

任意位置姿勢に配置された複数平面マーカの統合による オンラインARシステム

On-line Augmented Reality System by Integration of Multiple Planar Markers Placed in Arbitrary Positions and Directions

学生会員 植松 裕子[†], 正会員 斎藤 英雄[†]

Yuko Uematsu[†] and Hideo Saito[†]

Abstract We describe a new on-line AR system using multiple planar markers placed at arbitrary positions and directions. In most marker-based approaches, the markers' 3D positions and directions need to be measured in advance because they need to define a virtual object's coordinate in one fixed 3D coordinate system. However, such measurement is a very difficult and time-consuming task especially when the markers are in a complex arrangement or are placed in a wide space. Thus, we created a new on-line AR system that does not have any information on the geometrical relationship of the markers. In our registration method, we construct projective 3D space using two reference images, in which we can estimate the geometrical relationship of the multiple markers. By defining the virtual object's coordinate in projective space, this coordinate can be represented in one fixed 3D coordinate system for each frame. We performed some experiments to demonstrate the effectiveness of our system. A virtual object was superimposed onto input image sequences captured with a handy camera. Because the multiple markers were placed in a wide area, the virtual objects could easily move around the real world. Moreover, the registration could be carried out stably because the markers face various directions and because some of them can always be recognized from most viewpoints.

キーワード：拡張現実感 (AR), 複合現実感 (MR), 幾何学的位置合わせ, 射影空間, オンラインシステム, AR-Toolkit

1. ま え が き

Augmented Reality (AR)/Mixed Reality (MR) は、現実世界に仮想世界（仮想物体）を融合するための技術であり、仮想物体を現実世界に本当に存在しているように表示することにより実現される。仮想物体を現実世界に違和感なく表示するためには、現実世界と仮想物体を幾何学的に一致させる（幾何学的整合性）こと、環境の照明条件や物体の反射特性を一致させる（光学的整合性）こと、視点変化に対して時間的に同期させる（時間的整合性）ことが重要となる^{1)~3)}。ARにおけるこれらの問題のうち、本論文では、幾何学的整合性を解決するための手法を用いた新しいオンラインシステムを提案する。

多くのARシステムは、可動カメラによって撮影された動画に仮想物体を重ねて表示することで、仮想物体が現

実世界に存在しているような合成映像を生成する。仮想物体を動画に重ねるためには、各フレームにおけるカメラの動きに合わせて、仮想物体を重ねる位置も動かす必要があり、そのためにはカメラの位置・姿勢（外部パラメータ）をフレームごとに正しく取得しなければならない。このように、フレームごとのカメラの外部パラメータを求め、仮想物体を重ね表示する位置を決定することを、仮想物体の位置合わせと呼ぶ。

ARにおける仮想物体の位置合わせ手法では、センサを用いたり、画像そのものを用いたりすることが一般的である。磁気センサやジャイロセンサを用いてカメラの位置・姿勢を求める位置合わせ手法は、フレーム間でのカメラの急激な動きや照明条件の変化などに対してロバストであり、カメラの動きを継続的に追跡することができる。しかし、このようなセンサのみから得られる外部パラメータの精度は、仮想物体を現実世界に完全に一致させるためには不十分であり、撮影された画像を用いてさらに高精度化するなどの工夫が必要である。また、センサを用いると、ユーザの移動範囲がセンサの有効範囲に制限されたり、使用する環境からのノイズの影響を受けてしまうといった欠点もある。

2005年11月1日受付, 2006年2月17日再受付, 2006年3月8日採録

[†] 慶應義塾大学 大学院 理工学研究科 開放環境科学

(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, TEL. 045-563-1141)

[†] School of Science for Open and Environmental Systems, Graduate School of Science and Technology, Keio University

(3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522, Japan)

一方、画像のみを用いると、センサのような特別な機器を用意する必要がなく、カメラと計算機のみからシステムを構築することができる。このような画像ベースの手法では、画像中に存在する特徴を認識し、それらの見え方によって現在のカメラの位置・姿勢を算出する。一般的に利用される特徴としては、マーカや3次元モデル、自然特徴などがある。

自然特徴を用いる手法は、現実世界に手を加えずに済むため、事前に撮影環境を設定する必要もなく、さらにマーカを用いる場合よりも自然なARを実現することができる。しかし、位置合わせに利用できるよう明確な自然特徴は現実世界にそれほど多くはない。また、自然特徴を画像から常に安定に検出することは難しく、ジッタ・揺らぎの原因となる。このため、自然特徴を用いた方法は、オフラインのARに限定されている場合が多い。しかし、Augmented Realityの分野において、オンラインで動作可能なシステムを構築することは非常に重要である。そのため、本論文ではマーカベースの手法に着目する。

マーカベースの手法は、最も典型的な位置合わせ手法の一つであり、様々な関連研究が行われている。マーカは、自然特徴とは異なり、画像中から容易に抽出できるため、高い精度が期待でき、オンラインで動作可能な計算時間も実現できる。特に“AR-Toolkit”⁴⁾⁵⁾は非常に有名であり、簡単にオンラインのARシステムを構築できるツールとして多くの研究者の間で用いられている^{6)~8)}。

一つのマーカのみを用いる場合、カメラの移動可能範囲は、そのマーカをカメラの視野内に収めることのできる範囲に制限される。また、カメラの視点や照明条件によっては、必ずしもそのマーカが正しく認識されないこともある。そこで、広い範囲で安定に位置合わせを行うためには、複数のマーカを組合せる必要がある。

複数のマーカを用いると、常にいずれかのマーカが見えていれば位置合わせができるので、カメラの移動可能範囲が広がり、前述のような問題は解決できる。この場合、ある一つの基準マーカによって、仮想物体の座標系をあらかじめ定義しておき、各フレームにおいてカメラに撮影されているマーカと基準マーカとの幾何学的関係から、仮想物体の重畳位置を算出する。つまり、すべてのフレームを通して、常に仮想物体を同一の座標系で表現するためには、マーカ同士の相対的な幾何学的位置関係を事前に計測しておく必要がある^{9)~13)}。

このような手法の一例として、Katoらの手法では、正方形のマーカの位置・姿勢と、点マーカの位置をあらかじめ知っておく必要があった⁹⁾。またGencらの手法は、学習プロセスを用意することで、マーカレスの位置合わせを実現しているが、学習プロセスにおいてマーカを学習するためには、各マーカの幾何学的位置関係が必要であった¹⁰⁾。

