

ハンドヘルド高速プロジェクタを利用した大画面ディスプレイとの低遅延なインタラクション

吉川 太陽^{1,a)} 鏡 慎吾^{1,b)} 橋本 浩一¹

概要：大画面ディスプレイとのインタラクション方法について様々な研究が行われている。ユーザエクスペリエンスを考慮すると大画面ディスプレイは低遅延で動作することが求められるが、コストの問題があり難しい。本稿ではハンドヘルド高速プロジェクタで大画面ディスプレイの上に映像を重畳し、操作対象周辺部のみを高速で更新する低コストかつ低遅延なインタラクションを提案する。

1. 緒言

ディスプレイとのインタラクションは日常的に行われている。例えばパーソナルコンピュータではマウスを介してインタラクションを行い、スマートフォンではディスプレイを直接触ってインタラクションを行う。大画面ディスプレイを用いると、複数人でコンテンツを利用できる、多くの情報を一度に表示できるという利点があり、従来の大きさのディスプレイとは違った新しいアプリケーションが考えられる。例えばチームラボは「お絵かき水族館」という大画面ディスプレイを利用した、複数の子供が楽しめるイベントを開催している [7]。このイベントでは海中の様子がプロジェクタで壁面に投影され、子供隊が描いた魚がその海中を泳ぐ。子供たちの魚が登場する点、子供たちの動きによって魚の動きが変化する点が大画面ディスプレイとのインタラクションといえる。

ディスプレイが大きくなるとマウスやタッチによるインタラクションは難しくなる。Wu ら [8] はテーブルトップ型ディスプレイに対して、指先や手全体のジェスチャでインタラクションを行う手法を提案している。彼らはこの手法を使って、複数のユーザが両手を使って操作をする、ルームプランナという家具のレイアウトを考えるためのアプリケーションを実装した。Cao ら [2] は壁面を仮想的な大画面ディスプレイとし、ハンドヘルドプロジェクタを使ってインタラクションを行う手法を提案している。彼らはハンドヘルドプロジェクタの投影像の位置に対応したコンテンツを表示するフラッシュライトメタファという構想に基づいて、大画面ディスプレイの表示コンテンツを操作するア

プリケーションを実装した。Baur ら [1] はスマートフォンを仮想的なハンドヘルドプロジェクタとして扱うインタラクション方法を提案している。彼らがこの手法に基づいて作成したアプリケーションでは、ユーザが手に持ったスマートフォンから大画面ディスプレイに重畳して投影しているかのように大画面ディスプレイの表示内容が変化する。Langner ら [5] はディスプレイのタッチとポインティングデバイスによる遠隔操作の二つの方法で大画面ディスプレイとインタラクションをするシステムを開発し、システムのユーザビリティとインタラクション中のユーザの動きを分析、評価した。

一方、ディスプレイとのインタラクションにおいて遅延がユーザビリティに悪影響を与えることが一般に知られている。特にドラッグインタラクションにおいて、Ng ら [6] はユーザが 2 ms というわずかな遅延にも気づいたと報告している。そのため、ディスプレイは低遅延で動作することが求められる。Digital Micromirror Device (DMD) のような高速表示の可能なデバイスを用いることで低遅延なディスプレイは実現できる。しかし、大画面化はコストが高いという問題がある。

この問題を解決するために、ディスプレイ全体ではなく必要な部分だけを高速で更新することを考える。ディスプレイ内で操作に対して低遅延で反応すべき部分はインタラクション対象周辺部のみであることが多い。例えばディスプレイに表示されている写真を動かすタスクを想定すると、低遅延での更新が求められる部分は動かされている写真の周辺のみである。

インタラクション対象周辺部の並進に関する低遅延な追従は、ユーザがハンドヘルドプロジェクタをポインティングデバイスとして扱い、大画面ディスプレイに重畳して投

¹ 東北大学 Tohoku University

^{a)} taiyo.kikkawa.p1(at)dc.tohoku.ac.jp

^{b)} swk(at)ic.is.tohoku.ac.jp

影することで物理的に実現される。一方、回転のような並進以外の自由度の動きに低遅延で追従するには投影像の高速な変形が求められる。これはハンドヘルドプロジェクタに高速プロジェクタを利用することで可能となる。

