

平成 28 年度卒業論文

遠隔 AR のための実空間整合

宮崎大学 工学部 情報システム工学科

岡崎 浩佑

指導教員 椋木雅之

目次

| | |
|-------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 遠隔 AR | 3 |
| 2.1 遠隔 AR の技術的課題 | 3 |
| 2.2 異なる実空間での遠隔 AR | 4 |
| 3. 仮想物体による実空間の補完 | 6 |
| 3.1 実空間の 3 次元点群測定 | 7 |
| 3.2 目印の座標取得 | 8 |
| 3.3 点群の座標の変換 | 9 |
| 3.4 目印から離れた点群の削除 | 11 |
| 3.5 重複する点群の削除 | 12 |
| 3.6 実空間の差の補完 | 14 |
| 4. 実験 | 16 |
| 4.1 実空間の差の補完 | 16 |
| 4.1.1 実験手順 | 17 |
| 4.1.2 実験結果 | 17 |
| 4.2 物理シミュレーション | 19 |
| 4.2.1 実験準備 | 19 |

| | |
|------------------|----|
| 4.2.2 実験手順 | 20 |
| 4.2.3 実験結果 | 22 |
| 5. おわりに | 24 |

1. はじめに

拡張現実(AR)とは仮想物体や情報をあたかも実世界に存在するように実世界に重ね合わせて表示する技術である。「ARによって実世界に表示された仮想物体や情報を遠隔地間で同期し共有すること」を本研究では遠隔ARと呼ぶ。仮想物体を実世界にあるように見せ、その仮想物体を遠隔地間で共有できるならば、遠隔AR利用者に距離を感じさせない対面同様のコミュニケーションを提供することができる[1]。

遠隔ARで仮想物体を共有するには、同一の実空間を用意する必要がある。異なる実空間環境下で仮想物体を共有した場合、実空間の差が仮想物体に物理的矛盾を生じさせてしまう。例えば、「机にARを表示するためのマーカーのみを置いた環境A」と「マーカーとマーカー前方に箱を置いた環境B」の間で球状の仮想物体を共有する状況を考える(図1)。環境Aに合わせて仮想物体を同期する場合、球を前方に転がすと、環境Aでは机上を球が転がる様子が描写されるが、環境Bでは球が箱をすり抜けて転がるように描写される。環境Bに合わせて仮想物体を同期する場合、球を前方に転がすと、環境Bでは球が前方にある箱に衝突してこちらに戻ってくる様子が描写されるが、環境Aでは球が何もない空間に衝突して球が戻ってくる様子が描写される。

