

# 物理世界における作用と仮想世界における作用の融合と調和

柏木 敏朗<sup>†1,a)</sup> 中小路 久美代<sup>†1</sup>

**概要:** DITTO (Digital Instruments and Tangibles Theater Orchestrated) プロジェクトは、物理法則に基づいて構成される物理的な世界と、物理演算に基づきシミュレートされる仮想的な世界との間で起こる相互作用に着目し、それぞれがどのように干渉し合い、ユーザがこれを一貫性のある「現実/reality」として認識できるかについてモデル化と原理の解明に取り組むものである。DITTO プロジェクトでは、体験可能なシンプルなツール群で構成される Exploratorium (エクスプロラトリウム: 探索のためのツール群環境) を通して、その具現化を行っている。これまでに計 13 個のツール群のデザインと実装を進めてきた。本稿では、そのうちの光と色の物理現象を利用する 2 つのツール (DITTO#003 および DITTO#009) をとりあげ、物理的な世界と仮想的な世界との間で起こる干渉の事例を示す。

## 1. はじめに

現状の MR (Mixed-Reality) ・ AR (Augmented Reality) 技術やサービスの多くは、個別の目的やユーティリティに特化したものとして実装されている。Milgram ら [1] はこれらの xR 技術を、物理的な世界と仮想的な世界との連続的な中間領域に位置するものとして捉えているが、実装された各 xR システムは、この連続的な位置の中の「1 点」に存在するものとして位置付けているように思われる。

我々は、MR や AR と呼ばれる技術の本質的な価値は、シースルー型ヘッドマウントディスプレイなどのインタフェースを用いることで、物理的に存在するオブジェクトや現象と、実体を伴わない表象として表されたオブジェクトや現象が、あたかも同一空間に存在するように、人が認知することができる場所にあると考えている。

DITTO (Digital Instruments and Tangibles Theater Orchestrated) プロジェクトは、物理法則に基づいて構成される物理的な世界と、物理演算に基づきシミュレートされる仮想的な世界とが、相互にどのように干渉し合い、ユーザがこれを一貫性のある世界として認識できるかについて、そのモデル化と原理の解明に取り組むものである。

物理法則に基づく世界は、情報技術を使用せずに認知される「生」の状態で私たちが生きている世界である。ここで、錯覚といった認知的特性を踏まえると、人の脳は物理世界をそのまま認知しているとは言いがたいが、本研究では人の認知特性については単純化して捉えるものとする。

物理演算で構成される世界、いわゆる仮想世界は、物理

法則を倣って物理現象などがシミュレーションされる世界である。開発者やデザイナーが、恣意的に制御することができる世界である。

物理法則に基づいて構成される物理的な世界では、物理的なオブジェクトにおけるアクションやはたらきが物理的な自然現象として現れることで、ヒトはそれを知覚し物理的な世界を認知している。それに対して仮想的な世界では、仮想的なオブジェクトにおけるアクションやはたらきによって起こる現象を物理演算に基づきシミュレートし、目の前で起きているようにレンダリング出力することで、ヒトは実体を伴わない仮想的な世界を認知している。ヒトは、シースルー型ヘッドマウントディスプレイやプロジェクションマッピングといった技術を介して、それぞれの物理的な現象と仮想的な現象が同じ空間内で起きているように捉え、いわゆる「現実/reality」として認識していることになる。

DITTO プロジェクトは、ヒトが認識するこの「現実/reality」世界において、物理法則に基づく世界（本論では「物理法則」と記す）と、物理演算で構成される世界（本論では「物理演算」と記す）との間の相互作用に着目するものである。我々は、これら 2 つの世界の間の作用の多

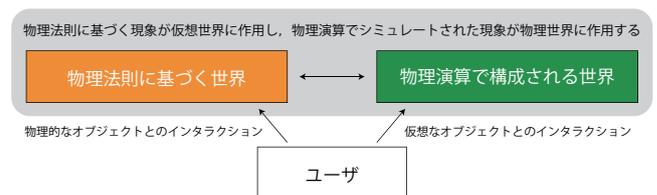


図 1 物理法則に基づく世界と物理演算で構成される世界との間のインタラクション

<sup>†1</sup> 現在、公立はこだて未来大学

<sup>a)</sup> g3120001@fun.ac.jp

様々な様態を、体験可能なシンプルなツール群で構成される Exploratorium (エクスペラトリウム：探索のためのツール群環境) として具現化するアプローチをとる。これまでに、Hololens2 を用いてテーブルトップ上でインタラクションできる計 13 個のツール群のデザインと実装を進めている。

