

# 3次元空間におけるレーザー光照射位置検出に関する検討

嶋田英樹\*\*

## Study on Laser Pointer Extraction in Real Space

Hideki SHIMADA

### 1. はじめに

近年, 建物の構造を利用して魅力的な映像を映し出す“プロジェクションマッピング”やヘッドマウントディスプレイを用いて仮想空間をリアルに体験できる“バーチャルリアリティ (VR) 体験”など, リアルな世界をシンクロさせ魅力的な世界観を生み出す様々な手法が開発されている。これらの技術は, 新感覚の芸術やゲーム等に利用されることが多いが, 知育教育や芸術的感性の育成にも有効であると考えられ, 大きな注目を集めている。例えば, プロジェクト“The Apollo 11 Virtual Reality Experience”<sup>[1]</sup>が2015年に資金(3万6千ドル)を集め, システム開発が進められている。このプロジェクトは, アポロ11号の月面着陸をVRを駆使して再現するものであり, アームストロング船長の視点でロケットへの乗船から月面への着陸, 地球への帰還を体験することができる。本システムの開発には, NASAの資料を活用しており, システム利用を通して科学や宇宙開発の歴史などについて仮想空間内での体験を交えながら学習ができる。

しかし, 現在開発されているVRシステムは, 高価な機器を使用することが多く, 特にプロジェクションマッピングについては, 場所や投影する映像に関して多くの考慮すべき点が存在する。このため, 実際にこれらの技術に触れ体験することが可能な人々は少数である。また, これらの技術を扱うには, ソフトウェア開発技術や映像制作技術等において, 専門性が必要とされる場面が多く, この観点からも技術の普及が難しくなっていると考えられる。

そこで, 本研究室では, プロジェクションマッピングやVR体験が誰でも手軽に楽しめ, 知育教育にも活用できるバーチャルドローイングシステム(以下

VDS)を開発している。本稿では, VDSの機能で本システムのコアとなる3次元空間上に照射されたレーザー光の位置検出手法について述べる。

### 2. バーチャルドローイングシステム (VDS)

VDSは, レーザーポインタと深度センサ・RGBセンサを搭載したカメラ(Kinectを使用), プロジェクターおよびPCで構成される。図1にVDSの概要を示す。

VDSは, プロジェクターで投影した壁面上にレーザーポインタで軌跡を描くことで, 描いた軌跡が物理特性を持った物体となり壁の形状に沿って様々な動作を行うシステムである。具体的には, プロジェクションマッピングのようにプロジェクターを用いて壁面への映像投影を行い, レーザーポインタで描かれた軌跡をKinectのRGBカメラで読み取り, 軌跡の形状に合わせたオブジェクトを仮想的に画面上に生成する。生成されたオブジェクトはKinectの深度センサにより計測された壁の形状に沿って物理演算を実行しオブジェクトの動きをシミュレートする。VDSの用途としては, 物理演算シミュレート機能を活用しての教育, 壁の形状を利用した芸術作品の創作等が考えられる。

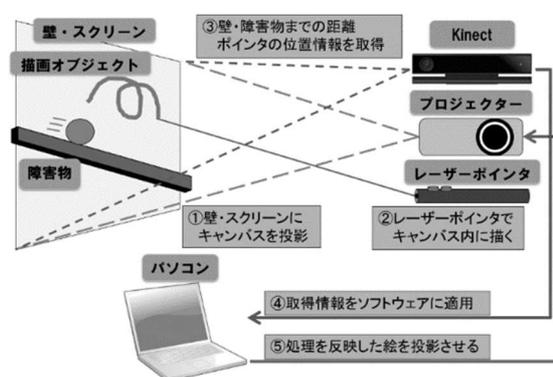


図1. VDSの概要

\* 原稿受付 平成30年10月31日

\*\* 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

### 3. レーザー光照射位置の検出について

VDS は、プロジェクションマッピングのように暗い空間でプロジェクターを用いて、レーザーポインタを照射し壁面への描画を行うことを想定している。このため、レーザー光照射位置の検出が重要となる。

