

実物体と仮想物体の自然な力学的相互作用を可能としたARシステム

著者	竹内 一平
出版者	法政大学大学院情報科学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 情報科学研究科編
巻	13
ページ	1-6
発行年	2017-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021526

実物体と仮想物体の自然な力学的相互作用を可能とした AR システム

Natural Physical Interaction Between Real and Virtual Objects in Augmented Reality Systems

竹内 一平 *

Ippei Takeuchi

法政大学大学院 情報科学研究科 情報科学専攻

Email: ippei.takeuchi.8p@stu.hosei.ac.jp

Abstract—In this paper, we present a method for implementing natural, real object-like physical interaction between real world objects and augmented virtual objects in Augmented Reality (AR) systems. First, we implemented physical interaction between virtual objects and the surrounding real world environment, which most AR contents lack, by reconstructing the detailed geometry of real world scenes. Second, we simulated collision response between pairs of colliding real and virtual objects using the corresponding premeasured coefficient of restitution (COR) to consider the differences of COR between different collision pairs. In addition, occlusion and shadowing between real and virtual objects was also implemented to prevent the other interactions from looking unnatural. User evaluation results show that our method was able to reproduce interaction between real and virtual objects which test subjects felt was natural for virtual objects representing real objects which has a wide-varying COR value against each collision.

1. 研究背景

近年, Virtual Reality (VR) や Augmented Reality (AR) に関する技術が急激に発達しているため VR, AR を用いた新しい体験が可能なコンテンツが世間に普及し始めている. しかし, 様々な VR コンテンツが台頭する一方で AR コンテンツはまだそれほど世間一般に普及していない. この主な原因は現在の AR コンテンツはまだ現実の拡張というのを実感できるほどの没入感がなためであると推測される.

一般的な AR コンテンツにおいてユーザーが没入感を得るためには提示される仮想物体がリアルであると認識させなければならない. これを解決するために過去の研究では主にレンダリングを工夫することで仮想物体の外見をより周辺の現実世界になじませる手法が提案されている [1][2][3]. これらの手法の他に没入感を得ることに重要となるのが実物体と仮想物体の相互作用の実現である. なぜなら, 実物体と仮想物体の間でオクルージョン (お互いを遮る様子), シャドーイング (お互いに影を落としあう様子), 衝突と跳ね返りなどを再現出来なければ仮想物体の挙動を不自然と感じてしまい, 没入感が低下してしまうからである.

AR コンテンツでは仮想空間上と現実空間上の物体が混在することになるため違う空間内にある物体同士の相互作用を実現しなければならない. そのため AR コンテンツ内ではこれらの相互作用は違和感のある挙動になることが多く, 没入感が阻害されがちである.

1.1. 目的

AR コンテンツにおける実物体と仮想物体の基礎的な相互作用は様々な手法を用いて既存研究にて改善されつつある. その中でオクルージョン [4][5][6] やシャドーイング [7] などお互いの見た目に対して与える相互作用 (視覚的相互作用) に関しては特に研究が進んでいる. それに対し, 実物体と仮想物体の間の衝突やそれによる作用のシミュレーション [8][9][10] などお互いの力学的挙動に対して与える相互作用 (力学的相互作用) に関しては視覚的相互作用ほど研究が進んでおらず, 特に仮想物体の力学的挙動の自然さそのものについてまだあまり追求されていない. よって, これから AR コンテンツの没入感をより向上させるためには現状の仮想物体の力学的挙動の不自然な部分をいかに解消していくかが重要となる.

そこで, 本研究では仮想物体の力学的挙動に対する影響が大きい二つの課題点を解消することで今までよりも自然な力学的相互作用を実現する. 一つ目は, 仮想物体が周辺の環境から受ける力学的相互作用の有無である. ここでは現在多くの AR コンテンツで不足していた周辺の環境との衝突やそれによる跳ね返りなどの力学的相互作用を環境の詳細な地形情報を用いてシミュレートすることでこれを解決する. 二つ目は, 仮想物体と実物体との衝突時における跳ね返りの違いの考慮である. こちらは実際のボールを表す仮想のボールを用いて実物体と相互作用を行う際に, 衝突した物体に応じて事前に計測した反発係数を用いて作用をシミュレートすることでこれを解決する. 最後にこれらの課題点の解決に加えて実物体と仮想物体の間のオクルージョンとシャドーイングも同時に実現した AR システムを実装し, 実験を通して本手法の有効性を評価する.

