



# 高速に運動する物体表面へのレーザラインアート投影システム

Laser Line Art Mapping onto a Fast Moving Surface

松本大吾<sup>1)</sup>, 鏡慎吾<sup>2)</sup>, 橋本浩一<sup>1)</sup>

Daigo Matsumoto, Shingo Kagami, and Koichi Hashimoto

1) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

2) 東北大学 未踏スケールデータアナリティクスセンター (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

**概要:** 本研究では、レーザラインアートの投影対象の移動への低遅延適応を目的として、ガルバノスキャナによるベクタ画像の描画中にレーザ光の反射点が走査する経路を、投影対象の最新の姿勢情報をもとにしてベクタ画像のフレームレート以上のレートで更新する手法を提案する。投影されたベクタ画像の形状の歪みや乱れに対するユーザ評価実験を実施し、運動するレーザラインアートが静止時とほぼ同様に知覚されるか否かを決定づける経路更新頻度や運動速度の条件について論じる。

**キーワード:** 拡張現実, プロジェクションマッピング, 高速ビジョン, 低遅延ディスプレイ

## 1. はじめに

レーザラインアートは、ベクタ画像を構成する一連の点に対してガルバノスキャナ等を用いてレーザ輝点を順に投影することで実現される。人間の視覚はレーザが投影対象表面で反射した輝点の動いた軌跡の残像を線として認識する。この表現手法は昨今のアートやエンターテインメントなどの分野で幅広く活用されており、その活用範囲を拡張する取り組みも積極的に進められている [1][2]。

一般的に、動的なシーンでの投影をもとにしたインタラクションシステムにおける主な課題は投影対象の動きに素早く追従し、適切な位置にコンテンツを投影することである。現在、ビデオプロジェクタを利用した動的なプロジェクションマッピング技術に関してはそれらの課題を解決する様々な技術が提案されている [3]。しかしながら現時点ではガルバノスキャナを用いた動的なレーザラインアート投影を実現しようとする試みは非常に限られている。そのような試みの一つとして、Iuchi らはガルバノスキャナとサッカーボールミラーを組み合わせたレーザラインアートの追従投影システムを提案している [4]。しかし、その追従は水平方向と垂直方向に制限されているため、三次元的に運動する投影対象を完全に追従することは困難である。

運動する投影対象に対して高速な追従投影を実現する最も率直なアプローチは、レーザラインアートのフレーム時間（一つのベクタ画像を描画する経路を一周走査し終えるまでにかかる時間）を可能な限り短くすることである。フレーム時間は、persistence of vision によってレーザラインアートの全体が一貫して知覚されるためには長くとも数十ミリ秒以下であることが望ましいが、フレーム時間をさらに短縮することで、投影するベクタ画像を素早く更新できる。すなわち、ベクタ画像を投影対象の動きに対して低遅

延で適応させることができる。

しかしながら、フレーム時間の短縮はラインアートの投影品質の観点から望ましくない。フレーム時間はレーザの輝点が走査する経路長とガルバノスキャナの走査速度に依存しており、複雑な形状のベクタ画像を投影するためには走査経路を長くする必要がある。また、一般的にガルバノスキャナは走査速度が高速になるほどミラーの慣性の影響により、直角の経路が曲線になるなどレーザの輝点の軌跡が意図した形状にならない事象が発生する。それらに加え、フレーム時間の短縮は persistence of vision が有効である時間内に同じ図形が複数回描画されることにつながり、ラインアートが二重に見える事象を引き起こす。そのためフレーム時間はラインアートのちらつきが生じない程度の長さに保たれることが好ましい。

一方、Digital Micromirror Device を搭載した DLP プロジェクタは入力画像を二値パターン分解し、それらのパターンを繰り返して投影する。人間の視覚はそれらのパターンが時間的に積分されたものを投影画像を知覚する。Kagami らは入力画像に対して、各二値パターンを個別に制御することでフレームレートを上げることなく低遅延な投影を実現した [5][6]。我々はそのアプローチから着想を得て、レーザラインアートのフレーム時間を短縮するのではなく、レーザ輝点が走査する経路を構成する個々の点に対して投影対象の動きに追従させるように制御することで、レーザラインアートのフレーム時間を短縮することなく、投影コンテンツの低遅延マッピングを実現することを目指す。

本稿では、我々が提案するレーザラインアート投影システムの概要とその特徴について述べる。また、投影されたベクタ画像の形状の歪みについて評価実験を行い、その結果の一部について報告する。

