

# Porton: 光沢のある水平面上に直立空中像を表示する 持ち運び可能な光学系の設計

佐野文香<sup>†1</sup> 小泉直也<sup>†1,†2</sup>

**概要:** 本稿では、持ち運び可能で光沢のある水平面に置くだけで設置可能な空中像を表示する光学系 Porton を提案する。従来の空中像光学系を用いて床などの既存の水平面上に設置する場合、水平面より下に光源を設置するために加工する必要があった。そこで、鏡を用いることで水平面の加工を不要にした。しかし、鏡を設置すると空中像よりも高輝度の像が水平面の中に表示されてしまう。そこで、使用する光源の種類ごとに空中像の下に表示される像を除去する方法も合わせて提案する。提案システムにより表示した空中像と地中像の輝度を比較し、その効果を確認した。さらにシステムを展示して観察を行った。

## 1. はじめに

本論文では光沢のある床や机の上などの水平面上に直立する空中像を表示する光学系 Porton の提案を行う。

空中像を空中に表示された映像と定義する。空中像を見る際には、観覧者が特殊な装置を身につける必要がないため裸眼複合現実感の実現において有効な手法であり、装置を身につけずにインタラクションを行うことが可能である。空中像を表示する方法は複数あるが、本研究では表示している空中像に手を伸ばすことが可能な再帰透過光学系を用いる。従来の光学系は設置空間と独立して設計されていた。そのため従来の光学系を既存の空間に設置するとき、空間に空中像や装置を溶け込ませることが難しかった。

本研究では、持ち運びが可能で光沢面に置くだけで設置することができ、水平面上に直立する空中像を表示する光学系を提案する。提案システムによって表示した空中像を図 1 に示す。空中像提示光学系内部に鏡を配置することで、水平面上に光学系の設置を可能とした。しかし、鏡を用いることで、表示した空中像の下の水平面内に空中像よりも高輝度の像が表示される。そこで、水平面の中に表示する像を光源となるディスプレイの偏光の向きを利用して除去し、水平面上の空中像を際立たせた。また、使用するディスプレイにより偏光の有無や向きが異なるため、ディスプレイの種類ごとに内部光学系を設計した。実装した光学系によって表示された像の輝度を測定し、水平面の中の像の除去が可能か評価を行った。また、本システムで表示した空中像を展示することで提案手法の実用性を検証した。

## 2. 関連研究

### 2.1 現実空間における情報表示

プロジェクタやディスプレイなどを用いて現実空間に映像情報を表示することが可能である。プロジェクタを用い

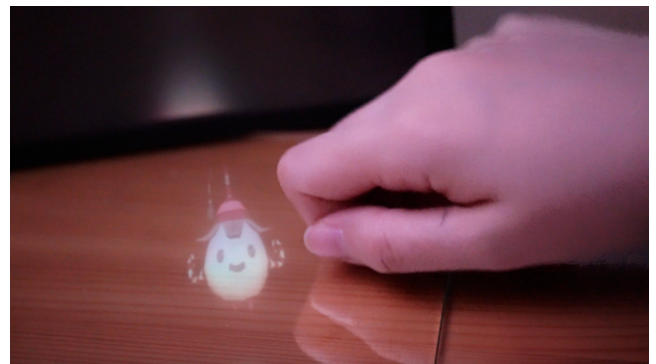


図 1 本システムで表示した空中像

て床や壁、テーブル面などに直接投影することで情報を表示する手法の例として RoomAlive[1]が挙げられる。これは複数台のプロジェクタと深度センサにより部屋全体を映像で覆うことができる。深度センサにより家具の形状も計測することができるため、ユーザは複雑な計算を行う必要がなく、プロジェクタによって計算された映像が投影される。これにより、ただの部屋がゲームの世界に変化し、ユーザはより高い没入感を得ることができる。また水平面と垂直面の両方にシームレスに情報を表示する方法として CrosSI[2]がある。これは水平面にも垂直面にも情報を表示することが可能で、指でドラッグすることで自分の好きな位置に移動することができる。しかしこれらの手法では平面上にしか情報を表示することができない。そこで本研究では平面から離れた位置での情報表示の実現を目指す。

