

# 独立に動作する複数端末の連携による マルチプロジェクターシステムの提案

三田 昌輝<sup>1,a)</sup> 阿部 亨<sup>1,2,b)</sup> 菅沼 拓夫<sup>1,2,c)</sup>

**概要:**近年、プロジェクター端末の小型化が進み、任意の場所での情報投影が可能となったため、固定式のプロジェクターのない作業現場など、様々な環境で即席の情報共有が容易となってきた。一方、複数台の小型プロジェクター端末を組み合わせることで、投影時の解像度や範囲に対する制限の解消を図るシステムが提案されているが、これらのシステムでは、プロジェクター端末の台数や位置が事前に固定されており、即席の環境での利用や状況の変化への対応などの考慮が不十分である。本稿では、プロジェクター端末の各々が独立に動作できるようにし、それら複数のプロジェクター端末を動的に連携させることで、複数コンテンツの投影を共同で行うシステムを提案する。提案システムでは、各プロジェクター端末が各コンテンツを投影した際の品質を推定し、その結果を共有することで、各コンテンツを最も高品質で投影可能なプロジェクター端末が投影を担当する。これにより、プロジェクター端末が移動したり、台数が増えるような場合でも、全体としての投影品質が最大となるように投影を継続することが可能となっている。

## 1. はじめに

プロジェクターはスクリーン等の現実の物体に対し画像を投影することで、ユーザへ情報を提示するデバイスである。このことから、現在、打ち合わせのような複数人での情報共有や、機械の操作指示といった作業支援の分野等での活用が進められている [1], [2]。

このような用途において、投影の質を向上させることを目的として、プロジェクターとカメラを組み合わせた、プロジェクターカメラシステムを利用することで、投影対象の位置や形状・材質に適応するよう投影状態を変更する手法が提案されている [3]。また、近年登場した携帯性の高いプロジェクターを複数利用することで、大型端末による投影に劣らない、高い解像度や広い投影範囲を目指すといった研究が行われている [4]。しかし、これらの複数プロジェクターを利用する既存手法では、各端末の台数や位置を固定としていたり、高い処理能力をもつサーバを必要とするなど、即席の環境や変化する環境での利用に対する考慮が不十分である。

本提案では、独立に動作する、プロジェクター・カメラ・

処理用の小型 PC からなる複数のプロジェクターカメラ端末 (Projector-Camera Terminal: PCT) を効率的に連携させるシステムの提案を行う。これにより、複数人が端末 (と投影したいコンテンツ) を持ち寄り、即席の環境での情報共有を行うといったシナリオを効果的に実現できる。

各端末では連携用のエージェントを動作させ、それらが通信を行うことによりコンテンツの投影を分担して行う。各エージェントは、各コンテンツを自身が投影した際の品質を推定し、その結果を共有する。最も高い品質で投影可能な端末が代表して投影を行うことで、投影の高解像度化と、品質のみをやり取りすることで通信帯域の削減を図る。

本発表では、実装した PCT による共同投影のデモンストラーションを行うことで、実験環境と異なる状況でもシステムが利用可能であることを示す。

## 2. 関連研究

プロジェクターカメラシステムを利用することで投影品質の向上を目指す研究が行われている。

例えば、投影結果を撮影したカメラ画像から投影像のボケを推定し、プロジェクターへの入力の高周波成分を協調することで、投影のボケを減らす手法 [5] や、投影対象の凹凸や模様と投影コンテンツの特徴から、可視性が高くなるような投影箇所を適切に設定する手法 [3] が提案されている。これらの研究は 1 台のプロジェクターによる投影品質の向上を目指しており、1 台での投影可能範囲を超える

<sup>1</sup> 東北大学大学院 情報科学研究科  
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

