

多様な環境で利用可能なマルチプロジェクター連携システムの提案と性能評価

三田 昌輝¹ 阿部 亨^{1,2} 菅沼 拓夫^{1,2}

概要: 近年, 小型プロジェクターの普及により, 様々な環境で情報投影が可能となっており, 特に投影範囲の拡大や投影の遮蔽を回避するために複数のプロジェクターを併用する研究が進められている. 本稿では, 複数のプロジェクターを用いた情報投影の効果的な実現のため, 各プロジェクターをエージェントとして構成し, 高度な連携を行う新たなシステムを提案する. また, 試作システムによる予備的な検証実験を行い, 提案の有効性を確認した.

A proposal of a multiprojector coordination system available for various environments

Masaki MITA¹ Toru ABE^{1,2} Takuo SUGANUMA^{1,2}

1. はじめに

プロジェクターは, 多数のユーザへ同一の情報を同時に提示可能な装置である. 近年, 携帯が可能な小型プロジェクターの普及により, 設置場所を気にすることなく, プロジェクターでの情報投影を様々な環境で自由に行えるようになってきた [1], [2]. しかし, プロジェクターの利用を想定しスクリーン等を事前に準備した専用の環境ではなく, 例えば, 手近の壁面などをスクリーン代りに利用し, プロジェクターの台数や位置が変化するような即席の環境では, 投影範囲の確保や投影品質の維持等が困難な場合があった.

本稿では, これらの問題に対処するため, 複数の小型プロジェクターを効果的に連携させ情報投影を行うシステムを提案する. システムは, 複数のユーザが各々携帯する投影端末で構成され, 各投影端末は, プロジェクター, カメラ, PC で構成される. 各投影端末の PC 上ではエージェントが稼働しており, それらの自律的な協調により複数の端末のプロジェクターでコンテンツの投影を分担する. その際, 各端末は, 自身のカメラで撮影した映像に基づき, 投影面との位置関係の認識, 及び自身のプロジェクターでコンテンツを投影した場合の品質推定を行い, エージェント

トを介して他の端末とその結果を共有する. 参加している端末の中で, 各コンテンツを最も高い品質で投影可能な端末が投影を担当することで, 投影環境の変化へ動的に対応しながら, 全体としての投影品質の最大化を図る.

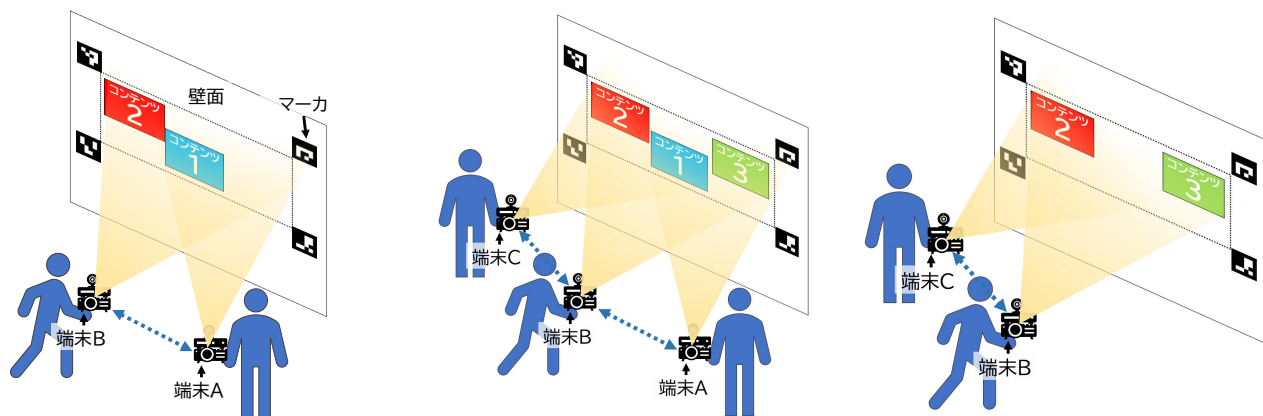
2. 関連研究

プロジェクターによる情報投影に関しては, 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システムを用い, 投影されたコンテンツの見易さを改善する研究が行われている. 例えば, 携帯型プロジェクターを体に装着する際にコンテンツを見易く投影するための装着位置の提案 [3] や, 凹凸や模様といった投影面の状態とコンテンツの特徴から投影箇所を適切に選択する手法 [4] が提案されている. これらの研究では, 1 台のプロジェクターでコンテンツを投影する場合を対象としており, 1 台で投影可能な範囲を超えるような大規模な投影や, 投影面での分解能の向上, 遮蔽の回避等に対しては十分な効果を得られない.

