

領域型バーチャルタイムマシン —過去の写真の撮影位置への誘導と現在風景への重畳

仲野潤^{†1} 笠田和宏^{†1} 西村邦裕^{†2}
谷川智洋^{†1} 廣瀬通孝^{†1}

本研究では、過去の写真の撮影位置を現地において探索し、ユーザをその地点に誘導し、現在風景への重畳を行うことによって、過去の様子を体験することを目的としたシステムの構築を行った。本論文中で、現在の風景を撮影した画像から3次元再構成を行い、ポイントクラウドを生成したうえで、過去の写真上の点とポイントクラウドを対応付けることで、過去の写真のカメラパラメータを復元し、撮影位置を推定する手法を示した。また、自然特徴点を用いたマーカレスAR技術を用い、現在風景に対しリアルタイムでの過去の写真の重畳を行い、カメラの動きに追従するロバストな重畳が行えることを示した。

On-site Virtual Time Machine – Navigation to Past Camera Position and Past Picture Superimpose on Present Landscape

JUNICHI NAKANO,^{†1} KAZUHIRO KASADA,^{†1}
KUNIHITO NISHIMURA,^{†2} TOMOHIRO TANIKAWA^{†1}
and MICHITAKA HIROSE^{†1}

In our research, we developed a system aim to provide experience of past scenery depicted in past photograph at the place where it was taken. To provide it, the system estimates camera position of past photograph, navigates a user to the place and displays it superimposed on present landscape. Point cloud are generated from present landscape, and estimation of camera parameter of past photograph is obtained by registration of past photograph to point cloud. We employ markerless AR method to superimpose past photograph on present landscape robustly in real-time.

1. はじめに

何らかの過去の写真を見る際に、その写真が撮影された現地に赴いて見ることで、より味わい深く写真を見ることができた、という経験はそれほど珍しいことではない。ただ写真を眺めているだけでは見落としがちな情報が、現地で実物と比較することで読み取れたり、実物を目の前にすることで過去の世界に感情移入できたりと、現地に行って体感するということは写真に込められている情報を深く読むことができる、意味のある行為である。

実際に、現地において過去の様子を提示するシステムとして、“Museum of London”¹⁾ という iPhone アプリケーションがあげられる。これは、現地において GPS による位置情報をもとに、適切な過去の写真を選択し提示することで、現在の風景と過去の風景を簡単に比較することができるアプリケーションであり、多くのユーザの評価も高い。こういったことから、過去の写真を現地において見ることの有意義さが分かる。

これに通じる写真の表現として、リフトグラフィと呼ばれる、過去の写真と同じアングルで現在を撮影するものがある。何が今と違って何が同じかということをかなり細かいところまで把握できるので、単に今の様子の写真と昔の様子を写した写真を2枚横に並べて見るより、細かい違いに気が付きやすくなり、それだけ想像もふくらみ、写真に写っているものへの理解が深まるわけである。似たようなものに VR 技術を用いて現在と過去を接続したシステムがあり、青木らのシステム²⁾ にみられるように、こういったシステムは、過去のコンテンツを用いた一種のバーチャルなタイムマシンとしてとらえることができると考えられる。

過去の写真を現地において簡単に現在の風景と重ね合わせて見るような、領域型のバーチャルタイムマシンシステムが実現すれば、過去の写真と現在の風景を一目で見比べることができるので、目の前に広がっている光景と過去の様子が直感的につながり、過去を深く知る強い手がかりとなるといえる。このようなことを簡単に実現できるシステムを構築することは、今日大量に蓄積されている過去の写真の価値を高めることにつながり、この情報爆発時代において、画像情報の新たな利用可能性を提案するという意味で意義深いといえよう。

^{†1} 東京大学大学院情報理工学系研究科

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{†2} 東京大学先端科学技術研究センター

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

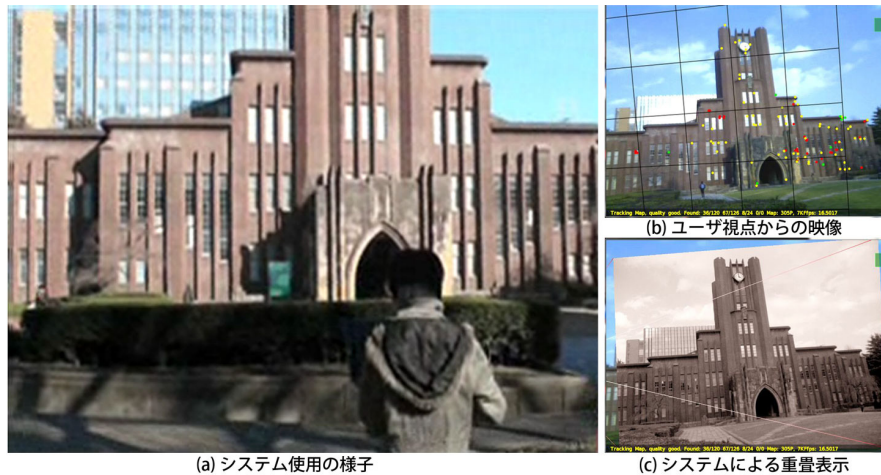


図 1 本提案システムの利用の様子．図中 (a) に示すように，ユーザは過去の写真が撮影された現地において，図中 (b)，(c) のように，現在の風景の上に過去の写真を重畳したものを切り替えながら見ることができ，過去の様子を没入的に理解することができる

Fig.1 Concept picture of this research. (a) A user is navigated to the place where the past photograph was taken, (b), (c) and he can watch the past photograph superimposed on present landscape, so he can understand past situation easily.

そこで，本研究では，

- (1) 過去の写真の撮影位置の探索と誘導
- (2) 現在の風景画像に対するリアルタイムでの重畳

を実現するシステムを構築し，そのような行為を簡単に行えるようにすることを目的とした (図 1)．

2. 関連研究

本章では，提案手法の関連研究として，従来提案されている，まず，写真のカメラパラメータの推定手法について説明する．

単一の過去の写真から，その写真の撮影位置を推定する手法としては，Kasada らの研究があげられる³⁾．Kasada らは，過去の写真の撮影された位置を，写真に撮影されている現地において探し，過去の写真と重なる現在の写真を再撮影する手法を構築した．この手法でははじめに，過去の写真と Web カメラから取得される現在の風景の画像の間に，過去から

現在において変化のない対象を探し，その対象上の点に対し，手動で画面上で 3 点の対応付けを行う．この 3 点には，なす角が直角にならないという制約条件がある．その後，3 点の画像上の位置関係が同一となるように，前後左右移動と回転のナビゲーションがユーザに指示され，それに従うことで過去の写真と重ね合わせられる現在の写真が撮影可能な位置に誘導される．ユーザが移動し，Web カメラから取得される現在の風景画像が変化の際，指定された 3 点はオプティカルフローを用いた追跡が行われ，ナビゲーションの方向，距離などが逐次計算されるため，ユーザは連続的なナビゲーションを受けられる．ナビゲーションが終了すると，最終的に，ユーザは指定した 3 点が過去の写真とちょうど重なるような現在の写真を撮影することができる．この手法の問題としては，この手法は連続的なナビゲーションを行うこと，指定した 3 点が過去の写真と同一の位置に重なる現在の写真を撮影することを目的にしているために，必ずしも過去の写真を撮影した位置と同じ位置に誘導がなされるわけではなく，たとえば過去の写真の撮影時のレンズの焦点距離と現在使用しているカメラのレンズの焦点距離が違った場合に，過去と現在で異なったパースを持つ写真が撮影される結果となってしまふといったことがある．