<sup>2</sup> 東北大学 サイバーサイエンスセンター  
Cyberscience Center, Tohoku University

a) mita@ci.cc.tohoku.ac.jp

b) beto@tohoku.ac.jp

c) suganuma@tohoku.ac.jp

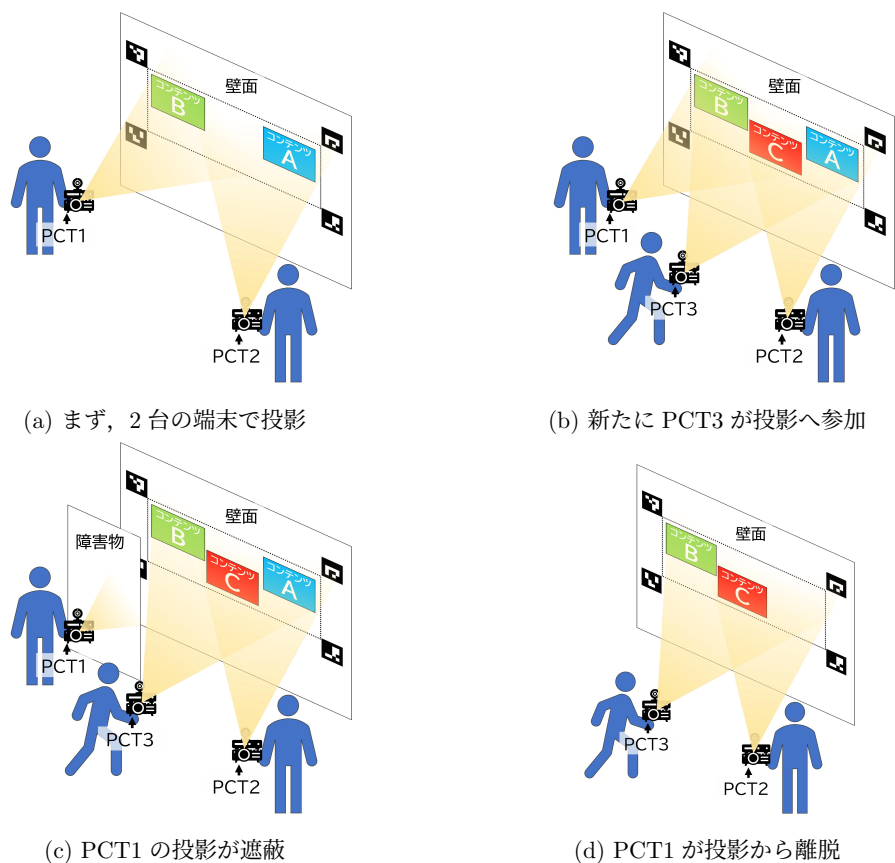


図 1: 提案システムの利用シナリオの例

ような大きいコンテンツ投影や投影結果の遮蔽を回避することは困難である。

これらの問題を回避するため、複数台のプロジェクターを連携させる手法が提案されている。例えば、マルチプロジェクターシステムにおいて、複数のプロジェクターの位置関係を正確に校正する手法 [4] や、複数併置されたプロジェクターが同一の領域に対して投影を行う状況で、各端末の投影光を調整することで投影結果の遮蔽を避ける手法 [6] が提案されている。

また、複数台のプロジェクターを利用したシステムの実装例として、投影面の前にいるユーザが行うハンドジェスチャを端末間で共有し、投影内容の変更を行う手法 [7] や、2 台のプロジェクター搭載スマートフォンによる投影の連携として、投影の重複部分を検出し、カーソルを共有する手法 [8] が提案されている。

これまで述べた、複数のプロジェクターを連携させる従来手法は、各プロジェクターと投影面との位置関係が固定で、既知であることや、コンテンツ情報を事前に共有していることを前提としているものが多い。この制約は、小型プロジェクターの利点である携帯性の高さを特に生かせる、端末の数や位置が変化するような即席の環境での利用を困難としている。Aditi ら [9] は、複数のプロジェクターを連携させる際の課題として「プロジェクター間の投影

位置・色調の調整」、「各プロジェクターでの投影環境の把握」、「プロジェクター間でのコンテンツの同期」の 3 つを挙げている。

本稿では、これらの課題を解決するシステムとして、個々のプロジェクターカメラシステムをエージェント化し、自律的な協調により情報投影を行うシステムを提案する。エージェントの連携によりコンテンツの同期や投影の分担を柔軟に行い、エージェントの自律性により投影環境の変化への動的な対応を図る。

### 3. 提案

本稿で提案するシステムは、プロジェクター・カメラ・小型 PC で構成されるプロジェクターカメラ端末 (PCT) の相互連携によって、複数のプロジェクターが共同で、一つの投影対象面へ複数のコンテンツを投影することを目標とする。その際、PCT で稼働するエージェント間の通信により、各コンテンツを最も高い品質で投影が可能な端末をリアルタイムに決定し、投影を行う。