### 2.2 水平面に空中像を表示する光学系

本研究では空中に表示された映像のことを空中像とする。水平面上に垂直空中像を表示する方法としてハーフミラーなどのビームスプリッターを用いる方法や再帰透過光学素子を用いる方法などがある。ハーフミラーを用いた例として、舞台などで使用される視覚トリックの一つであるペ

<sup>†1</sup> 電気通信大学

<sup>†2</sup> JST さきがけ

ッパーズ・ゴーストにより床の上に直立する空中像を生成することができる。しかしペッパーズゴーストによって生成された空中像には手を伸ばすことができない。また、再帰透過光学素子を用いた例として、テーブル上に直立した空中像を表示する EnchanTable[3]が挙げられる。EnchanTableはテーブルの奥側に光学系を設置するため、光学系を設置していない既存のテーブルにも適用できる。しかし、テーブル面より下に光源となるディスプレイを設置する必要がある。したがってこの設計を用いて床面に直立する空中像を表示する場合、既存の床面より下にディスプレイを配置しなければならない。そこで、本研究はEnchanTableの光学設計を援用し、既存の床面やテーブル面などの水平面に直立空中像を表示できるように設計する。

### 2.3 偏光による映像の選択

液晶ディスプレイの偏光特性によって表示する映像を選択することが可能である。吉田らはペッパーズ・ゴーストにより表示した空中像の実在感を向上させるために影や足跡などの奥行き知覚の手がかりとなる地面像を付加する手法を提案している[4]。液晶シャッターと偏光板を用いて表示している映像を高速に切り替えることで、一つのディスプレイで地面像と空中像の同時提示を可能にしている。本研究でもディスプレイの偏光方向の違いを用いることで特定のディスプレイの遮光を行う。

## 3. 提案システムと実装

### 3.1 目的

本研究では、持ち運びが可能であり、水平面に対して直立する空中像を表示する光学系を設計することを目的とする。また、使用するディスプレイの種類によって適した光学系の設計を行う。

### 3.2 設計方針

ここでは持ち運び可能で水平面に直立する空中像を表示する空中像光学系として以下の3点を設計方針とした。

1. 既存の水平面の上に表示できる
2. 水平面内に空中像より輝度の高い像を表示しない
3. ユーザの視点から見える光源を遮蔽する

この3点を設計方針とした理由を述べる。まず、光学系を設置するときに既存の水平面の加工が必要になると設置が困難になる。そのため、置くだけで設置できる光学系にする。次に、光沢のある床面の上に立っているものが床面に映り込むことはあるが、その映り込んだ虚像の輝度が実物よりも高くなることはない。そのため、水平面内に空中像よりも輝度の高い像を表示しないようにする。最後に空中像を結像するために用いる光源を見えない、または分かりにくい状態にすることで、ユーザの興味をひきつけることができることが分かっている[3]。そこで、光源をユーザから見えないようにするために遮蔽する。

### 3.3 光学設計

持ち運び可能な光学系の設計を図2に示す。ディスプレイ(D)、鏡(M)、再帰透過光学素子(MMAPs)、視界制御フィルム(LF)、反射面(R)により構成される。R以外は全て箱(BOX)内にあるため持ち運ぶことが可能である。本光学系が空中像を表示する手法を述べる。DがMに写り込むことで、D'が生じる。これにより、水平面の中にDがある状態を作り出すことができる。そして、D'からの光がMMAPs、LFを通過し、Rで反射することで水平面上に垂直空中像(Mid-air image)が表示される。

しかし、この設計では図2に示す通りDから直接MMAPsに入射する光によって水平面の中に像(Mid-air image')が表示する。そこで、Dの偏光特性を利用して水平面の中の像を除去することとした。使用するDによって設計が異なるため、以下にDの種類ごとの設計を述べる。以降水平面の中に表示された像を「地中像」と定義する。

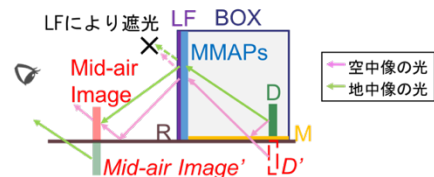


図2 持ち運び可能な光学系の設計

#### 3.3.1 斜偏光の液晶ディスプレイを使用する場合

光学設計を図3(a)に示す。また、図4(a)のような偏光の向きを「斜偏光」と定義する。MMAPsとLFの間に偏光板(P)を設置する。LFより後ろにPを設置する場合、LFで光が拡散するため偏光特性が変化する。そのためDからの光を遮蔽することができない。したがってPをMMAPsとLFの間に設置する。斜偏光の場合、Mに映り込むと偏光の位相が反転する。そこで、PをDの透過軸と直交するように設置することでDからの光が透過しなくなり、地中像を除去することができる。