これまでに、壁面へ照射されたレーザー光検出には次の5つの手法が提案されている<sup>[2][3]</sup>。

(1) 高出力レーザーポインタと光学フィルタを併用  
複雑な画像処理の必要がなく、高輝度な画素値の判断のみで簡単に高精度な照射位置検出が可能。出力クラス2 (1mW) 以上のレーザーポインタを使用するため、安全性の確保が難しい。

(2) 連続したフレーム間の差分を用いた手法

光の強度に関係なく動く物体を捉えることができる。このため、レーザーポインタの色、強さ、周りの環境光等を考慮することなしに照射位置の検出が可能。ただし、レーザーポインタが完全に静止した状態では検出が難しい。また、背景が大きく動く場合は、誤検出の可能性がある。

(3) 背景差分を用いた手法

フレーム間差分を用いた手法と同様の特徴を持つが、本手法は、レーザーポインタが完全に静止した場合においても照射位置の検出が可能である。ただし、背景が変化する場合および環境光が変化した場合等では、照射位置の検出が困難となる。

(4) RGB 値からレーザーポインタの色域を抽出

レーザー光の特定の色のみを抽出することができる。しかし、レーザーポインタの強さ、周囲の環境光ならびに背景によって照射位置の検出が困難となる。

(5) HSV 値からレーザーポインタの色域を抽出

RGB 値による抽出手法同様の特徴を有する。

VDS では、これらの5つのレーザー光照射位置検出手法を単独で用いるのではなく、高い検出精度が実現できると考え、2つの手法を組み合わせる。具体的には、(2)・(4)の手法または(2)・(5)の手法を組み合わせるシステムへ実装し、レーザー光照射位置検出実験を行い、各手法の有効性を検証した。

#### 3. 1 レーザー光照射位置検出

レーザー光照射位置検出には、(2)連続したフレ

ーム間差分を用いた手法と(4)RGBまたは(5)HSVによる色域抽出を組み合わせる手法を用いる。このため、Kinect から得られるカメラ画像に対して、RGB 値による処理、または HSV 値による処理の選択が可能となるようにシステムの開発を行い、実験を実施した。図2にレーザー光照射位置検出のフローチャートを示す。

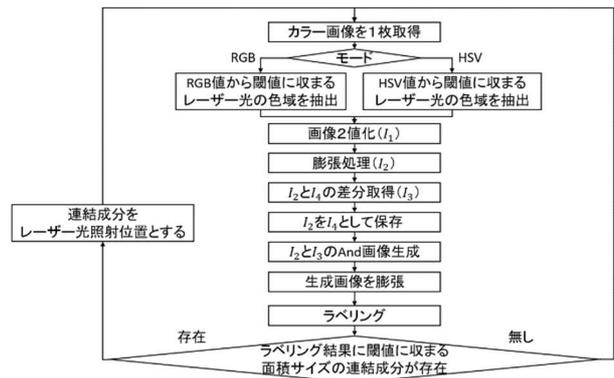


図2. レーザー光照射位置検出フローチャート

処理の流れとしては、まず Kinect のカメラから画像を取得する(図3)。取得したカラー画像から、RGB 値による色域抽出もしくは HSV 値による色域抽出を行い、得られた画像に対して2値化、膨張処理を行う(図4)。ここで背景色にレーザー光と同じ色域が含まれていた場合、直前までの処理で該当箇所が誤抽出されている可能性があるため、直前のフレーム間との差分を取得し誤抽出範囲を削除する(図5)。また、レーザーポインタの移動が速すぎる場合、フレーム間でレーザー光の位置が大きく離れてしまい差分画像に写ったレーザー光が2つに分かれてしまう場合がある。この問題を解消するために現在のフレームの処理済み画像(図4)と差分画像(図5)でAND画像を作成し、直前のフレームのレーザー光を差分画像から除去する(図6)。このようにして得られたAND画像をラベリングし、面積が閾値に収まる連結成分が存在した場合にその連結成分をレーザー光検出位置とする。