この連携によって、例えば図 1 に示すような利用シナリオが実現できる。

- (1) PCT1 がコンテンツ A を、PCT2 がコンテンツ B を持って投影へ参加し、全体での投影品質が高くなるよう、PCT1 がコンテンツ B を PCT2 がコンテンツ A

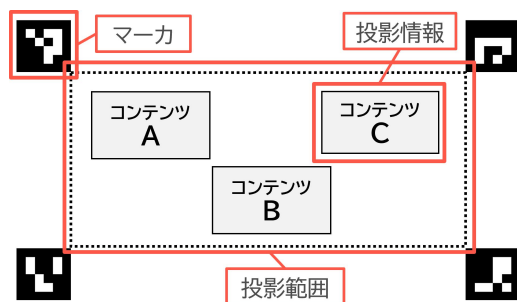


図 2: 投影面の例

を投影

- (2) そこに、PCT3 がコンテンツ C を持って投影へ参加
- (3) その後、PCT1 の前方に障害物が現れるが、PCT2 がコンテンツ A を、PCT3 がコンテンツ B,C の投影を担当することで3つのコンテンツの投影は継続
- (4) PCT1 がコンテンツ A と共に離脱し、PCT1 による投影、及びコンテンツ A の投影を終了

このように、本提案システムの利用により、投影へ参加する端末の数や位置、投影するコンテンツ内容や投影位置・サイズといった複数の要素が変化する状況への対応が可能となる。以下に、この機能を実現するためのシステム構成について述べる。

### 3.1 システム構成

提案システムは、モバイルプロジェクター・カメラ・小型 PC で構成される端末 (PCT) の連携によって実現される。PCT は投影に参加するユーザが各々携帯し、持ち寄ることを想定しているため、運搬が容易なサイズである必要がある。

投影するコンテンツは PCT を保持するユーザが端末へ保存する。各コンテンツは、その概要 (投影面上での投影範囲に対する相対的な目標投影箇所とサイズ) と詳細 (投影する画像) で構成される。

投影面は平面を想定し、図 2 のようにそれぞれ ID の異なる 2 枚以上のマーカを貼付し、このマーカで囲われた範囲を投影範囲とする。PCT で稼働するエージェントはカメラ画像からマーカを認識することで、投影範囲を認識し、自身と投影対象面との相対位置関係を算出する。したがって、マーカをより多く投影面に貼付することで、位置推定の精度が向上する。

エージェントは自身の端末に保存されたコンテンツの概要を他のエージェントへ通知する。各エージェントはその情報と算出された自身の位置関係から、各コンテンツを目標箇所へ投影した場合の品質を推定し、その結果を各コンテンツを所有するエージェントへ送信する。

コンテンツを所有するエージェントは、各コンテンツを最も高い品質で投影可能なエージェントを選択し、投影を依頼する。

### 3.2 投影品質の推定

次に、各 PCT がコンテンツを投影した際の品質を推定する方法について述べる。この品質は、PCT と投影面との位置関係とコンテンツの目標投影箇所やサイズ等の情報から算出される、3つの要件によって計算される。

**分解能** プロジェクターがコンテンツを投影する際に必要とする画素数である。これは投影面との位置関係やコンテンツの目標投影位置やサイズの他、プロジェクターの解像度により算出される。例えば、図 3(a) に示す例では、PCT1 に比べ PCT2 の方が目標投影箇所から近い位置で投影を行えるため、PCT2 の方が分解能は高くなる。

**投影可能率** コンテンツの目標投影箇所のうち、プロジェクターの投影範囲に含まれる部分の割合である。これは投影面との位置関係やコンテンツの目標投影位置やサイズ、プロジェクターの特性により算出される。図 3(b) に示す例では、PCT1 は目標箇所の一部しか投影できないため、PCT2 の方が投影可能率は高くなる。

**非遮蔽率** コンテンツを投影した際、遮蔽されずに正しく表示できる面積の割合である。これはカメラで撮影された実際の投影状態と、予測される投影状態と比較することにより算出される。図 3(c) に示す例では、PCT1 の投影が障害物により一部遮蔽され、PCT2 の投影には遮蔽が生じていないため、PCT2 の方が非遮蔽率は高くなる。

