

東京大学
情報理工学系研究科 創造情報学専攻
博士論文

高速移動環境下における
アクティブビジョン技術とその応用

早川 智彦
Tomohiko Hayakawa

指導教員 石川 正俊 教授

2016 年 2 月

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	高速移動環境下の定義	1
1.3	高速移動環境下におけるセンシングの意義	3
1.4	高速移動環境下におけるセンシングの問題点	4
1.5	高速移動環境下におけるセンシングシステムの例	10
1.6	高速移動環境下における日常的点検システムの要求仕様例	12
1.7	動的なセンシング技術：アクティブビジョン技術	13
1.8	本論文の目的と構成	16
第 2 章	モーションブラー補償装置	18
2.1	モーションブラーを補償することの重要性	18
2.2	モーションブラー補償手法の比較	19
2.3	モーションブラー補償装置の動作原理	26
2.4	相対角速度算出の高速・高精度化	27
2.5	高速性の評価：応答時間測定	33
2.6	本システムによる高速移動体に対する画像撮影	37
2.7	モーションブラー補償装置の応用用途拡張に向けた課題	40
2.8	本章のまとめ	41
第 3 章	プリアンファシス技術を利用した高時間分解能モーションブラー補償装置	42
3.1	従来のガルバノミラーの追従精度向上手法	42
3.2	プリアンファシス技術によるガルバノミラーの正弦波追従精度向上手法	46
3.3	プリアンファシス技術による高速性向上の評価：周波数応答測定	50
3.4	プリアンファシス技術を利用したモーションブラー補償システムの性能評価	52
3.5	考察と今後の展望	54
3.6	本章のまとめ	54
第 4 章	インフラ維持・管理におけるモーションブラー補償装置の応用	56
4.1	インフラ維持・管理におけるモーションブラー補償装置の導入	56

ii 目次

4.2	モーションブラー補償装置導入に向けた課題	57
4.3	通常車両を利用したモニタリングシステムの開発（猿投山トンネル）	58
4.4	高速道路における法定速度（最低速度）への対応（カルバートボックス）	64
4.5	高速道路における法定速度（最高速度）への対応（舟原トンネル）	70
4.6	公道でのシステムの利用（坂下トンネル）	75
4.7	実用化に向けた今後の課題	81
4.8	実用化後の波及効果予測	82
4.9	本章のまとめ	82
第 5 章	線形運動モデルに基づく GNSS 誤差範囲減少手法	84
5.1	高速移動環境下における自己位置推定の重要性	84
5.2	自己位置推定手法の比較	85
5.3	GNSS 誤差範囲減少手法	86
5.4	実験による評価	89
5.5	自己位置推定精度向上に向けた課題	95
5.6	本章のまとめ	96
第 6 章	誘電エラストマーを用いた光線位置制御に基づく三次元計測手法	98
6.1	背景	98
6.2	DEA の厚み制御によるレーザー照射位置制御手法の原理	101
6.3	予備実験：誘電エラストマーの透過率測定	103
6.4	基礎実験：DEA の厚み制御によるレーザー照射位置制御実験	103
6.5	応用実験：DEA を利用した三次元センシングのスキャニング	108
6.6	本章のまとめ	110
第 7 章	結論	112
	発表文献と研究活動	115
	参考文献	117

第 1 章

序論

カメラ等のセンシングデバイスは、主に静的な環境で用いられてきており、動的な環境では使用が敬遠されてきた。一方、動的な環境でのセンシングが可能となることにより、従来困難であった高速移動しながら効率的に各種データを取得することが可能となると考えられる。そこで本論文では、高速移動環境下における二次元画像撮像技術の形成及び応用を主眼とし、自己位置推定、三次元計測/光軸制御といった関連技術についても開拓していく。

1.1 はじめに

地球上では、日々人や物の移動が目まぐるしく繰り返されている。マクルーハン曰く足が延長されていると表現されているように [1]、移動環境の整備により、生活空間は拡張され物流の促進が進んできた。特に高速道路、線路等のインフラ上では、人や物のどちらも元来効率良く運ぶことが可能であり、その速度が速ければ速いほど高い効率性を手に入れることができる。また、そのような移動環境下では、運搬や移動だけでなく、インフラもしくは周辺環境を対象とする何らかの情報のセンシングも、移動速度の向上に伴い高い効率で実施可能と考えられる。一方で、高速な移動は一般的にセンシング精度の劣化を生じさせ、結果として不完全データの取得を招く。これに対し本論文では、主に動的な対象を撮像可能とする「アクティブビジョン技術」[2] を応用することで、二次元画像撮像を中心とした高速性と高精度性を両立可能な手法について考えていく。

1.2 高速移動環境下の定義

本論文における「高速移動環境下」とは、図 1.1 のように、センシング対象及びセンシングシステムのどちらか片方もしくは両者が高速に動く状況が想定されている。また、高速に動くことから、何らかの直線的な移動環境上での移動と考えられるため、移動の方向は一次元である。このため、センシング対象とセンシングシステムの速度を統合して、速度は下記の式のようにより相対速度 v_r として表す。

2 第1章 序論

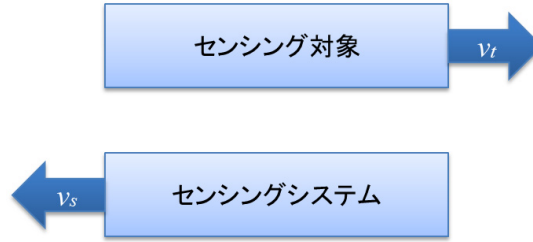


図 1.1. 移動環境下におけるセンシングシステムとセンシング対象

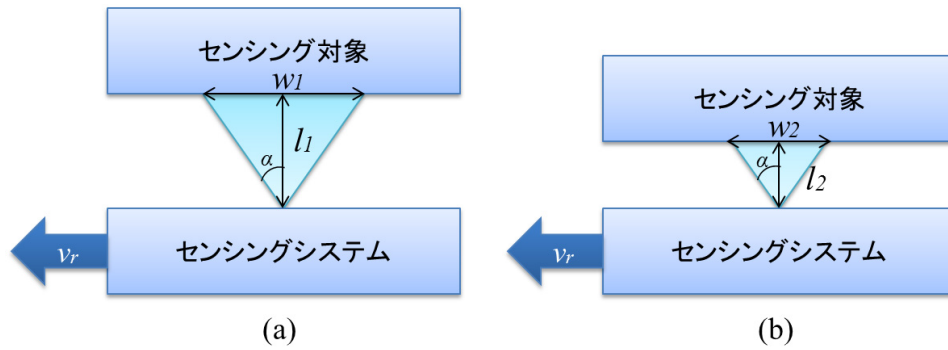


図 1.2. 距離の異なる移動環境下におけるセンシング範囲角 α を有するセンシングシステムとセンシング対象. (a) 距離が l_1 でセンシング幅が w_1 の関係. (b) 距離が l_2 でセンシング幅が w_2 の関係.

$$v_r = v_s + v_t \quad (1.1)$$

一次元での移動であるため、センシング対象としてはインフラやベルトコンベア、もしくはそのような移動環境上を移動する車両等が考えられる。

移動速度は v_r によって表わされると説明したが、カメラ等の一定のセンシング幅（この場合画角に該当する）を持ったセンシング機器を利用する場合、センシング対象とセンシングシステムの距離も考慮してセンシングについて検討する必要がある。たとえば、図 1.2(a)(b) のように、移動速度 v_r とセンシング機器の視野 α が同一であり、対象までの距離が l_1 と l_2 で異なる状況では、一定時間にセンシングする範囲は図中 w_1 と w_2 となり異なる。距離が近い方が対象をより細かくセンシングできる（高空間分解能）一方で、より細かい点におけるセンシングとなるため、1 点あたりのセンシング時間が短くなる。センシング時間の低下は S/N 比を低下させ、精度の低下を招くため、 v_r だけでなく距離 l についても今後のシステム要件として考慮したシステム設計を行っていく。

1.3 高速移動環境下におけるセンシングの意義

高速移動環境下を実現するインフラの例として、日本の高速道路について考える。車両の移動速度は最速で時速 100km に達する。マクロな視点で見ると東京・名古屋間約 350km を単純計算で 3 時間半で結ぶのに対し、ミクロな視点で見ると 1ms の間に 2.8cm 進む速度である。こうしたインフラを人や物の移動手段として考えたとき、移動する車両等が多ければ多いほど、インフラそのものが活発な経済を支える大動脈であるといえるが、一方で大動脈であるが故に、経済的損失や二次的な事故を避けるため、頻繁に規制をかけることが難しいといった事情も同時に存在する。

ところで、高速移動環境下におけるセンシングは国家的な課題として検討されており [3]、結果として様々な形で得られるデータの活用が期待されている。センシング対象として、インフラ及びインフラ周囲の外界が考えられ、前者は主にインフラの安全確認のための点検、後者は主に移動環境における視覚を通じた移動の疑似体験を提供するサービスのデータベース構築をそれぞれ目的としている。

そうしたセンシング対象の情報としては、二次元画像、位置情報、距離情報、振動情報、温度情報等が用途に応じて考えられる。図 1.3 に、インフラにおけるセンシング機器を搭載した車両によるセンシングのイメージ図を示す。この図に示すように、高速移動環境下でセンシングを行うことは、構造物のひび割れ検出及びネジ等の緩み検出によるインフラの安全性向上や、効率的な外界情報の取得だけでなく、車両の位置情報と連動したセンシングデータの取得に寄与し得るものと考えられる。しかしながら、一般的にセンシングは、移動によるセンシング精度低下の影響を受けることが知られている。これは、ある一定時間において特定の対象の状態を取得するためであり、移動中だと対象が変化してしまうためである。特に高速移動環境下では、センシングを極めて短時間に終わらせるか、もしくは移動速度を下げたセンシングすることで、この影響を避けてきた。しかしながら、センシングを短時間で行うと、対象の情報を十分に得られず、結果として S/N 比の低下を招いてしまう。また、移動速度に関しては、先述したように道路の規制をかけて静止状態を作り出すことは難しく、仮に規制をかけられた場合でも、人力で歩行と静止を繰り返してインフラの二次元画像を撮像、もしくは目視による対象の確認をし続けることを考えると、時速 100km と比べ歩行速度の時速 4km では 25 倍もの時間的コスト増を招く。

こうしたことから、高速移動環境下でもロバストに対象をセンシング可能な手法を確立することは、センシングの効率そのものを向上させるだけでなく、同時に経済的損失や二次的な事故を避けることが期待され、大きな意義があると考えられる。

本論文では、センシングする情報として主に二次元画像を対象とした方法論の確立及びシステムの開発を実施していくと同時に、位置情報、距離情報についても方法論の確立を目指す。

4 第1章 序論

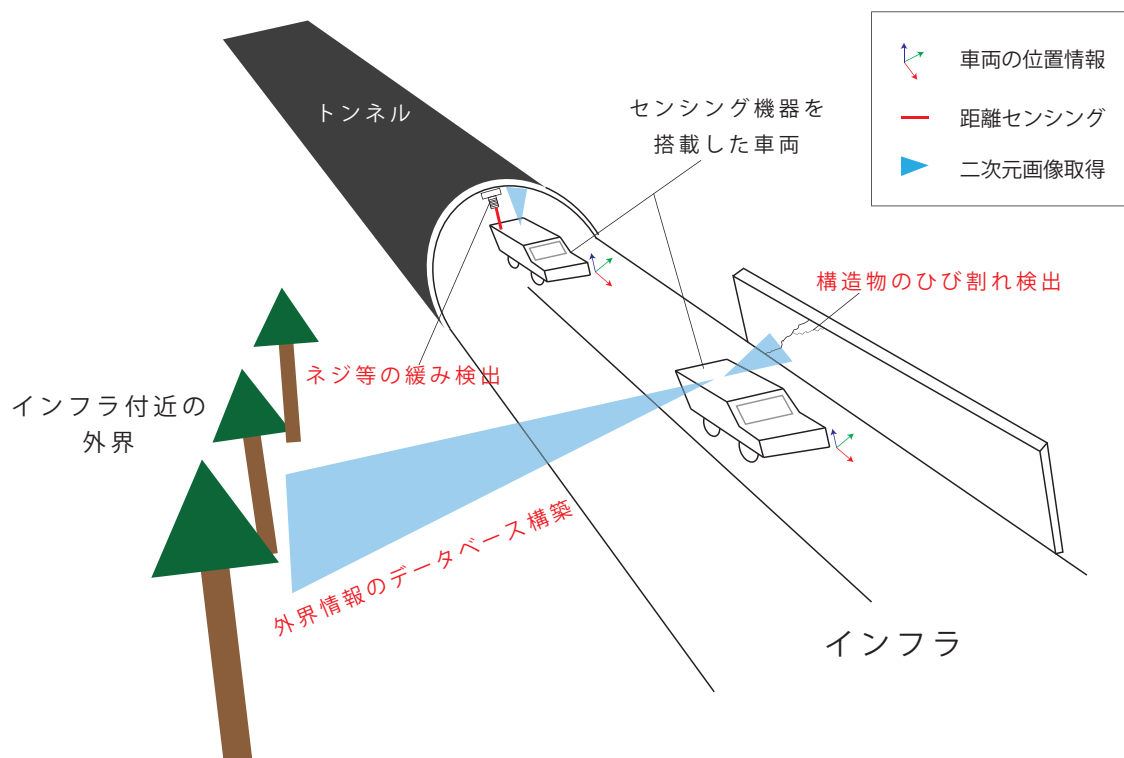


図 1.3. 高速移動環境下におけるセンシングの一例

1.4 高速移動環境下におけるセンシングの問題点

1.4.1 各問題点とその概要

モーションブラー

前述したように時速 100km で移動すると、仮にセンシング時間が 1ms だとしてもセンシング中に 2.8cm も進んでしまう。そのため、2.8cm の移動を許容するシステム設計が欠けると、センシング機器ではセンシング時の誤差が生じてしまうものと考えられる。具体的に、二次元の画像撮影において、こうした移動によって取得画像に生じるぶれのことをモーションブラーという。

サンプリングレート不足

また、対象に関するデータベースを構築するといった目的で、対象を隙間なく連続的にセンシングする必要がある場合、時速 100km で 1ms の間のセンシングでは、2.8cm の移動が完了する前に、次のセンシングプロセスを開始しなければならない。サンプリングレートは速ければ早いほど連続的に対象をセンシングできることから、前記の目的のためには高いサンプリングレートが求められる。また、低いサンプリングレートでは隙間の空いたデータベースができあがってしまう。

自己位置の変化

他に問題点として、センシングシステムが高速移動を行うことで、結果としてセンシングシステム自身の自己位置が変化してしまうことが挙げられる。自己位置情報は、二次元画像といったその他のセンシングデータを取得した場所を特定するために用いられるため、センシングデータを空間的に再構成するシステム・サービスには欠かせない。しかしながら、例えばGNSSによる絶対位置情報を取得する場合を考えると、高速移動中であると自己位置情報取得のサンプリング周期に対して位置情報の変化が相対的に大きくなってしまうため、センシング誤差が大きくなると考えられる。また、撮像画像を利用したヴィジュアルオドメトリによる相対位置情報取得を考えると、移動速度に応じたモーションブラーによって精度が低下してしまう。

振動

最後に、センシング機器の移動に伴い生じる振動の影響についても問題点として挙げる。例えば、高速道路はアスファルトで舗装されているため、一定の平坦性が担保されていると考えられるが、一方で完全にフラットな道路は車両と地面との間に摩擦が生じにくくスリップの原因となってしまうことから存在せず、ある程度の凹凸が存在している。それだけでなく、経年劣化によるイレギュラーな穴やひび割れ、高速道路の区間毎のジョイント部分等の影響を受けて、車両は走行中常に振動している。

以上の4つの問題点のセンシングに与える影響について、以降でより詳しく考察していく。

1.4.2 モーションブラーによる空間分解能の低下

モーションブラーに限らずぶれは、芸術的な演出として写真や映像に手法として用いられることがあるが[4]、ビジョンシステムにおいては検出・認識率を著しく低下させる大きな要因となっている。画像におけるモーションブラーは式1.2で表される。ここで、 K はブラーカーネル、 N はノイズ、 I は元の輝度情報、 B は最終的に取得される画像である。

$$B = I \otimes K + N \quad (1.2)$$

ある程度S/N比が高く保たれる撮影環境において N は0に近似され、 I はピクセル毎に K に応じて周辺画素の輝度の畳み込みが行われ、最終的に B が画像として出力される。ここで、 K のサイズはモーションブラー量に比例しているため、移動速度 v と定数 c によって表記が可能である(式1.3)。

$$|K| = cv \quad (1.3)$$

特に、 v の値が大きくモーションブラーが著しく生じる環境では、情報が全体的に均一化され、空間分解能の低下を招く。仮にカメラを搭載した車両が時速100kmで走行する際、車両

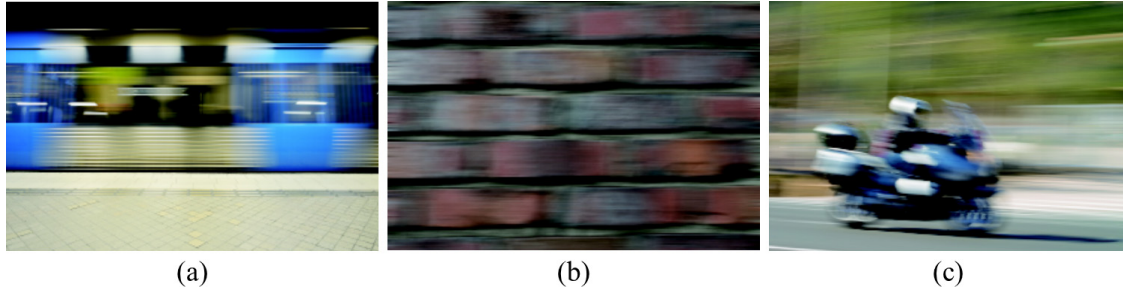


図 1.4. モーションブラーの分類. (a) 対象が動くケース. (b) カメラ系が動くケース. (c) 両者が動くケース.

は 1ms の間に 2.8cm 進むので，カメラ 1 画素当たりの空間分解能を 0.1mm/pixel としたとき，撮像画像内では周囲 280 ピクセル分の影響を受けたモーションブラーが生じることとなる．1.2 節の l の変化に関連して，ここで空間分解能を下げる場合を考えてみると，モーションブラーの影響は低下する傾向となるが，空間分解能を犠牲とするため，対象の詳細情報の取得が困難となる．特に，点検等の高い空間分解能が要求されるシステムでは，モーションブラーの影響をいかに防ぎ点検効率の向上を実現できるかがシステムの性能評価の指標となると考えられ，モーションブラーを補償するシステムのニーズが存在していた．

ところで，このモーションブラーは，カメラ系と対象との位置変化の関係性によって，図 1.4 に示すように，(a) 対象が動くケース，(b) カメラ系が動くケース，並びに (c) 両者が動くケースの 3 種類に分類される．本論文では，幅広い応用を可能とするため，(c) 両者が動くケースに対応したシステム開発を目指すことをここで断っておく．それに伴い，カメラと対象の位置変化を同時に扱うため両者を統合し，処理上相対的な位置変化として演算を行うものとする．2 章及び 3 章では対象が動く状況でシステムを検証し，4 章ではカメラ系が動く状況でシステムを検証していくことから，各章の実験を通して補完的に，相対的な位置変化に対するモーションブラー補償手法及びシステムを確立していく．

1.4.3 サンプリングレート不足によるセンシング漏れ

高速移動環境下において巨大な対象を連続的にセンシングしていく場合（例えばインフラ等の構造物そのものやインフラの周囲の風景等），隙間なく対象をセンシングすることで，データベースとしての利用価値が向上すると考えられる．しかしながら，センシングを行うためにはセンシング機器自身のサンプリングレート f が存在するため，この f が移動速度帯域をカバーしていない限り，データ間に隙間が生じてしまう．ここで，隙間とサンプリングレート f の関係を下記の式 1.4 と図 1.5 で表す．

$$w \geq \frac{v}{f} \quad (1.4)$$

カメラをセンシング機器として想定し，カメラの移動方向と同一方向にセンシング幅 w を持つと仮定すると，この w が式 1.4 を満たす限り，隙間なくセンシングを行うことが可能だ

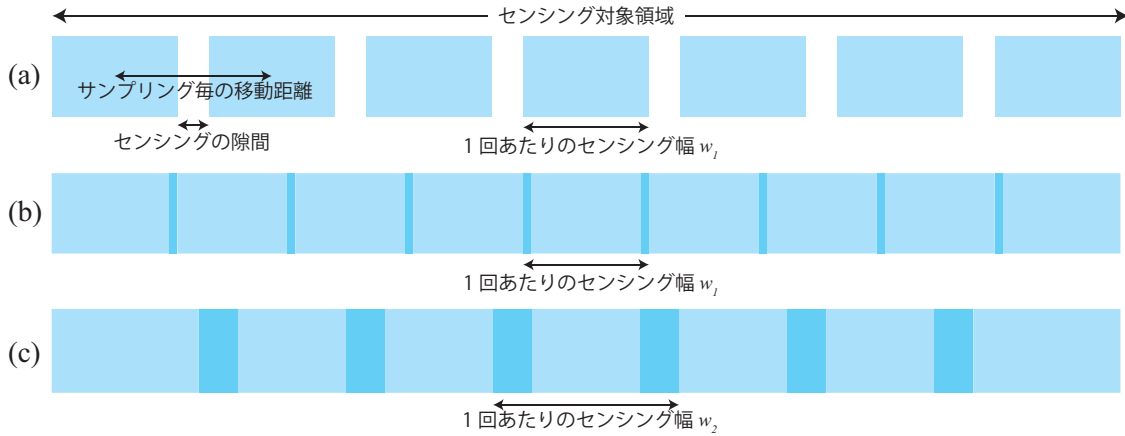


図 1.5. カメラが水平方向に移動しているとき、サンプリングレート f と幅 w によって変化するセンシングの隙間の様子. (a) センシング幅を w_1 、サンプリングレートを f_1 としたとき. (b) センシング幅を w_1 、サンプリングレートを f_2 としたとき. (c) センシング幅を w_2 、サンプリングレートを f_1 としたとき.

といえる．仮に v が時速 100km で f が 1000fps のカメラで対象を撮像した場合、 w として最低でも画角 2.8cm のセンシング幅のカメラ及びレンズ構成とする必要がある．逆に考えると、対象面でセンシング幅 2.8cm となるレンズを搭載したカメラを進行方向と垂直に向けている場合、隙間のない撮影を行うためには最低でも 1000fps 必要ということになる．ここで、 f に反比例して必要な w の値が大きくなることから、二次元画像撮影では図 1.5(c) のように単純に広角レンズを使用すれば隙間のないセンシングが可能となるが、一方で代償として空間分解能の低下が起きてしまう．前節で説明したモーションブラーと同様、空間分解能の低下は対象の詳細情報取得を困難としてしまうため、本質的な解決手法といえない．そのため、高速移動環境下におけるセンシングにおいて、図 1.5(b) のようにサンプリングレート f を向上させる手法について検討していく必要がある．

1.4.4 自己位置情報の変化

位置情報は主に絶対座標と相対座標に大別されるが、このうち絶対座標は地理情報のことを表している．図 1.6(a) のように絶対座標は地球上の緯度と経度及び高さによって表される．これに対し、図 1.6(b) のように、相対座標はある基準点からどの程度離れているかを表す量といえる．基準点さえあれば相対座標も絶対座標に変換可能であり、限定された空間もしくは室内においてこうした相対的な座標を利用するシステムは有効であると考えられるが、測位済みの基準点の数は限られていることから、移動しながらセンシングするシステムにおいては絶対座標の取得を行うことが原則的に必要だと考えられる．また、本研究の応用対象として検討しているトンネル内でのセンシングでは、電波が入らないため相対座標の取得も同時に必要となる．

ここで、高速移動環境下において、特にセンシング機器自身が移動している状況では、セン

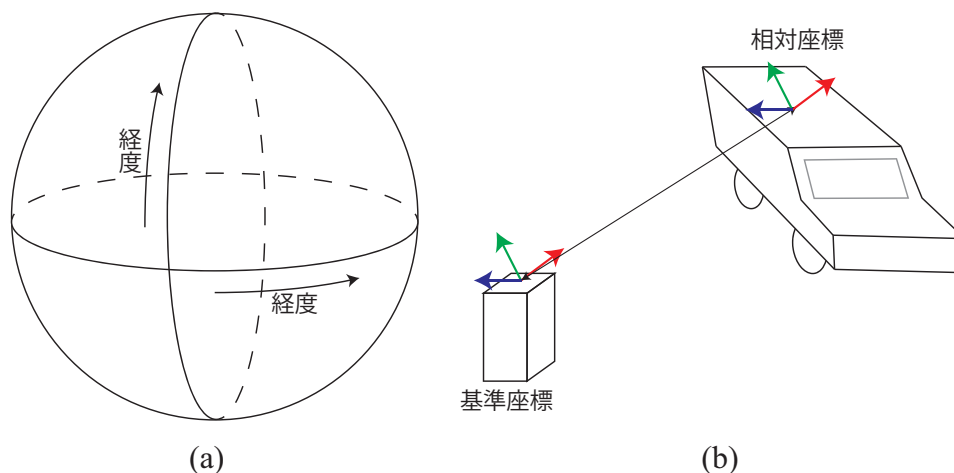


図 1.6. 2つの自己位置推定方式の比較. (a) 緯度経度による絶対座標の表現方式. (b) 基準座標点を利用して相対座標を絶対座標に変換する方式.

シング機器の自己位置が刻々と変化する. そのため, 例えば移動しながら二次元画像をセンシングし, 位置情報と結びつけたデータ活用を考えたとき, 高精度の自己位置情報の取得が必要となる. 自己位置情報には相対座標と絶対座標があるが, このうち本研究では相対座標ではヴィジュアルオドメトリ手法, 絶対座標ではGNSSを利用したセンシングを対象として考察していく. 特に高速移動環境下では, 画像撮像時にモーションブラーも生じてしまうためヴィジュアルオドメトリ手法による相対座標の位置精度が低下すると考えられ, また, 移動速度の高速化に伴い単位距離あたりのサンプリング回数が減ってしまうことから, GNSSによるセンシングデータの誤差の影響により絶対座標の位置精度も低下すると考えられる.

そこで, 本論文では高速移動環境下でいかにして精度の良い自己位置情報を得られるかについて検討を行っていく.

1.4.5 振動によるセンシング機器の測定誤差

図 1.7 のように, モーションブラーは高速移動環境下における進行方向への移動で連続的に生じるセンシング精度劣化要因であるが, これに対し振動は進行方向に対して垂直方向にランダムに生じるセンシング精度劣化要因であるといえる. 車両の移動に利用されるインフラは, 走行に適した状態であるため表面は平らに設計されているが, 厳密に平らとはいえない. 電車は高速道路と比べ, レール形状になっているために平面度が高いと考えられるが, それでもレール間の連結部は, 温度変化によるレールの破損を防ぐため余裕を持って設計されており, 走行時には振動が必ず生じる設計となっている. さらに, 高速道路ではアスファルトの舗装されていることによる表面の平坦度の限界や経年劣化等により, 表面の凹凸はレール以上に存在している. このため, インフラにおいて振動の影響について何かしら考慮する必要があると考えられる. モーションブラーと異なり, 振動はインフラの表面状態に依存するため, 定量的な考察には限界があるが, 少なくとも高速移動環境下におけるセンシング機器は, 常に何らかの

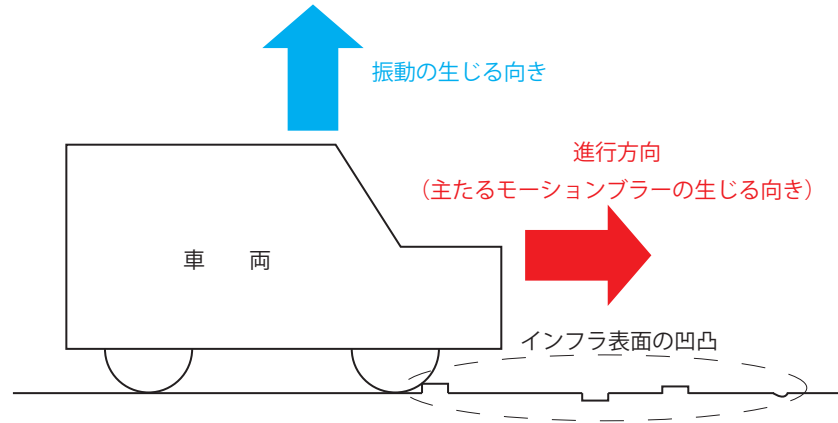


図 1.7. 進行によって生じるモーションブラーの向きと振動の生じる向きについて

形で振動の影響を受けると考えられる。

ある路面を走行した際にセンシング機器に生じる振動の帯域を f_v とする。一般的に、この振動の帯域がセンシング機器のセンシング帯域 f_s よりも低速帯域であれば、振動中の振幅 A_v の影響を受けにくいと考えられる。例えば、二次元画像センシングにおける 1 ピクセルあたりのサイズを h としたとき、下記の式を満たすことで、振動によって進行方向とは垂直方向に生じる画像中のモーションブラーを防ぐことができると考えられる。

$$h \geq \frac{A_v}{4f_v f_s} \quad (1.5)$$

このため、センシングシステムにおいて振動によるモーションブラーの影響を避けるためには、 A_v を低い値とすること、及び f_v もしくは f_s を大きな値とすることが求められる。ただし、インフラの点検で使用される車両は通常の市販されている車両と異なり、振動及び路面状態そのものを計測することを目的としてサスペンションがきつく設計されており、路面状態を計測するために通常よりも車両は振動の影響を受けやすくなっている。さらに、振動情報は前節の自己位置推定の情報と整合性が取れることで、どこで振動が生じたかを瞬時に把握することができ、これによりインフラの修繕を効率良く行うことが可能になると考えられる。

また、近年本論文でテーマとしているような動的な環境下での撮像に対応するため、適応的な光学系が利用される機会が増えてきているが、一部の光学系では駆動方式として液体を採用している。液体による光学系の部品設計は、固体と比べ形状変化しやすい特性があるため、高速帯域で大きなストロークが必要な用途との相性が良いと考えられるが、一方で移動によって生じる振動の影響を受けやすいという特徴がある。特に光学系は小さな設計値とのズレがシステム全体のスペックダウンにつながるだけでなく、再現性が保証されなくなる可能性があるため、高速移動環境下では液体材料を用いず、固体材料での光学系を用いることが必須と考えられる。

1.5 高速移動環境下におけるセンシングシステムの例

これまで述べてきたように，高速移動環境下におけるセンシングでは様々な問題が考えられるが，一方で，こうした諸問題に対応する仕組みはこれまでに検討されてきた．センシング機器として，主に二次元画像のセンサ=カメラが用いられていることから，ここでもカメラを利用した各センシングシステムを紹介していく．

1.5.1 センサをインフラに取り付ける方式

インフラ自身にセンサを取り付ける例として，身近に見られるのは Orbis 等の固定式カメラの存在が挙げられる．定点で観測して特定の対象の特定の時間の様子をセンシングする場合には適しているといえるが，設置箇所毎に初期費用がかかってしまうことが問題として挙げられる．特に，本論文で検討している点検や外界のデータベース構築といった目的に対して，センシング対象の領域全てに対してセンサを設置しなければならないことから，初期費用が莫大になってしまうと予想される．また，一度設置した後はインフラを規制することが難しいため，メンテナンスや仕様の変更が困難であると考えられる．こうしたことから，全域を対象とした二次元画像のセンシングに固定式のカメラを用いることは適切な手法ではないと考えられる．

1.5.2 移動式の車両方式

移動式の点検車両

固定式の二次元画像センシング手法に対し，移動式の点検車両を用いた二次元画像センシングシステムは既にいくつか報告されており [7, 8, 9]，点検にかかる時間や人的コストの削減に成功している．これらのシステムでは非常に強力な照明を照射し，非常に限られた時間で露光することで，モーションブラーを生じさせない手法を撮ってきた．しかしながら，1.2 節で触れたように，強力な照明は大量の電力が必要なだけでなく，強力な照明は他のドライバーに対してよそ見を誘発する等の何らかの事故を誘発する可能性がある．それだけでなく，点検が目的のシステムであるにも関わらず，比較的広角のレンズを仕様することで空間分解能が犠牲となっている．例えば，イーグルは 1.0mm のひび割れを検出する仕様となっており [9]，ひび割れの点検仕様である 0.2mm[12] を大幅に上回る分解能となっているため，空間分解能を上げる必要があると考えられる．こうしたシステムにおいて低い空間分解能を採用している理由として，モーションブラーの軽減と対象のセンシング領域に対し漏れ無くセンシングを行うことが挙げられる．

移動式の外界センシング車両

地理情報と二次元画像情報を合わせたデータ活用例として，近年情報システムの進化により，「いつ」「どこで」といったようなメディア情報の付加価値を体験可能なサービスが登場してきた．例として Google Street View[5] が挙げられるが，このサービスでは地理情報と同期



図 1.8. MIMM([8] より引用)



図 1.9. イーグル ([9] より引用)



(a)



(b)

図 1.10. Google Street View([5] より引用). (a) 画像撮影システム. (b) Google Street View におけるモーションブラー例.