2. 関連研究

2.1. AR における視覚的相互作用の実現

実物体と仮想物体の間の視覚的な相互作用を実現する為には実物体の形状や位置姿勢などの情報を仮想空間内に取り込む必要がある. その為の手段としてモデルベースの手法が深度ベースの手法が用いられることが多い.

モデルベースの手法は実物体を表す 3D モデルを事前に作製し, AR マーカーなどを用いて仮想空間と現実空間の座標を重ね合わせ, 実物体と 3D モデルの位置合わせを行うものである. 深度ベースの手法では 3D モデルの代わりに RGBD カメラやステレオカメラを用いて取得した実物体の深度情報を計測することで実物体の詳細な形状を得る. この時, カメラの位置姿勢が既知で

* Supervisor: Prof. Koike Takafumi

あれば正確に深度情報を実物体に合わせる事が出来る。一般的にはこれらの手法で実物体の形状の情報を取り込んだ後、それを用いて仮想物体とのインタラクションを仮想空間上でシミュレートしその結果を現実世界の環境の映像に合成することで相互作用を実現している。

Fortin らの研究ではモデルベースと深度ベースの二つの手法それぞれを用いて実物体と仮想物体間のオクルージョンを実現する手法を提案した [4]。この際、モデルベースの手法においてまず立方体や円柱などの実物体の形状を簡単に表す 3D モデルを実物体に重ね合わせ、その後カメラの映像上から得られた実物体の輪郭に合わせてモデルの余分な部分を取り除くことでどちらの手法においても実物体が変形、移動した場合に正確に物体間のオクルージョンを実現することが可能となった。

Haller らの研究では AR コンテンツにおける影の整合性による没入感の向上に注目し、実物体と仮想物体がお互いに落とす影を合成映像内に描画する手法を提案した [7]。仮想空間上で実物体を表す 3D モデルと映像に合成する仮想物体がお互いに影を落とす領域を shadow volume を用いて求め、ここで得られた影を仮想物体とともにカメラからの映像に合成することで相互のシャドウイングを実現している。なお、違和感無く影を映像に合成する為には現実世界の環境の光源位置が必要になるが、この研究ではこれを手動で設定している。

モデルベースや深度ベースの手法以外にも実物体の輪郭を基にオクルージョンを実現する手法も存在する。Tian らはカメラから得られた RGB 映像のみを用いて実物体と仮想物体のオクルージョンを実現する手法を提案した [5]。この手法ではユーザーが事前に映像内の最初のフレームから仮想物体を遮る実物体を指定し、その後リアルタイムでその実物体のトラッキングを行う。合成の為に映像に仮想物体を描画する際、映像内で指定された実物体に該当する領域のみ再度その上から描画することでオクルージョンを実現する。

Du らは RGBD カメラから得られた深度情報を基にオクルージョンを実現する際に生じるオクルージョン境界のズレを修正する手法を提案した [6]。この手法では深度画像内の実物体の輪郭を RGB 画像内の輪郭に合わせるように修正することで生の深度情報を用いた時よりも遥かに自然なオクルージョンを実現している。

2.2. AR における力学的相互作用の実現

視覚的相互作用と同時に、AR コンテンツの没入感を高める為には実物体と仮想物体の力学的な相互作用の再現が必要不可欠となる。力学的相互作用は視覚的相互作用ほど大きく映像の整合性に影響しないが、それでも仮想物体の力学的挙動が我々の知識、記憶の中にある物体の直感的な挙動にある程度従っていないければ十分な没入感を得ることができない。

Breen らの研究ではモデルベースと深度ベースの二手法それぞれによって実物体と仮想物体の間で簡単な衝突判定を実現している [8]。この手法では仮想物体の bounding box を用いて衝突を検知している上に衝突による仮想物体への反作用を計算していない為、より正確に力学的作用を表現する為にはさらなる工夫が必要となる。

Beany らはフォークリフトのようなロボットを用いて複数の仮想物体と力学的なインタラクションを行うシステムを考案した [9]。また、モデルベースの手法を基に物理エンジンをを用いて物体間の衝突やそれによる作用をシミュレートすることで実物体同様に近い感覚を得ることに成功している。

これらの手法のように実物体と仮想物体の間の力学的相互作用の基礎的な部分に関する研究ははそれなりに進んでいる為、近いうちに一般的な AR コンテンツにこれらの成果が反映されると予想される。これからさらに AR コンテンツの没入感を高めるには力学的相互作用による仮想物体の力学的挙動そのものの自然さに目を向ける必要があるが、こちらに関してはあまり研究が進んでいない為まだ改善の余地が残っている。