本稿では、DITTO の要素として実装したツールの中から、物理現象として光と色を利用するものを 2 個とりあげ、相互の作用を体験可能とするシンプルなツールで具現化する事例を示す。

## 2. 関連研究

〈物理法則〉と〈物理演算〉との間で起こる相互作用は、ヒトが持つ素朴物理学といった素朴理論による物理学的な認識が、それぞれで起こる事象間の一貫性を担保し、1 つの「現実/reality」として認識していると私たちは考えている。素朴物理学とは、ヒトが経験的に理解した物理学的な常識知識であり、重さや速度、光、摩擦などが含まれる。

苗村らは、懐中電灯型のデバイスを用いて物理的なオブジェクトの影を〈物理演算〉に、仮想オブジェクトの影を〈物理法則〉に投影するシステムを提案している [2]。これは、〈物理法則〉と〈物理演算〉の間の照明による干渉を具現化しているものであると捉えられる。Kobito-Virtual Brownies- は、こびとをモチーフにした仮想のキャラクターが物理的な紅茶缶を動かしている様子を具現化しているものであると捉えられる [3]。「仮想のキャラクターが紅茶缶を押すと紅茶缶が動く」「紅茶缶を押すと仮想のキャラクターが転ぶ」といった物理的な事象を再現している。DOMINO Toppling はドミノ倒しを題材とした物理的なオブジェクトと仮想オブジェクトとの衝突を具現化した MR アトラクションである [4]。物理ドミノを機械的に、仮想ドミノを仮想的にタイミングよく倒すことで〈物理法則〉と〈物理演算〉の遷移を実現している。

このように「光と影」「力による物の移動」「物の衝突」のような物理的な事象を、〈物理法則〉と〈物理演算〉の間でシームレスに起こっているように見せることで、人はあたかも物理的なオブジェクトと仮想オブジェクトが自然に混在しているという「現実/reality」を認識する。DITTO は、これらのような〈物理法則〉と〈物理演算〉との間の相互作用を多様な様態で具現化し、MR における「現実/reality」のモデル化や原理について追究していく。

## 3. 相互の作用を具現化する二つのツール

本稿でとりあげるのは、物理法則に基づくアクションやはたらきが物理演算でシミュレートされた世界に作用するシステム (DITTO#003) と、物理演算でシミュレートされたアクションやはたらきが物理法則で構成される世界に作用するシステム (DITTO#009) の 2 つである。これら

2 個のツールを用いて、〈物理法則〉から〈物理演算〉へのはたらきかけと、〈物理演算〉から〈物理法則〉へのはたらきかけを実現するというものの、機構的、体験的な意味と課題、さらにはインタラクションデザインにおいてそのあるべき位置付けを探る。

以下に、DITTO#003 および#009 のそれぞれについて、〈物理法則〉から〈物理演算〉への作用の実現、物理世界内の構成、仮想世界内の構成、観測される現象、および機構の設計について説明する。

### 3.1 DITTO#003：〈物理法則〉から〈物理演算〉への作用の実現

DITTO#003 は、物理世界における光の色の変化が、仮想的に作り出しているオブジェクトに作用するシステムである。物理法則に基づいて生じるアクションやはたらきをセンシングし、その作用の結果を物理演算でシミュレートして、その作用が及んだ形として仮想世界に作り出す。

#### 3.1.1 DITTO#003：物理世界内の構成

DITTO#003 は、Hololens2 とピコプロジェクト、カラーフィルタ、PC、Arduino UNO、赤外線マーカー、フォトリフレクタで構成される (図 2)。ピコプロジェクトと Arduino は PC に直接接続されている。Hololens2 と PC はデータ通信を行うために TCP 通信で接続されている。PC から Hololens2 に Arduino でセンシングした結果を送信する。