これらの問題を解決するために, 複数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, 複数のプロジェクターを連携させるために, 各プロジェクターと投影箇所の位置関係を正確に校正する手法 [5] や, 各プロジェクターの特性の違いを補正し色調をそろえる手法 [6], [7] などが提案されている. さらに, 複数のプロジェクターが同一

¹ 東北大学大学院情報科学研究科

² 東北大学サイバーサイエンスセンター



(a) まず、2 台の端末でコンテンツを投影 (b) さらに、1 台の端末が投影に参加 (c) その後、1 台の端末が投影から離脱

図 1: 提案システムの利用例

の領域に対して投影を行う状況を考え、一部のプロジェクターの投影が人物などによって遮蔽される場合でも、他のプロジェクターの投影光を調節することで投影面上に影が生じないようにする手法も提案されている [8], [9]. また、遮蔽物の移動へ対応するために、プロジェクター間で各種情報を効果的に共有する手法も提案されている [10].

Aditi ら [11] 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. 複数のプロジェクターを連携させる従来手法では、各プロジェクターと投影面との位置関係が固定されており既知であること、コンテンツが事前に共有されていることを前提としているものが多い. そのため、小型プロジェクターの利点が特に生かせるプロジェクターの台数や位置が変化するような即席の環境での利用は難しい.

複数のプロジェクターを用いた情報投影を即席の環境でも効果的に実現するためには、各プロジェクターの状態を考慮した上で、投影コンテンツの共有などプロジェクター同士の連携を効率的に行う新たなシステムが必要となる.

3. 提案

本稿で提案するシステムでは、複数のユーザが投影端末 (プロジェクター、カメラ、PC で構成) と投影コンテンツを各々持ち寄り、壁面などの同一の平面に対し情報投影を行うことを目標とする.

即席の環境で情報投影を行う状況としては、例えば、図 1 に示すような以下の利用シナリオが考えられる.

- (a) まず、端末 A, B がコンテンツ 1, 2 を各々投影
- (b) さらに、端末 C がコンテンツ 3 と共に投影へ参加
(投影品質が高くなるように、各端末と投影箇所の位置関係から A が 3 を、B が 1 を、C が 2 を投影)
- (c) その後、端末 A がコンテンツ 1 と共に投影から離脱

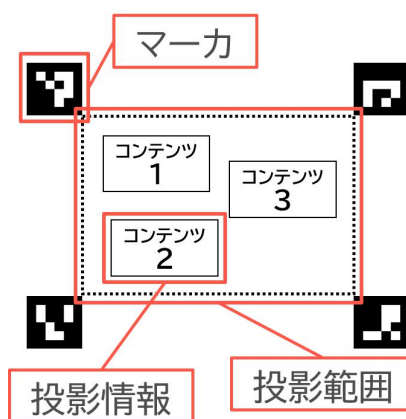


図 2: 投影面の例

(残った B が 3 を、C が 2 を投影)

このように、ユーザが携帯する投影端末の台数や、コンテンツの件数、位置、サイズ、内容などが投影中に変化する状況へ対応するためには、プロジェクター間の柔軟な連携が必要となり、提案システムでは、その効果的実現を目指す.

3.1 システム構成

提案システムは、複数のユーザが各々携帯する投影端末で構成される. 各端末は、プロジェクター、及びカメラ、PC からなる. 各端末の PC では、エージェントが稼働しており、他端末のエージェントとの協調により、端末が相互に連携する. また、各ユーザが携帯する端末の PC には、そのユーザが投影を望むコンテンツが格納されており、各投影コンテンツは、コンテンツ内容 (画像) とコンテンツ情報 (投影範囲に対する相対的な目標投影箇所、サイズなどの投影情報) で構成される.