本研究ではハンドヘルド高速プロジェクタをポインティングデバイスとして利用する、大画面ディスプレイとの低遅延な操作インタラクションを提案する。

2. 提案手法

ハンドヘルド高速プロジェクタ、通常のプロジェクタ、高速カメラを用いて大画面ディスプレイとインタラクションを行うシステムを提案する。本システムにおいて、ハンドヘルド高速プロジェクタの投影像を前景、固定プロジェクタの投影像を背景と定義する。背景は大画面ディスプレイに、前景はインタラクション対象周辺に相当する。固定プロジェクタは通常のフレームレートで、ハンドヘルド高速プロジェクタは高フレームレートで動作する。

本システムを利用して、大画面ディスプレイに表示されている写真を動かすアプリケーションを実現することを考える。図1に本アプリケーションで写真を動かすときの一連の流れを示す。選択された写真はハンドヘルド高速プロジェクタから投影され、ハンドヘルド高速プロジェクタの動きに追従してスクリーン上を平行移動する。選択されていない写真は固定プロジェクタから投影される。

ユーザが写真を移動させる際、ハンドヘルド高速プロジェクタの位置と姿勢によっては図2の左側に示すように前景が歪んでしまう。本システムではハンドヘルド高速プロジェクタの位置姿勢に基づいて投影像を毎時刻射影変換し、この歪みを補正する。前景と背景の表示内容にマーカを含めることで、カメラ画像から前景平面、背景平面、カメラ画像平面の位置関係がわかる。前景に基準点を設けておけば、カメラ画像から背景における前景の基準点の理想座標を計算できる。歪みの補正はこの理想座標を目標値として前景基準点にフィードバック制御を適用することによって行う。

3. システム構成

システムの全体図を図3、4に示す。本システムはハンドヘルド高速プロジェクタ、固定プロジェクタ、高速カメラ、コンピュータからなる。各プロジェクタとカメラは一台のコンピュータに接続されている。固定プロジェクタは机に固定されている。前節で述べた通りフィードバック制御を行っているため、高速カメラはマーカを撮影できる位置であればプログラム動作中に位置姿勢が変化してもよい。

ハンドヘルド高速プロジェクタは前景を変形しつつ投影する。本研究で使用した高速プロジェクタ [4] はコンピュータからホモグラフィ行列を受け取って、あらかじめ高速プロジェクタのメモリに読み込んでおいた画像を射影変形で

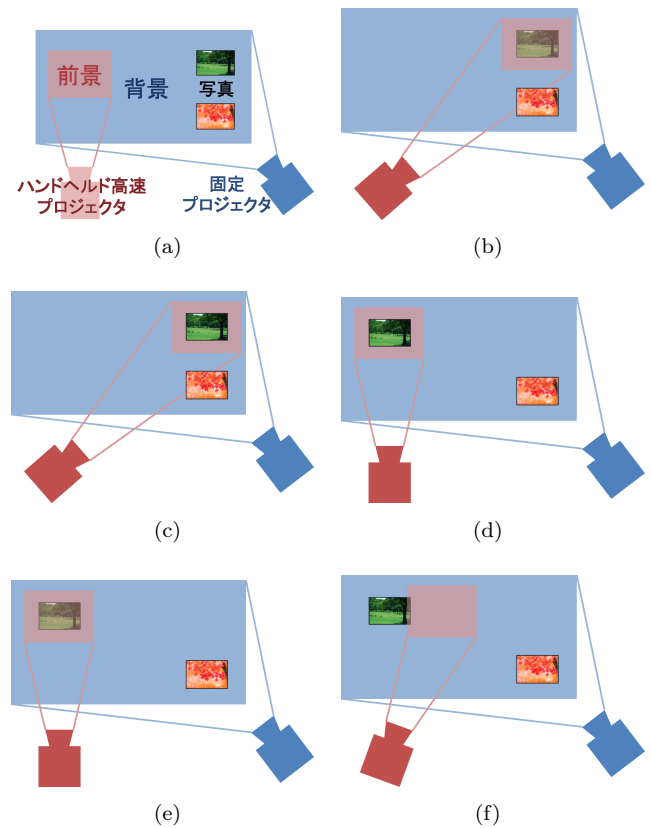


図1 写真を動かすときの一連の流れ。(a) 初期状態では写真が背景に含まれている。(b) 前景と写真が重なっている状態でキーを入力すると、移動させる写真を選択できる。(c)(d) 選択した写真は背景から消え、前景に含まれる。(e)(f) 写真を移動させている間にキーを入力すると写真が前景から消え、背景に含まれる。