#### 3. 2 レーザー光抽出閾値設定

レーザー光照射位置検出では、レーザー光検出に用いる抽出閾値を実行環境に合わせて設定する。設



図3. Kinect 画像

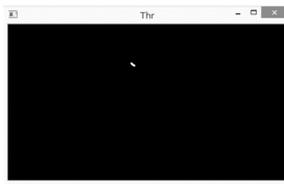


図4. 色域抽出画像

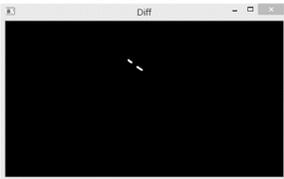


図5. 差分画像

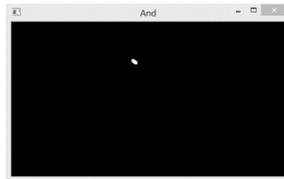


図6. AND 画像

定方法は、スクリーン（壁面）に何も投影していない状態で、レーザーポインタのレーザー光を照射する。これによって、レーザー光の位置が差分画像として検出され、レーザー光の色域がレーザー光検出に用いられる閾値として設定される。図7にレーザー光抽出閾値決定フローチャートを示す。

本アルゴリズムは、基本的にフレーム間差分を用いた手法で、差分画像を取得した結果、連結成分の数が1つのみの場合にその連結成分位置の画素値を設定値として取得、保存する。ここで、連結成分を1つのみに絞った理由としては、ノイズの誤検出を防ぐためである。また、実際に設定される閾値は、取得した画素値に次に示す補正値を考慮して設定している。

- ・画素値 - 20 < RGB 値 < 画素値+1
- ・画素値 - 20 < HSV 値 < 画素値+20
- ・連結成分の面積 - 20 < 面積 < 連結成分の面積+100

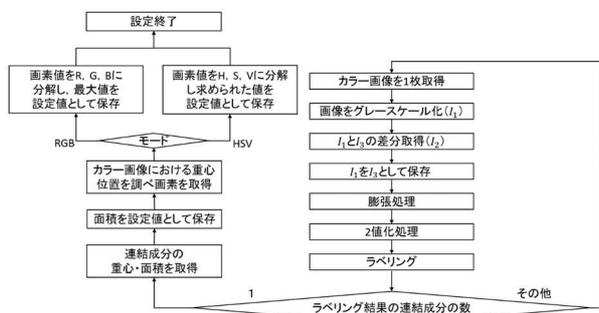


図7. レーザー光抽出閾値設定フローチャート

有効性の確認および色域抽出法の違いによる検出率を把握するためレーザー光照射位置検出実験を行った。

### 3. 3. 1 実験方法

レーザー光照射位置検出実験は、図8に示すように、プロジェクターでスクリーン上にランダムに円を投影し、レーザーポインタで投影された円にレーザー光を照射する。この時、認識されたレーザー光の照射位置と実際に円を投影した位置との誤差を計測する。ここで、Kinect およびプロジェクターは、撮影軸と投影軸が一致するように配置を行い、投影面は平面とし、背景画像の違いによる検証を行うため、黒単色画像、低輝度動画、高輝度動画をスクリーンに投影し、RGB 値、HSV 値を用いた検出手法について実験を行った。実験回数は、各背景ごとに 128 回であり、検出位置と投影円の位置との誤差が 20mm 以内の結果を検出成功とした。また、実験に用いた各値は、次の通りである。