手で回すことのできる円形のカラーフィルタ (図 3) を、ピコプロジェクト (PicoCube) から発せられる光が通過するようにピコプロジェクトの発光部分の前面に設置した。カラーフィルタは 5 つの円が切り抜かれた円形状のものにカラーフィルムを張り付けたものである。切り抜かれた部分 5 つのうち 4 つには赤色・黄色・青色・緑色の 4 種の色のカラーフィルムを張り付け、残りの 1 つは無色 (何も張り付けていない) である。ここでは、白色スライドを投影することでピコプロジェクトを発光源として利用する。

カラーフィルタ部分には、Arduino にフォトリフレクタ (LBR-127HLD) を 3 つ接続した。この 3 つのフォトリフレクタから得られる信号をもとに、ピコプロジェクトの光がどのカラーフィルタの色を透過しているかを識別できる

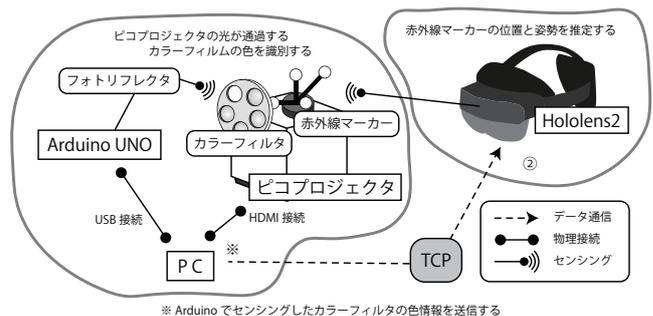


図 2 DITTO#003：物理世界内のデバイス構成

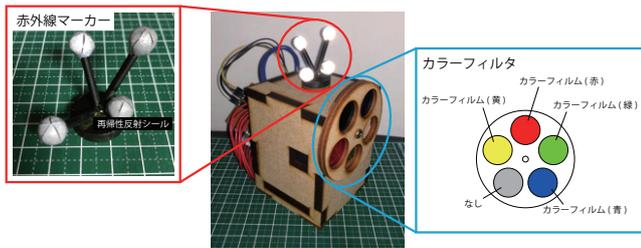


図 3 ピコプロジェクタとカラーフィルタ、赤外線マーカー

ようにした。

ピコプロジェクタの位置と姿勢を推定するために、赤外線マーカーをピコプロジェクタの上部に固定した。赤外線マーカーは図 3 に記しているような形状とし、3D プリンタで印刷し作成した。マーカーを構成する 4 本の先端に取り付けた枝の球面部分には赤外線を再帰的に反射する再帰性反射シールを貼りつけており、それ以外の部分には赤外線が反射しにくくするために黒色のラッカースプレーを吹きかけた。この赤外線マーカーは Hololens2 によってトラッキングされ、これによりピコプロジェクタの物理的な位置が計測される。

### 3.1.2 DITTO#003：仮想世界内の構成

3D ゲームエンジンである Unity を用いて仮想世界のシーンを作成した。開発には、MR アプリケーションを作るためのオープンソースツールキットである Mixed Reality Toolkit (MRTK) を用いている。仮想世界上に仮想のキューブ型のオブジェクトと仮想のスポットライトを配置した。仮想のスポットライトの光の範囲をピコプロジェクタの画角と同じ幅になるように設定した。また Hololens2 を被っているユーザが仮想のキューブ型オブジェクトをハンドジェスチャ (ポインティング/ピンチ) を用いて移動や回転といった操作を行うことができるようなインタラクティブティを実装した。

### 3.1.3 DITTO#003 において観測される現象

図 4 に、DITTO#003 において、〈物理法則〉から〈物理演算〉への作用によって観測される現象について説明する。ピコプロジェクタから発される光の色がカラーフィルタによって変化する。赤いカラーフィルムを通れば赤い光となり、青いカラーフィルムを通れば青い光となる。カラーフィルタのない部分を通れば白い光のままとなる。カラーフィルタを通った光は仮想のキューブ型オブジェクトに照射され、光のあたる面が、その色に変化した色でライティングされる。