3. 仮想物体と現実世界の環境の間の力学的相互作用

AR コンテンツにおける仮想物体と実物体の間の力学的相互作用の中でも特に仮想物体の力学的挙動への影響が大きいのが仮想物体と現実世界の環境との力学的相互作用の実現である。一般的に良く用いられるカメラ映像に仮想物体を合成する AR コンテンツでは主に AR マーカーの位置姿勢推定や映像からの特徴点抽出による平面推定を行い、その平面を作業場として仮想物体との相互作用を行う。しかし、このようなコンテンツでは現実世界の環境の形状についての情報はそれ以上持たず、合成された仮想物体がその平面以外の環境から受ける力学的作用をシミュレートすることができない。これは明らかに不自然な挙動であり、AR コンテンツの没入感を大きく削ぐ要因となるため改善すべきである。

そこで、それを解決するために本研究では現実世界の環境の詳細な地形情報を用いて周辺的环境から受ける力学的相互作用のシミュレーションを行う。その結果、図 1 のように仮想物体と周辺的环境の相互作用を再現することが可能となる。

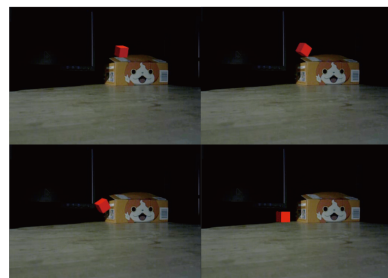


図 1. 環境から仮想物体への作用のシミュレーションの様子

3.1. プロトタイプ AR システムの作製

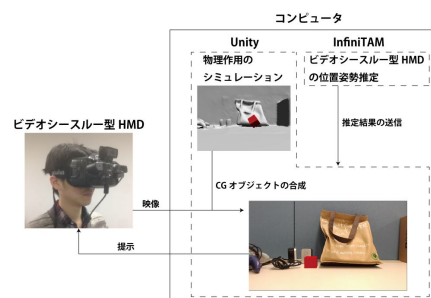


図 2. AR システム構成図

本手法では最終的に実装する自然な力学的相互作用を実現した AR システムのプロトタイプとして映像に合成する仮想物体と現実世界の環境の間の力学的作用を

考慮したビデオスルー型 HMD 用の AR システムを製作する。AR システムの構成図を図 2 に示す。

本 AR システムはゲームエンジンである Unity を用いて実装する。まず事前に Unity の仮想空間上に Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) の手法である InfiniTAM[11] を用いて作製した環境のマップとなる 3D モデルを配置する。その後システム実行時にその 3D モデルの上にカメラの映像に合成する仮想物体を配置し、Unity の物理演算機能を用いて仮想物体が環境から受ける力学的作用をシミュレートする。このシミュレーションの様子を Unity の仮想空間上の仮想カメラで撮影し、合成用の映像を得る。仮想カメラは InfiniTAM を用いて推定されたビデオスルー型 HMD の位置姿勢のパラメータを用いて動かす。この時、システム実行開始時にビデオスルー型 HMD と仮想カメラの位置を特定の初期位置に合わせるによりマップ内での仮想カメラの位置姿勢を環境内のビデオスルー型 HMD の位置姿勢と一致させる。この初期位置はマップの構築を行った時のビデオスルー型 HMD の初期位置とする。仮想カメラから得られた映像を RGB カメラから得られた環境の映像に合成し、Unity を通して合成結果をビデオスルー型 HMD に提示する。

3.2. マップの平滑化

本 AR システムでは現実世界の環境から仮想物体への作用のシミュレーションを行うための前準備として InfiniTAM[11] を用いて環境のマップとなる 3D モデルを構築する。マップを作製する時、InfiniTAM の実行を開始した時のビデオスルー型 HMD の位置をゲームテープなどで記録する。作成される 3D モデルの原点はこの地点となる。この地点を本 AR システムの実行開始地点とし、3D モデルの原点を仮想カメラの初期位置とすることでビデオスルー型 HMD と仮想カメラの初期位置を一致させる。

また、この時作製されたマップは環境の地形情報をおおよそ正確に再現しているが、RGBD カメラから得られる深度にはノイズが含まれる為平面部分に細かな凹凸ができてしまう。同時に、単純な平面部分においても多くの頂点を用いて面を構築してしまうため、仮想物体がその平面に衝突した時に跳ね返る方向が安定しない。

そこで、本 AR システムでは作製したマップに対して簡単な平面仮定を行うことで凹凸を抑え、同時マップの平面部分では二回、それ以外の部分では一回ダウンサンプリングを行うことで 3D モデルの元の形状を保ったまま平滑化を図る。