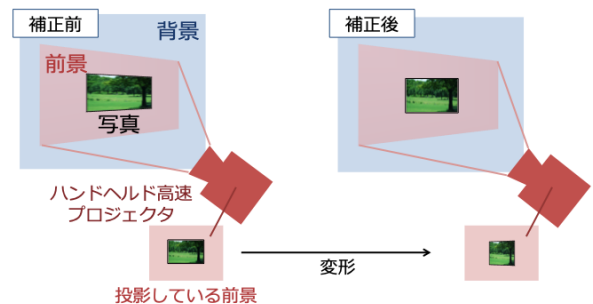


図2 前景補正の概略図。左側が補正前、右側が補正後。

きる。これによってコンピュータの計算量を減らし、高速で前景を更新できる。高速プロジェクタは、カメラ用の三脚を取り付けたアクリル製の筐体によって片手で操作できる。高速プロジェクタの解像度は1024×768 pixel、ホモグラフィ変換を適用できる最大レートは2470 fpsである。

固定プロジェクタ (EPSON 社製, EB-X6) は背景を

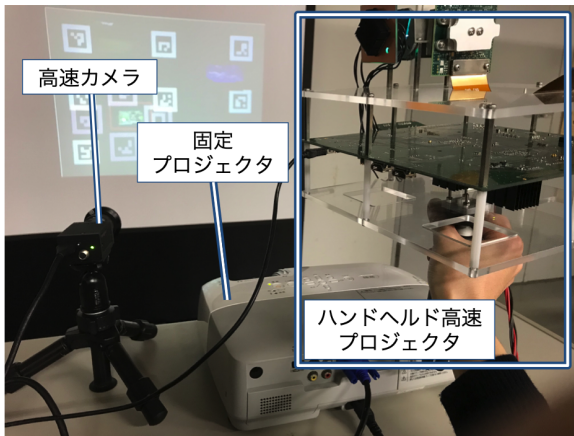


図 3 高速カメラを机に固定したときのシステムの全体図

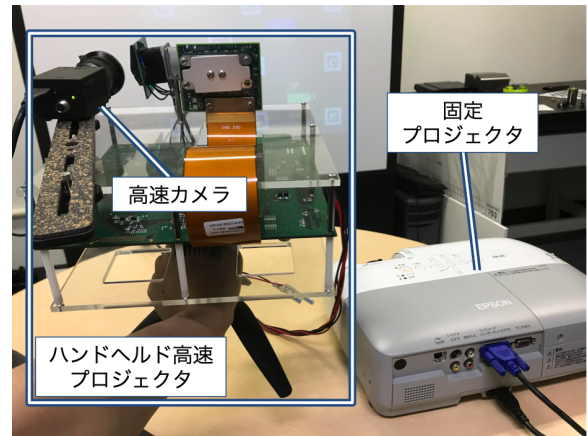


図 4 高速カメラをハンドヘルド高速プロジェクタに固定したときのシステムの全体図

投影する。最大解像度は 1024×768 pixel だが、本インタフェースでは 640×480 pixel の解像度で背景を投影する。最大フレームレートは 70 fps である。

高速カメラ (Point Grey Research 社製, GS3-U3-23S6-M) はスクリーンに映る前景と背景の ArUco マーカを撮影する。最大解像度は 1920×1200 pixel だが、本インタフェースでは対象領域解像度を 640×480 pixel として使用する。最大フレームレートは 380 fps である。

使用したコンピュータ (サードウェーブ社製, GALLERIA QSF960HE) の CPU は Intel Core i7-6700HQ 2.60 GHz, RAM 容量は 8 GB である。

前景の補正に必要なハンドヘルド高速プロジェクタの位置と姿勢は, ArUco マーカを利用して推定する。ArUco マーカ [3] は OpenCV ライブラリの ArUco モジュールによって容易に検出できる, バイナリの正方形マーカである。図 5, 6 のように背景には ID が 0 番から 8 番の ArUco マーカを, 前景には ID が 9 番から 12 番の ArUco マーカを表示する。ハンドヘルド高速プロジェクタと固定されている高速カメラでスクリーンを撮影することでこれらのマーカを検出する。前景基準点は操作対象の写真の角の四点とし, その速度は, 目標座標からの偏差に対する比例制御により定めた。比例ゲインは 0.2 とした。

