

移動可能な複数協調カメラによる AR システム

新井 祐輝† 斎藤 英雄†

† 慶應義塾大学理工学部情報工学科

本稿では、複数の移動可能なカメラを利用することによるマーカのオクルージョンにロバストなシステムを提案する。マーカ、カメラはともに移動可能であるため、マーカを移動することにより任意の場所に仮想物体を重畳表示することが可能であり、また、ユーザはその様子を任意の視点から撮影をおこなうことが可能である。具体的には、複数のカメラに共通に見えるマーカを利用することにより、カメラから見えていないマーカの位置を特定するというをおこなう。また、その際に Lucas Kanade 法を用いて、入力画像と基準画像の対応点を算出し射影行列を再算出することで、より精度の高いマーカ位置の特定をおこなった。本手法を用いた結果、マーカにオクルージョンが発生しても AR を実現することが可能となった。

AR System Using Collaborative Multiple Handy Cameras

Yuki Arai†, Hideo Saito†

† Department of Information and Computer Science, Keio University

In this paper, we present a system which is robust enough to handle occlusion of markers by using multiple handy cameras. Because markers and cameras can move, this system can display virtual object in arbitrary places by moving markers and we can construct a free view point image. Specifically we identify the position of the marker which is not seen from a camera by using a marker visible to multiple cameras. After calculating a projection matrix using multiple cameras, we compute more accurate projection matrix by using Lucas Kanade method. As a result, we can recognize existence of marker even if marker is occluded.

1 はじめに

近年、新たな情報提示やメディア提示を可能にする技術として、AR (Augmented Reality, 拡張現実感) に関する研究がさかんにおこなわれている [1]。AR とは従来の Virtual Reality (VR, 仮想現実感) の拡張ともいえ、現実世界と仮想世界を融合させることで、現実にはありえない表示を可能とするものである。AR を利用した技術の例としては、実際の本の 1 ページごとにマーカを配置し、それを利用して紙の上に 3 次元の仮想オブジェクトを表示し物語を展開する 3 次元絵本 "Magic Book" [2]、ユーザの位置姿勢に応じた音声映像 CG 等の観光案内を提供するウェアラブル観光案内システム [3]、HMD を装着することで家具の選定や配置などの仮想インテリアシミュレーションを体感す

ることができる MR リビングルーム [4] などが上げられる。

AR をおこなうためには正確に視点の位置姿勢を求めることが重要である。視点の位置推定の方法としては、一般的にセンサを用いた手法とビジョンベースの手法が知られている。センサを用いた手法とは、磁気センサやジャイロセンサを用いてカメラの位置・姿勢を推定する方法であり [5,6,7,8]、カメラの急激な動きや照明条件にロバストであるという利点をもつ。しかし、センサのみから得られる位置・姿勢の精度は仮想物体を現実空間に正確に重畳表示させるには不十分であることや、センサの有効範囲内でしか利用することができないという欠点を持つ。ビジョンベースの手法では、人工的なマーカとよばれる目印を現実空間中に

配置する方法 [9] や、現実空間中のエッジやコーナなどの自然特徴点を利用して位置・姿勢を推定する方法 [10,11,12,13] がある。ビジョンベースの手法では、センサのような特別な機器を用意する必要がなく、システムの構築やコストの面で利点がある。しかし、マーカを用いた場合はマーカの検出範囲に制限されてしまうということ、現実空間中の景観を損ねてしまうこと、マーカのオクルージョンや照明変化に弱いなどという欠点を持ち、また、自然特徴点を利用した場合には、視点の急激な変化に対応できないフレーム間で同一の特徴点を画像中から正確に抽出することが難しいなどという欠点を持つ。そのため、これらの欠点を補うためにさまざまな研究がおこなわれている。

