

フレーミングのための RGB-D 情報処理

2015年3月

團原 佑壮

フレーミングのための RGB-D 情報処理

團原 佑壮

概要

本研究では、任意の環境において、プロジェクタにより視認性の高い像を投影する手法を提案する。視認性とは、プロジェクタの入力画像と投影像の模様の類似性および、それぞれの画像のコントラストの類似性である。任意の環境においては、常に投影に適した面が用意されているとは限らない。投影される面の光学的および幾何学的性質により、投影された像の視認性は変化する。視認性の高い投影を行うためには、入力画像と投影像が類似するような投影平面を探索する必要がある。任意の空間において RGB カメラおよび深度センサを用い、空間内に存在する物体の明度、色の均一性、平面性、プロジェクタから物体までの距離の四つの評価値にそれぞれ重みを加え、計算することで投影に適した場所を選択する手法を提案する。投影に適した場所を選択することをフレーミングと呼ぶ。四つの評価値と視認性との関係を検証するために、二色により構成される一松模様を入力とする投影実験を行い、それぞれの色が投影された領域の明度値の平均の比を計測する。計測された明度値の平均の比を用いて各評価値の重みを決定する。決定した重みを導入して、提案手法によるフレーミングを行った。また、選択した場所、および、選択されなかった場所へ像を投影する実験を行った。実験結果から、入力画像とフレーミングした場所の投影像のコントラストの類似性は高くなかった。一方で、模様の類似性は最も高いことが確認できた。フレーミングによって視認性が高い像を投影することで、任意の環境において多数の人に適切な視覚的情報を提示できると期待される。

キーワード

フレーミング、プロジェクタ、RGB-D カメラ、光学的情報、幾何学的情報

RGB-D Information Processing for Framing

Yuso Danbara

Abstract

In this thesis, a method for high-visibility projection onto a proper surface in the variable environment is proposed. A proper surface should be searched to keep the projected images clear to see, because there are unsuited surfaces for the variable environment. High-visibility projection means that the projected image is similar to input image. Different property of the surface causes different visibility of projected image. In the proposed method, the surface is selected by means of four components; brightness, homogeneity, flatness, and distance. In addition, the four components have each weight. The weights are decided by the preliminary experiments. For framing, which means selecting the proper surface, an RGB-D camera is used to obtain photometric and geometric information. Framing experiment shows that the projected image onto framed surface are similar to input image. By framing, high-visibility images can be shown to many people in the variable environment.

Keywords

Framing, Projector, RGB-D camera, Photometric information, Geometric information

目次

第1章	はじめに	1
第2章	視覚的な情報の提示	3
2.1	空間内に存在する物体の計測方法	3
2.2	視覚的情報の提示	7
第3章	投影面選択と投影方法	12
3.1	提案手法の概要	12
3.2	フレーミング	13
3.3	選択面への投影	18
第4章	実験および考察	23
4.1	実験環境	23
4.2	フレーミング実験	28
4.3	投影実験	30
第5章	おわりに	40
	謝辞	41
	参考文献	42
	業績	46

目 次

1.1	任意環境における投影	2
2.1	刺激値直読法	4
2.2	分光測色法	4
2.3	パッシブステレオ法による幾何形状計測概要	5
2.4	Time of Flight 方式による幾何形状計測概要	6
2.5	Light Coding 方式による幾何形状計測概要	6
2.6	アクティブステレオ法による取得画像	6
2.7	視認性	7
2.8	明暗と投影像	8
2.9	色の均一性と投影像	8
2.10	凹凸と投影像	9
2.11	距離と投影像	9
2.12	投影に用いるパターン	10
2.13	結果を示すために用いるパターン	10
3.1	提案手法の概要	12
3.2	画像内の区画分割	13
3.3	パターンの視認性算出概要	16
3.4	投影された各色の領域抽出	17
3.5	明度正転画像と反転画像の差分	17
3.6	明度値の平均の比	18
3.7	座標変換概要	19
3.8	画像座標系	22

4.1	使用機器	24
4.2	機器の配置	24
4.3	フレーミングの対象となる空間	25
4.4	明度値の平均の比と明度	26
4.5	明度値の平均の比と色の均一性	26
4.6	明度値の平均の比と平面性	27
4.7	明度値の平均の比と距離	27
4.8	RGB-D カメラによる取得画像	28
4.9	各空間におけるフレーミング結果	29
4.10	投影画像	31
4.11	投影実験概要	31
4.12	入力画像の色	32
4.13	選択面への投影結果	33
4.14	フレーミングした場所の投影像	33
4.15	色が不均一な場所への投影結果	34
4.16	色が不均一な場所の投影像	34
4.17	凹凸のある場所への投影結果	35
4.18	凹凸のある場所の投影像	35
4.19	各投影場所における模様の類似性	36
4.20	周囲の変化に伴った投影	38

表 目 次

4.1 投影像の明度値	37
-----------------------	----

第1章 はじめに

人々は情報交換のために、主に会話などの聴覚的な手段に加え、場合により身振り手振りなどの視覚的な手段を用いている。特に、瞬時に多くの人を対象とする場合や、物体の位置情報などを伝えるには、図を提示するなどの視覚的な手段が適している。例えば、建造物内や街頭では大型映像ボードなどによる広告が増加している。また、広い敷地内で行先などを相談する際や娯楽のために複数人で情報を共有するために視覚的情報が用いられている [1] [2] [3] [4]。

例えば一度に複数人に対して、視覚的に情報を提示する際は映像ボードなどのディスプレイやプロジェクタなどが用いられる [5] [6]。映像ボードなどのディスプレイやプロジェクタなどを用いた視覚的情報提示に関しては、投影のために設けられたのではない場所に視覚的情報を提示するために、機器を持ち運ぶ必要がある場合がある。このとき、ディスプレイは自身の大きさにより提示される範囲が制限されるため、複数人に対して大きな範囲に情報を提示するためには、提示範囲に応じた大きさのディスプレイを用いる必要がある。一方で、プロジェクタを用いる場合は、提示範囲の大きさがプロジェクタ自身の大きさに依存しない [7]。持ち運びが容易なプロジェクタを用いることで任意の環境において視覚的な情報を提示することが可能であると期待される [8]。しかしながら、プロジェクタから提示される情報は、投影面の特性の影響を受ける [9] [10]。プロジェクタによって投影される対象は色が一樣でかつ平坦な物体である場合は、投影像の模様と、プロジェクタの入力画像の模様が類似する [11] [12]。このため、一般的にプロジェクタはスクリーンと呼ばれる色が一樣でかつ十分に凹凸が少ない場所に像を投影する。スクリーンがない場合は、無作為に投影を行うと、適切な情報が提示されない可能性がある。例えば、色が不均一な物体に投影すると、投影面そのものの色の影響により、本来は色が均一な像が結果として不均一になることや、凹凸のある場所へ投影すると本来の像の模様に対して変化してしまう。想定していない像を提示することによって、複数人に対し

て適切に情報を伝えることが困難となる。

視覚的情報を提示する際は視認性が高いことが望ましい。プロジェクタによる情報提示における視認性とは、入力画像と投影像の模様およびコントラストの類似性を表す。提示された内容における色のコントラストや、図および文字などの模様の変化は、情報の視認性に影響を与える [5] [13] [14] [15] [16] ため、プロジェクタを用いて環境に関わらず複数人に適切な情報を伝えるためには、視覚的な情報提示を行う側が想定する情報と観測者が認識する情報が一致していることが望ましい。

本研究では、図 1.1 に示すように空間内の光学的および幾何学的情報を考慮し、最も適した場所へ映像などの視覚的情報を提示する。RGB カメラと深度センサにより実空間の光学的情報と幾何学的情報を取得し、明度と色の均一性、プロジェクタから投影面までの距離と投影対象の平面性を評価することで、最適な投影面を取得する手法を導入する。なお、本研究において投影に適した場所を選択することをフレーミングと呼ぶ。フレーミングされた面に投影像を投影するために、RGB カメラおよび深度センサとプロジェクタの位置合わせを行う。最適な投影面に対し、幾何変換した視覚的情報を投影して提示することで、観測者に視認性の高い視覚的情報を提示することができる。提案手法を用いることで、広い敷地内において地図を表示し、行先の相談を行う際や、景色などを撮影した動画を任意の環境において複数人で共有する際に、共有する人がそれぞれ同様に情報を認識するために自動的に適切な場所へ地図や動画を表示させることなどが可能となると期待される。

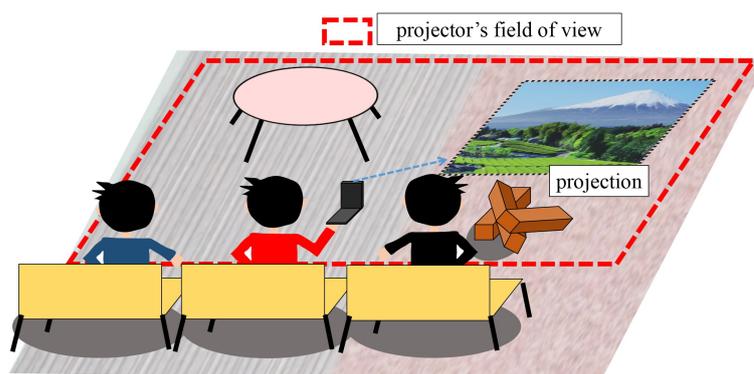


図 1.1: 任意環境における投影

第2章 視覚的な情報の提示

本章では、フレーミングのために取得すべき情報と取得方法について述べる。さらに、取得した情報を処理することで、視覚的な情報を効果的に提示する方法について述べる。

2.1 空間内に存在する物体の計測方法

プロジェクタからは視覚的な情報が提示されるため、投影像に視覚的影響を及ぼす光学的情報と幾何学的情報に着目する [11] [12]。本節では、プロジェクタを用いる際に考慮すべき光学的情報および幾何学的情報の計測方法について述べる。

光学的情報には、それぞれの物体からの反射光の色の種類だけでなく、色の分布が含まれる [12]。また、幾何学的情報には、物体と物体の間の距離や、それぞれの物体の表面形状などが含まれる。

2.1.1 光学的情報の計測方法

物体色を計測する方法としては、刺激値直読法と分光測色法がある [17]。刺激値直読法は、反射光をプリズムを通して複数の波長に分解する(分光する)のではなく、図 2.1 に示すように赤色 (R)、緑色 (G)、青色 (B) の三刺激値をそれぞれに対応するセンサにより直接計測する [18] [19]。物体の一部の色を直接計測する光電色彩計や、付近の物体の色を一度に計測する RGB カメラなどが用いられる。RGB カメラの場合は物体上の各点の R、G および B の三刺激値を計測し、点の位置情報を有した計測結果を出力する。

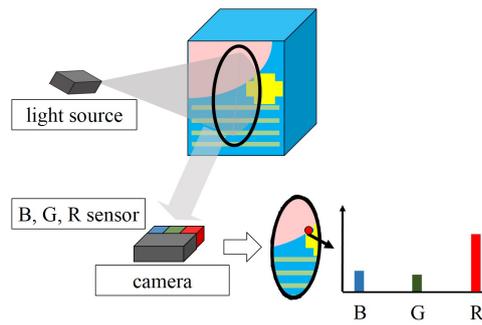


図 2.1: 刺激値直読法

一方の分光測色法は、図 2.2 に示すように、物体の反射光を分光器を用い、可視光領域の波長範囲での分光分布を分光光度計により測定し、分光分布を求める方法である。分光測色法は、刺激値直読法とは異なり、可視光領域の波長として出力されるため、正確な測色が可能である。しかし、一度に広範囲の測定は困難である。任意の環境下に複数の物体が存在する場合、一度に光電色彩計もしくは分光光度計により、広範囲に計測することは困難であるため、本研究で想定しているような、動的に変化する環境下での利用には適していない。

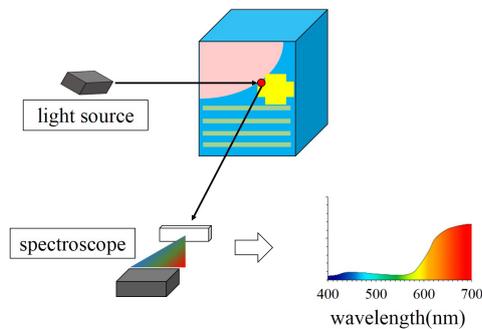


図 2.2: 分光測色法

一方、RGB カメラは一度に空間内に存在する複数の物体が有する色の三刺激値を取得できる。したがって、本研究では光学的情報の計測のために RGB カメラを用いる。

2.1.2 幾何学的情報の計測方法

空間内の幾何形状を取得するために、主にパッシブステレオ法とアクティブステレオ法がある [20] [21]。図 2.3 に示すように、パッシブステレオ法は二台のカメラを用いた方法であり、二台のカメラを異なる位置に配置し、それぞれが取得する画像の視差から空間内に存在する物体の幾何形状を計測する。それぞれの画像内において対応する特徴点の座標値によって計算することができる。プロジェクタなどの他の器具を用いる必要はないが、計測範囲内に独立な特徴点が存在している必要がある。

