

空間上に配置された複数レーザー光を用いたユーザーインターフェースの提案 A Proposal for the User Interface by Using Laser Devices Arranged in a Three Dimensional Space

小瀬木 悠佳[†] 亀山 真也[†] 児玉 賢史[‡] 明石 重男[‡]
Yuka Ozeki Shinya Kameyama Satoshi Kodama Shigeo Akashi

1. はじめに

画像認識技術の向上により、カメラを用いたユーザーインターフェースの研究が数多く行われている。例えば、視線検出による意思伝達装置[1]や、ジェスチャ認識によるインテリジェントルームの構築[2]など、応用例は多岐に渡る。しかしながら、これらのシステムを実社会へ導入することを考えた時に、プライバシー保護などの理由からカメラを設置できない場合がある。

カメラを使用しない手法として、渡部はレーザー光を用いたユーザーインターフェースシステム[3]を提案した。具体的には、レーザー光モジュールと受光センサーの組を複数組、一定間隔で空間上に配置し、レーザー光を遮った場合に物体があると判定する。これにより、空間上の物体情報を取得することができる。そして、予め現実空間を模倣した VR 空間を用意しておき、取得した物体の形状や動きの情報から、VR 空間上にある仮想物体に対して操作ができるようにする。操作として仮想物体への接触、および平行移動を想定し、正常に操作できることを確認した。

渡部のシステムの短所として、レーザー光を用いていることから、物体の認識は色や細部の形状まで把握することができない。そのため、動作の種類が限定的になってしまう。

そこで本研究では、仮想物体への既存の操作に回転を加え、組み合わせによってユーザーインターフェースとしての操作の種類を増やすことを提案する。渡部のシステムでは、仮想物体を回転させることを想定していないため、接触判定のアルゴリズムを変更する必要がある。

接触判定を行うにあたって、任意の点における対象物体の内外判定が必要になる。この内外判定の高速なアルゴリズムを提案するとともに、有効性を示す。

以下本稿では、2 章で本システムの概要を説明し、3 章で仮想物体への接触の操作に必要な内外判定について述べる。4 章ではシミュレータデバイスを用いた実装および実験について述べ、5 章で本システムの評価及び課題について考察する。

2. システムの概要

本システムは、レーザー光を使用して物体情報を取得し、その情報から VR 空間上の仮想物体を操作するユーザーインターフェースシステムである。この章では、主な処理である物体情報の取得と仮想物体に対する操作について詳しく述べる。

2.1 物体情報の取得

物体の位置、形状、動きなどの情報を取得するために、レーザー光を用いる。レーザー光モジュールと受光センサーを用意し、お互いが対面するように配置する。この間に物体があった場合、受光センサーがレーザー光を検知できないため、物体が存在すると判定できる。

渡部は図 1 のようなレーザー光モジュールと受光センサーを使用したプロトタイプデバイスを作成し、物体情報の取得が可能であることを確認した[3]。

この仕組みを利用して、図 2 のように三次元正方格子状に二方向から直交するようにレーザー光を配置し、交点を観測点とする。その結果、三次元の物体情報を得ることができる。