本稿では、センサに比べ容易にシステムを構築することができるなどの利点からビジョンベースの位置・姿勢推定について検討する。そして、その中でも容易に検出ができるマーカを利用した AR システムの構築を目指す。マーカは高速に検出できる反面、画像中で少しでもオクルージョンが発生していると認識することができないという欠点を持つ。これを改善するために、過去さまざまな研究がおこなわれている。立野ら [14] はマーカを入れ子型にし、マーカにオクルージョンが発生したとしても、マーカ内にある別のマーカを利用することによりマーカのオクルージョンにロバストなシステムを構築した。しかし、この手法では、複数のマーカを用いていることとかわりなく、すべてのマーカが隠れると射影行列を算出することができないなど、根本的なマーカのオクルージョンの解決策ではなかった。David ら [15] は、マーカが認識可能なときはマーカを利用し直接視点の位置・姿勢をもとめ、マーカがオクルージョンなどで認識できなくなった場合は、パーティクルフィルタを用いることにより、視点の位置・姿勢を求めるということをおこなった。このように、マーカと特徴点による位置・姿勢推定を条件によって使い分けることによってマーカのオクルージョンにロバストなシステムの構築を達成した。David らはカメラ 1 台で AR システムを構築しようと試みたが、Pilet ら [16] は複数カメラを用いることでマーカのオクルージョンの弱さを解決しようとした。具体的には、複数のカメラの位置関係を事前に求めておき、カメラからマーカが見えなかった場合でも、他のカメラでマーカが見えていればその情報とカメラの位置関係を利用して視点の位置・姿勢を推定しようとするものである。こ

の方法では、仮想物体を重畳表示するカメラからまったくマーカが見えなかったとしても仮想物体を重畳表示することができるという利点がある。しかし、カメラ間の位置関係は変化してはならないため、カメラは固定ではなくてはならないという欠点を持っていた。

本研究では、Pilet らの手法のように複数カメラを利用し、カメラ間で情報を共有することでマーカのオクルージョンにロバストなシステムの構築方法を提案する。その際、Pilet らの手法ではカメラは固定でなくてはならなかったが、本手法ではカメラ、マーカともに移動可能なシステムを提案する。

2 提案手法

2.1 システムの概要

ここでは、本研究のシステムの概要を説明する。図 1 にシステムの概略図を示す。

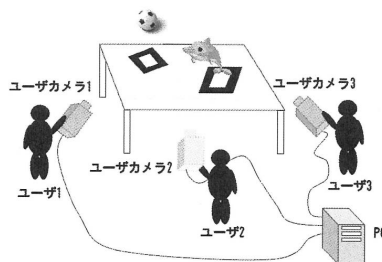


図 1: システムの概要

本システムでは、図 1 のように複数のユーザがビデオスルー型カメラ、または携帯電話などのカメラを利用して、マーカを用いて仮想物体を AR 表示している状況を見ている環境を想定する。すべてのマーカ、カメラはともに移動可能であるため、マーカを移動することにより、任意の場所に仮想物体を重畳表示することが可能であり、また、ユーザはその様子を任意の視点から撮影することが可能である。その際、仮想物体は、マーカそれぞれの上に重畳表示するものとする。

従来のシステムのようにカメラそれぞれが単独で AR に用いられる場合はマーカやカメラの位置関係によってはマーカが隠れてしまい、カメラの位置姿勢を推定できない状況が発生してしまうが、本システムでは得

られた複数の入力画像の情報を統合して射影行列を算出するため、認識に失敗したマーカへの射影行列も他のカメラからの情報を利用することにより算出することが可能である。このように、従来のシステムよりもマーカのオクルージョンにロバストなシステムとなっている。

また、今回の実験では、利用が簡単なことからビデオシーサー型カメラをwebカメラで代用し、それらを1台のPCに接続することで入力画像の情報の統合をおこなった。

2.2 提案手法の流れ

図2に本システムを実現するための提案手法の流れを示す。

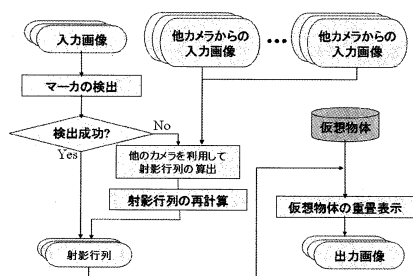


図 2: 手法の流れ

まず、webカメラより得た入力画像中からマーカをARToolkitを利用して検出する。検出に成功したマーカは、ARToolkitを用いてそのまま射影行列を算出し、仮想物体の重畳表示をおこなう。検出に失敗したマーカは、ARToolkitをもちいて直接射影行列を算出することができないため、他のユーザのカメラから得られたマーカの位置情報を元に、射影行列の算出をおこなう。その際、他カメラから得られたマーカの位置情報を利用して算出した射影行列には誤差が含まれているため、得られた射影行列を利用して射影行列の再計算を行い、より精度のよい射影行列の算出をおこなう。最後に、カメラからマーカまでの射影行列が算出されたマーカには、その射影行列を利用して仮想物体を重畳表示をおこなう。