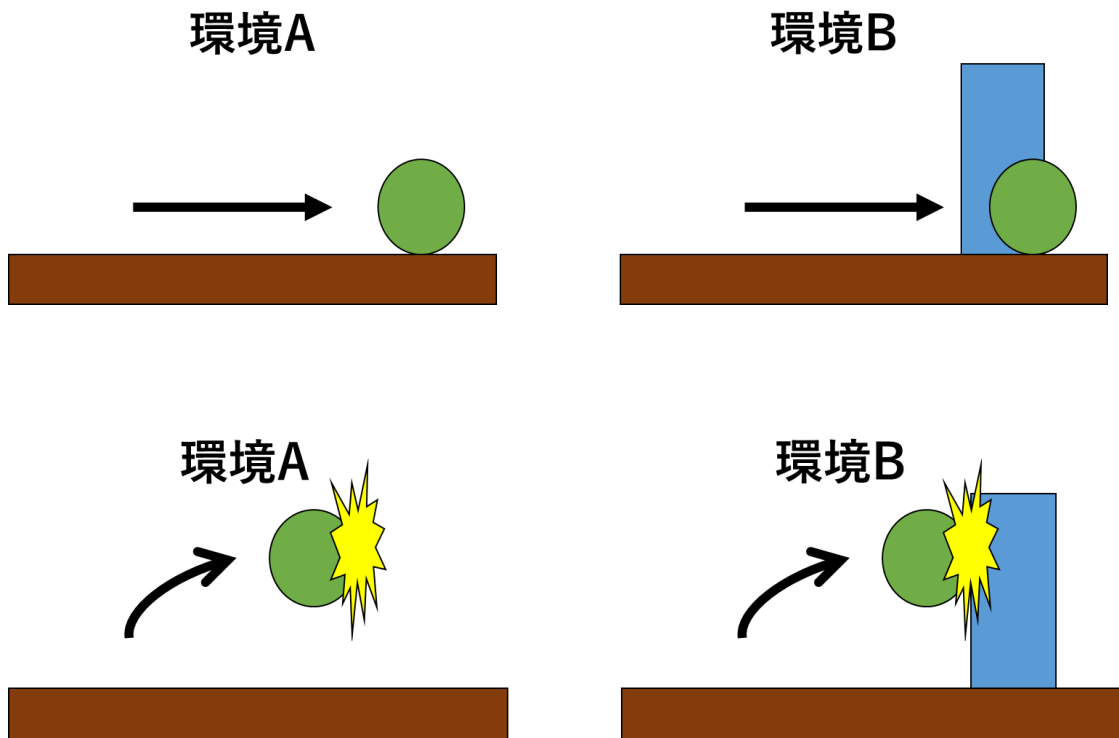


図1 異なる実空間環境間での仮想物体の同期

このように遠隔 AR において異なる実環境は仮想物体に物理的な矛盾を引き起こす原因となる。本研究では、遠隔 AR 利用者間の実空間の違いを仮想物体で補完することで疑似的に同一の実空間を作り出し、異なる実空間環境下で仮想物体の共有を可能にすることを旨とする。

2. 遠隔 AR

2.1 遠隔 AR の技術的課題

一般に AR では幾何学、光学、時間的整合性が課題となっている。幾何学的整合性とは実空間と仮想空間の位置合わせを行うこと、光学的整合性とは実空間における仮想物体の陰影を考慮すること、時間的整合性とは実空間における仮想物体描写の遅延や同期ずれに対処することである。一つでも欠けると実空間に投影した仮想物体が物理的に矛盾したものになる。

遠隔 AR ではさらに、仮想物体共有相手の実空間環境や遠隔間通信による遅延について考慮しなければならない。[2]では仮想物体表示に必要なデータ量を減らすことで、仮想物体の同期に必要な通信データ量を削減して、遠隔地間で遅延を感じさせずに仮想物体を同期させることを目指している。

この他にも遠距離間通信で仮想物体を共有するために考慮すべき要素は多々存在するが、本研究では実空間環境の違いによって生じる幾何学的整合性の問題に注目する。

2.2 異なる実空間での遠隔 AR

従来の研究では、同一の実空間環境下で仮想物体を共有しており、異なる実空間環境間での仮想物体の共有については考慮していない。異なる実空間環境間で仮想物体を共有すると、実世界に投影された仮想物体が物理的矛盾のあるように見えてしまう。

本研究では、異なる実空間環境間でも仮想物体を共有できるように、次のような手法を提案する。まず、遠隔 AR 利用者の実空間に目印を設置して、目印を含めて実空間を 3 次元点群データ化する。次に、目印を基準として点群を重ね合わせることで、点群の位置合わせを行う。点群を重ね合わせたときに重複しなかった点群を実空間の差の点群として取り出す。取り出した点群を仮想物体として実世界に投影することで、実空間の差を補完し、疑似的に同一の実空間を形成する。

先ほどの机上で仮想の球を転がす例にこの手法を適用した場合（図2）、環境Aの机の上には仮想の箱が表示されており、球を前方に転がすと、仮想の箱に衝突して球がこちらに戻ってくる様子が見える。このように実空間の差を仮想物体で補完することで、仮想物体の動きを物理的矛盾なしに共有することができる。