投影面は、図 2 に示すように、それぞれ ID の異なる 2 枚以上のマーカを貼付した平面を想定し、マーカで囲われる領域の内側を投影範囲とする. 各投影端末のエージェントは、カメラ映像からマーカを認識し、平面との位置関係、

及び投影範囲を決定する。

提案システムでは、エージェントの協調により投影コンテンツごとに投影を行う端末を決定する。ユーザがコンテンツの追加や変更を行った際は、まず、エージェント間でその情報を共有する。次に、各コンテンツを目標箇所へ投影した場合の品質を端末ごとに推定し、その結果をエージェント間で共有する。共有された結果から、各コンテンツを目標箇所へ最も高い品質で投影可能なプロジェクターが投影を担当する。

3.2 投影品質の推定

プロジェクターでコンテンツを投影した場合の品質を推定する際には、次の3つの要件を考慮する。

分解能 投影面の目標箇所へ目標のサイズでコンテンツを投影する際に必要なプロジェクターの画素数を分解能とする。分解能が高ければ、コンテンツを精細に投影でき投影品質は高くなる。分解能は、プロジェクターの解像度だけでなく、目標箇所との位置関係でも変化する。図3(a)に示す例の場合、プロジェクター1は、目標箇所に対しコンテンツを遠くから斜めに投影しているが、2は、近くから垂直に投影しているため、1よりも2の方が分解能は高くなる。

投影可能率 プロジェクターから目標箇所へ投影可能なコンテンツの部分面積の割合を投影可能率とする。この値は、プロジェクターの特性、コンテンツのサイズ、プロジェクターと目標箇所との位置関係で決定される。図3(b)に示す例の場合、プロジェクター1は、目標箇所の一部しか投影できず、2は、全体を投影できるため、1よりも2の方が投影可能率は高くなる。

非遮蔽率 コンテンツを投影面へ投影した際、障害物で遮蔽されない部分面積の割合を非遮蔽率とする。この値は、カメラで撮影した実際の投影状態と予測した遮蔽が無い状態を比較することで決定される。図3(c)に示す例の場合、プロジェクター1では、投影したコンテンツの一部が遮蔽され、2では、遮蔽が生じないため、1よりも2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 とすると ($0 \leq b, c \leq 1$)、あるプロジェクターで、あるコンテンツを投影をした場合の投影品質 Q は式(1)で表される。

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

3.3 エージェントの処理

エージェントの処理を図4に示す。

投影に参加する各投影端末のPCで稼働するエージェントは、まず、投影面に貼付されているマーカの映像をカメラで撮影し、認識したIDを周辺の他の端末のエージェントへ通知する。通知に対する応答の有無により、投影に既

に参加している他のエージェントの有無を判定する。他のエージェントが投影に既に参加している場合は、マーカ情報(詳細な位置関係)を他のエージェントから取得し、他が存在しない場合は自身で作成する。

その後、エージェント間でコンテンツの共有を非同期で行いながら、以下の処理を繰り返し実行する。

- 自身(端末)と投影面の位置関係の推定
- 共有した各コンテンツの投影品質の推定
- 自身が持ち寄ったコンテンツの投影担当の決定
- 自身が投影を担当するコンテンツの投影

これらの処理の繰り返しは、カメラでマーカを撮影できない状態が一定時間継続するか、ユーザからの指示があった場合に終了し、端末が投影から離脱したと見なす。

3.4 エージェントの構成

各投影端末のPC上で稼働するエージェントは、図5に示すように、モジュールPresenter, Negotiator, Exchanger, User Interfaceで構成され、Databaseを介して相互に情報を共有する。

各モジュールで行われる処理を以下に述べる。

3.4.1 Presenterでの処理

Presenterでは、投影面とのインタラクションを行う。具体的には、カメラによる投影面の映像の撮影、プロジェクターによる投影面へのコンテンツの投影等を制御する。

まず、撮影した映像から、自身(端末)と投影面との位置関係、現在の投影状態の推定を行なう。その結果に基づき、3.2で述べた方法により、各コンテンツを自身で投影した場合の品質を推定し自身のDatabaseに保存する。

次に、Database内の投影依頼を参照し、投影を担当するコンテンツについては、目標箇所に正しく投影できるよう、投影面との位置関係に基づきコンテンツ内容(画像)を変形した上で、自身のプロジェクターにより投影を行う。