分解能を  $a$ 、投影可能率を  $b$ 、非遮蔽率を  $c$  としたとき、 $0 \leq b, c \leq 1$  であり、ある PCT があるコンテンツを投影した際の品質  $Q$  は次の式 (1) によって表される。

$$Q = a \times b \times c \quad (1)$$

### 3.3 エージェントの処理

次に、各エージェントが行う処理について詳細を述べる。エージェントの動作は3つの処理フェーズに分類できる。

**参加フェーズ** 投影へ参加したエージェントは、カメラの画像から投影対象面を認識し検出できたマーカの ID を共有することで、既に同一平面へ投影を行っている他のエージェントを探索する。他のエージェントを発見した場合は、所有するコンテンツの共有を行い、品質の推定を開始する。

**交渉-投影フェーズ** 次の3つのタスクを並列で実行することで、コンテンツの投影を実行する。

- (1) 投影に参加しているエージェントが所有するコンテンツの投影品質を推定し、その結果を他のエージェントと共有
- (2) 所有するコンテンツを最も高い品質で投影可能な PCT (投影担当 PCT) を決定し、投影を依頼
- (3) 依頼されたコンテンツを投影

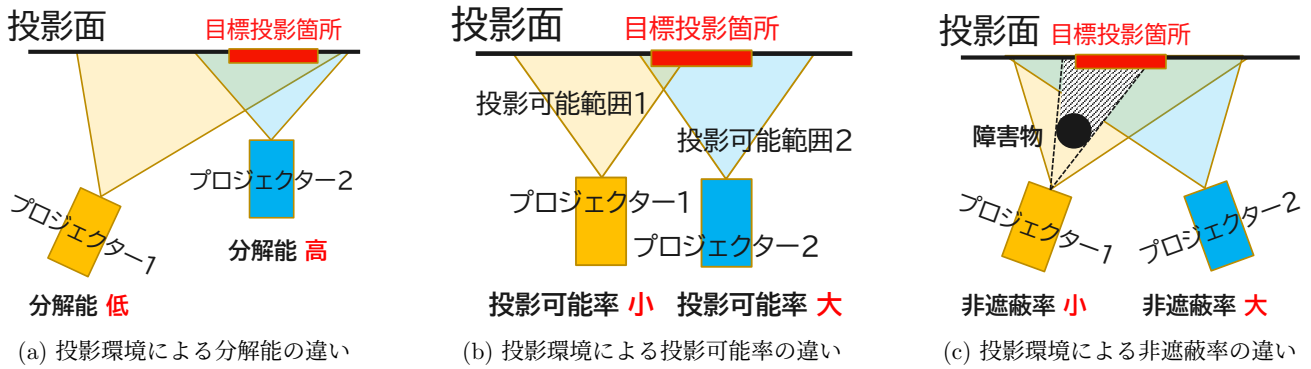


図 3: 投影品質を推定する際に考慮する要件

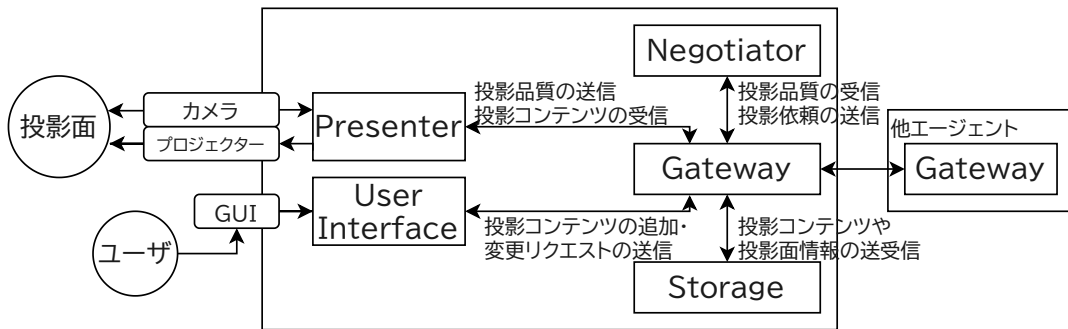


図 4: エージェントの構成

コンテンツの追加・削除や、既存のコンテンツの投影位置やサイズ変更のリクエストがあった場合は、随時エージェント間で共有する。また随時、他エージェントの参加・離脱のメッセージを受け付ける、