一方で，3 次元ジオメトリを大量の画像からなるべく正確に矛盾なく再現しようとする試みとして，Snavely らの研究があげられる⁴⁾．Snavely らは，大量のインターネット上の写真を用い，カメラパラメータの復元，ポイントクラウドによる 3 次元再構成を行う Structure From Motion 法 (以下，SFM 法) の一種を提案した．この手法では，大量の画像間の対応付けを SIFT 特徴量⁵⁾ を用いて行い，それぞれの画像が矛盾なく，画像上の点とポイントクラウドの投影誤差が最も小さくなるようにカメラパラメータを推定する Bundle Adjustment を行うことで高精度なカメラパラメータの復元，ポイントクラウドの生成を全自動で行っている．

Bae らは，SFM 法を応用し，推定された現在の空間の 3 次元ジオメトリを用いて過去の写真の撮影位置を推定し，ユーザを誘導する手法を提案した⁶⁾．この手法は，SFM 法を用いて，あらかじめ自動で現在の空間の 3 次元ジオメトリを推定しておき，現在の写真と過去の写真の対応付けをユーザが入力すると，3 次元ジオメトリと過去の写真の対応付けを行い，過去の写真のカメラパラメータを復元し，撮影位置を推定する．その後，オプティカルフローを用いた軽量なカメラ位置・姿勢推定と，SIFT 特徴量を利用したロバストなカメラ位置・姿勢推定を組み合わせた誘導をユーザに提示することで，リアルタイムでかつ精度の高い過去の写真位置の推定を実現している．

次に，実写画像に対するリアルタイムのコンテンツの重畳手法について説明する．

入力されたカメラ画像内の何らかの物体に対し，リアルタイムにコンテンツを位置合わせ

し、重畳する手法は、複合現実感の分野で広く研究されている⁷⁾。カメラの位置姿勢のリアルタイム推定による単純な重畳だけではなく、画像に対して安定にコンテンツの重畳を行い、複合現実感体験の質を高めるための手法についても議論が行われている⁸⁾。

高精度でロバストなコンテンツの重畳を行うために、カメラから得られる画像のみではなく、ジャイロなどのセンサを組み合わせる手法なども提案されている⁹⁾。しかし、このような特殊なセンサを用いると、精度やロバスト性については向上が見られる一方で、一般的な環境での利用が難しくなるため、広く利用されることを目的とするシステムを構築するためには、カメラから得られる画像のみを用いてコンテンツ重畳を行えるような手法を利用する必要がある。

計算機負荷の少ない AR の手法として、ARToolKit¹⁰⁾ などのライブラリが充実したこともあり、画像のみから、比較的安定して AR マーカを用いた重畳が容易に実現できるようになり、スマートフォンや携帯ゲーム機などのモバイル環境で広く用いられるようになってきた。モバイル環境での重畳を行う場合、計算機資源に大きな制約があることが多いため、このようなマーカを利用する AR 手法が利用されることが多い。

しかし、重畳を行いたい空間に AR マーカを配置し、それに合わせてコンテンツをあらかじめ構築しておくことにより現実空間にコンテンツを重畳することは、イベントなどの限られた場合にしか用いることができない。また、AR マーカは画像処理のアルゴリズムで容易に認識可能なことを要求するため、AR マーカを配置することによって景観が損なわれ、不自然になってしまうといった問題もある。

そのため近年では、AR マーカを用いず、自然特徴点を用いて重畳を行えるマーカレス AR の手法の研究がさかんである¹¹⁾。Klein らは、自然特徴点を用い、モバイル環境でリアルタイムに動作可能な画像ベースの SLAM を行うことで、ロバストな重畳を実現する手法、Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspace (PTAM) を開発した¹²⁾。PTAM は、高価なステレオカメラ、距離カメラなどを必要とせず、また特別にマーカなどを必要としない AR システムで、コンピュータビジョン分野の単眼 VisualSLAM の手法を用いている。比較的軽量の特徴点検出手法として FAST¹³⁾ を用い、1 つのカメラの入力画像から、特徴点のトラッキングをリアルタイムで行い、カメラ位置・姿勢の推定を行う。並行して新規の特徴点の追加、3 次元特徴点マップの最適化を行うことで、一般に販売されているノート PC 程度の性能のコンピュータを用いて、自然特徴点を用いてカメラの移動に対してロバストなリアルタイムのカメラ位置・姿勢推定を実現しており、マーカレス AR に適したロバストな重畳が可能となった。

3. 提案システムの概要

前章で取り上げた、過去に対応する現在の風景写真を撮影するための手法と、AR による実空間上にコンテンツを提示する手法を組み合わせれば、現在の風景の上に、過去の写真を浮かび上がらせることができると考えられる。これにより、過去の写真と現在の風景の関係性をユーザに強く訴え、現在と過去の写真の間のつながりを直感的に理解する手助けができるだろう。このような形で過去の写真の利用可能性を高めることに着目したのが本提案システムである。

過去の写真の風景と現在の風景を画面上で比較する際には、時間が経ち変化したものと変化していないものを詳細に比較するのであるから、過去の風景と現在の風景が正しく重なるようにすることが重要である。そのためには、過去の写真の撮影位置などのカメラパラメータをある程度正確に求める必要がある。しかし、たいていの過去の写真は撮影位置だけでなく、撮影時のレンズの焦点距離やトリミングの有無などすら不明なことが多い。そのため、単純な 8 点法などのアルゴリズムでは現在の風景と過去の写真の相対的なカメラパラメータの違いを精度良く求めることができない。そこで、ある程度正確に 3 次元再構成が行われたポイントクラウドに対し、過去の写真上の点を複数対応付け、これらの点の対応付けと最も矛盾の少ない、過去の写真の焦点距離、主点、撮影位置、姿勢などのカメラパラメータを非線形最適化アルゴリズムを用いて求めることにした。この場合、ポイントクラウドのそれぞれの点の位置の精度が低いと、過去の写真のカメラパラメータの推定の精度に直接の悪影響を及ぼす。また、入力画像は主に屋外であることが想定され、ロバストな 3 次元再構成手法を用いる必要がある。そのため、屋外で撮影された画像を用いることを前提とし、ロバストな特徴量である SIFT 特徴量を用い、大量画像において画像間のカメラパラメータの矛盾が少なくなるように特徴点の同定を行うなどの利点を持つ SFM 法である、Snavely らによる Bundler¹⁴⁾ を用いた過去の写真の撮影位置の探索と誘導手法を構築した。

過去の写真に正しく重なる現在の風景写真を撮影することが目的であるならば、上記のような SFM 法を用いることでその目的が達成できる。計算量が多く、リアルタイムの処理には適さない SFM 法をそのまま重畳のアルゴリズムに用いることはできない。リアルタイム重畳を行うためには、AR システムを用いることが考えられるが、本研究では、屋外で用いることのできるような、軽量でロバストなマーカレス AR システムを用いる必要がある。PTAM はそのような特徴を持っており、また、内部的には複数枚のキーフレーム画像とそのカメラパラメータのデータベースを持っており、これによりリアルタイムかつロバストな

特徴点の同定を実現している．そのため，前述の SFM 法に用いた入力画像と推定されたカメラパラメータを用いて重畳を行うことに対しての親和性が高い．このことから，PTAM を用いて，現在の風景画像に対するリアルタイムでの重畳を行うこととした．

図 2 に，システムの動作のフローチャートを示す．

過去の写真の撮影位置の探索と誘導は，複数枚の画像からの 3 次元再構成によるカメラパラメータの復元と，ポイントクラウドの生成をすることで実現している．まず，(1) 対象となる現地空間の現在の風景をカメラで複数枚撮影し，SFM 法を行うことで，撮影した際