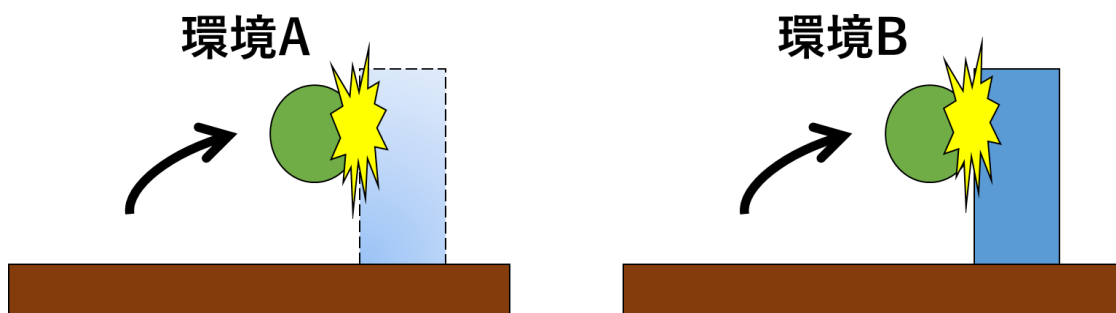


図2 仮想物体を用いた実空間の差の補完

3. 仮想物体による実空間の補完

本研究の提案手法の流れは以下の通りである。

- ① 実空間の3次元点群測定
- ② 目印の座標取得
- ③ 点群の座標の変換
- ④ 目印から離れた点群の削除
- ⑤ 重複する点群の削除
- ⑥ 実空間の差の補完

3.1 実空間の 3 次元点群測定

仮想物体として取り扱うために実空間を 3 次元点群データ化する。実空間を深度カメラで測定し、3 次元の点情報(点座標・色・法線ベクトル)に変換する(図 3)。

3 次元点群測定の際には、図 4 のような正方形で四隅に 4 色の折り紙を張り付けた目印を設置する。この目印を用いて点群の位置合わせを行う。



図 3 実環境と 3 次元点群データ化した実環境

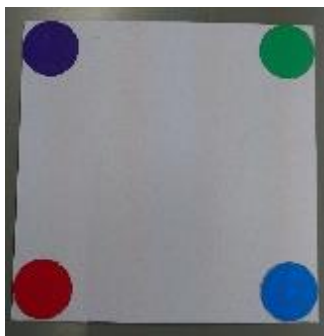


図 4 目印

3.2 目印の座標取得

点群の位置合わせの基準となる目印の座標を求める。目印の角の重心座標は色検出を用いて求める。

色は一般的に RGB(赤緑青)の三原色の組み合わせで表現されるが、RGB 表現は特定の色検出には不向きである。色検出には色合い・彩度・明度で色を表現する HSV を使用する。色合いの範囲を指定することで特定の色を検出できる。

目印の角の 4 つの色にそれぞれ色検出を行って、抽出した点群の平均を取ることによって目印の角の重心座標を得る。

3.3 点群の座標の変換

目印が基準の座標となるように点群の座標を変換する。点群の座標変換には図形の並進回転拡大剪断を表現可能なアフィン変換を用いる。

3次元空間におけるアフィン変換の変換行列は次のように表される。

$$\begin{pmatrix} a & b & c & t_x \\ d & e & f & t_y \\ g & h & i & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

左上の変数 $a\sim i$ は拡大回転剪断を行うための値で、 t_x, t_y, t_z は並進の値である。

今回の点群の座標変換では剪断と特定成分のみの拡大を行わないので、変換行列は四元数を用いて変数の個数を減らして次のように表現できる。

$$\begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) & t_x \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & t_y \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

この変換行列を M とおき、アフィン変換前の座標を A 、変換後の座標を B と

おくと、アフィン変換の方程式は次のように表される。

$$B = MA$$

さらに、左辺を右辺に寄せて

$$B - MA = 0$$

として、 A に目印の角の3点の座標を、 B に目印の移動先の座標を代入する。

回転行列の未知変数を $\mathbf{u} = (q_1, q_2, q_3, q_4, t_1, t_2, t_3)$ とし、方程式 $f(\mathbf{u})$ を次のよう

におく。

$$f(\mathbf{u}) = B - MA$$

この $f(\mathbf{u})$ が局所最小解となるとき、 \mathbf{u} が求める変換行列のパラメータとなる。

勾配法の一つである最急降下法を用いて \mathbf{u} の値を求める。最急降下法は次の手順で局所最小解を求める。

1. \mathbf{u} の初期値を設定
2. $\frac{\partial f(\mathbf{u})}{\partial u_i} = 0 (i = 1, \dots, 7)$ なら終了
3. $\mathbf{u}^{k+1} = \mathbf{u}^k - \varepsilon \frac{\partial f(\mathbf{u})}{\partial u_i}$ を計算して、 \mathbf{u} を更新
4. 2に戻る

変換行列を求めた後は、点群をアフィン変換の方程式に代入して点群全体を座標変換する。

3.4 目印から離れた点群の削除

点群の描写処理を軽減するために AR 利用範囲外にある余分な点群を削除する。点群の座標は目印を基準とする座標に変換したので、

$$|x| < \alpha, |y| < \beta, |z| < \gamma \quad (\alpha, \beta, \gamma \text{ は実数})$$