まずマップに含まれている頂点の数を減らすためにマップの余分な部分を削除し、ダウンサンプリングを行う。そのために点群に変換したマップを任意の大きさのボクセルで分割し、各ボクセル内に存在する n 個の頂点からなる頂点群の重心点 $P(x_g, y_g)$ を以下の式を用いて求める。

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, y_g = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (1)$$

ここで得られた重心点 P を頂点群の代わりにマップの頂点として置き換えることでマップの大まかな形状を保ちながら平滑化を行う。その後マップから RANSAC を用いて平面部分を検出し、検出した各平面部分に対して一度目より大きなボクセルを用いて先ほどと同様にダウンサンプリングを行う。最後に得られた点群から Ball Pivoting を用いてマップを再構築する。ここで得ら

れたマップ (図 3) を用いて仮想物体との力学的相互作用のシミュレーションを行う。

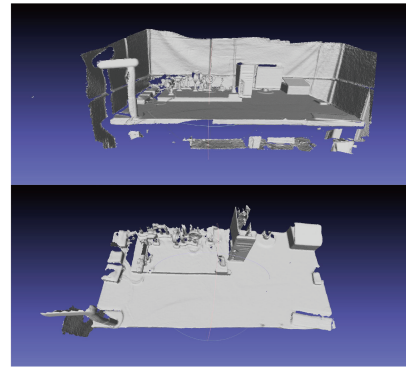


図 3. 修正前/修正後の 3D モデル

3.3. 提示映像の作製

本手法において仮想カメラから得られた映像を正確に環境の映像に合成する為には仮想カメラと RGB カメラの位置姿勢を合わせる必要がある。InfiniTAM によって得られる HMD の位置姿勢のパラメータは厳密に言うと RGBD カメラの中の深度カメラのものである。しかし、HMD に提示する現実世界の環境の映像は RGB カメラから得られたものである為、このパラメータをそのまま仮想カメラの位置姿勢として扱ってしまうと仮想カメラの位置姿勢は RGB カメラと一致せず合成用の映像と実際の映像の間にズレが生じてしまう。

そこで、InfiniTAM によって得られた位置姿勢のパラメータに RGBD カメラと RGB カメラの間の位置、回転のズレを表すオフセットを加えることによって仮想カメラの位置姿勢を修正し RGB カメラとの位置合わせを行う。なお、この位置合わせは仮想カメラと RGB カメラ両方の映像を同時に目視しながらそれらがなるべく一致するように手動でオフセットを調整することで行う。

4. 実物体の反発係数を用いた力学的相互作用のシミュレーション

3 章では AR コンテンツに不足していた仮想物体と現実世界の環境との力学的相互作用を実現する AR システムを実装した。そこで、次はその作用のシミュレーションにおいて解決すべき課題点に注目する。

近年の AR コンテンツにおける実物体と仮想物体の間の力学的相互作用に関する研究の多くは衝突判定やその作用のシミュレーションに注目している。しかし、この作用のシミュレーションでは衝突する物体同士の反発係数の違いが考慮されておらず、仮想物体はどの物体と衝突しても同じ跳ね返り方しかない。これは場合によっては明らかに不自然な力学的挙動を示すことになる。

そこで、本研究では 3 章で提案した環境の地形情報を用いた力学的相互作用の実現に加えて、事前に計測した環境上の実物体と仮想物体の間の反発係数を用いて作用のシミュレーションを行う。

4.1. システム概要

本手法では 3 章の AR システムを拡張した現実世界の環境上の実物体と仮想のボールとの相互作用におい

て衝突する物体の組に対応した反発係数を用いてシミュレーションを行うビデオスルー型 HMD 用の AR システムを作製する。

本 AR システムは 3 章に引き続き Unity を用いて実装する。まず、四種類のボール（テニスボール、ピンポン玉、ポリスチレン製ボール、スーパーボール）と現実世界の環境上に存在する実物体それぞれの間の反発係数を計測する。次に、環境上の実物体を表す仮想物体を作製し、それぞれの対となる実物体と位置合わせを行う。その後、前述の四種類のボールを表す仮想のボールを用いてそれらの仮想物体との相互作用を開始する。この時、仮想のボールが実物体を表す仮想物体と衝突する際に最初に計測したその仮想物体が表す実物体との反発係数を用いて作用のシミュレーションを行う。最後にこのシミュレーションの様子を仮想カメラで撮影し、HMD の前面に取り付けたステレオカメラから得られた現実世界の環境の映像上に仮想カメラから得られた映像を合成する。また、仮想カメラの映像を描画する際に実物体を表す仮想物体を透明であるが背後にある他の仮想物体を遮り、かつ互いに影を落とす/受けるようにする。これにより実物体と仮想物体が視覚的かつ力学的な相互作用を行う様子を再現することが可能となる。