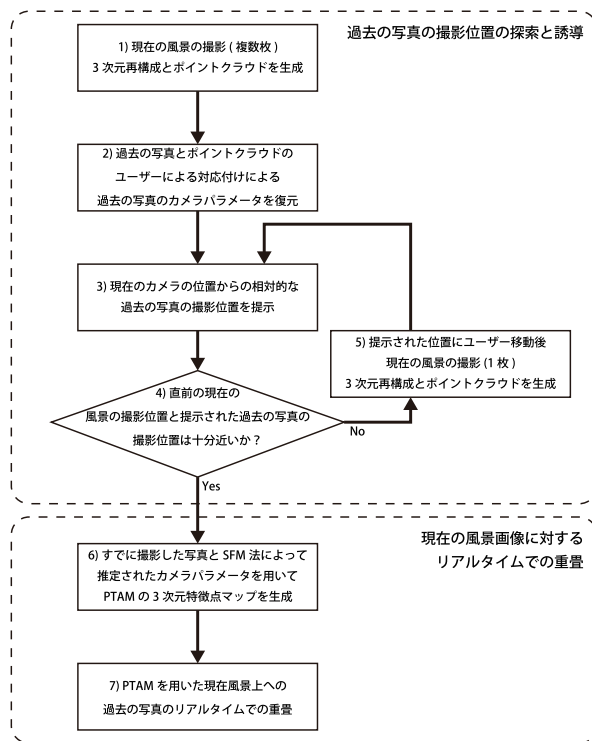


図 2 本提案システムの動作概要．過去の写真の撮影位置へユーザを誘導した後，現在風景へのリアルタイム重畳を行う

Fig. 2 Overview flowchart of this system. After navigating a user to the location of the past photograph, the past photograph is superimposed on present landscape.

のカメラパラメータを推定し，画像中の自然特徴点の 3 次元位置を推定し，ポイントクラウドを生成する．次に，(2) 生成されたポイントクラウドと過去の写真上の点の対応付けをユーザが行うことで，過去の写真の撮影位置，画角などのカメラパラメータについて推定を行う．(3) 現在の風景を撮影した際のカメラ位置と過去の写真のカメラ位置の相対的な関係から，ユーザに対し過去の写真の撮影位置の方向を提示し，写真の撮影位置への誘導を行う．(4) ユーザは，提示された過去の写真の撮影位置が直前の現在の風景の撮影位置に十分近いかどうかを判断し，(5) そうでなければ提示された位置に移動し，新たに写真を撮影する．その写真を加えて再度 SFM 法を行うことで，新たに撮影された写真のカメラパラメータ推定を行う．ユーザが過去の写真の撮影位置に十分近い位置で写真を撮影したと判断するまで，(3) から (5) を繰り返す．

現在の風景画像に対するリアルタイムでの重畳は，マーカレス AR システムである PTAM を，過去の写真の撮影位置の探索と誘導の際に得られた，現在の風景の 3 次元再構成や過去の写真のパラメータ推定の結果を用いて動作させることで実現している．(6) PTAM を利用するには 3 次元特徴点マップの生成が必要であるが，これを (1)，(5) で得られた，撮影した現在の風景の写真をキーフレームとし，SFM 法によって推定されたカメラパラメータを用いて行うことで，PTAM の 3 次元特徴点マップの座標系と現在の空間の対応を，(1)，(5) で得られた SFM 法で用いているマップの座標系と現在空間の対応とほぼ同一にすることができる．(7) これにより，(2) で得られた過去の写真のカメラパラメータを用いて，PTAM 上で現在の風景に対して過去の写真を重畳することが可能となる．

4. 過去の写真の撮影位置の探索

本章では，過去の写真の撮影位置を推定し，ユーザを誘導するための手法について説明する．過去の撮影位置にユーザを誘導するためには，位置と姿勢といった，過去の写真の外部カメラパラメータを知る必要があるが，一般的に，過去の写真にはメタデータがなく，外部カメラパラメータに加え，焦点距離や主点などの内部カメラパラメータについてもいっさい不明なため，それらを何らかの方法で推定する必要がある．そのため，本研究では，

- (1) 現在の空間に対して疎な 3 次元再構成を行う，
- (2) 3 次元再構成された現在の空間のポイントクラウドと過去の写真の間に対応付けを行い，過去の写真のカメラパラメータを復元する，
- (3) 過去の写真のカメラパラメータと現在のカメラパラメータとの相対的な位置関係を計算し，ユーザの誘導を行う，

という手順を用いて過去の写真の撮影位置の推定と誘導を行う。

4.1 現在の空間の疎な3次元再構成

まず、現在の風景の画像を複数の位置から複数枚撮影を行う（これを初期撮影画像群と名付ける）。初期撮影画像群に対し、SFM法を適用することで、現在の風景画像中の特徴点の3次元座標が復元され、初期撮影画像群のそれぞれの画像に対し、カメラパラメータが推定される。

初期撮影画像群を撮影する際、過去の写真との対応付けを行うことを目的としているため、過去の写真に写っており、現在にも残っているような対象を選び、写真のフレーム内に収まるようにして撮影する。また、初期撮影画像群は、対象物の立体形状が十分再現されるよう、視差が発生するような2カ所以上から撮影を行う必要がある。

このようにして準備された複数枚の画像をもとに、SFM法を適用する。本研究では、SFM法の実装として、Bundlerを用いた。SFM法を適用する際、現在の写真を撮影したカメラの内部カメラパラメータのうち、焦点距離についてはあらかじめ測定しておき、事前パラメータとして与えている。初期撮影画像群を撮影するカメラは、最終的に現在の風景上に重畳を行う際に風景画像をリアルタイム取得するためのカメラであり、あらかじめカメラの内部カメラパラメータのキャリブレーションが行われていることが前提であるため、焦点距離は内部カメラパラメータから容易に計算することができる。また、SFM法を適用する際、焦点距離が既知である場合はそうでない場合に比べてカメラの位置や姿勢についての制約が少なくなり¹⁵⁾、結果が安定化しやすいため、焦点距離についてはあらかじめ与えている。

4.2 現在の空間と過去の写真の間の対応付けによる、過去の写真のカメラパラメータの推定

次に、過去の写真を現在空間に対応付けるために、SFM法によって推定された、3次元座標の分かっているポイントクラウドと、過去の写真上の点を対応付け、過去の写真を撮影した際のカメラパラメータを求める。過去の風景と現在の風景が大きく異なっていなければ、過去の写真と現在の写真上の点の対応付けはSIFT特徴量などを用いることで自動的にすることも考えられる。だが、本研究の目的を考えると、過去の風景と現在の風景が大きく変化しているような状況においても利用可能でなければならず、劣化による画質の低下、周囲の建物の建て替えといったことによる大きな変化も許容する必要がある。そういった違いのある画像間の対応付けを自動化することは一般的に難しい。そのため、ユーザに手動で対応付けを行わせるようにした。

対応付けをユーザに行わせるインタフェースとして、図4に示すようなものを用意した。

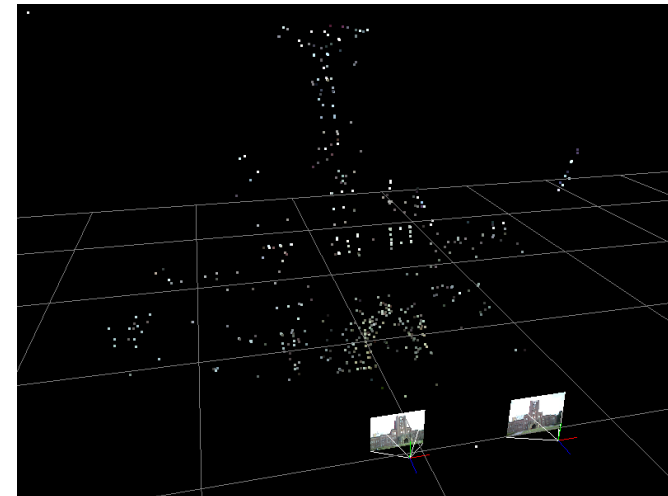


図3 現在の風景を撮影した画像にSFM法を適用し、外部カメラパラメータの推定、ポイントクラウドの生成を行った様子

Fig.3 SFM method applied to pictures of present landscape, extrinsic camera parameters and point clouds are estimated.