**離脱フェーズ** ユーザからの投影終了リクエストを受け、投影から離脱する。離脱の通知を受けた他エージェントはそのエージェントが所有する各コンテンツの品質推定を終了し、コンテンツ情報を削除する。

#### 4. エージェントの実装

次に、前節で述べたエージェントの処理を実現するため、設計したシステムの実装について述べる。

エージェントは図4に示すように、独立して動作する5つのモジュール (Gateway, Storage, Presenter, Negotiator, User Interface) で構成される。それぞれの処理について順に説明する。

##### 4.1 Gateway での処理

Gateway は、各モジュールや他エージェントとの通信を中継し、各モジュールが送信するメッセージを適切な相手へ伝送する。エージェント間通信は、この Gateway 同士が通信を行うことにより実現される。

これにより、各モジュールは、自身が処理を行い他モジュールへ通知する様々なメッセージについて、送信先を意識することなく、メッセージの通知が行える。

また、新たに投影へ参加するエージェントとの通信の確

立も行う。現在自身が投影している投影面のマーカ ID をブロードキャストすることで、他エージェントが自身と同一の投影面へ投影を試みていることを検出し、共同投影を開始する。

##### 4.2 Storage での処理

Storage では、コンテンツや投影面上のマーカ情報を保持し、他モジュールからのリクエストに応答する。

また、定期的に他エージェントが所有するコンテンツの詳細についてリクエストを行い、他モジュールからのコンテンツ要求等への素早い応答を実現する。

##### 4.3 Presenter での処理

Presenter は、カメラとプロジェクターに接続し、品質推定や投影といった投影面とのインタラクションを行う。

参加フェーズでは、投影面に貼付されたマーカを認識し、投影面上でのマーカ間の位置関係を算出し、Gateway へ送信する。他エージェントからより広い範囲の位置関係を取得した場合は、その値を利用する。交渉-投影フェーズでは、まず、撮影された画像から、現在の投影面との位置関係を推定する。その結果から、3.2 節で述べた方法によりコンテンツ投影の品質推定を行い、Gateway へ結果を送信する。また、Gateway から投影の依頼を受信すると、そのコンテンツの詳細 (画像) を Storage へリクエストし、目標投影箇所へ投影できるよう適切に変形したうえで、プロジェクターにより投影を行う。

表 1: PCT の構成

PC	Raspberry Pi 4 model B (RAM 2GB)
プロジェクター	CWEUG JP1-D5W-2 (1280 × 800px, 30fps)
カメラ	ELP-USBFHD01M-MFV (1920 × 1080px, 30fps)

表 2: エージェントソフトウェアの構成

OS	Raspberry Pi OS
開発言語	C# 9.0
フレームワーク	.NET 5.0
ライブラリ	OpenCV 4.3.1
通信方式	gRPC(モジュール間通信) UDP (他エージェントの探索)



図 5: 製作した PCT の外観

#### 4.4 Negotiator での処理

Negotiator では、自身が所持するコンテンツの投影品質を受信し、各コンテンツについて最も高い品質で投影が可能なエージェントを選択し、投影を依頼する。受信した品質には一定の有効時間を持たせ、一定時間新しい品質の通知がなかったエージェントは投影から離脱したものとみなし、投影の依頼を行う対象から除外する。

#### 4.5 User Interface での処理

User Interface では、ユーザからのコンテンツ内容や位置、サイズ変更のリクエストを受け付ける。

また、ユーザに対して他のエージェントが所有し、投影を望んでいるコンテンツの位置やサイズを提示することで、現在の投影状況を示す。

### 5. システムの動作例

前章で述べたエージェントを実装し、システムを実現するデバイスを作成した。

PCT の構成を表 1 に、エージェントソフトウェアの構成を表 2 に示す。またデバイスの外観は図 5 であり、サイズが幅 23.5cm、奥行 10.5cm、高さが 10cm と携行可能なサイズである。

