

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630198

研究課題名(和文)大規模非負システム制御理論に基づく映像投影システムの設計論

研究課題名(英文)Cooperative Multi-Projection System Design based on Distributed Control Theory

研究代表者

加嶋 健司(Kashima, Kenji)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：60401551

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：プロジェクションマッピングなどで注目される映像投影技術において、複数台のプロジェクタが自律分散的に投影画像を決定する柔軟性をもつシステムの設計は、頑健性向上や通信コスト削減に資する重要な課題である。本研究では、システム制御の分野で急速に発展している大規模システムの解析・分散制御の手法を用いて、こうした分散型映像投影システムの設計方法論を確立し、プロトタイプシステムを用いてその有効性を検証する。

研究成果の概要(英文)：Radiometric compensation is an important fundamental technology for projection-based augmented reality. In this research, we focus on radiometric compensation for a cooperative overlapping multi-projection system that has several advantages over a single projection system, such as higher maximum luminance while covering wider field of view and less shadows. To achieve high scalability, robustness and Plug-and-Play capability, we propose to apply a distributed optimization algorithm based on distributed control theory to radiometric compensation.

研究分野：制御工学

キーワード：バーチャルリアリティ 制御工学 分散最適化

1. 研究開始当初の背景

継ぎ目のないプロジェクションマッピングを行うためには、一般に多くのプロジェクタが必要となる。しかしながら、全プロジェクタの投影画像の集中(同時)最適化をリアルタイムでおこなうことは、非常に計算コストが高い。さらに、生成された画像を各プロジェクタに個別に伝送することも、通信量が膨大となり必ずしも現実的ではない。一方で、こうした映像投影技術においては、静止画であってもそのシステム全体の挙動は静的ではなく、動画の投影・環境の変化への適応まで考慮すると明らかにそのダイナミクスが重要である。ここで現れるダイナミクスを扱う困難さは、光の性質による非負値性、投影データの大規模性にあると考えられる。こうした状況と関連して、システム制御分野では、大規模非負システムの解析・分散制御の理論が急速に発展している。

2. 研究の目的

本研究では前項で述べた2つの異なる分野の関連性に着目し、システム制御理論的アプローチを用いて、映像投影システムの動的挙動に関する性能指標の導入をおこない、これにもとづくあらたな設計方法論を確立し、プロトタイプシステムを用いてその実用的有効性を検証する。特に、典型的な応用例を想定して、複数台のプロジェクタを用いて、非白色面に映像投影する際に生じる色ズレを補償しつつ、映像を投影するシステムを設計する。また、プロジェクタ端末数が増大した際の計算量や通信量、故障による端末の欠落に対する頑健性等を考慮し、全端末の投影画像を集中的に計算する端末の存在を仮定するのではなく、個々の端末が自律分散的に投影画像を決定する柔軟性をもつシステム構成とする。

3. 研究の方法

プロトタイプシステムとしてマルチプロジェクタ—シングルカメラからなるフィードバックシステムを構築し、解析・設計理論の構築、有効性の検証に用いる。ここで、各端末間には集中的な最適化や情報共有のための通信路は存在しない。このシステムにおいて、

- (1) 外乱存在下の静止面投影のための協調型映像投影システムの構築とその理論的性能評価およびその限界値の導出、
- (2) 動画投影システムへの拡張および時空間システム理論によるマルチピクセル間処

理の設計と性能評価、をそれぞれすすめる。

4. 研究成果

(1) 集中的なフィードフォワード制御と分散的フィードバック制御にもとづく2自由度制御系としての映像投影システムの設計法を提案し、カメラ端末において集中的な処理を行うことで、既存の分散的最適化の構造を変化させることなく、望ましい映像が投影できることを数値例、実験例を通じて確認した。

(2) 前項の提案手法を動画投影システムへと拡張した。また、短時間先の動きが予測可能な遮蔽物の存在を想定し、そうした情報を有効活用することを可能とする時空間解析手法を提案し、その有効性を検証した。本成果はバーチャルリアリティ分野におけるフラグシップ会議において発表され、複数の国際論文誌に収録された。