初期撮影画像群2枚の上に、SFM法で得られたポイントクラウドを黄色の点によって描画したもの（図4下半分の2枚の画像）、過去の写真をそのまま描画したもの（図4上半分の画像）をそれぞれ表示している。SFM法でポイントクラウドを生成する際に、初期撮影画像群中の特徴点の同定に失敗し、間違った点の座標が与えられている可能性を考慮し、初期撮影画像群2枚を表示し、ユーザが選択した点がどれかを両方に表示することで、正しく特徴点の同定が行われ、ポイントクラウドの生成が行えている点かを確認しながら過去の写真との対応付けを行えるようにしている。仮に特徴点の同定が間違っており、異常な座標値を持った点と過去の写真を対応付けてしまうと、その誤った座標値を持つ点との対応にかく乱され、過去の写真のカメラパラメータ推定が本来のものより大きく外れてしまう恐れがある。そういった問題を避けるため、このような設計とした。

現在の写真上のポイントクラウドの点と過去の写真上の点の対応は8つ以上とした。

この対応付けからの、過去の写真のカメラパラメータの具体的な算出方法について説明を行う。

ワールド座標系での3次元座標 $x = (x, y, z)$ と、カメラ座標系での3次元座標 $p =$

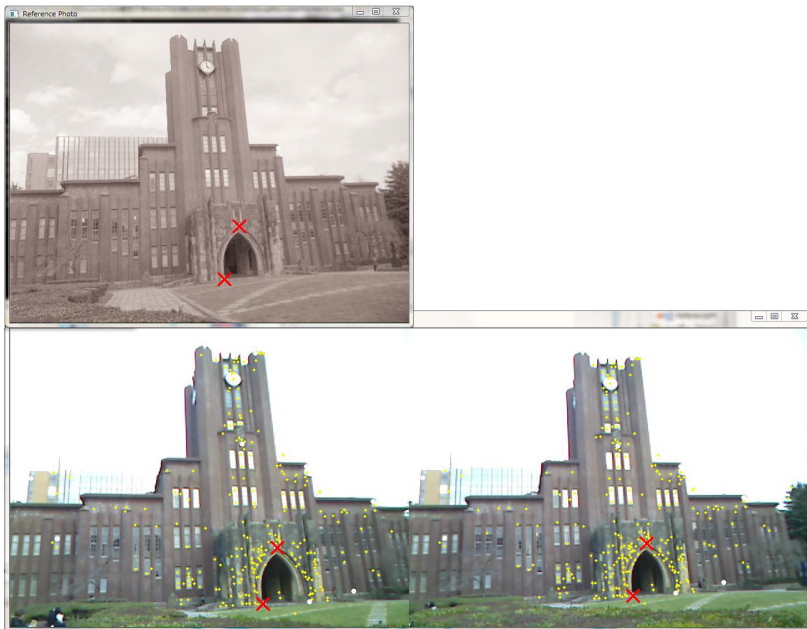


図4 過去の写真と現在の写真から生成したポイントクラウド間の対応付け用インターフェース。ポイントクラウドと過去の写真の点について2組の対応を指定したところで、赤色の×印が対応付けた点を示している
Fig.4 Interface for homologization between the past photograph and point cloud generated from pictures of present landscape. 2 homologization is entered, red X mark is homologized points.

(p_x, p_y, p_z) の間の変換を、次に示す式によって行うとする。

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{R} はカメラの回転を表す回転行列であり、 \mathbf{t} はカメラの並進を表すベクトルである。

カメラ座標系の3次元座標 \mathbf{p} から画像上の2次元同次座標 $\mathbf{p}'' = (p''_x, p''_y, 1)$ への変換は以下ようになる。

$$\mathbf{p}' = \begin{pmatrix} p_x/p_z \\ p_y/p_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{p}'' = \mathbf{A}\mathbf{p}' \quad (3)$$

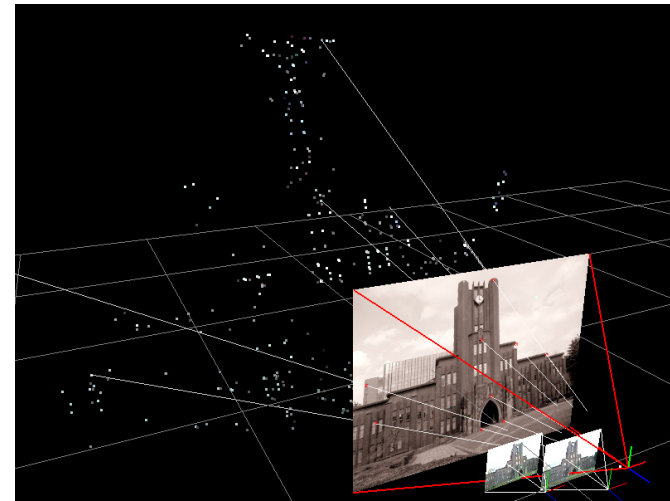


図5 ポイントクラウドと、過去の写真上の点の対応から、過去の写真のカメラパラメータが求まっている様子
Fig.5 A camera parameter of the past photograph is estimated from homologization between the past photograph and point cloud.

ここで、 \mathbf{A} は、焦点距離、主点の位置などの内部カメラパラメータを表す行列で、 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} W/f & 0 & u_0 \\ 0 & H/f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ とする。

SFM法によって、ポイントクラウドの各点に対し、ワールド座標系での3次元座標値 \mathbf{x} が復元されている。

ユーザが指定したポイントクラウドの点の座標 \mathbf{x}_i を過去の写真のカメラパラメータを用いて過去の写真上に再投影した座標を $\mathbf{p}''_{\text{past}_i}$ 、ユーザが過去の写真上に指定した座標を \mathbf{p}''_{U_i} とすると、再投影誤差の二乗和 r は、

$$r = \sum_i (\mathbf{p}''_{U_i} - \mathbf{p}''_{\text{past}_i})^2 \quad (4)$$

と表せる。この r を最小化するような外部カメラパラメータ $\mathbf{R}_{\text{past}}, \mathbf{t}_{\text{past}}$ 、内部パラメータ \mathbf{A}_{past} を Levenberg-Marquardt 法によって求めることで、過去の写真のカメラパラメータを推定する。カメラパラメータの初期値として、回転行列 \mathbf{R}_{past} は単位行列、並進ベクトル

t_{past} は 0, 主点は画像中心, 焦点距離は 500 ピクセルとなるようにした.

4.3 過去の写真のカメラパラメータと現在のカメラパラメータからのユーザへの誘導提示
SFM 法によって, 現在空間を撮影したカメラの外部カメラパラメータ R や t も推定されているが, 最後に現在空間を撮影した際のカメラ位置からユーザは動いていないと仮定し, 過去の写真を撮影したカメラ位置までの相対的な移動の誘導を行う.