図 5 は、〈物理世界〉と〈仮想世界〉の作用とユーザの操作の流れを表している。物理世界上では、ユーザがピコプロジェクタの位置と向きを決め、その位置から白色光が発される。ユーザがカラーフィルタを物理的に回してカラーフィルタの位置を変え、光の色を変化させる。その色に変化した光は、その先にある物体やスクリーン、手などに反

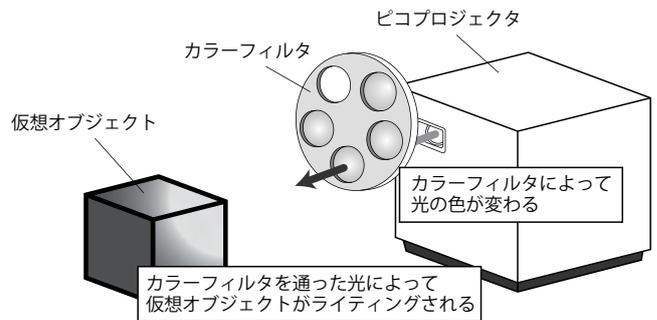


図 4 DITTO#003: 物理法則から物理演算への作用によって観測される現象

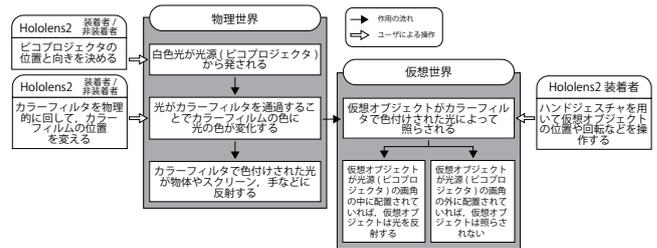


図 5 DITTO#003: 物理法則から物理演算への作用とユーザの操作の流れ

射する。それに対して仮想世界上では、Hololens2 を装着しているユーザがハンドジェスチャを用いて仮想のキューブ型オブジェクトの位置や回転などを操作する。もしその仮想オブジェクトがピコプロジェクタの光の範囲内に位置していれば、カラーフィルタで変えられた光の色で照らされる。もしその仮想オブジェクトがピコプロジェクタの光の範囲外に位置していれば、その仮想オブジェクトは照らされない。

図 6 のように、光の中に仮想オブジェクトがあれば物理演算によって仮想オブジェクトにライティング施され、それと同時にユーザの手にも物理法則に基づいたライティングが起こる。光の外に仮想オブジェクトがあれば物理演算によるライティング行われず、ユーザの手にだけ物理法則に基づいたライティングが起こる。

### 3.1.4 DITTO#003: 機構の設計

ユーザが観測した現象を生成するシステムの機構を説明する。図 7 のように、PC とピコプロジェクタ、Arduino によるストリーム処理と Hololens2 によるストリーム処理が行われている。

PC とピコプロジェクタ、Arduino によるストリーム処理は、まずピコプロジェクタから白色の単色画像を出力する。次に、Arduino に接続されている 3 つのフォトリフレクタを用いて、ピコプロジェクタの光がどの色のカラーフィルムを通過したかを識別する。フォトリフレクタによるカラーフィルタの色の識別は、カラーフィルタの裏面に白の画用紙と黒の画用紙を貼り、3 つの地点の赤外線反射光の強さを測定することで行う (図 8)。白画用紙と黒画用紙の赤外線の反射率は異なるため、フォトリフレクタ



図 6 赤色の光が仮想オブジェクトに作用している様子。(左) ピコプロジェクタの光の範囲内に仮想オブジェクトを配置した場合、(右) ピコプロジェクタの光の範囲外に仮想オブジェクトを配置した場合

の位置に白画用紙があるか黒画用紙があるかを認識することができる。図 8 の右図の場合、奥のセンサから白/白/黒と識別する。白と黒の並びをピコプロジェクタのレンズの前にあるカラーフィルムの色として変換して識別する。つまり白/白/黒は緑ということになる。ここで識別されたカラーフィルムの色を Hololens2 によるストリーム処理に TCP 通信で送信する。

Hololens2 によるストリーム処理は、まず赤外線マーカの位置と姿勢の推定を行う。赤外線マーカによるトラッキングシステムは、Thomas らによって提案された赤外線カメラを用いたポーズトラッキングシステムを参考に実装を行った [5]。図 3 で示しているように、赤外線マーカ