した光景を、画面を通して体験することが可能となっている．点検車両システムとは異なり，Google Street View[5] 及び使用されている車両 (図 1.10(a) に示す) も高速移動環境下において対象の二次元画像センシングを行っているシステムの一例といえる．

しかしながら，本サービスはあくまで利用者がその場を人間の視点で体験するためのツールであり，実際に利用してみると図 1.10(b) のように一部の画像はモーションブラーや画像の幾何変換による歪みを大きく伴っている．これは，利用する人にとって，ある場所がどのような光景になっているかを視覚的に楽しむためのツールであるため，空間分解能や空間の整合性についての厳密な設計仕様が不要なためと考えられる．今後人間の目で鑑賞するだけでなく，データベースとして画像検索等に用いる際には，十分な特徴量が得られないとマッチング精度が低くなってしまうため，利用用途によって空間分解能の向上が必須となると考えられる．そのため，本論文で取り扱っているように，高速移動環境下において高い空間分解能の二次元画像センシングを可能とするシステムの導入が将来的に必要であると考えられる．

1.6 高速移動環境下における日常的点検システムの要求仕様例

4章で改めて詳述するが、本論文は株式会社中日本高速道路株式会社（以降「Nexco 中日本」と呼称）と東京大学の共同研究「高速道路における点検技術の高度化に関する研究」[6]の内容を基に論文が構成されている。多くの高速道路は開通されて以降長い月日が経過しているが、特にトンネルは構造的に劣化が起きやすく、また事故が起こった際の被害も大きいと予想されることから、日常的な点検は重要である。一方で、従来の総点検は5年に1回の頻度で行われており、そのため先ほど紹介したMIMM[8]やイーグル[9]はそうした機会や緊急点検の際等に活用されているが、本共同研究では日常的に走行する車両に搭載可能なシステムの開発を行ってきた。

点検装置開発にあたり、下記の要求仕様が課されていた。

表 1.1. 高速移動環境下における日常的点検システムの要求仕様一覧

項目	要求仕様
対応速度	～時速 100km
最小抽出クラック幅	0.2mm
画像分解能	0.2mm/pixel 以下
対応車両	普通車両
全周囲撮像に必要な往復回数	複数回

MIMM やイーグルは点検のために開発された特殊な車両を使用しているのに対し、本研究では高速道路の維持作業に用いられる通常車両へ取り付け取り外し可能な装置の開発を目指す。これにより、全周囲撮像に複数回往復が必要であっても、日常業務に使用される車両に装置を搭載することで点検が日常的に行われることとなり、搭載センシング機材も往復回数に準拠して縮減させることが可能なことから、装置全体のコストダウンにも寄与可能である。コストダウンは装置の複数台開発・運用することを促進するため、さらなる点検頻度の向上が期待される。

また、二次元画像の撮像に関連して、下記の三点も機能要件として挙げられた。

- 路面から受ける振動の影響を回避すること。
- 自己位置推定機能を有すること。
- 対象の形状（奥行き距離）の計測を可能とすること。

振動の影響回避は画像の空間分解能の向上に寄与し、自己位置推定は車両によって取得されたデータに位置情報を付加することが可能と考えられる。また、対象形状の計測は、対象が何らかの異常を受けてネジの緩みや構造の変化を検出するために有効である。

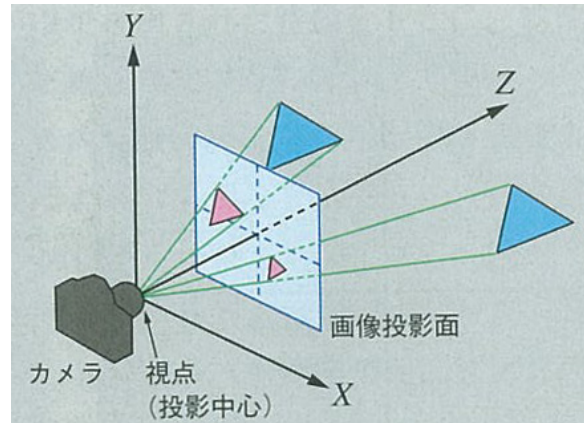


図 1.11. カメラが三次元の対象に対し、二次元画像として情報を取り込む様子（[10] より引用）

1.7 動的なセンシング技術：アクティブビジョン技術

1.6 節の高速移動環境下における点検の要求仕様を受けて、本論文ではまずセンシング情報として対象の二次元情報を主眼に置く。そして、従来の点検システムが採用していた強力な照明と短い露光時間の組み合わせが抱えていた問題点を解決するため、アクティブビジョン技術を用いることを検討していく。アクティブビジョン技術は、動的な対象を二次元画像としてセンシングする手法の代表例であり、本章では開発されるまでの変遷と技術そのものについて考察していく。

1.7.1 撮像による視覚的情報の獲得

アクティブビジョン技術について説明する前に、二次元の画像センシング技術の変遷についてここでは紹介していく。

撮像の定式化

我々は目によって外界の情報を連続的に脳に取り込み、あらゆる価値判断を行っているが、取り込んだ情報は記憶と共に薄れゆく宿命にある。これに対し、映像情報取得デバイスとしてのカメラは、ある時点での外界の三次元情報を二次元情報として撮像するデバイスであり、移りゆく視覚的情報であっても、撮像を経ることで「画像」として永続的に記録することが可能となっている。

ここで、映像情報取得デバイスとしてのカメラは、一般的にある時点での外界の三次元情報を二次元情報として撮像し、図 1.11 のようにデータとして取り込まれる。

撮像の際には元々三次元の情報が二次元の情報へと射影されるが、この撮像期間中に対象とカメラ系との位置関係に変化が生じた場合、モーションブラーとして画像の劣化が生じてしまう。一般的に撮像期間は「露光時間」として知られており、露光時間の強弱により画像の明る

さが変化する．両者の位置関係に変化が見られない状況で十分な露光時間と照明環境が用意されたとき，モーションブラー及びノイズのない一般的に画質が良いとされる画像が取得される．露光時間が短いと十分な光の情報が得られないため，画像にはノイズが目立ってしまい，S/N 比の低い画像が生成されてしまう．また，露光時間に関連して，動画像の撮影における1秒間あたりの撮像可能枚数はフレームレートと呼ばれ，カメラのスペックアップの際の指標の一つとなっており，次節でカメラのスペックの変化について検討を実施する．

撮像素子の時間・空間における高分解能化

一般的に時間と空間は同列で紹介されることが多いが [13]，情報処理の観点から見ても相関性のある主題として取り扱われている．カメラスペックの指標として先ほどフレームレートを紹介したが，こちらは時間分解能と呼ばれるものであり，それに対して画像中のピクセル数の多さの指標として空間分解能が知られており，情報量の観点からどちらかを増やせばどちらかが減るトレードオフの傾向にある．

しかしながら，産業分野では，既に高速カメラという名称で高い時間分解能と空間分解能を実現するカメラが流通しており，高解像度で動的な撮像を行う用途で用いられている．図 1.12 の Mikrottron 社 EoSens MC4083[14] や，Photron 社 FASTCAM SA-X2[15] はその一例であり，前者は 25 万画素で 500fps の周期で撮像可能であり，後者は 10 万画素で 13500fps での撮像が可能となっている．そのため，高速カメラを利用することで対象やカメラ系に瞬間的な変化が生じるダイナミックシーンであっても，瞬間的な露光時間で十分な S/N 比を得られる照明と併用することで，鮮明な画像として記録することが可能となった．

ここで，撮像しながら画像を PC に転送し，リアルタイムに画像処理が可能な前者に対し，後者では特定のハード内に画像を一旦保存し，画像処理はオフラインのみで可能という点が異なる．そのため，リアルタイムに対象を認識し，処理するといったようなダイナミックなシステムには前者のタイプの高速カメラが使用される．



図 1.12. Mikrottron EoSens MC4083([14]より引用)

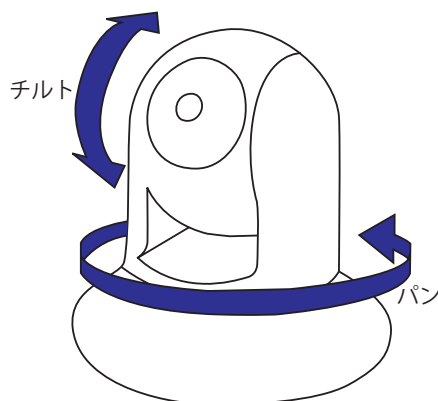


図 1.13. アクティブビジョン技術に用いられるパン・チルトカメラ

こうしたことから，リアルタイムアプリケーションには高速カメラが活用されつつあるが，

一方で撮像対象とカメラ系との動的関係によっては、通常の高速カメラ単体だけでは対象を十分な画質で撮影できないケースも存在する．具体的に、対象が初期の画角から外れてしまうケースや、カメラ系と対象間に速度が生じる等の動的な状況が該当する．こうしたケースにおいて、単純にカメラやレンズのスペックが上がれば解決できるものだけではないため、これまでも研究の観点から新しい技術が生み出されてきた．

1.7.2 アクティブビジョン技術

撮像対象が動的な状況において、静的な状況と変わらず撮影を実現することを目指す手法として、アクティブビジョン技術が挙げられる．

撮像対象が移動し続けるため、カメラの画角を外れてしまうことを防ぎ、対象を継続的に撮影するためには、カメラの視線を被写体（対象物）に向け続ける必要がある．多くの場合この作業は撮影者が手動で行うが、ボールの跳躍のような高速かつ不規則な運動に対して完璧に追従することは難しい．そのため、図 1.13 に見られるようなパン・チルトカメラ等を利用した視線方向を機械で自動制御するシステム（いわゆるアクティブビジョン技術 [2]）が開発されてきた．

それまでのカメラ単体での対象の撮像に対し、カメラの視線を機械制御するという発想自体が新しく、画角の拡張や対象の動きをトラッキングすることに伴うモーションブラーの改善など、多岐に渡る応用が期待されている．ここで、アクティブビジョン技術は対象の動きを補償する技術ということが出来るが、一方で本論文では対象の動きのみならずセンシング機器自体の動きも補償することを要件とするため、アクティブビジョン技術をそのまま利用することは困難であると考えられる．

そこで、本論文では表 1.2 のように、アクティブビジョン技術を拡張・応用し、センサー系自身も動く状況に対応した光学系を開発することで、いかにして高速移動環境下で高分解能二次元画像をセンシング可能とするかについて研究をしていく．また、関連してセンサー系自身も動くことを考慮し、従来のアクティブビジョン技術に加えて自己位置推定技術及び奥行きセンシングにおける問題点についても議論していく．

表 1.2. 従来のアクティブビジョン技術と本論文の対象範囲の比較

	従来のアクティブビジョン技術	本論文の対象範囲
対象	特定の画角内に収まるもの (例:人, 車, ボール)	画角を超えた巨大な対象の表面 (例: 壁, 床, 天井, 景色)
動的状況への対応		
- 対象が移動	○	○
- カメラが移動	—	○
- 両者が移動	—	○

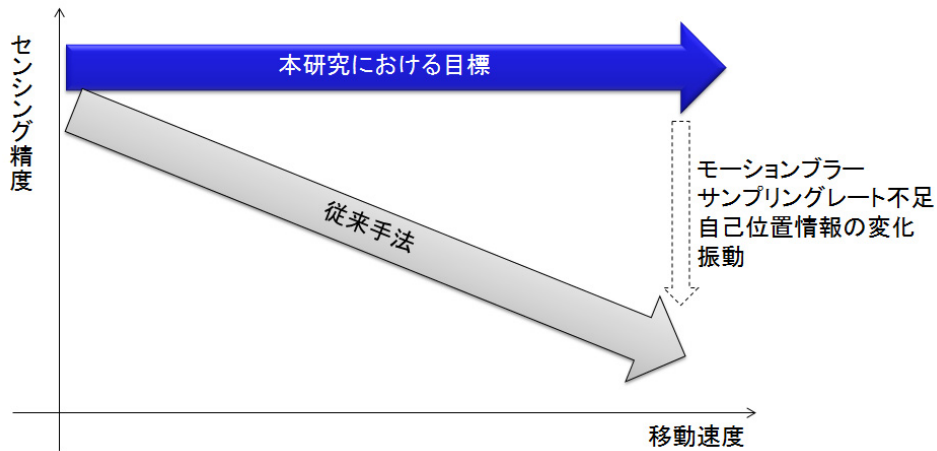


図 1.14. 本論文の目標

1.8 本論文の目的と構成

1.8.1 本章のまとめと本論文の目標・目的

本章では高速移動環境下におけるセンシングの意義，問題点，センシングシステムの例などについて述べた．また，動的なセンシング技術としてアクティブビジョン技術を応用することが，従来の高速移動環境下におけるセンシング性能を凌駕する新たなビジョンシステムの実現に繋がると期待されることを確認した．

筆者は，このような背景の下，以前より特に二次元画像センシングにおける高速ビジョンの光軸動的制御の高速化に着目し，高速移動環境下におけるセンシングシステムの考案 [16] 及び開発 [17] を進めてきた．

本システムは，光学的に視線方向を制御するという性質上，高速移動環境下におけるモーションブラーの補償を実現するだけではなく，自己位置制御技術，三次元センシングに向けた光軸制御技術と合わせた総合的なセンシングシステムとしても期待される．従来高速移動環境下ではモーションブラー，サンプリングレートの不足，自己位置の変化，振動といった要因により，センシング精度を犠牲にして高速移動環境を実現していたのに対し，本システムは図 1.14 のように高い移動効率とセンシング精度を両立する枠組みを提案する．

高速移動環境下におけるセンシングシステムとしての先行研究は，いずれの問題点に対しても，空間解像度を下げることでセンシング精度低下や照明光量を強くすることで二次的なリスクを招いていたのに対し，本研究では表 1.3 のように各章でそれぞれの問題について解決手法を提案していく．各章の提案手法を総合して，1.6 節の高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の点検における実用化での要求仕様を達成することを目指す．なお，先行研究・既存技術の詳細については各論にて述べるものとする．

表 1.3. 高速移動環境下におけるセンシングの問題点と関連する章

高速移動環境下におけるセンシングの問題点	関連する章
モーションブラー	2,3
サンプリングレート	2,3
位置情報変化	2,5
振動	4,6

1.8.2 本論文の構成

本論文の構成を図 1.15 に示す。まず本章では本研究に至る背景を述べ、目的を明確化した。第 2 章では、モーションブラー補償装置の原理について述べる。また実際にシステムを開発し、原理の有効性を確認する。第 3 章では、モーションブラー補償装置を利用したセンシングのサンプリングレートを向上させるためガルバノミラーの制御アルゴリズムを開発し、モーションブラー補償装置の性能向上を図る。第 4 章では、第 2,3 章にて構築したモーションブラー補償装置を用いてトンネルの点検アプリケーションを提案する。第 5 章では、線形運動モデルに基づく GNSS 誤差範囲減少手法を提案し、第 6 章では、誘電エラストマーを用いた光線位置制御に基づく三次元計測手法を提案する。最後に第 7 章にて、本論文の結論を述べる。

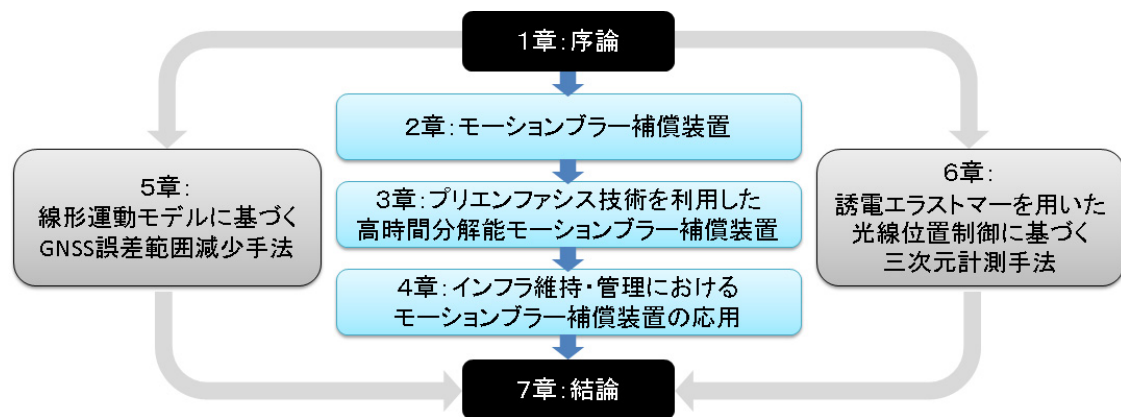


図 1.15. 本論文の構成

第 2 章

モーションブラー補償装置

筆者はこれまで、アクティブビジョン技術を発展させ適用範囲を広げることに関心があり、高速移動環境下における撮像システムの開発に取り組んできた。その中で、主にモーションブラー補償装置を考案 [16]，開発 [17] してきた。モーションブラー補償装置のコンセプトは図 2.1 に示されるものであり、高速カメラとガルバノミラーから成る光学系において、ガルバノミラーの回転動作によって高速移動を補償し、鮮明な画像を撮像することを目指す。

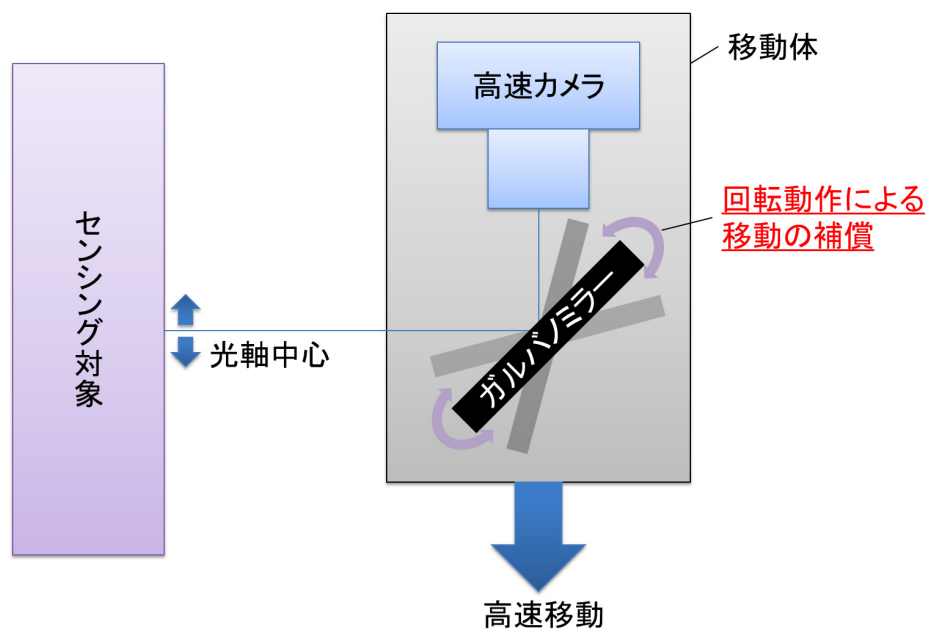


図 2.1. モーションブラー補償動作のコンセプト図

2.1 モーションブラーを補償することの重要性

移動や何らかの運搬作業において、インフラや運搬ルート of 安定性や安全性を確保することは非常に重要であり、そのため高頻度で正確な点検の実施要求される。具体的に点検の対象と

して、インフラや運搬ルートの壁面や構造物の表面や道路、さらに工場の生産ラインが考えられるが、点検を効率的に行うためには通常の移動速度で移動することが重要である。しかしながら、そのような移動は、画像にモーションブラーを生じさせ画質を劣化させる要因として知られている。特に高速道路におけるトンネルは、構造上劣化のリスクを元来含んでいる一方、点検のために頻繁に交通規制を行うことは困難である。そのため、動く車両からトンネルの表面をモニタリングするシステムに対する需要が高まっている。特に、人間の目による目視点検の代替として、構造物におけるさびやひび割れ等の異常を正確に検知するためにはトンネル表面の高画質画像が必要である。しかしながら、速度（効率）と精度の間にはトレードオフの関係があり、高解像度の画像は特にモーションブラーの影響を受けやすく、また高速な動きは低速な動きと比べ、よりモーションブラーによる画像の画質劣化を招く。インフラにおける車両点検システムでは、モーションブラーの影響を避けて高画質画像を得るために強力な照明が用いられてきたが、そのような強力な照明は他のドライバーに対し不用意な事故を誘発する可能性がある。それだけでなく、一般的に強力な照明は対象の表面に対し何らかのダメージを起こす可能性があり、それゆえ低出力の照明が本質的に望まれる。たとえば、製造業におけるベルトコンベア上での点検では効率が重要視されるが、製品によっては強力な照明によりダメージを受けてしまう可能性がある。点検以外の目的でも、航空機による地上の詳細な画像撮影を行う際に移動速度によって生じるモーションブラーが問題となるが、航空機から地上を照明で照らすことは、距離が離れすぎているため現実的ではないため、同様にモーションブラーに対する改善手法が望まれてきた。このように、用途によって強力な照明を用いることが難しい状況では、何らかの手法でモーションブラーを補償する必要があった。

2.2 モーションブラー補償手法の比較

2.2.1 モーションブラー補償手法の分類

これまでモーションブラーを補償する手法は多数提案されてきたが、それらは主に2つのカテゴリーに分類される。1つ目のカテゴリーはモーションブラーが発生する前にモーションブラーを補償する手法である [2, 19, 20, 21, 22, 23]。それらのセンサーやシステムは、対象との相対的な動きに合わせて対象に対し何らかの追従動作を実施することでモーションブラーの発生を回避する。2つ目のカテゴリーは撮像後の画像に対して後処理を施すことでモーションブラーを除去する手法に分類される [24, 25, 26, 27, 28]。こちらのカテゴリーでは計算科学の分野を中心としてあらゆる研究がこれまでなされてきた。本論文の手法は前者の手法に属している。これら2つのカテゴリーを比較する指標は様々にあるが、しかしながら一般的に前者の手法の方がよりモーションブラーの補償に対し効果があるとされている。なぜなら、後処理によってモーションブラーを除去するより、初めからモーションブラーを含まない画像を撮像した方が、結果的に高い画質の画像を得られるためである。

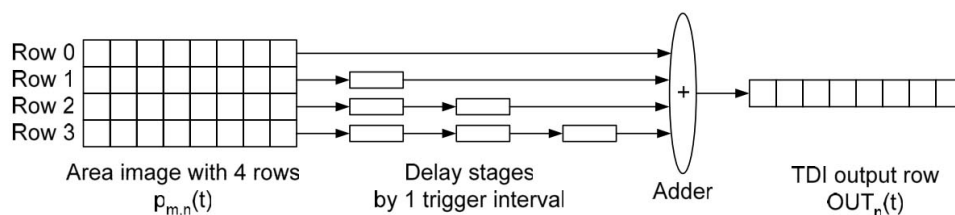


図 2.2. TDI センサーの動作原理概要 ([19] より引用)

2.2.2 事前動作によるモーションブラー補償手法

1 つ目のカテゴリの中で、Time Delayed Integration (TDI) 手法は露光時間を仮想的に延長する手法として挙げられる [19]。しかしながら、延長できる露光時間はラインセンサのステージ数（配列数）に制約されており、カメラと対象との相対的な速度が高速になった際には速度に応じて各ステージにおける露光時間が低下する。そのため、速度が高速になる前と比較して同等の画質の画像を得るためには、より多くのステージが必要となる。さらに、通常 TDI のセンサーコストはステージ数が増えるに応じて非常に高くなってしまい、TDI 方式を利用したシステムは実用面での費用対効果の面で問題を抱えている。上記に加え、TDI 方式は高精度のエンコーダー情報を必要とするため、システムの簡易性の面でも課題を有する。

TDI 以外には 1 つ目のカテゴリ内の手法として光学的手ぶれ補正が挙げられる。光学的手ぶれ補正は通常カメラ保持者の手ぶれによるモーションブラーを補償するのに活用されており [20, 21]、実際に民生機のカメラ等も含め流通している技術であるが、内部に組み込まれたジャイロセンサや加速度センサによって補償用のアクチュエータを駆動させるため、精度に限界があるという問題点があった。また、カメラが一定の範囲内で振動する状況のみ想定された技術であるため、対象が動く状況、もしくはカメラと対象に一定の速度が生じ続けるような状況では加速度が全く発生しないため、モーションブラーが補償されない問題点があった。追加のセンサを加えることで精度が改善されると想定されるが、結果としてコストの増加だけでなくシステムの簡易性が低下し、実用化の際に障害となってしまうと考えられる。

2.2.3 後処理によるモーションブラー補償手法

1 つ目のカテゴリに対し、後処理による手法ではカメラ以外にセンサを必要としない手法も見られる。具体的に Blind Deconvolution が知られており [24, 25]、通常の Blind Deconvolution ではオフラインで画像における点拡がり関数を推定し、点拡がり関数を元に Deconvolution を行ってモーションブラーを後から除去する手法を取っている。実際に図 2.4 のように、ブラーの影響を受けた (b) の画像が Blind Deconvolution によって (c) の画像に復元されていることがわかる。ただ、本手法は点拡がり関数の推定に一定の計算時間を必要とするため、オフラインで実施することが前提となっており、リアルタイムアプリケーション向

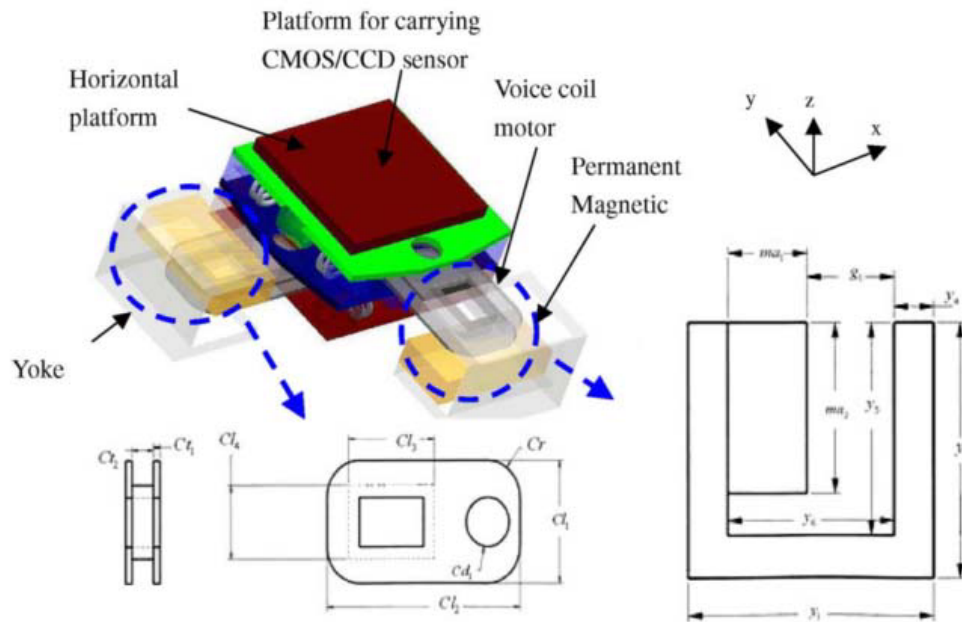


図 2.3. 光学的手ぶれ補正概要 ([21] より引用)

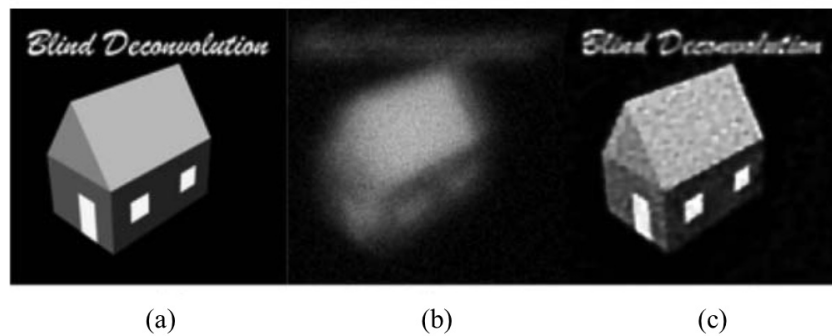


図 2.4. Blind Deconvolution の適用例 ([25] より引用). (a) 原画像. (b) ぶれとノイズ追加後の画像. (c) Blind Deconvolution の適用結果.

けではない手法といえる. さらに, Blind Deconvolution は NP 困難な問題として知られており, 点拡がり関数に関する予備情報無しにはモーションブラー除去に関する精度と速度に限界がある.

それに対し, 事前に推定もしくは簡略化された点拡がり関数に関する情報を用いた Deconvolution 手法も存在する [26, 27, 28]. 点拡がり関数を容易に求めることが可能なため, モーションブラー除去における速度や精度の改善が報告されている. 具体的に, Levin らの手法 [26] では図 2.5(a) のように, 回転盤の上にカメラを設置し, 露光中に撮像を行う. 撮影画角中に一次元を任意速度で動く 5 つの対象が含まれるとき, 通常のカメラで撮影した場合は図 2.5(b) のように異なる点拡がり関数で対象の動きが記録されると考えられるが, しかしながら

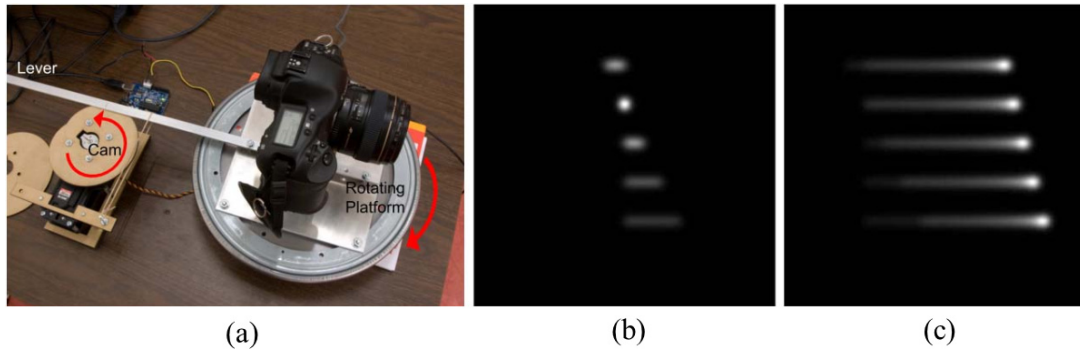


図 2.5. Levin らの手法の装置及び適用例. (a) プロトタイプ装置. (b) 通常のカメラで異なる 5 つの速度で動く光源を撮像したときの様子. (c) (a) のカメラで異なる 5 つの速度で動く光源を撮像したときの様子 ([26] より引用).

Levin らの手法では図 2.5(c) のように 1 回の露光中に異なる速度で動く複数の対象が同一の点拡がり関数を有するものとして撮像できることを特徴とする. Levin らの手法は任意の一次元の動きに対してモーションブラーを除去できることからロバストな手法であると考えられるが, しかしながらカメラ自体を回転させるため, 対象とカメラとの高速な相対速度には向いておらず, また Deconvolution 自体はオフラインで行われるため, リアルタイムアプリケーションには不向きである.

