

照明制御を用いた 拡張現実における空間認識手法の検討

松井 健人^{1,a)} 本谷 陽^{2,b)} 間 博人^{1,c)} 天白 宗成^{1,d)} 三木光範^{1,e)}

概要：拡張現実では、実空間の正確な位置に仮想空間のオブジェクトを配置するために空間認識が必要となる。空間認識手法としては、主に GPS や加速度センサ、地磁気センサ、赤外線深度センサ、超音波センサなどのセンサを用いた手法と実空間に設置したマーカの認識やフレームごとの特徴点の比較などの画像処理を用いた手法の 2 種類ある。本研究では、照明制御を用いた拡張現実における空間認識手法を提案する。照明制御を用いた拡張現実における空間認識手法は、それぞれの天井照明の光度が照度センサの照度に及ぼしている影響度合い（照度/光度影響度）を用いて距離を推定し、推定した距離を用いて天井面を推定することで空間認識を行う手法である。没入型 HMD とステレオカメラを組み合わせ HMD に実空間の映像を表示することで拡張現実を実現し、照明制御を用いた拡張現実における空間認識手法を用いることで実空間の自然な位置に仮想空間のオブジェクトを配置可能となった。

キーワード：拡張現実，ウェアラブルコンピューティング，没入型インターフェース，照明制御，空間認識

1. はじめに

近年、拡張現実スマートフォンのアプリケーションやプロジェクションマッピング、企業の PR など様々な分野で利用されている。また、Google 社の Google Glass や Oculus VR 社の Oculus Rift などといったウェアラブルデバイスの登場により一層注目を集めている。

拡張現実とは、実空間に何らかの情報を追加することで実際には存在しないものを知覚させる技術である。知覚の中でも視覚に対する拡張現実が一般的である。視覚に対する拡張現実とは、実際には存在しないオブジェクトを重ね表示することで実現している。実空間に文字やオブジェクトなどを重ね表示するためには空間認識を行う必要がある。

拡張現実において空間認識を行う手法として主に 2 つの手法がある [1]。1 つは GPS や無線 LAN の基地局の位置情報、加速度センサ、地磁気センサ、赤外線センサ、超音

波センサなどのセンサを用いて空間認識を行う方法である [2]。もう 1 つは、視界の映像を画像処理することで空間認識を行う手法である。実空間にマーカを設置してそのマーカを認識する、またはカメラ映像の各フレームごとに特徴点を検出して前後のフレームの特徴点を比較することで実現する。しかしながら、室内において GPS 等を用いる場合、電波の干渉が大きく影響する。また、画像処理を用いる場合には、カメラのキャリブレーションを行う必要がある。

我々はオフィスにおいて照明設備により照度センサの位置を推定可能な手法を提案している [3]。本稿では位置推定を行う際に照明制御を行うことで照明と照度センサとの距離推定を行っていることに着目した。室内における各照明の位置が既知である場合、照明と照度センサの距離および照明間の距離から照度センサと天井面の距離を推定し天井面の位置を知ることによって空間認識が実現できる。

照明制御を用いた空間認識手法は、照明の光度が照度センサの照度に及ぼす明るさ具合に基づいて照度センサと天井面の距離推定を行うことによる空間認識手法である。以後、照明の光度が照度センサの照度に及ぼす明るさ具合のことを照度/光度影響度と呼ぶ。

¹ 同志社大学理工学部、京都府
Department of Science and Engineering, Doshisha Univ, 1-3
Tataramiyakodani, Kyoutanabe-shi Kyoto, 610-0394 Japan

² 同志社大学理工学研究科、京都府
Graduate School of Science and Engineering, Doshisha
Univ, 1-3 Tataramiyakodani, Kyoutanabe-shi Kyoto, 610-
0394 Japan

a) kmatsui@mikilab.doshisha.ac.jp

b) ymotoya@mikilab.doshisha.ac.jp

c) haida@doshisha.ac.jp

d) mtempaku@mikilab.doshisha.ac.jp

e) mmiki@doshisha.ac.jp

2. 関連研究

空間認識を行う研究は数多くなされている．それらの中でも本研究と同じく拡張現実において空間認識を行っている研究として，Zollmann らによる FlyAR がある [4]．画像処理と深度センサを用いて空間認識を行い，目標経路を拡張現実によって重畳表示することで小型の無人飛行機のナビゲーションの支援を行っている．