のように範囲を定めて、その領域にある点群を取り出すことで、余分な点群を削除する。図 5 は図 3 の点群に対してこの処理を行った結果である。

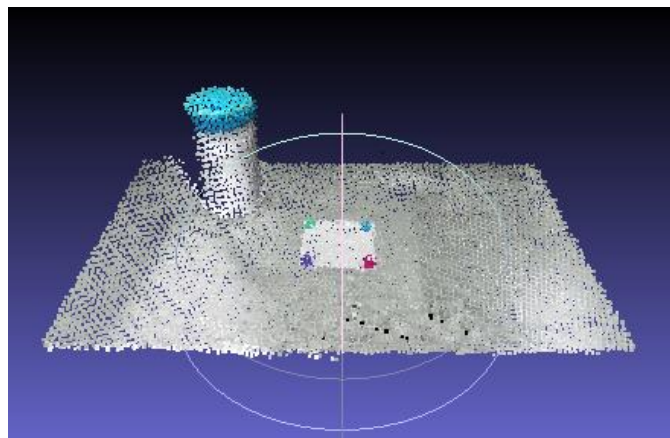


図 5 マーカー周辺のみを抽出した点群データ

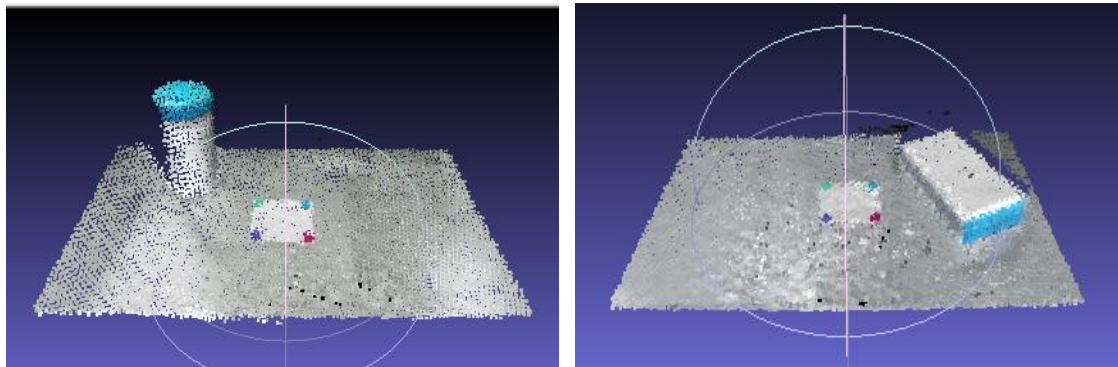
3.5 重複する点群の削除

実空間補完に使用するのは、点群データを重ね合わせたときに重複しない部分のみである。総当たりで点群データの重複判定を行い、重複しなかった点群を保存する。

重複判定は2点間の距離を求めて、それがあるパラメータの値 ε 以下であったら2点は重複しているとみなす。

二つの点群データ A と B について、実空間の差となる点群は次の手順で求める。

1. 環境 A の点群と環境 B の点群 (図 6) との間で重複判定を行い、重複する点群 $A \cap B$ を求める (図 7)。
2. 環境 A の点群から重複する点群 $A \cap B$ を取り除いたものを環境 B の実空間の補完に使用する点群 (図 8 (a)) とし、環境 B の点群から重複する点群 $A \cap B$ を取り除いたものを環境 A の実空間の補完に使用する点群 (図 8 (b)) とする。