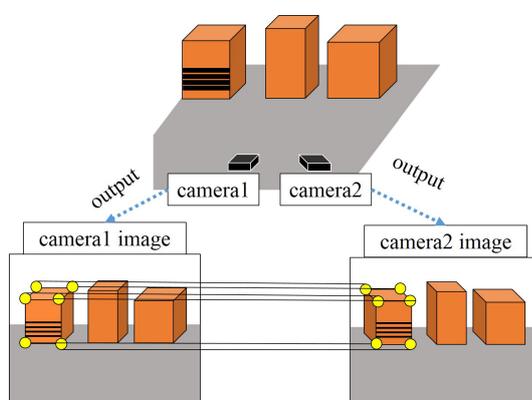


図 2.3: パッシブステレオ法による幾何形状計測概要

一方でアクティブステレオ法には、Time of Flight 方式と Light Coding 方式の二つに分類される [22] [23]。二つの方式はともにプロジェクタとカメラの組み合わせにより幾何形状を計測する。Time of Flight 方式は図 2.4 に示すように、プロジェクタから出た光が対象物体へと向い、反射した後にカメラに届くまでの時間により、対象物体までの距離を計測する。一方の Light Coding 方式は図 2.5 に示すように、特定のパターン光を照射し、カメラにより照射光を取得する [21]。カメラにより取得された光と、入力における光の分布関係から幾何形状を得る。本研究では可視光領域内において、幾何形状計測のための光と視覚的情報の提示のための光が混在することは望ましくない。したがって、本研究では赤外線深度センサを用いる。また、図 2.6(b)(c) に示すように、Time of Flight 方式は Light Coding 方式と比べ、対象物体の端部において雑音の影響が大きい。よって本研究では赤外線による Light Coding 方式を用いる。

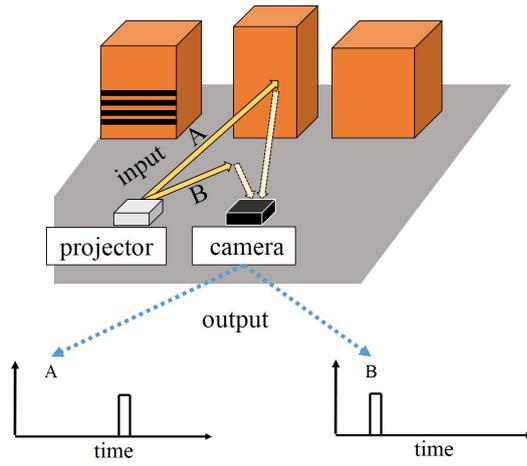


図 2.4: Time of Flight 方式による幾何形状計測概要

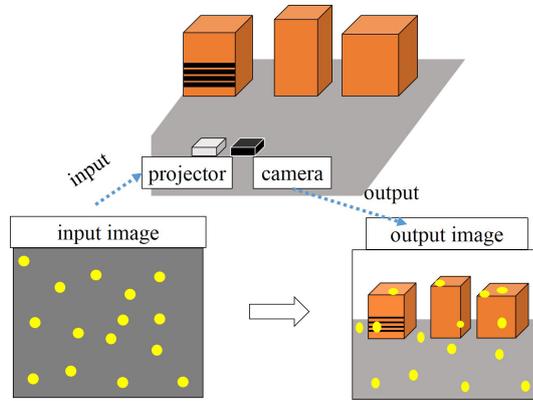
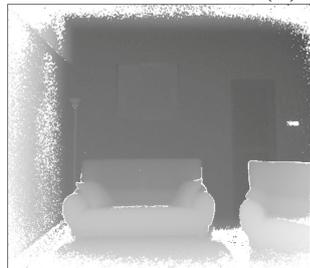


図 2.5: Light Coding 方式による幾何形状計測概要



(a) 幾何形状計測対象の例



(b) Time of Flight 方式による取得画像



(c) Light Coding 方式による取得画像

図 2.6: アクティブステレオ法による取得画像

2.2 視覚的情報の提示

本節では、視認性の高い投影を行うために考慮すべき光学的情報および幾何学的情報について述べる。

2.2.1 視認性

視覚的な情報を提示する際、観測者が正確に提示された情報を認識する必要がある。本論文では、提示者が想定する情報と観測者が認識する情報が一致しているかを示す指標として視認性と定義する。例えば、入力画像と投影像の模様およびコントラストが類似している場合、双方が認識する情報が一致しているとする。一方で、図 2.7 に示すように入力画像と投影像の模様は等しいが、入力画像に比べ投影像のコントラストが低い場合、視認性が低いとする。プロジェクタによる投影の際、投影対象の物体特性により投影結果は異なる。視覚的な情報を複数の視点から同時に観測した際に、それぞれから観測される投影像が類似していることが望ましい。以下では視認性の高い視覚的な情報の提示に関して述べる。

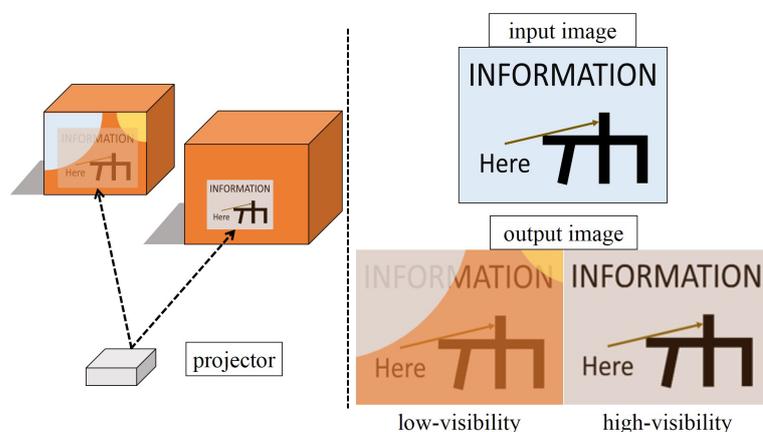


図 2.7: 視認性

2.2.2 空間内の情報を考慮した提示

空間内の情報である、光学的情報を考慮することで図 2.8 および図 2.9 に示すように、投影像の見かけは異なる。図 2.8 に示すように、環境光による影響や物体の色の異なる場所に像を投影すると、それぞれのコントラストは異なる。明るい場所に投影された像は、コントラストが低くなり、情報の認識が困難となる。図 2.9 に示すように、物体の色の均一性が異なる場所へ像を投影すると、それぞれの模様は異なる。色が不均一な場所に投影された像は、入力画像との模様が異なり、情報の認識が困難となる。

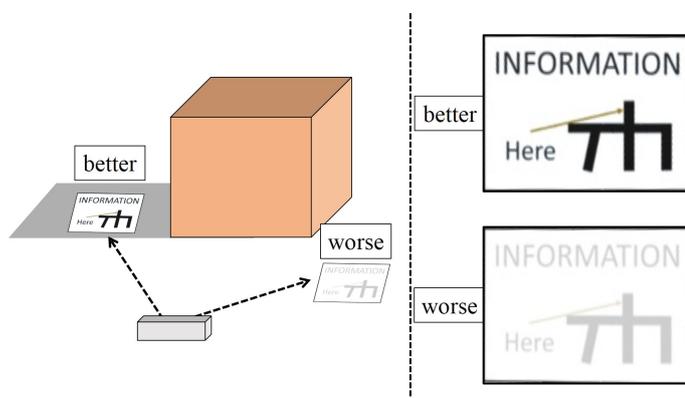


図 2.8: 明暗と投影像

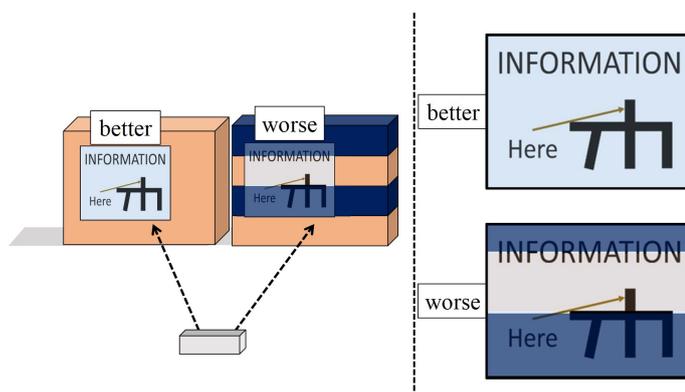


図 2.9: 色の均一性と投影像

また、幾何学的情報を考慮することで図 2.10 および図 2.11 に示すように、投影像の見かけは異なる。図 2.10 に示すように、物体の凹凸の大小が異なる場所へ像を投影するとそれぞれの模様は異なる。凹凸のある場所に投影された像は、視点の違いにより模様が異なり、情報の認識が困難となる。図 2.11 に示すように、プロジェクタから対象物体までの距離が異なる場所へ像を投影するとそれぞれのコントラストは異なる。距離が大きい場所に投影された像はコントラストが低くなり、情報の認識が困難となる。

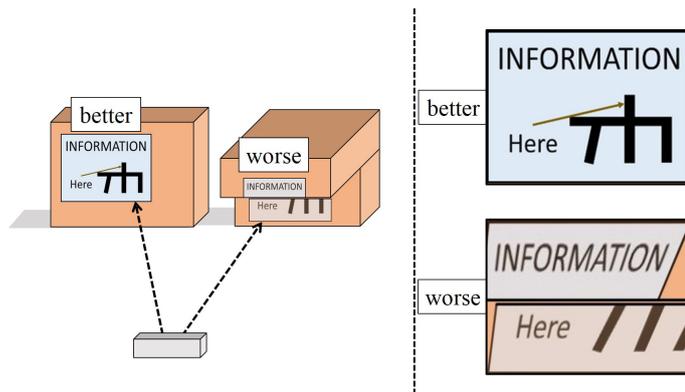


図 2.10: 凹凸と投影像

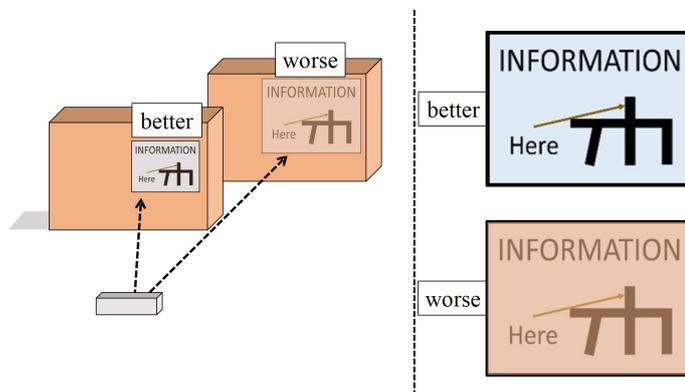


図 2.11: 距離と投影像

任意の視点から視認性が高くなる投影を実現するためには、投影面の幾何的および光学的性質が投影に適している必要がある。本研究では、特定の視点に限らず任意の視点において視認性の高い投影を実現するため、任意の環境における問題を考慮した上で投影面を選択する必要がある。

2.2.3 計測および結果の表示に用いる画像

図 2.12(a) に示すパターンは本研究において、空間内に存在する物体の位置を計測するために用いる。図 2.12(b) に示す一松模様は、白色領域と黒色領域のコントラストを計測するために用い、図 2.12(b) の画像を投影した結果について、白色が投影された領域と黒色が投影された領域のコントラストを計測する。図 2.13 に示すパターンは、特定の画像内部において、各領域ごとに投影対象として評価した結果を表すために用いる。提案手法により領域ごとに投影対象としての適性を評価した結果を示すために用いる。以上のパターンを用いて、本研究で視認性の高い提示を行うために、2.2.4 において考慮すべき事項についてまとめる。

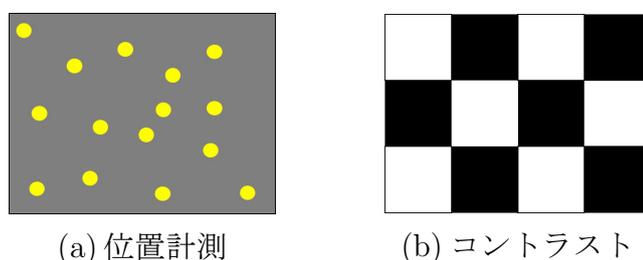


図 2.12: 投影に用いるパターン



図 2.13: 結果を示すために用いるパターン

2.2.4 評価指標

Orlosky らは二次元画像において、明度と色の均一性を評価することで視認性の高い視覚的な情報の提示を可能とした [24]。本研究では、三次元空間内に視覚的な情報を提示するため、光学的情報である明度と色の均一性に加え、幾何学的情報を評価する必要がある。