このように、ほとんどのケースにおいてマーカの幾何学的位置関係が必要とされているが、これらはあらかじめ手

動で計測しておかなければならず、手間のかかる作業である。そこでKotakeらは、バンドルアジャストメント用いて、複数の平面マーカの幾何学的関係を推定する手法を提案した¹⁴⁾。この手法では、マーカ同士の完全な位置関係は必要ないが、“同一平面上に存在する”などといったマーカの相対的な配置に関する情報をあらかじめ知っておく必要があった。

そこで本論文では、任意の位置・姿勢に配置された複数の平面マーカを用いたオンラインのARシステムを提案し、マーカの相対的な位置関係についての情報を事前に全く必要としない位置合わせを行う。このシステムでは、我々が既に提案している、任意位置姿勢に存在する複数の自然平面を射影空間によって統合する位置合わせ手法¹⁵⁾を平面マーカに応用する。

複数平面をARの位置合わせに用いた関連研究としては、複数の自然平面を利用するSimonらの手法があるが、彼らの手法では、複数の平面が直交しているという制約を利用したり¹⁶⁾、すべてのフレームをバンドルアジャストメントにより最適化するオフライン処理で複数平面の幾何学的情報を得る¹⁷⁾ことで、カメラの外部パラメータを求めている。

一方、我々が提案した手法¹⁵⁾では、Simonらの手法と同様に複数の自然平面を利用するが、平面の配置に対する制約がなく、カメラの外部パラメータを毎フレーム独立に求めることができる。しかし、自然平面を自動的に認識し、リアルタイムで平面ごとに特徴点を分割することは非常に難しいため、文献¹⁵⁾で行った検証実験では、オフラインシステムを構築するにとどまっている。

そこで、自然平面の代わりに、AR-Toolkitで用いられるような2次元平面マーカを用いてこの手法を応用すると、複数の平面を同時に自動検出できるとともに、マーカを事前に計測する必要がなくなるので、任意の位置姿勢に配置した複数のマーカを利用して、オンラインのARシステムを構築することができる。本システムを利用すれば、好きな場所に適当にマーカを置くだけで、広い範囲を移動可能なオンラインのARが簡単に実現できる。これは、机の上などの小規模空間はもちろん、利用するマーカの数を増やせば、大規模な空間にでも適用可能である。

本システムの流れを図1に示す。2章では、文献¹⁵⁾で提案した位置合わせの理論について説明する。次に、本論文で新たに提案する、マーカを用いたオンラインシステムへと拡張するための手法について3章で述べる。また、本システムを用いて行った実験および結果を4章で示す。

2. 3次元射影空間による位置合わせ手法

ARにおける一般的な位置合わせ手法では、位置合わせする仮想物体の座標系を、現実世界のworld座標系で表現しておく。そして、world座標系と画像座標系(カメラ座標系)の関係に相当するカメラパラメータ(射影行列)をフ

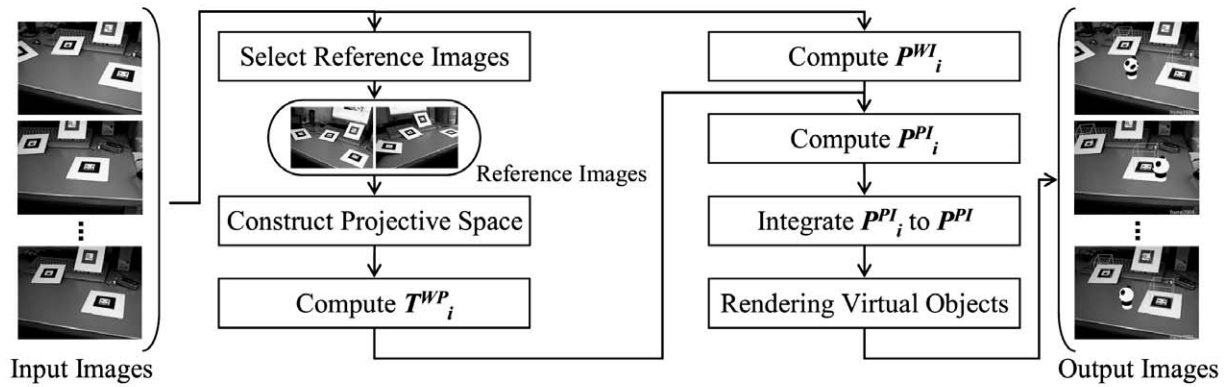


図 1 本システムにおける処理の流れ。
Flow of processing in our system.

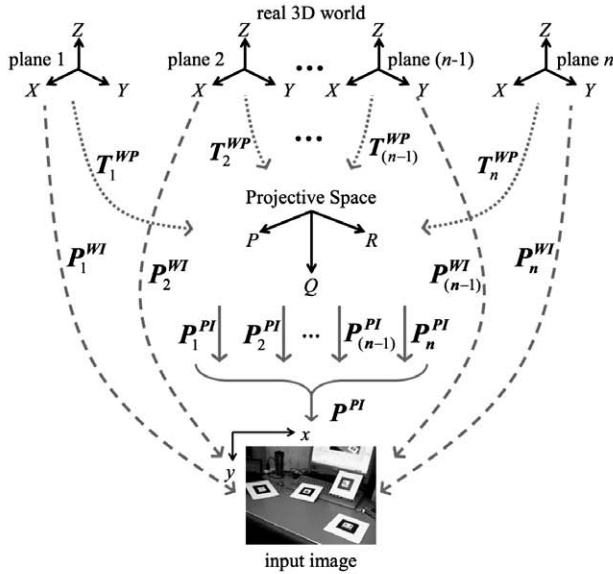


図 2 各座標系の関係。
Relationship among three coordinate systems.

レーンごとに求め、そのパラメータによって仮想物体座標を変換することで、仮想物体を画像上に重畳表示している。

複数の平面を用いる手法において、各平面に対してそれぞれ独立に world 座標系を定義し、各 world 座標系からの射影行列を求めると、当然のことながら、平面が切り替わるたびに仮想物体の座標系が変わってしまう。常に同一の world 座標系で表現された仮想物体を重畳表示するためには、平面同士の 3 次元位置関係をあらかじめ求めておく必要がある。

そこで我々は、2 枚の参照画像から構築される 3 次元の射影空間を用いて、3 次元位置が未知な複数平面の相対的關係を推定し、仮想物体を常に同一の座標系で表すことのできる手法を提案した。本手法における、各平面に設定した 3 次元座標系 (world 座標系)、入力画像の 2 次元画像座標系、および射影空間座標系の関係を図 2 に示す。ここでは、 n 枚の平面を利用することにする。