(a) 環境 A

(b) 環境 B

図 6 2つの環境の点群データ

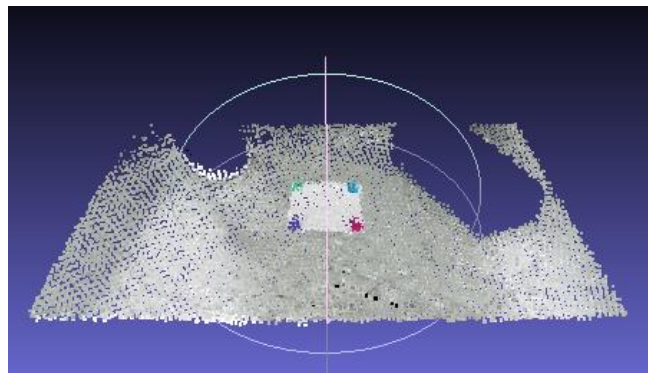
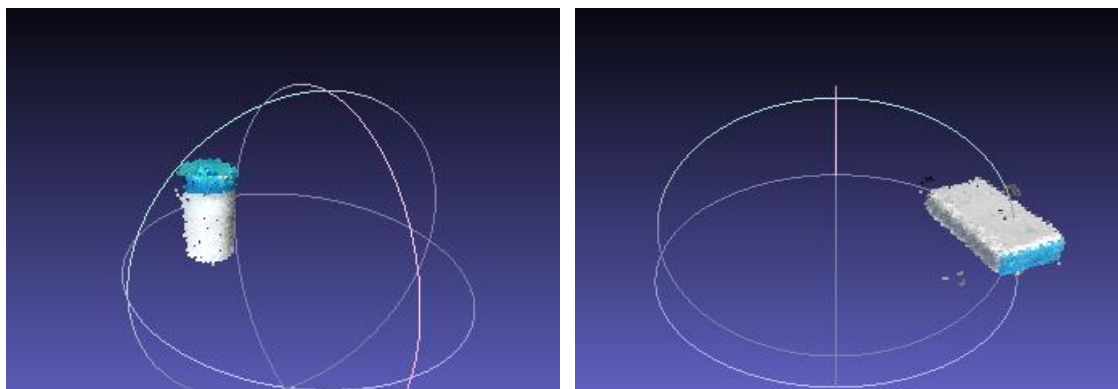


図 7 環境 A と B の重複点群 $A \cap B$



(a) 環境 A と環境 B の差 $A - (A \cap B)$

(b) 環境 B と環境 A の差 $B - (A \cap B)$

図 8 図 6 の点群における重複部分の削除結果

3.6 実空間の差の補完

重複しない点群を仮想物体として表示して、実空間の差を補完する。

ARToolKit[3]を用いて点群を仮想物体として現実世界に投影する。ARToolKitはカメラで撮影されたARマーカールをもとに、カメラ座標系からARマーカールの座標系への変換行列を計算する。この変換行列を用いて、カメラから見たARマーカールの位置に仮想物体を表示することができる。

提案手法で求めた実空間の差の点群は目印が中心の座標系であるので、目印の場所にARマーカールを設置して、目印とマーカールの大きさの倍率を調整すれば、正しい位置に仮想物体を表示することができる。