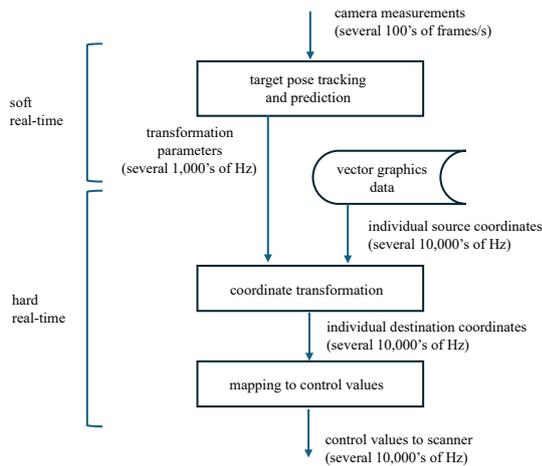


図 1: 提案システムの処理パイプライン

## 2. レーザ走査制御手法

通常、ガルバノスキャナのミラーは数万 Hz のレートで制御される。典型的な動的なレーザラインアート投影システムでは、投影対象の動きはカメラによって検出され、その測定値をもとに現在の投影対象の姿勢が推定されると、ガルバノスキャナに送信する一連の時系列データが更新される。更新レートはベクタ画像のフレーム時間によって制限されるため、低遅延の制御は困難である。図 1 に提案システムのパイプラインを示す。提案システムではベクタ画像のフレームの時系列データ全体を一度に更新する代わりに、推定された投影対象の姿勢を用いて、レーザの輝点の現在位置を即座に更新することで制御遅延を最小化する。

高速カメラは数百 Hz のレートで投影対象の動きを追跡するために用いられ、投影対象の姿勢は予測と補間によって数 kHz のレートで推定される。ソース座標値は最新の姿勢情報によって座標変換され、その後ミラー角度の制御値へと写像される。

## 3. システム実装

座標変換と制御値への写像の適用は数十 kHz 以上のレートで実行されなければならないが、それを PC によるソフトウェア制御で実現することは非常に難しい。ソフトウェア制御に起因するタイミング違反は、レーザラインアートの輝度の意図しない変動や経路を構成する点の欠落など、提示されたラインアートの品質の劣化を引き起こす。その劣化を避けるため、FPGA にこれらの機能を実装した。ハードウェアとして、Kagami らが開発した低遅延ホモグラフィ変換投影システム [6] の制御機器の一部を再利用した。文献 [6] のシステムでは座標変換がホモグラフィ変換に限定されているが、本研究で実装したシステムでは任意の三次元座標に対して剛体変換を適用して座標変換を実行する。

実装したシステムは剛体変換エンジン、レーザユニット (Quarton 製 VLM-635-32-Series), ガルバノスキャナ (GSI 製 VM500+), ドライバ (GSI 製 MiniSAX Driver), D/A 変換器 (Analog Devices 製 AD667), PC (サードウェーブ

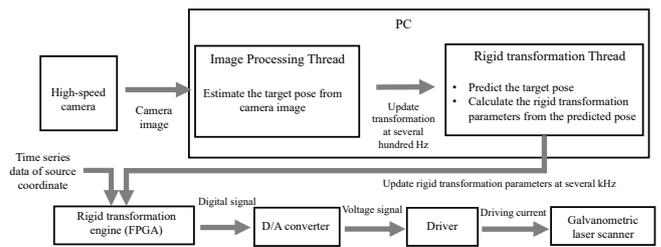


図 2: 提案するシステムのブロック図

製 GALLERIAZA9C-R39), 高速カメラ (Basler acA720-520um) からなる。高速カメラの最大フレームレートは 524 fps であり、D/A 変換器は 12bit デジタル値が  $\pm 5V$  に対応するように設定されている。ガルバノスキャナとカメラは横並びに設置され、両者の相対的な姿勢は事前にキャリブレーションされている。

実装したシステムのブロック図を図 2 に示す。PC では画像処理スレッドと剛体変換スレッドの二つのスレッドが並列的に実行される。画像処理スレッドはカメラ画像から投影対象の姿勢を推定し、その結果を剛体変換スレッドに送信する。この画像処理スレッドはおおよそ高速カメラのフレームレートで実行される。剛体変換スレッドは投影対象の過去の姿勢情報を保持しており、それらの情報から線形外挿を行うことでカメラレート以上の約 8k Hz で姿勢を推定する。推定した姿勢から算出された剛体変換パラメータは USB2.0 経由で剛体変換エンジンに送信される。