また, Raskar らは 1 回のカメラセンサーの露光中に任意のオン・オフパターンで照明を点灯させることで, 点拡がり関数を容易に求める手法を提案している [27]. この手法では照明系の点灯パターンを制御するハードウェアの追加のみ必要で可搬部を持たないことが特徴であるが, しかしながら露光時間はパターン化された照明がオンの時間のみに制約されてしまうため, 得られる光量も制限される. さらに, Levin らの手法と同様, オフラインでの Deconvolution を前提としているため, こちらの手法もリアルタイム向けとはいえない. これに対し, Qian らはリアルタイムの Deconvolution 手法を提案している [28]. しかしながら, 周期は 1Hz となっており, 本研究が目指す高速な移動環境下において連続して撮像するシーンではリアルタイム性が不足してしまうことが懸念される. いずれの Deconvolution 手法でも Blind Deconvolution に比べ, シンプルなソフトウェア処理で Blind Deconvolution 手法と比べ精度や速度の向上が可能と考えられるが, 一方で追加のハードウェアや露光時間の制約を負ってしまう. そのため, よりシンプルな機構でリアルタイムアプリケーションを実現するためには, 異なる手法を用いることが必要と考えられる. 最後に, Blind Deconvolution 手法及び Deconvolution 手法を含む 2 つ目のカテゴリー全般に共通していることであるが, これらは後処理によるモーションブラー補償手法であるため, 一旦画像から消えてしまった一定以上の高周波情報を復元することができず, 高画質な画像を出力として要求されるアプリケーションには不向きと考えられる. しかしながら, 今回は比較のためブラーカーネルを事前に本研究の提案手法によって把握している状態で Deconvolution を行い, 実際に前記のように高周波情報の復元が困難かについて 2.6 節において検証を実施する.

2.2.4 ガルバノミラーを利用したモーションブラー補償手法

アクティブビジョン技術のモーションブラー補償手法への応用の検討

高速性とシンプルな構成という 2 つのシステム要求を満たすモーションブラー補償手法を検討するに当たり、本章では 1 章で紹介したアクティブビジョン技術 [2] のコンセプトを参考にしている。アクティブビジョン技術はここまで紹介してきた 1 つ目のカテゴリに関連しているが、しかしながら従来のアクティブビジョンシステムではあくまで対象のトラッキングが目的であり、モーションブラーを補償することを目的としてこなかった。

ガルバノミラーを利用したアクティブビジョン技術

アクティブビジョン技術は 1 章で紹介したように、撮影対象が撮像画像の中心に常に位置するようカメラ系の視線を動的に制御することで、従来よりダイナミックな撮像環境を対象としたカメラシステムの実現を可能としている。大池らはパン・チルトカメラを撮像対象の位置に応じて制御することにより、鮮明な画像を撮像できることを示しているが [22]、Levin らの手法と同様、カメラ自身を回転させるため対象の高速な動作に対応することが難しい。これに対し、奥村らはガルバノミラーを利用してアクティブビジョンシステムを構築することで、従来よりも高速に対象を追従するサッカードミラーシステムを確立している [23]。この手法では、図 2.6 のようにカメラ前方に配置した小型駆動鏡面によって高速にカメラの視線変更を行うサッカードミラー (Saccade Mirror) と呼ばれる光学系が提案されている。この技術では、2 軸のガルバノミラーを用いることによって、高速な視線変更ができるようになっている。もし、制御系において、常に画面中心で対象物をとらえるように視線の制御ができれば、他に類を見ないダイナミックな撮像が可能になると考えられる。しかしながら、従来のサッカードミラーは、カメラ自体が被写体に対して高速移動する場合に対応するシステムとはなっていない。また、対象物が画面中心から外れた際に、対象物が画面中心に再び位置するようにミラー角度を補正する制御を行っている。すると、撮像画像中に、ミラー角度の調整に伴うモーションブラーが生じてしまう。これでは、常に高い分解能が求められる点検等の用途に対応することは難しいと考えられる。また、例えば一次元の動き（道路上の車両、線路上の車両、ベルトコンベヤ等）で対象が連続的に更新されるような状況には対応しておらず、カメラが高速（例えば時速 100km）で移動しながら、固定された対象物を撮影する状況では、取得した画像にモーションブラーが含まれることになる。画像により対象物の損傷状態を正確に点検するためには、車両の移動速度（つまりカメラの移動速度）を下げるか、露光時間を短くする必要がある。車両の移動速度を下げると、検査効率の悪化を招く。また、露光時間を短縮すると、画質の劣化を招く。しかしながら、高速で移動するカメラで得られる画像のモーションブラーを効果的に軽減する技術は提案されていない。そのため、新たなモーションブラー補償手法を考案する必要があった。

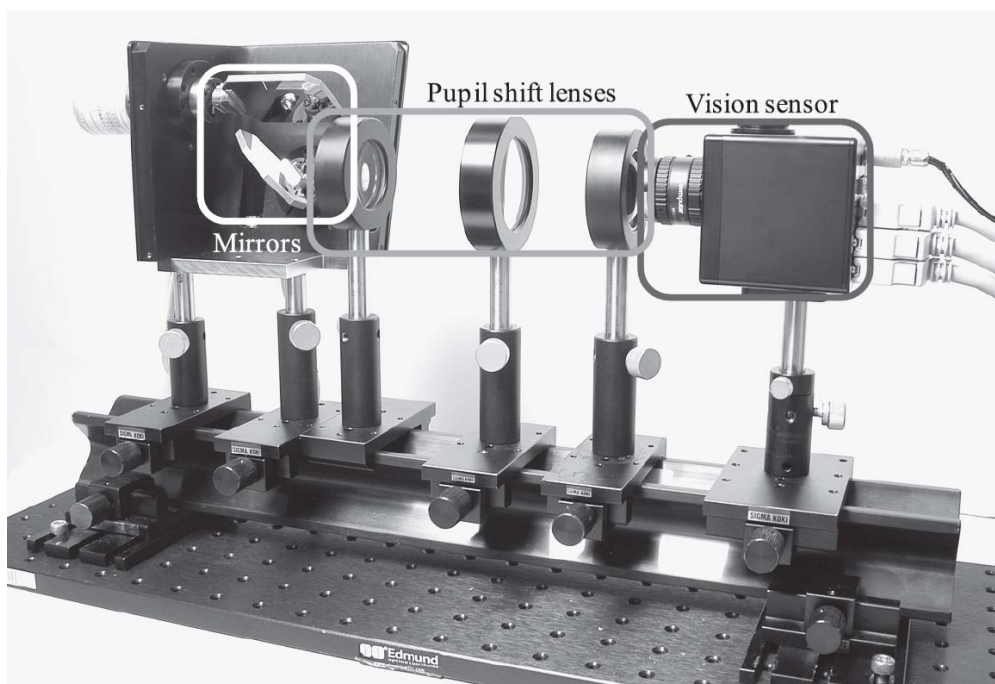


図 2.6. サッカードミラー ([23] より引用)

生物学的なモーションブラー補償機構のモーションブラー補償手法への応用

ところで、アクティブビジョンシステムは人間の眼球が対象をトラッキングする様子に例えられることがある。それに対し、本論文で提案するモーションブラー補償機構は人間の眼球における前庭眼反射やハトにおける歩行時に前後に首を動かす動きを参考にしている。生物は固有の運動器官により、運動しつつ各々のタスクをこなす存在であるため、運動の度にモーションブラーが生じてしまうと、視覚情報の空間分解能が下がることでタスクパフォーマンスが下がり、生物活動に影響を及ぼすものと考えられる。そのため、鳥類ハトは図 2.7 のように移動時には首の前後運動を連続的に行い、自分の動くスピード分のモーションブラーを首の動きによって補償していることが知られている [29]。また、我々人間も、図 2.8 のように首の旋回時に眼球が反対方向に動き、固定対象への視線制御が不随意に行われ、一時的にモーションブラーが補償された鮮明な視覚情報の取得が可能となる機能を有している [30]。これらの生物学的機構は効果的にモーションブラーを補償する仕組みであるため、本論文におけるモーションブラー補償機構の基礎コンセプトとして、カメラシステムの露光時間を延ばすことに対し寄与し得ると考えられる。

ここで両者の動作を考察すると、ハトの動作は直線運動であるため、移動量と一対一に応じたストローク量の首の前後運動が必要となり、高速動作の速度には限界があると考えられる。しかしながら、ハトの場合は歩行速度が低速であり、連続的に動作を繰り返すことが容易となっているため、移動中にモーションブラーが繰り返し補償され続けていると考えられる。これに対し、人間の眼球運動による対象追従では、動作が回転運動であるため少ない制御量でも

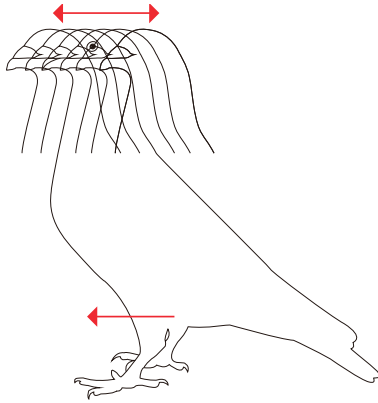


図 2.7. ハトの首の前後運動によるモーションブラー補償

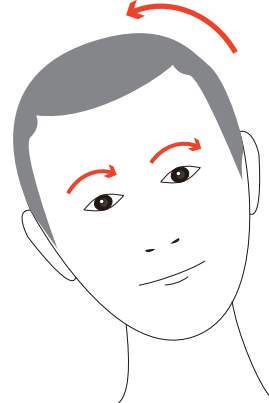


図 2.8. 人間の首の動きに対する眼球運動による対象注視の補償機構

高速な動きに対応することが可能であるが、眼球の構造的に筋疲労が生じてしまうため、長時間の連続動作には向いていない。また、カメラと対象との間に生じる相対速度を完全に補償するためにはハトのような前後運動による動作が最適だと考えられるが、ハトのように移動量に応じたストロークが必要となるため、前後動作を利用したシステムでは速度の面で制約を抱えてしまう。これに対し、人間の眼球のように回転運動であれば速度が出やすいことから、ハトの首の動作と人間の前庭眼反射を組み合わせ、本研究では連続した回転往復運動を利用したモーションブラー補償装置の開発を行い、従来のアクティブビジョン技術の拡張を目指す。

なお、類似のモーションブラー補償手法に、ガルバノミラーの回転を利用した航空画像の鮮鋭化を実現するモーガンらの特許文献 [18] が挙げられるが、本論文のように生物学的な考察はなされておらず、航空機の移動速度と地上までの距離を利用してガルバノミラーの制御量を決定する方式であるため、航空機の移動の補償にしか対応していない。また計器の精度に依存した精度であったため限定的な応用しか考えられなかった。これに対し、本論文の手法では取得画像の像面情報に基づき回転制御量を取得する設計とすることで、相対的な移動に対応するだけでなく、移動速度と距離を取得する必要がある。こうした手法の差異により、筆者の手法は基本特許として認められた [16]。この筆者のモーションブラーの補償手法について、以降で考察を行っていく。

本論文におけるモーションブラー補償手法の一連の流れ

この論文ではガルバノミラーを利用した、光学的な視線制御に基づくリアルタイムモーションブラー補償手法及びシステムの提案を行う。本システムは必要とされる制御量に対し比較的軽量のガルバノミラーを用いることで、次から次へと更新される対象を順次トラッキングしながら露光していくことを可能とする。さらに取得した画像の像面情報を利用した低コストの計算アルゴリズムにより、ガルバノミラーの制御量を決定することで、対象との相対速度が変化する状況でも動的に対応してモーションブラーを補償し続けるものとする。ガルバノミラーの回転は連続した回転往復運動を採用し、回転往復運動はガルバノミラーに対し正弦波を入力波

形として利用することで実現するものとする．また，露光するタイミングはガルバノミラーの一定の角度と同期するものとし，入力波形が正弦波であっても波形中の直線的な動作をしているときに露光することで，モーションブラーの補償量を最大化する．

2.3 モーションブラー補償装置の動作原理

2.3.1 ガルバノミラーの回転往復運動制御による連続的なモーションブラー補償

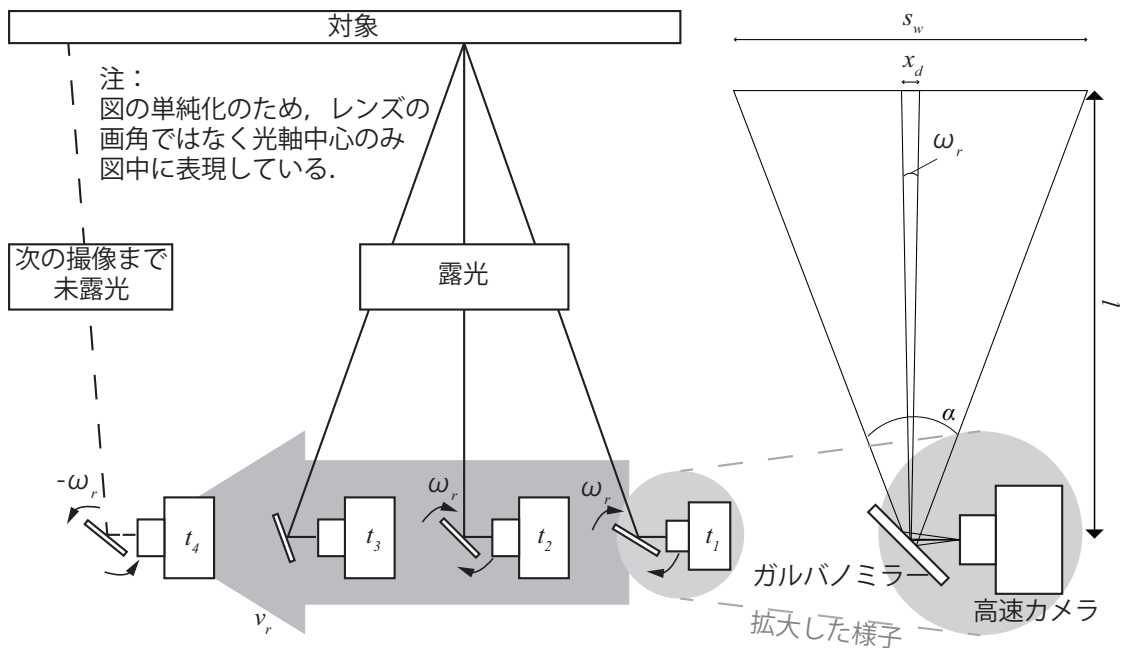


図 2.9. ガルバノミラーの回転往復運動制御の概要

図 2.9 はガルバノミラーの回転往復運動制御の概要を表している．モーションブラーを補償するため，本論文ではカメラに取り付けたガルバノミラーの角速度 ω_m に対し，カメラと撮影対象との相対速度 v_r の近似式によって求められた相対角速度 ω_r を代入することで制御を行う．カメラからの視点だと，短時間の間にカメラと対象との間に生じる v_r は ω_r によって近似可能なため，以降は速度 v_r ではなく角速度 ω_r について議論をしていく．このときカメラと対象との距離 l が，カメラの視野 α によって決まる撮像画像の最大幅 s_w に対し長ければ長いほど近似しやすくなる．図 2.9 において， l は紙面節約のため短く表現されているが，しかしながら，実際に本手法が活用される場面では l が十分に長い状況が想定される．そのため，撮像画像中の中心部と外周部ではレンズの収差等の影響で分解能が異なるが，こうした l が長い条件では分解能が画像内で全体的に近い値となるため，本提案手法が有効である．特にカメラを搭載した車両システムによる構造物の遠隔点検の際には，交通の安全の観点からも車両と構造物の距離は十分確保されている状況が想定されるため，本手法が有効であると考えら

れる．また，ガルバノミラーが対象をトラッキングし，カメラが露光している t_1 から t_3 までの間は一定の角速度 ω_m でガルバノミラーが回転動作を行う．このとき， ω_r と ω_m が露光時間 t_{ex} の間で等しければ，カメラから見た視線は常に同一位置に留まることとなり，それゆえ撮像される画像にはモーションブラーが含まれない．仮に，ガルバノミラーがシステム要求に対して十分な応答性を実現するほど軽量であれば，システムの視線方向の制御に関する自由度が非常に高くなり，カメラと対象との間で生じる相対速度 v_r が高速であったとしても，モーションブラーを補償し続けることが可能となる．すなわち，本手法を用いることでモーションブラーを含めずに露光時間を延ばすことが可能となる．

カメラが露光を終えたあとは，ガルバノミラーによる追従動作を継続する必要がなく，次の対象へと視線を更新するため，これまでと反対方向へとガルバノミラーの回転方向を切り替える．具体的に，図 2.9 における t_4 の状況では露光をしておらず，相対速度に対し反対方向に回転している状態に該当する．この回転往復運動のプロセスは，繰り返し ω_m を更新することにより実現される．そのため，最新の ω_r と ω_m が一致するように制御することが必要となる．本章においては 2.4 節で紹介するように，連続した画像間でブロックマッチングを行うことにより，一定期間内の画像における移動量を取得し，最終的に ω_m の計算を行う手法を紹介する．

2.3.2 モーションブラー補償装置のシステム構成

モーションブラーの補償は基本的にガルバノミラーと高速カメラの協調制御によって実施されるが，制御は他にも複数の機器によって実施するものとする．図 2.10 のようにガルバノミラーと高速カメラは PC とそれぞれ AD/DA ボードとキャプチャボードを介して接続される．PC から AD/DA ボードに対して回転動作制御信号が送られると同時に，キャプチャボードに対し露光制御信号が送られる．キャプチャボードは高速カメラから撮像画像の取得も行い，PC に画像が取り込まれた後に画像はメモリへと DMA 転送が行われ，メモリを介して回転速度の計算や画像の保存が行われる．各処理はリアルタイム性を維持するためマルチスレッド処理によって実行されるものとする．詳しい動作については以降で説明していく．

2.4 相対角速度算出の高速・高精度化

2.4.1 本節における問題設定の整理

追加のセンサーを用いることなくリアルタイム高速モーションブラー補償装置を実現するため，本節ではまず問題設定の整理を行う．今回の手法では撮像デバイスとして高速カメラを用いるため，1 回あたりの露光時間は短く設定可能である．そのため，短い露光時間ではカメラ系と対象との相対変化が変化することは起きにくいと考えられるため，本研究において露光時間中の移動速度は不変であると仮定することができる．特に，高速な相対速度 v_r が発生している状況では，カメラ系もしくは対象に強い慣性力が働くため，短い露光時間のうちに v_r が変化することは考えられにくい．その他にも高速カメラを用いることには利点があり，フレー

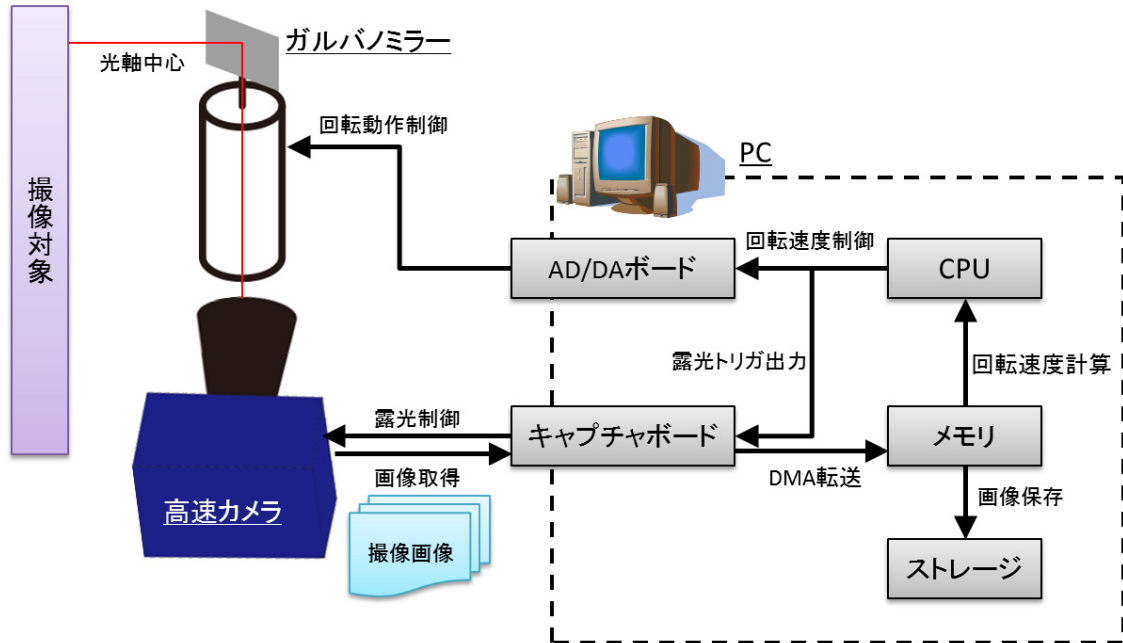


図 2.10. モーションブラー補償装置のシステム構成

ムレートが高いためガリバノミラーに設定する角速度の更新周期が素早く、そのため異なるフレーム間でカメラと対象との相対速度に変化があった場合にも、動的に素早く最新の制御パラメーターを素早く反映可能といった点が挙げられる。今回のシステムでは一次元上のモーションベクターが生じる高速移動環境下を想定しており（たとえば、道路上、レール上、ベルトコンベヤ上等）、特にそうした環境では対象の表面が平面と考えられるため、ターゲットとカメラとの距離 l も不変であると想定できる。対象によっては表面に三次元のテクスチャを有する場合もあると考えられるが、特に l が表面上の深度差と比較して十分に長い場合、表面は平面とみなされるためモーションブラーの補償が単一のガリバノミラーの制御量によって実現可能となる。

また、通常のアクティブビジョンシステムでは対象の動く方向が任意となっているため、トラッキングにかかる計算コストが高くなっていたが、これに対し本論文で想定する環境における相対速度は一次元に生じるため、計算コストは著しく低下し、システムのリアルタイム性が向上する一因となると考えられる。対象が特定の特徴量を持たない状況では、背景面の任意特徴量を用いたトラッキングを実施する必要があることから、このようなトラッキングを背景トラッキングと以降で呼ぶ。

2.4.2 ガリバノミラーの回転往復運動の制御手法

角速度 ω_r の計算手法

ガリバノミラーの制御のため、 ω_r を x_d から求める。図 2.9 の関係を式で表すと下記のようなになる。

$$\frac{s_w}{2l} = \tan \frac{\alpha}{2}, \quad (2.1)$$

$$\frac{x_d}{2l} = \tan \frac{\omega_r}{2}. \quad (2.2)$$

追加のセンサー無しで、 l が未知であっても本手法では問題ない。式 2.1 と式 2.2 を ω_r のために解くと ω_r が得られる。

$$\omega_r = 2 \tan^{-1} \left(\frac{x_d}{s_w} \tan \frac{\alpha}{2} \right). \quad (2.3)$$

このように、対象が平面であれば ω_r は連続した画像から l を求めることなく取得可能である。この手法はシステムのシンプルさに対し寄与する。

最後に ω_r は ω_m へと代入される。

$$\omega_m = \begin{cases} \omega_r & (t_1 \leq t \leq t_3) \\ -\omega_r & (e.g. t = t_4) \end{cases} \quad (2.4)$$

2.4.3 ベイヤー画像空間における高速ブロックマッチングを利用した背景トラッキング

ここでは連続して撮影された 2 枚の画像のうち、重なっている部分の位置の差を比較することで、 x_d を計算し、 ω_r の推定を行っていく。

高速ブロックマッチングのための背景トラッキング

x_d を計算するために、背景トラッキングの概念を採用する。従来のアクティブビジョンシステムにおいては、ターゲットの特定の特徴情報（例えば色や形）を用いてターゲットの位置が計算されてきた [22, 23]。しかしながら通常のアクティブビジョンシステムと異なり、本システムでは特定の対象を持たず、連続して取得される各画像の情報を利用する。具体的に、ターゲットの任意部分を検索窓として、各画像間のずれを算出するブロックマッチング法を使用する。ブロックマッチング法を利用することで対象の移動前後の位置と移動量がわかるが、対象の現在位置は本システムにとって不要であり、必要なのは移動量及び移動量から計算される速度情報のみである。よって、特定の位置にかかわらず画像中の任意の位置でブロックマッチング法を実装可能となる。また、 v_r は一次元と想定しているため、ターゲットの任意の部分に（運動方向に応じて）少なくとも一行または一列を検索窓として割り当てただけでよい。Heo らは、検索範囲のモデリングが計算コストの低減に有効であることを実証した [31]。元の高さが 100 画素で、運動方向が水平であれば、計算コストは理論上は百分の一になる。この概念を図 2.11(a) に図示する。

ベイヤー画像における高速ブロックマッチング

ここで、カラーカメラ用の x_d を取得するために適応可能な高速ブロックマッチング法を紹介する。カラーセンサーを採用している検査システムは多くないが、カラーセンサーはモノクロセンサーと比較してより多くの情報を取得できる。検査でより多くの情報を取得すれば、異常箇所を検出できる可能性が高まる。そのため、従来と比べてより包括的なシステムを実現するためにはカラーセンサーが必要であると考えられる。しかしながら、一般的に情報量と計算速度はトレードオフの関係にあり、対象をモノクロ情報に基づき形状を判別するだけで済むような用途に対して主にモノクロセンサーが使用されている。そこで、本論文では高速画像処理法及びカラーセンサーに対応できる手法を提案する。

通常、ベイヤー画像はデモザイキング処理（図 2.12 に図示）によって RGB 画像に変換された後に画像処理が行われるが、デモザイキング処理は画像中の全画素に対して空間フィルタをかけなければならないため計算時間がかかってしまい、リアルタイムシステムを実装する上でのボトルネックになる。したがって、リアルタイムシステムを実現するために、ここではベイヤー変換を必要としないブロックマッチング法の使用を提案する。未加工のベイヤー画像の処理についてはいくつかの研究がおこなわれてきた [32, 33]。Romanenko らは、ノイズ除去のための、未加工のベイヤー画像とノイズモデルとの間のブロックマッチング法を実装した [32]。Yang らは、未加工のベイヤー画像から赤の画素のみを用いてフィルタリングを行った [33]。一方、筆者は 2 つの未加工ベイヤー画像間でのブロックマッチング法を実装した。具体的に、計算速度をより上げるために、2 画素ごとのブロックマッチング法を実装した。これは、ベイヤー変換の前でも、画素列は水平方向に $RG_rRG_rRG_r\dots$ または $G_bBG_bBG_bB\dots$ のパターンを繰り返すことに基づいている（図 2.11(b)）。

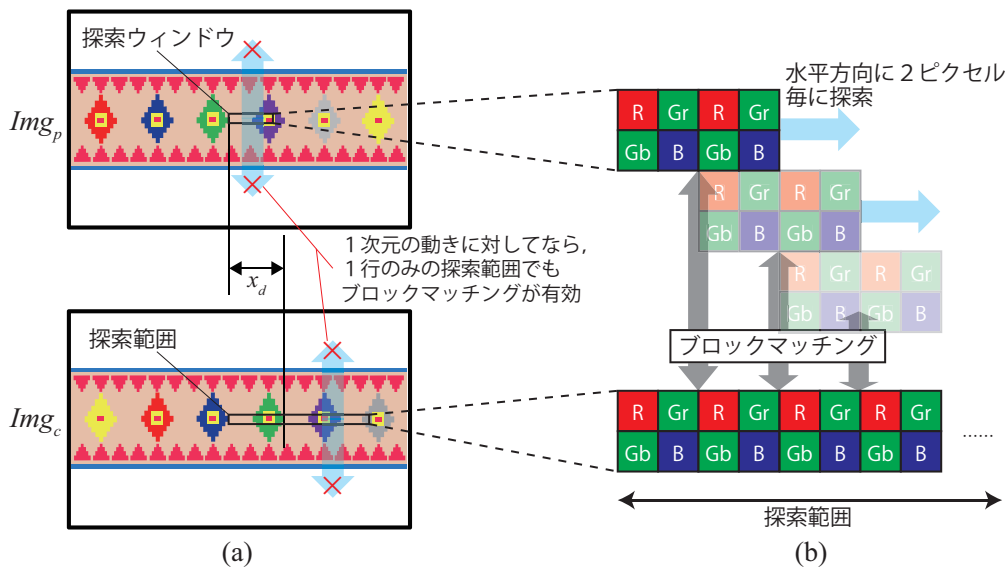


図 2.11. ベイヤー画像における高速ブロックマッチング手法. (a) 高速ブロックマッチングのための背景トラッキング. (b) 2 枚のベイヤー画像におけるブロックマッチング手法.