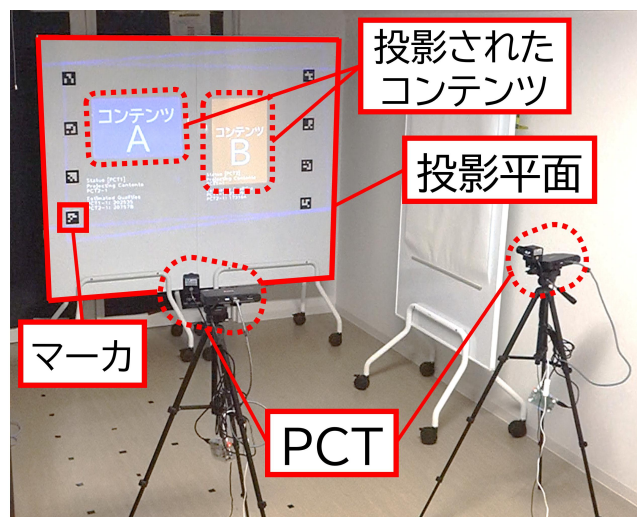


図 6: 実験環境

投影面に貼付するマーカは Romero らの手法 [10] を用い作成し、またプロジェクターとカメラの構成を行うためのキャリブレーションは Huang ら [11] の手法を用いて行った。

#### 5.1 品質による投影端末切り替え

3.2 節で述べた投影品質による端末の切り替えが可能であることを検証するための実験を行った。

PCT を 2 台用意し、投影への離脱や参加、遮蔽の発生、端末の移動といった状況でも、エージェントの協調によりコンテンツの投影が行われるかを確認した。

検証は図 6 のような環境で行った。ホワイトボードにマーカを貼付し、投影面とした。各マーカのサイズは 7.2×7.2cm であり、マーカで囲まれた投影範囲は 142×77.5cm である。2 台の投影端末は、投影面から 200cm の距離に設置し、初期状態では 2 台の間隔を 140cm とした。

まず、実験の初期状態について説明し、以降、端末の離脱・参加、遮蔽の発生、端末の移動を行った際の動作結果について順に説明する。

##### ● 初期状態

実験の初期状態を図 7(a) に示す。図中、右側の端末を PCT1、左側の端末を PCT2 とする。PCT1 は、コンテンツ A と共に、PCT2 は、コンテンツ B と共に投影に参加している。図 8 が実際に投影に用いたコンテンツ A, B の画像である。図 7(a) の状況では、各端末が自身の所有するコンテンツとは異なるもの (PCT1 がコンテンツ B、PCT2 がコンテンツ A) を投影している。これは、各端末と目標投影箇所との位置関係から、各コンテンツの投影品質 (分解能) が最も高くなるように、各々のコンテンツをより目標投影箇所に対し近い端末が投影しているからである。