剛体変換エンジンは XILINX Kintex-7 FPGA に実装されている。剛体変換エンジンでは、SDRAM から読み出された、ソース画像を構成する点からなる時系列データに対して順に剛体変換を適用することで目標とする投影点に変換する。目標投影点の三次元座標は事前にキャリブレーションされた多項式モデルを用いて 12bit の制御値に変換され、外部の D/A 変換器に出力される。剛体変換エンジンの一連の処理はガルバノスキャナの制御レートであるおおよそ数十 kHz 以上のレートで実行される。USB 経由で新たな剛体変換パラメータを受信すると FPGA 内部に保存された剛体変換パラメータは即座に更新され、次の変換に用いられる。

デモンストレーションとして、運動する物体表面へ鳥の形のラインアートを追従投影した様子を 60 fps のビデオカメラで撮影した際の 6 連続フレームを図 3 に示す。図中のベクタ画像は 338 点で構成されており、カメラフレームレートと制御信号の送信レートはそれぞれ 524 fps, 14.3 kHz とした。剛体変換スレッドでの剛体変換パラメータの更新レートは平均 8759 Hz であった。また、システムの遅延を保証するために投影対象の剛体変換は常に 4.5 ms 後の投影対象の姿勢の予測値をもとに算出した。

## 4. 形状の一貫性に関するユーザ評価

提案手法ではレーザラインアートの経路をその描画中に投影対象の姿勢に適応するように更新するため、理想的にはある時刻におけるレーザ輝点は常に投影対象のローカル

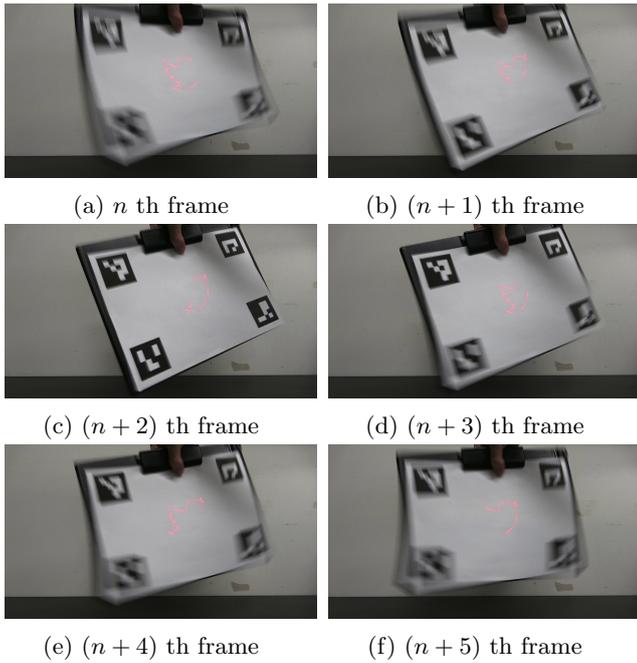
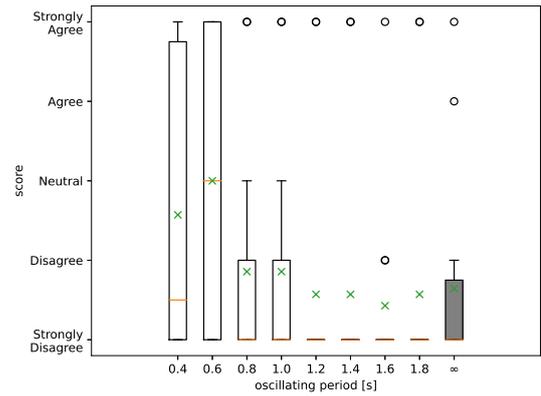