まず、現実世界に存在する平面 i ($1 \leq i \leq n$) に対して、それぞれ独立に 3 次元の world 座標系を設定する。そして、

これらの 3 次元位置関係を間接的に推定するために、すべての平面が撮影されている 2 枚の画像 (参照画像) を用いた射影復元によって、3 次元の射影空間を構築する。この射影空間に対する各 world 座標系 i からの変換 T_i^{WP} をそれぞれ求めると、射影空間を介することで、各平面の 3 次元座標系間の相対的關係を表すことができる。そこで、各平面 i の world 座標系から画像座標系への変換を表す射影行列 P_i^{WI} をそれぞれ求め、射影空間によって得られた平面の相対的關係を用いると、次式のような関係が成り立つ。

$$P_i^{PI} = P_i^{WI} (T_i^{WP})^{-1} \quad (1)$$

この変換行列 P_i^{PI} は、すべて射影空間座標系から画像座標系という同一の座標系間の変換を表している。そこで本手法では、これらすべての平面 i についての変換行列 P_i^{PI} を、最小 2 乗法により一つの変換行列 P^{PI} に統合することで、射影空間座標系から画像座標系への変換を一意に決定する。

以上のような手順により、あらゆるフレームにおいて、その画像中に見えている平面 i に対応する T_i^{WP} と P_i^{WI} から P_i^{PI} を求め、 P^{PI} を算出することができる。つまり、どの平面が画像に写っているかということに依らず、常に同一の 3 次元座標系である射影空間から画像座標への変換行列を求めることができるのである。

ここで本手法では、仮想物体を表す 3 次元座標を、射影空間座標系で表現しておく。具体的には、まず複数の平面マーカの中から 1 枚を選択し、その平面マーカを基準とした 3 次元座標系において、仮想物体の 3 次元座標を記述した後に、射影空間座標系での 3 次元座標 X_V へとあらかじめ変換しておく。そして、入力画像列に対して毎フレーム算出される P^{PI} によって、射影空間座標系で表されている仮想物体の 3 次元座標 X_V を、画像座標 x へと変換し、画像上へ重畳表示する。

$$x = P^{PI} X_V \quad (2)$$

この射影空間は、構築する際に用いた平面構造が変化しない限り同一の 3 次元座標系であるため、各平面と射影空間

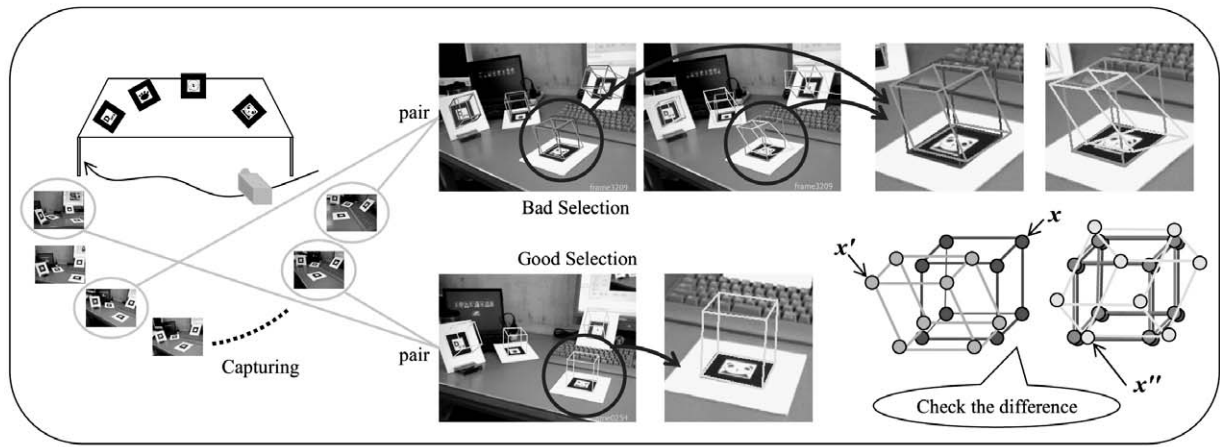


図 3 参照画像の自動選択.
Automatic selection of the reference images.

の関係を表す T_i^{WP} は、射影空間を構築した時点で一度だけ算出すればよい。また、仮想物体の 3 次元座標を射影空間内で表す変換処理も、 T_i^{WP} が算出された後に一度だけ行う。射影空間の構築後は、入力画像列に対して毎フレーム P_i^{WI} を算出し、式 (1) で得られた P_i^{PI} を統合することで、仮想物体が重畳された合成画像を出力する。なお、各処理の詳細については、付録を参照のこと。

3. オンライン AR システムへの応用

本章では、前章で述べた射影空間による位置合わせ手法を応用し、オンラインの AR システムを構築するための手法について説明する。

3.1 参照画像の自動選択

本システムで用いる射影空間は、付・図 1 のように 2 枚の参照画像間の射影幾何によって構築されるため、その参照画像の選び方が重要となる。具体的には、各マーカ単独で算出したカメラの外部パラメータを用いて算出した画像座標と、射影空間を用いて算出した画像座標が一致するような射影空間を構築できるような画像を選ばなくてはならない。

オフラインシステムでは、一度取り込んだ入力画像列の中から手動で 2 枚の画像を選び出していたが、本システムは全てオンラインで処理を行うため、適切な 2 枚の参照画像を自動的に選び出す手法を導入する。

本処理の概要を図 3 に示す。まず、参照画像の候補として、対象となる現実シーン全体をカメラで数十フレーム撮影する。撮影された画像列に対しては、付録 D より、各 world 座標系と画像座標系間の射影行列 P_i^{WI} がフレームごとに算出されている。次に、この画像列から任意に 2 枚を選び出し、仮にそれぞれを参照画像 A, B とすると、両画像間の F-Matrix である F_{AB} は次のように表される。

$$F_{AB_i} = [e_{B_i}]_x P_{B_i} P_{A_i}^{-T} \quad (3)$$

P_{A_i} , P_{B_i} はそれぞれ、参照画像 A, B における平面 i についての射影行列であり、 $P_{A_i}^{-T}$ は P_{A_i} の疑似逆行列であ