そのためのインタフェースとして, 図 6 に示されるようなものを用意した. SFM 法に

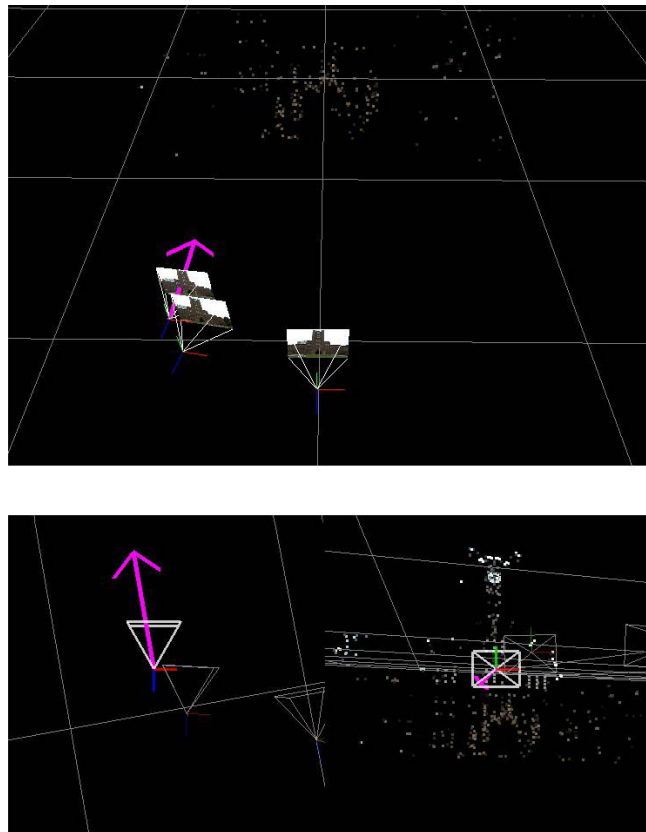


図 6 過去の写真の撮影位置への移動の提示

Fig. 6 Presentation of translation for the position where the past photograph was taken.

よって得られるパラメータは, 原理上絶対的な距離のスケールの自由度を消去できないために, 過去の写真を撮影したカメラ位置までの相対的な移動について, 方向は提示できるものの, 具体的な距離を提示することはできない. そこで, 現実の空間との対応をユーザに把握してもらいやすくするために, 初期撮影画像群を含め, 現在空間を撮影したカメラすべての, SFM 法によって推定されたカメラ位置 (図 6 中四角錐), 現在空間のポイントクラウド, また, 最後に撮影したカメラ位置から過去の写真のカメラ位置までの方向, 距離を矢印 (図 6 中紫色矢印) で可視化した表示を行った. これは, 過去の写真を撮影したカメラ位置までの移動の誘導方向や距離が, ユーザがすでに撮影したカメラの位置関係やポイントクラウドとの視覚的な対比によって把握されうことを狙ったことである. 実際の表示には, 自由に視点を変更でき, 全体を見渡すことのできる鳥瞰的な表示 (図 6 上図), カメラの現在向いている方向を真上とした地図的な進行方向の表示 (図 6 下図左側部分), カメラの上下左右移動を示す一人称的な視点からの表示 (図 6 下図右側部分) を用意した.

ユーザは, この矢印表示に従い移動し, 新たに現在空間を撮影する. それまでに撮影した現在空間の写真に加え, 新たに撮影した写真も含めて SFM 法を再度適用する. これにより, ポイントクラウドがより正確に復元され, また, 新たな方向・距離の提示を得る. これを繰り返すと, 過去の写真の撮影位置に漸近的に近づいていくので, ユーザは可視化表示から, 移動距離が十分に小さくなったと感じたら, ナビゲーションを終了する.

5. 現在風景へのリアルタイム重畳

本章では, 現在風景への過去の写真のリアルタイム重畳をするための手法について説明する.

前章までで, 過去の写真を撮影した際のカメラ位置にほぼ近い地点にユーザは移動しているはずなので, その地点で現在の空間の画像を撮影すれば, 過去の写真と重ね合わせて比較することが可能である. 本研究では, よりインタラクティブで直感的な比較を目的とし, 現在の画像を撮影し, 過去の写真と重ね合わせて比較するのではなく, 現在風景の画像に対してのリアルタイムでの過去の写真の重畳を行う.

現在画像に対し, フレームごとにカメラ位置・姿勢を推定して過去の写真の重畳を行う必要があるため, モバイル環境で利用可能なマーカレス AR システムとして PTAM を採用した.

PTAM では, マップ中の特徴点とカメラから取得される画像から検出される特徴点との同定を行うことでリアルタイムのカメラの位置・姿勢推定を実現しており, 動作前に対象空間に合わせたマップの初期化を必要とする. PTAM 本来のマップ初期化は, 1 枚画像を撮

影後、カメラをゆっくりと移動させ、2枚目の画像を撮影し、画像間の特徴点対応からのポイントクラウドの3次元再構成を行う、という方法を用いているが、この手法では初期化時の操作を毎回一定に保つのは不可能であり、初期化ごとにマップが異なったものになってしまい、本研究で目指すような、特定のコンテンツを特定の位置に配置するような重畳が難しくなる。そのため、新たに、前章で撮影した現在の画像からのSFM法の結果を用いてマップを生成する仕組みを実装した。

PTAM本来のマップ初期化の方法では、2枚の画像の特徴点対応から、まず、5-point algorithmで2枚の画像の相対的なカメラ位置・姿勢の変化を推定し、次に、特徴点の3次元座標を三角測量の手法で求めている。SFM法を適用したことで、前章で撮影した現在の画像について、それぞれの画像のカメラパラメータは推定されているため、改めてこれを推定する必要はない。そのため、画像中の特徴点に対し三角測量を行うだけで、前章の撮影結果、SFM法によるカメラパラメータの推定結果を用いてマップを生成することができる。

本研究で用いたSFM法であるBundlerでは特徴点検出法としてSIFTを用いており、SIFT特徴量を用いて特徴点の同定を行っている。一方PTAMでは特徴点検出法としてFASTを用いており、特徴点の同定には 8×8 程度の画像によるテンプレートマッチングを行っている。そのため、前章でSFM法に入力した現在風景の撮影画像をキーフレームとし、それらのカメラパラメータはSFM法で求められたものとして、改めてFASTを用いて特徴点検出を行い、テンプレートマッチングによる同定、三角測量を行うことで、ポイントクラウドを改めて生成し、SFM法によって生成されたマップ座標系と同等の座標系を持ったマップを生成することができる。マップの生成が行えれば、4.2節で推定した過去の写真のカメラパラメータを用いて写真を重畳することができる。重畳を行う際に、写真の平面の奥行きに関しては、対象物のあたりに写真が配置されるようにするために、ユーザが対応付けを行った際に選択したポイントクラウド中の点に対し、平面との距離の二乗和が最小となるようなものを用いている。

また、最終的にユーザに現在風景に重畳された過去の写真を提示する際に、ユーザに現在風景に対する過去の写真の位置の微調整を画面上で行ってもらうことで、より正しく過去の写真が現在の風景に重なるようにし、重畳の効果を高められるようにしている。

6. 実験

提案手法による過去の写真の撮影位置推定、現在風景に対する重畳の有効性を示すために、屋外環境において、過去に撮影された写真のカメラパラメータを推定し、その撮影位置

にユーザを誘導し、現在の風景に対しリアルタイムの重畳を行った。なお、本実験はCore i7 M640 (2.8 GHz) のノートPCを用いて行った。

6.1 過去の写真の撮影位置の探索

本実験ではまず、市販のWebカメラ(Logicool HD Pro Webcam C910)を用い、場所を変えて対象となる建物を2枚撮影した。これを現在の初期登録画像群と呼ぶことにする。建物との距離はおおよそ20m、1枚目と2枚目の撮影の間隔は2mほどであった。あらかじめこのWebカメラはPTAMに付属のカメラのキャリブレーションツールでキャリブレーションされており、焦点距離、主点位置などが分かっている。次に、現在の初期登録画像群に対しSFM法を適用し、画像中から検出された特徴点によるポイントクラウドと、現在の初期登録画像群のカメラパラメータを復元した。図3は、実際の復元の様子である。