また，同じく拡張現実において空間認識を行っている研究として，神原らによる研究がある [5]．この研究は，RTK-GPS と慣性航法装置の 2 つのセンサを用いており，これらのセンサはお互いの欠点を補いあうことでセンサ位置の高精度な計測を実現している．この独自のハイブリッドなセンサを用いることで，車に搭載した拡張現実感カーナビゲーションシステムとユーザの頭部に装着したウェアラブル型拡張現実感システムを実現している．これらの研究は，本研究が屋内での空間認識を目的としているのに対して屋外での空間認識を目的としている．

一方で，屋外で拡張現実における空間認識を利用した研究も数多く存在している．Jones らによる IllumiRoom は，深度センサを用いて屋内の構造を予めスキャンし，プロジェクションマッピングを用いて棚や壁などへの映像投影を実現している [6]．テレビ以外の室内にも映像が投影されるため臨場感がより高まる．

3. 照明制御を用いた空間認識手法

3.1 照明制御を用いた空間認識手法の概要

本稿では照明制御を行うことで照明と照度センサとの距離推定が可能であることに着目した．室内における各照明の位置が既知である場合，照明と照度センサの距離および照明間の距離から照度センサと天井面の距離を推定できる．天井面の位置を知ることによって空間認識が実現できる．

照明制御を用いた空間認識手法とは，照度/光度影響度を用いて距離を推定し天井面までの距離を推定することによって空間認識を行う手法である．照度/光度影響度を求めることで照明と照度センサの距離を推定できる．推定した照明と照度センサの距離から照度センサと天井面までの距離を推定できる．

照明制御を用いた空間認識手法は照明および制御用コンピュータを同一ネットワーク上に接続し，照度計を設置することで構成している．照明制御を用いた空間認識手法を実現するためのシステム構成図を図 1 に示す．

3.2 照明制御を用いた空間認識手法のアルゴリズム

照度/光度影響度を求めることで照明と照度センサの距離を推定できる．照度/光度影響度とは，照明の光度が照度センサの照度に及ぼす影響度を表す係数で，関係式 (1)

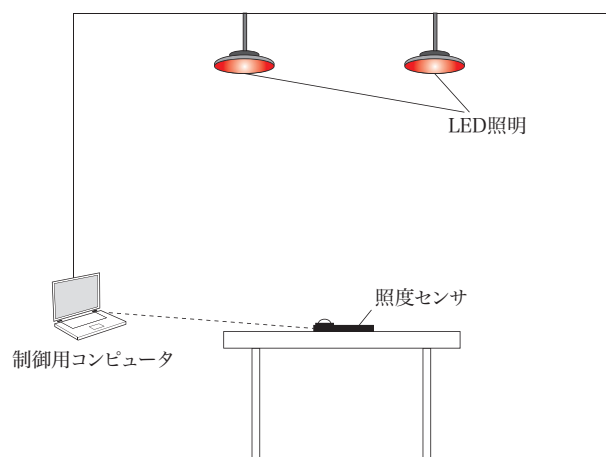


図 1 照明制御による空間認識手法の構成図

で表すことができる．

$$R = \frac{E}{I} \quad (1)$$

R : 照度/光度影響度係数 [cd/lx]，

E : 光度 [cd]，

I : 照度 [lx]

また，照明環境が変化しない限り R は定数とみなすことができる．以後，この定数 R を照度/光度影響度係数と呼ぶ．

照度/光度影響度を求める方法は 2 種類存在する．1 つ目の方法は，各照明の光度を人間が光の変化を感じ取れない範囲内でランダムに変更させ，光度変化量と照度変化量から回帰分析を行うことで照度/光度影響度を算出する方法である [7]．