る。 n 枚の平面があるとき、 F_{AB_i} は n 通り算出されるので、次式の $result$ が最小となる平面 i による F_{AB_i} を、仮の参照画像 A, B 間における F-Matrix, F_{AB} とする。

$$result = x_B^T F_{AB_i} x_A \quad (4)$$

算出された F_{AB} を用いて、式 (付・1) を満たすような射影空間を仮に構築し、 T_i^{WP} を算出する。さらに、 P_i^{WI} と合わせて P_i^{PI} を平面ごとに算出し、一つに統合した P^{PI} も求める。ここで、次式により算出される三つの画像座標を比較する。

$$x = P_i^{WI} X_W \quad (5)$$

$$x' = P_i^{PI} T_i^{WP} X_W \quad (6)$$

$$x'' = P^{PI} T_i^{WP} X_W \quad (7)$$

x は、ある一つの平面マーカ i から算出された射影行列 P_i^{WI} により、world 座標 X_W を投影した画像座標である。 x' は、平面 i における world 座標を一度射影空間座標系に変換し、さらに画像座標に変換した結果である。 x'' は、world 座標を一度射影空間座標系に変換し、統合した P^{PI} を用いて画像座標へ変換した結果である。 x と x' の比較は、射影空間を構築するための F-Matrix の算出精度および、各平面での各変換行列の算出結果に問題があるかどうかを検証するものである。 x と x'' の比較は、構築された射影空間の精度を表す。これら三つの座標が最も近くなるような参照画像の組合せを選択することで、精度の良い射影空間を自動的に構築する。

3.2 利用するマーカ数の自動選択

付録 D より、本システムでは、それぞれの 2 次元平面パターンマーカに対して、マーカが $X-Y$ 平面となり、それに垂直な方向に Z 軸をとるような 3 次元 world 座標系を毎フレーム設定する。そのため、カメラの視点によってはマーカの認識および座標軸の設定が安定しない場合がある。

図 4 は、ほぼ同一の視点から撮影した画像列であるが、(b) においては、カメラとほぼ平行に配置されているマー

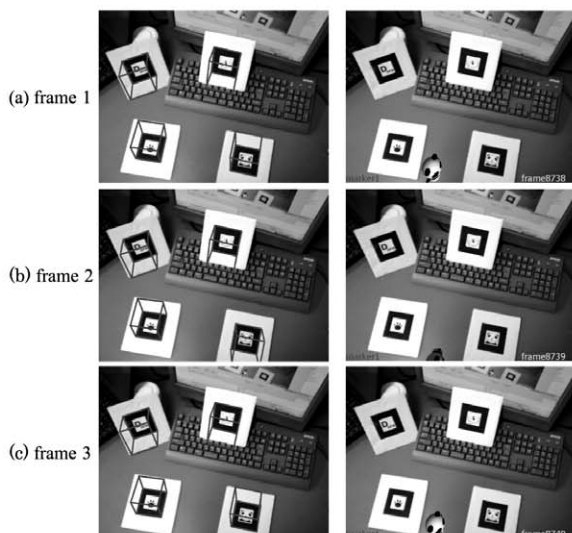


図 4 マーカの認識に失敗している例。
Example of failure of recognition of markers.

カ（右下）の Z 軸が大きく傾いてしまっている。よって、外部パラメータが正しく算出されないで、すべてのマーカの情報を統合してしまうと、(b) の重畳表示結果のように仮想物体を正しい位置に重畳できなくなってしまう。

このようなカメラとマーカの角度による Z 軸の不安定さは、平面形状のマーカを使うためには避けられない問題である。また、照明による反射など影響で、マーカを正しく認識できない場合もある。

オフラインで処理する場合は、各平面から算出される外部パラメータを最急降下法などで最適化することで、正しい外部パラメータに修正してから P_i^{PI} を算出し、一つの P^{PI} へ統合していた。しかし本システムは、すべての処理をオンラインでリアルタイムに行うため、繰り返し最適化による計算量の増加は避けなければならない。

そのため本システムでは、まず画像内に見えているすべてのマーカから算出された P_i^{PI} を用いて P^{PI} を算出する。その P^{PI} を用いて求めた重畳位置が正しくないと判断された場合、利用する平面の枚数を減らし、間違っって認識してしまったマーカ i による P_i^{PI} を含めないことで、計算量を増やさないように対処する。 P^{PI} による重畳結果が正しいかどうかの判断は、3.1 章で述べた考え方と同様に、式 (5) と式 (7) の差を比較することで判定する。

4. 実験

本システムを用いて仮想物体を現実世界に位置合わせし、重畳表示する実験を行った。以下にシステム構成と実験結果を示す。

4.1 システム構成

本システムは、1 台のビデオカメラ (ELECOM UCAM-E1D30MSV) とデスクトップ PC (OS: Windows XP, CPU: Intel Pentium IV 3.6GHz) によって構成される。

撮影された画像の解像度は 640×480[pixel] であり、仮想物体の描画には OpenGL を用いた。実際のユーザ操作およびシステム動作の流れは次のようになる。

Operation process

- (1) **Arrangement**
複数の平面マーカを任意位置・姿勢に配置;
- (2) **Capturing**
参照画像の候補となる画像列を撮影;
- (3) **Selection**
適切な参照画像の組を自動的に選択;
- (4) **Overlay**
仮想物体を重畳表示;

ユーザは、複数の平面マーカを現実世界の好きな場所に配置し、参照画像の候補とするために対象シーン全体を数十フレーム撮影する。このとき本手法では、2 枚の参照画像にそれぞれすべてのマーカが写っていなければならないので、異なる 2 視点からすべてのマーカが撮影できる範囲内にマーカを配置する。システムは、3.1 章で述べた手法によって、撮影された画像列から適切な参照画像の組を自動的に選び出す。適切な画像が選び出せなかった場合は、再びユーザが候補となる画像を撮影し直す。適切な参照画像が選び出されたら、射影空間を構築する。それ以降は、カメラ（ユーザ）の動きに従って、各フレームに存在するマーカを用いて P^{PI} を求め、仮想物体を重畳表示する。

4.2 重畳表示結果

本システムの有効性を示すために、三つの実験を行った。まず実験 1 では、図 6(a) のようにテーブルの上に 4 枚のマーカを適当に配置し、図 6(d) に示す仮想物体を重畳表示した。なお、すべての実験において、仮想物体はマーカの周りを往復しながら直線運動し続けている。

実験 1 の結果を図 5 に示す。仮想物体を追いかけてカメラが移動し、カメラに写るマーカが次々と変化しているが、仮想物体は常に定義した同一の射影空間で表現されており、

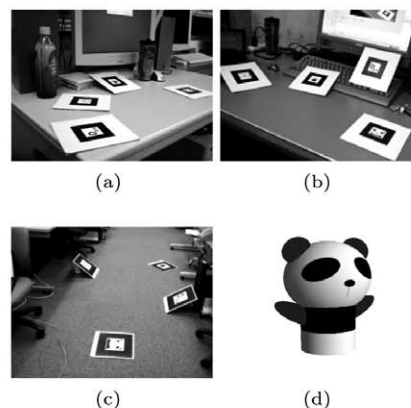


図 6 (a)~(c) 実験 1~3 でのマーカ配置, (d) 仮想物体。
(a)~(c) Arrangement of markers in experiment 1 ~ 3, (d) Virtual object.