- 明度

明度とは色の明るさを示す指標である。投影像と周囲の面のコントラストが大きいかほど視認性が高い。明度を評価することでコントラストが大きくなる場所を選択する。

- 色の均一性

色の均一性とは、評価対象の面が一様な色であるか、もしくは複数の色が混在しているかを示す指標である。プロジェクタによる投影像は対象の色に大きく影響を受けるため、対象の色が一様であるほど視認性が高くなる。

- 平面性

平面性とは、投影対象となる領域が平坦であるか、もしくは凹凸があるかを示す指標である。プロジェクタに対する投影対象の勾配が一定であるほど平坦であり、平坦であるほど視認性が高くなる。

- プロジェクタから投影対象までの距離

プロジェクタから投影対象までの距離は光源と投影面が小さいか、もしくは大きいかを示す指標である。プロジェクタからの投影の際、プロジェクタの光源から投影対象への距離が大きくなるに従い、投影範囲が大きくなる。投影像全体の光量は常に一定であるため、投影像が大きくなると単位面積当たりの光量は減少する。単位面積当たりの光量が減少すると観測者にとって視認性が低い情報となるため、プロジェクタと投影対象間の距離を評価する。

本研究では、光学的情報である明度と色の均一性に加え、幾何学的情報である平面性とプロジェクタと投影対象間の距離を評価指標とする。本章では投影面を選択するための光学的および幾何学的情報の処理方法について述べる。

第3章 投影面選択と投影方法

本章では、視認性の高い像の投影のために、投影面の光学的情報に加え幾何学的情報を考慮した投影面選択手法を提案する。

3.1 提案手法の概要

任意の環境において複数の視点にとって視認性の高い視覚的な情報を提示するためには、光学的小および幾何学的情報を処理する手法が必要となる。光学的小および幾何学的情報を取得するためにカメラおよび深度センサを用いる。図 3.1 に示すように、カメラおよび深度センサから得られる画像から、視認性と関連する光学的小および幾何学的情報を処理し、画像内において最も視認性が高くなる場所を選択する。また、選択した場所へ投影するために、像の幾何変換を行う。そのためにはプロジェクタとカメラおよび深度センサの位置姿勢関係を取得する必要がある。提案手法ではプロジェクタ座標系上の任意の点とカメラ画像座標系上の任意の点との対応関係を取得し、位置合わせを行う。

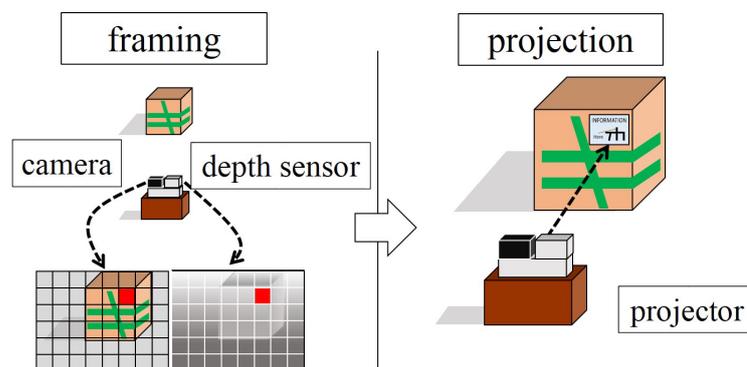


図 3.1: 提案手法の概要

3.2 フレーミング

投影像に影響を与える要因は、投影対象の光学的および幾何学的な特徴であると考えられる。視認性の高い視覚的情報を提示するために、外部環境の情報を取得し、投影面を選択する手法を提案する。本節では、RGB カメラと赤外線深度センサによって取得される色および距離情報を用いて投影対象の明度、色の均一性、平面性、距離を評価することで、視認性に基づいた投影面をフレーミングする手法の詳細について述べる。

3.2.1 区画分割

投影面を選択するために、撮影画像を複数の区画に分割し、区画ごとに投影像の視認性を評価するものとする。RGB カメラから得られた画像を図 3.2(a) のように N 個の区画に分割する。また、深度センサから得られた深度画像も同図 (b) に示すように同様に区画に分割する。RGB 画像が有する色情報と深度画像が有する距離情報から各区画内において、明度、色の均一性、平面性、距離を計算できる。四つの要素を計算することで、各区画における視認性を評価し、 N 個に分割された区画の中で最も投影に適した区画を選択する。なお図 3.2(b) において、深度センサからの距離が小さい場所では暗い色、大きい場所では明るい色で表している。

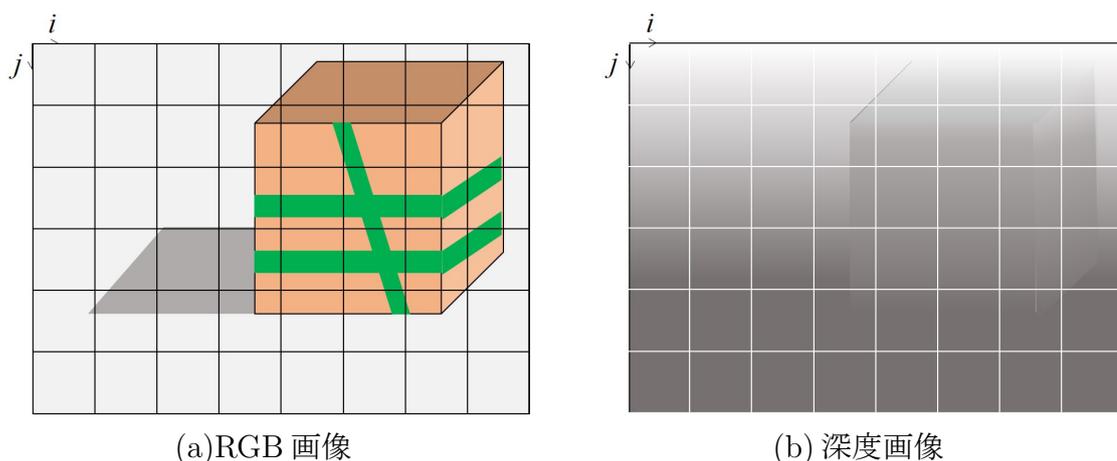


図 3.2: 画像内の区画分割

3.2.2 明度

分割された各区画内において、明度値の総和を明度の評価値とする。明度値 $g_n(i_n, j_n)$ はRGBカメラによって取得される三つの輝度値 ($R(i_n, j_n)$ 、 $G(i_n, j_n)$ 、 $B(i_n, j_n)$) を用いて、式 (3.1) のように表す。なお、 n および (i_n, j_n) は区画番号およびピクセルの座標を表す。

$$g_n(i_n, j_n) = \frac{R(i_n, j_n) + G(i_n, j_n) + B(i_n, j_n)}{3} \quad (3.1)$$

明度の評価値 E_{bn} を式 (3.2) に示す。

$$E_{bn} = \sum_{i_n=1}^{N_{in}} \sum_{j_n=1}^{N_{jn}} g_n(i_n, j_n) \quad (3.2)$$

N_{in} 、 N_{jn} はそれぞれ、区画内の i 方向および j 方向のピクセル数を表す。明度値が小さい値となるような暗い場所であれば、プロジェクタから投影される光と区画のコントラストが大きくなるため、視認性が高くなる。

3.2.3 色の均一性

色の分散の評価値 E_{cn} として、式 (3.3) に示すような明度値の分散を求める。

$$E_{cn} = \sum_{i_n=1}^{N_{in}} \sum_{j_n=1}^{N_{jn}} (g_n(i_n, j_n) - \bar{g}_n)^2 \quad (3.3)$$

$$\bar{g}_n = \frac{1}{N_{in}} \frac{1}{N_{jn}} \sum_{i_n=1}^{N_{in}} \sum_{j_n=1}^{N_{jn}} g_n(i_n, j_n) \quad (3.4)$$

\bar{g}_n は区画 n における明度値の平均を表す。色の分散 E_{cn} が小さいほど色が均一であることを表し、視認性が高くなる。

3.2.4 平面性

式 (3.5) に示すように、隣接するピクセル間の深度の勾配の分散を平面性の評価値 E_{dn} とする。深度そのものの分散を計算すると、画像平面に対して対象の平面に傾きがある場合や、小さな凹凸を有している際にも大きな分散が生じるため、適切な

評価が困難であると考えられる。Goksel らは、画像内の物体の表面の粗さを画像強度の勾配の分散を計算することで評価している [25]。提案手法では、深度の勾配の分散によって平面性を評価する。

$$E_{dn} = \sum_{i_n=1}^{N_{in}} \sum_{j_n=1}^{N_{jn}} (d_n(i_n, j_n) - \bar{d}_n)^2 \quad (3.5)$$

$d_n(i_n, j_n)$ 、 \bar{d}_n はそれぞれ、 (i_n, j_n) における深度の勾配、区画 n における深度の勾配の平均を表す。ここで、深度の勾配 $d_n(i_n, j_n)$ は式 (3.6) に示すように、画像平面における i_n 方向と j_n 方向のそれぞれの深度値の中央差分 $d_{ni}(i_n, j_n)$ および $d_{nj}(i_n, j_n)$ から求める。

$$d_{ni}(i_n, j_n) = -\frac{1}{2} l_n(i_n - 1, j_n) + \frac{1}{2} l_n(i_n + 1, j_n) \quad (3.6)$$

$$d_{nj}(i_n, j_n) = -\frac{1}{2} l_n(i_n, j_n - 1) + \frac{1}{2} l_n(i_n, j_n + 1) \quad (3.7)$$

$$d_n(i_n, j_n) = (d_{ni}(i_n, j_n)^2 + d_{nj}(i_n, j_n)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

$$\bar{d}_n = \frac{1}{N_{in}} \frac{1}{N_{jn}} \sum_{i_n=1}^{N_{in}} \sum_{j_n=1}^{N_{jn}} d_n(i_n, j_n) \quad (3.9)$$

$l_n(i_n, j_n)$ は (i_n, j_n) における深度を表す。深度の勾配の分散 E_{dn} が小さいほど平面性が高いことを表し、視認性が高くなる。

3.2.5 距離

投影面がプロジェクタから受ける単位面積当たりの光量は、ケプラーの法則から距離 (深度) の逆二乗に比例する [26]。深度センサから得られるそれぞれの区画内の各ピクセルが有している深度の平均 \bar{l}_n から、式 (3.10) に示すように単位面積当たりの光量の減少を表す評価値 E_{kn} を求める。

$$E_{kn} = \bar{l}_n^2 \quad (3.10)$$

$$\bar{l}_n = \frac{1}{N_{in}} \frac{1}{N_{jn}} \sum_{i_n=1}^{N_{in}} \sum_{j_n=1}^{N_{jn}} l_n(i_n, j_n) \quad (3.11)$$

単位面積当たりの光量の減少を表す E_{kn} が小さいほど光量は多くなることを表し、視認性が高くなる。

3.2.6 投影面としての適性を表す評価値

以上から、任意の区画における評価関数 E_{wn} を式 (3.12) のように定義する。

$$E_{wn} = w_b E_{bn} + w_c E_{cn} + w_d E_{dn} + w_k E_{kn} \quad (3.12)$$

w_b 、 w_c 、 w_d 、 w_k はそれぞれの重み関数を表す。なお、全区画の評価関数における値はそれぞれの評価関数の最大値により正規化される。全区画における評価関数を計算し、最も投影に適した区画が選択される。

3.2.7 重みの決定

重みを決定するために、四つの評価値と視認性との関係を求める。特定のパターンを投影し、各区画ごとに四つの評価値および投影されたパターンの視認性を算出する。パターンの視認性を算出するまでの行程を図 3.3 に示す。