次に、得られたポイントクラウドと、過去の写真の対応付けを入力した。本実験では11点の対応付けを行った。図4は、実際の対応付けの様子である。この対応付けをもとに、過去の写真のカメラパラメータを推定した。図5はカメラパラメータが推定された過去のカメラのポイントクラウドとの対応を示している。

過去の写真の撮影位置が推定されたため、本提案手法によって示される、最後に撮影したカメラからの過去の写真の撮影位置の相対的な方向指示をもとに、過去の写真の撮影位置方向に移動し、画像を撮影した。その後、現在の初期登録画像群に加えて新たに撮影した画像を加え、SFM法を再度実行する、ということを繰り返すことで、過去の写真の撮影位置に漸近的に近づくことができた。

SFM法によって推定した、現在の画像の撮影位置の変化を図7に示す。実際に、ユーザが漸的に推定された過去の写真の撮影位置に近づいていることが分かる。

写真を撮影してからシステムが誘導方向の指示を出すまでに毎回おおよそ8秒を要しており、内訳は写真からSIFT特徴点を抽出するのに3秒、特徴点の同定を行うのに3秒、Bundle Adjustmentを行うのに2秒となっている。

最終的に、初期登録画像群の撮影から、最終的に誘導を終了するまでの時間は6分、画像の撮影枚数は6枚となった。このことから、誘導の大部分はユーザの移動とカメラの再設置に時間を要しており、システムの処理性能が問題となっているわけではないといえる。

6.2 現在の風景に対しての過去の写真のリアルタイム重畳

過去の写真の撮影位置での重畳結果を図8に示す。見回しのカメラの動きに合わせ、現在の風景に対し過去の写真が重畳されていることが確認できる。本実験中、重畳処理のフレームレートは40fps以上となっていることを確認しており、リアルタイム性を持った重

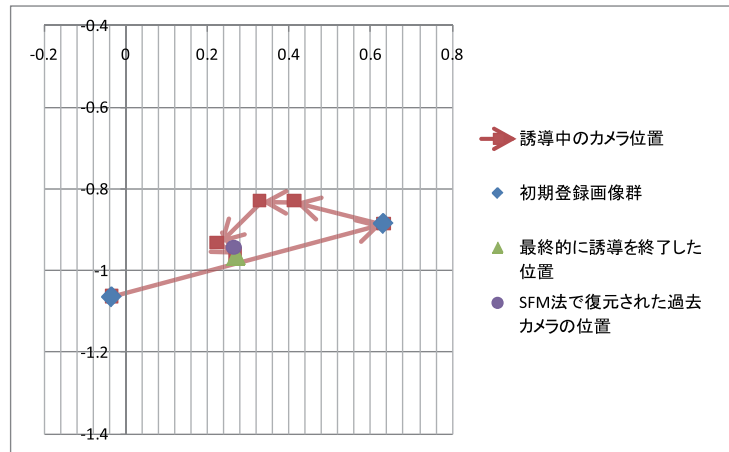


図 7 過去の写真の撮影位置へのユーザの移動の推移。座標値は SFM 法により推定されたものである
 Fig.7 User movement from initial position to position where the past photograph taken.
 Coordinate values are estimated by SFM method.

畳ができているといえる。

また、過去の写真の撮影位置から約 1m ほど右にずれた位置での重畳結果を図 9 に示す。撮影位置が異なるため、建物の前に広がる芝生の領域や生け垣の位置にずれが発生するが、過去と現在の比較の対象物となる建物の位置に関しては大きなずれが生じておらず、カメラの移動に対してロバストな重畳が行えているといえる。

6.3 システムの有効性の評価

本提案システムの目的である、過去の写真の撮影位置へ移動し、その場で現在の風景に対し過去の写真を重畳することで、過去の写真に撮影されている対象への興味や理解などを高める、ということが、本提案システムを用いることで容易に実現できているかについて評価するために、複数人の被験者によって、システム全体の主観評価実験を行った。

本実験では、ユーザが自ら撮影位置を現地空間で写真と現在の風景を見比べながら探索する場合に比べ、本提案システムを用い、過去の写真の撮影位置への誘導を受けて探索することで、過去の写真の撮影位置により正確に到達できたか、探索が簡単になったか、について評価する。

また、現地でない場所において単に写真を鑑賞する場合、現地で過去の写真の撮影位置から写真を鑑賞する場合、現地で過去の写真の撮影位置から本提案システムによる現在空間に

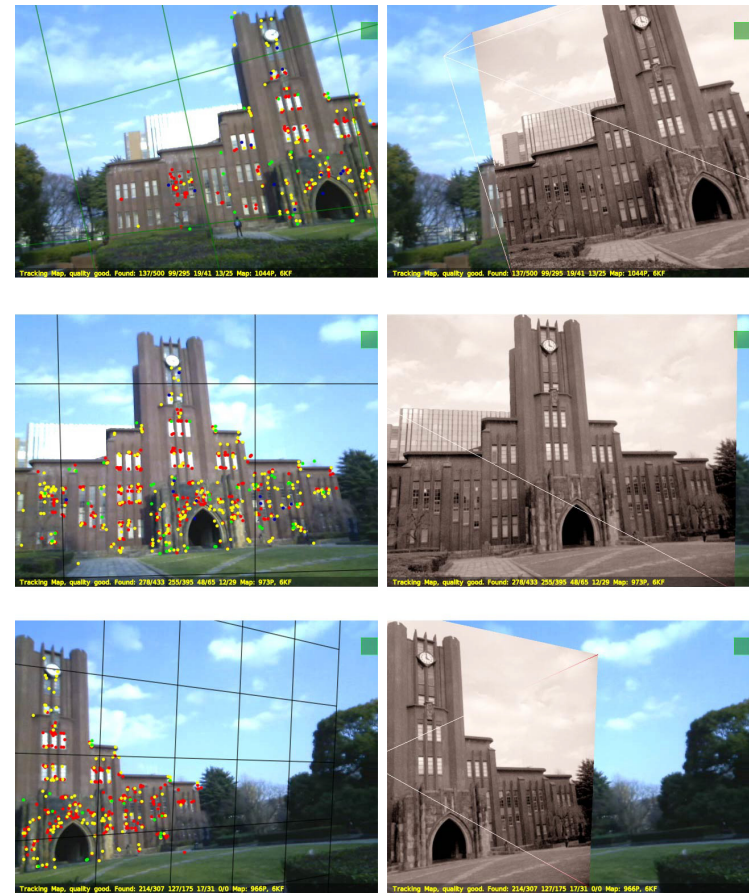


図 8 過去の写真の撮影位置で、現在の風景上にリアルタイムで過去の写真を重畳した例。各列左が現在の風景と検出された特徴点、右が過去の写真を重畳した結果である

Fig.8 Result of realtime superimpose of the past photograph on present landscape at the position where the past photograph was taken. Pictures of left column are present landscape and detected feature points. Pictures of right column are superimposed result.

過去の写真の重畳を行って鑑賞する場合のそれぞれに対して、過去の写真に撮影されている対象への興味や理解などが高まったか、について評価する。



図9 過去の写真の撮影位置からやや右にずれた位置で、現在の風景上にリアルタイムで過去の写真を重畳した例。列左が現在の風景と検出された特徴点、右が過去の写真を重畳した結果である

Fig.9 Result of realtime superimpose of the past photograph on present landscape at the position slightly traveled to right from the position where the past photograph was taken. Picture of left column are present landscape and detected feature points. Picture of right column are superimposed result.