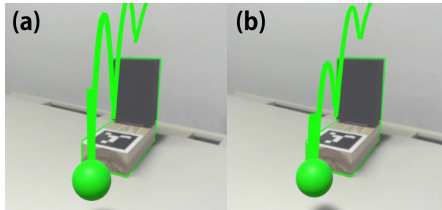


図 4. 実物体との衝突による作用のシミュレーションの様子。(a) 事前に測定した反発係数を用いた場合、(b) 固定された反発係数を用いた場合

4.2. 反発係数の測定

環境上に存在する全ての実物体と仮想物体の衝突による作用を再現する為には全ての衝突が起こりうる物体の組み合わせにおいて反発係数を求める必要がある。ボールと他の物体の間の反発係数の計測においては既存研究にて自由落下におけるボールの跳ね返りが収まるまでの時間を基に反発係数を算出する手法 [12]、マイクやオシロスコープを用いて録音したボールの衝突音の時間間隔を基に反発係数を算出する手法 [13][14]、垂直でない跳ね返りにおけるボールの回転や速度を基に反発係数を算出する手法 [15] など精密な計測を行う手法がいくつか存在する。しかし、本研究ではおおよその反発係数を推定し、衝突する物体に応じたボールの挙動の違いを再現できれば良いとし、簡単に測定できるボールの自由落下における跳ね返りの高さを基に反発係数を算出する。

本研究では図 4 のように木製とゴム製のブロックを組み合わせた物体が配置してある机を環境として使用する為、4.1 節で述べた 4 種類のボールと机、木製ブロック、ゴム製ブロック、床それぞれとの衝突における反発係数を計測する。その為には事前に決められた高さ H からそれぞれのボールをそれぞれの環境上の物体の上に複数回自由落下させ、その様子をウェブカメラ (1920 × 1080 ピクセル, 30fps) を用いて撮影する。

その後、撮影映像の中で跳ね返りが衝突面に対して垂直に近い場合の跳ね返りの高さ h を n 回分記録する。跳ね返りの高さは撮影映像内の巻き尺の目盛りから目

視で計測する。ここで得られた n 回分の跳ね返りの高さの平均 \bar{h} を求める。

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (2)$$

本研究ではおおよその反発係数を推定できれば良いため $n = 5$ とする。ここで得られた跳ね返りの平均の高さ \bar{h} を用いて以下の自由落下における反発係数の公式から各ボールの反発係数 e を求める。

$$e = \sqrt{\frac{\bar{h}}{H}} \quad (3)$$

4.3. 実物体と仮想物体の位置合わせ

本手法では 3 章で用いた平滑化したマップの代わりに事前に作製した 3D モデルを用いて環境と仮想のボールの力学的相互作用のシミュレーションを行う。本研究では後に本システムを用いて本手法の評価実験を行う際に、仮想のボールの力学的挙動のみに焦点を当て有効性を検証する。そのためには実物体と仮想物体の間のオクルージョンとシャドーイングを実現し力学的挙動以外の相互作用の違和感の原因を取り除く必要がある。しかし、現状の RGBD カメラや SLAM の手法の精度を鑑みるとどうしてもマップの形状に誤差が出てしまい、オクルージョンやシャドーイングの結果に違和感が生じてしまう。これを防ぐために現実世界の環境を簡単な形状の実物体のみを用いて構成し、事前にそれらの実物体を表す 3D モデルを作製する。

これらの 3D モデルを用いて実物体と仮想のボールの間の力学的相互作用やオクルージョン、シャドーイングなどの相互作用を自然に行わせるためには実物体とその対となる仮想物体の位置姿勢を合わせることが重要である。本手法では現実世界の環境上の木製/ゴム製ブロック、机、床に対して仮想物体の位置合わせを行う。木製/ゴム製ブロックに対しては図 4 のように AR マーカーを付け、ステレオカメラの撮影映像から推定されたその位置姿勢を用いることで仮想物体の位置を合わせる。床に対しては一度 HMD を床の上に置き、赤外線カメラを用いたトラッキングによって取得されたその時の HMD の位置姿勢を用いて平面オブジェクトの位置を合わせる。机に対しては HMD と同様にトラッキングが行われているコントローラーを用いて机の上の四つの地点を選択し、その四点を頂点とする平面オブジェクトを生成することで机の上面との重ね合わせを行う。