#### 3.3.2 縦偏光・横偏光の液晶ディスプレイを使用する場合

光学設計を図3(b)に示す。また、図4(b)上のような偏光の向きを「縦偏光」、図4(b)下のような偏光の向きを「横偏光」と定義する。Mの上に1/4λ波長板(W)、MMAPsとLFの間にPを設置する。縦偏光・横偏光の場合、Mに映り込んでも偏光の位相は反転しない。そこで、D'の位相を反転させるためにWを設置する。WによりD'の偏光は図5のようになる。よってPをDの透過軸と直交するように設置することでDからの光が透過しなくなり、地中像を除去することができる。

#### 3.3.3 偏光を持たないディスプレイを使用する場合

光学設計を図3(c)に示す。ここで用いるDは有機ELディスプレイやプロジェクタなど偏光がないディスプレイである。Dの前と、MMAPsとLFの間にPを設置する。D

の前に設置する P は図 4 (a) と同じ向きにする．それにより，D と D' の位相が反転する．さらに P を D の前に設置した P の透過軸と直交するように設置することで D からの光が透過しなくなり，地中像を除去することができる．

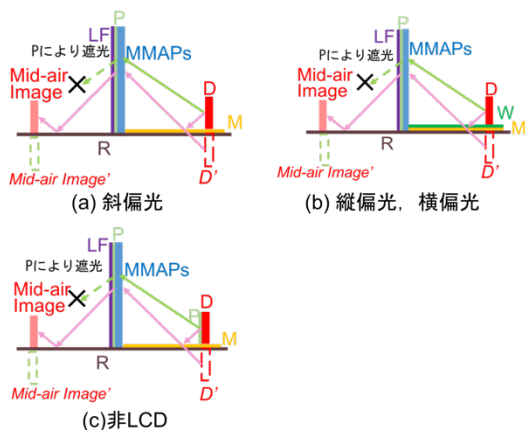


図 3 提案システムの光学設計 (a) 斜偏光の液晶ディスプレイを用いた場合 (b) 縦偏光・横偏光の液晶ディスプレイを用いた場合 (c) 偏光がないディスプレイを用いた場合

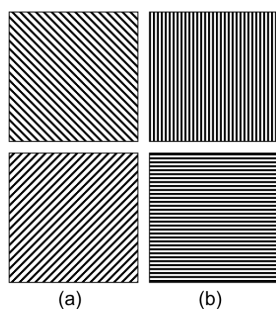


図 4 液晶ディスプレイの偏光の向き (a) 斜偏光 (b) 縦偏光・横偏光

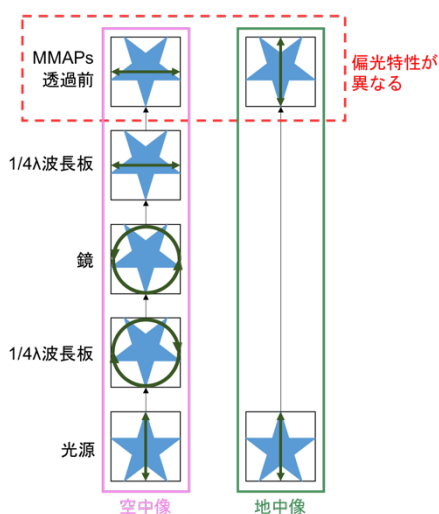


図 5 映像の向きと偏光状態

本システムにおいて，MMAPs を傾けて設置することが可能である．図 6 (a) のように傾ける場合は以下の条件式が成り立つ．ここでは水平面に対する MMAPs の傾斜角度を  $\theta$ ，MMAPs への入射光と MMAPs の中心から地面に向かって垂直に引いた線との間になす角度を  $\gamma$  とする． $\alpha$  は計算しやすくするために導入する．