2 つ目の方法は，照明を 1 灯ずつ点滅させて，各照明の光度変化量と照度変化量から照度/光度影響度を計測する方法である．この方法では，他の照明の光度変化の影響を受けない照度/光度影響度を求めることができる．

各照明と各照度センサ間の距離は，照度/光度影響度に基づき関係式 (2) より算出される．

$$L = \frac{1}{\sqrt{R}} \quad (2)$$

L : 照明と照度センサ間の距離 [m]，

R : 照度/光度影響度係数 [cd/lx]

照明と照度センサの直線距離が大きい場合，推定された照度/光度影響度が小さくなるため，関係式 (2) にて算出される推定距離の誤差が大きくなる．そこで，照明と照度センサがそれぞれ近い位置関係にある，照度/光度影響度が高い照明に基づいて推定した距離を天井面の推定に用いる．照度センサから天井面までの距離は，3 灯の照明と照度センサを頂点として三角錐を形成する場合の照度センサから 3 灯の照明から成る面へとおろした垂線を求めること

で推定する。天井面を推定することで空間認識を行う。

照明制御を用いた空間認識手法の手順を以下にまとめる。

- (1) 照度/光度影響度を求める。
- (2) 各照度/光度影響度を基に照明と照度センサ間の距離を推定する。
- (3) 照度/光度影響度の高い照明を3灯選択する。
- (4) 推定した照明と照度センサ間の距離及び各照明間の距離より照度センサと天井面までの距離を推定する。

4. 評価

4.1 実験概要

本実験では照度/光度影響度を用いて照明と照度センサの距離推定精度について検証を行った。また照度/光度影響度によって推定された距離を用いた照度センサから天井面まで距離推定精度について検証を行った。

照明と照度センサの位置関係による直線距離と推定距離の誤差を検証するために、照度センサは照明1灯の直下、2灯の間、4灯の間に配置し、それぞれに対して天井面から垂直に1 mと1.95 m離れた位置の計6ヶ所に配置して照度/光度影響度を求めた。求められた照度/光度影響度係数を用いてそれぞれの位置にある照度センサから各照明までの距離を推定した。照度/光度影響度値が高い照明を3灯選択してそれらの照明間の距離を算出した。算出された照明間の距離と3灯の照明と照度センサの距離より、照度センサから天井面までの距離を推定し、照度センサから天井面まで距離推定精度について検証を行った。

照度センサから天井面までの距離の推定方法は、3灯の照明と照度センサを頂点として三角錐を形成する場合の照度センサから3灯の照明から成る面へとおろした垂線を求める方法である。

4.2 実験環境

検証実験は同志社大学高知間知的システム創造環境実験室で行う。使用機器は、調光可能な照明10台、制御用コンピュータ1台、ANA/F11照度センサ3台である。照明1灯の直下に配置した照度センサをA、2灯の間に配置した照度センサをB、4灯の間に配置した照度センサをCとする。実験環境における照明および照度センサA、B、Cの配置を図3に示す。また、実験環境における照度センサA、B、Cおよび制御用コンピュータの配置を図4に示す。実験風景を図5に示す。