正しく重畳表示されていることがわかる。1枚のマークのみを用いた場合は、このように仮想物体が広い範囲を移動してしまうと、マークがカメラに写らなくなってしまうために、位置合わせを継続できなくなってしまう。また、複数のマークを用いた場合は、あらかじめマークの配置を計測しておかなければ、このように仮想物体を常に同一の座標系で表現することはできない。しかし本システムを利用することで、このような適当に配置された複数のマークが利用可能となり、簡単に広い範囲を移動できるARを実現することができたといえる。

実験1では、すべてのマークがほぼ同一平面に近い状態で配置されていたが、実験2では、図6(b)のようにさらに複雑にマークを配置して同様の実験を行った。結果を図7に示す。このような複雑なマークの配置にしても、正しく仮想物体を位置合わせできていることがわかる。ここで、図7の最下段(m)(n)(o)に注目すると、カメラには写っていても認識されていないマークがいくつか存在することがわかる。このように、平面パターンのマークを用いると、カメラの視点によってマークが見えにくい角度があり、認識に失敗してしまうことがある。つまり、複数のマークを同一平面にのみ配置した場合、カメラとマークの見込み角度が小さいフレームでは、すべてのマークが写っているのに認識されない可能性がある。しかし、このように様々な姿勢でマークを配置すれば、常に良い状態で見えるマークが存在するので、カメラの視点に依らず位置合わせを継続することができる。このような配置の場合、従来手法のように、マークの3次元位置を手動で簡単に計測することは難しい。一方、本システムでは、射影空間を構築することで平面同士の相対的な関係を推定できるため、複雑なマークの配置にも対応することができる。

さらに、テーブルの上のような小規模な空間だけではなく、図6(c)のような部屋の中を、等身大の仮想物体が動き回るような実験も行った。結果を図8に示す。このように、人間が歩くような広い空間においても、本システムによって仮想物体が正しく位置合わせできることがわかる。空間が広がるほど、マークの配置を計測するのは難しくなるが、本システムでは自動的にマークの配置を推定することができるため、あらかじめ計測しておく必要がなく、大規模な空間でも簡単にARを行うことができる。

本研究で行った実験における処理速度は、キャプチャおよび画像処理を含めて約12fpsであり、ほぼリアルタイムで合成映像を生成することができた。Augmented Realityの分野において、リアルタイム処理、オンラインシステムというのは非常に重要な要素である。さらに、テーブルの上などの小規模な空間だけでなく、室内全体といった広い空間にも適用できることから、本システムの有効性が実証できたと考えられる。

5. む す び

本論文では、Augmented Realityにおける幾何学的位置合わせ手法として、任意位置姿勢に存在する複数の平面を射影空間によって統合する位置合わせ手法¹⁵⁾を応用し、複数の平面パターンマークを用いたオンラインARシステムを提案した。また、実験により本システムの有効性を示した。

本システムは、複数のマークを用いることで、カメラ・仮想物体の移動可能範囲を広げ、さらに複数のマークを用いる際に必要であった事前の3次元配置計測の手間をなくすことで、簡単にオンラインのARを実現することができる。また、複数のマークを用いても、統合処理の計算量を抑え、すべての処理をオンラインでリアルタイムに行うことができる。

実際に本システムを応用できるアプリケーションとしては、テーブル上で鑑賞可能なARサッカーゲームなどが考えられる。実際のテレビ中継映像のように、メインスタンド側からユーザが観戦すると仮定することで、テーブル上にサッカーフィールドの模型を置き、グラウンド上および逆サイドのスタンドなどにマークを配置し、両ゴールエリア付近から撮影した画像を参照画像として射影空間を構築することで、本手法を適用することが可能である。

今後の展開としては、2枚以上の参照画像から射影空間を構築することや、利用するマークの中の数枚ずつを使って複数の射影空間を構築し、重畳場所ごとに利用する射影空間を変えていくことで、さらに広い範囲で利用可能なアプリケーションとして応用していきたいと考えている。

【文 献】

- 1) R. T. Azuma: "A survey of augmented reality", Presence, pp. 355-385 (1997).
- 2) 田村秀行, 大田友一: "複合現実感", 映情学誌, 52, 3, pp. 266-272 (1998).
- 3) R. T. Azuma: "Recent advances in augmented reality", IEEE Computer Graphics and Applications, 21, 6, pp. 34-47 (2001).
- 4) M. Billinghurst and H. Kato: "Collaborative mixed reality", Proc. of ISMR, pp. 261-284 (1999).
- 5) M. Billinghurst, S. Cambell, I. Poupyrev, K. Takahashi, H. Kato, W. Chinthammit and D. Hendrickson: "Magic book: Exploring transitions in collaborative ar interfaces", Proc. of SIGGRAPH 2000, p. 87 (2000).
- 6) S. Prince, A. D. Cheok, F. Farbiz, T. Williamson, N. Johnson, M. Billinghurst and H. Kato: "3d live: Real time captured content for mixed reality", Proc. of the ISMAR, pp. 7-13 (2002).
- 7) E. J. Umlauf, H. Piringer, G. Reitmayr and D. Schmalstieg: "AR-Lib: The augmented library", Proc. of the ART02, pp. TR-188-2-2002-10 (2002).
- 8) D. Claus and A. W. Fitzgibbon: "Reliable automatic calibration of a marker-based position tracking system", Proc. of the WACV, pp. 300-305 (2005).
- 9) H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev, K. Imamoto and K. Tachibana: "Virtual object manipulation on a table-top ar environment", Proc. of the ISAR, pp. 111-119 (2000).
- 10) Y. Genc, S. Riedel, F. Souvannavong, C. Akinlar and N. Navab: "Marker-less tracking for ar: A learning-based approach", Proc. of the ISMAR, pp. 295-304 (2002).
- 11) E. Foxlin and L. Naimark: "Miniaturization, calibration & accuracy evaluation of a hybrid self-tracker", Proc. of the ISMAR, pp. 151-160 (2003).
- 12) E. Foxlin and L. Naimark: "Vis-traker: A wearable vision-inertial self-tracker", Proc. of Virtual Reality, pp. 199-206 (2003).