これらの処理を反復することで、投影面との位置関係やコンテンツの変化への自律的な対応を図る。

3.4.2 Negotiatorでの処理

Negotiatorでは、各コンテンツの投影を担当する端末を決定するための処理を行う。

まず、自身がPresenterで推定しDatabaseに保存した各コンテンツに対する投影品質を他の端末と共有する。共有は、端末のNegotiator間の通信で実現され、共有された結果は各端末のDatabaseに保存される。Negotiatorでの投影品質の受信には制限時間を設け、タイムアウトが生じた場合は、相手の端末が投影から離脱したと見なす。

自身が持ち寄ったコンテンツについては、Databaseを参照し、自身および他の端末が推定した投影品質の順位付けを行う。もし、そのコンテンツを最高品質で投影可能な端末が自身ならば、投影依頼を自身のDatabaseに記録し、他の端末ならば、Negotiator間の通信により、投影依頼を

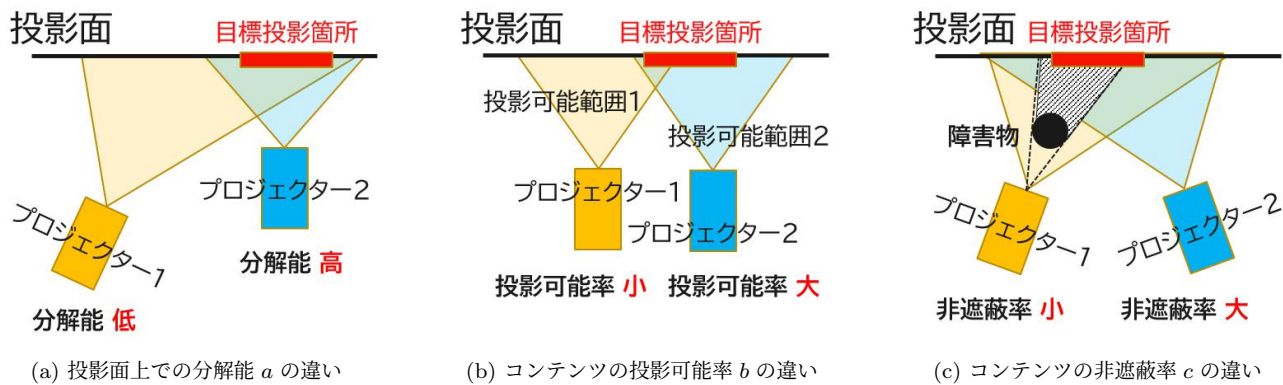


図 3: 投影品質を推定する際に考慮する要件

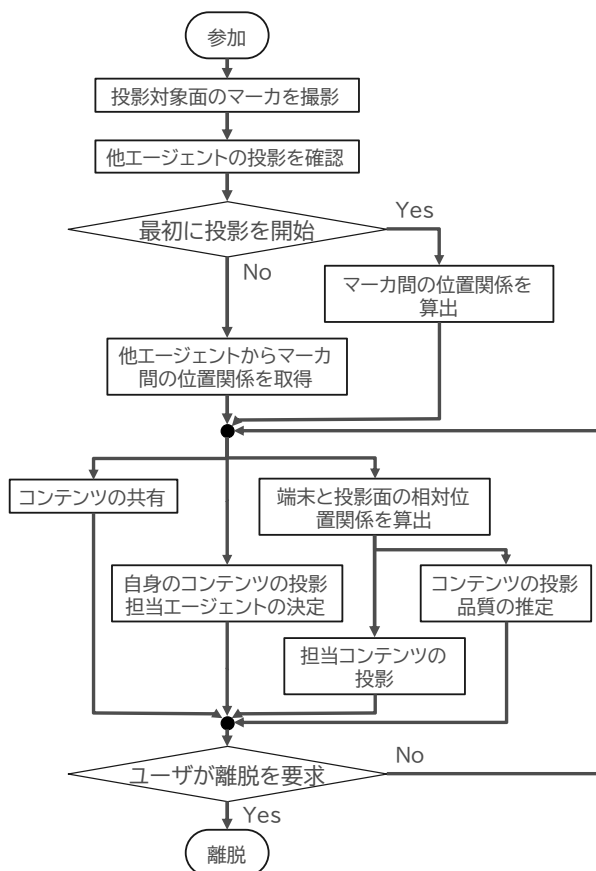


図 4: エージェントの処理

相手の端末に送り相手の Database に記録させる。

3.4.3 Exchanger での処理

Exchanger では、マーカ情報と投影コンテンツをエージェント間で共有するための処理を行う。

端末起動時、あるいは投影参加時、自身の Database にマーカ情報が保存されていない場合、他の端末の Exchanger に共有を要求する。また、自身の Database にマーカ情報が保存されており、他の端末から共有の要求があった場合は、それへ応答する。

自身が持ち寄ったコンテンツに変更があった場合、Exchanger 間の通信でその情報の共有を図り、他の端末の

Database 内のコンテンツを更新する。

3.4.4 User Interface での処理

User Interface では、ユーザによる投影コンテンツの内容、位置、サイズ変更のリクエストを受け付け、自身の Database へ保存する。その際、大きいサイズのコンテンツが追加された場合は、小さなサイズに分割し、複数のコンテンツとして保存する。

3.4.5 Database での処理