2.3 他カメラを利用した射影行列算出方法

ARToolkitを利用することで、マーカが検出されたときはマーカとカメラ間の射影行列を得ることができるが、そうでない場合は他カメラからのマーカの位置情報を利用して射影行列を求めなければならない。ここではその方法について説明する。

本手法では、マーカ、カメラの位置関係は絶えず変化していると仮定するため、毎フレームごとにカメラ間の位置関係を算出しカメラからマーカへの射影行列を算出するというをおこなう。具体的には、2つ以上のカメラから共通に見えているマーカを探し出し、それを利用してカメラ間の位置関係を毎フレーム算出することにより、他カメラを利用して自分のカメラからは認識できないマーカへの射影行列の算出をおこなう。

例えば、図3のように、カメラ1からはマーカ1,2が、カメラ2からはマーカ1が、カメラ3からはマーカ2,3が、カメラ4からはマーカ2,3が見える場合、カメラ4からマーカ1への射影行列は、カメラ4からマーカ1が見えていないため直接算出することはできない。そのため、2つ以上のカメラに共通して見えるマーカを利用してカメラ1とカメラ4の外部パラメータMを求め、それとカメラ1からマーカ1までの射影行列Pをかけることによって、カメラ4からマーカ1までの射影行列を算出する。その際、カメラ4からカメラ1へ行く経路としていくつか考えられ、どのカメラを経由して射影行列を算出するかが問題として挙げられる。本稿では、カメラから見えるマーカの大きさなどが十分でないために発生する射影行列の誤差より、より多くのカメラを経由することによる誤差のほうが大きいと判断したため、見えないマーカまでの射影行列を求めるための経路は、経由するカメラの数をもっとも少なくする経路を選択することとした。そのため、最短経路問題で有名なDijkstraのアルゴリズムを利用して最も経由するカメラの数が少ない経路を自動で選択し、それを用いて射影行列を算出するようにした。

なお、マーカを経由してカメラ間の位置関係を算出することにより、認識に失敗したマーカとカメラとの位置関係を算出するため、カメラ間で共通に見えるマーカが最低1つは必要であり、また、すべてのカメラから見えていないマーカへの射影行列は算出することはできない。

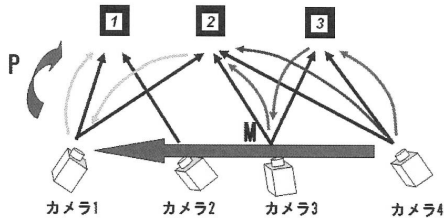


図 3: 他カメラを利用した射影行列の算出

2.4 射影行列の再計算

2.4.1 再計算の流れ

他カメラからの射影行列を利用して対象カメラの射影行列を算出する方法は、ARToolkit を用いて求めた射影行列の精度が正確でないことから、経由するカメラが多くなればなるほど正確な射影行列との誤差が大きくなってしまふという欠点をもつ。そこで、本研究では、他カメラを利用して算出した射影行列を用いることにより、射影行列の再計算をおこない、精度の高い射影行列の算出をおこなった。以下にその方法について述べる。また、射影行列の再計算の流れを図 4 に示す。

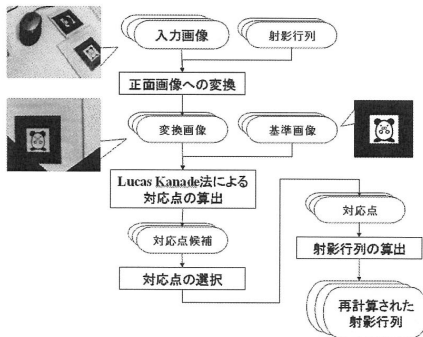


図 4: 射影行列の再計算の流れ

他カメラを利用して射影行列が算出されているということは、だいたいのマーカの位置がわかるということである。そこで、まず、他カメラから得た射影行列を利用して入力画像を変換し、オクルージョンの発生し