4. 実験結果・考察

作成したアプリケーションを筆頭著者が体験し, 性能を評価した。想定していた通りに写真の選択, 移動, 再配置を正しく行えることを確認した。ハンドヘルド高速プロジェクタを大きく傾けた様子を図 7 に示す。ハンドヘルド高速プロジェクタを傾けても移動させている写真が傾いていないことから, 前景の補正が正しく働いているとわかる。前景の更新のフレームレートは 153 fps だった。この値は通常のプロジェクタのフレームレートより十分が高いため, 局所的な高速化ができたといえる。筆頭著者がインタラク션을体験した限りではほとんどの場合で遅延を感じなかったが, ハンドヘルド高速プロジェクタを素早く

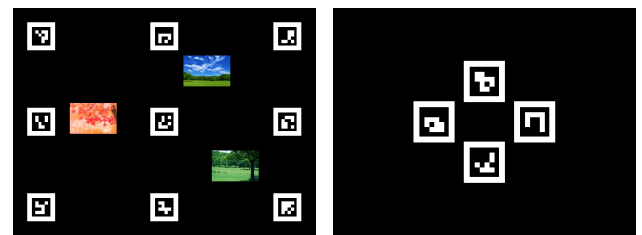


図 5 背景

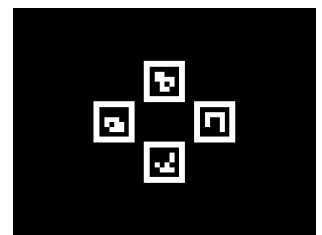


図 6 前景

傾けた時には遅延を感じるがあった。

前景の補正の正確さを評価するために, インタラクション中に投影された前景の, ハンドヘルド高速プロジェクタの位置姿勢に基づく理想の変形をされた前景に対する誤差を調べた。この実験では高速カメラはハンドヘルド高速プロジェクタに固定した。対象とした動きは平行移動, ローリング, ヨーイングの三種類である。平行移動はスクリーンに対して前後に動かす動きで, 動作中は前景を拡大, 縮小する必要がある。ローリングはハンドヘルド高速プロジェクタの光軸を中心に回転させる動きで, 動作中は前景を回転させる必要がある。ヨーイングはユーザから見てハンドヘルド高速プロジェクタを左右に回転させる動きで, 動作中は前景の射影歪みを取り除く必要がある。いずれの場合も, 前景がスクリーン上で同じ位置に投影されるようにハンドヘルド高速プロジェクタを動かした。そのためヨーイングには高速プロジェクタの光軸とハンドルの軸に垂直な軸方向の平行移動を含んでいる。これらの動作を行なっている時のスクリーンを別のコンピュータと高速カメラで撮影し, 投影された前景に表示されている写真の角の四点について, スクリーン上での実際の座標と理想座標の差を計測した。図 8 に各動作中のフレームと誤差の関係を示す。

背景の大きさはスクリーン上で 72×55 cm であり, ユーザはこれを 1 m 離れた位置から見るため, 各動作中の変形の誤差は小さいといえる。各動作の誤差にはピークが見られる。これらのピークの原因はフレームとユーザの動きを対応させた計測を行っていないため不明である。現段