4.3 照度/光度影響度を用いた距離推定

照度センサを天井面から垂直に1 m降ろした位置に配置した際の照度センサA、B、Cから照明までの距離に対する、直線距離と推定距離の誤差を図5に示す。また、照度

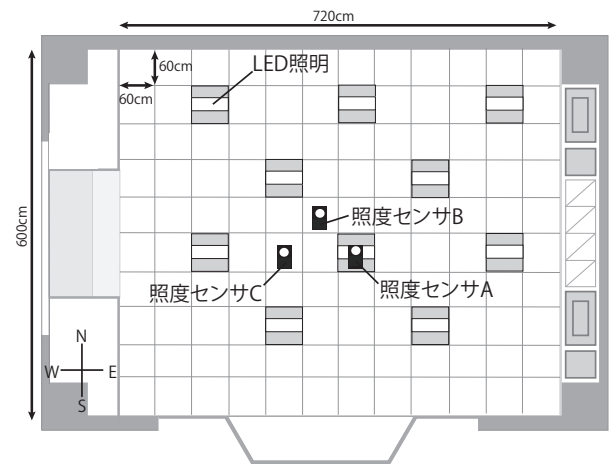


図2 照明と照度センサの配置

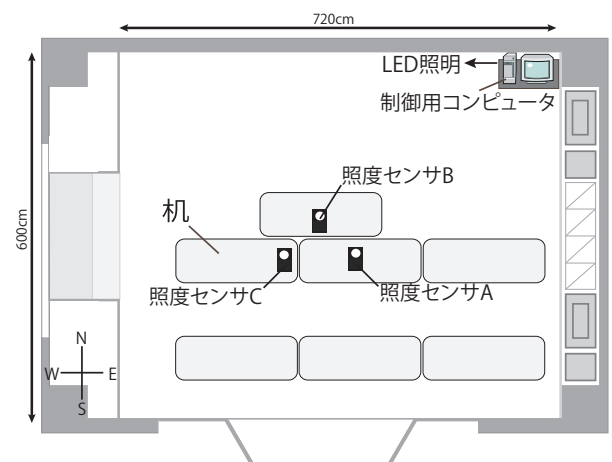


図3 照度センサと制御用コンピュータの配置



図4 実験風景

センサを天井面から垂直に1.95 m降ろした位置に配置した際の照度センサA、B、Cから照明までの距離に対する、直線距離と推定距離の誤差を図6に示す。図5、図6はどちらも縦軸を推定距離と直線距離の誤差、横軸を直線距離としている。