図10の画像はARToolKitを用いた仮想物体の投影によって図9の実空間の差を補完した結果を表す。

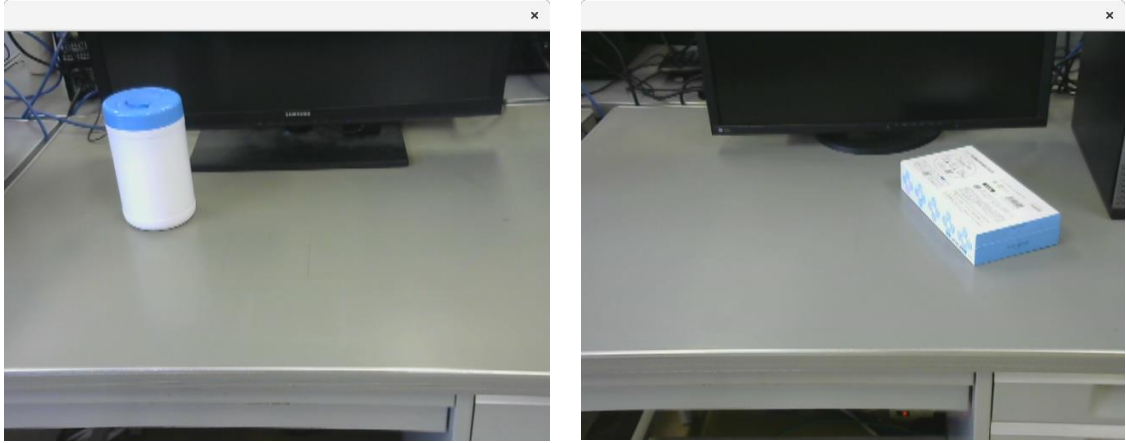


図9 異なる二つの実空間

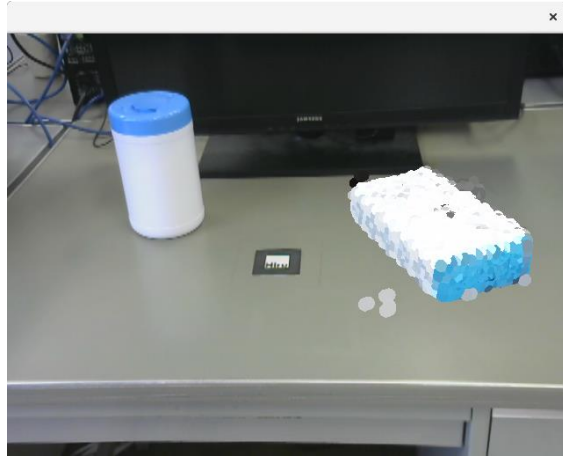


図10 仮想物体による実空間の差の補完

4. 実験

4.1 実空間の差の補完

2つの異なる実空間に提案手法を用いて実空間の差の補完を行い、同一の実空間を形成できるかを確認する。

直方体を置いた環境 A と円柱を置いた環境 B を用意する (図 11)。環境 A の直方体と重なるように円柱を配置した環境 B との間で実空間補完を行う。



(a) 環境 A

(b) 環境 B

図 11 実験に使用した実環境

4.1.1 実験手順

提案手法通りに、実空間の 3 次元点群データ化、目印を基準とした点群データの位置合わせを行う。次に、AR 利用範囲外の点群を削除する。環境 A と B の机は同じ平面とみなし、机の平面の点群はこの時点で削除する。その後、3.5 節のパラメータ ε の値を調節しながら実空間の差の点群のみを取り出す。最後に差の点群を実空間に投影して、実空間の差が補完できているかを確認する。

4.1.2 実験結果

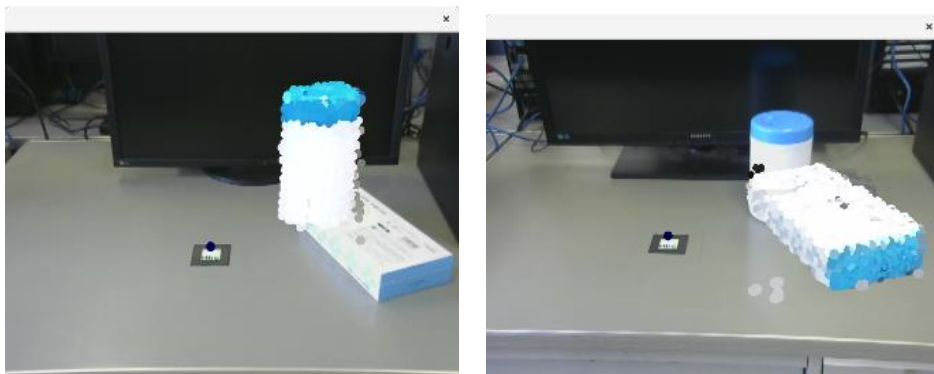


図 12 環境 A と環境 B の補完 ($\varepsilon = 0.05$)

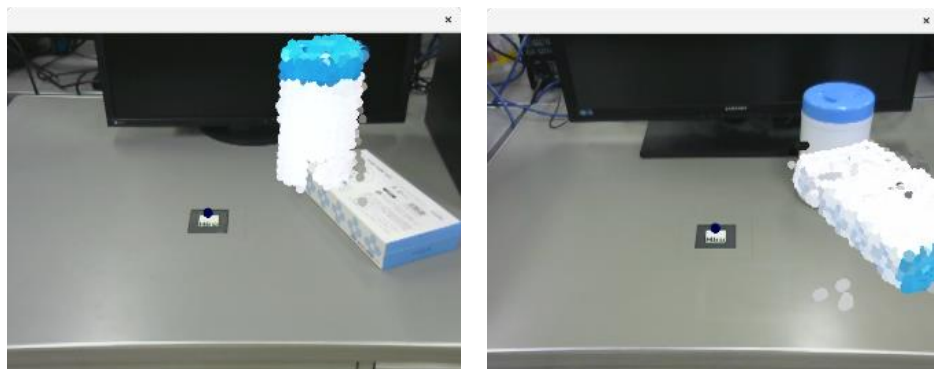


図 13 環境 A と環境 B の補完 ($\varepsilon = 0.08$)