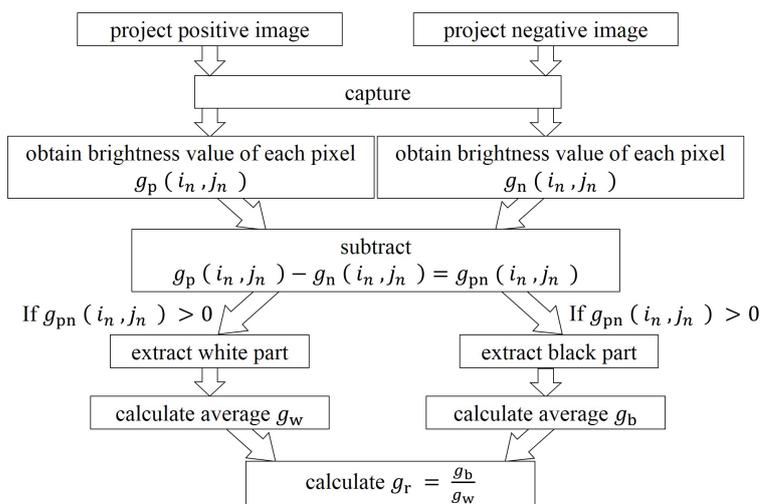


図 3.3: パターンの視認性算出概要

二色の一松模様を投影し、白色が投影された領域および黒色が投影された領域のそれぞれのみを抽出し、各領域の明度値の平均の比を計算する。重みを決定する際に明度値の平均の比を視認性とする。なお、各領域を抽出する際は、図 3.4 および図 3.5 に示すように投影に用いた画像の明度反転画像を同一の場所に投影し、明度正転画像および明度反転画像が投影された結果の画像の差分することにより行う。明度正転画像および明度反転画像を投影した際のカメラ画像における各画素の明度値

$g_p(i_n, j_n)$ 、 $g_n(i_n, j_n)$ を比較し、 (i_n, j_n) における $g_p(i_n, j_n)$ と $g_n(i_n, j_n)$ の差 $g_{pn}(i_n, j_n)$ を式 (3.13) のように求める。

$$g_{pn}(i_n, j_n) = g_p(i_n, j_n) - g_n(i_n, j_n) \quad (3.13)$$

$g_{pn}(i_n, j_n)$ が正および負のとき、 (i_n, j_n) にはそれぞれ白色および黒色が投影されているとする。

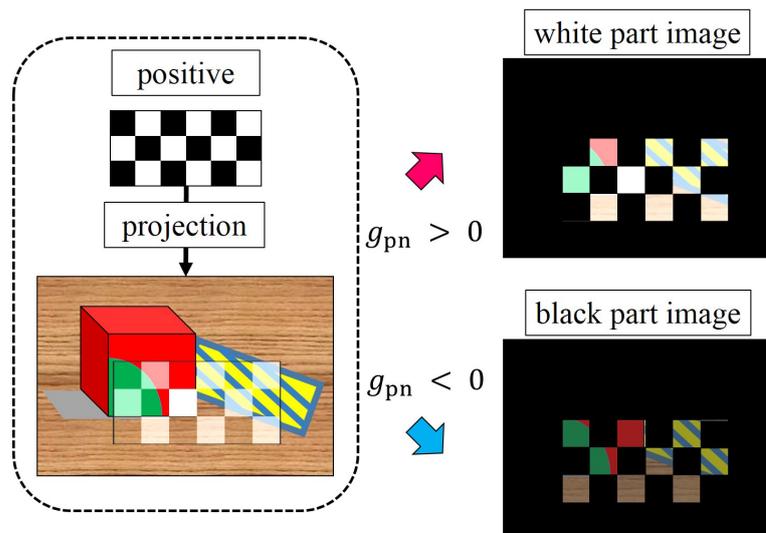


図 3.4: 投影された各色の領域抽出

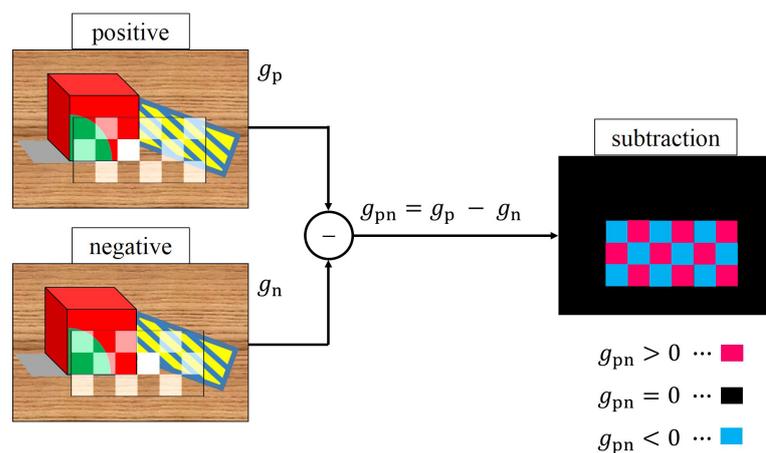


図 3.5: 明度正転画像と反転画像の差分

図 3.6 に示すように、抽出した各色の領域に関して、式 (3.14) に示すように、白色が投影された領域の明度値の平均 g_{wn} と黒色が投影された領域の明度値の平均 g_{bn}

の比 g_{rn} を視認性として求める。

$$g_{rn} = \frac{g_{bn}}{g_{wn}} \quad (3.14)$$

それぞれの評価値について、縦軸を各評価値、横軸を視認性として記録し、常用対

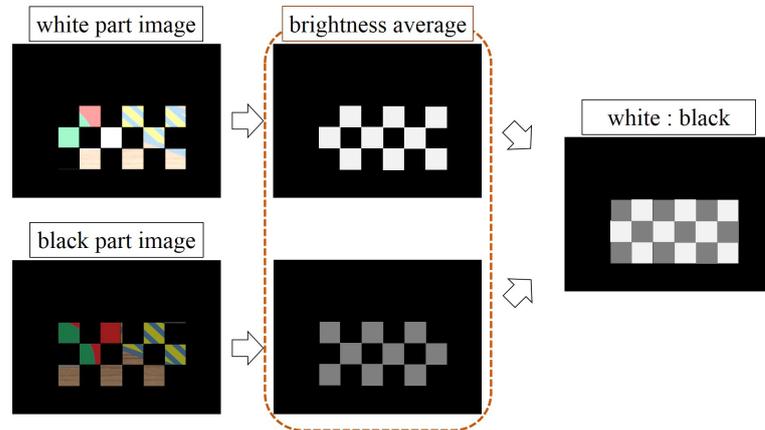


図 3.6: 明度値の平均の比

数近似を行う [27] ことで、それぞれの近似曲線と計算した各評価値との誤差を最小二乗法により求める。誤差が小さいほど重みが大きくなるように決定する。

3.3 選択面への投影

選択した場所へ投影するためには、空間内の物体とプロジェクタの位置姿勢関係を把握する必要がある。空間内の各物体の位置を表す 3 次元の世界座標系から 2 次元のプロジェクタ画面上の座標に変換するまでの概要を図 3.7 に示す。プロジェクタとカメラおよび深度センサとの位置姿勢関係を求めることで、カメラ座標系において選択した区画のプロジェクタ座標系における範囲を算出できる。なお、本研究ではカメラと深度センサの位置姿勢関係は既知とする。

3.3.1 座標系の相互変換

世界座標系で表される投影面の範囲をプロジェクタのレンズ中心を原点とした 3 次元の座標系に変換することで、プロジェクタのレンズ中心からの投影面の範囲を把握することができる。また、世界座標系で表される投影面上の任意の点が、プロジェク

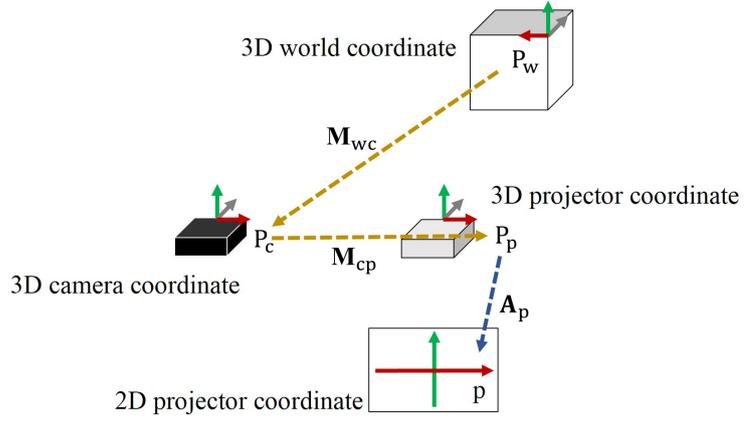


図 3.7: 座標変換概要

タ座標系上のどの点に変換されるかを計算することで、投影像の変形を把握することができる [28] [29]。世界座標系で表される点を認識するためにはカメラが必要である。世界座標系における点をカメラ座標系に変換し、次にカメラ座標系からプロジェクタ座標系に変換する。最後にプロジェクタ画面の2次元座標系に変換するという過程が必要である。3次元のカメラ座標系上の点の同次座標表現 $\mathbf{P}_c = (x_c, y_c, z_c, 1)^T$ は、世界座標系で表される点の同次座標表現 $\mathbf{P}_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$ と投影面とカメラの位置関係を表す変換行列 \mathbf{M}_{wc} を用いて、式 (3.15) のように表せる。なお、Tは転置を表す。

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{M}_{wc} \mathbf{P}_w \quad (3.15)$$

\mathbf{M}_{wc} は世界座標系の x_w 、 y_w 、 z_w 軸周りの回転を示す 3×3 の行列 \mathbf{R}_{wc} と平行移動を表す3行の列ベクトル \mathbf{T}_{wc} で表される式 (3.18) に示すような 4×4 の同次座標表現の行列である。

$$\mathbf{R}_{wc} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{T}_{wc} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{M}_{wc} = (\mathbf{R}_{wc} | \mathbf{T}_{wc}) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

カメラ座標系の点の同次座標表現 \mathbf{P}_c から3次元のプロジェクト座標系の点の同次座標表現 $\mathbf{P}_p = (x_p, y_p, z_p, 1)^T$ への変換は、世界座標系からカメラ座標系への変換と同様に、回転行列 \mathbf{R}_{cp} と平行移動列ベクトル \mathbf{T}_{cp} で表される変換行列 \mathbf{M}_{cp} を用いて式(3.20)のようになる。

$$\mathbf{M}_{cp} = (\mathbf{R}_{cp} | \mathbf{T}_{cp}) \quad (3.19)$$

$$\mathbf{P}_p = \mathbf{M}_{cp} \mathbf{P}_c \quad (3.20)$$

また、プロジェクトが投影する画像は2次元であるため、式(3.15)で得られたプロジェクト視点の3次元座標系から、プロジェクトが投影する画像上の2次元座標系に変換する必要がある。3次元座標から2次元座標に変換する行列を \mathbf{A}_p とすると、プロジェクトが投影する画像上の点の同次座標表現 $\mathbf{p} = (u, v, 1)^T$ は、プロジェクト視点の3次元座標系上の点 $\mathbf{P}_{p2} = (x_p, y_p, z_p)^T$ と変換行列 \mathbf{A}_p を用いて、式(3.22)-(3.25)のように表せる。なお、点 \mathbf{P}_{p2} は同次座標表現ではない。

$$\mathbf{A}_p = \begin{pmatrix} fs_u & 0 & u0 \\ 0 & fs_v & v0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{p}' = \mathbf{A}_p \mathbf{P}_{p2} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{p}' = \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

$$u = u', v = v' \quad (3.25)$$

u_0, v_0 はそれぞれ u 方向、 v 方向の中心座標、 s_u, s_v はそれぞれ一つのピクセルに対応するレンズの u 方向、 v 方向の長さ、 f はプロジェクタの焦点距離を示す。式 (3.22) から投影された像の任意の点とプロジェクタの各画素との対応関係が得られる。

投影像をプロジェクタ視点におけるピクセルに対応した変換をすることで、最適な位置に歪みのない像を投影することができる。平面を射影変換を用いて別の平面に射影するための 3×3 の行列であるホモグラフィ \mathbf{H} を用いて、投影前の像がプロジェクタ座標系で表されるような像に変換する。変換前の像の任意の点の同次座標表現 $\mathbf{p}_b = (u_b, v_b, 1)^T$ は式 (3.26) に示すように、プロジェクタの 2 次元座標系の点の同次座標表現 \mathbf{p} に変換される。

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{p}_b \quad (3.26)$$

\mathbf{p}_b は投影前の像の任意の点であり、 \mathbf{p} は式 (3.22) から求めることができるため、 \mathbf{p}_b, \mathbf{p} はともに既知の値から成る。それぞれが既知であることからホモグラフィ \mathbf{H} を求めることができ、投影前の像の全ての点に対して \mathbf{H} を用いて変換することができる。

3.3.2 ホモグラフィを用いた位置合わせ

図 3.8 に示すように、プロジェクタ画像座標系の点 \mathbf{p} からカメラ画像座標系の点 \mathbf{c} への変換は、 3×3 の行列 \mathbf{M}' を用いて、式 (3.27) のようになる。なお、 \mathbf{c} および \mathbf{p} は二次元の同次座標系である [30]。