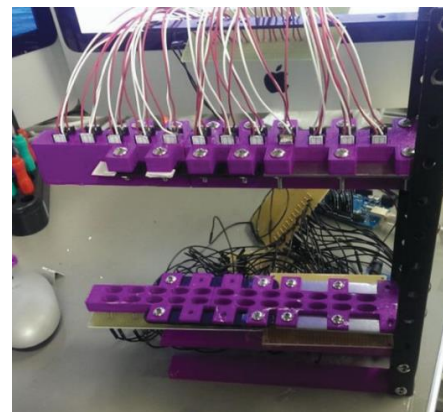


図 1 プロトタイプデバイス

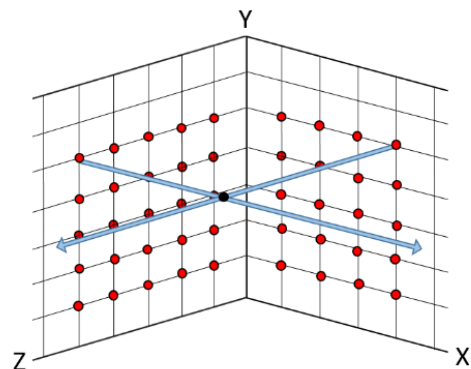


図 2 空間上の複数レーザー光の配置

[†] 東京理科大学 理工学研究科 情報科学専攻

[‡] 東京理科大学 理工学部 情報科学科

2.2 仮想物体に対する操作

2.1 章で取得した物体情報を利用して、予め現実空間を模倣した VR 空間を用意しておき、仮想物体の回転、接触、平行移動の操作を行う。仮想物体は非凸形状のような複雑形状である場合も考慮した。以下で、今回新たに加わった操作である回転と、それにともない変更する接触判定のアルゴリズムについて述べる。

2.2.1 回転

回転の操作は、取得した物体情報の移動方向ベクトルが、仮想物体の中心方向へのベクトルと垂直に近ければ行う。

現在の物体の中心位置、仮想物体の中心位置、過去の物体の中心位置がなす角を求め、物体の移動距離に応じて移動方向に回転させる。

2.2.2 接触

接触の操作とは、取得した物体情報が仮想物体に触れていることを指す。物体情報はレーザー光の観測点の点群で与えられるため、各点が仮想物体の内部か外部か判定することにより、接触しているか判断することができる。その際に用いる内外判定のアルゴリズムは 3 章で詳しく述べる。

3. 内外判定

任意の点が対象物体の内部か外部か判定を行う。本システムにおける内外判定は、対象物体の内側および表面上にある点はすべて内部と判定する。レーザー光はカメラに比べ粗い情報しか取得できないため、オブジェクトの近傍点においても正確に判定ができるアルゴリズムである必要がある。前提条件として、対象物体は非凸形状のような複雑形状も含み、三角形ポリゴンで形成されているとする。

3.1 既存手法

内外判定の既存手法で有名なアルゴリズムに、Crossing Number Algorithm と Winding Number Algorithm がある[4]。

Crossing Number Algorithm は求めたい点から水平方向に線を引き、その半直線が対象物体と交差する回数を数え、その値によって内外判定を行うアルゴリズムである。二次元の場合は辺に対する交点、三次元の場合は面に対する交点の数を求める。

一方、Winding Number Algorithm は角度を用いることで内外判定を行うアルゴリズムである。二次元の場合は、求めたい点を中心に対象物体の辺をなぞり、点の回りを何周したかで内外判定を行う。三次元の場合は、立体角を用いる[5]。

Crossing Number Algorithm は一般的によく利用されるが、対象物体の表面上の点など特殊な場合に、誤判定を起してしまう可能性がある。Winding Number Algorithm は自己交差を持つ対象物体に対しても正確に判定できることで知られており、特殊な条件を考慮する必要がない。しかし、三角関数を利用しているため、計算コストが大幅にかかる。

そこで本研究では、Crossing Number Algorithm を基盤として、計算コストがかからず、近傍点も正確に判定できるアルゴリズムを提案する。

3.2 提案手法

三次元物体に対して、任意の点 $P(p_1, p_2, p_3)$ の内外判定を行う。

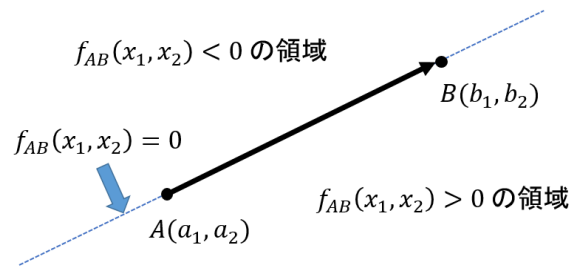
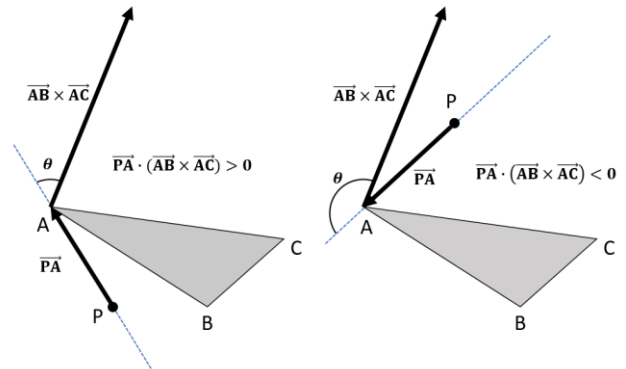