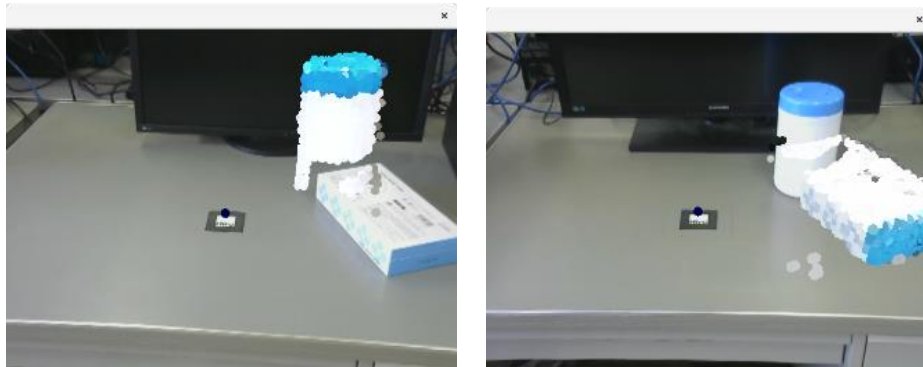


図 14 環境 A と環境 B の補完 ($\epsilon = 0.2$)

図 12 は ϵ の値を小さく設定して重複する点群の削除を行った結果である。 ϵ の値が小さいと重複した点群をうまく削除できず、実物体が仮想物体に埋もれてしまう。図 13 は ϵ を適切な値に設定して重複する点群の削除を行った結果である。 ϵ の値が適切だと仮想物体が現実の物体にぴったりかみ合うように表示される。図 14 は ϵ の値を大きく設定して重複する点群の削除を行った結果である。 ϵ の値が大きいと重複していない点群まで削除してしまい、実物体と仮想物体に隙間ができてしまう。

図 12、13、14 の右側の仮想物体の表示は実物体が仮想物体に埋もれている。深度カメラによる 3 次元点群測定では物体の表面しか点群化できず、幅のある立体を点群化すると内部が空洞になってしまう。この空洞が原因で、提案手法では立体内部に入り込んだ点群が重複している点群であると判定することができない。正確な実空間の差の点群を取り出すには立体内部の空洞を考慮しなければならない。

4.2 物理シミュレーション

実空間の差の補完を行った実空間上で仮想の球を使用した物理シミュレーションを行い、物理的矛盾がなく仮想物体を共有できるかを確認する。

4.2.1 実験準備

仮想物体を共有する物理シミュレーションでは、環境 A（実空間 A,実空間 A の 3次元点群データ,PCA,web カメラ,AR マーカー）（図 15）と環境 B（実空間 B,実空間 B の 3次元点群データ,PCB,web カメラ,AR マーカー）（図 16）、仮想物体の描写・操作を行うサーバプログラム、仮想物体の同期・描写を行うクライアントプログラムを用意した。



(a) 環境 A の実空間



(b) 環境 A での AR 描写に使用する PCA

図 15 環境 A



(a) 環境 B の実空間



(b) 環境 B での AR 描写に使用する PCA

図 16 環境 B

4.2.2 実験手順

まず、提案手法を用いて2つの実空間の差の点群を求める。次に、AR マーカーを設置して、A の PC でサーバプログラムを、B の PC でクライアントプログラムを起動する。それぞれの実空間に差の点群を描写することで実空間の差を補完する。

仮想物体と実物体の衝突について、机の平面は AR マーカーと同じ平面上にあるので、机の平面を $z = 0$ の x - y 平面とみなして仮想の球の衝突処理を行う。それ以外の実物体については実空間の点群を用いて仮想の球との衝突処理を行う。

仮想物体の衝突判定について、仮想の球の座標を (x_1, y_1, z_1) 、半径を r_1 、点群中のある点の座標を (x_2, y_2, z_2) 、半径を r_2 とおいたとき、衝突判定は次式で表される。

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \leq r_1 + r_2$$

仮想の球と点群の距離がそれぞれの半径の和より小さくなったときに衝突したとみなす。

衝突は点群中の点を持つ法線ベクトルを平面と見立てて (図 17)、仮想の球が平面に衝突したかのように処理することで (図 18)、衝突後の仮想の球の速度ベクトルを計算する。