ているマーカを正面画像に変換するというをおこなう。射影行列が正確であれば変換画像と基準のマーカはまったく同じ位置に表示されるが、射影行列が正確でないため変換画像と基準画像とのマーカ位置には多少のずれが生じる。そのため、変換画像と基準画像との対応点を算出するために、Lucas Kanade 法を用いて算出する。Lucas Kanade 法とは、勾配法を用いて 2 つの画像間の対応点を算出する方法である。また、ここでいう基準画像とは、マーカの元となる、マーカを正面から捉えた画像のことである。その後、Lucas Kanade 法を用いて探し出した対応点の中には、画像間の対応の取れていない点も含まれるため、その対応点を取り除くということを行う。これらの処理により最終的に見つかった対応点を利用することにより、変換画像を入力画像に戻すことにより、入力画像と基準画像との対応点が求まるので、それを利用してカメラからマーカへの射影行列を算出する。

2.4.2 対応点算出方法

ここでは、射影行列の再計算の流れの中の対応点算出の方法について解説する。図 5 は、本手法の対応点算出方法の流れを表わした図である。

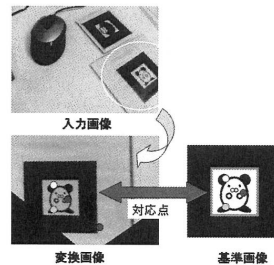


図 5: 対応点算出方法

射影行列の再計算をするにあたって、入力画像と基準画像との対応点を算出する必要がある。しかし、入力画像中から基準画像との対応点を探索するのはとても困難な問題である。そのため、本手法では他カメラを利用して算出した射影行列を利用して入力画像を変換しマーカの正面画像を得て、正面画像と基準画像とで対応点を算出することにより、最終的に入力画像と基準画像との対応点を算出した。

そのため、まず、他カメラを利用して算出した射影行列を利用して入力画像をマーカを正面からみた画像に変換し、Lucas Kanade 法を用いて基準画像と正面画像との対応点候補を見つけ、対応点候補が見つかった後には、対応点候補から領域選択によってはずれ値を取り除いた。具体的に図 5 でいうと、マーカのエッジ上の点などは対応点算出を誤りやすいため取り除いた。つまり、得られた対応点候補のうち、マーカの黒い枠の内側にある点のみを対応点候補とし、それ以外の点を対応点候補からはずすということをおこなった。図 5 の中でいうと、マーカの黒い枠上の点は対応点としてはあっているが、マーカの黒枠の内側でないため誤っている確率が高いということから対応点候補からはずした。

領域選択により対応点候補を絞ったら、次に K-means 法を利用して対応点をさらに選択する。具体的には、Lucas Kanade 法を利用すると、図 6 の (c) のような対応点の位置関係を表わした線を算出することができる。そして、この対応点を表わした直線を傾き、長さにおいていくつかのクラスに分類し、はずれ値を取り除くことをおこなう。図 6 は実際に Lucas Kanade 法を用いて変換画像と基準画像の対応点を算出した結果である。この一連の操作によって最終的に、図 6 の (d) のように、対応点の正しいもののみが選択される。

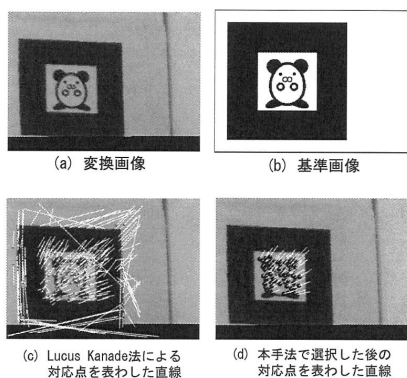


図 6: 対応点の算出結果

3 実験と結果

3.1 実験の概要

本手法の有効性を示すために以下の 3 つの実験を行った。

まず、実験 1 として、射影行列の再計算をおこなった場合とおこなわない場合とでのマーカ位置の精度を比較するため、マーカの外枠を重畳表示しマーカ位置のずれについて検討した。マーカの外枠は、他カメラを利用して算出した射影行列とそれに対して再計算をおこなった射影行列の 2 通りについて重畳表示をおこなった。