図 3 半空間分割関数による領域判別



法線ベクトル負方向にある 法線ベクトル正方向にある

図 4 ポリゴンに対する点 P の位置関係

対象物体の各ポリゴンの頂点座標を外部から見て左回りに入力する。このようにすることで、外部の任意の点から対象物体を見たときに、実際に見えるポリゴンは左回り、隠れているポリゴンは右回りに入力されていることになる。

対象物体を形成する全てのポリゴン、および点 P を Z 軸と平行に XY 平面へ射影する。

射影した際に、点 P が三角形に対してどの領域にあるか考える。二次元における領域判別は半空間分割関数[6]を用いて行う。半空間分割関数とは、図 3 に示すように頂点 $A(a_1, a_2)$ 、 $B(b_1, b_2)$ に対して以下のように定義される。

$$f_{AB}(x_1, x_2) = (b_2 - a_2)(x_1 - a_1) + (a_1 - b_1)(x_2 - a_2)$$

この関数を用いることで、 A から B に向かうベクトルの右側に属する点は正の値、左側に属する点は負の値、直線 AB 上に属する点は 0 になるため、任意の点が属する領域を判別することができる。

前提条件から、各ポリゴンは凸形状であり、すべての辺の半空間分割関数の値が同符号、または 1 つでも 0 であれば、点 P はポリゴンの内部と判定することができる。点 P が内部と判定された各ポリゴンをそれぞれ T_1, T_2, \dots, T_n とする。このとき、半空間分割関数の値がすべて 0 になるようなポリゴンは、射影する前において Z 軸と並行である。そのポリゴンについてのみ射影する前に戻し、 XZ 平面に対して再度射影を行い、その上で判定を行う。

得られたポリゴン T_1, T_2, \dots, T_n と点 P を射影する前の位置に戻し、点 P がポリゴンに対してどの領域にあるか考える。任意のポリゴン T_i の頂点をそれぞれ A, B, C とする。このとき、ポリゴンの法線ベクトルである $\overline{AB} \times \overline{AC}$ とベクトル \overline{PA} の内積の値が、正の値ならば法線ベクトルの負方向に点 P があり、負の値ならば法線ベクトルの正方向に点 P があると判別できる。 0 の場合はポリゴン上に点 P がある(図 4)。

そこで、各ポリゴンの法線ベクトルを Z 成分が正になるように求め、 \vec{PA} との内積が負の値のポリゴンの数を数える。内積が 0 になるポリゴンが 1 つでも存在する場合は、直ちに内部と判定する。数えたポリゴンの数が奇数ならば内部、偶数ならば外部と判定することができる。

この方法は、XY 平面に射影した際に、点 P がポリゴンの辺上や頂点上にあった場合を考慮しなければ誤判定を起こしてしまう。そこで、 T_1, T_2, \dots, T_n の中から、射影する前に辺または頂点を共有しているポリゴン同士を探し、それぞれグループにして分けておく。Z 軸の正方向から負方向に対象物体を見たとき、グループ内の各ポリゴンの入力がすべて右回り、またはすべて左回りの時に一つの面と見なす。1 つでも方向が違うときは面がないと見なす。これにより、すべての点に対して正しく判定することができる。

4. 実装と実験

本システムの有用性を確かめるために実装を行った。また、内外判定における提案手法の有効性について調査するために比較実験を行った。

本システムは 2 章で述べたような複数のレーザー光モジュールと受光センサーを使用したシステムを想定しているが、作成にはコストがかかる。現段階では配置の仕方、ユーザーインターフェースとしての有用性についての検討段階であるため、シミュレータデバイス[3]を用いて、その上で実装、および実験を行った。