Database では、以下の情報を保存し、他モジュールからのリクエストに応じそれらの編集、参照を受け付ける。

- 自身が持ち寄った投影コンテンツ
- 自身が投影を担当するコンテンツ
- 他端末が持ち寄ったコンテンツの投影情報
- 投影面のマーカ情報
- 各コンテンツに対する投影品質の推定結果

4. 検証実験

提案の有効性を検証するための予備的な実験を行った。

今回の実験は、コンテンツの投影品質の共有により投影担当の端末を決定する処理の動作検証を主な目的としており、エージェントに関しては、Presenter, Negotiator, Exchanger の 3 つのモジュールのみを実装した。

まず、実験 1 では、投影端末の離脱・参加、遮蔽の発生、投影端末の移動が生じた状況下でも、エージェント間の協調によりコンテンツの投影が正しく行われるか動作検証を行った。次に、実験 2 では、提案システムの各種処理時間を計測し、リアルタイム性とシステムの実用に関する検証を行った。

4.1 実験環境

実験では、図 6 に示すように、2 台の投影端末で同一の投影面へ情報投影を行った。

投影面として、ホワイトボードにマーカを貼付したものをを用いた。各マーカのサイズは $7.3 \times 7.3 \text{ cm}$ であり、マーカで囲まれた投影範囲は $115 \times 75 \text{ cm}$ である。2 台の投影端末

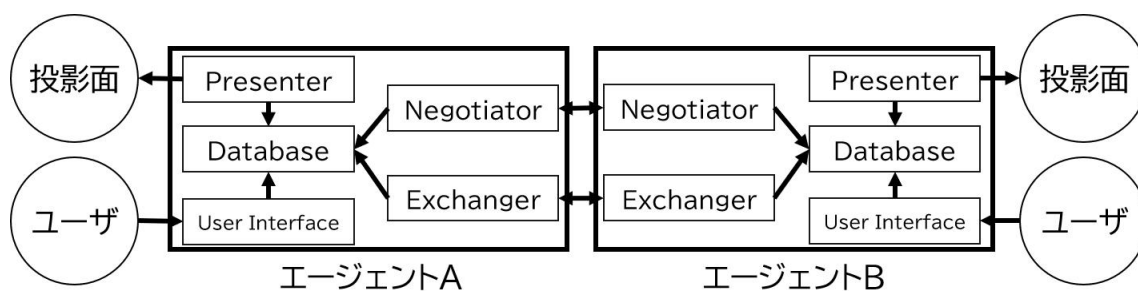


図 5: エージェントの構成



図 6: 実験環境

表 1: 投影端末の構成

PC	Raspberry Pi 4 model 4 (RAM 2GB)
プロジェクター	CWEUG JP1-D5W-2 (1280 × 800px, 30fps)
カメラ	ELP-USBFDH01M-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	Wi-Fi 上のUDP (情報の送受信) TCP (投影コンテンツの送受信)

は、投影面から 150cm の距離に設置し、初期状態では 2 台の間隔を 120cm とした。

投影コンテンツには、投影端末毎に異なる内容を用い、処理時間比較のために、48×48px (小サイズ) と 512×512px (大サイズ) の 2 つのサイズを各々に用意した。