次に、実験 2,3 では実際に本システムを用いて仮想物体の重畳表示をおこなった。実験 2 では射影行列の再計算をおこなわず、実験 3 では射影行列の再計算をおこなって仮想物体を実際に重畳表示した。その際、どちらの実験もカメラは 3 台利用した。

また、本実験で用いた PC のスペックは以下のとおりである。

- CPU : Intel Pentium4 3.2GHz
- メモリ : 2048MB
- OS : Windows XP
- カメラの解像度 : 320 × 240

3.2 実験 1 の検討

図 7 に実験 1 の結果を示す。図 7 の左側の画像は他カメラから得られた射影行列を利用して射影行列の再計算をおこない、それを利用してマーカの外枠を重畳表示した結果である。また、図 7 の右側の画像は他カメラから得られた射影行列をそのまま利用してマーカの外枠を重畳表示した結果である。図 7 をみると、他カメラを利用して算出した射影行列のうち、射影行列の再計算をおこなわないものは、他のカメラのマーカを利用してマーカ位置の特定が可能のため、マーカのオクルージョンが発生してもマーカを重畳表示できていることがわかる(図 7(b)(d)(f))。しかし、カメラとマーカの位置関係によっては射影行列に誤差が生じてしまい、マーカ位置が正確に重畳表示できないことが確認された(図 7(b)(d))。射影行列の再計算をおこなっ

て算出した射影行列では、マーカにオクルージョンが発生している場合でも射影行列の再計算をおこなわない場合と違い精度のよいマーカ位置の重畳表示がおこなわれていることがわかる(図7(a)(c))。しかし、基準画像と入力画像の対応点算出に成功したときは他カメラを利用して算出した射影行列よりも精度のよい結果を得られるが、対応点算出にまだ課題がのこっているため、条件によっては対応点の算出に失敗してしまい、再計算をおこなう前よりも精度の低い射影行列を算出してしまい、まったく検討違いのところにマーカを重畳表示してしまう場合もあった(図7(e))。つまりこの実験で、射影行列の再計算をおこなうとより精度よくマーカを重畳表示できる反面、再計算に失敗すると大きくずれてしまうことが確認された。

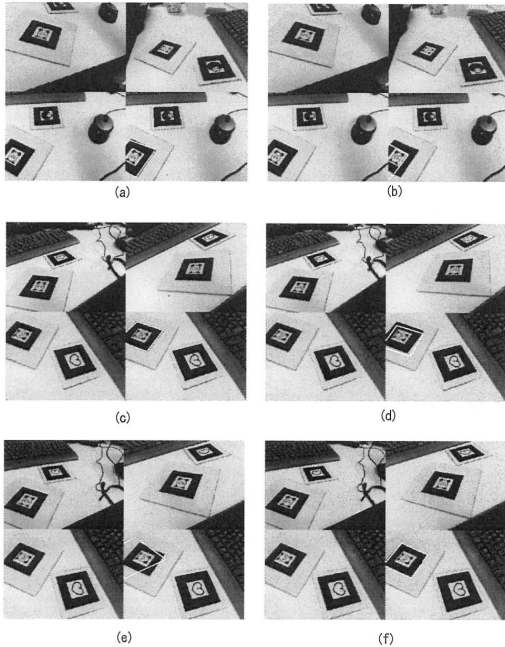


図7: 再計算の有無による精度の比較(左:再計算あり, 右:再計算なし)