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}'\mathbf{p} \quad (3.27)$$

提案手法によりカメラ画像座標系において選択した区画へ視覚情報を投影するため、カメラ画像座標系上の区画の点 \mathbf{c}' をプロジェクタ画像座標系の点 \mathbf{p}_b へ変換する。この変換は、 \mathbf{M}' の逆行列 \mathbf{M}'^{-1} を用いて式 (3.28) のように表せる。

$$\mathbf{p}_b = \mathbf{M}'^{-1}\mathbf{c}' \quad (3.28)$$

式 (3.28) により、プロジェクタ画像座標系において選択された区画の位置や大きさが求められる。プロジェクタ画像座標系において、投影像を選択された区画の位置

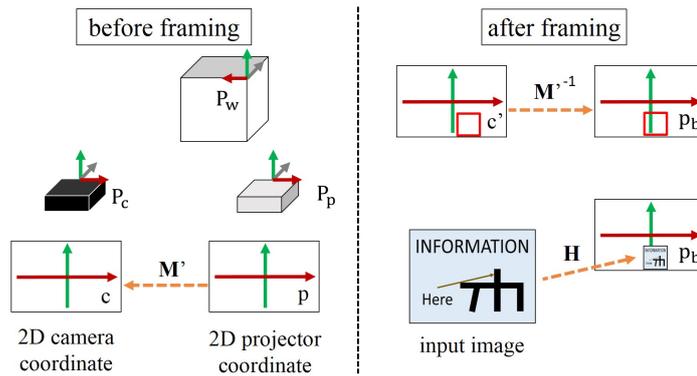


図 3.8: 画像座標系

や大きさにあわせて変換することで、選択面へ歪みのない視覚情報を投影できる。投影像の変換はホモグラフィ \mathbf{H} を用いて、式(3.29)のように表される。

$$\mathbf{p}_b = \mathbf{H}\mathbf{p} \quad (3.29)$$

ホモグラフィを用いたプロジェクタとカメラの位置合わせは、主に凹凸が少ない環境下において有効である。なお本論文では、プロジェクタ画像座標系における既知の四点を実空間に投影し、投影像のカメラ画像座標系における位置を計測することで、 \mathbf{M} を求める。式(3.29)における \mathbf{p}_b は提案手法によりフレーミングした区画内の特定の四点 \mathbf{c}' と \mathbf{M}^{-1} から計算する。プロジェクタ画像座標系において、変換前の画像の任意の四点と計算により得られた \mathbf{p}_b の四点からホモグラフィ \mathbf{H} を求め、投影像 \mathbf{p} の全ての点をホモグラフィ \mathbf{H} を用いて変換する。

第4章 実験および考察

本章では、まず四つの評価値に関する重みを決定するための実験に関して述べる。また、決定した重みを用いて、提案手法により投影面を選択し、さらに像を投影する実験に関して述べる。

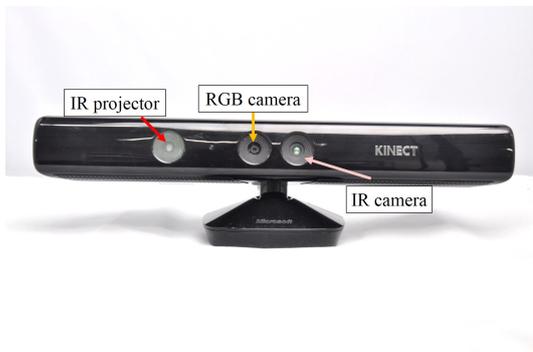
4.1 実験環境

本節では、提案手法により投影面選択を行うために用いる機器や、評価値に加える重みなどのパラメータについて述べる。

4.1.1 使用機器

任意の空間において、提案手法によるフレーミングのために図 4.1(a) に示すような、RGB カメラと深度センサの双方の機能を持つ RGB-D カメラとして Microsoft Kinect for Windows を用いる。Kinect から得られる RGB 画像および深度画像の解像度はそれぞれ 640×480 pixels である。RGB カメラにおける輝度値 R 、 G および B の値域は $0 - 255$ であり、深度の計測範囲および分解能は $800 - 4000$ mm および 10 mm である。また、取得した情報を処理するために PC (Intel Core i5 CPU) を用いる。提案手法により選択した面に像を投影するために図 4.1(b) に示すようなプロジェクタ (Optoma EP71551) を用いる。プロジェクタの解像度および輝度は 640×480 pixels および 3000 ルーメンである。以上の機器を用いて実験を行う際のそれぞれの配置例を図 4.2 に示す。以下の実験ではすべて同一の機器を用いる。なお、本実験においてフレーミングの対象となる空間を図 4.3(a) から (e) に示す。

また、提案手法により四つの評価値を計算する際に RGB-D カメラで取得する画像内を区画に分割する。区画のサイズは、評価値の計算に必要な画素数を確保するため、画像全体を縦横 10 分割する大きさとなる 64×48 pixels とした。



(a) RGB-D カメラ



(b) プロジェクタ

図 4.1: 使用機器

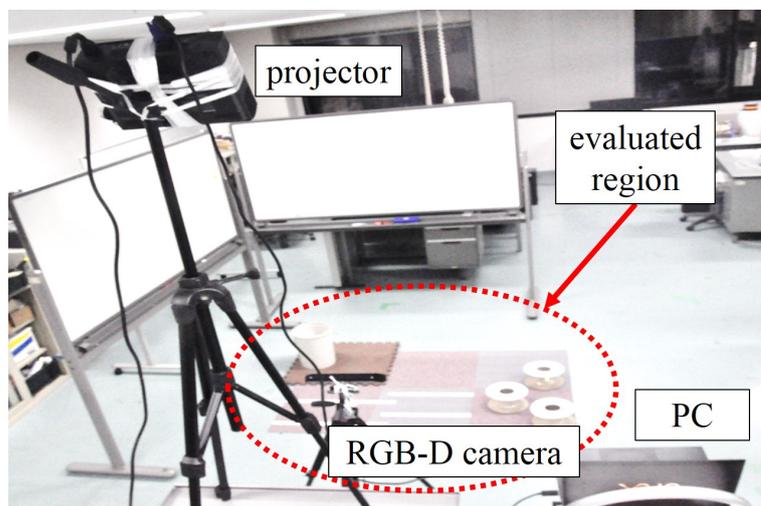
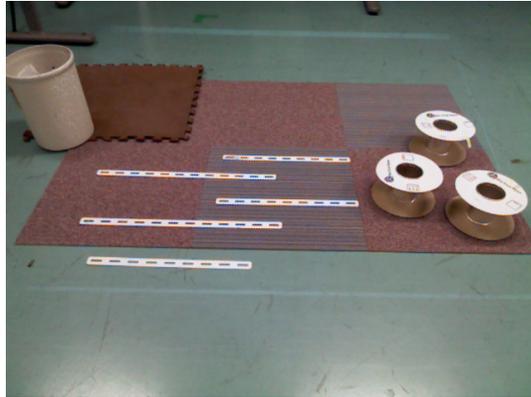
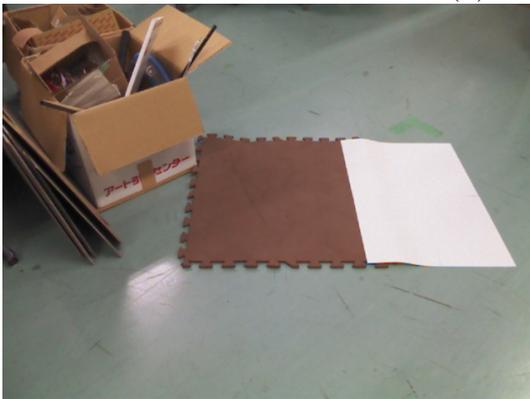


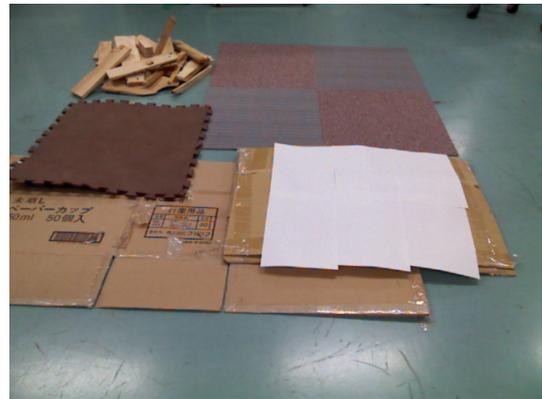
図 4.2: 機器の配置



(a) 任意の空間



(b) 明度の差が大きい空間



(c) 特に色が不均一な空間



(d) 凹凸を多く含む空間



(e) 距離の差が大きい空間

図 4.3: フレーミングの対象となる空間

4.1.2 重みの決定

特定の環境に限らず、任意の環境において利用可能な重みを決定する。任意の環境において提案システムを適応させるために、複数の環境において実験を行い、重みを決定する。図 4.3 に示した図において、(b) の明度の差が大きい空間、(c) の色が不均一な場所を多く含む空間、(d) の凹凸を多く含む空間および (e) の距離の差が大きい空間の四つの空間を重みの決定に利用する。図 4.3(b) から (e) に示したそれぞれの画像において、区画ごとに四つの評価値および視認性を算出した結果を図 4.4 から 4.7 に示す。

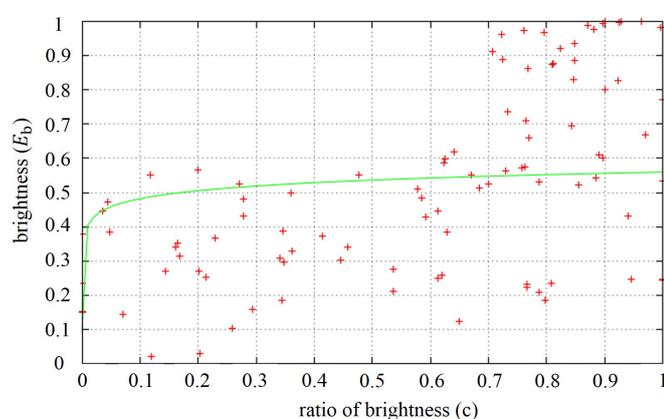


図 4.4: 明度値の平均の比と明度

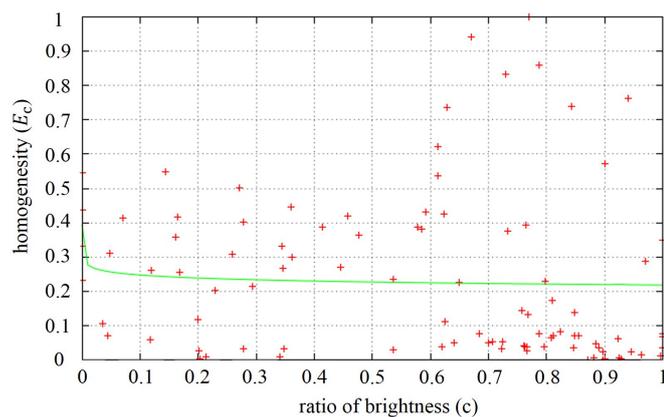


図 4.5: 明度値の平均の比と色の均一性

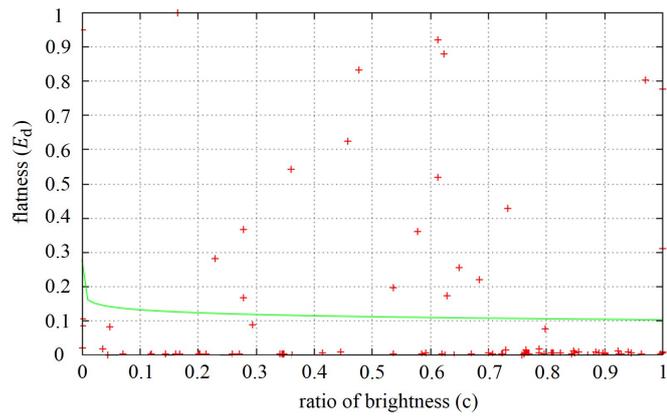


図 4.6: 明度値の平均の比と平面性

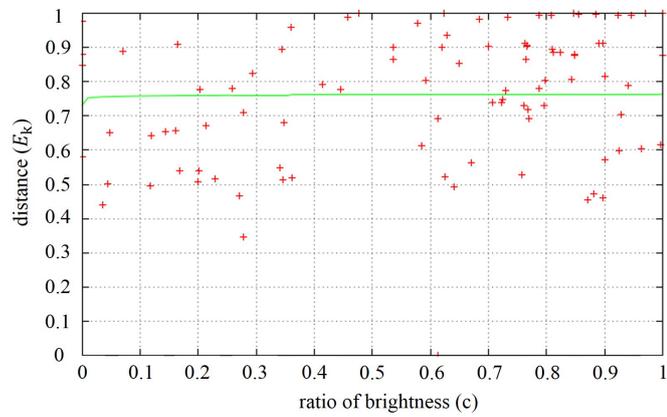


図 4.7: 明度値の平均の比と距離

それぞれの評価値について、対数近似した曲線と実測値との誤差は 7.15×10^{-2} 、 6.12×10^{-2} 、 6.83×10^{-2} 、 3.75×10^{-2} であった。誤差が小さいほど評価値と視認性の相関が強いと考えられる。本研究では、重みはそれぞれの誤差の逆数の比から $w_b = 0.195$ 、 $w_c = 0.228$ 、 $w_d = 0.204$ 、 $w_k = 0.373$ とする。重みを決定することで提案手法により投影面を選択できる。