また、試作した投影端末の構成を表 1 に、エージェントソフトウェアの構成を表 2 に示す。なお、各投影端末におけるプロジェクターとカメラの位置関係は、[12] の手法に基づき事前に校正を行った。

4.2 実験 1: 動作検証

投影端末の離脱・参加、遮蔽の発生、投影端末の移動を行い、それらの状況下での動作検証を行った。

まず、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、端末の移動が生じた場合の動作について順に説明する。

● 初期状態

初期状態の投影状況を図 7 (a) に示す。図中、左側の端末を A、右側の端末を B とする。端末 A は、コンテンツ ①と共に、端末 B は、コンテンツ ②と共に投影に参加している。図 7 (a) の状況では、各端末と目標投影箇所との位置関係から、コンテンツの投影品質（分解能）が高くなるよう、端末 A がコンテンツ ②を端末 B がコンテンツ ①を各々投影面へ投影している（各端末が、自身の持ち寄ったものとは異なるコンテンツの投影を担当している）。

● 投影端末の離脱・参加

まず、初期状態から、端末 A をコンテンツ ①と共に離脱させると、端末 B からコンテンツ ②のみが投影された。次に、端末 A をコンテンツ ①と共に投影へ再度参加させると、再び、端末 A からコンテンツ ②が、端末 B からコンテンツ ①が各々投影面へ投影された。このことから、試作システムは、投影端末の離脱・参加に対応していることが確認できた。

● 遮蔽の発生

次に、初期状態と同じ状態から、図 7 (b) に示すように、投影面の前にパーティションを置き、端末 B からの投影が遮蔽されるようにした。この結果、コンテンツ ①を端末 B から投影した場合の品質（非遮蔽率）が低下し、端末 A 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て端末 A から ① ②の両方が投影された。このことから、試作システムは、一部の投影端末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していることが確認できた。

● 投影端末の移動

さらに、初期状態と同じ状態から、図 7 (c) に示すように、端末 A を移動し、目標投影箇所との位置関係が変化するようにした。この結果、コンテンツ ①を端末

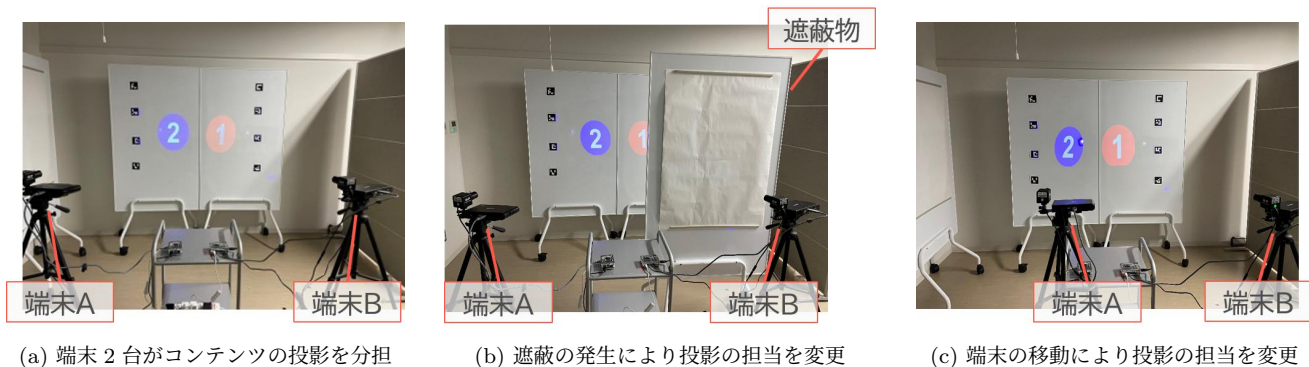


図 7: 実験 1 の結果 (2 台の投影端末で 2 件の投影コンテンツを投影)

表 3: 各処理の平均処理時間 (PC - RAM 2GB)