<配置, 閾値>

スクリーン - プロジェクター距離 : 1270mm

Kinect - プロジェクター距離 : 175mm

2 値化閾値 : 30

<RGB>

R 値で色域抽出,  $236 \leq R < 256$ ,

$36 < \text{面積} < 146$

<HSV>

$130 < H < 170$ ,  $0 < S < 23$ ,  $235 < V < 256$ ,

$31 < \text{面積} < 141$

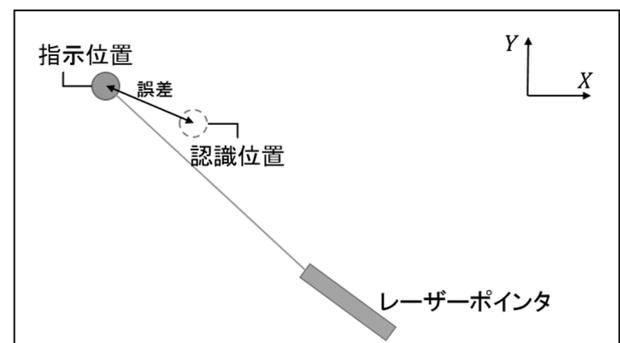


図8. レーザー光照射位置検出実験

### 3. 3 レーザー光照射位置の検出実験

前述のレーザー光照射位置検出手法について、その

### 3. 3. 2 実験結果

レーザー光照射位置検出実験結果を表1に示す。表

1の実験結果からRGB値による検出手法に関しては、黒背景、低輝度動画において高い検出率となることが確認された。一方、高輝度動画においては、計測不能であった。これは、取得画像の高輝度箇所が白く映ってしまい、背景動画を誤認識してしまったことによるものと思われる。また、HSV値による検出手法についても、黒背景、低輝度動画が高い検出率となり、高輝度動画では、低い検出率となった。この理由としては、検出の際にHSV値変換を行うことによって、明るさによる抽出域指定が可能となったためであると考えられる。

以上の実験結果からVDSでは、レーザー光照射位置検出手法としてHSV値を用いた検出手法が有効であることが確認された。

表1. レーザー光抽出位置検出実験結果

		成功 [回]	失敗 [回]	成功率 [%]	成功時誤差 平均[mm]
R	黒背景	128	0	100	9.14
	低輝度	124	4	96.9	9.74
B	高輝度	—	—	—	—
H	黒背景	128	0	100	8.77
	低輝度	122	6	96.2	9.62
V	高輝度	40	88	31.3	8.90

#### 4. 凹凸のある空間でのレーザー光照射位置の検出

VDSの特徴の一つに、壁の形状を深度センサを用いて取り込み、映像パフォーマンスに取り入れる機能がある。このため、コントローラーとして用いるレーザーポインタのレーザー光は、凹凸のある壁面に照射されることとなり、レーザー光照射位置の検出だけでなく、壁面形状に応じたレーザー光位置の修正が必要になると予想される。そこで、深度センサからの情報を利用した凹凸を有する壁面へのレーザー光照射位置検出アルゴリズムの修正を検討した。

##### 4. 1 凹凸のある空間での問題点及び修正法

凹凸のある壁面にレーザー光を照射した場合のレーザー光照射位置とカメラによる認識位置、プロジェクターによる投影位置の関係を図9に示す。図9に示すように、障害物上の位置にレーザー光を照射する場

合、次の問題が発生する。

図9において、レーザー光を障害物上の $P_1$ に向けて照射する。Kinectのカメラ画像による認識だけでは、障害物により視野が狭まり $P_1$ の位置が $P_2$ であると認識され、プロジェクターからは $P_2$ に向けて投影が行われる。しかし、実際は、障害物があるため投影位置が $P_3$ へずれる。結果として、レーザー光照射位置と認識により投影が行われた位置が大きくなることとなる。これは、レーザー光の軌跡を処理に用いるVDSでは、生成するオブジェクトの投影位置にずれが生じることとなり、VRシステムにおいての没入感を阻害する原因となるため問題となる。このため、認識位置の修正を次のように行った。