には 4 つの再帰性反射シールが貼られた球があり、それぞれの球と球の距離に類似性がないように球を 3 次元的に配置している。この球と球の距離を特徴として、赤外線マーカの位置と姿勢の推定を行う。4 つの球の位置を認識するために Hololens2 の前面に搭載されている近距離 ToF センサを用いる。近距離 ToF センサからは赤外光の反射の強さ、深度を取得することができる。赤外線マーカの球面部分には再帰性反射シールが貼られているため、ほかの物体よりも赤外光を強く返す。そのため赤外光の反射の強さを用いてフィルタリングすることで球面部分を検出することができる。この検出された 4 つの球面の位置関係から赤外線マーカの位置と姿勢を推定する。次に、推定された赤外線マーカの位置と姿勢からピコプロジェクタのレンズの位置と向きを推定する。このピコプロジェクタのレンズの位置と向きを Unity 上 (仮想世界上) の座標系に変換し、その位置と姿勢を仮想のスポットライトに適用する。PC とピコプロジェクタ、Arduino によるストリーム処理から送られてきたカラーフィルムの色を仮想のスポットライトの色に変更する。最後に Unity 上 (仮想世界上) の仮想オブジェクトに対する仮想スポットライトのライティングをレンダリングする。

この 2 つのストリーム処理をリアルタイムで処理を行う。

### 3.2 DITTO#009 : 〈物理演算〉から〈物理法則〉への作用の実現

DITTO#009 は、物理演算でシミュレートされる色の変化を生み出す仮想的なカラーフィルタの操作によるはたらかかけの作用を、物理的な世界に配置したプロジェクターの発光によるライティングを用いた物理的な現象として作り出すツールである。

#### 3.2.1 DITTO#009 : 物理世界内の構成

本システムは、Hololens2 とピコプロジェクタ、Intel RealSense D435i、PC、赤外線マーカで構成されている (図 9)。ピコプロジェクタと D435i は PC に直接接続されている。Hololens2 と PC はデータ通信を行うために TCP 通信で接続されている。Hololens2 から PC に仮想世界上のオブジェクトの位置と姿勢の情報を送信する。

ピコプロジェクタのレンズからの深度情報を得るために、ピコプロジェクタのレンズ上部に D435i を設置した。図 10 のように、D435i の背面にあるネジ穴を用いて、ピコプロジェクタのレンズと D435i のレンズが平行になるように固定した。ピコプロジェクタの位置と姿勢を推定するために、2.1 で説明した DITTO#003 と同様に、赤外線マーカをピコプロジェクタの上部に固定している。

#### 3.2.2 DITTO#009 : 仮想世界内の構成

前節で説明した DITTO#003 と同様に、3D ゲームエンジンである Unity と MRTK 用いて仮想世界のシーンを作成している。DITTO#009 では、仮想世界上に、仮想の平