- 13) E. Foxlin, Y. Altshuler, L. Naimark and M. Harrington: "Flight-tracker: A novel optical/inertial tracker for cockpit enhanced vision", Proc. of the ISMAR, pp. 212-221 (2004).
- 14) D. Kotake, S. Uchiyama and H. Yamamoto: "A marker calibration method utilizing a priori knowledge on marker arrangement", Proc. of the ISMAR, pp. 89-98 (2004).
- 15) 植松裕子, 斎藤英雄: "任意複数平面の統合による拡張現実感のための画像ベース位置合わせ手法", 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2005, pp. 265-272 (2005).
- 16) G. Simon and M. Berger: "Reconstructing while registering: a novel approach for markerless augmented reality", Proc. of the ISMAR, pp. 285-294 (2002).
- 17) G. Simon and M. O. Berger: "Real time registration known or recovered multi-planar structures: application to ar", Proc. of the BMVC, pp. 567-576 (2002).

〈付 録〉

A. 射影復元による射影空間

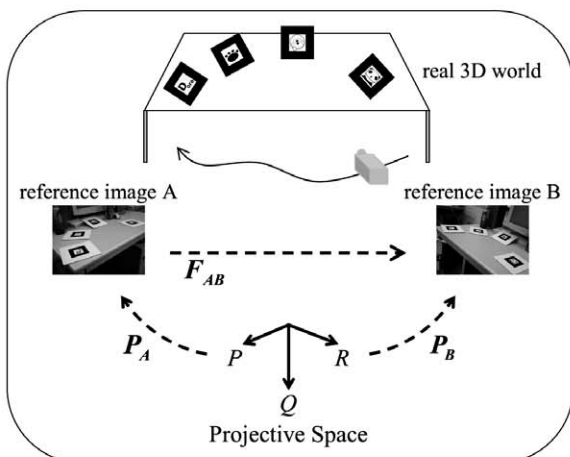
本手法で用いる射影空間は、2枚の画像による射影復元の原理に基づいて構築される。図1のように、利用する平面が撮影されている2枚の画像を参照画像A、Bとすると、両画像間のエポポーラ幾何により、射影空間は次のように表される。

$$P_A = [I | 0], \quad P_B = \left[-\frac{[e_B]_{\times} F_{AB}}{\|e_B\|^2} | e_B \right] \quad (\text{付} \cdot 1)$$

F_{AB} は参照画像AからBへのF-Matrix, e_B は参照画像Bにおけるエポポール, $[e_B]_{\times}$ は e_B の歪対称行列である。

ある平面の world 座標 $X_W(X, Y, Z)$ が参照画像A、B上でそれぞれ $x_A(u_A, v_A)$, $x_B(u_B, v_B)$ へ投影されるとき、射影空間座標 $X_P(P, Q, R)$ との間には次のような関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} p_A^1 - u_A p_A^3 \\ p_A^2 - v_A p_A^3 \\ p_B^1 - u_B p_B^3 \\ p_B^2 - v_B p_B^3 \end{bmatrix} X_P = 0 \quad (\text{付} \cdot 2)$$



付・図1 射影復元による3次元射影空間。

3D projective space constructed by projective reconstruction.

なお, p_A^j , p_B^j は, P_A , P_B の第 j 行ベクトルである。

B. 各 world 座標系から射影空間への変換

各平面 i の world 座標系と射影空間座標系の間は、式(付・3)のような変換式によって関係付けられる。

$$X_P \simeq T_i^{WP} X_W \quad (\text{付} \cdot 3)$$

両座標系とも3次元であるため、この変換行列 T_i^{WP} は 4×4 の行列である。よって、両座標系の5点以上の対応点を得ることによって算出できる。そこで、式(付・2)の 4×4 の行列を特異値分解すると、 x_A , x_B , つまり、 X_W に対応する射影空間内の座標 X_P が得られることから、各座標系間でそれぞれ5点以上の対応点を計算し、最小二乗法により各 T_i^{WP} を得る。

C. 仮想物体座標系の定義

本手法では、仮想物体の位置・姿勢を表す3次元座標を、射影空間座標系で表現している。以下にその手順を示す。

まず、仮想物体を現実世界に重畳表示するときの3次元座標系の基準として、利用する複数平面の中から1枚の平面を選択し、その平面(平面 i とする)を $Z=0$ とする3次元の world 座標系 (X - Y - Z 座標系)において、仮想物体の3次元座標を記述しておく。この座標を X_V' とする。次にステージ1において、付録Aおよび付録Bで述べた処理によって、射影空間を構築し、平面 i の world 座標系から射影空間座標系 (P - Q - R 座標系) への変換行列 T_i^{WP} を算出する。そして、この変換行列 T_i^{WP} を用いて、平面 i の world 座標系で記述していた仮想物体の3次元座標を、射影空間座標系の3次元座標へと式(付・4)のように変換する。この3次元座標が、式(2)における X_V となる。

$$X_V = T_i^{WP} X_V' \quad (\text{付} \cdot 4)$$

この変換処理は、ステージ1において、射影空間の構築、変換行列 T_i^{WP} の算出処理の後に、あらかじめ一度だけ行う処理である。そのため、この後のステージ2において実際に仮想物体を重畳する処理を行う際には、その入力画像列に対してどのように平面 i が検出されようと、ステージ1でこのように一度定義した仮想物体座標 X_V は不変であり、ステージ2における平面検出誤り等の影響を受けずに X_V が表現され続けることになる。

D. 射影行列の算出

図2のように、各平面が $Z=0$ の平面になるような3次元座標系(world座標系)をそれぞれ独立に設定し、各 world 座標系 i と画像座標系との間の射影行列 P_i^{WI} をそれぞれ算出する。

$$x \simeq P_i^{WI} X_W \quad (\text{付} \cdot 5)$$



付・図 2 各平面に対する world 座標系の例。
Example of 3D world coordinate system for each plane.

文献¹⁵⁾で提案した手法では、現実世界に存在する複数の平面構造を用い、それらの平面上の特徴点から算出される Homography を利用して、各平面の world 座標系から画像座標系への射影変換行列を求めていた。本論文で提案するオンラインシステムでは、現実世界の平面構造の代わりに 2次元平面パターンのマーカを用いるので、AR-Toolkit⁴⁾⁵⁾のアルゴリズムによって各マーカの world 座標系に対するカメラの外部パラメータを求め、あらかじめ別の手法で求めておいた内部パラメータと組み合わせることで、射影行列 P_i^{WI} を算出する。

E. 射影空間から画像座標系への変換

各平面 i の world 座標系から射影空間への変換 T_i^{WP} は、射影空間が構築された時点で算出される。そこで、入力画像列に対して射影行列 P_i^{WI} をフレームごとに算出し、式 (1) により各 world 座標系を基準とした射影空間から画像座標系への変換行列 P_i^{PI} を求める。これらは全て射影空間座標系から画像座標系への変換を表しているため、本来、平面に依らず同一となるはずである。そこで、最小二乗法によって 1 つの変換行列 P^{PI} に統合する。

$$x = P^{PI} X_P \quad (\text{付} \cdot 6)$$

ここで付録 C より、位置合わせする仮想物体の座標 X_V は射影空間座標系で表されているので、式 (2) より、統合された P^{PI} を用いて、現在のフレームにおけるカメラの動きに合わせた画像座標に仮想物体を投影する。



