Elise Taichmann, Manfred Wieser, Dieter Schmalstieg, and Bernhard Hofmann-Wellenhof. Global pose estimation using multi-sensor fusion for outdoor augmented reality. In *Proceedings of the 2009 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, ISMAR '09, pp. 153–162, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.

- [33] Martin Schumann, Sabine Achilles, and Stefan Müller. Analysis by synthesis techniques for markerless tracking. *Virtuelle und Erweiterte Realität, 6. Workshop der GI Fachgruppe VR/AR*, 2009.
- [34] Jianbo Shi and Carlo Tomasi. Good features to track. In *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593–600, 1994.
- [35] Gilles Simon. Tracking-by-synthesis using point features and pyramidal blurring. In *Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR '11*, pp. 85–92, Washington, DC, USA, 2011. IEEE Computer Society.
- [36] Takafumi Taketomi, Tomokazu Sato, and Naokazu Yokoya. Real-time geometric registration using feature landmark database for augmented reality applications. *SPIE Electronic Imaging*, Vol. 7238, pp. 723804–723804–9, 2009.
- [37] Carlo Tomasi and Takeo Kanade. Detection and tracking of point features. Technical report, International Journal of Computer Vision, 1991.
- [38] Greg Turk and Marc Levoy. Zippered polygon meshes from range images. In *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '94*, pp. 311–318, New York, NY, USA, 1994. ACM.
- [39] Shinji Uchiyama, Kazuki Takemoto, Kiyohide Satoh, Hiroyuki Yamamoto, and Hideyuki Tamura. Mr platform: A basic body on which mixed reality applications are built. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR '02*, pp. 246–, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [40] Vassilios Vlahakis, Nikolaos Ioannidis, John Karigiannis, Manolis Tsotros, Michael Gounaris, Didier Stricker, Tim Gleue, Patrick Daehne, and Luis Almeida. Archeoguide: An augmented reality guide for archaeological sites. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 22, No. 5, pp. 52–60, 2002.
- [41] Daniel Wagner, Alessandro Mulloni, Tobias Langlotz, and Dieter Schmalstieg. Real-time panoramic mapping and tracking on mobile phones. In *Proceedings of the 2010 IEEE Virtual Reality Conference, VR '10*, pp. 211–218, Washington, DC, USA, 2010. IEEE Computer Society.
- [42] Juyang Weng, Paul Cohen, and Marc Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 14, No. 10, pp. 965–980, October 1992.
- [43] James A. Worthey and Michael H. Brill. Heuristic analysis of von kries color constancy. *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 3, No. 10, pp. 1708–1712, Oct 1986.

- [44] Harald Wuest, Folker Wientapper, and Didier Stricker. Adaptable model-based tracking using analysis-by-synthesis techniques. In *Proceedings of the 12th international conference on Computer analysis of images and patterns*, CAIP'07, pp. 20–27, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [45] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, November 2000.
- [46] 佐川立昌, 西野恒, 倉爪亮, 池内克史. 大規模観測対象のための幾何形状および光学情報統合システム. 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 44, No. 5, pp. 41–53, apr 2003.
- [47] 阪野貴彦, 池内克史. 全方位球面画像を用いた p3p 解法によるオフライン自転車位置姿勢推定. 自動車技術会論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 107–111, 2011.
- [48] 神原誠之, 横矢直和. Rtk-gps と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感 (複合現実感とパターン認識・メディア理解, 一般). 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 104, No. 572, pp. 37–42, jan 2005.
- [49] 大蔵苑子, 川上玲, 池内克史. 全周画像を用いた屋外拡散反射物体の表面反射率の推定 (テーマ関連セッション 5). 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア], Vol. 2008, No. 3, pp. 177–184, jan 2008.
- [50] 田村秀行, 大田友一. 複合現実感. 映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア, Vol. 52, No. 3, pp. 266–272, mar 1998.

発表文献

- [51] Masaki Inaba, Atsuhiko Banno, Takeshi Oishi, and Katsushi Ikeuchi. Achieving Robust Alignment for Outdoor Mixed Reality using 3D Range Data. In *Proc. 18th ACM Symp. on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '12, pp. 61–68, Toront, Ontario, Canada, December 2012.
- [52] 稲葉正樹, 阪野貴彦, 大石岳史, 池内克史. 3次元計測データを利用した屋外 MR における頑健な位置合わせ. 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU '12, aug 2012.