##### ● PCT の離脱・参加

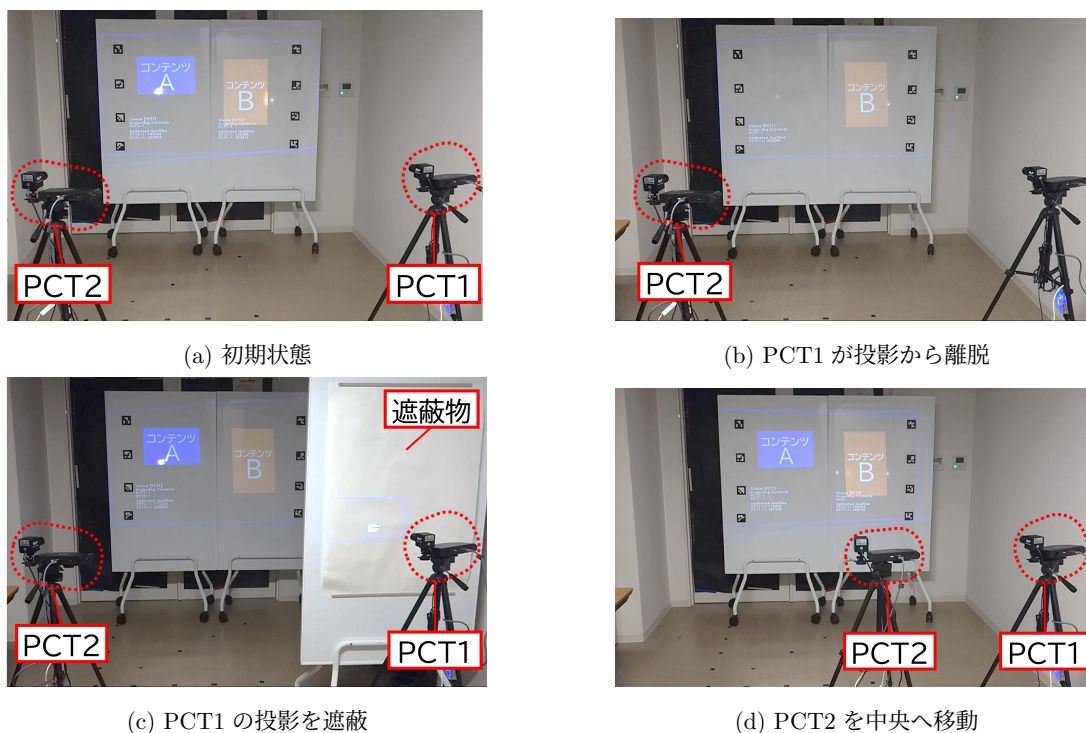


図 7: 投影端末切り替えの検証結果

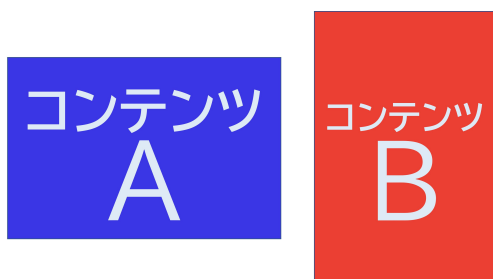


図 8: 投影したコンテンツ

まず、初期状態から、PCT1 をコンテンツ A と共に離脱させると、図 7(b) のように PCT2 からコンテンツ B のみが投影された。次に、再び PCT1 をコンテンツ A と共に投影へ参加させると、初期の投影状態へと移行した。このことから、試作システムは、投影端末の離脱・参加に対応できることが確認できた。

● 遮蔽の発生

次に、初期状態から、図 7(c) のように、投影面の前に遮蔽物を置くことで PCT1 の投影を遮蔽した。この結果、コンテンツ B を PCT1 から投影した場合の品質（非遮蔽率）が低下し、PCT2 による投影品質よりも低くなったため、投影の担当が変更され、PCT2 からコンテンツ A,B の両方が投影された。このことから、試作システムは、一部の PCT に遮蔽が発生しても、投影の担当を変更することでその状況へ対応することが確認できた。

● 投影端末の移動

さらに、初期状態から、図 7(d) に示すように、PCT2 を移動し、目標投影箇所により近い位置から投影を行えるようにした。この結果、コンテンツ B を PCT2 から投影した場合の品質（分解能）が向上し、PCT1 による投影品質よりも高くなったため、投影の担当が変更され、PCT2 からコンテンツ A,B の両方が投影された。このことから、試作システムは、PCT が移動しても、投影の担当を変更することでその状況へ対応することが確認できた。

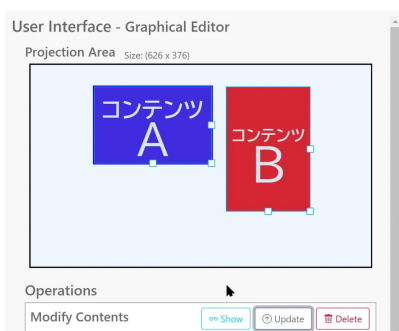
この結果から、各端末による品質推定とその共有によってコンテンツを投影する端末を適切に選択できることが確認された。

5.2 使いやすさ向上のための検討

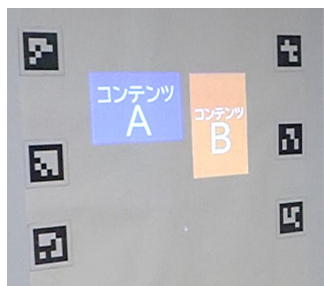
3章で述べたシナリオのような、システムの活用場面を想定すると、PCT の実装はユーザの使いやすさを考慮する必要がある。そのため、現在 User Interface モジュールでの表示や操作方法の検討を行っている。

User Interface(UI) は Web サーバとして稼働し、図 9(a) のようなエディタを Web ページとしてユーザに提示する。水色の矩形が投影範囲であり、その大きさや縦横比率は Presenter が投影面のマーカを検出することで算出されたものである。ユーザが投影を望むコンテンツをアップロードすると投影範囲にサムネイルが表示され、その箇所に投影が行われる。その際、投影位置やサイズの変更も可能である。