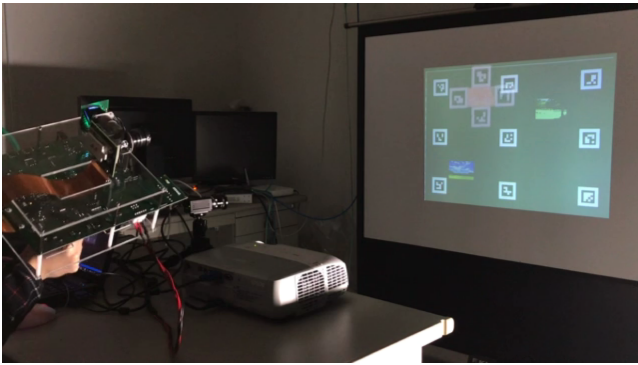


図 7 写真移動中にハンドヘルド高速プロジェクタを大きく傾けている様子。

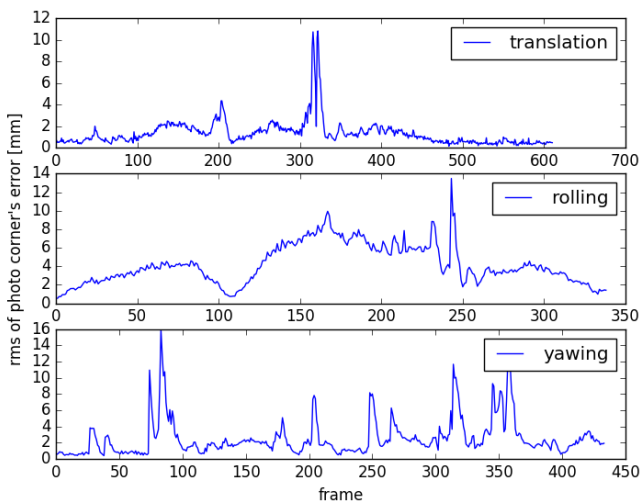


図 8 特定動作中の変形の誤差. あるフレームにおける前景の写真の角四点の理想座標と観測座標の距離について二乗平均平方根を求め、誤差としている。

階では各動作における切り返しの部分がこのピークに当たると推測している。切り返しとは例えばローリングであれば、右に傾けた状態から左に傾ける瞬間を指す。ピークを除いて考えると、各動作の中でローリング時の誤差が最も大きい。この要因は前景平面の時間当たりの変化がローリング時に最も大きくなるからだと推測される。ヨーイング時の誤差は他の動作時の誤差に比べて安定していない。これはスクリーンの一点を狙い続けながらヨーイングを行うのが難しく、ハンドヘルド高速プロジェクタの姿勢が安定しなかったことが原因だと考えられる。

5. 結言

研究ではハンドヘルド高速プロジェクタをポインティングデバイスとして利用する、低遅延な大画面ディスプレイとの操作インタラクションを提案した。設計したユーザインタフェースでは、高速な更新を必要とするインタラクション対象周辺を高速プロジェクタで通常プロジェクタにの投影像に重畳して投影し、局所的な高速化を可能にした。

本システムの課題はハンドヘルド高速プロジェクタの位置姿勢推定方法である。現段階では ArUco マーカを前景と背景に表示することで位置姿勢推定を行なっているが、この方法にはマーカがコンテンツと重なってしまうことでマーカを認識しづらくなる、またコンテンツの表示が阻害されるという問題がある。解決のために赤外線マーカ、カメラを利用する方法やトラッキングを利用する方法を検討している。コストと高速性、動作の安定性を考慮して適切な方法を採用したい。本稿で述べたインタフェースの使用感は主観的なものである。ユーザビリティテストを行なって客観的なデータを集計したいと考えている。

謝辞 本研究の一部は、JST ACCEL JPMJAC1601 および科研費 16H02853, 16H06536 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Baur, D., Boring, S. and Feiner, S.: Virtual Projection: Exploring Optical Projection as a Metaphor for Multi-Device Interaction, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1693–1702 (2012).
- [2] Cao, X. and Balakrish, R.: Interacting with Dynamically Defined Information Spaces using a Handheld Projector and a Pen, *Proc. of 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 225–234 (2006).
- [3] Garrido-Juradon, S., R.Munoz-Salinas and Marin-Jimenez, M.: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, *Pattern Recognition*, Vol. 47, pp. 2840–2292 (2014).
- [4] Kagami, S. and Hashimoto, K.: A Full-Color Single-Chip-DLP Projector with an Embedded 2400-fps Homography Warping Engine, *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, Article No.1 (2018).
- [5] Langner, R., Kister, U. and Dachsel, R.: Multiple Coordinated Views at Large Displays for Multiple Users: Empirical Findings on User Behavior, Movements, and Distances, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 25, No. 1, pp. 608–618 (2019).
- [6] Ng, A., Annett, M., Dietz, P., Gupta, A. and Bischof, W. F.: In the blink of an eye: investigating latency perception during stylus interaction, *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1103–1112 (2014).
- [7] teamLab: お絵かき水族館 / Sketch Aquarium, teamLab (オンライン), https://futurepark.teamlab.art/playinstallations/sketch_aquarium.html (参照 2019-07-31).
- [8] Wu, M. and Balakrishnan, R.: Multi-Finger and Whole Hand Gestural Interaction Techniques for Multi-User Tabletop Displays, *Proc. of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 193–202 (2003).