4.2 フレーミング実験

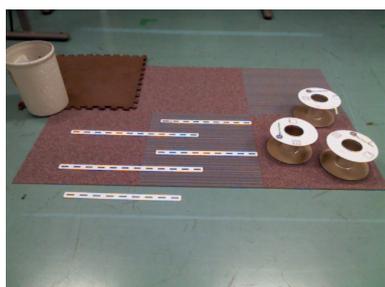
本節では、様々な光学的および幾何学的性質を有する複数の空間を対象として、提案手法を用いて最も視認性の高い投影面のフレーミングが可能であることを示すための実験を行い、結果について述べる。

4.2.1 実験方法

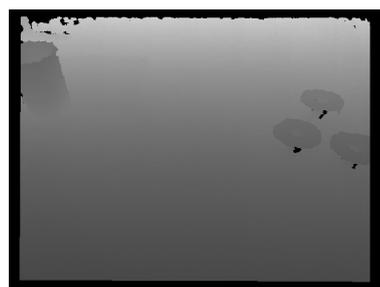
実験の際に、4.1.1 で示した PC、RGB-D カメラを用いた。なお、本実験では RGB-D カメラの RGB カメラと深度センサの位置姿勢関係は既知である。特定の空間を撮影したカメラ画像および深度画像から、それぞれ提案手法により各区画における評価を行い、重みを考慮した結果として各画像ごとに最も視認性が高い区画を投影面として選択する。なお、提案手法により計算した各区画の評価結果を示すため、撮影した RGB 画像に計算結果に対応する色を重畳する。

4.2.2 実験結果

4.2.1 節で述べた実験において、RGB-D カメラから取得した RGB 画像と深度画像をそれぞれ図 4.8(a)(b) に示す。図 4.8(b) では、計測位置からの距離が大きくなるにつれて明度が高くなる。



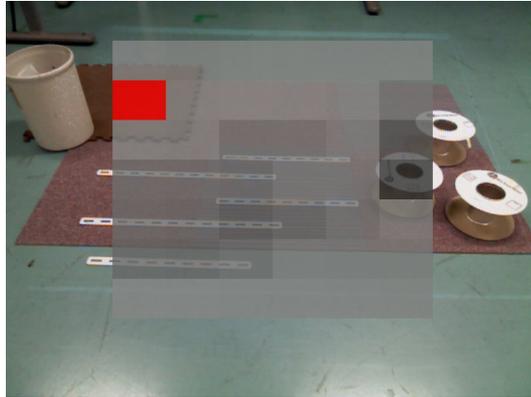
(a) RGB 画像



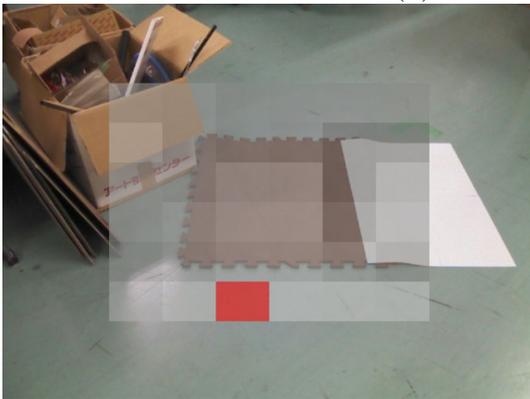
(b) 深度画像

図 4.8: RGB-D カメラによる取得画像

投影面を選択するために取得した画像について評価を行った結果をそれぞれ図 4.9 に示す。区画の色として、白は視認性が高く、黒は視認性が低いことを表している。図 4.9 において赤で表示された区画が、提案手法により最も視認性が高いとされた区画である。



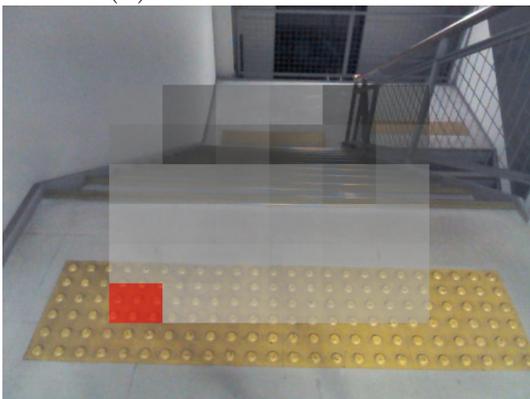
(a) フレーミング結果 I



(b) フレーミング結果 II



(c) フレーミング結果 III



(d) フレーミング結果 IV



(e) フレーミング結果 V

図 4.9: 各空間におけるフレーミング結果

4.2.3 考察

図 4.9 から、色の境界や物体と物体間の境界を含む区画は視認性が低いという結果になった。それぞれの境界近傍において色が不均一であることや平面性が低いことが原因と考えられる。また、距離が大きい場所に比べて小さい場所では視認性が高い結果となった。以上から、光学的および幾何学的特性を考慮できていると考えられる。空間の特性を考慮することで、その場に応じて最適な投影面を選択し、視認性の高い像の提示が可能と考えられる。

一方、図 4.9(c) において選択された区画は、実際には小さな凹凸を多く含む領域である。距離の重みが最も大きいため、小さな凹凸を含む領域では、距離が近い場所を優先していることがわかる。4.1.2 節においては、視認性の尺度として投影像の明度値の平均の比のみを考慮しており、投影像の模様を考慮していないためと考えられる。このことから図 4.9(c) に示すような、小さな凹凸を含む空間においては、投影像の変形が最も小さい場所を選択するとは限らない。重みを決定する際の尺度として、明度値の平均の比だけでなく、入力画像に対して投影像がどれだけ変形したかを示す指標を考慮すべきであると考えられる。

4.3 投影実験

提案手法により選択した場所へ投影された像の視認性が高いかを確かめるためには、実際に選択した場所へ投影する必要がある。本節では提案手法により選択された面へ像を投影する実験を行う。

4.3.1 実験方法

本節では、複数の視点において、実際に投影した像の視認性を検証する。フレーミング実験と同様に、投影実験においても図 4.1 で示した PC、RGB-D カメラおよびプロジェクタを用いた。投影実験を行う際に使用した投影画像を図 4.10 に示す。4.2 節の図 4.8 で示した空間において提案手法により選択した面に像を投影するために、RGB-D カメラとプロジェクタの位置合わせを行う必要がある。本実験では、3.3.2 に示したホモグラフィを用いた RGB-D カメラとプロジェクタの位置合わせを行う。

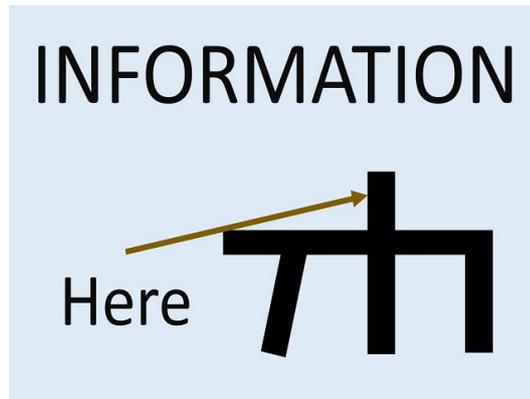


図 4.10: 投影画像

図 4.11 に示すように、投影を行った結果を RGB-D カメラ視点および RGB-D カメラとは異なる三つの視点から撮影し、それぞれにおいて視認性を検証する。なお、視認性として、入力画像と投影像の画素の一致数と明度値の平均の差とする。入力画像と投影像の模様を比較するためにそれぞれの視点から撮影した投影結果における像をホモグラフィを用いてプロジェクト画像座標系に変換し、変換後に二値化する。二値化した入力画像と投影像の各画素における画素値を比較し、画素値が等しい画素数を計算し、その画素数を模様の類似性とする。また、4.1.2 において、投影像の色をそれぞれ抽出した際と同様の方法により入力画像の中で図 4.12(a) および (b) に示す青白色および黒色が投影された領域を抽出し、その領域の明度値の平均を計測する。

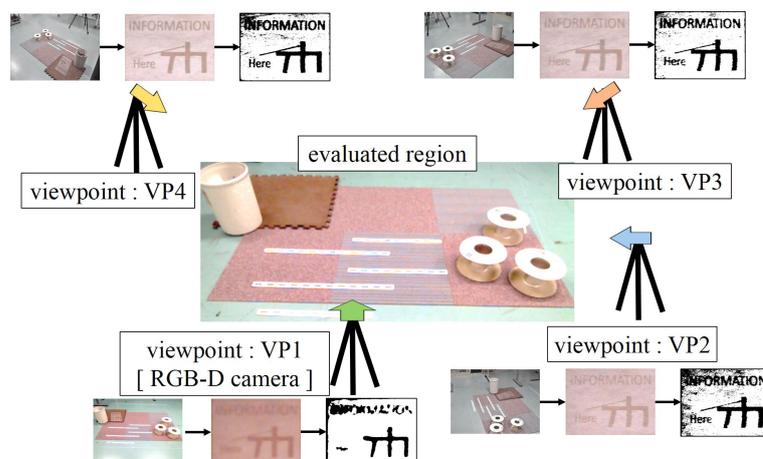
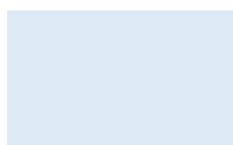


図 4.11: 投影実験概要



(a) 青白色



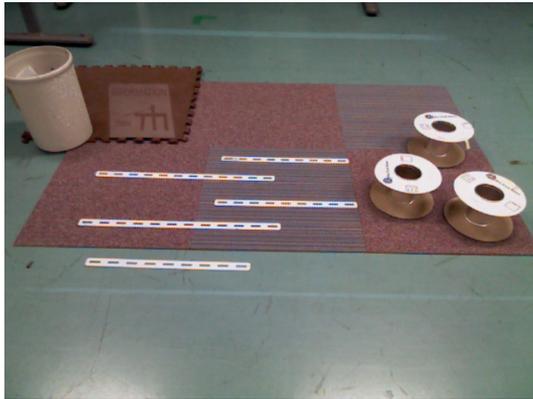
(b) 黒色

図 4.12: 入力画像の色

図4.11において、視点 VP1、VP2、VP3およびVP4は選択する際に設置した RGB-D カメラ視点、RGB-D カメラから向かって右方向からの視点、RGB-D カメラから向かって右斜め前方向からの視点および RGB-D カメラから向かって左斜め前方向からの視点である。

4.3.2 実験結果

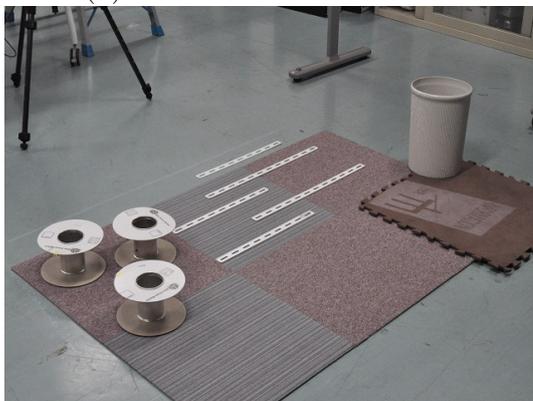
4.2.2において選択した場所へ図 4.10 の画像を投影した結果を図 4.13 に示す。また、選択した場所の投影像をホモグラフィ変換し、二値化した結果を図 4.14 に示す。提案手法により選択されていない場所として、色が不均一な場所へ像を投影した結果を図 4.15 に示し、ホモグラフィ変換し、二値化した結果を図 4.16 に示す。また、凹凸のある場所へ像を投影した結果を図 4.17 に示し、ホモグラフィ変換し、二値化した結果を図 4.18 に示す。