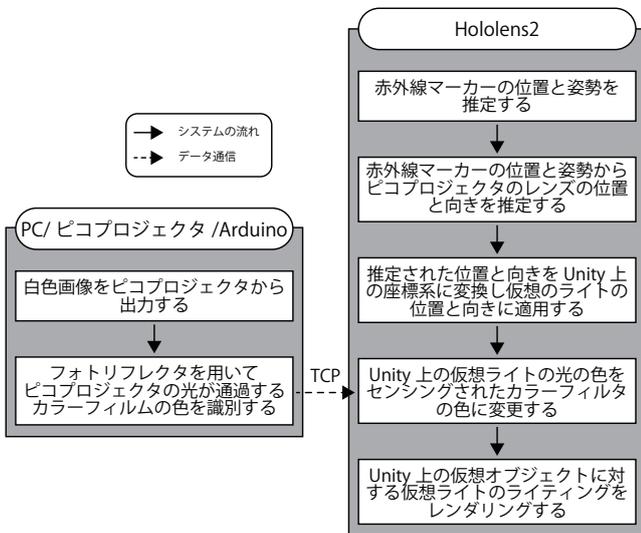


図 7 物理法則から物理演算への作用を実現する原理

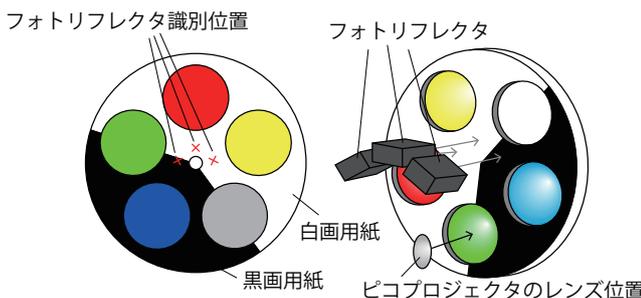


図 8 フォトリフレクタによるカラーフィルムの色の識別

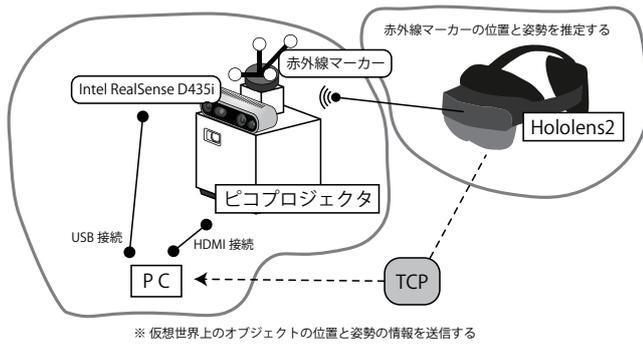


図 9 DITTO#009 における物理世界内のデバイス構成



図 10 ピコプロジェクタと D435i、赤外線マーカー

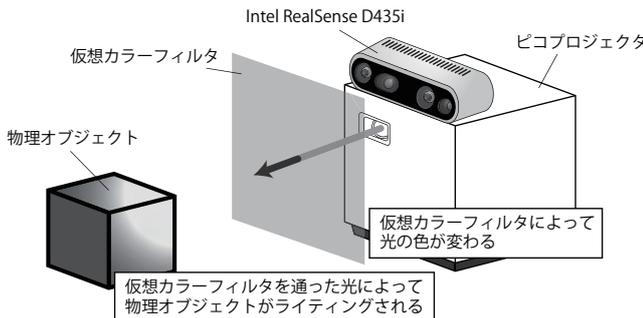


図 11 DITTO#009: 物理演算から物理法則への作用によって観測される現象

面型のオブジェクトを仮想カラーフィルタとして3つ配置した。いずれも半透明で、それぞれ赤色/緑色/青色である。このシーンを PC と Hololens2 でそれぞれで起動し、3つの仮想カラーフィルタの位置と姿勢を同期する。PC 上のシーンには仮想のカメラを配置し、Hololens2 で認識されるピコプロジェクタの位置と向きと同期させる。仮想カメラの FoV をピコプロジェクタの画角と一致するように設定する。

### 3.2.3 DITTO#009 において観測される現象

〈物理演算〉から〈物理法則〉への作用によって観測される現象について説明する(図 11)。DITTO#009 では、ピコプロジェクタから発せられる光の色が、仮想カラーフィルタの位置によって変化する。赤い仮想カラーフィルムを通れば赤い光、青い仮想カラーフィルムを通れば青い光となり、その先にある物理オブジェクトに変化した光が投影