$$\alpha + \gamma < \theta \quad (1)$$

$$0 < \gamma \quad (2)$$

$$\alpha = 90 - \theta \quad (3)$$

以上の式を解くと以下の通りになる．

$$0 < \gamma < (2\theta - 90) \quad (4)$$

$$45 < \theta < 90 \quad (5)$$

また，図 6 (b) のように傾ける場合は以下の式が成り立つように設計する．このとき，入射光と MMAPs のなす角を  $\omega$  とする．

$$\alpha + \omega < 90 \quad (6)$$

$$\alpha < \omega \quad (7)$$

$$\alpha = \theta - 90 \quad (8)$$

以上の式を解くと以下の通りになる．

$$(\theta - 90) < \omega < (180 - \theta) \quad (9)$$

$$90 < \theta < 135 \quad (10)$$

MMAPs を斜めに傾けて設置すると水平面に直立するように表示することは困難である．解決方法としては，MMAPs 通過後の光路内に鏡を設置する方法が挙げられる．

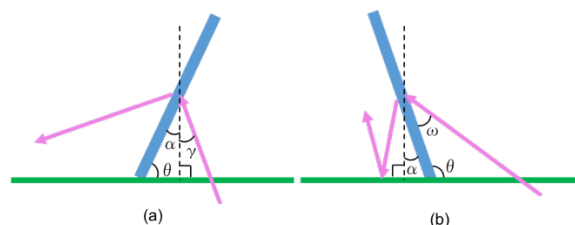


図 6 MMAPs の設置方法

### 3.4 実装

光学設計を元に作成した設計図と実装したシステムを図 7 に示す．ここでは床面に直立する空中像を表示することを想定して実装を行った．また，3.3.2 の設計を実装した．用いた機器は以下の通りである．D として LITEMAX 製 Durapixel 0708-T (輝度：1600cd/m<sup>2</sup>)，M としてアクリサンデー製アクリミラー，W として美館イメージング製 MCR140N，MMAPs としてアスカネット製 ASKA3D-488[5]，LF としてリンテック製ウインコスビジョンコントロールフィルム W-0055，P として美館イメージング製 SHLP41 を用いた．これらを木製の箱の中に設置することで持ち運び可能にした．また，R として本磨き加工がされた黒の大理石を用いた．

MMAPs の 15cm 前方に表示された空中像を 50cm 離れた位置にいるユーザから観察できるようにする．腕を完全に

伸ばした状態で空中像とインタラクションをすると腕が疲れてしまう[6]. 先行研究[7]より, 腕の 0.4~0.8 倍の長さであれば腕が疲れにくいことが分かっている. そこで, 空中像と人の距離を女性の腕の長さの平均値 62cm[8]の約 0.8 倍の 50cm とした. また, 立っている人がしゃがんでも空中像を見ることができるよう視点位置を 79cm から 168cm と想定した.

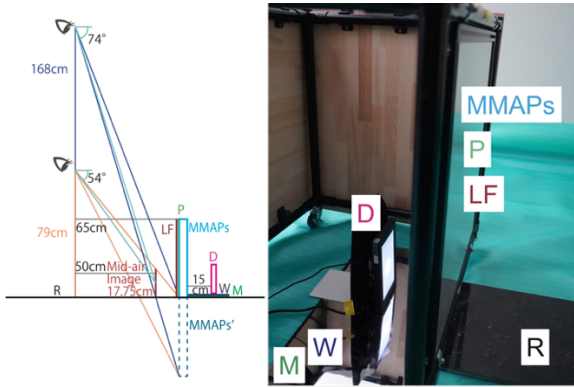


図 7 実装した様子

### 3.4.1 輝度測定による水平面内空中像の遮蔽の評価

#### 目的

本システムによって地中像よりも高輝度な空中像の表示が可能かを輝度計測によって評価した.

#### 方法

偏光板を用いることで地中像を除去する. まず偏光板と波長板を入れずに装置を組み立て, 空中像と地中像の輝度の測定を行なった. 次に偏光板と波長板を入れて装置を組み立て, 同様に輝度の測定を行なった. なお, 今後は偏光板・波長板を入れずに組み立てたシステムのことを A, 偏光板・波長板を入れて組み立てたシステムを B と記載する.