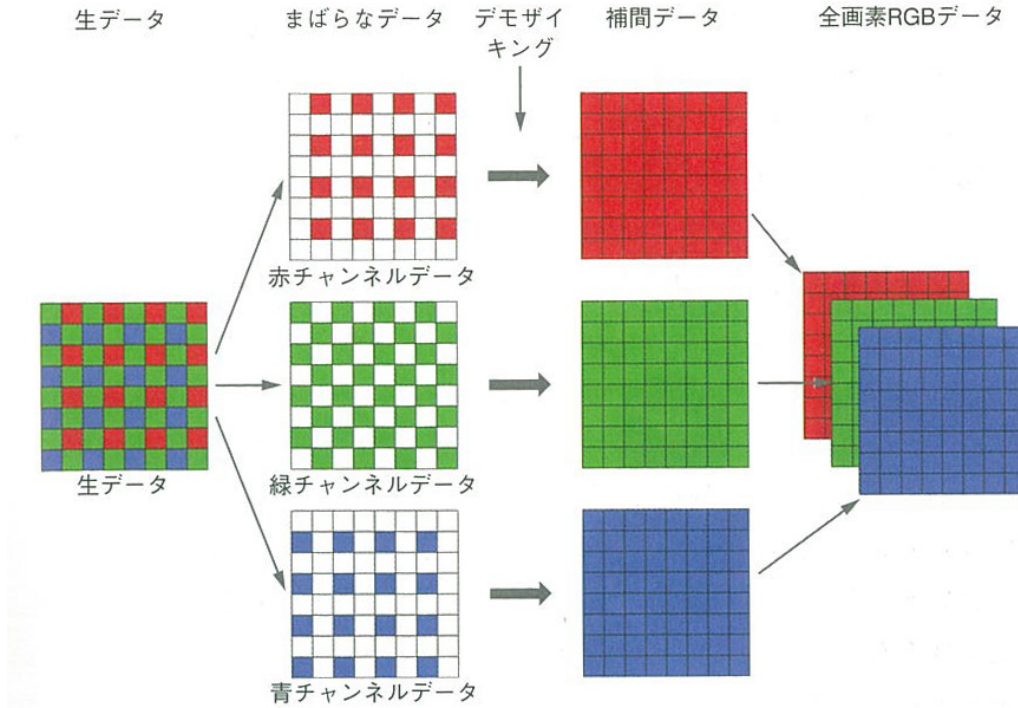


図 2.12. バイヤー画像のデモザイキング処理 ([11] より引用)

式 2.5 に、この計算を示す．ここで、 W_w はブロックマッチング用の窓の幅を表す．この計算は、一方の端から他方の端へと水平方向に繰り返される．前画像 Img_p と現画像 Img_c との R_{SSD} が最小の場合に、窓の位置 x を x_d に設定する（図 2.11(a) も参照すること）．

$$R_{SSD} = \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^{W_w-1} (Img_p(i, j) - Img_c(i + 2, j))^2 \quad (2.5)$$

2.4.4 モーションブラー補償装置の時間軸上の制御

モーションブラー補償装置の制御フロー

図 2.13 に、制御フローを示す．初期状態 P1 では、 ω_m の初期値を設定することができる．その後の処理においては、 ω_m の値は自動的に設定される． ω_m に任意の値を設定した後、P2 において、システム自身が、ガルバノミラーの現在の角度が露光に適しているか否かを確認する．その後、P3 において、所定の露光時間が経過するまで、カメラが画像を露光する．露光後、ミラーは反対方向に回転し始め、元の角度まで回転する．同時に取得した画像を P4 及び P5 において使用し、最新の ω_m を計算して、再び P1 において値を設定する．P1 から P5 までの一連の処理が繰り返されることによって制御が行われる．本フローの周波数 f は、P1 以前に設定され、ガルバノミラーの加速度及び計算速度により決定される． f の設定値については、2.5.2 節で詳細に検討を行う．

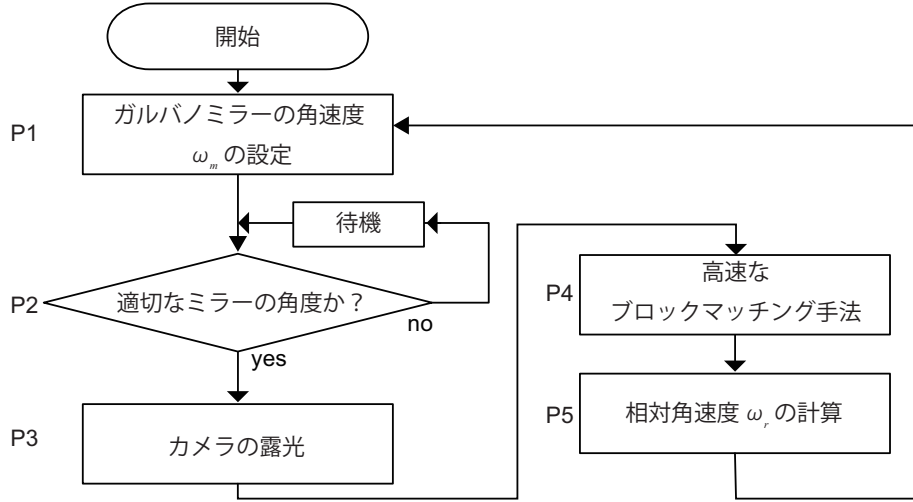


図 2.13. モーションブラー補償装置の制御フロー

カメラの露光時間とガルバノミラーの角度の同期手法

回転往復運動するガルバノミラーの周波数 f 及び振幅 A は、そのガルバノミラーの重量によって制限される。よって、ミラーの大きさと加速度とは、トレードオフの関係にある。実際、 ω_r と ω_m とを一致させる、すなわちモーションブラー補償のために最適の条件は、一定の角速度であり、正及び負の一定の角速度から成る三角波（式 5.1）やノコギリ波を連続的に生成できることである。

$$\theta = \omega_m t \quad \{t_1 \leq t \leq t_3\} \quad (2.6)$$

しかしながら、三角波は角速度の正負を切り替える際に瞬時に鋭い方向転換が求められるので、ガルバノミラーには非常に大きな加速度が必要となり、足りない加速度を補うために生じる制御遅延により振幅が小さくなってしまう。この問題を避けるため、本論文では正弦波を制御に使用し、三角波と共通の A を有する正弦波で三角波の近似を行う（式 3.9）。

$$\theta = A \sin(2\pi ft) \quad (2.7)$$

ここで、振幅 A は次式により与えられる。

$$A = \frac{\omega_m}{4f} \quad (2.8)$$

式 3.8 において、 $1/f$ は正弦波の周期に対応し、ミラーの角度は、 0° からスタートした場合は周期の四分の一で A に達することを表している。

正弦波はすべての点において滑らかであるため、三角波の場合と比較して必要な加速度は小さい [40]。これは、ガルバノミラーの制御の飽和及び性能の劣化を防止することに対し非常に有効である。同時に、正弦波は転換点から離れた位置ではほぼ直線の部分を含む。そのため、

本論文では正弦波を使用し，ガルバノミラーの高速回転動作を制御していく．図 2.14 に，三角波と正弦波の違いを示す． t_1 及び t_3 は，回転方向の転換点を表す（図 2.9 も参照）． 0° 周辺におけるこの正弦波の傾きは，式 2.4 により与えられる ω_m の傾きの直線に一致し，この正弦波によりモーションブラーを補償できる．

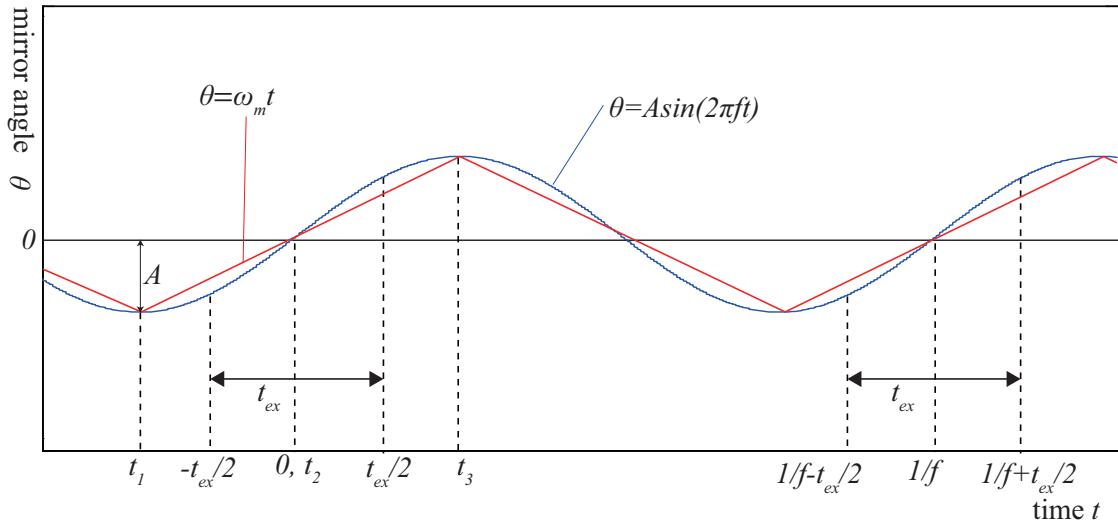


図 2.14. 露光とガルバノミラーの角度の関係

カメラはミラーの回転動作に同期し， $-t_{ex}/2$ から $+t_{ex}/2$ の間に画像を露光する．これらの処理を， $1/f$ ごとに繰り返していく．

2.5 高速性の評価：応答時間測定

2.5.1 実験装置

提案手法を実証するために，高速で移動するベルトコンベアの動きを補償する実験を行った．図 2.15 に，実験システムの概念図を示す．本システムの性能を評価するために，解像度チャート及び細かいテクスチャを含む画像を用意し，ベルトコンベアの表面に貼り付けた．解像度チャートの静止画像は，ベルトコンベアの回転方向である水平方向に対し，白と黒の明瞭なコントラストを示していた．本実験では，ベルトコンベアの回転速度である各 v_r においてこの白と黒のペアのピーク間の値の確認や，細かいテクスチャを含む画像の鮮鋭度確認によってモーションブラーの補償が行われているか検証を行った．また，白と黒の線のペアの画像について，オフラインでウィナーフィルタを用いた Deconvolution によるモーションブラーの除去 [34] を行い，本提案手法との結果の比較を行った．

本実験では高速カメラとして CMOS 高速カラーカメラ（Mikrotron Eosens MC4083[14]）を使用した．このカメラは，900Hz に近い周波数でフル HD 画像を取得できる．ガルバノミラーは，ケンブリッジ・テクノロジー製の M3 シリーズ [56] で，数百ヘルツの周波数で往復運動可能で実効径 3cm のカメラセンシングに適したものである．また，解像度 16 ビット

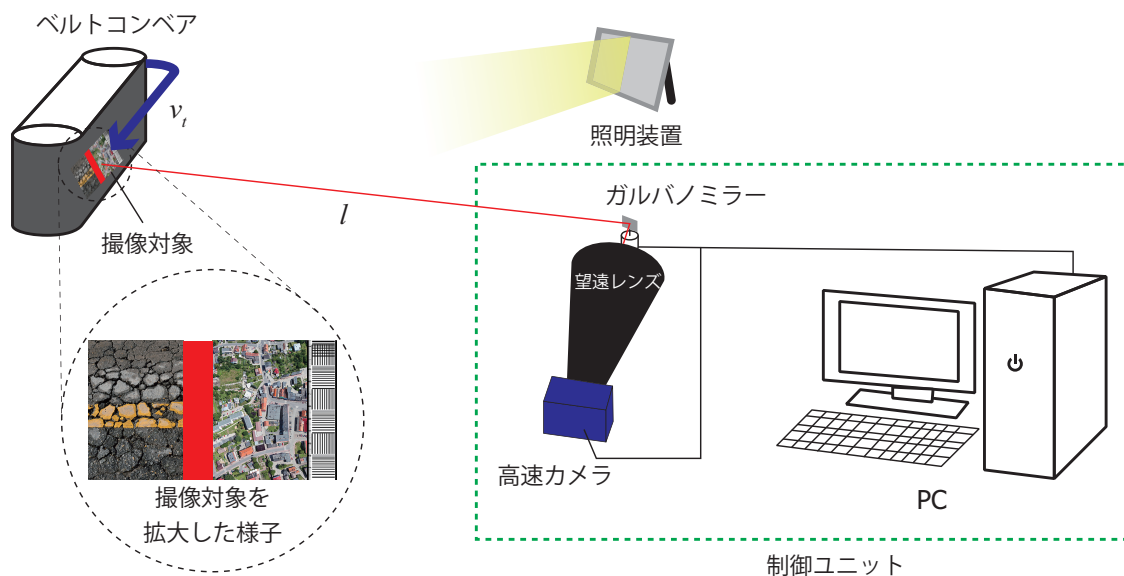


図 2.15. 実験システムの概念図

の AD/DA インターフェースボード（インタフェース社 LPC-361216）を用意した．PC は，CPU として Intel Xeon E5-1620 プロセッサ，OS として Windows 7 Professional を使用した．ソフトウェアは，OpenCV 2.4.6 を使用して C/C++ で記述した．また，システムには他に照明（Mintage M Power Light PMX-120）とレンズ（Nikon AF-S NIKKOR 200mm f/2G ED VR II）を使用した．図 2.16 に，モーションブラー補償システムのプロトタイプの写真を示す．

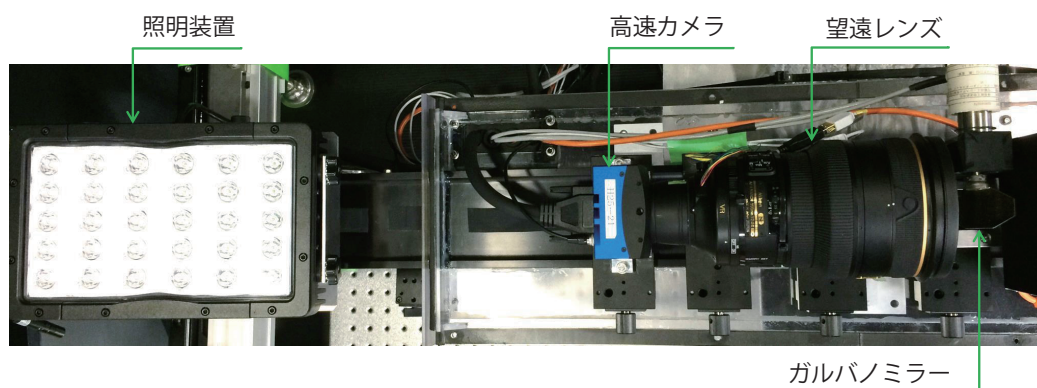


図 2.16. モーションブラー補償装置のプロトタイプ

実験を始めるにあたり，最初にパラメーターを表 2.1 のように設定した．

また，ウィーナーフィルタによるモーションブラーの除去には，同一の PC を利用し，ブロックマッチングによって得られた移動ピクセル数をモーションブラーのブラーカーネルとして設定し，Deconvolution 処理を行った．その差異，ノイズの分散を 0.00001 として設定した．

表 2.1. モーションブラー補償装置の検証実験におけるパラメーター

項目	パラメーター
露光時間 t_{ex}	2.5ms
相対速度 v_r	0~30km/h
画角 α	4.5°
画像幅 S_w	2336 画素
距離 l	3.0m

2.5.2 予備実験

ガルバノミラーの応答特性

第1の予備実験として、周波数 f についてのガルバノミラーの応答特性を確認するため、入出力間の振幅値の関係を分析した。Duma らの研究によれば、光学デバイスの応答特性を把握して使用することは、適切な光学システムやソフトウェアの設計を助けることとなる [40]。

まずファンクションジェネレータを使用し、100Hz から 500Hz の周波数の正弦波を発生させた。M3 は数百 Hz のオーダーで入力信号を出力可能であるが、今回は応答特性の限界を知るため 500Hz までを対象とした実験を行った。さらに、振幅を 0mV から 500mV の範囲に設定した。入力振幅 $\pm 3V$ は、回転角 $\pm 30^\circ$ に対応させた。 v_r が 30km/h の場合、ターゲットは 5ms の間（100Hz の周波数に対応する周期の半分）に前方に 4.2cm 動く。したがって、理論上の最大入力振幅は、 $\arctan(0.042/3)/30 * 3000$ から $\pm 1.40mV$ であると導出できる。しかしながら、入力振幅の低い値にはノイズ成分が含まれるため、500mV まで応答を調べて応答特性の傾向を判断した。

結果として、図 3.6(a) 及び (b) に示す応答特性を得た。図において、入力振幅は A に対応し、入力周波数は f に対応する。図 3.6(a) においては、入力 500mV までは、 f が 100Hz から 200Hz の間でプロットされた点が直線的であり、100Hz でプロットされた点が $y = x$ に対応することがわかった。さらに、図 3.6(b) は、100Hz でのゲインが 0dB であり、その他はゼロ未満であったことを示している。したがって、本実験においては減衰が見られなかった周波数である 100Hz を f として設定することとした。

高速ブロックマッチングの評価

第2の予備実験として、高速ブロックマッチング法の性能を評価した。2.5.2 節の結果より、 f を 100Hz に設定することとしたため、ブロックマッチングと角速度の計算にかかる全時間が 10ms 未満であれば、最新の ω_r を ω_m に設定することが可能となる。式 2.3 及び式 2.4 は、比較的計算量の少ない処理であるが、式 2.5 は特に計算量が多い処理であると考えられるため、ブロックマッチング法が 10ms 未満で実行できるかどうかについて検証を行った。

この予備実験のため、水平方向に移動した位置関係にあるペイヤー配列の静止画像 2 枚（図

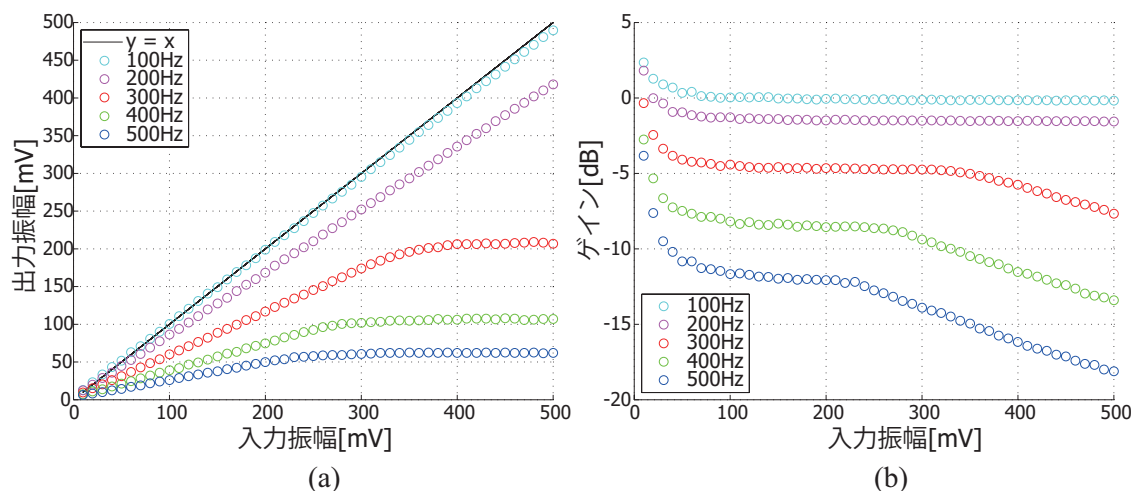


図 2.17. ガルバノミラーの応答特性. (a) 入力信号 [mV] 及び出力信号 [mV] (グラフの直線性を確認するため, ノイズが現れた位置において平滑化を行った). (b) 入力信号 [mV] 及びゲイン [dB].

2.18(a)(b) 参照) を用意した. これらはベルトコンベアの画像の一部であり, 特徴的な赤いシールをその上に貼り付け, 結果を簡単に確認できるようにした. 画像の幅は 1500 画素, 画像の高さは 848 画素として設定した. ブロックマッチング法を通常の手法と本論文における手法でそれぞれ試したところ, どちらも図 2.18(a) 及び (b) における画像間の距離は, 346 画素となった.

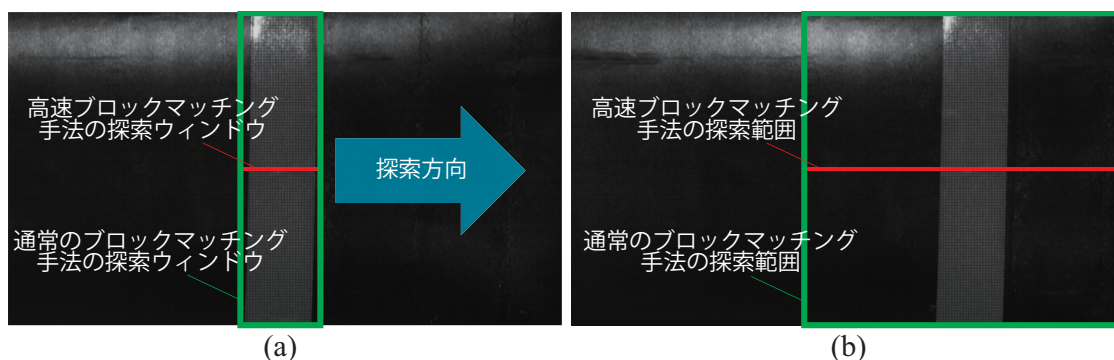


図 2.18. 2つのブロックマッチング法 (従来手法及び提案手法) により処理される水平方向に移動されたベイヤー配列静止画像. (a) 前画像. (b) 現画像.

実験の結果, 従来手法ではベイヤー変換に 8.9ms, 検索範囲全体に対する単純ブロックマッチング法に 4351ms かかったのに対し, 本手法ではベイヤー変換が不要であったにも関わらず領域を削減したブロックマッチング法であったために 4.3ms の時間しかかからなかった. 346 画素の画像間の距離が示す通り, これら 2つのブロックマッチング法の精度は同じだった. 図 2.13 では, 他にもいくつか処理が示されているが, P4 のみが 2次元画像処理であり, 要求される計算コストが高いのに対し, 他の処理は非常に簡単で計算量が少ないため, これらの処理

については計算時間として無視できる．よって，筆者の手法が 100Hz リアルタイムシステムの実装に適していることが実証され，ブロックマッチング法のアルゴリズムは単純な全域的な処理と比べてほぼ 1000 倍速くなることがわかった．

本実験で使用した赤のパターンは本実験でも引き続き使用していく．

2.6 本システムによる高速移動体に対する画像撮影

2.6.1 実験結果

図 2.19(a)–(d) に，本システムの基本的な結果を示す．図 2.19(c) 及び (d) の画像は図 2.19(a) の画像と比較して鮮明度が劣化していたが，図 2.19(c) 及び (d) の画像は図 2.19(b) の画像と比較して格段に鮮明度が向上していた．また，図 2.19(d) は図 2.19(c) と比べてノイズが少なく，より細かい白黒の線を読み取ることができた．

次に，図 2.19 の青い線は画像中の特定列における画像のプロファイルを表している．図 2.19 の各 (a)–(d) をプロファイルで見ると，図 2.19(b) に示す特性は完全に平坦であるが，図 2.19(c) 及び (d) に示される特性は，白と黒の縞模様のコントラストが改善した結果，一定の凹凸が認められる．これは画像の鮮鋭さが失われていないことを表している．しかしながら，プロファイルにおいても図 2.19(d) は図 2.19(c) と比べて周期的に白黒のパターンが現れたのに対し，図 2.19(c) ではプロファイルの直線の滑らかさが失われておりランダム性が増していることから，ノイズの影響を受けていると考えられる．今回の結果により，ブロックマッチングによって正しいブラーカーネルの設定さえできていれば，モーションブラーの除去がなされることを確認できたが，一方で式 1.2 で示したようにカメラにおける画像撮像では撮像と共にノイズ成分が含まれてしまうため，Deconvolution 処理によってノイズが増幅してしまう傾向にある．そのため，本提案手法を用いた結果のように，より細かい空間分解能を Deconvolution で実現するためには，ノイズを含まない理想的な環境での撮像が必要と考えられるが，実際には撮像時の一定量のノイズは避けることができない．よって，本研究手法はノイズを含む撮像系であってもモーションブラーの影響を避けることが可能な手法と言い換えることもでき，高速移動環境下においてモーションブラーの影響を避けるには，Deconvolution よりも本提案手法の方が向いていると考えられる．また，ノイズ量は今回手動で結果が最良となるよう調整したこともあり，動的な撮像環境では本結果より劣化した Deconvolution の結果が得られるものと予想される．最後に，Deconvolution 処理にかかる時間を計測したところ，1 枚の画像あたり画像の読み込みから Deconvolution 処理終了まで 597ms を要したため，撮像周期の 10ms を考慮するとリアルタイム処理するためには GPU の使用等今回とは異なる手法が必要と考えられる．点検等の応用では画像撮像後速やかに異常があったかどうかの判別を行う必要があることから，計算コストを極力減らすことが重要であり，その点からも本論文における提案手法の方が望ましいと考えられる．

結果をより定量的に議論するために，図 2.20 に，各 v_r における当初の白と黒のペアのピーク値を示す．モーションブラー補償機能をオフにした場合は，白と黒を区別することは

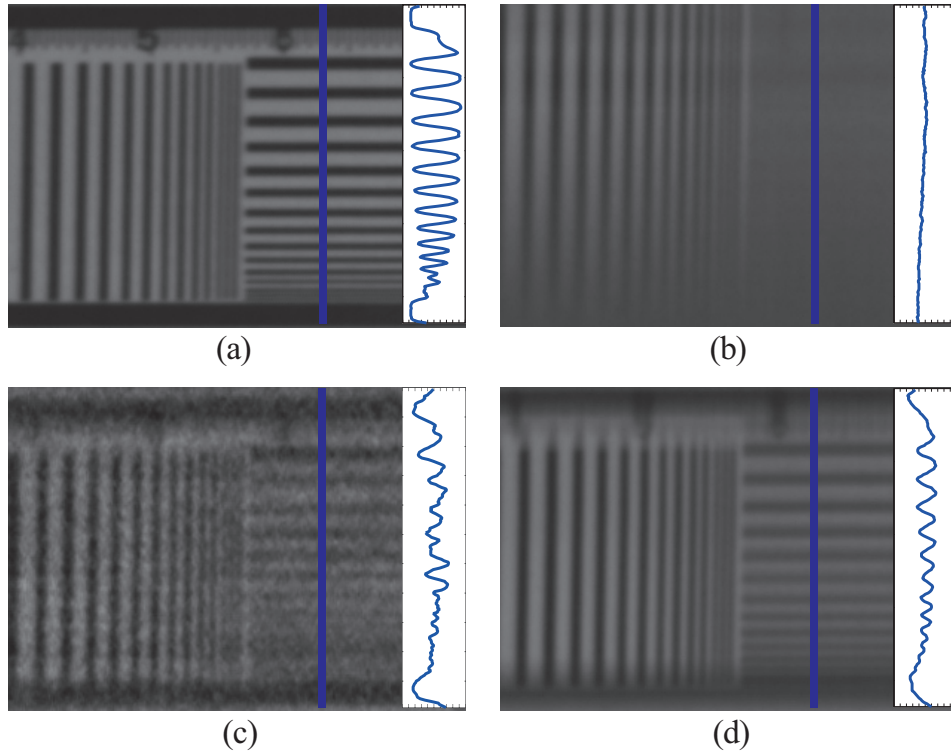


図 2.19. 時速 30km で装置が動いた際の基礎的な実験結果. 隣の曲線は青い線におけるプロファイルを表す. (a) 静止画像. (b) Deconvolution 及びモーションブラー補償無し. (c) Deconvolution 有り. (d) モーションブラー補償有り.

困難であったが, モーションブラー補償機能をオンにした場合は, ピーク間の値は $v_r=30\text{km/h}$ でも維持された. また, すべての試行において, モーションブラー補償機能を用いることで, ガルバノミラーと同期をしながら画像を取得することができた.

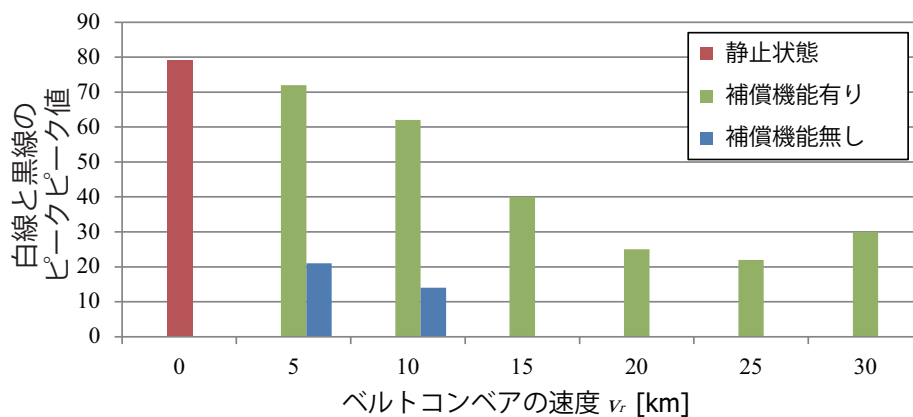


図 2.20. それぞれのベルトコンベア速度 v_r におけるピークピーク値の様子

最後に, 筆者らのシステムの用途例を図 2.21 に示す. 図 2.21(a)–(c) は, ひび割れた道路の

画像を示す．(b) の画像と比較して (c) の画像は改善されており，これは，特に高速運動中に照明が限られる場合において，本システムが道路状態の検査に有効であることを示している．このことから，本リアルタイムモーションブラー補償システムは，緊急に補修が必要な危険な道路損傷について警告を発する助けとなる可能性が考えられる．図 2.21(d)–(f) は，コンベヤーライン上の物体を検査する際に欠陥部が存在するか否かを確認することに対しても本システムが有効であることを示している．図 2.21(g)–(i) は，ヘリコプターから撮影された画像に対しても本システムが有効であることを示している．画像取得時に，モーションブラーが補償され，空間解像度が向上するため，画像検索の精度を向上させることができると考えられる．画像検索の精度向上は画像の空間上における位置情報に結びつけることも可能とすることで，相対的な自己位置推定にも活かすことができる．これらのことから，筆者の手法を利用することで，モーションブラーがパフォーマンスを低下させると考えられる応用用途において，本手法が有効であることを示す結果を得ることができた．

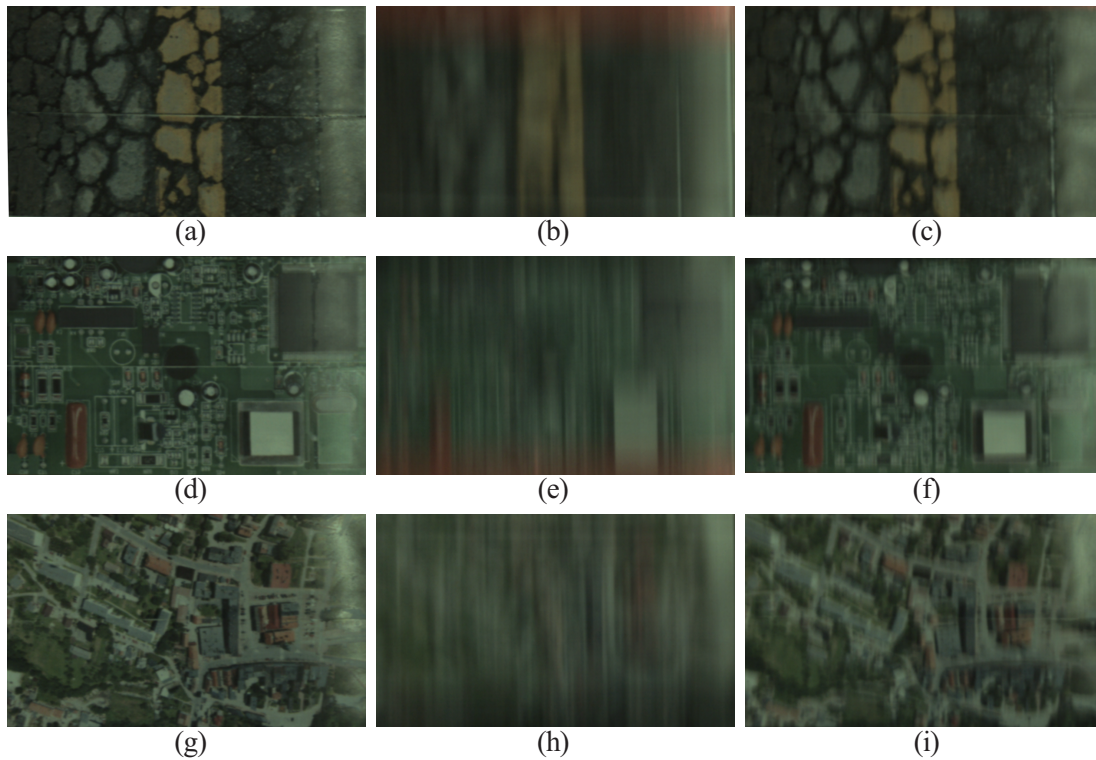


図 2.21. 筆者らのシステムの実用的応用用途例（表示位置を揃えるために画像をトリミングしている）．1 行目 ((a),(b),(c)) にはひび割れた道路，2 行目 ((d),(e),(f)) にはプリント基板，3 行目には ((g),(h),(i)) ヘリコプターからの写真を示す．1 列目 ((a),(d),(g)) には静止画像，2 列目 ((b),(e),(h)) には $v_r=30\text{km/h}$ の間の画像（モーションブラー補償無し），3 列目 ((c),(f),(i)) には $v_r=30\text{km/h}$ の間の画像（モーションブラー補償有り）を示す．

2.7 モーションブラー補償装置の応用用途拡張に向けた課題

2.7.1 モーションブラー補償手法の改善

図 2.19(c) に示す画像の鮮明度は、図 2.19(a) に示す画像の鮮明度と比較して劣化していた。図 2.20 ではまた、モーションブラー補償機能がオンの場合に、時速 30km の速度でのピークピーク値は、静止状態と比較して約半分であることを示している。考えられる理由として、まず、カメラ露光タイミングとガルバノミラーの θ との同期が不完全であることが挙げられる。本手法ではガルバノミラーを開ループ制御により制御したため、制御遅延により同期が不完全になった可能性がある。図 2.14 において、位相が遅延している場合、モーションブラー補償の効果は減少する。これを避けるためには、閉ループ制御またはリアルタイム OS を使用する必要がある。また、今回の手法では正弦波のみを使用した。別の波形（例えば三角波、鋸波等）の使用についても考えることができる。しかしながら、2.4.4 節で説明した通り、波形に鋭いエッジがあると、ガルバノミラーに非常に大きい加速度が必要とされる。そのため、まずは加速度を上げる手法について考える必要が生じる。この点については、次節 2.7.2 節でも議論する。最後に、 ω_r と ω_m との不整合を考えることができる。これもまた、閉ループを用いてパラメータをチェックし、理論モデルを実用に適したモデルに修正することにより回避することができると考えられる。

2.7.2 リアルタイム性を向上させるためのゲイン補償機能の追加

2.5.2 節で述べた通り、筆者のシステムは、ガルバノミラーの応答性の不足により、100Hz を超える f を必要とするリアルタイム用途には対応できなかった。 f が上昇すると、ガルバノミラーの出力ゲインは低下する。これは、ガルバノミラー M3 のモータドライバの仕様である PID 制御の性能が、入力周波数により制限されるからだと考えられる。入力周波数が高ければ、特に比例係数を変更しない限り PID 制御は機能しない。一般的に、ゲイン低下の問題は、PID 制御用のパラメータをチューニングすることで解決できる。しかしながら、 f をある一定の値としてパラメータをチューニングした場合、他の値が使われる際に再チューニングをしないと、システム使用時のパフォーマンスが低下することが予想される。こうした事態を避けるために、ミラーを小さく・軽くできれば、応答性が向上し、 f を高く設定できるようになる。しかしながら、一方でミラーの受光面積が減少してしまうため、カメラが受光する照明の量は減少する。照明の光量及び取得画像の明るさが同じで、且つ高速にシステムを運用できる用途では、そのようなミラーのサイズを変えることは難しく、ガルバノミラーの駆動方式や制御方法を改善する必要がある。これは、より大きい電流量を用いて加速度を上げるか、他の制御方法を採用するか、別種のガルバノミラーを使用することで実現できると考える。本課題に対し、3 章で新たにプリエンファシス技術を利用したリアルタイム制御手法について議論していく。

2.7.3 絶対位置座標の獲得

2.6.1 節で述べた通り，モーションブラー補償手法により高速移動環境下における撮像画像の空間分解能が向上することで，画像検索精度が向上し，ヴィジュアルオドメトリにより撮像画像の空間上における位置との対応付け精度も向上するものと考えられる．この位置情報は一定の空間内において相対座標として利用されることが見込まれるが，一方であくまで相対的な座標であるため，地理上の位置と関連付けられていない．そのため，絶対座標空間で見たときの画像の位置が特定されることはなく，広域的な視点で取得した情報に対して管理・記録することが難しくなるものと考えられる．そこで，相対座標だけでなく，5章において絶対座標の取得位置精度改善手法について議論していく．