3.3 実験2の検討

図8に実験2の結果を示す。

実際に他カメラからの情報を利用して射影行列を算出し、射影行列の再計算をおこなわないで仮想物体を重畳表示した結果を見てみると、本手法の目的であった、オクルージョンが発生しているマーカの上にも仮想物体を重畳表示できていることがわかる。しかし、実験1の結果からもわかるように、マーカから直接射影行列を求めた場合に比べ、他カメラを利用した場合には精度のよい射影行列を得ることができないため、マーカにオクルージョンが発生し、直接マーカから射影行列を算出していたのが他カメラから射影行列を算出する方法が変わった瞬間に、仮想物体の重畳位置が変わってしまうということがおきてしまうことがあった。また、他カメラを利用して算出した射影行列はコンスタントでなく、仮想物体が前後左右に多少ぶれてしまうという現象も見られた。このことから、正確なARをおこなうにあたって他カメラを利用して射影行列を算出することだけでは、不十分であるということが確認された。

また、この実験では7fpsの速度を得ることができた。

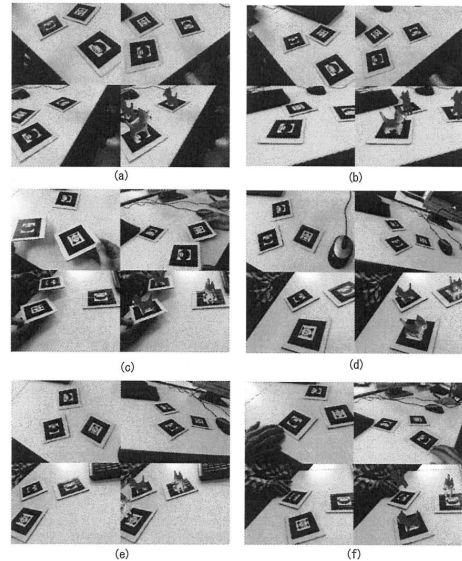


図8: 重畳結果(再計算なし)

3.4 実験3の検討

実験3をみてみると、ユーザカメラ上でマーカが隠れてしまっても、他のカメラからマーカが見えていれば仮想物体をマーカの上に重畳表示できていることがわかる。しかし、現在のシステムでは、条件によっては射影行列の再計算に失敗し仮想物体の位置合わせに失敗してしまうこともわかる。その原因としては、他カメラを利用して算出した射影行列を利用して、入力画像中のマーカを正面画像にして基準画像との対応点を取っているが、その対応点を誤っているためである。現在は正面画像と基準画像から Lucas Kanade 法のオプティカルフロー算出を用いて 100~300 点ほどの対応点を探しだし、そのなかから対応点として誤っていない確率の高い対応点を選択し射影行列を算出しているが、Lucas Kanade 法による対応点算出の精度が正面画像によっては悪くなってしまいうことと、最適な対応点の選択が完璧ではないことなどが上げられる。そのため、対応点算出の方法を SIFT など別のものに変更するか、対応点選択の手法を K-means 法以外にも適応する必要がある。

また、本手法ではマーカ内のオブジェクトを利用して射影行列の再計算をおこなっているため、再計算をおこなうマーカが大きく隠れてしまった場合には再計算をおこなうことができないという欠点も持っている。また、この実験では 4fps の速度を得ることができた。

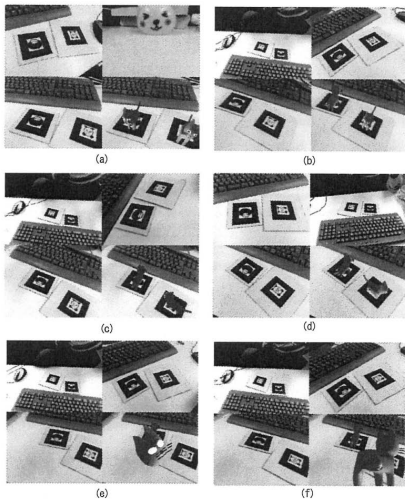


図 9: 重畳結果 (再計算あり)

4 結論

複数の移動可能なカメラから得られた情報を統合し、カメラ間に共通に見えるマーカを利用してマーカの位置を特定することにより、マーカのオクルージョンにロバストなシステムを構築することができた。