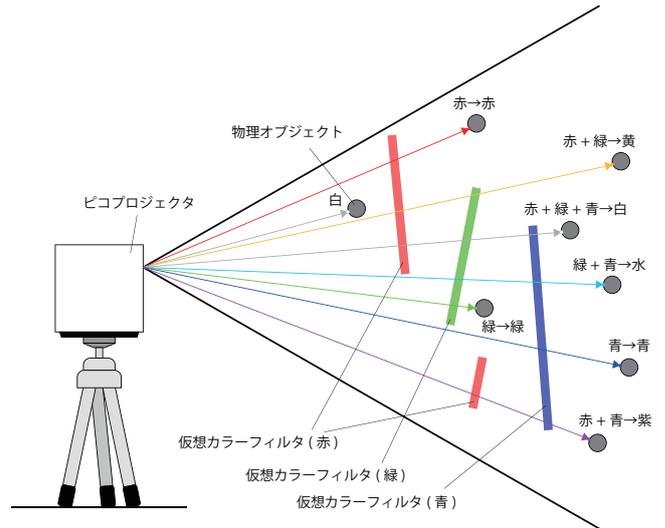


図 12 仮想カラーフィルタと物理オブジェクトの位置関係によって変化する現象

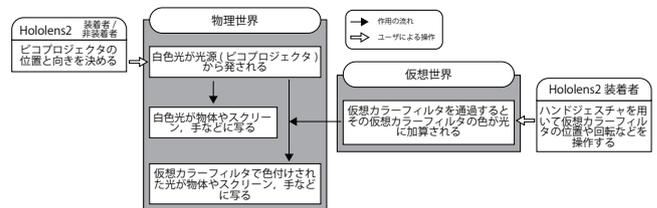


図 13 DITTO#009: 物理演算から物理法則への作用とユーザの操作の流れ

される。仮想カラーフィルムより手前に物理オブジェクトがある場合は、その物理オブジェクトには白い光が投影される(図 12)。さらに、光が複数枚の仮想カラーフィルタを通れば、光の色はそれぞれの仮想カラーフィルタの色が加算された色になる。例えば赤い仮想カラーフィルタと青い仮想カラーフィルタを通った場合、赤と青が加算された紫色の光が物理オブジェクトに投影される。

図 13 に、物理世界と仮想世界の作用とユーザの操作の流れを示す。物理世界上では、ユーザがピコプロジェクタの位置と向きを決め、その位置から白色光がピコプロジェクタから発せられる。その白色光は図 12 のような仮想カラーフィルタによる作用により、色が変化する。ユーザによる物理オブジェクトの位置の変更と Hololens2 を装着しているユーザによる仮想カラーフィルタの位置や姿勢の変更により、仮想カラーフィルタと物理オブジェクトの位置関係が変わる。この位置関係の変化により、物理オブジェクトに映る光の色が動的に変化する。

図 14 は仮想カラーフィルタによって変化した光の色を手に映している様子である。手をピコプロジェクタに対して仮想カラーフィルタより遠くに配置すると、赤い光が手に映し出される。仮想カラーフィルタよりも手前(ピコプロジェクタとの間)に手を置くと、白い光が手に映し出される。

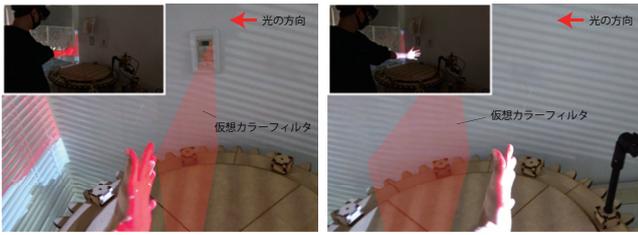


図 14 赤い仮想カラーフィルタによって光の色に作用を及ぼしている様子。(左) ピコプロジェクタの光が仮想カラーフィルタを通り物理オブジェクトに到達した場合、(右) ピコプロジェクタの光が仮想カラーフィルタを通る前に物理オブジェクトに到達した場合