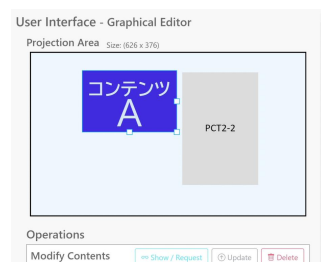
これらの機能により、ユーザが図 9(a) のようにコンテン



(a) 投影中の User Interface での描画



(b) 投影結果



(c) 他端末が所有するコンテンツの UI 表示

図 9: システムの動作

位置を設定した場合、図 9(b) のように壁面のマークで囲われた領域内にコンテンツの投影が行われる。

また、他エージェントが投影に参加しており、コンテンツの投影を行おうとした場合、他エージェントが所有するコンテンツは図 9(c) のように灰色の矩形で表示され、閲覧のみが可能となる。

このように、UI 上でユーザがコンテンツの目標投影箇所を直感的に指定できるようにすることで、使いやすさの向上を図る。今後はこの検討をさらに進め、またモジュールを全て実装した PCT を用いて処理速度の評価やユーザによる使いやすさの評価を行う実験を進めていく。

## 6. おわりに

本稿では複数のプロジェクターカメラの高度な連携を目指し、独立に動作するプロジェクターカメラ端末の連携による情報投影システムの提案を行った。各端末で稼働するエージェントが相互に連携し、コンテンツを投影する適切な端末をリアルタイムに決定することで、投影中の端末台数や位置の変化、投影コンテンツの変更に対し柔軟な投影を可能とする。

またシステムの動作検証から、提案手法を用いることで複数の PCT が協調することで、投影の遮蔽や端末の移動といった環境変化へ対応可能であることを示した。

今後は、実装したシステムの動作検証を行い、エージェントの協調方法やプロトコルについて、より深い検討や改善を行う。また、システムの性能評価として、速度測定による処理性能の測定や、情報共有での利便性の検証として利用者による評価を計画している。

## 参考文献

- [1] Büttner, S. et al.: The design space of augmented and virtual reality applications for assistive environments in manufacturing: A visual approach, *Proc. 10th Int. Conf. Pervasive Technol. Relat. Assistive Environ.*, pp. 433–440 (2017).
- [2] Uva, A. E. et al.: Evaluating the effectiveness of spatial augmented reality in smart manufacturing: A solution

- for manual working stations, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 94, pp. 509–521 (2018).
- [3] Funk, M. et al.: Automatic projection positioning based on surface suitability, *Proc. 5th ACM Int. Symp. Pervasive Disp.*, pp. 75–79 (2016).
- [4] Bajestani, S. A. et al.: Scalable and view-independent calibration of multi-projector display for arbitrary uneven surfaces, *Mach. Vision Appl.*, Vol. 30, pp. 1191–1207 (2019).
- [5] Brown, M., Song, P. and Cham, T.-J.: Image Pre-Conditioning for Out-of-Focus Projector Blur, *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, Vol. 2, pp. 1956–1963 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2006.145 (2006).
- [6] Iwai, D. et al.: Shadow removal of projected imagery by occluder shape measurement in a multiple overlapping projection system, *Virtual Reality*, Vol. 18, No. 4, pp. 245–254 (2014).
- [7] Roman, P. et al.: A scalable distributed paradigm for multi-user interaction with tiled rear projection display walls, *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics*, Vol. 16, No. 6, pp. 1623–1632 (2010).
- [8] Chiou, Y. et al.: Interactive projection system for dual mobile projector devices, *2015 8th International Conference on Ubi-Media Computing (UMEDIA)*, pp. 248–253 (online), DOI: 10.1109/UMEDIA.2015.7297463 (2015).
- [9] Majumder, A.: Ubiquitous displays: Spatially augmenting reality via multi-projector agents, *Proc. Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Inf.*, pp. 831–840 (2017).
- [10] Romero-Ramirez, F., Muñoz-Salinas, R. and Medina-Carnicer, R.: Speeded Up Detection of Squared Fiducial Markers, *Image and Vision Computing*, Vol. 76 (online), DOI: 10.1016/j.imavis.2018.05.004 (2018).
- [11] Huang, B. et al.: A Fast and Flexible Projector-Camera Calibration System, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, (online), DOI: 10.1109/TASE.2020.2994223 (2020).