2.8 本章のまとめ

本章ではセンサーを追加せずにリアルタイムモーションブラー補償手法を用いて，高速カメラで連続画像を撮影するシステムを開発した．具体的に，モーションブラー補償装置はガルバノミラーの回転往復運動により実装されており，リアルタイム動作を実現するために，背景トラッキングの概念を提案した．本章の手法により，筆者の高速ブロックマッチングにかかる時間は 4.3ms であることが実証された．また，100Hz がガルバノミラーの制御に適した周波数であり，従来のアプローチと比較して，筆者のシステムではこの周波数においてモーションブラーが改善されることを実証した．筆者のシステムは，様々な分野（例えば，ベルトコンベアのラインでの欠陥部品の検索，道路状態の検査，高精度画像検索等）に応用できると考えられる．

本章の結果は，本論文において高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の基礎となる内容を示した．また，本章の手法は高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の問題点として挙げた 4 点のうち，モーションブラーとサンプリングレート，及び位置情報変化に対して有効であると考えられる．位置情報変化については本論では詳しく言及をしてこなかったが，本手法は従来より高分解能の画像を移動しながら撮像することが可能であるため，画像と画像間のマッチング精度を向上させられることができる．そのため，位置情報を画像情報によって照合する状況では，位置の特定がしやすいといった利点が挙げられ，相対座標を取得可能と考えられるが，絶対座標については前記手法以外のアプローチが必要となる．

第 3 章

プリエンファシス技術を利用した高時間分解能モーションブラー補償装置

2 章においてモーションブラー補償装置の基本機能は実現できたものの、ガルバノミラーの応答性が不足していたために撮像周期が 100Hz に留まった結果となった。そのため、筆者はこれまでモーションブラー補償技術を発展させ適用範囲を広げることに関心があり、プリエンファシス技術を利用した高時間分解能モーションブラー補償装置を開発 [36] してきた。本装置で用いているガルバノミラーには PID 制御が用いられており、PID 制御は生成軌道が急峻になると追従精度が低下することが知られており、動作特性限界による装置の駆動周期限界が存在した。そこで、通信工学で知られるプリエンファシス技術を用い、正弦波の軌道をゲイン 0dB で追従できるプリエンファシス係数を予め求め、入力信号を補正することで、高精度の軌道追従精度を広範囲の周波数帯域で実現する手法を本章で提案する。

3.1 従来のガルバノミラーの追従精度向上手法

近年、様々な光学用途のアクチュエータが開発されており、同時に様々な光学アプリケーション向けに制御手法についての研究も進んでいる [37, 38]。図 3.1 で示すように、そのようなアクチュエータの中でも特にガルバノミラーは精度、応答性、携帯性、コスト、信頼性の面から見てバランスが取れたデバイスである [39, 40, 41]。それゆえ、ターゲットトラッキングや描画、スキャニング制御といった光学的なアプリケーションでは、応答性や精度に優れていることから図のようにガルバノミラーを用いてシステム化が実現されている [17, 46, 47, 48, 49]。

こうした背景の中、筆者もモーションブラー補償装置においてガルバノミラーを使用しており [17]、他のアプリケーション同様にガルバノミラーの優れた応答性や精度を活かしたシステム設計を行った。しかしながら、先にも触れたように、ガルバノミラーの応答性が向上すればさらにシステムの実用範囲が広がると考えられることから、応答性の向上は本システムにおける課題となっている。筆者のシステムにおけるガルバノミラーのサーボドライバは PID 制御

Type of scanner	Scan speed & frequencies	Precision	Compact & light	Cost	Remarks
Polygon mirrors (PMs)	Excellent (high rotational speeds of up to 60 krpm and the PMs have up to 128 facets)	Good (0.005% speed stability)	<i>Fair</i>	<i>Highest</i> (\$1k...15k)	Uni-directional; Highest speed <i>Mechanical vibrations; Structural integrity & deformation issues (Finite Element Analysis is necessary [1, 21])</i>
Galvano-meter scanners (GSs)	Good ² (up to $n \cdot 10^2$ kHz)	Very good ($\sim 10 \mu\text{rad}$)	Good	Good (\$1k...2k)	Mature technology <i>Limited in speed for high $I=0D_a$ (scan resolution / Lagrange invariant)</i>
Risley prisms (refractive)	Good (rotational speeds of krpm)	Good ($\sim 0.5 \text{ mrad}$) (<i>large FOR</i>)	Very good	Good ($\sim \$1k$)	Micro-optical devices exist <i>Complicated data retrieving algorithms – in order to follow the scan patterns [12]</i>
MEMS (resonant scanners)	Very good (frequencies of up to 3 kHz for both axes for small mirror sizes [22])	Very good (similar to GS)	Excellent	<i>Still high</i> ($\sim \$3k$)	<i>Their technology is in development; The frequencies have increased significantly; Their issues include in part those of GSs.</i>

図 3.1. 光軸制御デバイスの特徴比較 ([40] より引用)

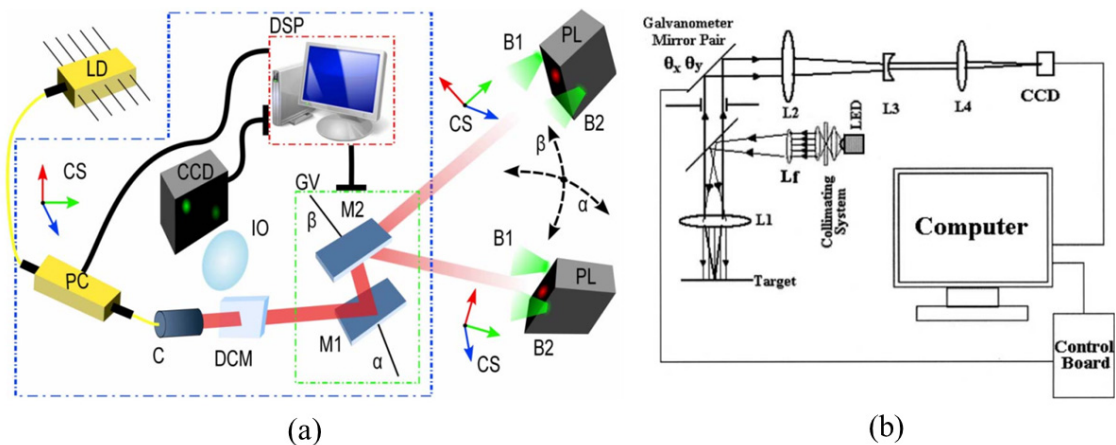


図 3.2. ガルバノミラーを使用したアプリケーション例. (a) [47] より引用. (b) [46] より引用.

によって駆動するコントローラーとなっており，位置制御による正弦波でのスキャンによって制御されている。

筆者はカメラと対象との間に生じる高速な相対速度によって生じるモーションブラーを連続的に補償し，100Hz でリアルタイムにモーションブラーを補償することを 2 章で達成した。しかしながら，この周期は対象を連続して撮像する際の各画像間のオーバーラップ領域もしくは隙間に関連しており，撮像の周波数が高ければ高いほどより高速性が要求されるアプリケーションに向くと考えられる。最近では HD 画質を超える画像を 500Hz といった高フレームレートで撮像可能で，且つ撮像後にそのまま画像処理を実施可能な高速カメラ [14] は流通しており，本論文でも使用しているのに対し，2 章で見られたように，ガルバノミラーの応答性がシステムのさらなる高速化をする際のボトルネックとなっていた。仮に 2 章のモーションブラー補償装置でガルバノミラーを 500Hz といった高周波帯域で駆動させる場合，モーションブラーが未補償の劣化した画質の画像が得られると考えられる。これは PID コン

トローラに対し制御信号が入力されてから制御するまでの時間が短すぎるためと考えられ、その結果として時間内に軌道を追従を実施することが困難となっていた。

一般的にPID制御は、これらのアプリケーションにおいて外部コントローラの制御法として使われており、ある程度の追従精度を実現する手法として広く使われている[50]。しかしながら P, I, D の3つのパラメーターを状況に合わせて正しく設定する必要があり、筆者のシステムに生じるゲイン低下を解消する典型的な解決手法はPID制御の制御パラメーターをチューニングする手法が考えられる。しかしながら制御コントローラは、コントローラによって生成される波形を確認しながら手動で設定するタイプが従来より用いられてきたため、筆者の想定するリアルタイムシステムには不向きな解決手法といえる。これに対し、近年パラメータを自動決定するオートチューニング機能を有するサーボドライバも普及しつつあり、PID制御における制御パラメータを使用前に自動的に求め、設定することが可能となっている[51]。筆者のシステムでは高周波もしくは高速な駆動でガルバノミラーのゲインが低下が見られていたので、単純に比例係数 P の値を増加させることで高速動作に対する追従精度が向上し、さらに応答性が改善するが、単純に P の値を変えただけではその分、チューニング前に良好であった低速度帯域において収束時間やノイズが増すことが考えられ、必ずしも追従精度の向上とはならない。これに対し、セルフチューニングコントローラは適切なパラメータを最新のシステム特性に合わせチューニングする機能として知られているが[52]、パラメータを求める計算時間によるシステム反映の遅延が生じることから、こちらもありリアルタイムシステムに適切な手法ではないと考えられる。

一般的なPIDコントローラから派生したPIDコントローラの外部にさらにコントローラを追加する手法[43, 44]や予測制御方式のコントローラを追加する手法[42]が提案されており、実際に三角波、正弦波、のこぎり波を対象としてガルバノミラーの追従性能が向上することが確認されている。しかしながら、筆者のケースでは、正弦波の高周波帯域での駆動時にゲインが著しく低下しており、意図したガルバノミラーの角速度より大幅に低下した角速度で回転制御が行われると考えられる。実際Mnerieらは図3.3(a)のように出力波形の各周期毎のエッジや位相部分に着目し、手法の効果を検証しているが、波形全体の減衰についての検証はなされていない。また、筆者は正弦波についてのみ軌道追従精度を改善する手法を必要としているので、それゆえ図3.3(b)に挙げられるようなMnerieらの手法のようにコントローラ等のハードウェアに手を加えることなく、ソフトウェアに限定した手法で精度改善を図ることで、手法としての応用範囲を広げることも目的として挙げる。

そこで、本章において筆者は、通信の速度や質向上のために通信工学の分野で用いられるプリエンファシス技術[53, 54, 55]を用いて上記の問題解決を図っていく。プリエンファシス技術は、必要とする出力信号を出力する入力信号をあらかじめ求めていくことを動作の基礎としており、通信工学において利用された結果、図3.4の破線で示されるように増幅された信号が理想の波形に近づいた形状で出力されていることが分かる。筆者はこの技術をPID制御が理想の入力信号通りに機能しない領域に対して適用することで、入力信号と出力信号の信号比を減衰なく0dBとし、軌道追従精度向上へと活用することを目指す。これにより、PIDコントローラのパラメータのチューニング無しで高速・高周波帯域でも減衰のない信号入出力を実

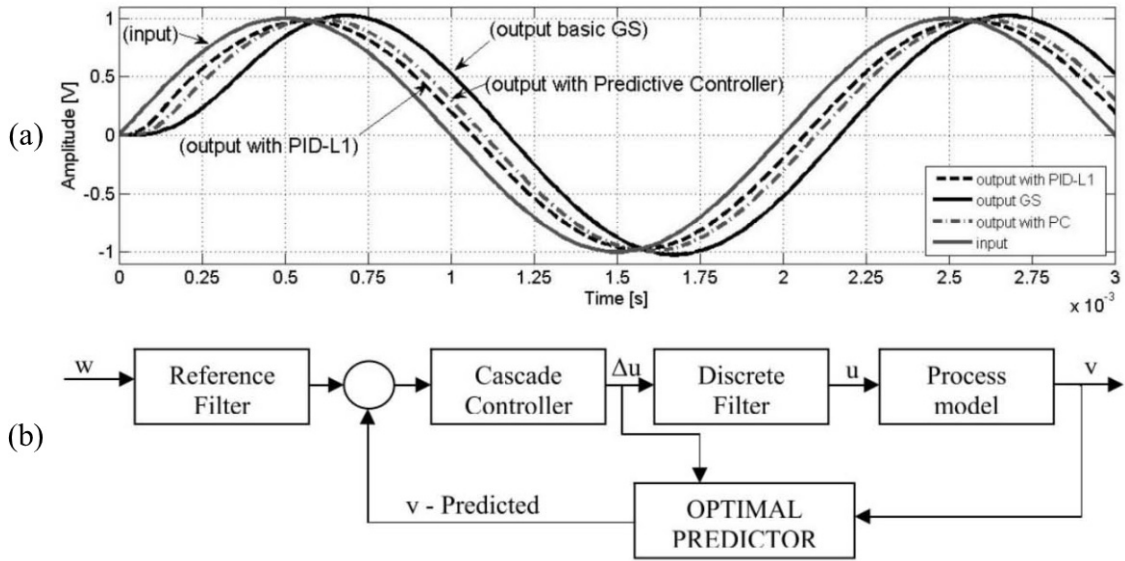


図 3.3. 予測制御方式による軌道追従精度向上手法 ([42] より引用). (a) 500Hz の正弦波に対し適用した例. (b) 予測制御を加えて出力値を最適化する制御構成.

現できることとなる. 筆者のケースでは制御信号は正弦波に限定しており, 正弦波は単一の周波数のみの信号で駆動される波形であるため, あらかじめ入力信号と出力信号の関係性を求めておくと, プリエンファシス技術を適用可能であると考えられる. これにより, アクティブなコントローラやハードウェアを追加する必要がなくなる. すなわち, 筆者の手法では, ガルバノミラーの特性を明示的に求める必要がないだけでなく, Mnerie らの手法と異なりコントローラ自身もブラックボックスとして伝達関数設計等のモデリングをする必要がない. この手法のシンプルさはガルバノミラーを利用した様々なアプリケーションの適用範囲を拡張するものと考えられる.

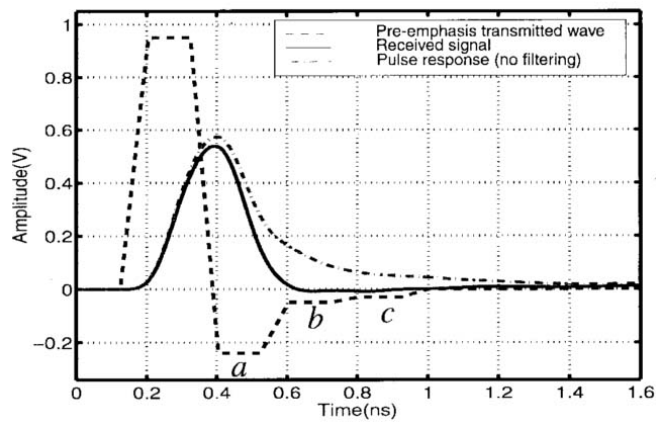


図 3.4. プリエンファシス技術を通信における減衰改善のために利用した結果 ([53] より引用)

3.2 プリエンファシス技術によるガルバノミラーの正弦波追従精度向上手法

3.2.1 本章におけるガルバノミラー及びガルバノミラーの応答特性

これまでに述べてきたように，ガルバノミラーの制御波形には正弦波を用いる．正弦波は位相 0° 付近ではほぼ直線とみなせる区間を持っているため，ガルバノミラーを一定区間等角速度で駆動させることが可能である．なお，本検討には前章までと同様に，図 3.5 に示されるケンブリッジテクノロジー社のガルバノスキャナ M3S システムを用いる．本製品ではサーボドライバ内部で，手動制御パラメーターに応じた PID 制御を行っている．サーボドライバに対し，ユーザーは任意のアナログ電圧を入力することで，電圧値に対応した角度位置にミラーが駆動する仕組みとなっており，同時にガルバノミラーの現在の角度情報がサーボドライバから電圧値として出力される．また，入力電圧値 $\pm 3V$ がミラー角度 $\pm 30^\circ$ に対応するように設定を行った．図 3.6 は前章に続き再記載となるが，本ガルバノミラーに対し，100 - 500Hz の周波数及び 10 - 500mV 振幅の正弦波を入力し，出力電圧の振幅平均値で割ったところ，図 3.6(a)(b) の入出力特性並びにゲイン特性が得られた．本図で見られるように，200 - 400Hz では周波数と電圧の増加と共にゲインの低下が認められ，入力信号に対して制御が追い付いていないことが考えられる．一方，100Hz ではほぼゲインが 0dB で維持されていることがわかり，100Hz 付近まではサーボドライバの PID 制御によって十分な軌道追従精度が確保されていると考えられる．



図 3.5. ケンブリッジテクノロジー社のガルバノスキャナ M3S システム ([56] より引用，紙面の節約のため横に倒して表示)

3.2.2 ガルバノミラー M3S における減衰特性の数式による表現

図 3.6(a) で見られるように，伝送路特性として，どの周波数でも入力値の増加に伴い出力値が連続的に上昇している．そのため，周波数毎に入力する信号の振幅 (A_{in}) と出力される信号の振幅 (A_{out}) は全単射の関係にあり，各要素は下記の式で表される．

$$A_{in1} > A_{in2} \Leftrightarrow A_{out1} > A_{out2} \quad (3.1)$$

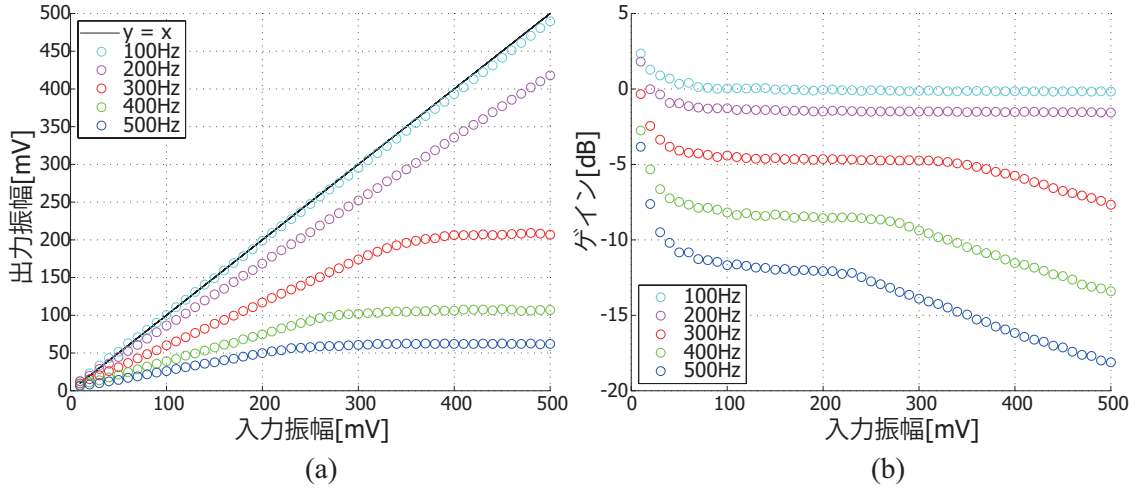


図 3.6. ガルバノミラー M3S の応答特性. (a) 入出力特性. (b) ゲイン特性 (2 章の図 2.17 を本章用に結果を比較しやすいよう再記載, 応答特性を数式化しやすいようノイズは平滑化されている).

図 3.6(a) より, 出力信号値は特に 200mV 程度までは全体的に線形変化をしているように見られ, そのため下記の単純な数式にて表現可能だと考えられる.

$$A_{out} = g_f(A_{in}), \quad (3.2)$$

ここで, g は関数を表しており, また f は周波数を表している.

3.2.3 制御におけるプリエンファシス技術の利用

先ほど紹介したように, 通信工学では, 伝送路における周波数特性の改善のためプリエンファシス技術が用いられ, 伝送路通過時の高周波数におけるゲイン特性を予め求め, その特性に応じて本来の入力値を増幅することで, 出力を一定に保つことが可能となる [53, 54, 55]. 本研究の制御対象であるガルバノミラー及びサーボドライバは, 入力電圧に対して出力電圧が得られる一種の伝送路とみなすことができる. そこで, 通信工学同様, 制御において PID 制御で減衰してしまう周波数帯域に対し, 予めプリエンファシス係数を求め, 入力電圧値に係数をかけることでゲインを一定とし, 軌道追従精度が高い速度帯域を拡張することを目指す.

制御におけるプリエンファシス技術利用の流れ

図 3.7 に制御におけるプリエンファシス技術利用の流れを示す. 処理はオフライン処理とオンライン処理にわかれ, オフライン処理はガルバノミラーの初回利用時にのみ必要となる. まずオフライン処理によって各入力振幅及び周波数の際の出力振幅の特性をデータセットとして入力し, データを線形補間処理することにより各周波数毎の線形補間係数を取得する. 次に線形補間係数を四次重回帰分析することにより, 任意周波数の入力によって信号の増幅処理を可能とするプリエンファシス係数を得る. オンライン処理では, ガルバノミラーを正弦波で動作

させる際に周波数 f をプリエンファシス係数を利用した信号増幅処理にかけ、周波数 f に関する線形補間係数を得る．その補間係数を増幅係数として利用し、入力信号 A_{in} に適用することで、最終的に増幅された入力信号 A_{out} が得られる．詳しくは以降の節で説明していく．

オフライン処理(初回時のみ)

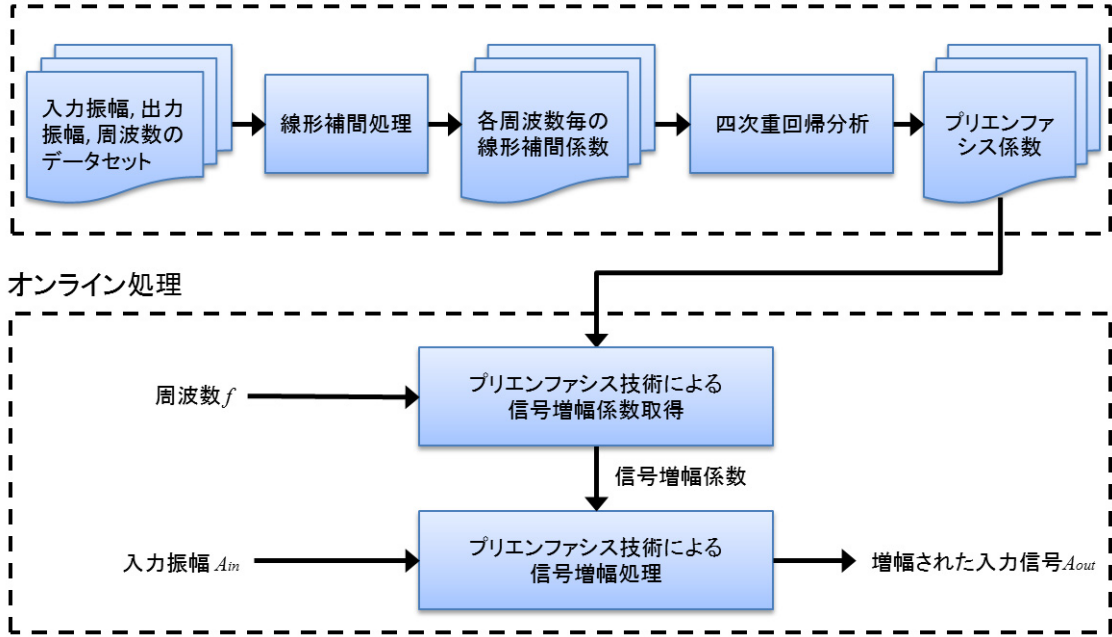


図 3.7. プリエンファシス技術利用の流れ

離散的な位置におけるプリエンファシス技術の活用

まず、図 3.6(a) の座標軸を入れ替えて図 3.8 及び式 3.3 のように逆関数とすると、理想的な出力値を入力信号としたときの実際の出力値が得られる．数式的表現を用いることをしなくても、この段階で更新された A_{in} (A'_{in} と表記) を図 3.8 に従って求めることが可能である．例えば、300Hz の周期で 100mV の出力振幅を得たいときは、165mV 程度を入力振幅値とすればよいことが図 3.8 内の破線部より読み取れる．

$$A'_{in} = g_f^{-1}(A_{out}) \quad (3.3)$$

任意振幅・周波数におけるプリエンファシス係数

しかしながら、図 3.8 では、離散的な A や f における A'_{in} に対してのみプリエンファシス技術を活用可能となっている．そこで、本手法では入出力関係に線形関係が認められることを利用し、まず振幅の変化に対し各周波数毎に g^{-1} を求めて線形補間を行う．図 3.6(a) で見られるように、入出力関係は少なくとも一定の振幅値までは線形変化しているので、下記の式によって 1 次式で表される．

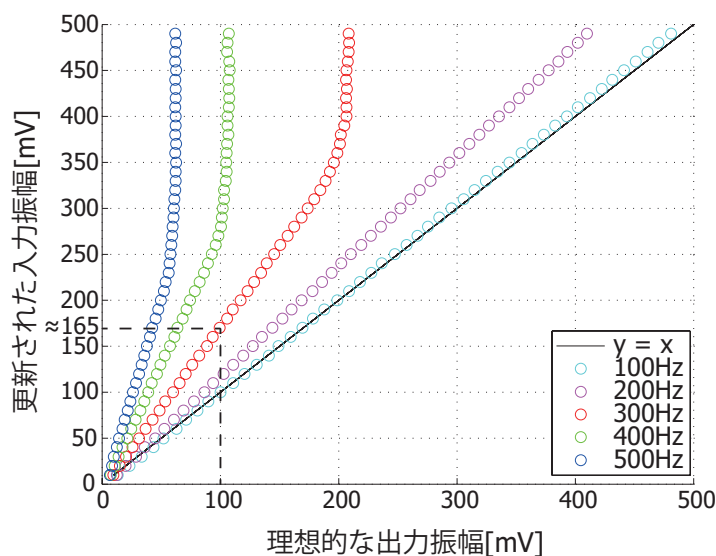


図 3.8. 逆関数適用結果

$$A'_{in} = k_{(0,f)} A_{in} + k_{(1,f)}. \quad (3.4)$$

表 3.1 は実際に線形補間によって求められた式 3.4 における各係数を表している。ただし、図 3.8 において非線形として見られた 500Hz の 200mV 以上等については、PID 制御が飽和してしまっていると考えられるため、今回の線形補間の対象から除外し、計算処理を行った。

表 3.1. 周波数毎の線形補間係数一覧

f [Hz]	線形補間係数	
	$k_{(0,f)}$	$k_{(1,f)}$
100	1.0271	-3.7321
200	1.2053	-3.7107
300	1.7570	-4.2157
400	2.7891	-9.1564
500	4.3559	-14.931

なお、今回は線形に減衰する動特性のガルバノミラーに対し、線形補間によってプリエンファシス係数を求める手法を提案したが、式 3.1 が満たされる限りにおいて、二次曲線といった単調増加する曲線も同様に式 3.5 といった異なる補間式によって数式化することも可能である。

$$A'_{in} = k_{(0,f)} A_{in}^2 + k_{(1,f)} A_{in} + k_{(2,f)} \quad (3.5)$$

表 3.1 より、各周波数毎に任意の入力電圧におけるプリエンファシス係数及び、理想的な出

力値を得るための入力電圧値を予測することが可能となった。

次に、任意の周波数においてもプリエンファシス技術を適用可能とするため、式 3.6 の周波数毎の補間係数変化を 4 次式で近似した。これにより、任意の周波数においてもプリエンファシス技術を適用可能となる。このとき、表 3.2 は 4 次式に対するプリエンファシス係数を表している。

$$k_{(i,f)} = a_i f^4 + b_i f^3 + c_i f^2 + d_i f^1 + e_i \quad (i = 0, 1) \quad (3.6)$$

表 3.2. 4 次の多項式係数一覧

i	4 次の多項式係数				
	a	b	c	d	e
0	-2.158E-11	3.927E-08	5.508E-07	-8.162E-04	1.067E+00
1	6.296E-10	-7.812E-07	2.350E-04	-2.504E-02	-2.859E+00

3.3 プリエンファシス技術による高速性向上の評価：周波数応答測定

3.3.1 プリエンファシス技術によるゲイン向上

100Hz から 500Hz まで 10Hz 間隔の周波数、また 10mV から 400mV まで 10mV 間隔の振幅を式 3.4 に代入していった。この際、図 3.6(a) に基づき、グラフ化できた範囲で線形変化をしている値を振幅増幅の限界とし、200Hz までは 400mV、300Hz までは 200mV、400Hz までは 100mV、500Hz までは 50mV をそれぞれ入力電圧の上限とした。また、500Hz を入力信号の最大周波数とした。結果、図 3.9(a) に見られるように、ほぼ全てのサンプリング点において $y = x$ に従う分布が得られ、図 3.9(b) でも同様にほぼ全てのサンプリングにおいて入出力信号における減衰は 0dB であると確認することができた。しかしながら、いくつかのサンプリング点において予想された位置から外れる結果となってしまった。これは、得られた振幅の値が AD/DA ボードにおけるノイズの影響を受けてしまったものと考えられる。しかしながら、いずれのサンプリング点においても 0dB 以下にはならなかったため、プリエンファシス技術によって入力信号が増幅され、減衰がなくなったことが確認できた。

さらに、結果を定量的に評価するため、プリエンファシス技術が有りのときと無しのときのゲインの値を図 3.10 に示す。結果として、入出力信号が 100Hz のときを除き、ゲインの絶対値は大幅に減少することが確認できた。特に周波数が 400Hz と 500Hz のときには、ゲインが 3dB 程度も向上することがわかった。ここで、図 3.10 に見られるプリエンファシス技術無しのときの結果は、ゲイン計測前にノイズを平滑化により取り除いたあとで振幅値を計算したことから、100Hz において前処理の平滑化によってデータが理想化されすぎてしまったため、プリエンファシス無しの方が結果が良くなったものと考えられる。実際にはノイズの影響がデー

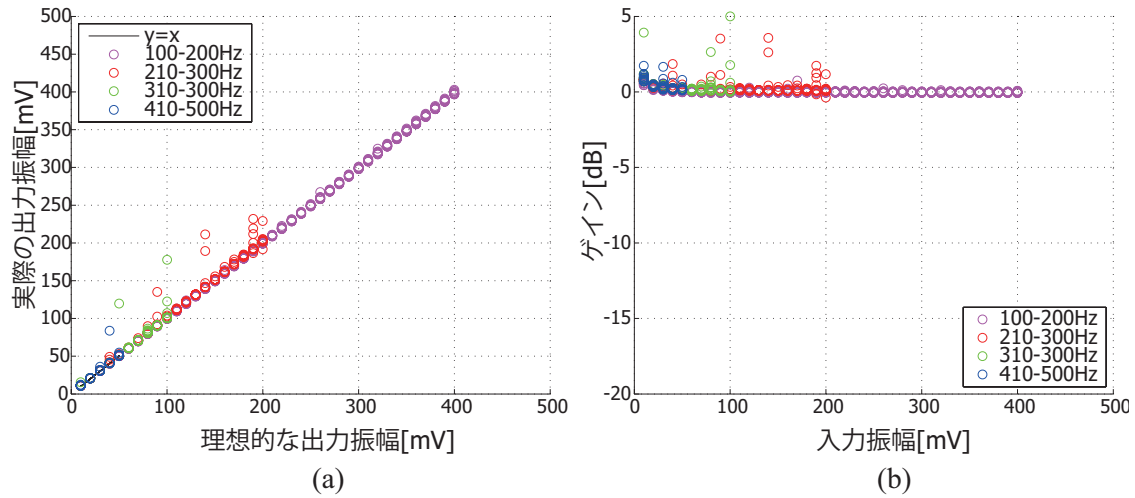


図 3.9. プリエンファシス技術の適用結果. (a) プリエンファシス技術を使用した際の理想的な出力信号と実際の出力信号の振幅値. (b) プリエンファシス技術を使用した際の入力振幅毎のゲイン値.

タに含まれるので、100Hz においてもプリエンファシス技術利用時と同等もしくは劣るゲイン値になると考えられる.