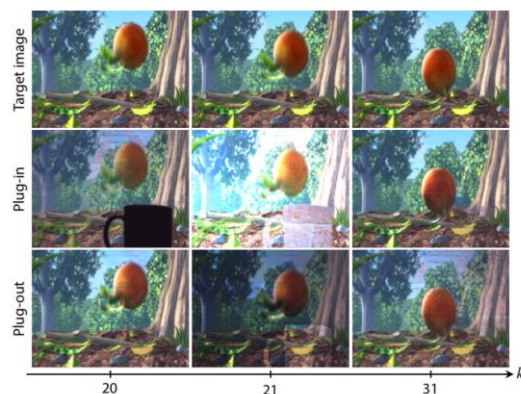


Figure 1: プロジェクタの Plug-in、Plug-out 時の自動投影補償結果。

【中段】Plug-in 直前 ($k=20$) では、コップ型の遮蔽物の影響を避けられない。新しいプロジェクタ投入直後 ($k=21$) は、その領域にも投影可能となる一方で、全体的に過度の光量が投影されている。10 ステップ後には、分散的な協調作用により、集中的な最適化をおこなうことなく、適切な投影が実現されている。

【下段】Plug-out 直前 ($k=20$) では、適切な投影が行われている。故障などを模擬して、1台のプロジェクタを無効化した直後 ($k=21$) は、その影響により全体的に光量が不足している。10 ステップ後には、自律的な協調作用により、同様に残りのプロジェクタが協調的にその影響を補償し、適切な投影が達成されている。

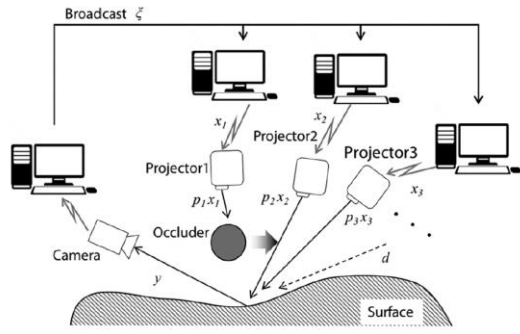


Figure 2: プロトタイプシステムのアーキテクチャ。投影面を撮影するカメラ端末のみが目標映像を有している。この端末から誤差情報がプロジェクタ端末にブロードキャストされるが、各プロジェクタ端末の性能等の情報は有しておらず、各端末それぞれに異なる指示を与えることもできない。各プロジェクタ端末においては、ブロードキャストされた誤差情報および自身のみの投影性能などから投影画像を更新する。環境光などの外乱情報は、いかなる端末においても測定していない。遮蔽物による陰影を除去する問題設定においては、その1ステップ先の予見情報が、カメラ端末において利用可能であると想定する。

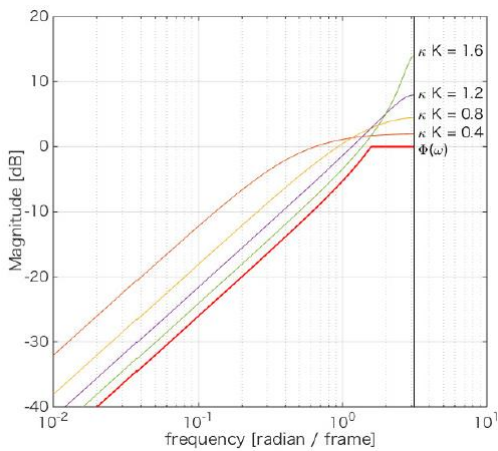


Figure 3: アルゴリズム内のパラメータ (κK) に対する、目標動画（もしくは環境外乱）時間周波数と誤差の関係を数学的に導出した結果。いずれの周波数においても、パラメータの決め方によらず誤差には下限（図中の Φ ）が存在する。この性能限界は、パラメータの調整では決して克服できないことを理論的に示している。こうした数学的なモデル化と解析による性能評価は、バーチャルリアリティ分野では一般的ではなく、異分野協働により初めて実現できた成果と言える。