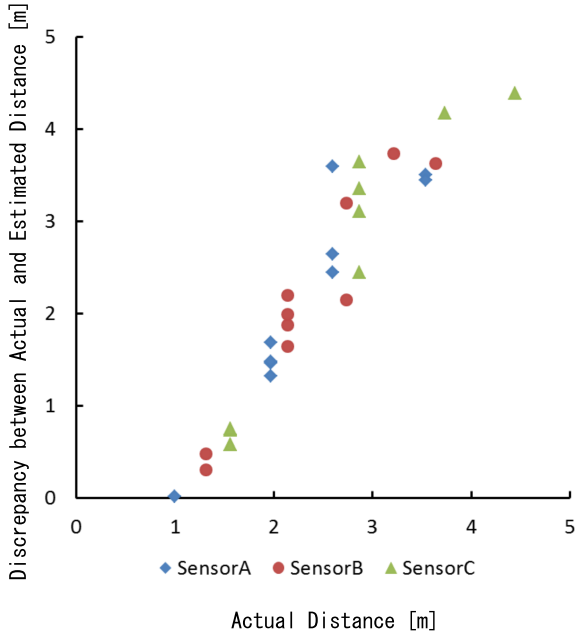


図 5 天井面から 1 m の照度センサにおける距離の誤差

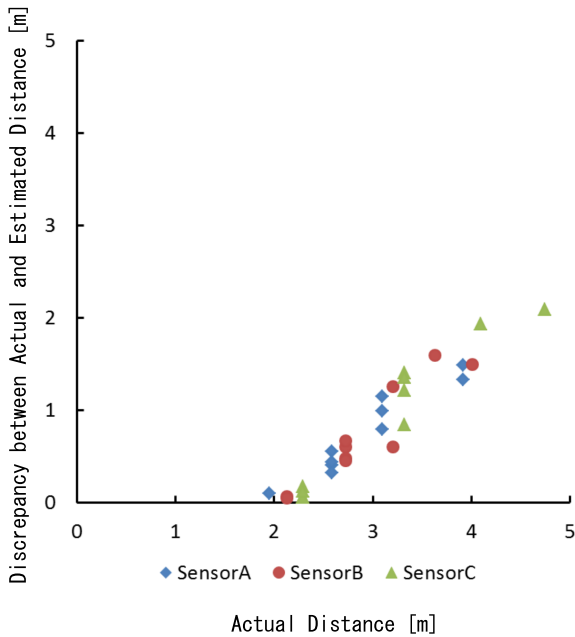


図 6 天井面から 1.95 m の照度センサにおける距離の誤差

4.4 照明と照度センサの距離を用いた天井面算出

照度センサの水平方向の位置が既知の場合は、照明と照度センサの直線距離と水平距離から垂直距離を算出できる。この垂直距離は照度センサと天井面までの距離であるため関係式 (3) より算出される。

$$h = \sqrt{L^2 - VL^2} \quad (3)$$

h : 照度センサと天井面の距離 [m],
L : 照明と照度センサ間の距離 [m],
VL : 照明と照度センサの水平距離 [m]

天井面から垂直に 1 m と 1.95 m 降ろした位置の 2 種類の高さにおける照度センサ A, B, C から天井面までの距離の誤差を図 7 に示す。

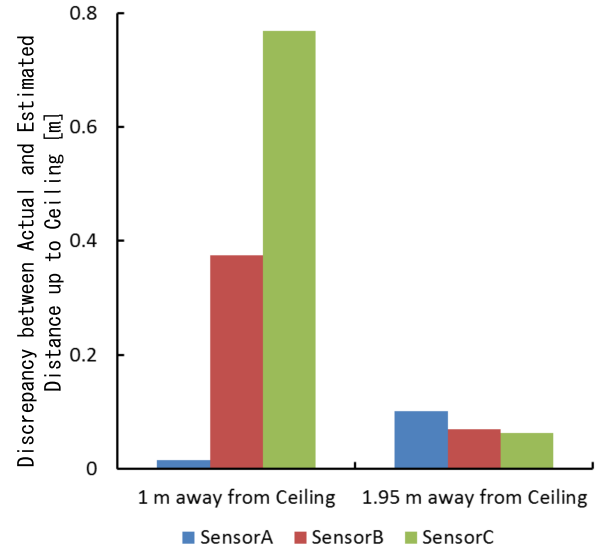


図 7 照度センサの位置が既知の場合の照度センサから天井面までの距離の誤差

照度センサの水平方向の位置が未知の場合は、3 灯の照明を選択してそれらの照明間の距離と各照明と照度センサの距離を用いた三角錐の垂線から算出することが可能である。このとき、3 灯の照明間の距離とそれぞれの照明と照度センサの距離より三角錐の 6 辺の長さが既知となるため、関係式 (4) を用いることにより三角錐の垂線、つまり照度センサと天井面までの距離が推定できる。

関係式 (4) では、選択した 3 灯の照明をそれぞれ照明 A, B, C とし、照度センサを照度センサ O としている。また、照度センサと天井面までの距離は h としている。

関係式 (4) における照明と照度センサの位置関係を図 8 に示す。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4} \sqrt{(AB^2 + BC^2 + CA^2)^2 - 2(AB^4 + BC^4 + CA^4)} \\ &= \frac{1}{4} \sqrt{2AB^2(OA^2 + OB^2 - 2h^2) - (OA^2 - OB^2)^2 - AB^4} \\ &+ \frac{1}{4} \sqrt{2BC^2(OC^2 + OB^2 - 2h^2) - (OC^2 - OB^2)^2 - BC^4} \\ &+ \frac{1}{4} \sqrt{2CA^2(OA^2 + OC^2 - 2h^2) - (OA^2 - OC^2)^2 - CA^4} \end{aligned} \quad (4)$$

h : 照度センサと天井面の距離 [m],
OA : 照度センサと照明 A の距離 [m],
OB : 照度センサと照明 B の距離 [m],
OC : 照度センサと照明 C の距離 [m],
AB : 照明 A と照明 B の距離 [m],
BC : 照明 B と照明 C の距離 [m],