4.1 Web カメラを用いたシミュレータデバイス

Web カメラ二台を図 5 のように配置し、被写体側の面に青いシートを配置した。このようにすることで、Web カメラで取得した画像から、想定しているレーザー光の当たる箇所のピクセル情報のみを抽出し、青であったら受光センサーが受光した場合、青以外であったらレーザー光が遮られた場合として対応付けることができる。空間は縦 320mm、横 240mm、高さ 240mm の空間を想定した。操作する物体として手を想定した。図 6 に実際に用いたシミュレータデバイスを示す。

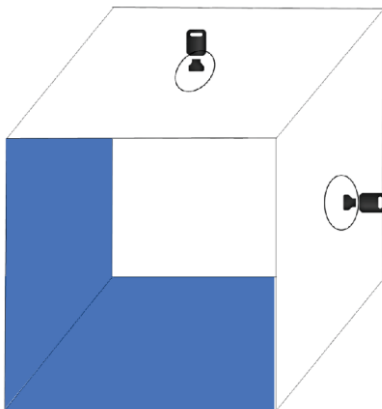


図 5 シミュレータデバイスのイメージ

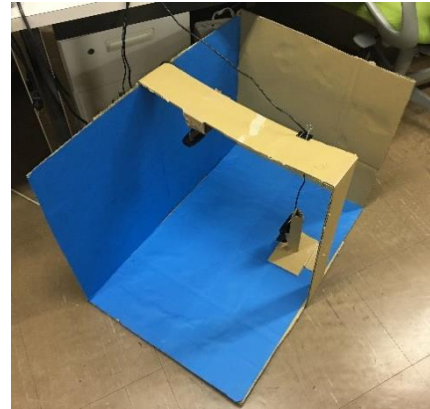


図 6 実際のシミュレータデバイス

4.2 実装環境

表 1 に実装環境を示す。統合開発環境、およびプログラムの作成は Unity[7]を用いて行った。OpenCV は Web カメラから取得した画像を処理するために使用した。

表 1 実装環境

OS	Windows 10 Enterprise 64bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-4790 (3.60GHz)
メモリ	8.0GB
統合開発環境	Unity 5.1.0
開発言語	C#
ライブラリ	OpenCV 2.4.10
Web カメラ	Logicool HD Webcam C270, Logicool HD Webcam C525

4.3 実験内容

仮想物体として非凸形状のドーナツ型図形を用いた。ポリゴン総数は 112 面である。この仮想物体を用いて、以下の実験を行った。

4.3.1 操作

今回新たに加わった回転、接触の操作を正しく行うことができるか検証する。

4.3.2 内外判定法の比較

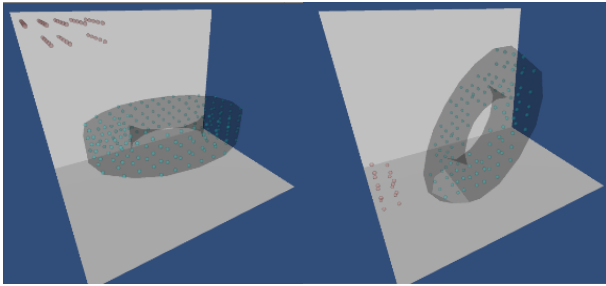
格子点に対する内外判定の正答個数、処理時間を指標に比較実験を行う。

4.4 実験結果

この章では実験結果を提示する。

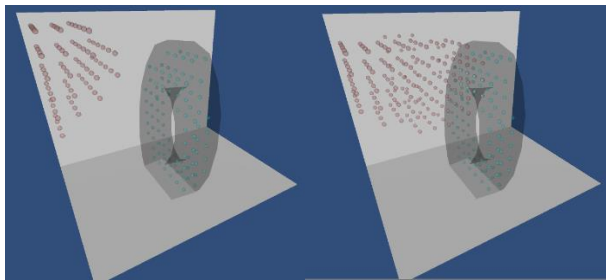
4.4.1 操作

回転の操作、および接触の操作の実験結果を図 7、図 8 に示す。



回転前 回転後

図 7 回転の操作



接触前 接触している

図 8 接触の操作

4.4.2 内外判定法の比較

本システムの内外判定では平面上の点および頂点上の点も内部と正しく判定できるアルゴリズムである必要がある。この条件を満たすアルゴリズムである、3.1 章で紹介した立体角を用いた Winding Number Algorithm と 3.2 章で述べた提案手法における比較を行った。