5. 実験

5.1. 環境のマップを用いたシステム

3 章の AR システムにおいて平面仮定による環境のマップとなる 3D モデルの修正を行わない場合の評価実験を行う。評価する項目は提案手法による現実世界の環境の映像への仮想物体の合成精度と提案手法で用いる環境のマップの正確性の二項目である。

5.1.1. 仮想物体の合成精度の評価. 仮想物体の合成精度を測定する為に現実世界の環境上に $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ の立方体を配置し、仮想空間上でマップ内のそれに対応した位置に同じく $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ の CG の立方体を配置する。CG の立方体の大きさは Unity の仮想空間の単位がメートルであることを考慮し、仮想空間上で設定

する。この状態で AR システムを運用し、HMD が単純な並進移動と回転を含めた並進移動を行う際の環境の映像内における立方体の合成位置の誤差をピクセル単位で測定する。測定に用いる映像の解像度は 700×500 ピクセルとする。

まず、現実世界の環境内で図 5 のように五つの基準点を定め、各地点を中心として左右への並進移動を行う。この時、並進移動の中心点と左右への移動それぞれにおける中間点と終点の合計五箇所において合成結果の画像を取得し、その画像内での実際の立方体と CG の立方体の位置の x 方向、y 方向の誤差を計測する。また、五つの基準点はシステム実行開始地点（地点 1）、初期位置から後ろ 10cm の地点（地点 2）、初期位置から上 10cm の地点（地点 3）と地点 3 から前 10cm の地点と後ろ 10cm の地点（地点 4、地点 5）とする。回転を含めた並進移動においても同様の手順で誤差を計測する。

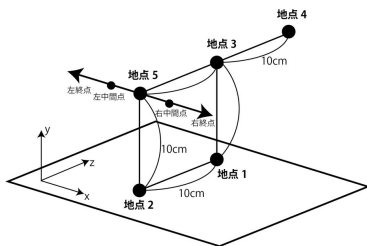


図 5. 計測の基準点

5.1.2. 測定結果. 並進移動に関してはある程度小さく収まっていた。システムの実行開始地点とその上と後ろの地点においては画像内の x 方向、y 方向の誤差はそれぞれ 1~15 ピクセル程度であり、それらの地点よりシステムの実行開始地点から離れている他 2 地点では誤差は 10~30 ピクセル程度であった。しかし、回転を含めた並進移動に関してはどの地点でも誤差が非常に大きく、並進移動の時に誤差が小さかった地点でも大きな誤差が現れている。これはそれぞれの計測地点において中心点から離れるほど顕著であり、左右の移動の終点では小さいものでも 30 ピクセル程度、大きいもので 60~100 ピクセル程度の誤差があった。

このズレは仮想カメラの位置を RGB カメラに合わせる際にオフセットを正しく設定できていないことで生じていると思われる。本実験において現実世界の環境の映像は RGBD カメラからではなく HMD 上に取り付けた別の RGB カメラから取得している。よってカメラの x、y、z 座標や各軸周りの回転など多くの相互に影響しあうパラメータを調整しなければならず、正確に位置合わせを行うことが困難なのである。また、以上の結果より運用する際にはユーザーの動きをある程度制限しなければ正確な合成結果を得ることができないことが分かる。

5.1.3. マップの正確性の評価. 仮想物体を映像の中の正しい位置に合成し、地形に対して整合性が取れるように力学的作用のシミュレーションを行うにはマップの正確性が重要となる。そこで、マップの正確性を評価する為に現実世界の環境とそれを基に作製されたマップの差異を計測する。差異の計測は環境内とマップそれぞれに存在する共通の物体の大きさや複数の物体間の距離を環境内、仮想空間内で測り、それぞれの測定値の誤差を求めると行う。この時、環境はマップ作製時と同じ状態にあるものとする。

5.1.4. 測定結果. 本実験では環境内に存在する分かりやすい基準点として箱と袋を用いて計測を行う。測定項目は箱の縦、横、奥行の長さ、システムの実行開始地点から袋までの距離、箱と袋の間の距離である。計測した結果、箱は縦 25.3 cm、横 26 cm、奥行 16 cm、マップ上では縦 24.3 cm、横 26.3 cm、奥行 15.5 cm であった。また、システムの実行開始地点から袋までの距離は 47 cm、マップ上で 47.2 cm であり、箱から袋までの距離は 18.5 cm、マップ上で 18.6 cm であった。これより作製されたマップは現実世界の環境とほぼ一致しており、十分に正確であると言える。

5.2. 平面仮定を行った環境のマップを用いるシステムの評価

平面仮定を行ったマップを用いた AR システムの評価実験を行う。本実験では実験 1 と同じく AR システムの仮想物体の合成精度とマップの正確性を評価する。また、実験 1 で合成精度が芳しくないことを受け本実験では現実世界の環境の映像を RGBD カメラから直接取得するように AR システムを修正している。この修正により仮想物体の合成精度が向上することを期待する。