図 3: 運動物体表面へのラインアート追従投影

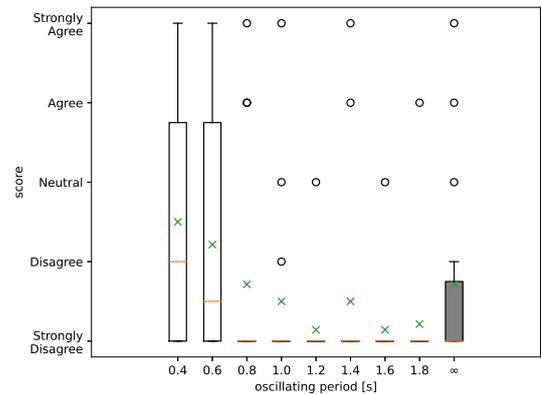
座標系上に固定されたベクタ画像の経路上に存在する。ただし実際にはシステムによる経路の更新が非連続的に行われるためレーザー輝点の位置には多少の変動が生じる。提案手法のそのような特性により、実際に投影されたレーザーラインアートの経路はユーザから見て、すなわち世界座標系においては意図したベクタ画像の経路とは一致しない。我々が提案するシステムはラインアートの経路を描画途中に更新した場合でもユーザはラインアートが同じ形状を保ったまま運動する知覚するという仮説に基づいている。そこでレーザーラインアートの形状の歪みについて、二種類の評価実験を実施した。

実験 1 としてラインアートの運動速度の変化に伴う形状の歪みについて評価を行った。実験ではラインアートを運動する物体に追従させる代わりに、計 2000 点から構成される一辺が 3 cm の正方形のベクタ画像をフレーム時間 20 ms でボード上に投影し、その投影画像を水平方向に振幅 ± 5 cm で単振動させた。参加者はおよそ 1 m 離れた位置から運動するレーザーラインアートを観察し、振動周期の異なる各条件で同一の 6 問の設問にリッカートの五段階評価で回答した。レーザーラインアートの振動周期は 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 [s] と静止状態である ∞ [s] の計 9 条件とした。参加者は最初に静止状態のラインアートを観察し、その後に振動するラインアートをランダムな順序で観察した。本実験では経路の更新速度による影響を最小限に抑えるため、更新間隔はシステムで実現可能な最短の時間に設定した。本システムの最短更新間隔は約 100 μs であった。本稿では紙面の都合上、三つの設問のみ結果を報告する。

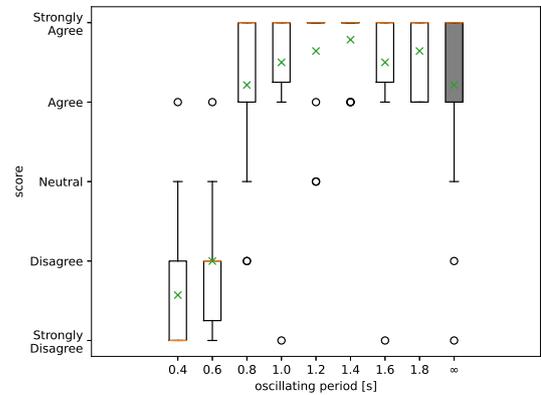
図 4(a)(b)(c) にそれぞれ「辺が直線ではなく波線のように見える」「辺が途中で途切れているように見える」「隣り合う辺が直交しているように見える」という設問に対する



(a) 設問「辺が直線ではなく波線のように見える」



(b) 設問「辺が途中で途切れているように見える」



(c) 設問「隣り合う辺が直交しているように見える」

図 4: 振動周期による設問の評価の変化

評価結果の箱ひげ図を示す。図中の橙線は中央値、緑 x 印は平均値を示している。図 4(a)(b) では、振動周期が短くなるほど評価が悪化する傾向が見られたが、全体的には設問の内容に対してはおおよそ否定的な評価が得られた。ラインアートの運動速度が高速になるほど一回当たりの経路の更新量が大きくなり、その結果、参加者は線分が波打っていたり、途中で途切れていると知覚したと考えられる。図 4(c) では、ラインアートの振動周期が 0.8 s 以上の範囲では静止時とほぼ同等の評価であったのに対し、0.6 s 以下の範囲では評価が大幅に悪化した。本システムの特長により、走査されるレーザー輝点の移動方向はラインアート全体の移

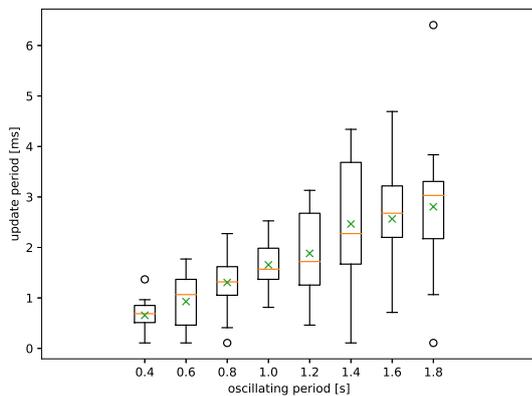


図 5: 最短更新周期と同様に知覚される更新周期の上限

動方向に引き伸ばされ、その度合いは運動速度が速いほど大きくなる。振動周期が 0.6 s 以下のようなラインアートが高速に動く場合、レーザー輝点が正方形の縦の辺を走査する間に水平方向に大きく移動することで縦の辺が傾斜し、参加者は隣り合う辺が直交していないと知覚したと考えられる。また、評価が急激に悪化したことから、ある有限の更新速度に対してラインアートが静止時と同等に知覚されるような運動速度の上限が存在する可能性が示唆された。