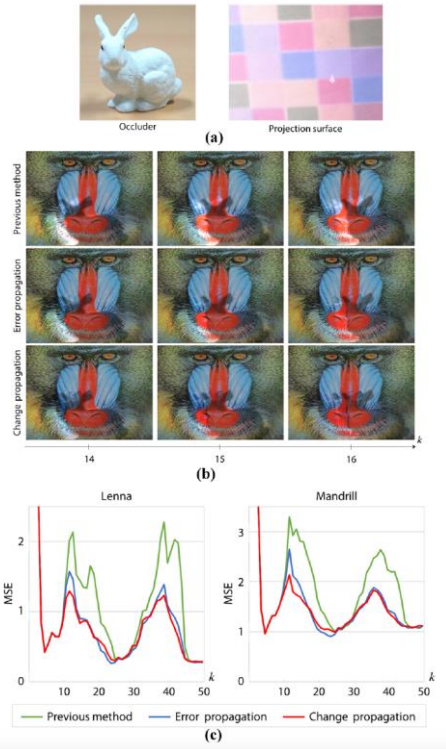


Figure 4: マルチピクセル間処理による性能改善。Previous method: ピクセルごとの処理、Error propagation, Change propagation: マルチピクセル間処理
(a) 実験に用いた遮蔽物および非一様な投影面。(b) 各手法による投影結果。(c) 平均二乗誤差。

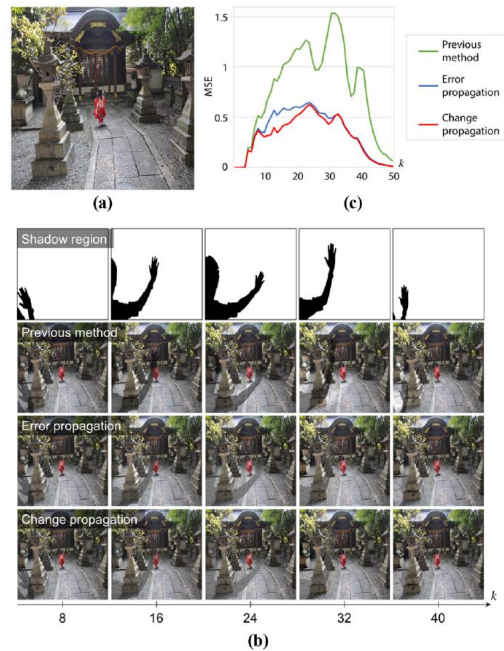


Figure 5: マルチピクセル間処理による移動遮蔽物の陰影除去性能改善。Previous method: ピクセルごとの処理、Error propagation, Change propagation: マルチピクセル間処理
(a) 実験に用いた元画像。(b) 各手法による投影結果。(c) 平均二乗誤差。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Jun Tsukamoto, Daisuke Iwai, and Kenji Kashima, "Distributed Optimization Framework for Shadow Removal in Multi-Projection Systems," Computer Graphics Forum (accepted).
- ② Jun Tsukamoto, Daisuke Iwai, and Kenji Kashima, "Radiometric Compensation for Cooperative Distributed Multi-Projection System through 2-DOF Distributed Control," IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality), Vol. 21, No. 11, pp. 1221-1229, 2015.
- ③ 塚本潤, 岩井大輔, 加嶋健司, "分散最適化にもとづく協調型映像投影システムによる投影色補正," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No. 2, pp. 143-150, 2015.

[学会発表] (計 4 件)

- ① Jun Tsukamoto, Daisuke Iwai, Kenji Kashima, "Distributed Optimization for Shadow Removal in Spatial Augmented Reality," In Adjunct Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed Reality and Augmented Reality, pp. 147-148, 2016.
- ② 塚本潤, 岩井大輔, 加嶋健司, "2 自由度制御系としての動画投影システムの設計," 第59回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 324-3 (3 pages), 2015.
- ③ 塚本潤, 岩井大輔, 加嶋健司, "分散最適化にもとづく協調型映像投影システムの設計," 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. 145-146, 2015.
- ④ 塚本潤, 岩井大輔, 加嶋健司, "分散最適化にもとづく協調型映像投影システムの設計," 第57回自動制御連合講演会, pp. 2093-2094, 2014.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www-sens.sys.es.osaka-u.ac.jp/users/iwai/jp/research/distopt.html>

<http://www-sens.sys.es.osaka-u.ac.jp/users/iwai/jp/research/distopt2.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加嶋 健司 (KASHIMA, Kenji)
京都大学・情報学研究科・准教授
研究者番号：60401551

(2) 研究分担者

岩井 大輔 (IWAI, Daisuke)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号：90504837

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()