	処理		処理時間 (s)
Presenter	投影担当端末の切り替え		2.186
	投影面との位置関係の推定		0.034
	投影品質の推定 (端末 1 台)	小サイズ	0.073
		大サイズ	0.405
	投影品質の推定 (端末 2 台)	小サイズ	0.105
		大サイズ	0.301
	コンテンツの投影 (コンテンツ 1 件)	小サイズ	0.132
		大サイズ	0.243
	コンテンツの投影 (コンテンツ 2 件)	小サイズ	0.265
		大サイズ	0.509
Negotiator	投影品質の順位付け		0.002
Exchanger	コンテンツの共有	小サイズ	0.091
		大サイズ	4.471

A から投影した場合の品質 (分解能) が向上し、端末 B 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て端末 A から ① ② の両方が投影された。このことから、試作システムは、投影端末が移動しても、投影の担当を変更することでその状況へ対応していることが確認できた。

4.3 実験 2: 処理時間

次に、コンテンツの投影を担当する端末の切り替えに要する時間、エージェントのモジュール Presenter, Negotiator, Exchanger 内で繰り返し実行される各処理の処理時間を計測した。

計測された処理時間の平均を表 3 に示す。

投影を担当する端末の切り替えに要する時間は、エージェントの離脱や投影端末の移動による投影端末の変化が反映されるまでの時間と等しい。実験結果から分かるように、今回の試作システムでは、端末の切り替えが 2s 程度で完了しており、投影環境の変化に応じた端末の切り替えがほぼリアルタイムに可能であると考えられる。

コンテンツが小サイズ (48×48px) で、投影端末の PC

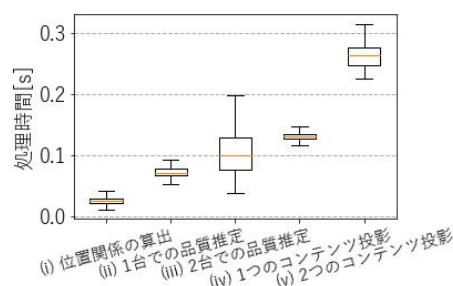


図 8: Presenter における各処理の処理時間 (コンテンツ - 小サイズ, PC - RAM 2GB)

の RAM が 2GB である場合について、Presenter における各処理、(i) 投影面との位置関係の推定、(ii) 投影品質の推定 (端末 1 台)、(iii) 投影品質の推定 (2 台)、(iv) コンテンツの投影 (コンテンツ 1 件)、(v) コンテンツの投影 (2 件) の処理時間を図 8 に示す。また、比較のために、コンテンツが大サイズ (512×512px) で、投影端末の PC の RAM 容量が 2GB, 4GB, 8GB である場合の各処理時間を図 9 に示す。

これらの結果から、Presenter における投影品質の推定、コンテンツの投影については、コンテンツのサイズに応じて処理時間が増加していることが確認できる。また、PC の RAM 容量の違いは、Presenter での処理時間に余り影響を与えないことも確認できる。

Negotiator での処理 (投影品質の順位付け) に要する時間を図 10 に示す。投影品質の順位付けに要する時間は、投影に参加する端末の台数、投影するコンテンツの件数に影響されると考えられるが、今回の実験では、それらの影響は明確には確認されなかった。また、PC の RAM 容量の違いによる影響についても、殆ど確認されなかった。

Exchanger での処理 (コンテンツの共有) に要する時間を図 11 に示す。この結果から分かるように、コンテンツの共有に要する時間は、PC の RAM 容量には影響されないが、コンテンツのサイズに応じて増加しており、これは、ほとんどが画像転送に必要な通信時間であると考えられる。従って、圧縮して画像を転送する等の方法を用いれば、コ