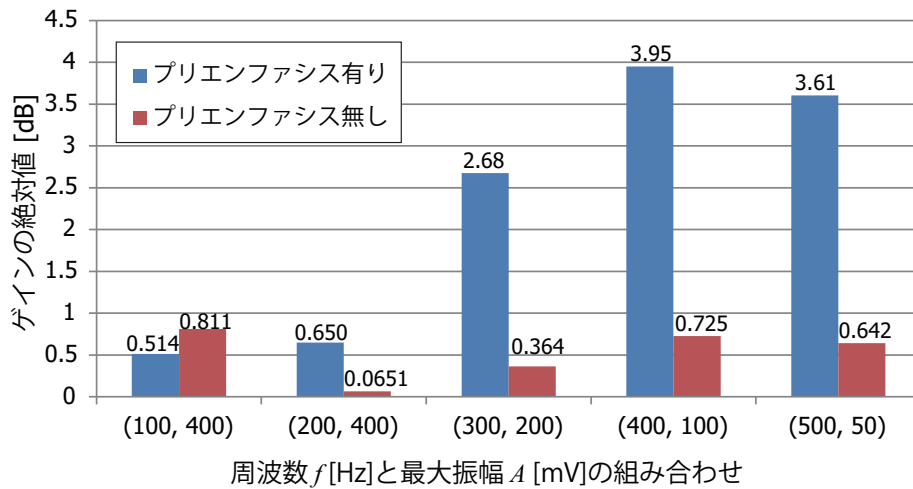


図 3.10. プリエンファシス技術有り・無しそれぞれの際のゲイン値（絶対値）の比較グラフ

ここまで得られた結果から、筆者の手法を用いることで本章におけるセットアップ環境では、正弦波を減衰なく追従可能な周波数を 100Hz から 500Hz まで拡張することができた。また、ガルバノミラーのサイズを小さくすることなく、応答性を改善することが可能だと証明できた。

3.4 プリエンファシス技術を利用したモーションブラー補償システムの性能評価

本提案技術は、周波数の高低に関わらず、正弦波での走査を PID 制御で行う制御系に対し、PID 制御の制御パラメーターのチューニングをせず、高周波帯域に対応範囲を拡張することに対し有効である。そこで、筆者が開発中のモーションブラー補償装置 [17] に対しプリエンファシス技術を適用し、本技術適用前後の性能評価を行う。

3.4.1 モーションブラーキャンセルシステムの要件定義

高周波でガルバノミラーを駆動させる際のモーションブラー量を検証するため、本章ではモーションブラー補償装置の使用手順の簡略化を行った。実験に使用するベルトコンベアの手速度 v_t は変化させず固定とし、予めモーションブラーを補償するために必要とされる角速度 ω_r を計算しておき、ガルバノミラーの制御量として一定の値とした。図 3.11 において $l=3100\text{mm}$, $v_t=30\text{km/h}$ とした。これらのパラメータを式 3.7 に代入し、 $\omega_r = 0.0014[\text{rad/ms}]$ が結果として得られた。

$$\omega_r = 2\arctan\left(\frac{v_t}{l}\right) \quad (3.7)$$

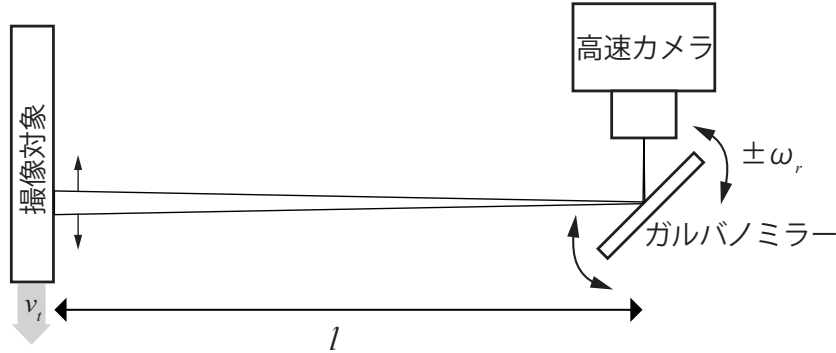


図 3.11. モーションブラー補償装置の模式図

さらに、露光時間 t_{ex} を 1 ms 、周波数 f を 333 Hz とした。これは、正弦波における各周期の 33% が有効な線形区間とする Montagu らの研究結果による [57]。最後に、これらのパラメータを式 3.4、式 3.8 及び式 3.9 へと代入した結果、ガルバノミラーのサーボドライバの制御信号値となる θ を得ることができた。

$$A_{in} = \frac{\omega_m}{4f} \quad (3.8)$$

$$\theta = A'_{in} \sin(2\pi ft) \quad (3.9)$$

3.4.2 実験のセットアップ

ガルバノミラーと AD/DA ボード以外の使用機材は、3 章と同様とした。高速カメラのキャプチャ画像サイズは $848 * 960$ px (幅 * 高さ) とし、センサー内の各ピクセルサイズは $7 * 7 \mu\text{m}$ である。

3.4.3 プリエンファシス技術を利用したモーションブラー補償実験の結果

図 3.12(a)–(d) はそれぞれ移動するベルトコンベア上の縞模様を撮像した結果を表している。図 3.12(d) では図 3.12(a) と比べると鮮鋭度が低下しているものの、図 3.12(b) 及び (c) と比べ、著しく鮮鋭度が向上している。図 3.12(a)–(d) において、結果の定量的な評価を可能とするため、右側に画像の中心部 1 列 (青い線で図示) のプロファイルに記載した。図 3.12(b) 及び (c) は全体的にほぼフラットなプロファイルとなっているのに対し、図 3.12(d) ではプロファイルの上から下まで凹凸が続いて見られる。これはモーションブラーの補償及びプリエンファシス技術により白黒の色のコントラストが改善したためと考えられる。また、図 3.12(c) は図 3.12(b) と比べ若干凹凸を含んでいるが、本来ならばモーションブラー補償装置によって補償されるはずのモーションブラーが、高周波で駆動させたガルバノミラーの出力信号減衰によってモーションブラーの補償が機能しなかったことが原因と考えられる。この結果により、2 章までの装置の駆動周期である 100Hz と比べ、今回の結果は周波数ベースでリアルタイム性向上を達成することができたといえる。また、本章で筆者はプリエンファシス技術がリアルタイムのモーションブラー補償装置に対し有効であると示すことができた。

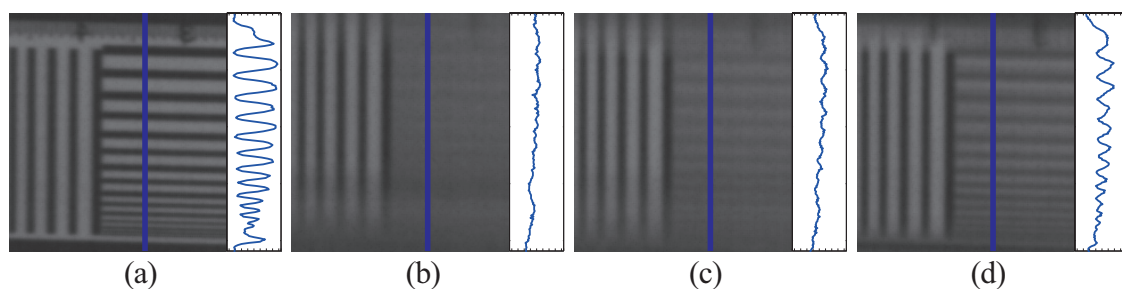


図 3.12. 垂直方向に $v_t=30\text{km/h}$ で対象が動いている際のモーションブラーの様子及び青い線
の場所におけるプロファイル (それぞれの画像は $240 * 225$ ピクセルにトリミングされ
ている). (a) 静止状態の画像. (b) $v_t=30\text{km/h}$ の際の画像 (モーションブラーの補
償機能無し). (c) $v_t=30\text{km/h}$ の際の画像 (モーションブラーの補償機能有り、プリエ
ンファシス機能無し). (d) $v_t=30\text{km/h}$ の際の画像 (モーションブラーの補償機能有
り、プリエンファシス機能有り).

3.5 考察と今後の展望

ここまで、PID 制御が高い軌道追従精度を実現する正弦波の周波数範囲を拡張できることを示してきた。本技術はアクチュエータ及び PID 制御の制御パラメータを変えずに、簡易的に性能向上を得られるため、あらゆる正弦波を利用した制御システム更新時のコスト削減に寄与し得る。今回の実験ではガルバノミラーはケンブリッジテクノロジー社の M3S のみ用いたが、本手法はガルバノミラーやコントローラーをブラックボックスとみなしているため、初期化時やハードウェアの減衰特性に変化が生じた際にプリエンファシス係数を求めさえすれば、他のアクチュエータやコントローラーを用いたシステムに対しても有効な手法として考えられる。

また、図 3.10 においてゲインの値が 0dB より大きくなるサンプリング点が見つかったが、3.3.1 節で述べたように AD/DA ボードにノイズが乗っていた可能性だけでなく、取得信号値全体からピークピーク値を求め、単純に 2 で割ったことにより振幅を求めたことに起因する可能性もあるため、振幅の計測手法をより慎重に行った際には結果が改善される可能性があると考えられる。さらに、3.2.3 節で述べたように、もし入出力信号の関係が式 3.1 の単調増加を続ける条件が満たされれば、プリエンファシス技術は線形の応答特性を持たない他のデバイスに対しても応用可能である。

3.6 本章のまとめ

一般的にガルバノミラーを利用した光学システムの高速な視線制御はガルバノミラーの応答性の不足により、システム全体の速度に限界があった。同様に、筆者がこれまで提案してきたモーションブラー補償装置においても 100Hz 周期でのシステム実行が限界であり、さらにリアルタイム性が要求されるアプリケーションに対して応答性を改善する必要がある。そのため、本章ではプリエンファシス技術を利用して PID 制御における軌道追従精度が高精度である周波数領域を拡張し、高精度な正弦波の追従を提案及び実現した。具体的に、まず入出力信号比が 0dB となるようにプリエンファシス係数をあらかじめ求め、システム利用時の入力信号にそれらのプリエンファシス係数を乗算する手法とした。実験により、周波数は 100Hz から 500Hz まで範囲を拡張してガルバノミラーを使用可能となり、特に 400Hz と 500Hz においては約 3dB ほど減衰が改善した。また、プリエンファシス技術をモーションブラー補償装置に適用した結果、高周波でのガルバノミラー駆動でモーションブラーが著しく改善されることが分かった。2 章までの 100Hz に対し、333Hz で実現できたため、少なくとも 3.3 倍の応答性改善が果たされたといえる。

本章の結果は、本論文において高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の問題点として挙げた 4 点のうち、モーションブラーとサンプリングレートに対して有効であると考えられる。特に 2 章に比べ高いサンプリングレートでシステムを駆動させることが可能となったため、対象全域を連続的に撮像する状況等で漏れのないセンシングが可能となったと考えられ

る。また，加えて位置情報の変化に対しても画像のもれがない分，画像のマッチング精度の向上に対し寄与する結果が得られたといえる。これまでの 2 章と 3 章の結果を受けて，4 章では実用化の検討及び実証実験を行っていく。

第 4 章

インフラ維持・管理におけるモーションブラー補償装置の応用

本章では、これまで研究開発を進めてきたモーションブラー補償装置の応用例として、インフラ維持・管理における目視点検の代替手法の提案を行う。提案手法に関連して、筆者はこれまでインフラ維持・管理におけるモーションブラー補償装置の応用技術を開発してきた [58, 59, 60]。トンネル等の構造物を走行しながら目視点検する技術は、構造物の異常を早期に発見できる可能性だけでなく、インフラ機能自体を停止する必要がないため、近年非常に注目が集まっている。しかしながら、高速で車両走行しながら画像取得を実施することは、従来の静的な画像撮影と比較しモーションブラーによる画質の劣化が避けられない。特に、点検目的では高い精度の画像判定が要求されるため、高分解能の画像をモーションブラー無しで撮影することは極めて困難な課題であった。そこで、本章ではモーションブラー補償装置をインフラ維持・管理に応用するにあたり必要な仕様を検討した上で、複数回の現地実験を経てモーションブラー補償技術の実用化に向けた検証について紹介していく。

4.1 インフラ維持・管理におけるモーションブラー補償装置の導入

高速道路の管理延長は約 8,998km で、平成 23 年度末ではその管理延長の約 40 % が、トンネル数では約 21 % が供用後 30 年以上経過している [61]。それゆえ、不測の事態を防ぐためにそれらトンネル等の劣化に対する何らかの対応策が求められている。既存の老朽化が進んだ構造物等を再建造することと比べ、メンテナンスの方がコストの観点から現実的な手法として考えられている [62]。2030 年にはインフラ向けのモニタリングシステムの世界市場規模は 20 兆円と予測されており [3]、持続的な社会形成に向けて効率的で高精度なモニタリング手法は非常に強く期待されている。特に、高速道路上のトンネルは構造的に比較的高い劣化のリスクを含んでいる一方で、点検のために頻繁に道路を規制することが難しいため、移動する車両からトンネルをモニタリングするシステムの需要が高まっている。また、人間の目による目視点検の代替として、そうしたモニタリングを実施する場合、構造物の中にひび割れやサビといった

何らかの異常を高精度で見つけるためには、高画質の画像を得られることがシステム要件となる。これまで、既にそのような目的の移動式提案車両は提案されてきており [8, 7], 点検にかかる時間や人的コストの削減に成功している。しかしながら、点検における速度（効率）と精度はトレードオフの関係にあり、高速な動きはモーションブラーを生じさせるために画質の劣化を起こす。この問題を解決するため、従来のシステムでは非常に強力な照明を照射し、非常に限られた時間で露光することで、モーションブラーを生じさせない手法が用いられてきた。しかしながら、大量の電力が必要なだけでなく、強力な照明は他のドライバーに対してよそ見を誘発する等の何らかの事故を誘発する可能性がある。さらに、モーションブラーの量は車両の速度と撮像する画像の空間分解能が上がるほど増すため、細かいテクスチャを含んだ画像を鮮鋭に撮影することは困難な課題であった。

そこで、本章ではこれまで述べてきたモーションブラー補償装置を用いることで、移動式車両によるモニタリング点検を高速で且つ高精度に実現していくことを目指す。

4.2 モーションブラー補償装置導入に向けた課題

モーションブラー補償装置を用いたモニタリング点検では、高速画像処理技術を用いて、高速で走行しながら画像処理により自動的に異常を検出する技術の開発を目指す。本研究の目標は、1. 規制をしない点検手法を確立すること、2. 変異・変状を早期発見することである。これに対して、本論文のモーションブラー補償装置を用いることで、高速で移動しながら高精細な画像を取得できるため、それぞれの目標を実現できると考えられる。また、本システムを用いることで、日常点検を詳細に行うことが可能となる。さらに、得られた画像データを用いて変異・変状の進捗状況を日々確認することができ、時系列でデータを蓄積することが可能となる。また、規制を行わず、通常の走行で高速道路の構造物などの画像を正確かつ鮮明に撮影するため、コスト削減と時間の短縮を可能とする。このようなシステムを確立するため、筆者は下記の課題の順序に従い、開発及び現地実験を実施してきた。

表 4.1. 各課題と検証を実施した場所及び時期

課題	実施場所	実施時期
通常車両を利用したモニタリングシステムの開発	猿投山トンネル	2013 年 2 月
高速道路における法定速度への対応（最低速度）	カルバートボックス	2014 年 4 月
高速道路における法定速度への対応（最高速度）	舟原トンネル	2014 年 6 月
公道でのシステムの利用	坂下トンネル	2015 年 3 月

また、公道でのモーションブラー補償が確認できれば、実際の道路上におけるデータを今後頻繁に取得可能となり、時系列で前後のデータを確認可能となるが、その際に位置情報が把握できていることで前後画像の比較が容易になる。ただ、1 章でも述べたようにこうしたカメラ系が移動するシステムでは自己位置が常に変化するため、どの位置の画像を取得しているのか把握するのが困難である。そのため、2 章で述べたように高空間分解能画像を利用したヴィ

ジュアルオドメトリによる相対的な空間座標の獲得や、5章でこれから説明する絶対座標取得精度向上手法の検討を行っていく。

さて、本章では目視検査の代替並びに高性能化を目指し、モーションブラー補償装置を搭載した移動式モニタリング車両（下記図右、以降 HSV システムと呼称、High Speed Vision の略称）について説明していく。HSV システムは下記図左の維持作業車両に将来的に着脱可能であるものとする。ここで維持作業車両を例に上げたのは、交通道路において定期的に往復するだけでなく、通常車両として車検に登録されているために簡易に点検に活用することが可能なためである。



図 4.1. 維持作業車両

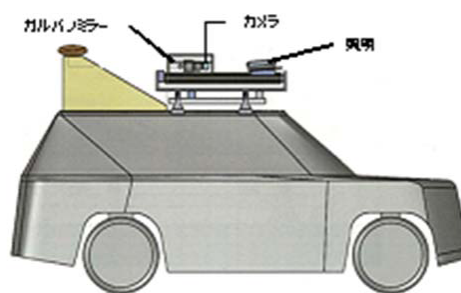


図 4.2. HSV システム完成イメージ図

以降の節では、各トンネルでの現地実験毎に実験に向けた開発、現地実験の様子、及び結果について上記課題を解決していく過程を紹介していく。

4.3 通常車両を利用したモニタリングシステムの開発（猿投山トンネル）

移動式モニタリングシステムを開発していくにあたり、まず通常車両で移動式モニタリングが可能かどうかについて、基礎的な検証を行った。筆者は本検証に至るまで、車両のシステムの開発はしておらず、トンネルの点検に携わったことも一切なかったために、開発を開始するにあたり、基本的な注意事項を初めに抑えておく狙いもあった。

4.3.1 実験に向けたセットアップ

実験場所：猿投山トンネル

本現地実験は 2013 年 2 月、愛知県豊田市猿投山町にある東海環状自動車道上の猿投山トンネルで実施された。実験期間中はトンネルの前後に車線規制が実施されていたため、道路上に降りて車両のセットアップ等を行うことができた。図 4.3 に車線規制中の猿投山トンネルの内部の様子を示す。猿投山トンネルは高さが地上から平均で 7m 程度あり、その他の高速道路の平均的な高さや形状を満たしていた。そのため、今後のシステム開発計画に対し、基礎データ

を得るための基本的なトンネルとして位置付けられた。猿投山トンネルの全長は 4310m あり、開通から一定年数が経過していたため、トンネル内には図 4.4(a)(b) のようなひび割れやエフロレッセンス等のトンネル特有の劣化現象が見られた。また、全長が 1km を超えているため、トンネル内の換気目的で天井部にはジェットファン及びジェットファンを天井から吊るすためのターンバックルが設置されていた（図 4.3 を参照のこと）。



図 4.3. 猿投山トンネル内部の様子

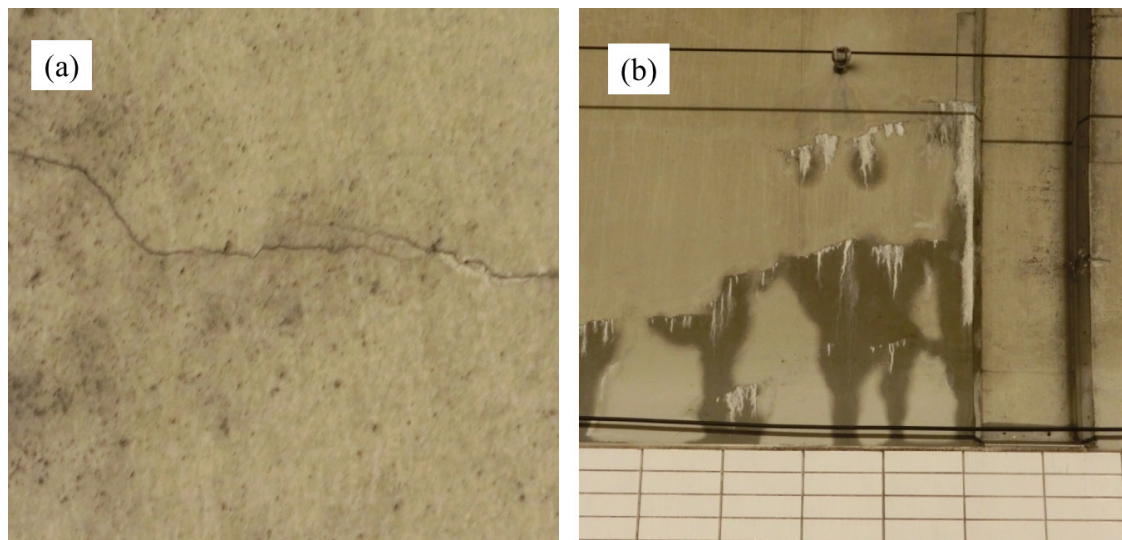


図 4.4. 猿投山トンネル内部の劣化の様子をデジタルカメラで撮影。(a) ひび割れ箇所。(b) エフロレッセンス (ひび割れから炭酸カルシウムが染み出して固化する現象)。

通常車両による点検に向けた車両のセットアップ

車両はトヨタ社のヴェルファイアを使用した。試行錯誤を繰り返すという実験の性質上、頻繁に機材のセットアップを行う必要があり、車両内部から直接車両の上部にアクセスできる機構であるサンルーフを有した車種であったため、ヴェルファイアが選定された。ヴェルファイアに対し、市販のルーフキャリアバーを接続し、ルーフキャリアバーを介してアルミバーをさらに接続した（図 4.5(a)(b)）。さらに、アルミバーに対し、照明やカメラといった点検に必要な機材を搭載していった（図 4.5(c)）。使用したカメラは Mikrotrotron 社の Eosens MC1363 で、1280*1024 ピクセルにおいて 500fps の撮像が可能となっており、この条件で設定した。レンズは実験により単焦点レンズとズームレンズを使い分けた。また、照明は 3 章までと同様に Mintage 社の M Power Light PMX-120 を使用した。他に、車内に CPU として Xeon E3-1225V2@3.20Ghz を採用した Windows 7 OS の PC 及びディスプレイを設置し、走行しながら車両の座席で PC 操作が可能な環境を構築した。

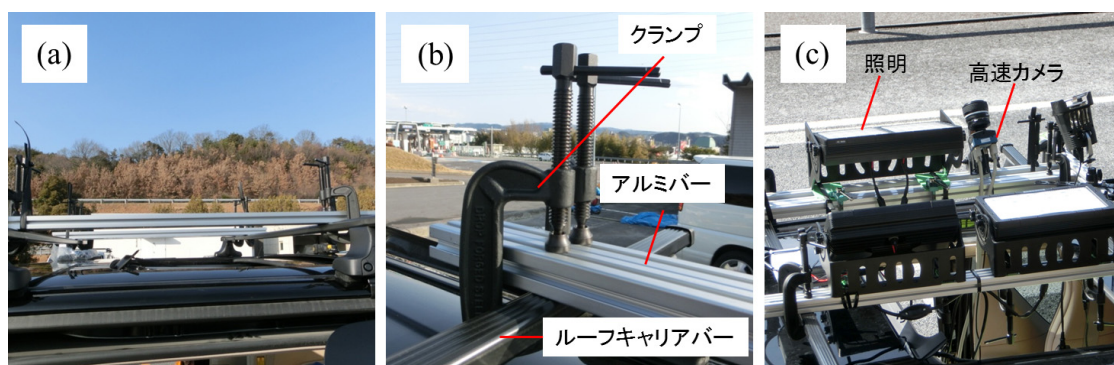


図 4.5. ヴェルファイアの天井部に機材を搭載する様子。(a) ルーフキャリアバーに対しクランプでアルミバーを接続する様子。(b) (a) のアップ。(c) アルミバーに接続されて搭載された実験機材の様子。

図 4.5(c) で説明した構成ではカメラは直接天井部を見ることを想定して設定しており、実験としてはトンネル内で走行中のモーションブラー量を把握するための構成であった。今回行った実験は、それ以外にモーションブラーの補償が車両から可能か検討する目的であったので、2 つ目の構成として図 4.6(a) 及び (b) のようにガルバノミラーを通じてトンネルの天井に光軸中心が向かうレイアウトの準備も行った。以降それぞれの実験について詳しく述べていく。

ところで、3 章までに述べてきたモーションブラー補償装置は、プロトタイプ版も含めて完成していなかったため、今回の実験では特定の完成されたシステムを搭載したわけではなく、あくまで手持ちの機材を手探りで搭載し、どのような機材が車両での実験に適しているかを決定することも目的であった。実際に機材を搭載し、トンネルの中を走行している様子を図 4.7 に示す。

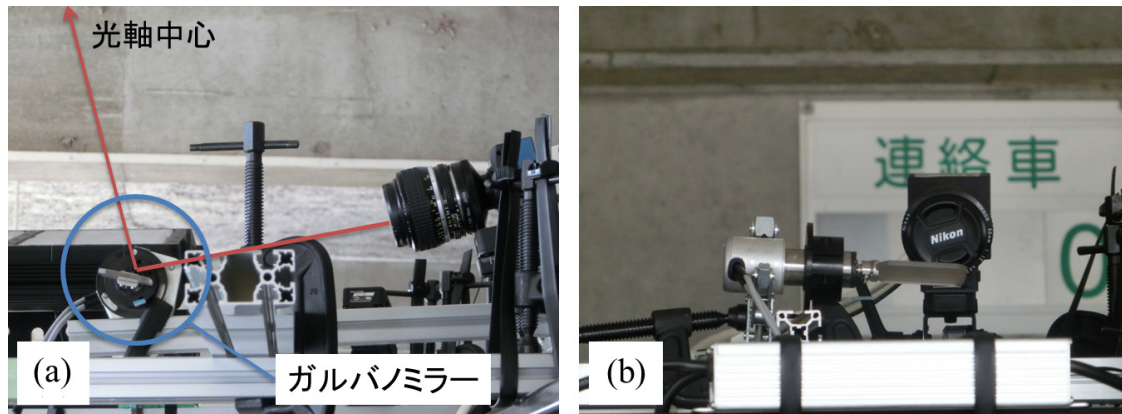


図 4.6. 車両に対し、高速カメラとガルバノミラーによるモーションブラー補償機構を導入した様子. (a) 車両側面から見た様子. (b) 車両前方から見た様子.



図 4.7. 猿投山トンネルでの現地実験の様子

4.3.2 高速道路走行時におけるモーションブラーの影響

本現地試験では、まず車両走行時におけるカメラの撮像でのモーションブラーの影響を検証した。図 4.8(a)–(c) に示すのは、露光時間を固定している状況で速度を変化させた際のどれだけモーションブラー量を検証した結果である。画像中の下半分に斜めに入っているのはひび割れで、右上の直線的な模様は構造物の接合部と考えられるが、図 4.8(a) の時速 10km の際にはひび割れや模様がはっきりと見えるのに対し、時速が上がるに連れて詳細な情報が欠落していく様子がこの結果から読み取れた。この結果により、目視点検と異なり車両が移動しながら

点検する方式を採る場合，移動速度に応じて対象の異常判定が困難になることを実験的に確認することができた．

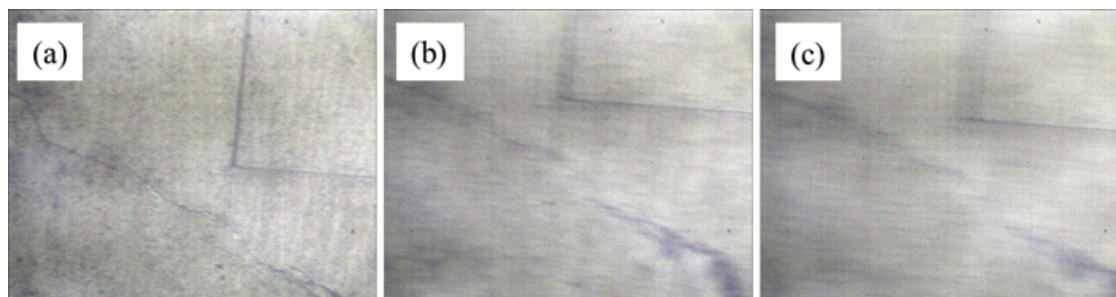


図 4.8. 速度変化による撮像画像のモーションブラー量の変化 (露光時間は 2ms に固定). (a) 時速 10km. (b) 時速 30km. (c) 時速 50km.

次に速度を固定し，高速移動環境下での撮像時の露光時間の長さが画像に与える影響を検証した．図 4.9(a) 及び (b) は時速 100km で走行時のターンバックルの様子であるが，図 4.9(a) は図 4.9(b) と比べ露光時間が長いこと S/N 比が高いと考えられるが，一方でモーションブラーを多く含んでいるため，ネジやプレートの特に境界面がぼやけて映ってしまっている．露光時間を短くするとモーションブラーの影響が減ることはこの結果から確認することができたが，一方で S/N 比が下がってしまうため，画像から対象の状態を判定する際には適切な結果が得られにくくなる．

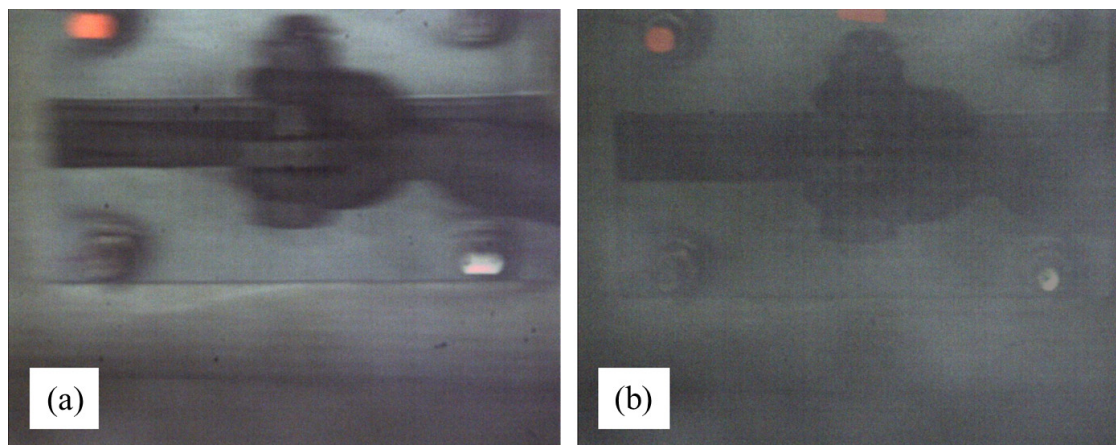


図 4.9. 時速 100km で走行中にターンバックルを撮像した画像. (a) 露光時間 1000 μ s. (b) 露光時間 200 μ s.