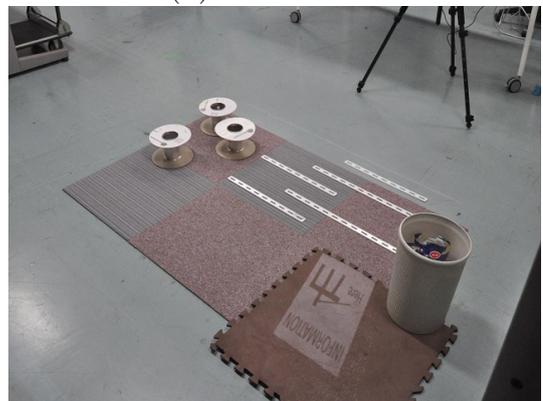
(a)RGB-D カメラ視点 VP1



(b) 右視点 VP2

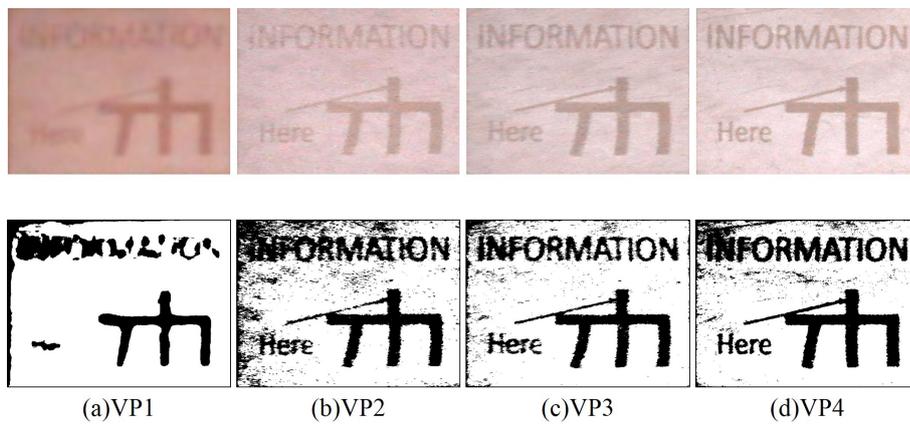


(c) 右斜め前視点 VP3



(d) 左斜め前視点 VP4

図 4.13: 選択面への投影結果



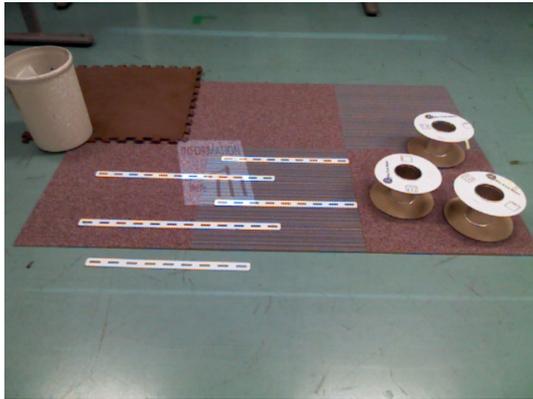
(a)VP1

(b)VP2

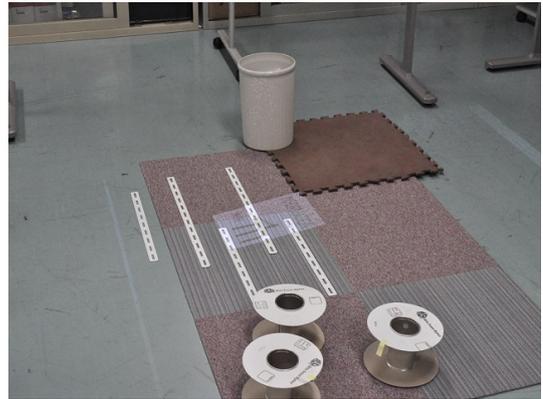
(c)VP3

(d)VP4

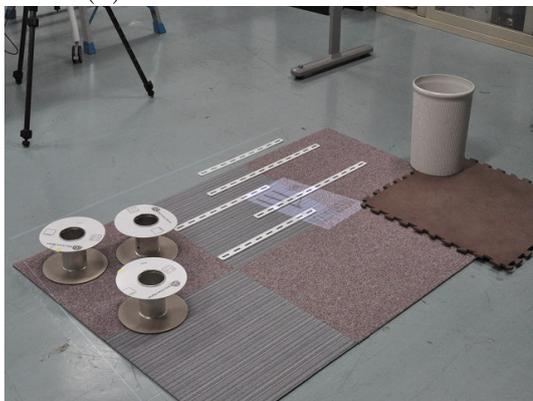
図 4.14: フレーミングした場所の投影像



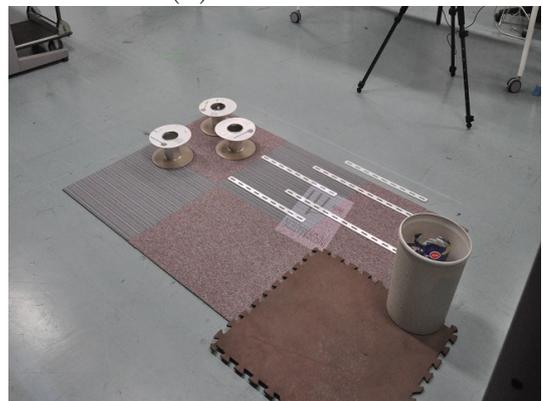
(a) RGB-D カメラ視点 VP1



(b) 右視点 VP2

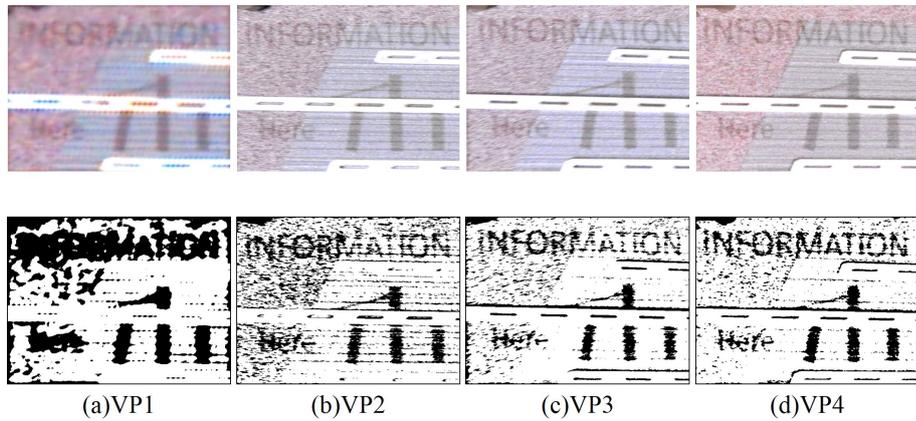


(c) 右斜め前視点 VP3



(d) 左斜め前視点 VP4

図 4.15: 色が不均一な場所への投影結果



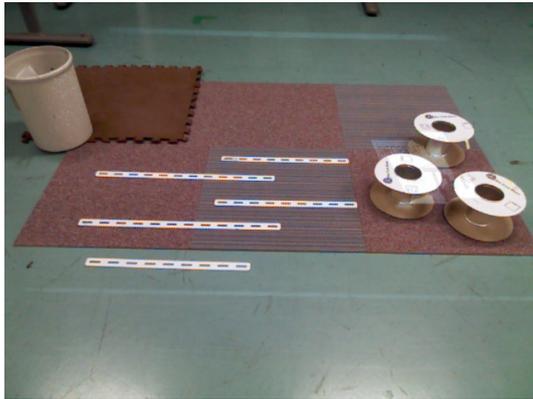
(a)VP1

(b)VP2

(c)VP3

(d)VP4

図 4.16: 色が不均一な場所の投影像



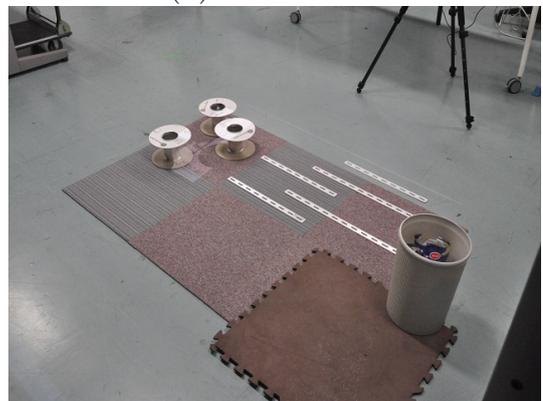
(a)RGB-D カメラ視点 VP1



(b) 右視点 VP2

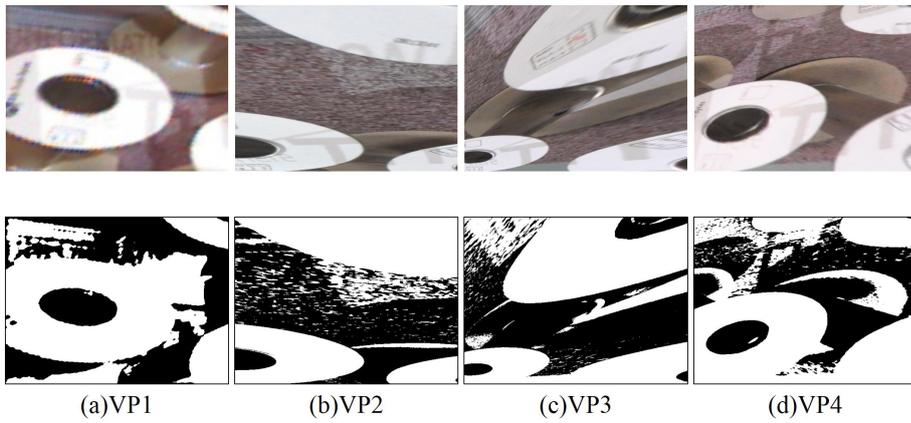


(c) 右斜め前視点 VP3



(d) 左斜め前視点 VP4

図 4.17: 凹凸のある場所への投影結果



(a)VP1

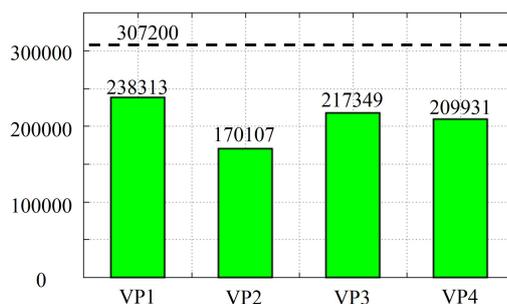
(b)VP2

(c)VP3

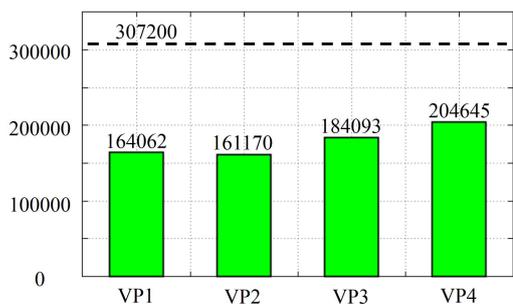
(d)VP4

図 4.18: 凹凸のある場所の投影像

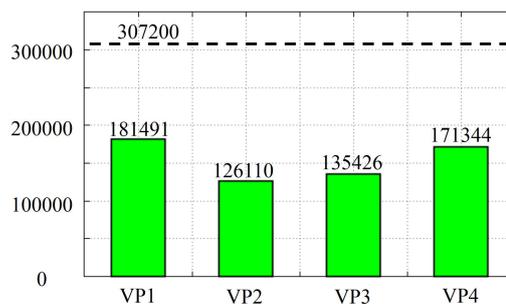
二値化した入力画像と投影像の画素値が一致している点の数と画像の解像度 ($640 \times 480 = 307200$ pixels) を用いて、投影像と入力画像の類似性を図 4.19 に示す。グラフの縦軸は画素数である。緑色領域が入力画像と投影像が一致している画素数を示しており、その値が大きいほど入力画像と投影像が類似しており、視認性が高いことを示している。



(a) フレーミングした場所の投影像



(b) 色が不均一な場所の投影像



(c) 凹凸のある場所の投影像

図 4.19: 各投影場所における模様の類似性

また、選択した場所の投影像、色が不均一な場所の投影像および凹凸のある場所の投影像の各色の領域の明度値の平均を計測した結果を表 4.1(b) から (d) に示す。入力画像と投影像の青白色領域と黒色領域の明度値の平均の比が類似しているほど視認性が高い。

また、周囲の物体の位置の変化に伴った投影を行った結果を図 4.20 に示す。

表 4.1: 投影像の明度値

(a) 入力画像の明度値

背白色領域	232
黒色領域	0.00

(b) フレーミングした場所への投影

視点	RGB-D カメラ視点	右視点	右斜め前視点	左斜め前視点
背白色領域	72.8	97.2	97.4	112
黒色領域	17.8	42.5	42.6	52.2