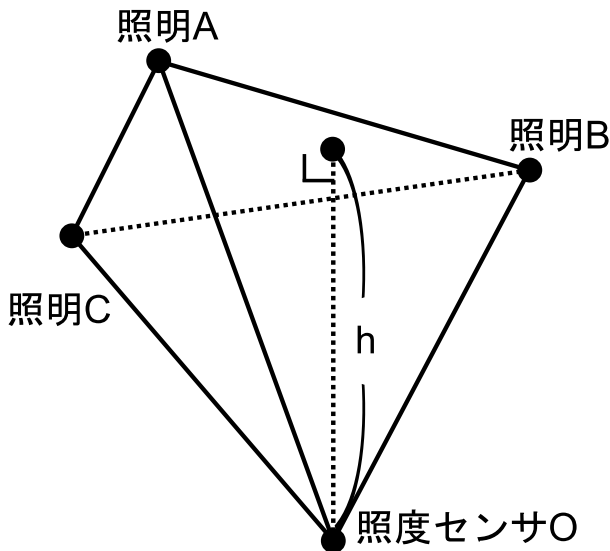


図 8 照明と照度センサの位置関係

CA : 照明 C と照明 A の距離 [m]

本実験では、照明の配置が均一であるため 3 灯の照明を頂点として形成される三角形が直角三角形になるように照明を選択する。このとき、照度センサと天井面までの距離は関係式 (5) より算出される。

$$h = \sqrt{OA^2 - \frac{OA^2 + AB^2 - OB^2}{2AB} - \frac{OA^2 + CA^2 - OC^2}{2CA}} \quad (5)$$

h : 照度センサと天井面の距離 [m],
OA : 照度センサと照明 A の距離 [m],
OB : 照度センサと照明 B の距離 [m],
OC : 照度センサと照明 C の距離 [m],
AB : 照明 A と照明 B の距離 [m],
CA : 照明 C と照明 A の距離 [m]

照度/光度影響係数の高い順に照明を選択し、関係式 (5) を用いて照度センサから天井面までの距離を推定する。天井面から垂直に 1 m と 1.95 m 降ろした位置の 2 種類の高さにおける照度センサ A, B, C から天井面までの距離の誤差を図 9 に示す。

4.5 考察

図 5, 図 6 より、照度センサと照明の距離が長くなると直線距離と推定距離の誤差が大きくなることが分かった。また、照度センサと照明の距離と直線距離と推定距離の誤差は比例関係があることがわかった。照度センサと天井面の距離が短くなるほど照度センサと照明の直線距離と推定距離の誤差は小さくなると考えていた。しかし、照度センサが天井面に近すぎると照度センサと照明の直線距離と推定距離の誤差が大きくなることが分かった。これは、照度

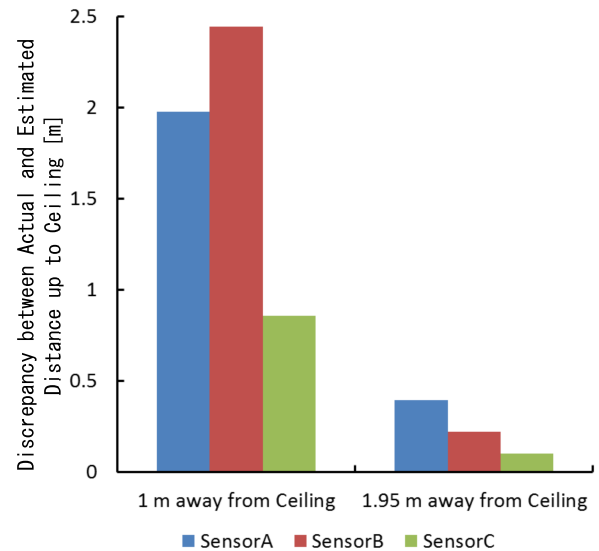


図 9 照度センサの位置が未知の場合の照度センサから天井面までの距離の誤差

センサが天井面に近づくことで、照明から照度センサに照射された光の入射角が大きくなることが要因であると考えられる。照度センサを照明を結ぶ直線対して垂直にすることで、より正確な距離の計測が可能になると考えられる。