測定条件を図 8 に示す. 輝度計は空中像から 50cm 離れた位置に設置した. 緯度方向の角度を  $X$ , 経度方向の角度を  $Y$  とする.  $X$  は  $50^\circ \sim 70^\circ$  の範囲,  $Y$  は  $0^\circ \sim 20^\circ$  の範囲とし, それぞれ  $5^\circ$  刻みで測定した.  $X$  において  $0^\circ \sim 45^\circ$  および  $75^\circ$  以上,  $Y$  において  $25^\circ$  以上は空中像を見ることができなかつたためこの範囲内で測定を行なった. D に直径 8cm の白円を表示し, 空中像と地中像の輝度をそれぞれ測定した. 輝度計はコニカミノルタ製 CS-150 を用いた.

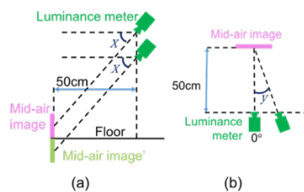


図 8 輝度測定の様子 (a) 緯度方向の測定 (横から見た状態) (b) 経度方向の測定 (上から見た状態)

## 結果

A で表示した空中像 (above) と地中像 (in) の輝度の測定結果を図 9 に示す. 実線が空中像の輝度で破線が地中像の輝度を示す. ここから, 地中像の方が空中像より輝度が高いことが分かる. また, B で表示した空中像と地中像の輝度の測定結果を図 10 に示す.  $Y = 25^\circ$ ,  $X = 55^\circ$  の時, 地中像の方が空中像よりも高輝度であり, 他の  $X$  においても輝度がほとんど同じだった. しかしほとんどの範囲である  $Y = 0^\circ \sim 20^\circ$  において空中像の方が地中像よりも輝度が高い. ここから B のように実装することで地中像よりも輝度の高い空中像を表示することが可能と言える.

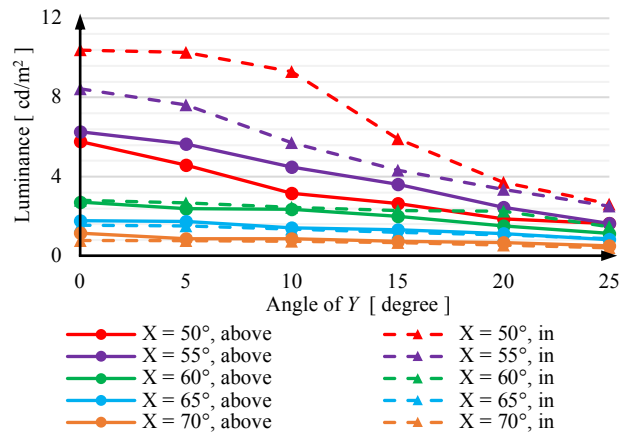


図 9 A の実装での輝度測定の結果

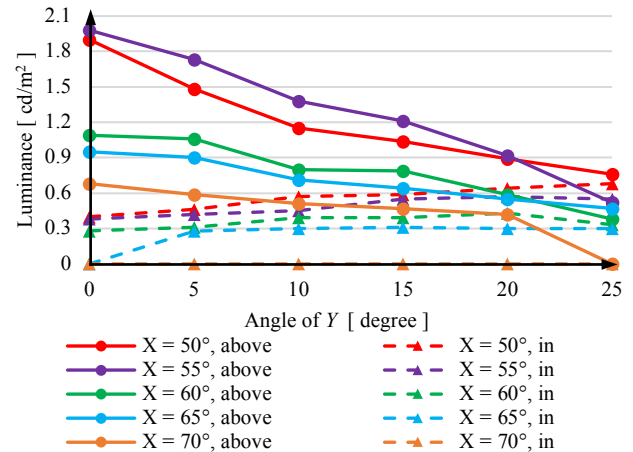


図 10 B での輝度測定の結果

## 4. 考察

設計した空中像光学系が設計方針を満たしているかを議論する. 本システムは鏡を使用して水平面の中にディスプレイがある状態を作り出すことで, 床などの既存の水平面に置くだけで設置することを可能にした. ディスプレイの種類ごとに地中像を除去する方法を設計し, 空中像だけを表示することを可能にした. また, 視界制御フィルムを用いて光源を遮蔽することにより装置を気にすることなく空中像に注目してもらうことができた. 以上より設計方針を満たす光学設計であると言える.