うまつ ゆうこ
植松 裕子 2006 年慶應義塾大学大学院修士課程修了。現在、同大学院理工学研究科開放環境科学専攻後期博士課程に在学中。コンピュータビジョン、複合現実感に関する研究に従事。学生会員。



さいとう ひでお
斎藤 英雄 1992 年慶應義塾大学大学院博士課程修了。同年同大学助手、1995 年専任講師、2001 年助教授、2006 年情報工学科教授。博士（工学）。コンピュータビジョン、画像処理に関する研究に従事。1997～1999 年日本学術振興会海外特別研究員として米国カーネギーメロン大学ロボティクス研究所へ留学。2000～2003 年科学技術振興事業団さきがけ 21『情報と知』研究員。正会員。

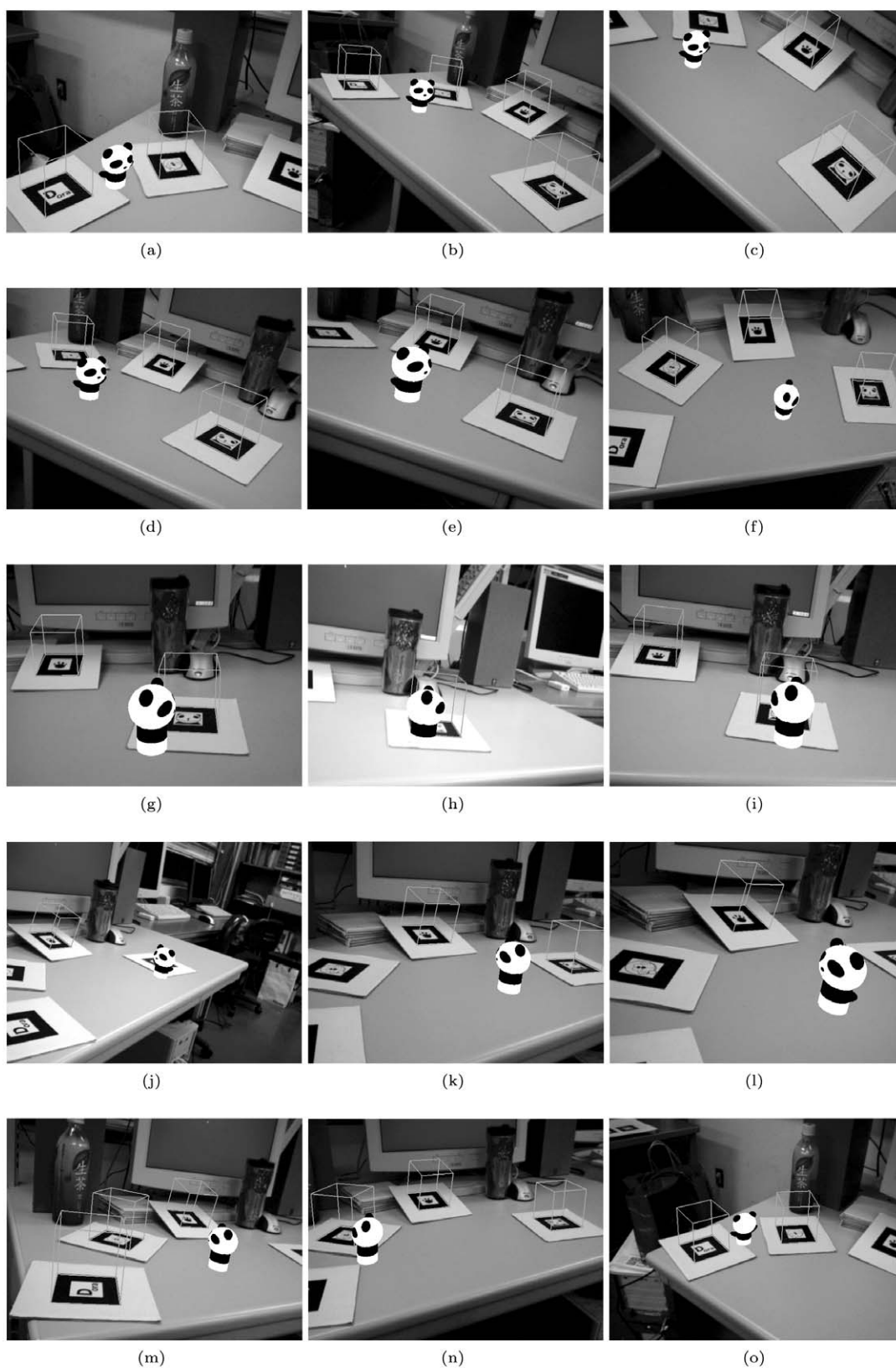


図 5 実験 1 における重畳表示結果.
Overlaid image sequence of a virtual object in experiment 1.