図 7 より、照度センサと照明の距離が短いと照明 1 灯の直下にある照度センサと照明の直線距離と推定距離の誤差は極めて小さくなるが、照明 2 灯の間および照明 4 灯の間にある照度センサと照明の直線距離と推定距離の誤差は大きくなることが分かった。これは、照度センサが天井面に近すぎると照度センサと照明の直線距離と推定距離の誤差が大きくなるためであると考えられる。一方で、照度センサと照明の距離が 1.95 m の場合はいずれの照度センサも照明までの直線距離と推定距離の誤差は 0.1 m 以内に収まっていることがわかった。

図 9 より、照度センサの位置が照明の直下に配置されている場合よりも、照明間の中央に配置されている場合の方が照度センサと天井面までの直線距離と推定距離の誤差が小さくなることがわかった。本実験では 3 灯の照明を選択してそれらの照明間の距離と各照明と照度センサの距離を 6 辺とした三角錐の垂線から照度センサと天井面までの距離を推定している。このため、照度センサの位置が照明の直下に配置されている場合、照度センサに対して近い位置の照明までの距離の誤差は小さいが遠い位置の照明までの距離の誤差は大きくなる。従って、照度センサに対して近い位置の照明と遠い位置の照明の推定距離の差が大きくなるためであると考えられる。一方で、照度センサが照明間の中央に配置されている場合、照度センサと照明の推定距離の差が小さいため照度センサと天井面までの距離の誤差が小さくなると考えた。

5. 拡張現実における提案手法の応用

5.1 拡張現実における空間認識

照明制御を用いた空間認識手法を拡張現実に応用する。空間認識の実現により実空間の自然な位置に仮想オブジェクトを配置できる。

拡張現実は没入型 HMD とビジョンセンサを利用することで実現する。また、3D ゲーム開発エンジンを用いて実空間に仮想オブジェクトを配置する。

拡張現実において、照明制御を用いた空間認識手法を用いて照度センサから天井面まで距離を推定し、没入型 HMD のヘッドトラッキングを利用して天井面までの距離を推定する。推定された天井面までの距離は拡張現実において仮想オブジェクトとして表示する。

5.2 動作環境

照明制御を用いた拡張現実における空間認識手法では、実空間をビジョンセンサを用いて撮影してリアルタイムで没入型 HMD に映像を映し出すことで拡張現実を構成している。没入型 HMD には Oculus VR 社の Oculus Rift を使用する。Oculus Rift はバーチャルリアリティの実現を目的とした没入型 HMD である。視野角が広く、ヘッドトラッキングが可能といった特徴がある。ステレオカメラの Ovrvision を使用する。Ovrvision は Oculus Rift 専用の拡張現実の実現を目的としたビジョンセンサである。ステレオカメラは両眼視差を利用した立体的な映像を映し出すことが可能であるといった特徴がある。また、実空間の仮想オブジェクトの配置には 3D ゲーム開発エンジンである Unity を利用する。Unity は Oculus Rift, Ovrvision のどちらの SDK にも対応している。

Ovrvision を装着した Oculus Rift を図 10 に示す。動作風景を図 11 に示す。

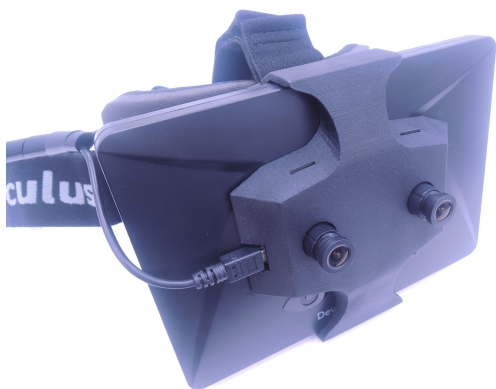


図 10 Ovrvision を装着した Oculus Rift



図 11 動作風景

5.3 天井面までの距離の表示

拡張現実を用いて視線の先にある天井面までの距離を表示する。没入型 HMD のヘッドトラッキングにより水平面に対する傾きの取得が可能であるので、関係式 (6) を用いて視線の先にある天井面までの距離を算出する。

$$D = \frac{h}{\sin\theta} \quad (6)$$

D : 視線の先にある天井面までの距離 [m],

h : 照度センサと天井面の距離 [m],

θ : 水平面に対する傾き [rad]