図9に対して、図10に示すように、角度、長さをそれぞれ定義し、図10からプロジェクターの投影位

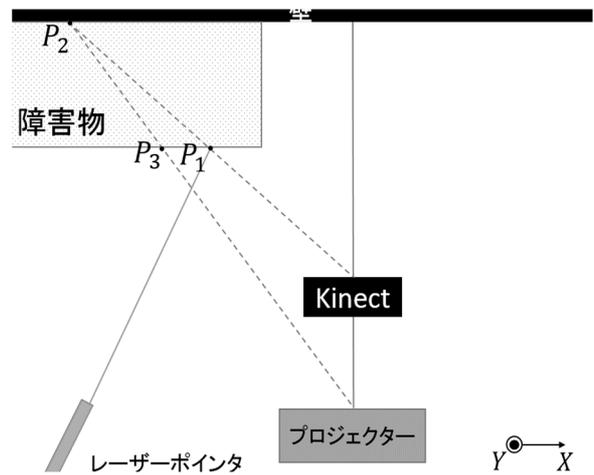


図9. 凹凸のある壁面へのレーザー光の照射

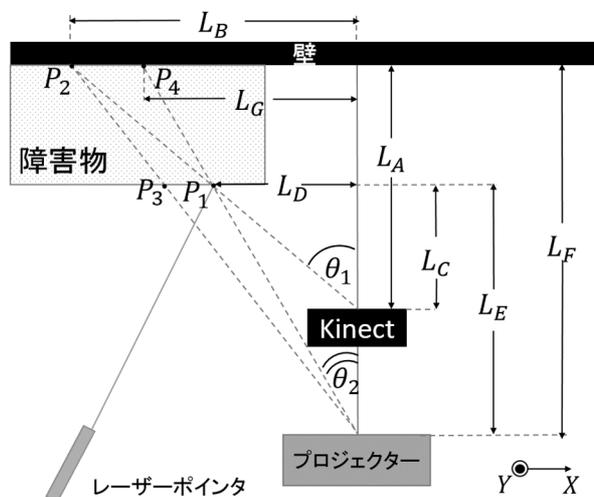


図10. 角度、長さの定義

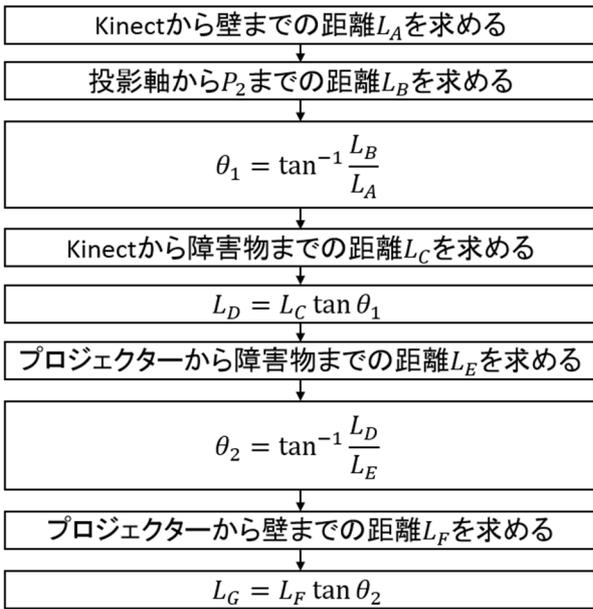


図 11. レーザー光照射位置検出手法の修正手順

置を  $P_1$  に修正するために、レーザー光認識位置  $P_2$  を  $P_4$  に修正することを考え、図 11 に示すレーザー光照射位置検出修正アルゴリズムを開発した。

#### 4. 2 凹凸のある空間でのレーザー光検出実験

凹凸のある空間におけるレーザー光照射位置の検出が可能か検証を行った。

##### 4. 2. 1 実験方法

図 12 に示すように、障害物を壁の手前に設置し障害物上にランダムに円を投影し、レーザーポインタで投影された円にレーザー光を照射する。この結果認識されたレーザー光の照射位置と実際に円を投影した位置との誤差を計測する。

実験は、障害物の厚さによる影響を把握するため 49mm, 75mm, 120mm の 3 つの厚さの障害物について行った。また、レーザー光検出には HSV 値による検出法を用い、比較のため修正を行わなかった場合の誤差についても計測した。実験回数は、1 つの障害物に対して 128 回、プロジェクターの投影軸と指示位置の距離、計測された誤差の関係を X 軸、Y 軸のそれぞれについて求めた。また、指示位置の間隔は 1mm ごととし、同じ間隔の箇所でも複数の計測結果が存在した場合は、それらの平均値を計測値として扱い、実験結果に対して最小二乗法による線形近似を行った。円の投影は障害物上のみであり、投影位置の決定