5.2.1. 仮想物体の合成精度の評価. 合成精度の測定において、今回は図 6 で示すようにシステム実行開始地点（地点 1）、初期位置から前 10cm の地点と後ろ 10cm の地点（地点 2、地点 3）、地点 1、2、3 それぞれの上 10cm の地点（地点 4,5,6）の合計六地点で並進移動中の 5 箇所（10cm 間隔）において合成結果の画像を取得する。

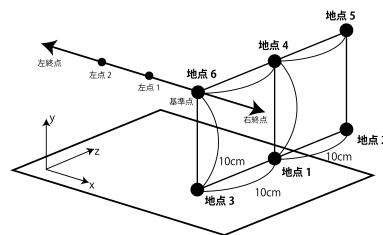


図 6. 計測の基準点

並進移動に関しては全ての計測位置において誤差が 10 ピクセル程度に収まった。この誤差は計測位置が各基準点から離れれば離れるほど大きくなる傾向がある。それぞれの地点における計測結果の違いには大きな差は無く、一部の特に誤差の大きい地点を除けば 5 ピクセルほどの差となっている。

回転を含めた並進移動に関してはほぼどの計測位置においても並進移動に比べて大きな誤差が生じていた。ここでは 10 ピクセルから 30 ピクセル程度の誤差が多く、最大で 40 ピクセル程度の誤差が見られる。こちらの誤差は各計測位置における HMD の回転角度が大きいほど大きくなる傾向がある。また、こちらの計測結果に関してはそれぞれの地点における計測結果の違いに一貫した傾向は無く、誤差の値が大きくばらついていてる。

総じて、実験 1 の時と同じような課題点が見られるものの誤差自体は前手法より抑えることができたことが分かった。

5.2.2. マップの正確性の評価. 今回の測定には現実世界の環境上にある箱の縦、横、奥行の長さ、システム実行開始地点からデスクトップ PC までの距離、デスクトップ

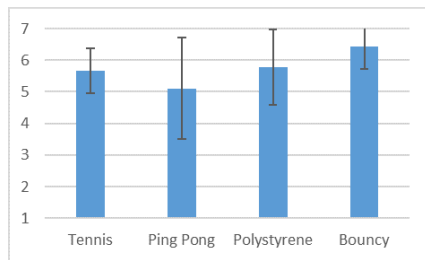


図 7. アンケート結果

プ PC と箱の間の距離を用いる。測定した結果、箱は縦 12cm, 横 33cm, 奥行 25cm, マップ上では縦 11.8cm, 縦 32.2cm, 奥行 24cm であった。また、システム実行開始地点から箱までの距離は 63.5cm, マップ上で 64.1cm であり、デスクトップ PC から箱までの距離は 55cm, マップ内では 53.9cm であった。これより平面仮定を行う場合においてもマップは十分に正確であることが分かる。

5.3. 事前に計測した反発係数を用いるシステムの評価

本実験では 4 章の AR システムが没入感に対して与える影響を評価する為に実験を行う。まず、被験者に 4 種類のボールのうち 1 つを渡し、4.2 節で説明した現実世界の環境に対してボールをぶつけてインタラクションを行いボールの力学的挙動を確認する。

次に、被験者は AR システムを通しそのボールを表す仮想のボールを用いて先ほどと同様にに実物体との相互作用を行う。この時、仮想のボールはトラッキングされたコントローラーを用いて掴んだり投げたりすることができる。この AR システムを用いたインタラクションは合計二回実施し、一回目は固定された反発係数、二回目は 4.2 節で計測した反発係数を用いて衝突による作用のシミュレーションを行う。

最後に、被験者はそれらのインタラクションの結果のうちどちらが最初に確認したボールの力学的挙動に近かったかを 1 から 7 のスケール (1: 固定された反発係数を用いた時, 7: 実際に計測した反発係数を用いた時) で評価する。これらの手順を反発係数の測定に用いた四つのボールすべてにおいて行う。

本実験に 9 人 (男性 6 名, 女性 3 名, 21 ~ 24 歳) が参加した。図 7 に各ボールにおけるアンケート結果の平均点を示す。各ボールの平均点は、テニスボール: 5.67 (標準偏差 0.71), ピンポン玉: 5.11 (標準偏差 1.62), ポリスチレン製ボール: 5.78 (標準偏差 1.20), スーパーボール: 6.44 (標準偏差 0.73) である。この結果により、総じて被験者は事前に計測した反発係数を用いたインタラクションのぼうが実際のボールの力学的挙動に近いと感じていたことが分かる。