輝度測定の結果、緯度  $65^\circ$  経度  $0^\circ$  のときは地中像はほとんど見えないが、緯度および経度が大きくなるにつれて地中像が見える。液晶ディスプレイの一番手前に付いている偏光板の透過軸と直交するように偏光板を設置すると光は出射しないが、少しでも透過軸がずれると透過軸方向成分のみが透過する。そのため、正面にいるときに地中像が見えないように波長板を設置した場合、正面からずれた位置から見ると透過軸がずれるため地中像が見えてしまうと考えられる。

## 5. 展示

制作したシステムを2018年10月14日から16日の3日間、調布市文化会館たづくりで行われた「電通大展 たづくり」で展示を行った。3.4で作成した装置を使用し、図11に示すような縦10cm横9.5cmのCGキャラクタを表示した。CGキャラクタの動きは基本的には図11の状態であるが、ランダムにジャンプ・手を振る・頭突きの動きをするようにした。

展示ブースには幼児からご年配の方までが訪れた。体験者の空中像CGキャラクタに手を伸ばす様子やじっと見ている様子が見られた。多くの子供は空中像CGキャラクタに手を伸ばし、触れないことを認識すると空中像CGキャラクタに対して捕まえようとする動作や、手で隠そうとする動作をしていた。他にもCGキャラクタに対して叩く、蹴るなどの動作や、持っていたおもちゃで攻撃しようとする様子が見られた。中には空中像CGキャラクタを怖がって見たがらない子供もいた。以上より本システムで表示した空中像CGキャラクタに実在感を感じた人がいたと考えており、他の表示手法との比較による評価の実施を検討している。また、本システム内にあるディスプレイを指摘する人はいなかった。これにより、光源を遮蔽することができていたと考えている。今後は視界制御フィルムにより光源のディスプレイが遮蔽されていることを定量的な評価で示したい。



図 11 展示した時の様子

## 6. 結論

本論文では持ち運びが可能で床や机の上などの光沢のある水平面に置くだけで設置できる空中像光学系Portonを設計した。本システムでは、鏡を用いることで水平面の中に光源を設置するという状態を作り出した。光源となるディスプレイの種類ごとに水平面の中に映り込む像の輝度を落とす設計を行った。斜偏光の液晶ディスプレイを用いる場合、再帰透過光学素子と視界制御フィルムの中に偏光板を設置することで解決する。縦偏光・横偏光の場合は斜偏光の場合の設計に追加して波長板を鏡の上に設置することで解決する。偏光を持たないディスプレイを用いる場合、斜偏光の場合の設計に追加してディスプレイの前に偏光板を設置することで解決する。また、視界制御フィルムを用いて光源の遮蔽を行うことで表示システムを気にせずに空中像に注目してもらうことができた。実際に展示を行ったところ、本システムで表示した空中像に多くの人の関心を集めることができた。

**謝辞** 本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さががけ, JPMJP16D5)によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Brett Jones, Rajinder Sodhi, Michael Murdock, Ravish Mehra, Hrvoje Benko, Andrew D. Wilson, Eyal Ofek, Blair MacIntyre, Nikunj Raghuvanshi, and Lior Shapira, "RoomAlive: Magical Experiences Enabled by Scalable, Adaptive Projector-Camera Units", in 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, 2014, pp. 637-644.
- [2] Risa Otsuki, and Kaori Fujinami, "CrosSI: A Novel Workspace with Connected Horizontal and Vertical Interactive Surfaces", in ISS, 2018, pp.339-344.
- [3] 山本紘暉, 梶田創, 小泉直也, 苗村健, "EnchanTable: テーブル面の反射を用いた直立空中ディスプレイ", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 2016, Vol.21, No.3, pp. 401-410.
- [4] 吉田駿, 謝淳, 宍戸英彦, 亀田能成, 掛谷英紀, 北原格, "実在感の向上を目的とした空中像と床面像の同時投影方式", 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2018, 14D-3.
- [5] M. Otsubo, "Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same", U.S. Patent No. 8,702,252. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2014.
- [6] Julian Seifert, Sebastian Boring, Christian Winkler, Florian Schaub, Fabian Schwab, Steffen Herrdum, Fabian Maier, Daniel Mayer, and Enrico Rukzio, "Hover Pad: Interacting with Autonomous and Self-Actuated Displays in Space", in 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, 2014, pp. 139-147.
- [7] Valkov, Steinicke, Bruder, and Hinrichs, "2d touching of 3d stereoscopic objects", in CHI, pp. 1353-1362, 2011.
- [8] 日本建築学会編 "コンパクト建築設計資料集成 [インテリア]", 丸善株式会社