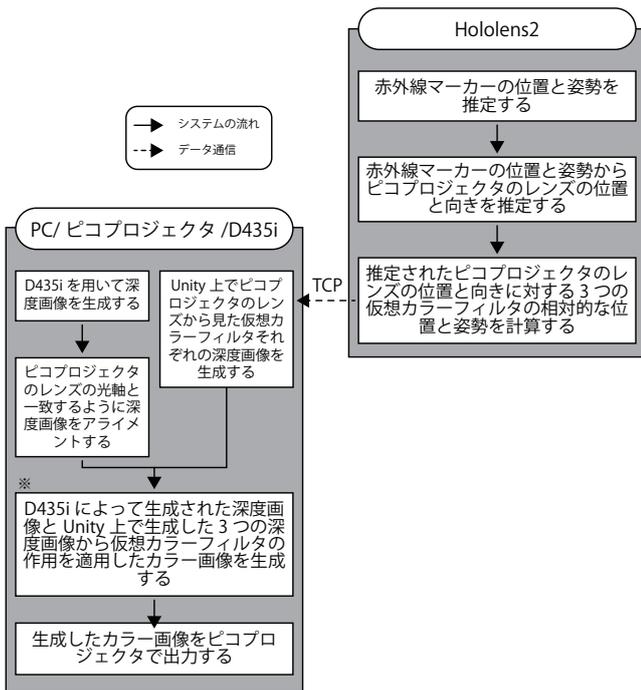


図 15 DITTO#009: 〈物理演算〉から〈物理法則〉への作用を実現する原理

### 3.2.4 DITTO#009: 機構の設計

ユーザが観測した現象を生成するシステムの機構を説明する。DITTO#009では、PCとピコプロジェクタ、D435iによるストリーム処理とHololens2によるストリーム処理を行っている(図15)。

Hololens2によるストリーム処理は、まず赤外線マーカの位置と姿勢の推定を行う。推定された赤外線マーカの位置と姿勢からピコプロジェクタのレンズの位置と向きを推定する。推定されたピコプロジェクタのレンズの位置と向きに対する3つの仮想カラーフィルタの相対的な位置と姿勢を計算する。この相対的な位置と姿勢をTCP通信でPCとピコプロジェクタ、D435iによるストリーム処理に送信する。

PCとピコプロジェクタ、D435iによるストリーム処理は、まずD435iを用いて深度画像を生成する。この取得した深度画像をピコプロジェクタのレンズの光軸と一致する

ようにアライメントした画像に変換する。次に、Hololens2によるストリーム処理から送られてきた仮想カラーフィルタのピコプロジェクタのレンズに対する相対位置と姿勢を基に、Unityを用いてピコプロジェクタのレンズからみた仮想カラーフィルタそれぞれの深度画像を生成する。D435iによって生成された深度画像とUnity上で生成された3つの深度画像から仮想カラーフィルタの作用を適用したカラー画像を生成する。生成する方法として、深度画像におけるピクセル座標(u,v)の深度を比較する。もしD435iが計測した深度が最も小さい場合、白色とする。Unity上で計算された仮想カラーフィルタまでの深度がD435iが計測した深度よりも小さい場合、その仮想のカラーフィルタの色を黒色に加算した色とする。この生成されたカラー画像をピコプロジェクタで出力する。

この2つのストリーム処理をリアルタイムで処理を行う。

## 4. まとめ

〈物理法則〉から〈物理演算〉への作用の実現するDITTO#003と〈物理演算〉から〈物理法則〉への作用の実現するDITTO#009について説明した。DITTO#003は物理的な自然現象によって光の色を変え、その結果を仮想世界上のライティングに作用させた。DITTO#009は仮想的な現象として光の色を変化させ、その結果を物理世界上の表出させた。物理的な世界と仮想的な世界との間で起こる干渉を具体的に体験可能とする事例となった。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科研費(20H05962)の支援を受けています。

## 参考文献

- [1] Milgram, P. and Kishino, F.: *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Display*, IEICE Trans. Information Systems, Vol.E77-D, No.12, pp.1321-1329 (1994)
- [2] Naemura, T., Nitta, T., Mimura, A. and Harashima, H.: *Virtual Shadows in Mixed Reality Environment Using Flashlight-like Devices*, Transactions of the Virtual Reality Society of Japans, Vol.7, No.2, pp.227-238 (2002)
- [3] 青木 孝文, 三武 裕玄, 浅野 一行, 栗山 貴嗣, 遠山 喬, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: 実世界で存在感を持つバーチャルリチャーの実現: Kobito -Virtual Brownies-, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.2, pp.313-322 (2006)
- [4] 平田 遼太郎, 石橋 朋果, チェ カネイ, 森 尚平, 池田 聖, 柴田 史久, 木村 朝子, 田村 秀行: DOMINO Toppling: 実物体と仮想物体のシームレスな遷移を可能にしたMRアトラクション, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, 21巻, 3号, pp.463-472, 2016
- [5] Pintaric, T. and Kaufmann, H.: *Affordable Infrared-Optical Pose-Tracking for Virtual and Augmented Reality*, IEEE VR Workshop on Trends and Issues in Tracking for Virtual Environments (2007)