にはメルセンヌ・ツイスタ法による擬似乱数生成器を用いた。

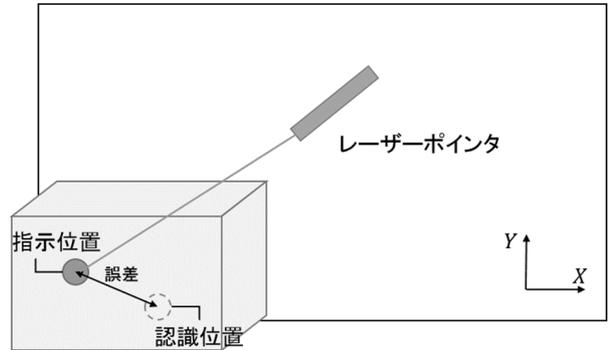


図 12. レーザー光照射位置検出実験 (凹凸あり)

##### 4. 2. 1 実験結果

凹凸のある空間におけるレーザー光照射位置検出実験結果を図 13 から図 18 に示す。図 13, 図 14 は、厚さ 49mm の障害物に対してレーザー光を照射した場合の指示位置と投影軸の距離と誤差の関係をレーザー光照射位置修正ありの場合と修正なしの場合を比較したグラフである。同様に図 15, 図 16 は障害物の厚さが 75mm の場合、図 17, 図 18 は障害物の厚さが 120mm の場合のグラフである。