4.3.3 フィードフォワード版モーションブラー補償テスト

前記の高速移動環境下におけるモーションブラーの影響を踏まえ，本節では車両にモーションブラーの補償機構を搭載し，補償が可能かどうかについて検証を行う．装置は図 4.6 のように，これまで使ってきた高速カメラに加え，ガルバノミラーを利用し，光軸を進行方向におけ

る進行量を補償する方向に回転動作によって補償を行う。ただし、繰り返しとなるが本実験は3章までのモーションブラー補償装置の開発前に行ったため、ユニット化されたシステムを用いていない。ガルバノミラーはマイクロコントローラー Arduino Due の DA コンバーターを入力信号として、正弦波で回転運動を行うものとした。このとき、一定の回転角に達するとカメラに対し同期信号が送信される仕組みとした。また、カメラから見た対象の進行速度を取得する機構は備えておらず、筆者が可変抵抗を用いて手でガルバノミラーの角速度を設定するフィードフォワード制御によるモーションブラー補償機構とした。そのため、システムとしての再現性は保証されていなかったが、今回は筆者の考えるモーションブラー補償の手法が有効かどうかを検証するため、繰り返し車をトンネルで走行させることで、チャンピオンデータとしてモーションブラーを補償できる事例が現れるまで実験を繰り返した。

結果として図 4.10(a)(b) の画像が得られた。両者を比べて図 4.10 の (b) モーションブラー補償機能を有りにした際には、モーションブラーが軽減された結果、特にターンバックルのエッジ部等の高周波情報がぼけずに残っていることが分かった。今回はあくまで定性的な結果であるが、結果として車両走行により発生するモーションブラーをガルバノミラーの回転動作によって補償可能なことを確認することができた。

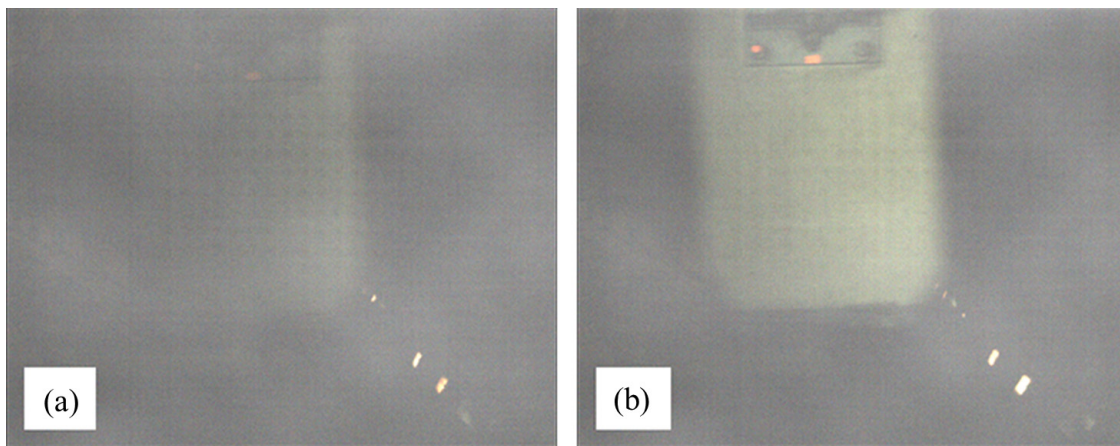


図 4.10. 時速 70km で走行中にガルバノミラーを介して撮像したターンバックルの様子。(a) モーションブラー補償無し。(b) モーションブラー補償有り。

4.3.4 本現地実験のまとめと次の現地実験に向けた課題

今回の猿投山トンネルでの現地実験により、今後の開発に向けて実際のトンネル内の様子を直接記録することができた。筆者は元々土木関係のノウハウを有していなかったため、一連の実験により知見を高めることができ、今後の開発での開発効率を向上させる要因を得ることができたと考えられる。また、一般的に考えられている車両の走行がもたらすモーションブラーの影響をトンネル内で確認することができた。

以上の実験結果により、モーションブラー補償機構を搭載した車両の開発が可能であると判断し、次節以降で通常車両を用いたプロトタイプ機の開発を行っていく。今回の現地実験で

は手元にある機材を組み合わせる実験を行ったが、プロトタイプ機としての開発に向けて具体的に車両による現地実験に適した機材の選定を進めていく必要がある。

4.4 高速道路における法定速度（最低速度）への対応（カルバートボックス）

4.4.1 プロトタイプ機の開発

インフラ維持・管理における画像点検場面を考えてみると、高速移動環境下では慣性力により急激な速度変化は考えられず、また、対象が道路・線路・コンベアライン等における側壁面や路面等の平面が続く状況が想定されるため、撮影対象はカメラから見て平行とみなすことができる。そのため、ガルバノミラーを利用した角速度制御における角速度情報はこれまで説明してきたモーションブラー補償装置によって取得可能である。これにより、追加のエンコーダー機器が必要なく、像面内の情報のみを用いて計算可能であるため、精度とコストの面で寄与しうる機構となっている。

このモーションブラー補償装置を通常車両に搭載することで、車両走行時のモーションブラー補償の性能検証を行うため、まず車両に対しどのようにモーションブラー補償装置を搭載するのか検討する必要がある。実験条件が一定であるとみなせる実験室等での実験と異なり、実用化の際には車両は道路上を走行するため、多少路面が荒れた状況も想定して設計する必要がある。たいていの光学システムは安定性を向上させるために金属製の剛体フレームに対し厳重に固定設計がなされているが、本システムも安定性向上のためモーションブラー補償装置を6cm角のアルミフレームに対して固定するよう設計した。さらに、筆者は除振マウントを車両とアルミフレームの間に接続することで、荒れた路面で生じる振動に対しても装置が許容するシステムとした（図4.11(a)を参照のこと）。また、実用化を考えたときシステムの柔軟性も重要な要素である。対象を撮像する際にシステムが光軸を変更することが可能であれば、カメラを複数台用意する必要がなくなる。このことはシステムのコスト削減ことにつながる。図4.11(b)のように光軸を変化させるためにアクチュエータを2種類用意している。さらに、モーションブラー補償装置を通常車両に対し適用可能とすることで、特殊車両をその都度調達する必要なくシステムを製造可能とし、複数台のシステムで点検を実施する際のコスト削減を実現するためにも、筆者は猿投山トンネルでの実験時と同様に市販のルーフキャリアバーを車両の取り付け、そのバーに対してシステムを取り付けた（図4.11(a)を参照のこと）。今回の実験以降車両はトヨタ車のランドクルーザープラドを使用しているが、これは図4.1の維持作業車両において同車両が使用されていることから、装置の開発後にスムーズに車両による実用化に移行することを念頭においた結果である。

図4.12はモーションブラー補償装置を車両に搭載した様子を示している。これにより、筆者は室内実験用途のみであったモーションブラー補償装置を、実際の点検装置として屋外で車両に対して使用可能なプロトタイプ装置を製作することができたと考えられる。あくまで装置を現地で使うのは初の試みであったため、今後のシステムの更新の計画上、ここではプロトタ

イプ装置と呼称している。車両はトヨタ社のランドクルーザープラドを使用し、ルーフキャリアは TERZO 社の製品を 2 セット計 4 本使用した。光軸はアクチュエーターにより水平方向に 600mm 可変であり、また 90 度回転させることが可能であるため、道路上を走行する際にトンネルを対象に点検を行うとすれば、片道でトンネル全周の半分側を撮像することが可能である (往復で合計 180 度となる)。

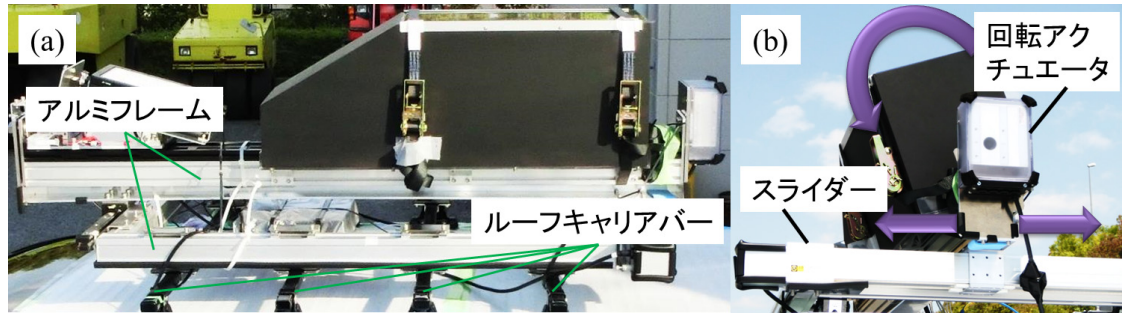


図 4.11. プロトタイプ機の各部のズーム。(a) HSV システム上部を側面から撮影した様子。(b) 光軸制御のための 2 つのアクチュエーター。



図 4.12. 車両にモーションブラー補償装置を搭載した様子。

4.4.2 性能検証に向けたセットアップ

現地実験環境

システムの性能を検証するため、筆者は道路上での実験を 2014 年 4 月に、愛知県豊田市豊田保全・サービスセンターにて実施した。実験場所は中日本高速道路株式会社が管理する私有地であり、一般車が走行することなく、自由度の高い現地実験を行えることから本実験場所を選定をした。実験自体は図 4.13 のカルバートボックス内で実施した。カルバートボックスはトンネルの 1 種であり、山等を掘削して作られた円周上のトンネルと異なり、四角形状であることが特徴である。実験場所の選定理由として、今回の現地実験ではモーションブラーがどの

程度補償できているか検証することが本実験の目的であり，円周上のトンネルである必要はなく，むしろ表面が平面のために実験結果から問題点を考察しやすい点が重視され，カルバートボックスが実験場所として選定された．

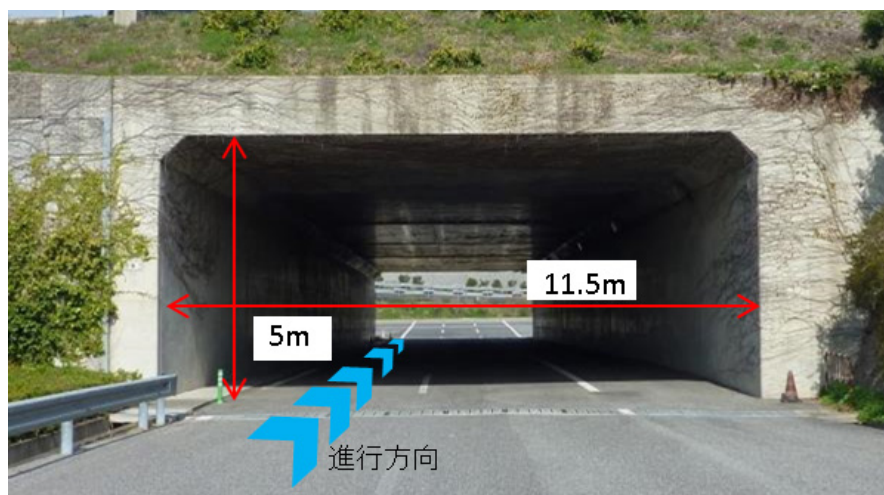


図 4.13. 実験を行ったカルバートボックス

カルバートボックスの幅は 11.5m であり，地面からの高さは平均約 5.0m で，全長 71.2m であった．地面から車両のカメラまでの高さは 2.0m であるため，カメラから天井面までの距離は 3.0m であった．そのため，撮像された画像の空間分解能は水平垂直方向共に 1 ピクセルあたり 0.13mm となった．

実験場所のセットアップと実験手順

車両走行中のモーションブラーをどの程度補償できるのかを検証するため，筆者は検証用に 0.2mm から 1.0mm の垂直・水平方向共に細かい縞模様の入った評価シートを用意し，マーカーと共にカルバートボックスの天井部に貼り付けた（図 4.14）．本実験はモーションブラー補償装置によってモーションブラー量が軽減されることを確認することが目的であったため，マーカーを複数枚貼り付け，ガルバノミラーに対して入力する角速度 ω_m の計算を容易にしたことで，実験の手順の単純化を図った．これは，ガルバノミラーに設定する角速度の計算アルゴリズムが対象表面の特徴量に依存しているためである．

実験を開始するにあたり，露光時間は 1ms とし，駆動周波数は 333Hz として設定した．このとき，システムは 2 章の開発まで終えた段階であり，333Hz ではゲインが低下してしまう現象を防ぐため，入力信号に手動で係数をかけることでゲイン低下を防いで実験に臨んだ．この際の係数 k は式 4.1 において 1.05 とした．車両の走行速度は，敷地内の制約から最高時速 60km とし，進行方向は図 4.13 及び図 4.14 の方向とした．

$$\omega'_m = k\omega_m. \quad (4.1)$$

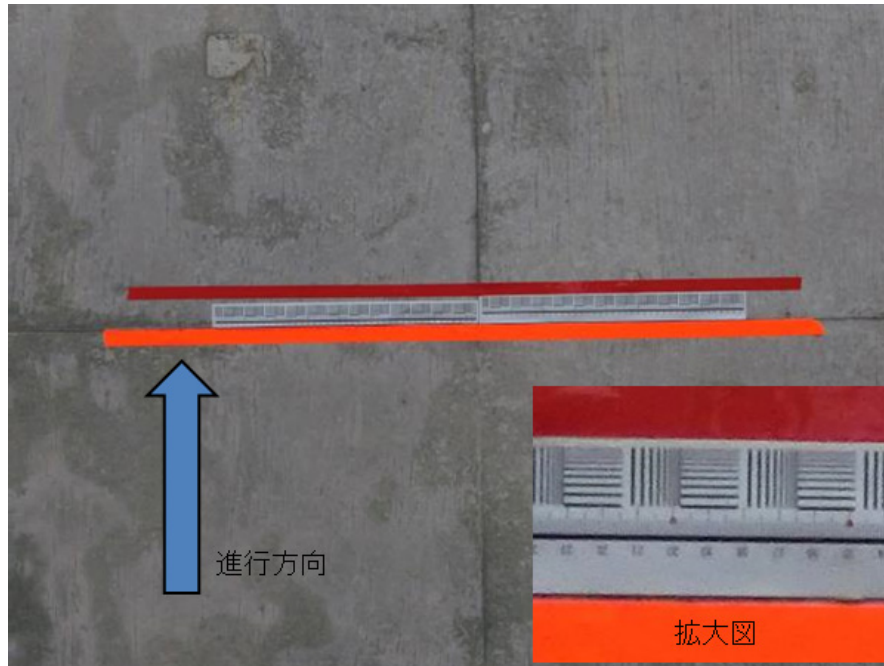


図 4.14. カルバートボックスの天井面に貼り付けたマーカーと評価シート（本画像はあくまで実験環境の説明用途であるため、撮影はモーションブラーの補償装置におけるカメラではなく、民生機のデジカメによって行われた）

4.4.3 現地実験結果及び考察

図 4.15 に示すように、カルバートボックスにて HSV システムを走行させ、モーションブラー補償の性能検証を行った。図 4.16(a)–(c) と図 4.17(a)–(c) はそれぞれ縞模様の静止画と時速 40km で走行中のモーションブラー補償有り・無しでの撮像画像を表している。時速 40km で走行中に 1ms で車両は 11mm 進行するため、図 4.17(c) に見られるように通常では大量のモーションブラーが生じてしまう。これに対して、図 4.17(b) では、静止画である図 4.17(a) と比べると画像の鮮鋭度に劣化が認められるものの、図 4.17(c) と比べ、著しくモーションブラーが改善されていることが分かる。仮に露光時間を制限して強い照明を用いてモーションブラーを抑える方式とした場合、モーションブラーが起きないには露光時間を $13\mu\text{s}$ とする必要があり、今回設定したモーションブラー補償装置の 1ms の露光時間において、約 10 倍から 100 倍の画質改善を果たした。これは、図 4.17(a) と比べると画質に劣化が見られるため、改善の度合いに幅を持たせて表記した。ところで、時速 40km でカルバートボックス（高さ 5m）を走行しながらトンネル天井面の点検を行うことは、時速 66km で日本の高速道路の通常のトンネル（高さ 7m）を走行していることと等価である。これにより、本システムの対象速度範囲の上限が、高速道路における最低速度である時速 50km を超えることができた。

また、図 4.18(a)–(e) 及び図 4.19 で示すようにその他の速度でも同様にモーションブラーの補償が行われ、補償無しで観察が難しかった縞の幅を観察できた。具体的に、時速 24km(図



図 4.15. カルパートボックスにおける HSV システム走行中の様子

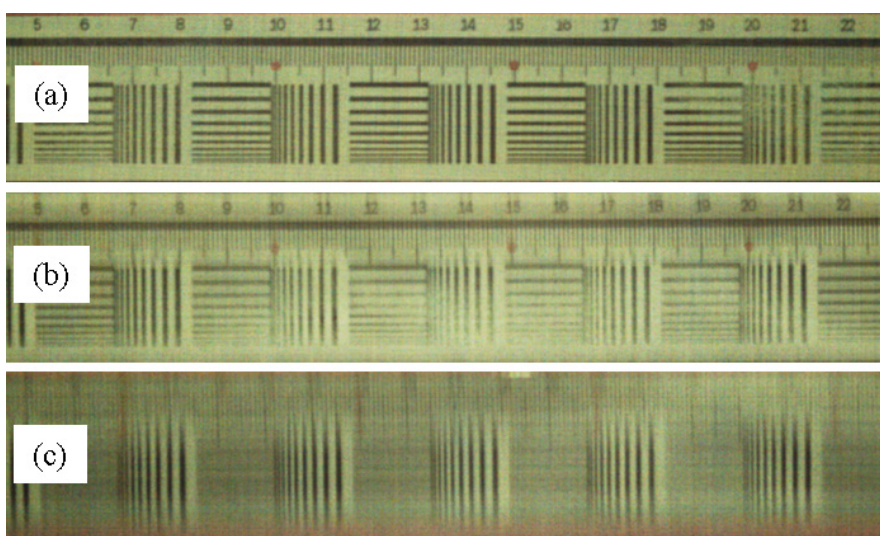


図 4.16. モーションブラー補償例 (撮像画像に対しトリミングとコントラスト補正を施し記載).
 なお、モーションブラーは画像における上下方向に発生している。(a) 静止状態で撮影された画像。(b) 車両の走行速度が時速 40km のときにモーションブラーを補償した結果。(c) 車両の走行速度が時速 40km のときにモーションブラー補償機能を無にした結果。

4.18(a)), 時速 30km(図 4.18(b)), 時速 40km(図 4.18(c)) ではそれぞれ幅 0.2mm の縞模様が確認できた, 時速 50km では 0.4mm(図 4.18(d)), 時速 56.5km では 0.3mm の幅が確認できた (図 4.18(e)). 結果として, 照明照度やカメラ感度を変えることなく, 露光時間を上げることで, コンマ数ミリの異常 (クラック, さび等) を点検可能なシステムを確立できたといえる. ただし, 図 4.19 より, 速度が上がるにつれて観察可能な縞の幅が太くなり, 補償精度が低下

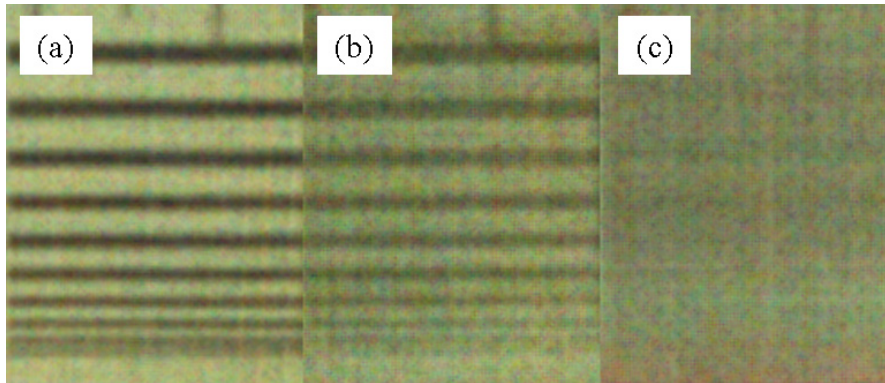


図 4.17. 図 4.16 のモーションブラー補償例の拡大画像 (撮像画像に対しトリミングとコントラスト補正を施し記載). なお, モーションブラーは画像における上下方向に発生している. (a) 静止状態で撮影された画像. (b) 車両の走行速度が時速 40km のときにモーションブラーを補償した結果. (c) 車両の走行速度が時速 40km のときにモーションブラー補償機能を無しにした結果.

していることから, ガルバノミラーの応答性改善やシステムの動作安定性の改善が今後の課題として考えられる.

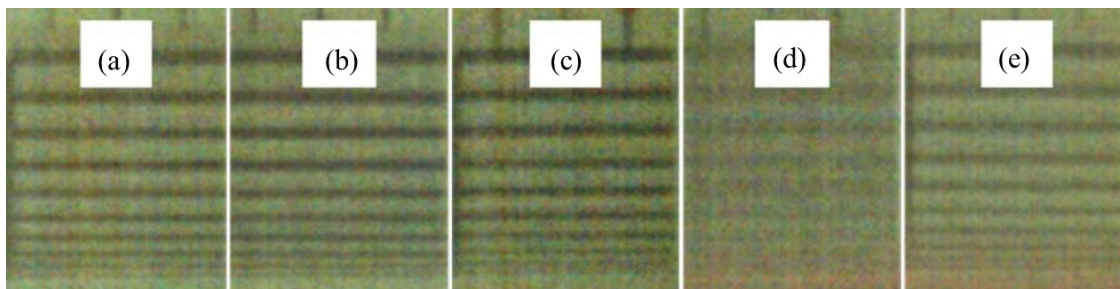


図 4.18. モーションブラー補償例 (撮像画像に対しトリミングとコントラスト補正を施し記載). なお, モーションブラーは画像における上下方向に発生しており, それぞれの画像で車両の走行速度が異なる. (a) 時速 24km. (b) 時速 30km. (c) 時速 40km. (d) 時速 50km. (e) 時速 56.5km.

4.4.4 本現地実験のまとめと次の現地実験に向けた課題

本現地実験により, モーションブラー補償装置による点検の基本性能を検証することができた. システムとしてはプロトタイプであったものの, 高速道路の最低速度にも対応可能なことがわかった. これにより, 車両を公道で走行しつつ高速道路上のトンネルを点検可能になったと考えられる.

ただし, 実用化の際の目的でもあるように規制をかけずに点検可能なシステムとするためには, 他車の走行に影響を与えないことは重要である. 時速 66km でも高速道路上で走行は可能であるものの, 他の車両速度に影響を与える可能性があることから, 速度として最高速度の

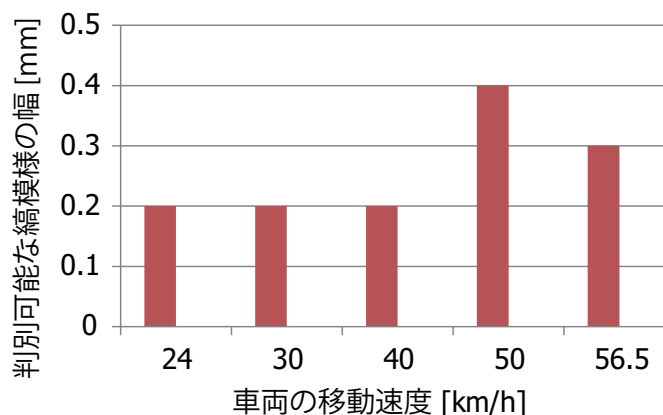


図 4.19. 各速度と判別できた縞模様の幅の関係性

100km に対応していることは非常に重要である。そのため、実用化に向けた次の課題をシステムの対応速度を時速 100km に拡張することとする。

4.5 高速道路における法定速度 (最高速度) への対応 (舟原トンネル)

本節では HSV システムを高速道路での最高速度である時速 100km に対応させるため、3 章にて説明したプリアンファシス技術を用いて HSV システムをアップデートし、岐阜県舟原トンネルにて行われた現地実験及び結果について説明していく。

4.5.1 高速道路の最高時速 100km への対応

3 章においてガルバノミラーに対して与えた正弦波波形の周波数を上げた際の性能の検証は行ったが、実験に利用したベルトコンベヤの最高速度が時速 30km までであり、速度を上げた際の性能については検証を行うことができなかった。そこで高速道路で実際の車両を用いることで、プリアンファシス技術並びにプリアンファシス技術を搭載した HSV システムが時速 100km に対応したシステムとなっているかについて検証を行った。

4.5.2 評価用シートとクラックサンプルの準備

舟原トンネルの実験では、4.4 節のカルバートボックスにおける実験で用いた評価シートをアップデートしたものに加え (図 4.20(a) 参照)、本現地実験では新たにひび割れのサンプル及びひび割れのサンプルシートを用意した。図 4.20(b) のように、ひび割れが発生しているコンクリートを、ひび割れ幅等の状態が変化しないように樹脂で周りを固めたものをひび割れサンプルとする。これにより、評価用のシートと同様に、固定化されたひび割れ幅に対するモーションブラーの影響についての検証が可能となった。

また、ひび割れサンプルをカラーコピーしたものをひび割れのサンプルシートとして用意し

た．これは，ひび割れサンプルと比べ，紙であるシートの方が圧倒的に重量が軽く，トンネルの天井に貼り付ける際に落下を予防することが目的であった．

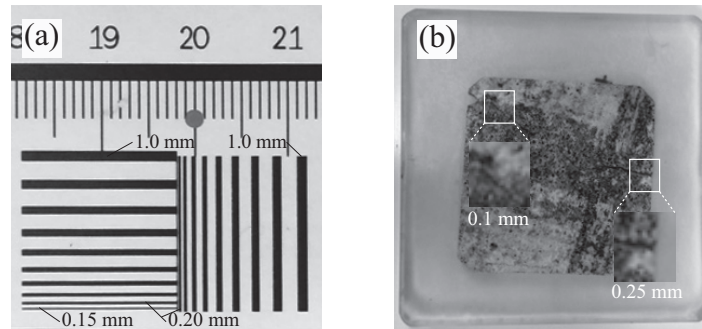


図 4.20. 評価用シートとクラックサンプル（白黒で表示）．(a) 評価用シート：最大幅 1.0mm，最小幅 0.15mm．(b) ひび割れサンプル：最大幅 0.25mm，最小幅 0.1mm．

4.5.3 性能検証に向けたセットアップ

現地実験環境

システムの性能を検証するため，筆者は道路上での実験を 2014 年 6 月に，図 4.21 で示す岐阜県飛騨市東海北陸自動車道上の舟原トンネルにて実施した．実験場所は対面走行の 2 車線のトンネルであり，通常一般車が走行する道路であるが，本現地実験時に道路の通行止めが実施されていたため，自由度の高い現地実験を行えることから本実験場所を選定をした．実験は図 4.22(a)(b) のトンネル内で実施した．本トンネルは通常の高速度道路のトンネルと同様に高さ 7m であり，形状もカルバートボックスと異なり円周上となっていた．



図 4.21. 舟原トンネル外観（[63] より引用）

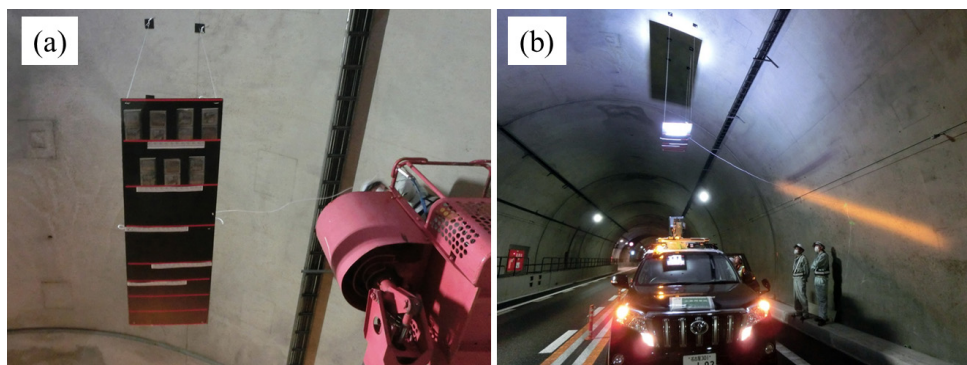


図 4.22. 舟原トンネルにおける検証用パネルの様子。(a) パネルを高所作業車により設置する様子。(b) パネル設置後、安全面や実験の進行に問題がないか筆者らが確認している様子。

実験場所のセットアップと実験手順

今回の実験もカルバートボックスでの実験と同様、モーションブラーがどの程度補償できているか検証することが実験の目的であるため、トンネル天井部よりロープによって吊り下げられたパネル上に貼り付けた評価用シートとひび割れサンプルシートをどの程度鮮明に読み取れるかを基準に検証を実施した。図 4.22(a)(b) のように本実験は天井より吊り下げたパネル上の縞模様を読み取ることで検証を行った。この際、車両の進行方向に対してパネルが水平となるよう、パネルを固定するロープの長さの調節を慎重に行った。

システムへの設定値として、露光時間は 1m、駆動周波数は 333Hz とした。このとき、システムはモーションブラー補償機能及びプリアンファシス技術を有りにした場合とどちらも無しにした場合で結果の比較を行った。車両の走行速度は、本トンネルの通行止め時の速度規制より、最高時速 50km とした。ただし、パネルを地上 4.2m の位置に吊り下げたため、カメラからパネルまでの距離は 2.2m となり、通常のトンネルの高さ 7m に換算して、最大で時速 120km まで検証可能なセットアップを組むことができた。

4.5.4 現地実験結果及び考察

図 4.23(a)(b) 及び図 4.24(a)(b) に示すように、モーションブラー補償とプリアンファシス技術有りでは、それぞれ無しと比べ縞模様が著しく鮮明に見えることがわかった。それぞれの幅の線が鮮明に映り、図 4.24(b) では、右側に図示されるプロファイルにおいて、0.2mm のピークまで確認することができた。カルバートボックスでの実験時は時速 66km 相当で 0.2mm の線が見えたので、速度に関して約 2 倍ほどの性能アップを果たすことができた。さらに、図 4.24(a)(b) において破線の位置のピークピーク値を求めたところ、図 4.24(a) では 68 であり、図 4.24(b) では 213 となった。そのため、撮像された画像の破線の位置におけるコントラストは、今回筆者の手法を用いたことで単純計算で 3 倍程度のコントラスト向上ができたと考えられる。一方で 0.15mm ではピークが現れていなかったことから、さらなる細

かい分解能を得るためにはモーションブラーをより補償できるようにシステムをアップデートするか、レンズをより望遠にする手法が必要となる。ただし、対象までの距離が通常のトンネル走行時と比べて近い分、1ピクセルあたりの分解能はカルバートボックスでの実験時と比べ細かいという変化はあるため、一様な評価を下すことはできない。ところで、図 4.23(a) と図 4.23(b) では縦方向の線の長さが異なって表示されているが、これは表示の縮尺を変更したわけではなく、モーションブラーの影響で縦方向に線が伸びて撮像された結果である。

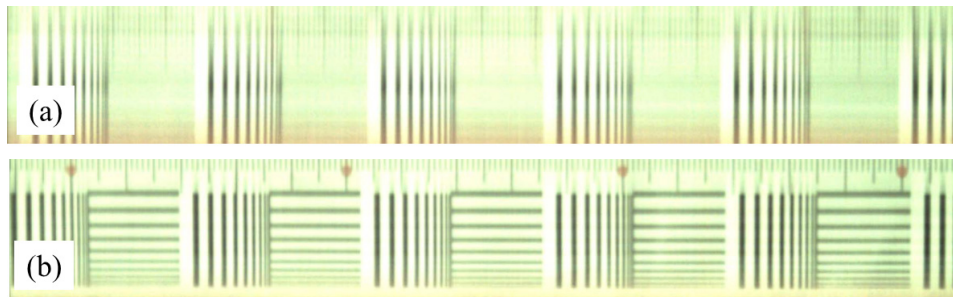


図 4.23. 時速 120km 相当で走行中に撮影した評価シートの画像. (a) モーションブラー補償及びプリアンファシス技術無し. (b) モーションブラー補償及びプリアンファシス技術有り.

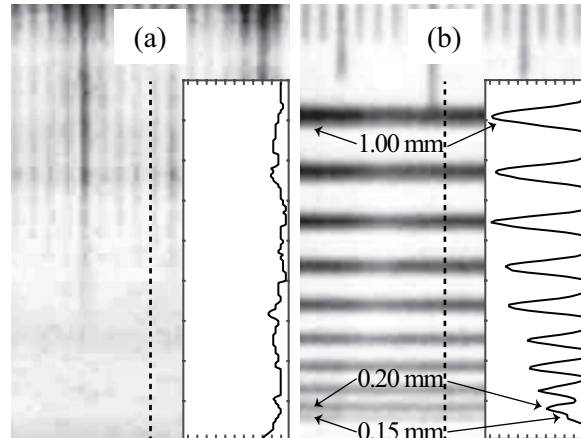


図 4.24. 図 4.23 の時速 120km 相当で走行中に撮影した評価シートの画像を拡大表示し、プロファイルを右側に図示. (解析のため画像は白黒に変換後、コントラスト補正して表示). 破線の位置のプロファイルが右側に図示されている. (a) モーションブラー補償及びプリアンファシス技術無し. (b) モーションブラー補償及びプリアンファシス技術有り.