6.3.1 実験手法

実験の手順は以下のとおりとした。

- (1) 写真に撮影されている対象が見えない、現地でない場所で、被験者に2-3分ほどA4大の厚紙に貼り付けた写真を見せ、過去の写真から読み取れること、興味深い点などに留意して鑑賞してもらう。
- (2) 被験者に現地における実験のスタート地点（対象物の正面）に移動してもらう。
- (3) 対象のある現地の空間において、被験者が厚紙に貼り付けた写真のみを用いて、現在の風景と比較し、過去の写真の撮影位置と思われる点を探してもらい、被験者が撮影位置に到着したと主張するまでの所要時間を測定する。
- (4) 過去の写真の撮影位置と思われる点から厚紙に貼り付けた写真を見せ、過去の写真から読み取れること、興味深い点などに留意して鑑賞してもらう。
- (5) 被験者に現地における実験のスタート地点（対象物の正面）に移動してもらう。
- (6) 被験者に提案システムを操作してもらい、過去の写真の撮影位置への誘導に従って移動、過去の写真の撮影位置に到達したと主張するまでの所要時間を測定する。
- (7) 被験者に提案システムを操作してもらい、現在の風景に対する過去の写真の重畳位置の微調整を行ってもらい、所要時間を測定する。

- (8) 被験者に提案システムの重畳表示を利用してもらい、現在の風景上に過去の写真を重畳表示する・しないの変更や、カメラのパンニングなどをインタラクティブに行ってもらうことで、リアルタイム重畳表示による効果を体感し、過去の写真から読み取れること、興味深い点などに留意して鑑賞してもらう。

- (9) アンケートに回答してもらう。

アンケートは、以下の質問を用意した。

Q1. 紙に印刷された写真を見ながら、現地で現在の風景と過去の写真を比較することで、過去の写真を撮影した位置に自分の力のみで正しく移動できたと感じましたか（1. まったくそう思わない-7. とてもそう思うの7段階評価）。

Q2. 自分の力で過去の写真の撮影位置を探索するのに比べ、提案システムを用いて、過去の写真の撮影位置に誘導してもらうことは簡単だと感じましたか（1. とても難しくなった-7. とても簡単になったの7段階評価）。

Q3. 提案システムによって、過去の写真の撮影位置に正しく誘導されたと感じましたか（1. まったくそう思わない-7. とてもそう思うの7段階評価）。

Q4. 現地でないところで紙に印刷された過去の写真を見ることと、現地でその写真の撮影位置で写真を見ることを比較した場合、その写真に対する理解や興味などの得やすさについ

て、前者に比べ後者は効果的だと感じましたか(1. まったくそう思わない-7. とてもそう思うの7段階評価)。

Q5. 現地で自分で探索した過去の写真の撮影位置で紙に印刷された過去の写真を見ることが、提案システムによって誘導された過去の写真の撮影位置で、現在の風景上へのリアルタイム重畳が行われた過去の写真の撮影位置で写真を見ることを比較した場合、その写真に対する理解や興味などの得やすさについて、前者に比べ後者は効果的だと感じましたか(1. まったくそう思わない-7. とてもそう思うの7段階評価)。

Q6. ただ写真を鑑賞するのではなく、重畳表示によって、現在風景と過去の写真を比較することで初めて、何か気付いた、面白かった部分があれば、その内容と場所を箇条書きで記述してください。

Q7. 現地でないところで写真を鑑賞すること、現地で過去の写真の撮影位置で写真を鑑賞すること、現地で過去の写真の撮影位置で本提案システムを利用して写真を現在の風景の上に重畳して鑑賞することそれぞれによって得られた、写真に対する理解度を、100点満点で評価してください。

本実験では、過去の写真として、渡辺眸「東大全共闘 1968-1969」からの写真を用いた(図10)。被験者は8名(20代男性8名)となった。全員、写真の風景の撮影された現地には見覚えのある者である。

6.3.2 実験結果

実験結果は以下ようになった。まず、表1に、実験手順(3)写真のみを用いた過去の写真の撮影位置の探索、(6)提案システムによる過去の写真の撮影位置の探索、(7)重畳の微調整の所要時間について示す。

なお、手順(6)において、被験者が提案システムを用いた過去の写真の撮影位置の探索について失敗したと感じたことが8人中2人に起こったので、その際には、現在空間から得られるポイントクラウドと過去の写真上の点の対応の入力を慎重に行うように指示したうえで、再度手順(6)を行った。

この結果より、被験者が写真のみを用い、現在の風景と比較しながら過去の写真の撮影位置を探索するのに必要な時間である(3)の所要時間に比べ、提案システムを用いた場合に過去の写真の撮影位置を探索し、重畳を行うまでに必要な時間である(6)+(7)の所要時間は、9倍程度になることが分かる。

アンケートQ1-Q5に対する結果は図11のとおりとなった。

Q1, Q3の評価を比較すると、被験者は、自力で撮影位置を探索するのに比べ、提案シス



図10 システムの有効性の評価に用いた写真¹⁶⁾

Fig. 10 The past photograph used for evaluation of effectivity of the system¹⁶⁾.

表1 実験手順(3),(6),(7)の所要時間
Table 1 The time required for step (3), (6), (7).

	平均(sec)	標準偏差(sec)	最大(sec)	最小(sec)
手順(3)	50.1	12.8	60	40
手順(6)	412	111	576	250
手順(7)	42	11	58	25

テムによって誘導された撮影位置の方が正しいと感じると結論付けられる。

一方で、自分で撮影位置を探索するのに比べ、提案システムによって誘導されて撮影位置

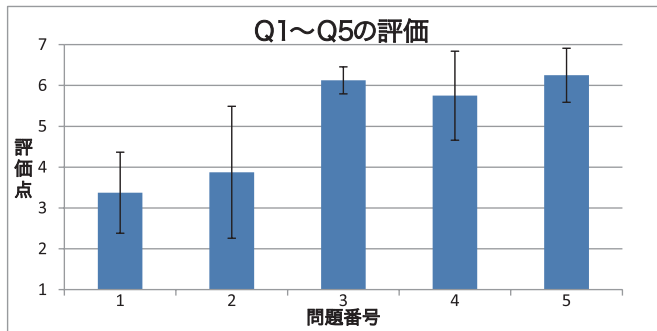


図 11 アンケート Q1-Q5 に対するの回答
Fig. 11 Result of enquete Q1-Q5.