A の PC から仮想物体を操作して実物体に衝突させたとき、B の PC から見た仮想物体の動きを観察する。

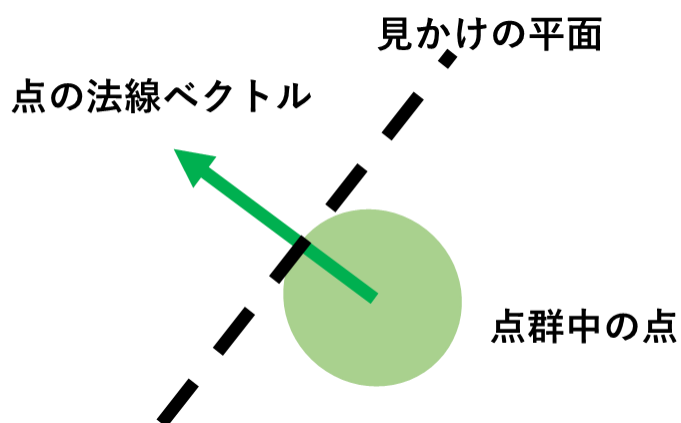


図 17 見かけの平面

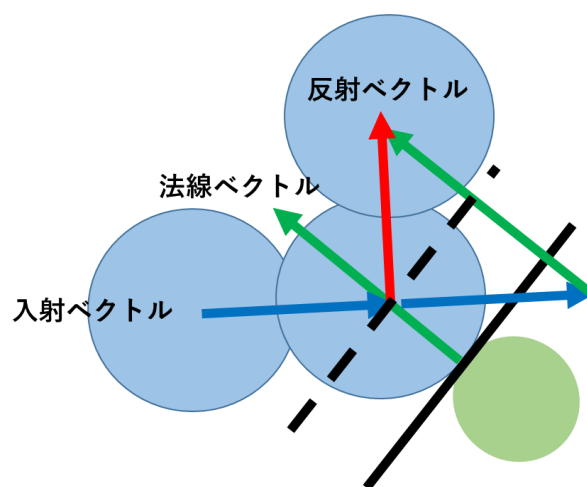
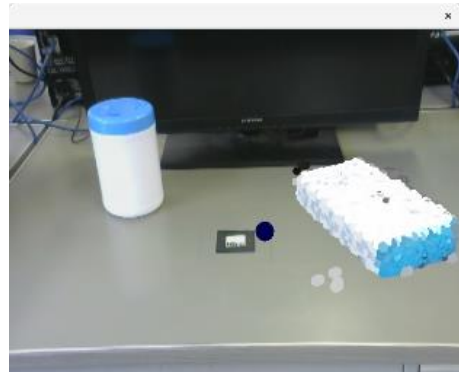


図 18 球と点の衝突処理

4.2.3 実験結果

図 19 はシミュレーションの様子を表している。上の図はマーカーから仮想の球を転がす様子を、真ん中の図は直方体に仮想の球が衝突した瞬間を、下の図は仮想の球が衝突して跳ね返ってくる様子を表している。

環境 A では仮想物体が実物体(実空間の点群)に対して衝突運動を行ったが、環境 B では実空間の差の補完として描写されている仮想の直方体にあたかも衝突したように見せることで、仮想物体の幾何学的整合性を保つことができた。



(a)環境 A

(b)環境 B

図 19 シミュレーションの様子

5. おわりに

本研究では、遠隔 AR 利用者間の実空間の違いを仮想物体で補完することで疑似的に同一の実空間を形成する手法を提案した。さらに、提案手法で実空間の差を補完した実空間環境上で物理シミュレーションを行い、幾何学的整合性を保ちながら仮想物体を共有できることを示した。光学的,時間的整合性についても考慮することを今後の課題とする。

謝辞

本論文を作成するにあたり、丁寧で熱心なご指導を頂いた指導教員の椋木雅之教授に感謝致します。また、研究の相談や助言を快く受けて頂いた椋木研究室の皆様にも感謝致します。

参考文献

[1]Susumu Tachi, “Tele-Existence”, Journal of Robotics and Mechatronics,

Vol.4 No. 1, pp.7-12, 1992.

[2]南谷真哉,北原格,亀田能成,大田友一, “遠隔地における複合現実空間の共

有”, 信学技報 MVE2007-53, 2007-10.

[3]加藤博一, “拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発”, 信学技報

PRMU2001-232, 2002-2.