関係式 (6) によって算出された距離を拡張現実において重畳表示する。天井面までの距離を重畳表示した画面を図 12 に示す。



図 12 天井面までの距離を重畳表示した画面

5.4 考察

没入型 HMD のヘッドトラッキングにより水平面に対する傾きを取得可能だったため、照明制御を用いた空間認識手法を用いて推定した照度センサと天井面までの距離より視線の先の天井面までの距離を算出できた。

本応用例では、照明の形がどれも同じであったため画像処理を用いて各照明をそれぞれ別の照明として認識できな

かった。従って、予め照度センサと天井面までの距離を推定しておく必要があったため、高さが変わると再度照度センサと天井面までの距離を推定する。

しかし、画像処理によって視界内の照明を認識することができれば照度/光度影響度をリアルタイムに求めることができるようになる。これにより、移動して高さが変わっても天井面までの距離を推定できるのではないかと考えた。

また、照明制御を用いた空間認識手法では照度センサが天井面に近づくと照明から照度センサに照射された光の入射角が大きくなる。このことにより、照明と照度センサの直接距離と推定距離の誤差が大きくなる。しかし、没入型HMDに照度センサを装着することで、照度センサが照明と照度センサを結ぶ直線に対して垂直になるので、光の入射角が小さくなり誤差が小さくなると考えた。

6. 結論と今後の展望

本研究では、照明制御を行うことで照明と照度センサの距離を推定し、既知である照明間の距離と組み合わせることで天井面を推定する空間認識手法を提案した。照明制御を用いた空間認識手法では、天井面を推定することで実空間の自然な位置に仮想空間のオブジェクトを配置可能となった。

照明制御を用いた空間認識手法では、天井面に設置されている照明を用いているため照度センサと天井面までの距離の推定は可能であるが、壁までの距離の推定は不可能である。このため、壁に対して自然な位置に仮想オブジェクトを配置することができない。しかし、液晶ディスプレイや電光掲示板等の照度/光度影響度を用いることが可能になれば壁に対して自然な位置に仮想オブジェクトを配置することが可能となると考えられ、より広い範囲での活用が期待できる。

参考文献

- [1] 佐野彰：AR 入門改訂版 身近になった拡張現実，工学社 (2013)。
- [2] Priyantha, B., N., Chakraborty, A., and Balakrishnan, H.: The Cricket Location-Support System, pp. 32-43 (2000)。
- [3] Miki, M., Yoshida, K., Hirano, Y. and Ikegami, H.: Estimation of illuminance sensor positions and improvement of energy efficiency in the distributed control lighting system, pp. 137-142 (2013)。
- [4] Zollmann, S., Hoppe, C., Langlotz, T., and Reitmayr, G.: FlyAR: Augmented Reality Supported Micro Aerial Vehicle Navigation, pp. 560-568 (2014)。
- [5] 神原誠之, 横矢直和: RTK-GPS と慣性航法装置を併用したハイブリッドセンサによる屋外型拡張現実感システム, Vol. 104, No. 572, pp. 37-42(2005)。
- [6] Jones, R., B., Benko, H., Ofek, E., Wilson, D., A.: IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences, pp. 869-878(2013)。
- [7] Miki, M., Nagano, M., Yoshimi, M., Yonemoto, H., and Yoshida, K.: Intelligent Lighting System with an Addi-

tional Energy-Saving Mechanism, pp. 3173-3178 (2012)。