実験 2 として形状の歪みを知覚する経路の更新頻度の閾値を計測した。実験 1 と同様に正方形のベクタ画像を振動させた。参加者は投影されているラインアートのテスト画像の経路更新周期を調節でき、また、好きなタイミングで更新頻度が最短であるリファレンス画像とテスト画像を切り替えることができる。切り替え操作後 0.5 秒間はラインアートは投影されない。本システムでは更新周期を長くするほど、ラインアートの線が波打つ、途切れるといった現象が見られる。参加者は実験 1 から静止条件を除いた振動周期の各条件でリファレンス画像とテスト画像を見比べながらテスト画像の更新周期を調節し、テスト画像がリファレンス画像と同様に知覚される最長の更新周期を決定した。参加者が把握している情報は更新周期の増減の方向と現在提示されている画像がテストか否かの情報のみであり、現時点での具体的な更新周期は提示されていない。また、実験はランダムな振動周期の順序で実施された。

図 5 にレーザーラインアートの各振動周期で最短の更新周期と同様に知覚される最長の更新周期の箱ひげ図を示す。図中の橙線は中央値、緑 x 印は平均値を示している。図より、最短の更新周期と同様に知覚される更新周期の上限は、レーザーラインアートの振動周期が短くなるほど短くなる傾向が見られた。同一の更新周期ではラインアートの運動速度が高速になるほど一回当たりの経路の更新量が大きくなるため、振動周期が短くなるほどリファレンス画像との差異が知覚される更新周期が短くなったと考えられる。よって実装したシステムで実現可能な最短の更新周期で投影されたリファレンス画像に乱れが生じていないと仮定すると、形状の乱れが知覚されないようなラインアートを投影するためには、実験によって求められた更新周期程度のレートで

制御信号を生成すれば十分であり、想定されるユースケースによっては要求されるシステム性能の要件が緩和される可能性がある。

## 5. 結言

本研究ではランダムに運動する投影対象に対してレーザーラインアートを高速に追従投影させる手法を提案し、そのシステム実装を行った。さらに、システム特性に起因するラインアートの形状の歪みについて評価実験を実施し、ラインアートの運動速度と更新周期と知覚される形状の歪みの関係性について論じた。

今後は実際に運動する投影対象に対してレーザーラインアートを追従投影させた際のユーザの知覚について評価する予定である。また、本システムの特徴を活かした新たな投影コンテンツの提案も今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は科研費 19H04146, 22H03622, および 21H05298 の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] S. Peter, L. Samson, S. Narayanan, "PROJECT HVECT," *International Journal Of Advanced Research in Basic Engineering Sciences and Technology (IJARBEST)*, Vol. 3, Special Issue 29, pp. 93–98, Mar. 2017
- [2] P. Pjanic, S. Willi and A. Grundhöfer: "Geometric and Photometric Consistency in a Mixed Video and Galvanoscopic Scanning Laser Projection Mapping System," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, no. 11, pp. 2430–2439, Nov. 2017
- [3] A. Grundhöfer, D. Iwai: "Recent Advances in Projection Mapping Algorithms, Hardware and Applications," *Computer Graphics Forum*, Vol. 37, Issue 2, pp. 653–675, May. 2018
- [4] M. Iuchi, Y. Hirohashi and H. Oku: "Proposal for an aerial display using dynamic projection mapping on a distant flying screen," *2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 603–608, 2023
- [5] S. Kagami, K. Hashimoto: "A full-color single-chip-DLP projector with an embedded 2400-fps homography warping engine," *SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies (SIGGRAPH '18)*, Article No. 1, 2018
- [6] S. Kagami, K. Hashimoto: "Animated Stickies: Fast Video Projection Mapping onto a Markerless Plane through a Direct Closed-Loop Alignment," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 25, no. 11, pp. 3094–3104, Nov. 2019