また、有意水準 5% の両側 t 検定によるとスーパーボールの平均点はテニスボールとピンポン玉の平均点に対して有意差が見られるが (テニスボールの平均点に対して: t スコア -2.302, p スコア 0.035, ピンポン玉の平均点に対して: t スコア -2.258, p スコア 0.045), ポリスチレン製ボールに対しては有意差が見られなかった (t スコア -1.424, p スコア 0.174)。この結果より、反発係数による挙動の違い以外ユーザーが仮想物体の力学的挙動を自然と感じる要素が存在すると推測される。

6. 結論

本研究では AR システムにおいて周辺の環境の地形情報と各実物体の反発係数を考慮した力学的相互作用のシミュレーションを行った。評価実験よりこれらのシミュレーションを用いることで反発係数の値の範囲が大きい実物体を表す仮想物体の挙動が特に自然に感じられ、没入感を高めるには有効であることが分かった。また、同時に仮想物体の反発係数による挙動の違い以外にユーザーが仮想物体の力学的挙動に関して自然に感じる要素が存在する可能性が見られたため、将来さらに仮想物体の力学的挙動の自然さを追求することによって AR コンテンツの没入感をより向上させられることが期待される。

参考文献

- [1] M. Kanbara, N. Yokoya, and H. Takemura, "Real-time estimation of light source environment for photorealistic augmented reality," 2004.
- [2] K. Agusanto, L. Li, Z. Chuangui, and N. W. Sing, "Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination," in *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM international symposium on mixed and augmented reality*. IEEE Computer Society, 2003, p. 208.
- [3] S. Pessoa, G. Moura, J. Lima, V. Teichrieb, and J. Kelner, "Photorealistic rendering for augmented reality: A global illumination and brdf solution," in *Virtual Reality Conference (VR), 2010 IEEE*. IEEE, 2010, pp. 3–10.
- [4] P. Fortin and P. Hebert, "Handling occlusions in real-time augmented reality: dealing with movable real and virtual objects," in *Computer and Robot Vision, 2006. The 3rd Canadian Conference on*. IEEE, 2006, pp. 54–54.
- [5] Y. Tian, T. Guan, and C. Wang, "Real-time occlusion handling in augmented reality based on an object tracking approach," *Sensors*, vol. 10, no. 4, pp. 2885–2900, 2010.
- [6] C. Du, Y.-L. Chen, M. Ye, and L. Ren, "Edge snapping-based depth enhancement for dynamic occlusion handling in augmented reality," in *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2016 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2016, pp. 54–62.
- [7] M. Haller, S. Drab, and W. Hartmann, "A real-time shadow approach for an augmented reality application using shadow volumes," in *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. ACM, 2003, pp. 56–65.
- [8] D. E. Breen, E. Rose, and R. T. Whitaker, "Interactive occlusion and collision of real and virtual objects in augmented reality," *Munich, Germany, European Computer Industry Research Center*, 1995.
- [9] D. Beaney and B. Mac Namee, "Forked! a demonstration of physics realism in augmented reality," in *Mixed and Augmented Reality, 2009. ISMAR 2009. 8th IEEE International Symposium on*. IEEE, 2009, pp. 171–172.
- [10] S. Kim, Y. Kim, and S.-H. Lee, "On visual artifacts of physics simulation in augmented reality environment," in *Ubiquitous Virtual Reality (ISUVR), 2011 International Symposium on*. IEEE, 2011, pp. 25–28.
- [11] O. Kähler, V. A. Prisacariu, C. Y. Ren, X. Sun, P. Torr, and D. Murray, "Very high frame rate volumetric integration of depth images on mobile devices," *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 21, no. 11, pp. 1241–1250, 2015.
- [12] N. Farkas and R. Ramsier, "Measurement of coefficient of restitution made easy," *Physics education*, vol. 41, no. 1, p. 73, 2006.
- [13] C. Aguiar and F. Laudares, "Listening to the coefficient of restitution and the gravitational acceleration of a bouncing ball," *American Journal of Physics*, vol. 71, no. 5, pp. 499–501, 2003.
- [14] A. Wadhwa, "Measuring the coefficient of restitution using a digital oscilloscope," *Physics Education*, vol. 44, no. 5, p. 517, 2009.
- [15] R. Cross, "Measurements of the horizontal coefficient of restitution for a superball and a tennis ball," *American Journal of Physics*, vol. 70, no. 5, pp. 482–489, 2002.