今回、複数協調カメラを用いた AR の手法について提案したが、射影行列の再計算の成功する確率がそれほど高くないことやマーカが大きく隠れてしまうと再計算をおこなうことができないなど、条件がそろわないと射影行列を算出することができないなど、実際にこのままでは AR に利用することは難しいことが判明した。しかし、他カメラを利用して多少の誤差のある射影行列を算出することは可能であり、それを利用して変換した画像と基準画像との対応点を正確に算出することができればオクルージョンの発生しているマーカ上にも正確に仮想物体を重畳表示することが可能であるということがわかった。

射影行列の再計算において、基準画像と変換画像との対応点算出がうまくいかないために検討違いの射影行列を算出してしまうことがあったが、図 10 のように SIFT を用いれば Lucas Kanade 法より良い対応点の結果が得られることがわかっている。そのため、Lucas Kanade 法を用いた部分に高速 SIFT などを用いることによって、より良い射影行列の再計算をおこなうことができるであろうと考えられる。

今後は基準画像と変換画像の対応点をより正確に算出するということをしていきたい。

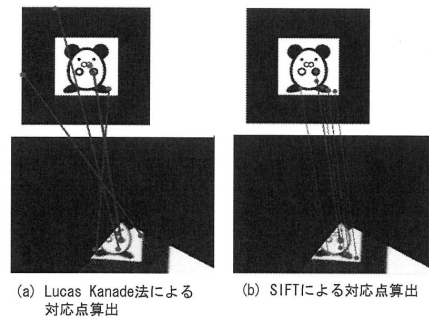


図 10: 対応点算出の比較

参考文献

- [1] Ronald T. Azuma: "A Survey of Augmented Reality" In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments Vol6, No.4*, pp.355-385, 1997.
- [2] Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, and Ivan Poupyrev, "The MagicBook: a transitional AR interface", *Computers & Graphics* 25, pp.745-753, 2001.
- [3] 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和: "拡張現実感を用いたウェアラブル観光案内システム「平城京跡ナビ」", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2003-186, 2004.
- [4] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: "MR リビングルーム— MR 空間の幾何的・画質的整合性に関する考察", 日本バーチャルリアリティ学会第3 回大会論文集, pp.309-312, 1998.
- [5] Andrei State, Gentaro Hirota, David T. Chen, William F. Garrett, Mark A. Livingston: "Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking", *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1996*, pp.429-438, August 1996.
- [6] 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: "複合現実感における現実空間と仮想空間の融合に関する検討", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.2 pp.161-164, Sep 1997.
- [7] Livingston, Mark A. and Andrei State: "Magnetic tracker calibration for improved augmented reality registration", In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, MIT Press, Vol.6, No.5, pp532-546, 1997.
- [8] 佐藤清秀, 穴吹まほろ, 山本裕之, 田村秀行: "屋外装着型複合現実感のためのハイブリッド位置合わせ手法" 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.7, no.2, pp.129-137, 2002.
- [9] 加藤博一, Mark Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎: "マーカ追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.4, No.4, pp.607-616, 1999.
- [10] Iryna Skrypnyk and David G. Lowe: "Scene Modelling, Recognition and Tracking with Invariant Image Features", *Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*.
- [11] Michael Aron, Gilles Simon, Marie-Odile Berger: "Handling Uncertain Sensor Data in Vision-based Camera Tracking", *Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*.
- [12] Luca Vacchetti, Vincent Lepetit, Pascal Fua: "Combining Edge and Texture Information for Real-Time Accurate 3D Camera Tracking", *Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*.
- [13] Georg Klein and Tom Drummond: "Sensor Fusion and Occlusion Refinement for Tablet-based AR", *Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*.
- [14] 立野 圭祐, 北原 格, 大田 友一: "視点移動自由度の大きい拡張現実感のための入れ子型マーカ", technical report of IEICE.
- [15] David Marimon, Yannich Maret, yousri Abdeljaoued and Touradj Ebrahimi: "Particle filter-based camera tracker fusing marker and feature point cues", *Proc. of the IS and SPIE Conf. on Visual Communications and Image Processing (2007)*.
- [16] Julien Pilet, Andreas Geiger, Pascal Laguerre, Vincent Lepetit, Pascal Fua: "An All-In-One Solution to Geometric and Photometric Calibration", *Proceedings of the Therd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR2006)*.