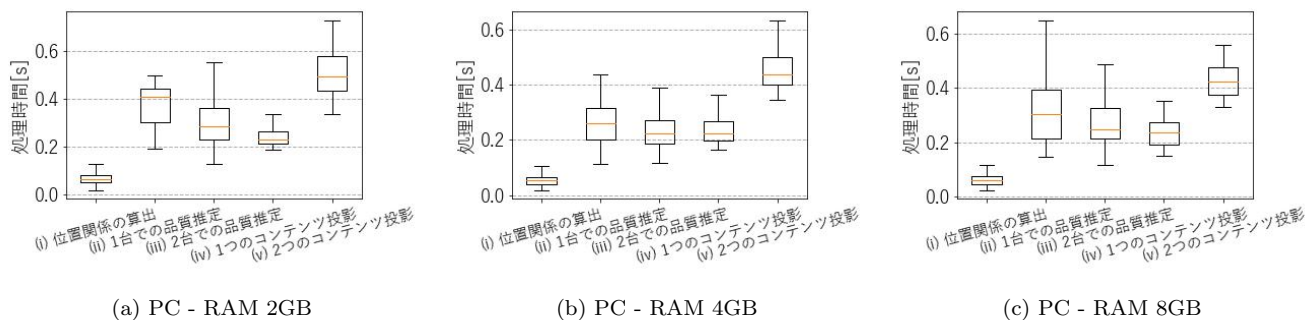


図 9: Presenter での各処理時間 (コンテンツ - 大サイズ, PC - RAM 2GB, 4GB, 8GB)

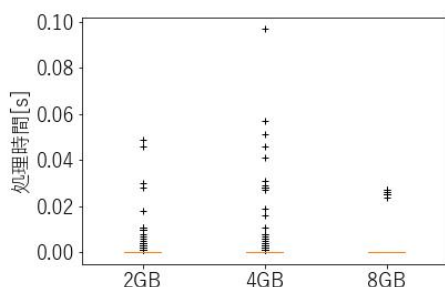


図 10: Negotiator での処理時間 (投影品質の順位付け)

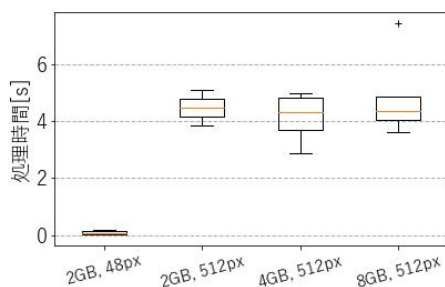


図 11: Exchanger での処理時間 (コンテンツの共有)

コンテンツの共有に要する時間は更に削減可能と思われる。

5. おわりに

本稿では、複数のプロジェクターを用いた情報投影の効果的な実現のため、各プロジェクターをエージェントとして構成し、それらの自律的な協調により情報投影を行うシステムを提案した。提案システムでは、投影環境の変化へ対応しつつ、コンテンツの投影品質を考慮した情報投影が可能となっている。

試作システムを用いた予備的な検証実験の結果から、投影端末 (プロジェクター) の離脱・参加、移動、遮蔽の発生などに対し、投影を担当する端末をほぼリアルタイムで変更し対応可能であることが確認できた。

今後は、エージェント間のプロトコルや協調方法、コンテンツの共有方法などの改良を行い、システムの処理速度を向上させるための検討を行う予定である。また、コンテ

ントの投影品質を適切に推定し、投影を担当する端末をより効果的に変更可能なシステムの実現を目指す。

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] 太田脩平ほか: 投影映像の視認性を考慮した装着型プロジェクタの装着位置評価, *情報学論*, Vol. 53, No. 7, pp. 1882–7764 (2012).
- [4] Funk, M. et al.: Automatic projection positioning based on surface suitability, *Proc. 5th ACM Int. Symp. Pervasive Disp.*, pp. 75–79 (2016).
- [5] 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).
- [6] Jia, Q. et al.: Research of color correction algorithm for multi-projector screen based on projector-camera system, *Proc. 2nd Int. Conf. Intell. Syst. Des. Eng. Appl.*, pp. 1285–1288 (2012).
- [7] Steele, R. M. et al.: Color calibration of multi-projector displays through automatic optimization of hardware settings, *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vision Pattern Recognit. Workshops*, pp. 55–60 (2009).
- [8] 坂梨 豊, 橋本直己: 前面投影システムにおける複数台プロジェクタのシームレスな切り替えによる鑑賞可能領域の拡張, *映像学技報*, Vol. 34, No. 10, pp. 133–136 (2010).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] Majumder, A.: Ubiquitous displays: Spatially augmenting reality via multi-projector agents, *Proc. Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Inf.*, pp. 831–840 (2017).
- [12] Moreno, D. and Taubin, G.: Simple, accurate, and robust projector-camera calibration, *Proc. 2nd Int. Conf. 3D Imaging Model. Process. Visualization Transm.*, pp. 464–471 (2012).