を探索する方が簡単だと感じるかどうかを調査した Q2 については、個人差が大きいということが分かった。これについては、「現在と過去の点の対応を入力することが煩雑だ」という意見が得られた。

Q4 の評価からは、現地に行かずに写真を鑑賞するよりは現地に行って鑑賞した方が、写真に対するユーザのより深い理解や興味を得られると結論付けられる。

Q5 の評価からは、現地において、紙に印刷された写真によって実物と比較するのに比べ、現在の風景上に写真を重畳し比較する方が、写真に対するユーザのより深い理解や興味を得られると結論付けられる。

Q6 については、箇条書きの項目数が 1~3 となり、平均は 1.75 個となった。「人が屋上にのぼっているのを見ることで、建物のスケールが初めて分かった」「ガラスが割れていることに気付いた」「入口付近のバリケードに気付いた」などの意見があった。

Q7 に対する結果は、図 12 のとおりとなった。これは、Q5、Q6 の結果と矛盾せず、現地で、過去の写真の撮影位置で現在の風景上に写真を重畳することで、ユーザが写真に対するより深い理解を得られると結論付けられる。

また、自由回答の意見として、「過去の写真には空間の一部しか写っていないが、それが現在の風景の上に重畳されることで、過去の写真の空間が拡張されるのが面白い」といったもの、「現在の風景ののんびりとした雰囲気と、過去の写真のものものしい雰囲気のギャップが面白い」といったものがみられた。

また、最終的な現在の風景上への過去の写真の重畳は、一例として、図 13 のようになった。

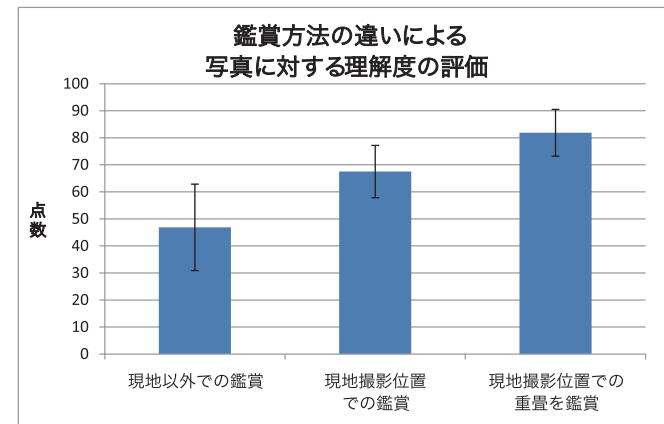


図 12 鑑賞方法の違いによる写真に対する理解度の評価
Fig. 12 Evaluation of understanding of the photograph.



図 13 被験者が得た最終的な重畳の例
Fig. 13 An example of superimpose which examinee sees.

アンケート Q2 と所要時間から分かるように、本システムを用いた場合、写真を現地で鑑賞するのに比べ、ユーザへの負担が大きくなる事が分かる。しかし、アンケート Q1、Q3-Q7 の結果から、過去の写真のより深い理解や興味を得、現在と過去の相違点を把握するのに、本システムによる過去の写真の撮影位置への誘導、現在風景上への重畳が有効だということが示された。

7. ま と め

本論文では、過去の写真の効果的な利用方法として、過去の写真に撮影された現地で過去の写真の撮影位置を探索し、現在の風景の上にリアルタイムで過去の写真の重畳を行うことで、現在と過去における共通点や相違点を直感的に把握できるインタフェースを提案した。本手法では、SfM 法とマーカレス AR 技術による重畳を組み合わせたことで、過去の写真に対し、その写真を撮影した現地において、現在に残っているなんらかの対象物があれば、対象物を精度良く重ね合わせられ、現在と過去の比較ができるという特長を有していることが実験により確認できた。歴史的建造物が残っているような場所では、その歴史をより直感的な形で理解することができると考えられ、歴史学習などに広く応用可能であるといえる。今後は、重畳可能なコンテンツを写真だけではなく、3次元CGの物体などに広げ、応用の可能性を高める。また、本論文では現在の空間の画像の上に過去の写真をそのまま重畳するだけであったが、今後は、過去の写真の風景の上に、現在の空間を歩いている人間だけが浮かび上がるような重畳手法¹⁷⁾など、現在の風景と過去のコンテンツの重ね合わせをより高度な手法で行う方法についても検討する。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金：「大量の写真・映像群を用いた都市空間の記録と再生に関する研究」(21013013)および「既存映像を用いた動きのある3次元空間の再構築手法に関する研究」(23680011)の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表すものとします。

参 考 文 献

- 1) Thumbspark Limited: Museum of London: Streetmuseum, available from (<http://itunes.apple.com/gb/app/museum-london-streetmuseum/id369684330?mt=8>).
- 2) 青木貴司, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 実写画像を用いた時間方向のバーチャルな移動表現の実現, 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文集, Vol.12, pp.319-322 (2007).
- 3) Kasada, K., Hayashi, O., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: On-site Virtual Time Machine with Navigation to Past Camera Position, *Proc. ASIAGRAPH 2010 in Tokyo*, Tokyo, Japan, Vol.4, No.2, pp.35-40 (2010).
- 4) Snavely, N., Seitz, S.M. and Szeliski, R.: Photo tourism: Exploring photo collections in 3D, *Proc. SIGGRAPH Conference*, New York, NY, USA, pp.835-846, ACM Press (2006).
- 5) Lowe, D.: Object recognition from local scale-invariant features, *ICCV*, p.1150, IEEE Computer Society (1999).
- 6) Bae, S., Agarwala, A. and Durand, F.: Computational rephotography, *ACM Trans. Graphics (TOG)*, Vol.29, No.3, pp.1-15 (2010).
- 7) Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. and MacIntyre, B.: Recent Advances in Augmented Reality, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.21, pp.34-47 (online), DOI:<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/38.963459> (2001).
- 8) 遠藤隆明, 佐藤清秀, 内山晋二ほか: 複合現実感におけるカメラ位置姿勢推定の安定化とその考察, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.195-206 (2008).
- 9) 前田真希, 小川剛史, 清川 清, 竹村治雄: ウェアラブル拡張現実感のための赤外マーカのステレオ計測と姿勢センサを用いた位置・姿勢推定, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.4, pp.459-466 (2005).
- 10) Kato, H. and Billinghurst, M.: Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system, *IWAR*, p.85, IEEE Computer Society (1999).
- 11) 武富貴史, 佐藤智和, 横矢直和: 拡張現実感のための優先度情報を付加した自然特徴点ランドマークデータベースを用いた実時間カメラ位置・姿勢推定(インタラクション・VR, 〈特集〉画像の認識・理解論文), 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.92, No.8, pp.1440-1451 (2009).
- 12) Klein, G. and Murray, D.: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, *Proc. 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07)*, Nara, Japan (2007).
- 13) Rosten, E. and Drummond, T.: Machine learning for high-speed corner detection, *Computer Vision (ECCV 2006)*, pp.430-443 (2006).
- 14) Snavely, N.: Bundler: Structure from Motion (SfM) for Unordered Image Collections, available from (<http://phototour.cs.washington.edu/bundler/>), (accessed 2011-04-11).
- 15) 山田健人, 金澤 靖, 金谷健一, 菅谷保之: 2画像からの3次元復元の最新アルゴリズム, 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.2009, No.15, pp.1-8 (オンライン), 入手先(<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007991135/>), (参照 2009-08-24).
- 16) 渡辺 眸: 東大全共闘 1968-1969, p.121, 新潮社 (2007).
- 17) Kakuta, T., Vinh, L., Kawakami, R., Oishi, T. and Ikeuchi, K.: Detection of mov-

ing objects and cast shadows using a spherical vision camera for outdoor mixed reality, *Proc. 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.219–222, ACM (2008).

(平成 23 年 4 月 12 日受付)
(平成 23 年 9 月 12 日採録)



仲野 潤一

2007 年東京大学工学部都市工学科卒業，2009 年同大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了．現在，同大学院情報理工学系研究科博士課程在学中．



笠田 和宏

2010 年東京大学工学部機械情報工学科卒業．現在，同大学大学院情報理工学系研究科修士課程在学中．



西村 邦裕

2001 年東京大学工学部機械情報工学科卒業，2003 年同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了．2006 年同大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了．2007 年同大学院情報理工学系研究科助教，2011 年同大学先端科学技術研究センター客員研究員，現在に至る．



谷川 智洋

1997 年東京大学工学部産業機械工学科卒業，1999 年同大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻修士課程修了．2002 年同大学院工学系研究科博士課程修了．2006 年同大学院情報理工学系研究科講師，現在に至る．



廣瀬 通孝

1982 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了．2006 年同大学院情報理工学系研究科教授，現在に至る．