グラフからは、認識位置修正ありと修正なしの場合の結果に顕著な差が現れておらず、修正が正しく行われているか判断することができなかった。この主な要

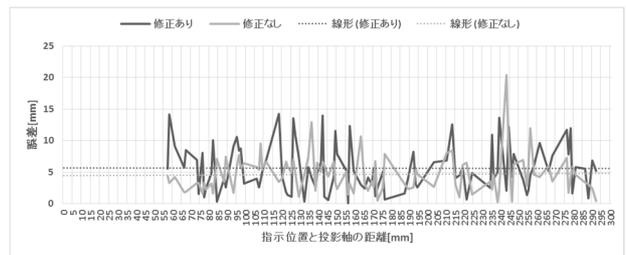


図 13. 障害物 49mm, X 軸方向誤差

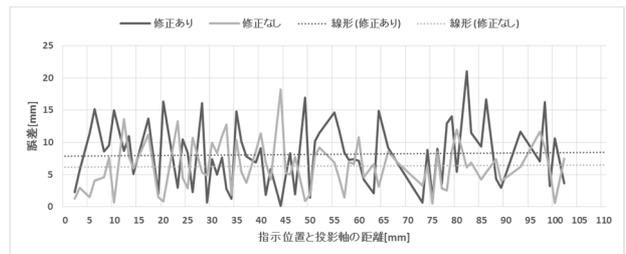


図 14. 障害物 49mm, Y 軸方向誤差

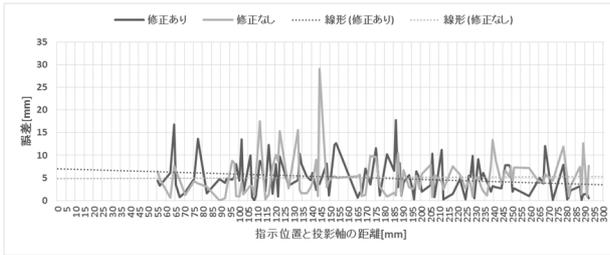


図 15. 障害物 75mm, X軸方向誤差

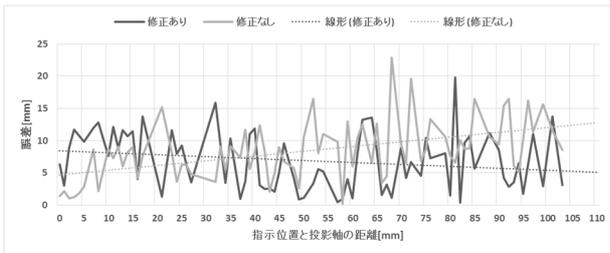


図 16. 障害物 75mm, Y軸方向誤差

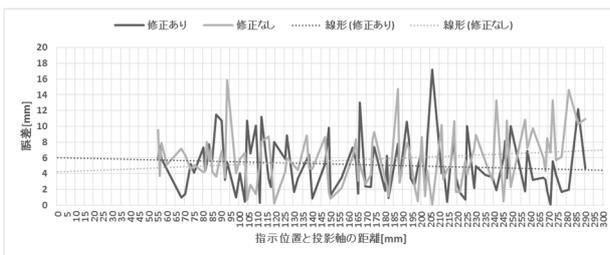


図 17. 障害物 120mm, X軸方向誤差

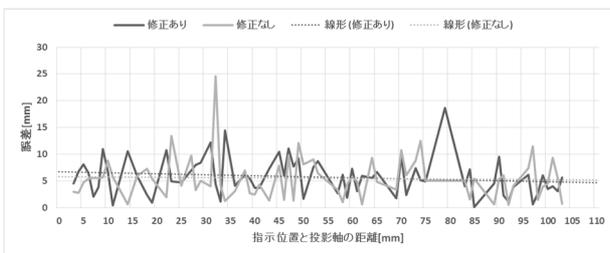


図 18. 障害物 120mm, Y軸方向誤差

因としては、Kinect とプロジェクター間距離が短かったことが考えられる。Kinect とプロジェクター間距離が短い場合、図 19 に示すように、図 9 (もしくは図 10) と比較して  $P_1$  と  $P_3$  のずれが小さくなることを確認できる。つまり、実験結果からは、Kinect とプロジェクターが近くなる場合、レーザー光認識位置の修正を行わなくても正確なレーザー光照射位置の認識が可能であることが確認された。

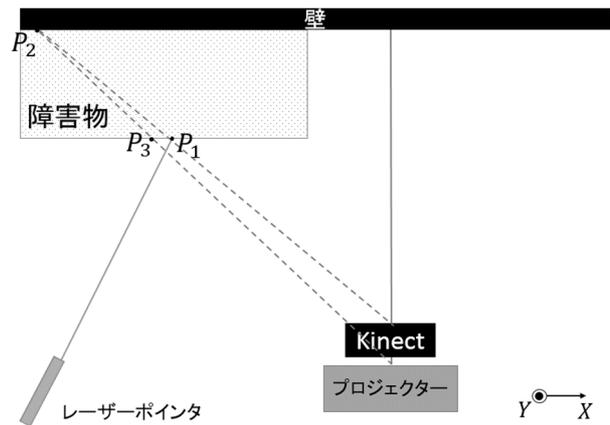


図 19. Kinect, プロジェクター間距離が近い場合

### 5. おわりに

今回、開発しているバーチャルドローイングシステム (VDS) において、3次元空間に照射されたレーザー光の位置検出手法について報告を行った。実験の結果から、今回提案したレーザー光照射位置の検出手法および障害物等が存在する場合の修正手法は、本システムにおいての利用に問題のないことが確認できた。しかし、カメラとプロジェクターの配置によっては、レーザー光照射位置と投影オブジェクトにずれが生じることも明らかとなった。

今後の課題としては、カメラとプロジェクターの配置位置に関係なく、高精度でのレーザー光照射位置へのオブジェクト投影手法の検討ならびに高輝度動画における検出率の向上が挙げられる。

### 謝辞

本システムに関して、レーザー光照射位置検出プログラム等の開発にご協力いただきました本校電子制御工学科卒業生 田丸将寛氏にお礼を申し上げます。

### 参考文献

- [1] The Apollo 11 Virtual Reality Experience, <https://www.kickstarter.com/>
- [2] 勝山裕, 小澤憲秋, 武部浩明, 直井聡, 横田治夫: “講義ビデオ中のレーザーポインタ抽出の一検討”, 信学技報, 103(656), pp.37 - 42, 2004
- [3] 福地健太郎: “レーザーポインタの軌跡を追跡する映像パフォーマンス向け遠隔入力システム”, 情報処理学会論文誌, 49(7), pp.2712-2721, 2008