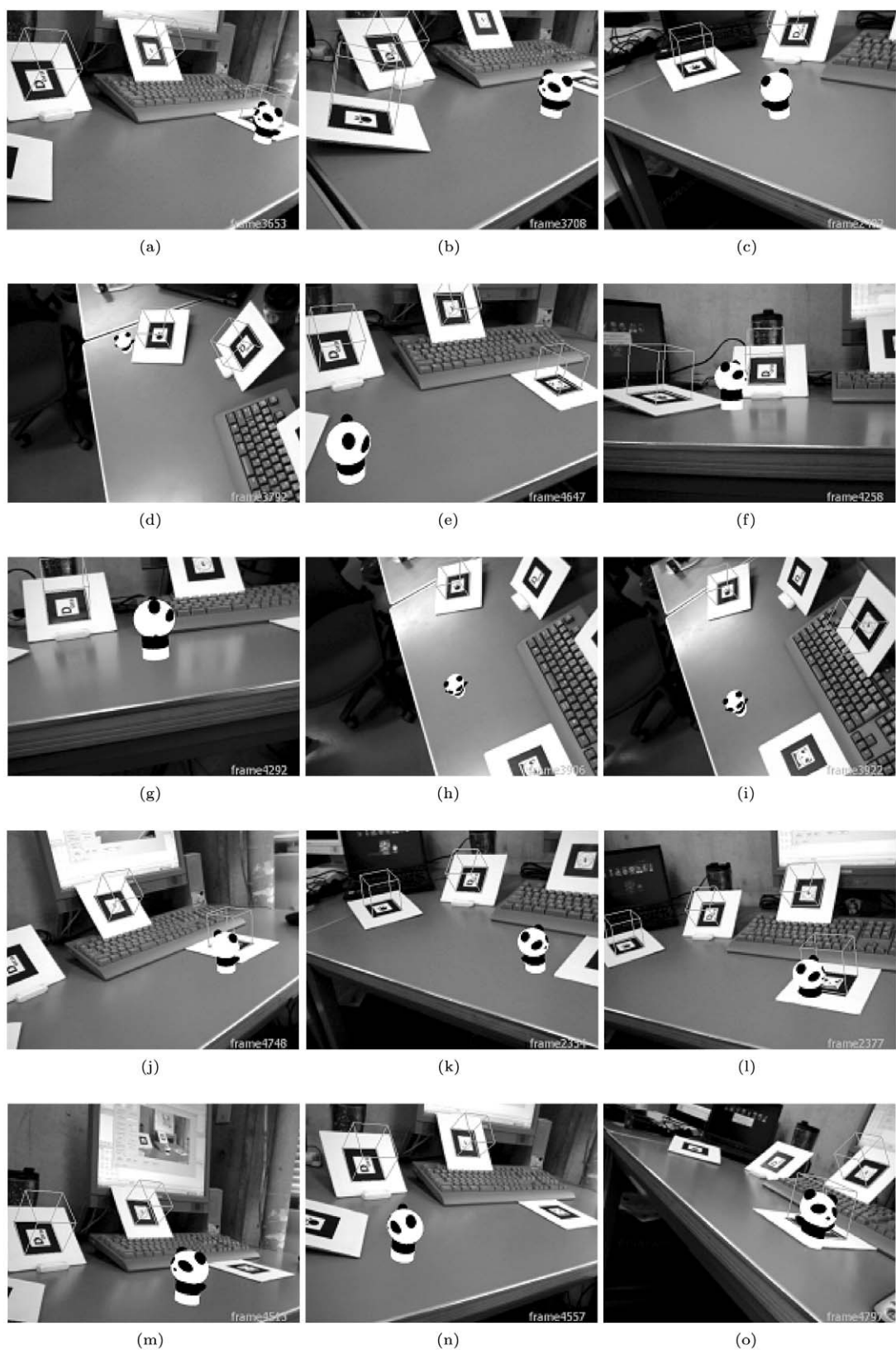


図 7 実験 2 における重畳表示結果.
Overlaid image sequence of a virtual object in experiment 2.

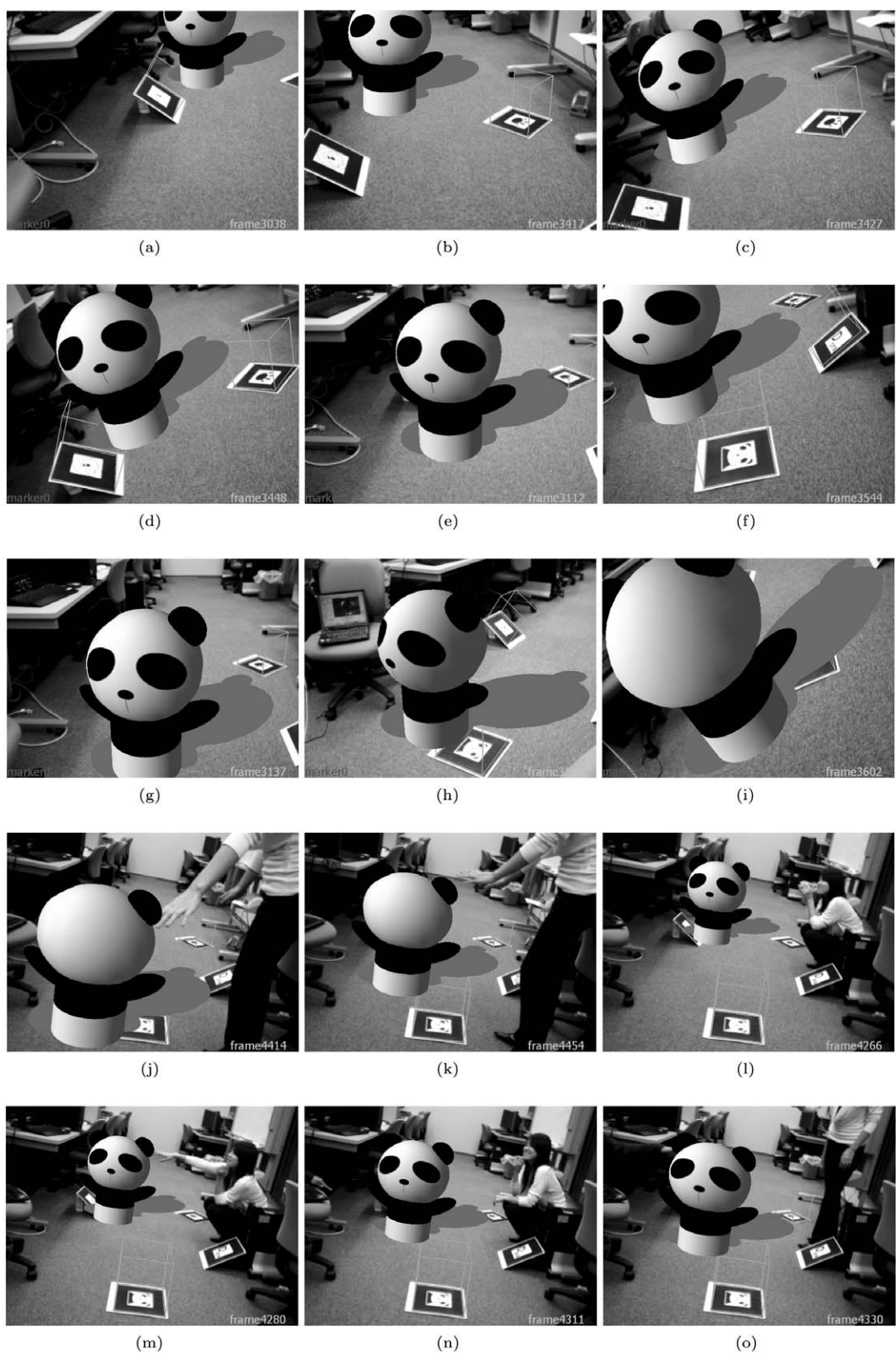


図 8 実験 3 における重ね表示結果.
Overlaid image sequence of a virtual object in experiment 3.