処理速度の比較では、計算回数に負荷をかけて処理時間がどのように変化するか実験を行った。内外判定のみの 20 回分の平均処理時間を表 2 にまとめる。その際の正答個数を表 3 にまとめる。

表 2 内外判定の平均処理時間

判定する点の個数 (個)	Winding Number Algorithm (秒)	提案手法(秒)
288	0.1758	0.0880
2304	1.3454	0.4710
18432	10.7287	3.8023

表 3 内外判定の正答個数

判定する点の個数 (個)	Winding Number Algorithm (個)	提案手法(個)
288	288	288
2304	2304	2304
18432	18432	18432

5. システムの評価と課題

回転の操作について、手の移動方向を正しく認識し、想定した方向に回転させることができた。また、接触の操作においても想定通りに動作した。しかし、手の移動距離については、物体の中心位置から求めているため、手首を固定して指先で撫でるような動作は想定した動きより移動距離が短く認識される。そのため、物体の重心位置を推定することができれば安定した移動距離を求めることができると考えられる。

内外判定法の比較について、提案手法を用いた場合は立体角を用いた Winding Number Algorithm の場合よりも処理時間が短くなった。これは、提案手法では、割り算の使用回数を必要最低限に抑え、三角関数を用いずに計算を行うことができるためである。デザインの凝った仮想物体はポリゴン数が増えるため、提案手法は有効であると考えられる。

今回の実装では、レーザー光を二方向から直交するように配置したが、角度を変えることによって少ないレーザー光で多くの観測点を設けることができる可能性がある。例えば、入射角 45° で二方向から空間中で交わるようにレーザー光を配置した場合、観測点を細分化することができる。しかし、この方法は課題が多い。例えば、レーザー光モジュールに近いところで物体がレーザー光を遮った場合、その地点から受光センサーまでにある観測点においても遮ったと判断されてしまう。その結果、物体の形状や動作を正しく認識できない可能性がある。これは直交する場合も同様の現象が起きるが、誤判定による形状の変化が少ない。今後の展望として、物体の形状を正しく認識するための最適なレーザー光の配置を考える必要がある。

6. まとめ

本稿ではレーザー光を用いたユーザーインターフェースシステムを提案した。操作として回転を加えることができ、その結果、ユーザーインターフェースとしての操作の種類を増やすことができたと考えられる。今後は、簡易的に利用できるようにコンパクトな実装を提案していきたい。

謝辞

この研究を行うきっかけを作ってくださった渡部さんに厚く御礼申し上げます。研究における議論や実験を手伝ってくださった明石研究室の皆様へ感謝致します。

参考文献

- [1] 伊藤 和幸, 伊福部 達, “ビデオキャプチャ画像処理による視線検出および意思伝達装置への応用”, 電子情報通信学会論文誌 ISSN 0915-1915, Vol.J88-D-I, No.2 (2005).
- [2] 入江 耕太, 若村 直弘, 梅田 和昇, “ジェスチャ認識に基づくインテリジェントルームの構築”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73, No.725 P258-265(2007).
- [3] 渡部 祐太, “仮想現実上の複雑形状におけるレーザー光を用いた接触判定問題”, 東京理科大学大学院 修士論文(2016).
- [4] 川尻 真寛, “点の多角形に対する内外判定”, http://www.ntpc.co.jp/technology/number_algorithm.html.
- [5] 中山 敦司, 川勝 大輔, 小堀 研一, 久津輪 敏郎, “仮想現実感における物体把持のための内外判定法”, 全国大会講演論文集 第 48 回(データ処理) P297 - 298 (1994).
- [6] 原 佑太郎, 児玉 賢史, “拡張現実における赤外光を用いた可変形マーカーの提案”, 電子情報通信学会技術研究報告.HIP ヒューマン情報処理 ISSN 0913-5684, Vol.113, No.299 (2013).
- [7] Unity, <https://unity3d.com/jp>.