(c) 色が不均一な場所への投影

視点	RGB-D カメラ視点	右視点	右斜め前視点	左斜め前視点
背白色領域	127	132	134	134
黒色領域	26.4	49.8	54.6	49.1

(d) 凹凸のある場所への投影

視点	RGB-D カメラ視点	右視点	右斜め前視点	左斜め前視点
背白色領域	141	124	110	117
黒色領域	31.4	64.8	81.1	65.1



図 4.20: 周囲の変化に伴った投影

4.3.3 考察

図 4.14 から図 4.18 に示す投影像と入力画像の模様の類似性はいずれの視点においても、選択面上の投影像が最も高い結果が得られた。例えば、図 4.19(a) の VP1 においてフレーミングした場所の模様の類似度は百分率で表すと 67% であり、図 4.19(b) の VP1 の色が不均一な場所および図 4.19(c) の VP1 の凹凸のある場所の模様の類似度は 60% および 44% であった。また、それぞれの場所へ投影した像が視点により視認性の値が異なる原因としては、環境光の投影面からの反射光が、鏡面反射などの乱反射の影響により視点により異なることが考えられる。また、投影像をプロジェクタ画像座標系に変換する際に生じる誤差なども原因として考えられる。凹凸のある場所の投影像は視点により死角となる部分が異なるため、視点の違いにより類似性が異なると考えられる。一方で表 4.1(a) から (d) より投影像と入力画像のコントラストの類似性は最も高い結果ではなかった。例えば、表 4.1(b) と表 4.1(c) の RGB-D カメラ視点より、選択した場所の青白色と黒色領域の明度値の比は 72.8 : 17.8 に対して、色が不均一な場所の投影像の明度値の比は 127 : 26.4 であった。原因としては、提案手法では物体の明度としての明るさと照明などの環境光の影響による明るさを区別しておらず、投影像のコントラストはそれぞれの明るさによる影響が異なるためと考えられる。

図 4.19 および表 4.1 から特定の視点に限らず、視認性の高い像を投影することができることを確認できた。このことから、提案手法により複数の人に対して同時に視認性の高い像を投影でき、人が動く環境においても広告の提示などが可能であると期待される。一方で、凹凸のある場所への投影は視点の違いにより、像の見かけは大きく異なるため、平坦な場所が選択できないほど人が存在する場合などは視認性の高い像の投影は困難であると考えられる。

第5章 おわりに

本研究では、実空間内の光学的情報と幾何学的情報をカメラおよび深度センサを用いて取得し、それぞれから得られた画像を用いて評価を行うことで視認性の高い区画のフレーミングを行い、さらにプロジェクタおよびカメラの位置姿勢関係を考慮した視認性の高い投影を行う手法を提案した。また、それぞれの評価値の重みを決定するための実験を行うことで、明度と色の均一性、平面性と距離のそれぞれと視認性との関係を得ることができた。提案手法により視認性の高い投影面のフレーミング実験と、選択した面へ投影をする実験を行った。フレーミング実験および投影実験は凹凸や、色の不均一な領域を有する環境において行い、選択された面と他の面へ投影されたそれぞれの像をカメラで計測し、その投影像を二値化することで視認性が高い結果となることを確認した。凹凸や色が不均一な領域などを有する環境においても、視認性が高い面への投影が可能となることで、任意の環境において複数人で視覚的情報を共有し、意思疎通が可能となると期待される。

謝 辞

本研究は大阪大学 大学院基礎工学研究科で行ったものである。

研究を行う際に研究環境を提供して頂き、本論文の添削指導や研究に関する問題点などの指摘や、研究内容だけでなくさまざまな勉学の際に多大なるご指導をいただきました大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城理教授にお礼を申し上げます。大阪大学 大学院基礎工学研究科 宮崎文夫教授には、本研究をまとめるにあたり副査として御指導頂き、感謝いたします。これまで何度も相談に乗っていただき、研究の進め方などのアドバイスをいただきました大阪大学 大学院基礎工学研究科 井村誠孝准教授に心より感謝します。本研究に関して幾度となく研究の相談に乗って頂き、研究の進め方や必要性の考え方など適切なアドバイスをいただきました京都大学 医学部附属病院 医療情報企画部 浦西友樹助教に深くお礼申し上げます。学生に近い立場として、研究生活の中でたくさんのことを教えていただきました大阪大学 大学院基礎工学研究科 吉元俊助教に深く感謝します。

また、普段の研究室生活において、それぞれ研究内容や研究生活などあらゆる面においてお世話になった大城研究室の先輩方である三宅正夫氏、加藤雄樹氏、井手口裕太氏、籾岡亮氏にお礼申し上げます。三宅氏には課外活動などであった際に、やさしく接していただきました。加藤氏には、研究に対する姿勢の手本となっただけではありません。井手口氏には、研究に関するアドバイスをしていただきました。また籾岡氏には研究生活や日常生活におけるアドバイスをいただきました。研究生活の中で、互いに励ましあい、意見を交換しながら共に研究を進めてきた同期の長坂信吾氏、中藤寛己氏、豆野裕信氏、和田章宏氏に感謝します。英語に関する相談や新鮮な経験をさせてもらった Rodrigues Victor Matsuguma 氏に感謝します。また、研究室の後輩への指導や相談などによってさまざまな発見につなげることができた加藤高浩氏、上西健太氏、川口純輝氏、古澤大樹氏、加藤弘樹氏、桑谷達之氏、武村浩志氏、日夏俊氏に感謝します。

参考文献

- [1] C.Daniel McFarlane and M.Steven Wilder. Interactive dirt: increasing mobile work performance with a wearable projector-camera system. *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing*, pp. 205–214, 2009.
- [2] 大隈隆史, 興梠正克, 酒田信親, 蔵田武志. 屋内展示ナビと現地や遠隔地での追体験のための三次元インタフェース (仮想都市, 複合現実感, 及び一般). 電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎, Vol. 107, No. 242, pp. 43–48, 2007.
- [3] B.Jones, R.Sodhi, M.Murdock, R.Mehra, H.Benko, A.Wilson, E.Ofek, B.MacIntyre, N.Raghuvanshi, and L.Shapira. Roomalive: Magical experiences enabled by scalable, adaptive projector-camera units, 2014.
- [4] 松丸隆文, 干場祐, 平岩慎司, 宮田康広. プロジェクタを用いて次の動作を予告表示する機能をもつ移動ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 3, pp. 410–421, 2007.
- [5] 弘平野本, 正晴若松. 大画面表示インタフェースのための空間設計法. 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界, Vol. 86, No. 4, pp. 491–499, 2003.
- [6] K.A.Gavaghan, M.Peterhans, T.Oliveira-Santos, and S.Weber. A portable image overlay projection device for computer-aided open liver surgery. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, Vol. 58, No. 6, pp. 1855–1864, 2011.
- [7] J.Hu, G.Li, X.Xie, Z.Lv, and Z.Wang. Bare-fingers touch detection by the button's distortion in a projector camera system. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 24, No. 4, pp. 566–575, 2014.

- [8] H.Song, F.Guimbretiere, T.Grossman, and G.Fitzmaurice. Mouselight: Bi-manual interactions on digital paper using a pen and a spatially-aware mobile projector, 2010.
- [9] 山崎眞見, 皆川剛, 武田晴夫, 長谷川晶一, 橋本直己, 佐藤誠. 複合曲面スクリーン上での投射映像シームレス接続技術. 映像情報メディア学会誌, Vol. 57, No. 11, pp. 1543–1550, 2003.
- [10] 橋本直己, 渡邊暁. 環境変化に対応する動的映像補正手法. *The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers*, Vol. 66, No. 9, pp. 303–309, 2012.
- [11] 橋本直己, 洪進. 任意形状面への高速かつ高精細なリアルタイムレンダリング手法. 電子情報通信学会論文誌, Vol. 94, No. 1, pp. 169–177, 2011.
- [12] A.Grundhofer and O.Bimber. Real-time adaptive radiometric compensation. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 14, No. 1, pp. 97–108, 2008.
- [13] 齋藤大輔, 齋藤恵一, 納富一宏, 齋藤正男. 標準リンク色と背景色の視認性評価: コントラストおよび色度による検討. バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 8, No. 1, pp. 107–113, 2006.
- [14] 間宮勝. ホログラムと面照光 led を用いた高視認性表示技術の開発. 計測自動制御学会 ヒューマン インタフェース シンポジウム論文集, 1996.
- [15] 木村文香, 目加田慶人, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, 宮原孝行, 玉津幸政. 車載カメラからの交通信号機の視認性計測. 第 14 回画像センシングシンポジウム講演論文集, IN-2-06, 2008.
- [16] 鎧沢勇, 井上政之. 文字画像における配色と見易さの関係. テレビジョン学会技術報告, Vol. 7, No. 19, pp. 25–30, 1983.
- [17] 中塚毅. 色彩計測と技術動向. *DIT Technical Review*, No. 5, pp. 9–16, 1999.

- [18] 池田宏明. カラーテレビジョン方式の測色パラメータについて. テレビジョン学会誌, Vol. 43, No. 6, pp. 620–622, 1989.
- [19] 小寺宏暉. カラースキャナの分光特性の間接的推定と測色的評価. テレビジョン学会誌, Vol. 41, No. 3, pp. 264–269, 1987.
- [20] 承啓李, 昌論張山, 充隆亀山. 高安全自動車道路抽出のための動的再構成可能アーキテクチャ. 情報処理学会研究報告. 計算機アーキテクチャ研究会報告, Vol. 2006, No. 62, pp. 63–67, 2006.
- [21] S.Izadi, D.Kim, O.Hilliges, D.Molyneaux, R.Newcombe, P.Kohli, J.Shotton, S.Hodges, D.Freeman, A.Davison, and A.Fitzgibbon. Kinectfusion: Real-time 3d reconstruction and interaction using a moving depth camera. *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, No. UIST '11, pp. 559–568, 2011.
- [22] C.Albitar, P.Graebbling, and C.Doignon. Robust structured light coding for 3d reconstruction. *Computer Vision, 2007. ICCV 2007. IEEE 11th International Conference on*, pp. 1–6, 2007.
- [23] L.Schwarz, A.Mkhitaryan, D.Mateus, and N.Navab. Estimating human 3d pose from time-of-flight images based on geodesic distances and optical flow. *Automatic Face Gesture Recognition and Workshops, 2011 IEEE International Conference on*, pp. 700–706, 2011.
- [24] J.Orlosky, K.Kiyokawa, and H.Takemura. Dynamic text management for see-through wearable and heads-up display systems. *Proceedings of the 2013 International Conference on Intelligent User Interfaces*, No. IUI '13, pp. 363–370, 2013.
- [25] O.Goksel, H.Eskandari, and S.E.Salcudean. Mesh adaptation for improving elasticity reconstruction using the fem inverse problem. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, Vol. 32, No. 2, pp. 408–418, 2013.

- [26] 小山亮, 船富卓哉, 飯山将晃, 角所考, 美濃導彦. チンダル現象を利用した物体表面の三次元位置及び法線推定. 第12回画像の理解・認識シンポジウム (MIRU2009) 論文集, pp. 1156–1163, 2009.
- [27] 松井利一. マルチチャネル構造視覚モデルによる視知覚特性の理論的再現—コントラスト感度の画面サイズ依存特性—. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 79, No. 5, pp. 889–898, 1996.
- [28] 見市伸裕, 和田俊和, 松山隆司. Calibration of projector-camera system. 2002.
- [29] 島村潤, 荒川賢一, 新井啓之, 安野貴之. プロジェクタ・カメラシステムにおける射影変換行列と直線パターン検出に基づく複数平面の検出. *The Journal of The Institute of Image Information and Television Engineers*, Vol. 61, No. 1, pp. 76–84, 2006.
- [30] 見市伸裕, 和田俊和, 松山隆司. プロジェクタ・カメラシステムのキャリブレーションに関する研究. 情報処理学会研究報告. CVIM, Vol. 2002, No. 34, pp. 1–8, 2002.

業績

- 国内発表

1. 團原佑壮, 浦西友樹, 山本豪志朗, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 大城理, “屋外プロジェクションのための視認性に基づく投影面選択”, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, pp.121-124, 2014
2. 團原佑壮, 浦西友樹, 吉元俊輔, 井村誠孝, 大城理, “シーンの色と形状に基づく高視認面へのプロジェクション”, システム制御情報学会, 115-6, 2014
3. 團原佑壮, 浦西友樹, 吉元俊輔, 井村誠孝, 大城理, “視認性の高い投影のための色と形状に基づくシーンの評価”, 電子情報通信学会, pp.79-84, 2015

- その他

1. 團原佑壮, “高視認面への選択的プロジェクション”, 生体工学領域交流会, 2014, 7月