ここまで、白と黒の縞模様というコントラスト的に理想的な画像を使用して検証実験を行ってきたが、本来のトンネルはコンクリートに覆われて、色のコントラストも白と黒の縞模様と比べ低いのが実状である。そこで、ひび割れサンプルシートに対しても同様に実験を行った。結果を下記の図 4.25(a)(b) 及び図 4.26(a)–(d) に示すように、ひび割れサンプルシートに対しても筆者のモーションブラー補償装置及びプリアンファシス技術によって鮮明な画像を撮像でき

ることがわかった。図 4.25(b) は図 4.25(a) と比べ、詳細なテクスチャが残っており、2 箇所
の白い枠はそれぞれ左が 0.1mm のひび割れ、右が 0.25mm のひび割れに対応している。両者
を拡大及びプロファイルとして表示したものが図 4.26(a)–(d) であり、プロファイルを見ると
0.1mm も 0.25mm も共にひび割れの位置でピークがあることがわかった。そのため、今回の
結果から今後ひび割れやサビ等の異常が検出されるしきい値を画素値として設定しておくこと
で、ひび割れの自動抽出等に活用可能であると考えられる。

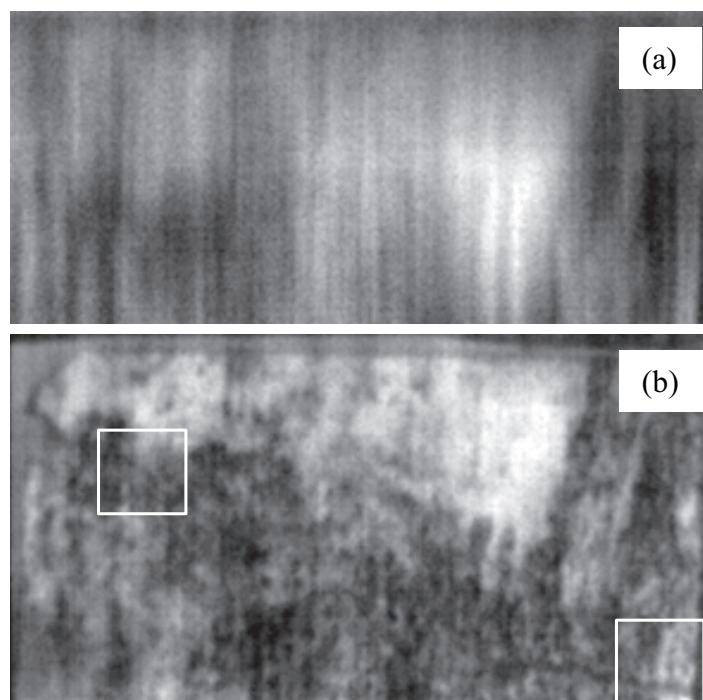


図 4.25. ひび割れサンプルシートを対象に時速 120km 相当で走行中に撮影した画像（解析のため画像は白黒に変換後、コントラスト補正して表示）. (a) モーションブラー補償及びプリアンファシス技術無し. (b) モーションブラー補償及びプリアンファシス技術有り.

今回の実験により、本システムが時速 120km 相当まで対応可能なことを検証できたことから、元々対象として想定していた日本の高速道路の最高時速 100km に留まらず、速度だけでいえば海外の最高時速にも対応可能であることがわかった。また、今回は走行速度が時速 50km に制約されていたが、またさらに高速で実験できる機会があれば、限界を検証することも本研究の先のステップとして考えられる。

4.5.5 本現地実験のまとめと次の現地実験に向けた課題

今回舟原トンネルでモーションブラー補償装置及びプリアンファシス技術を用いて現地実験をすることにより、時速 120km 相当で車両が進行中であってもモーションブラーを補償した画像撮像が得られることが分かった。また、その際、0.2mm の縞模様が読み取れただけでなく、ひび割れサンプルの 0.1mm の線も読み取ることができた。この結果により、カルバー

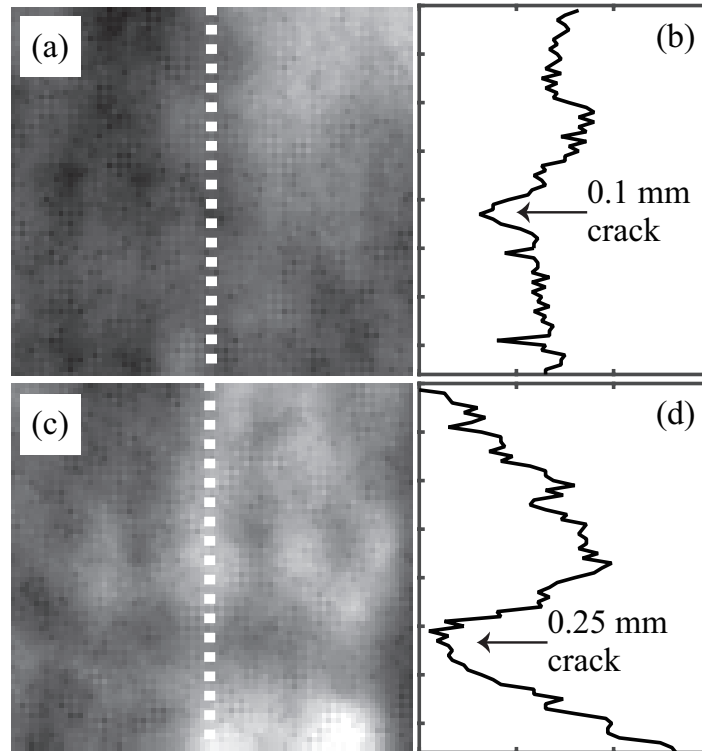


図 4.26. 図 4.25 の時速 120km 相当で走行中に撮影したひび割れサンプルシートを拡大表示し、破線の位置のプロファイルが右側に図示されている（解析のため画像は白黒に変換後、コントラスト補正して表示）. (a) 0.1mm 幅のひび割れ. (b) 0.25mm 幅のひび割れのプロファイル. (c) 0.25mm 幅のひび割れ. (d) 0.25mm 幅のひび割れのプロファイル.

トボックスでの実験時と比べ、速度ベースで見ると約 2 倍の性能アップを実現することができた。

今回の現地実験を経て、装置の目的であるモーションブラーの補償に対する基礎的な技術検証を行うことができたので、今後は実用化に向けて道路の規制がかかっていない環境でも対応可能なシステムとするべく、さらなるシステムのアップデートが必要である。

4.6 公道でのシステムの利用（坂下トンネル）

4.6.1 公道での実験に向けたシステムの更新点

レンズにおけるオートフォーカスの導入

これまでの現地実験では、撮影する状況に合わせて車両停止中にレンズのフォーカスを手動で合わせていた。しかしながら、今後実施する実験は他の車両も走行して停車できない環境に対応させるため、事前にフォーカスを調整することができないため、オートフォーカスを導入する必要があった。本来、実験に使用している Nikon 社 Nikon AF-S NIKKOR 200mm f/2G ED VR II はオートフォーカスに対応した仕様であるものの、あくまで Nikon 社のカメ

ラに対応しており，筆者の使用している高速カメラ Mikrotron 社 Eosens MC4083 ではオートフォーカス機能を使うことができない．そこで，HSV システム用に新たにオートフォーカス機能の開発を行った．

まず，機材のレイアウトを下記の図 4.27 に示す．

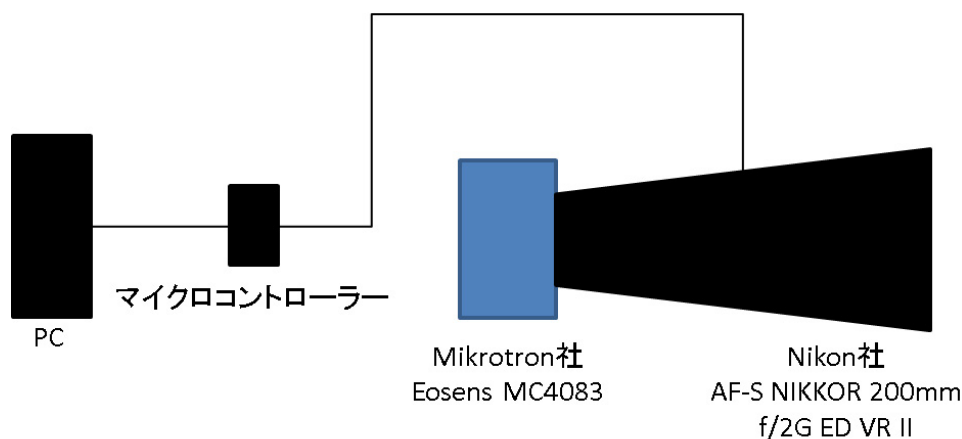


図 4.27. オートフォーカスのシステムレイアウト

レンズの CPU 接点に対しハンダ付けを行い，USB ケーブルを介してマイクロコントローラーに接続をする仕様となっている．マイクロコントローラーは PC に接続されているので，PC からの指令に応じてレンズ内のアクチュエーターが連動して動くシステム構成とした．また，Nikon 社の標準搭載オートフォーカスでは，応答速度が 1 秒から最大数秒程度であるため，例えばトンネルの高さが連続的に変化する状況等では，応答速度が追いつかず，ピンぼけが生じやすくなってしまう．そのため，対象までの距離に応じて即時的にアクチュエーターが動かす方式を新規に筆者が実装することとし，レンズ本体のアクチュエーターの応答速度を引き出すシステムとした．そのために，本研究では SICK 社の測距センサ DT500 を用い，4Hz でセンシングしながら距離情報を予め用意した二次補間係数に代入し，レンズ内部のアクチュエーターの制御量へと変換し，従来よりも 4 倍以上の速度でオートフォーカスを行う機能を実現した．

撮像画像における S/N 比の改善

筆者のシステムで使用しているカメラは Mikrotron 社の Eosens MC4083 であるが，高速の通信帯域を出すために，カメラのインタフェースは CoaXPress となっている．CoaXPress 規格 [64] は最も高速なもので 6.25Gbps まで出すことが可能で，MC4083 の場合は通信線が 4 本あることから，最速で合計 25Gbps の通信が可能となる．これまでの実験ではより高速な通信を実現するため，6.25Gbps の通信帯域を使用していたが，実験を重ねるうちに半分の帯域である 3.125Gbps で撮像された画像の方が S/N 比が格段に良くなることがわかった．これは，6.25Gbps という高速な通信規格を実現するために，ケーブルやボード内部の配線においてノイズが大量に発生してしまっていることが原因として考えられる．本実験では使用帯域が 3.125Gbps でも足りることから，通信帯域を落として実験を行うこととした．

4.6.2 性能検証に向けたセットアップ

現地実験環境

本実験は小田原厚木道路上の神奈川件小田原市坂下トンネルにて 2015 年 3 月に実施された。本トンネルは猿投山トンネルや舟原トンネルと同様、高さ 7m で円周状であり、標準的なトンネルである（図 4.28 に外観を記載）。トンネル内は片面 2 車線走行であり、最高速度は時速 70km と設定されている。本トンネルは開通から 45 年程度が経過することから、劣化状態が進んでおり、通常より高頻度の点検が望まれていた。そこで、今回 HSV 装置を用いて、本トンネルを対象にトンネルの劣化状態の基礎データを取得するため、実際に現地で実験を行った。



図 4.28. 坂下トンネルの外観（撮影時は車線規制中）

実験場所のセットアップと実験手順

システムの運用を考えると、時系列でひび割れの進行具合を比較することは重要である。そのためにも、ひび割れ及び撮影箇所を把握する必要がある。そこで、各ひび割れ毎に事前にマーカー及び評価シートを貼り付けた。実際に貼り付けた様子を図 4.29 に示す。

貼り付けの際には車線規制となっていたので、高所作業車を用いて天井面のひび割れ箇所を中心に貼り付け作業を進めた。今回貼り付けを行ったことにより、図 4.29(b) のひび割れ ID 及び位置 ID を元に、今後の撮影においてどの箇所を撮影したか、比較することが可能となった。

4.6.3 現地実験結果及び考察

車両走行実験は、道路の規制中ではなく、他の車両が走行している状況で坂下トンネルを車両で走行し、覆工面の画像撮影を行った。まず、今回の現地実験のためにアップデートしたオートフォーカス機能及び CoaXPress の帯域変更の成果を見るため、舟原トンネルでのシス

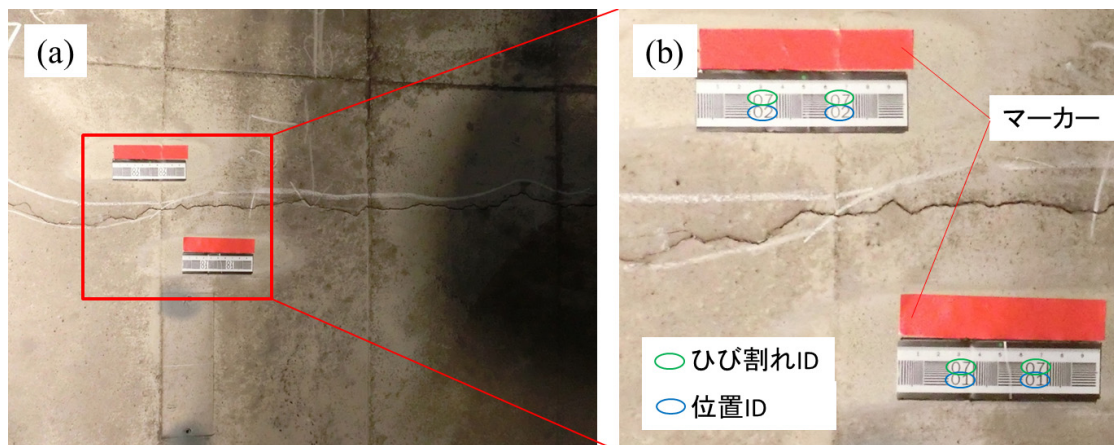


図 4.29. 坂下トンネル内部にマーカー及び評価シートを貼り付けた様子。(a) ひび割れの付近にマーカーを2枚貼り付けた。(b) (a) のズーム画像。

テムの状態では図 4.30 の画像を撮影した。このとき、オートフォーカス機能は付けておらず、CoaXPress の帯域幅は 6.25Gbps となっている。画像は激しくピンぼけしており、また縦横に固定パターンノイズ及びダイナミックノイズによる線が見られる。



図 4.30. オートフォーカス機能を使わず、CoaXPress の通信帯域を 6.25Gbps として、時速 70km で走行中にモーションブラー補償及びプリアンファシス技術有りで撮像した画像

これに対し、図 4.31 ではオートフォーカス機能を加え、CoaXPress の帯域を 3.125Gbps に落とした結果、鮮明な画像を取得することができた。画像中にはひび割れの様子とマーカーの両方が入っていることから、トンネル内のどの位置のひび割れがどのように進行しているか特定することに寄与する画像を得ることができた。この画像の場合は数字が見きれてしまっているが、ひび割れ ID は 06 番と読み取れることから、トンネル内のひび割れを記載したマップと対応付けが可能となった。一方、マーカー及び評価シートの貼り付け枚数が不足していたため、トンネル内の全箇所のひび割れを網羅することができなかったことは今後の課題として残った。また、図 4.31 のように、評価シートの ID が完全に画角に入っていないことにより、位置の特定に至らないケースについても対応する必要がある。

他に図 4.32 に今回得られた画像 7 枚を手動でイメージモザイクングして高解像度画像とし



図 4.31. オートフォーカス機能を使い，CoaXPress の通信帯域を 3.125Gbps として，時速 70km で走行中にモーションブラー補償及びプリアンファシス技術有りて撮像した画像

た例を示す．筆者が開発した HSV システムは分解能の細かい画像が取得できる一方で，ズーム率を上げるとその分画角が狭くなってしまい，先述したようにマーカー及び評価シートの位置とのリンク付けが難しくなることも考えられる．そのため，ここではイメージモザイクングが今後の開発において重要となることを示す目的で，手動での結果を示した．

この画像からはチョークで書かれた 0.5 という数字が読み取れることから，ひび割れの幅が 0.5mm 程度であったと考えられる．

坂下トンネルでの現地実験の結果として，最後に図 4.33 を示す．この画像は坂下トンネル上りで連続して撮影された画像 4 枚を手動でイメージモザイクングしたものである．今回の現地実験では坂下トンネル下りのみマーカーと評価シートの貼り付けを行ったが，そのようなセットアップがされていない環境でも同様にモーションブラーが補償できるか検証を行った．その結果，図 4.33 に示すように，マーカーや評価シートの貼り付けをせずとも，モーションブラーの影響を受けていない画像の取得が可能なが分かった．HSV システムは撮像された画像の特徴点をトラッキングすることでガルバノミラーの角速度を決定しているが，マーカーがなくとも坂下トンネル上りの覆工表面のテクスチャーが十分な特徴量を含んでいたものと考えられる．これにより，対象の表面状態には依存するものの，マーカーがなくともトンネル表面の状態を HSV システムで走行しながら点検可能ながわかった．

また，先ほどの坂下トンネル下りの画像と同様，坂下トンネル上がりでもチョークがひび割れをなぞるように書かれており，この場所が目視点検の際に観察対象であったと考えられる．このことから，目視点検後，どのようにひび割れの状態が進行しているか確認するためにも，本システムが有効であると考えられる．

今回イメージモザイクングは手動で行ったが，モーションブラー補償システムではガルバノミラーの角速度を求める際にブロックマッチングを行っており，連続した画像間の移動ピクセル数を求めている．この移動ピクセル数分を利用した自動イメージモザイクングシステムを構築することで，トンネル内の全域的な画像データベースを構築することも可能と考えられる．ブロックマッチングの精度だけで不足するときは，オフラインで探索範囲を広げたブロックマッチングを行うこと，画像周辺の収差を考慮した画像処理を行うこと等で，データベースと



図 4.32. 坂下トンネル下りにおいて時速 70km で走行中に撮像した画像を手動でイメージモザイクキングした様子（撮像後コントラスト補正と色調補正を実行）

しての空間位置関係の整合性が向上すると考えられる。

4.6.4 本現地実験のまとめと今後の現地実験に向けた課題

坂下トンネルでの現地実験により，規制がかかっていない環境で走行しながら覆工表面の画像を撮像することができた．その際，課題であったオートフォーカスの導入と画像の S/N 比向上の検討により，高画質画像をロバストに取得できる可能性が高まり，今後点検箇所にも異常が含まれるか判断する際の精度向上に寄与する結果が得られたと考えられる．

一方，今回は実験を行うにあたり，マーカーや評価シートを貼り付けたが，今後道路の交通規制を定期的の実施することは極めて困難だけでなく，仮に十分に貼り付ける機会を得られ

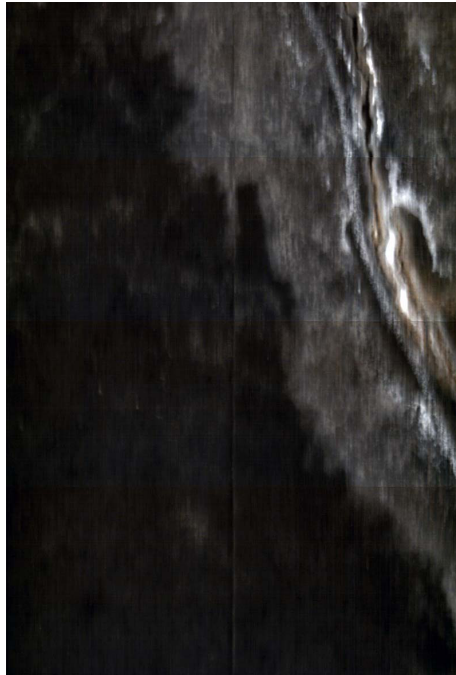


図 4.33. 坂下トンネル上りにおいて時速 70km で走行中に撮像した画像を手動でイメージモザイクキングした様子（撮像後コントラスト補正と色調補正を実行）

たとしても、マーカ―や評価シートはスス等の影響を受けるため長期的に状態をメンテナンスすることが必要であり、マーカ―や評価シートを貼り付けなくともひび割れ等の位置を管理しながら行う点検手法を確立することが望ましいと考えられる。そのためにモーションブラー補償による相対座標取得の空間分解能改善や、5 章で紹介する絶対位置座標精度の向上手法が寄与できるものと考えられる。

4.7 実用化に向けた今後の課題

ここまで計 4 つのトンネルで現地実験を行ってきた結果、トンネルの覆工表面を対象に、車両走行しながらモーションブラーを補償して画像撮影を行うシステムの開発及び検証を進めることができた。しかしながら、今後実際に実用レベルで点検に活用するためには、まだいくつかの開発ステップがあるものと考えられる。

1 つ目は、坂下トンネルの課題でも述べたように、マーカ―や評価シートを貼らずに撮影した箇所を記録できる仕組みを作ることが挙げられる。そのためには具体的に、車両の自己位置推定を逐次的に行うことが必要となる。この仕組みができれば、各画像を時系列上で比較できるだけでなく、同時刻に取られた各画像の位置関係も明瞭になることから、時系列で前後に撮像した画像の比較が用意になると考えられる。

2 つ目は、より包括的な点検システムとするため、二次元画像の撮像だけでなく、三次元の奥行きセンシングも対象としたシステムの構築が求められる。ススが多い箇所などでは二次元画像の取得だけでは色が均一に映ってしまうことから、三次元センシング等の別のセンシ

グ手法が必要となる。そのため、高速移動環境下に適した高精度の三次元センシング手法の開発が別途必要となると考えられる。

4.8 実用化後の波及効果予測

本研究開発による成果は、国内外の高速道路のみならず道路・鉄道・港湾・空港などの鋼構造物・コンクリート構造物などの健全性診断に応用展開が期待でき、センサ・モニタリングシステム市場において一定の割合を占めるインフラにも適応可能と考えている。また、直接的な経済効果だけでなく、点検のための交通規制が不要になること、高頻度に状況把握が可能なことから劣化・損傷が軽度のうちに早期補修等の対応が可能となり、重大な劣化・損傷による緊急的な通行止め、長期にわたる大規模な補修のための通行止め等を低減することが期待できる。本システムで高頻度、低コストに点検することにより通行止めによる国民の時間的ロスを軽減でき、二次的な経済効果も期待できる。

本装置は一旦開発できたシステムを指定の汎用車両に搭載すれば運用可能な仕組みとなり、開発メーカーの受注頻度が増え、使用する各インフラ会社が自社体系の中で点検に活用することができ、各々の点検頻度の基準に沿って運用することが可能である。また、高速道路上を巡回・維持作業を行っている維持作業車両に取り付けることで、日々継続的に構造をモニタリングすることが可能となる。維持作業車両は1日に何度も高速道路上を走行しており、全ての車両に装置が搭載されていれば、1日だけでも広範囲のセンシングが可能な計算となる。また、各維持作業車両のユニットがネットワークに接続されている条件下では、協調動作が可能となり、無駄のないセンシングを行うことで、効率的且つ状態変化を迅速に把握することへの寄与が見込まれる。

4.9 本章のまとめ

本章では、これまで研究開発を進めてきたモーションブラー補償装置の応用例として、インフラ維持・管理における目視点検の代替手法の提案を行った。モーションブラー補償装置をインフラ維持・管理に応用するにあたり必要な仕様を検討した上で、複数回の現地実験を経てモーションブラー補償技術の実用化に向けた検証を行った。結果、地面から天井までの高さ7mで時速120km相当でのブラーキャンセルの成功しただけでなく、公道で他車が走行している環境下でもモーションブラーの補償をしたひび割れの画像を取得することができ、本装置の検証を行うことができた。元々の要求仕様に対し、対応速度：時速100km、最小抽出クロック幅：0.1mm、画像分解能：0.13mm/pixel、対応車両：普通車両として、全て達成することができた。筆者のシステムは、今後さらに開発が進むことで、実際に維持作業車両に搭載されることを始め、日常的な点検に活用されることが可能性として考えられる。

本章の結果は、本論文において高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の問題点として挙げた4点のうち、振動に対して有効であったと考えられる。本文中でも述べたように、装置をアルミフレームの剛体で設計し、装置と車両を除振マウントによって接続したことが

ら，振動に対して一定の効果があったものと考えられる．

第 5 章

線形運動モデルに基づく GNSS 誤差 範囲減少手法

これまで高速移動環境下における二次元画像撮影手法について考察してきたが，移動に伴う自己位置の変化によって位置情報と連動したシステムを考えたときに，自己位置情報の取得を高精度に得ることは重要であると考えられる．提案手法に関連して，筆者はこれまで線形運動モデルに基づく GNSS 誤差範囲減少手法を開発してきた [65]．GNSS は，絶対座標フレーム内におけるロボットの定位に有効なツールであるが，用途によっては，理想的な環境において GNSS により提供される位置情報であっても，精度の高い制御を行うには位置精度が足りない場合もある．本研究において筆者は，直線運動を想定することにより GNSS 測位情報の誤差範囲を縮小する手法を提案することで，高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の応用範囲を広げることを目指す．

5.1 高速移動環境下における自己位置推定の重要性

高速移動環境下において，センシング機器自身が移動している状況では，センシング機器の自己位置が刻々と変化する．自己位置には相対位置と絶対位置があるが，このうち相対位置については 2 章以降で紹介してきたモーションブラー補償手法により，高空間分解能画像を利用したヴィジュアルオドメトリによって高い精度で得られるものと考えられるが，絶対位置については別途取得手法を検討しなければならない．特に高速移動環境下では，トンネルといったように，外部から電波が入らない環境では相対座標の重要性がより高いと考えられる一方，取得した画像を時系列に地理的に管理していくことを考えると，対象構造物の絶対位置情報は地殻変動等の大局的な構造物の異常を発見することに寄与する．一方で，対象とする構造物全てにセンシング機材を設置することは，規模等にもよるが，設営工事やメンテナンスが必要となってくるため，高速移動環境下で移動しながらセンシングすることが望ましい．また，構造物内の相対座標と絶対座標を関連付ける際に，構造物の入口における絶対座標を高精度に取得することで，以前取得した画像と最新の画像を比較する際に，画像探索範囲を圧縮することに寄与すると考えられる．こうしたことから，本章では高速移動環境下でいかにして精度の良い

絶対位置情報を得られるかについて検討を行っていく。

5.2 自己位置推定手法の比較

ロボット工学の分野では、自己位置推定のための数多くの手法が存在する。この分野の過去の研究の概要は、文献 [66] および [67] で議論されている。例えば、加速度センサを用いた二重積分により座標を定位する手法や、レーザを用いて高精度 [68] および高速 [69] に定位する手法が挙げられる。しかしながらこれらの手法は相対座標しか得られず、地球上における絶対位置情報の取得はできないため、測位済みの絶対座標を利用せざるを得ない。これに対し、[70] 等の視覚センサに基づく自己位置推定手法では、環境中の自然特徴さえあれば、正確に自己位置の定位をすることが可能である。しかしながら、これらの手法も、局所的な画像フレーム内における自己位置情報を提供できるだけであり、Lingemann らと同様に相対座標しか得られない。先述したように相対座標も確かな絶対座標を基準とすれば絶対座標に変換可能であるが、測位済みの基準点の数は屋外に限られていることから、屋外を移動しながらセンシングするシステムにおいては絶対座標の取得を行うことが原則的に必要だと考えられる。そこで、本論文ではいかにして精度の良い絶対座標を得られるかについて検討を行っていく。

これとは対照的に、GNSS は、衛星定位による絶対座標を取得し、地球参照フレームにおけるグローバル座標を提供することができる。その用途としては、監視、自律運転等がある。自律車両、農業用トラクタ、およびアスファルト舗装機械には、正しい経路が確実に辿られるように、高精度 GNSS 手法が採用されつつある [71, 72]。ガリレオやみちびきといった将来の衛星システムでは、精度はかなり高くなると考えられる。これらのシステムが運用されるまでは、図 5.1 に示す GNSS の誤差要因に対処しなければならない。

正確性を最大化するためには、遮蔽による問題を避けるため、GNSS は空が見えている場所で使用すべきである。マルチパスの問題には、Kihara ら、Kubo, Meguro らの研究による衛星選択手法 [73][74][75] により対処可能である。また、ドップラー効果には、Mao らの研究による遅延補償アルゴリズム [76] により対処可能である。これらの手法により GNSS 測位の正確性の向上が確認されたが、それでもなお精度の高い制御を行うには正確性が十分ではない。また、場合によっては、機器そのものに追加的な要素が必要であったり、機器自体を前処理のために構成する必要があったりする。マップマッチングアルゴリズムは、GNSS 測位情報を後処理するために用いられ、カーナビゲーションシステムにも用いられている。これらの手法は、正確な地図に対しては大変有効である [77]。Wenk らは、マップマッチングアルゴリズムを道路網のカーブ用に改善する手法を提案している [78]。また、Lou らは、低サンプリングレート GNSS のマップマッチングアルゴリズムへの適用手法を提案している [79]。しかしながら、マップマッチングアルゴリズムは地図に依存するため、地図が不正確な場合、測定の正確性は劣化する。しかも、これらのアルゴリズムではしばしば最短経路アルゴリズムが用いられ、誤った道路を選択する可能性がある。

したがって、筆者の目的は、地図情報を用いずに、後処理によって生の測定情報の正確性を改善することである。筆者の手法は、運動方向を想定することに基づいている。多くの用途

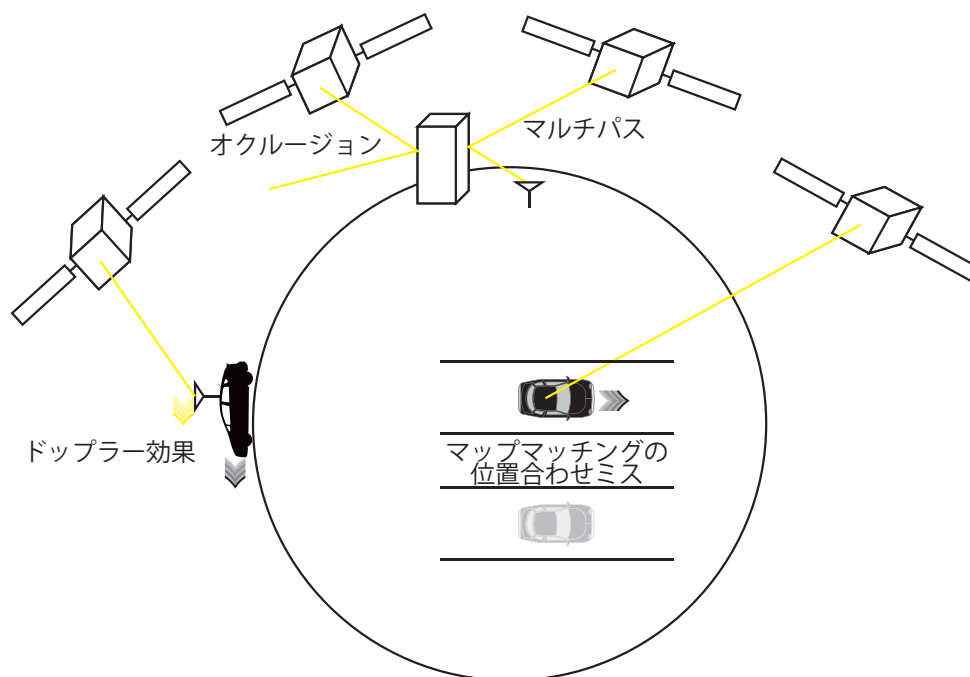


図 5.1. GNSS の誤差要因

で、GNSS 受信機は車両に搭載され、ほとんどの車両は、直接道路上またはレール上を前方に進むと想定できる。慣性の法則によれば、車両の重量により運動は直線的になりがちである。特に高速運動の場合は、車両の方向を変えるには大きな加速度を必要とするため、直線運動は維持される傾向にある。本研究では筆者は直線性と正確性（システムは静的）の関係に注目するが、今後の研究ではこれに加えて、速度、GNSS 品質、円形運動、ノイズ量、他の手法との適合性といった要素も研究しようとしている。本稿では、直線運動下における GNSS 測位の正確性を検討する。

5.3 GNSS 誤差範囲減少手法

5.3.1 モデルに基づく計算

モデルに基づく計算は、推定の正確性を向上させ計算コストを減少させるために、多くの研究で採用されてきた [80][81]。Zhang らは、車両の三次元形状モデルを用いて車両姿勢・位置を推定している [82]。この手法は、相対的な座標フレームにおける定位には有効である。しかし、マップマッチング手法と同様に、精度の高いマッピングには、事前に正確な絶対座標が取得されることを必要とする。これに対し、筆者は運動モデルを用いて GNSS の誤差範囲を減少させ、位置情報の精度を向上させる。

5.3.2 GNSS 用直線運動モデル

車両の運動方向が直線的であると想定すれば、GNSS アンテナの運動経路を直線としてモデル化できる。この直線の式を求める、すなわち式 5.1 中のパラメータ a および b を求めるために、筆者は最小二乗法（LMS）による線形回帰を行う。LMS は粗なアルゴリズムであり、ノイズには強くはない。しかしながら、計算コストが低いため、リアルタイム用途では本手法は有効であると考えられる。この式において筆者は、緯度を従属変数として、経度を独立変数として定義しているが、任意に設定可能である。

$$y = ax + b \quad (5.1)$$

5.3.3 GNSS 誤差範囲

5.2 節で言及した理由に加えて、GNSS の正確性に限界がある理由としては、衛星内部のクロックの不正確性がある。誤差には水平成分と垂直成分があり、これらの成分は互いに独立である。これを図 5.2 に示すとともに、式 5.2 – 5.4 に表す。

$$lon_{detected} < lon_{correct} \pm lon_{error_range} \quad (5.2)$$

$$lat_{detected} < lat_{correct} \pm lat_{error_range} \quad (5.3)$$

$$h_{detected} < h_{correct} \pm h_{error_range} \quad (5.4)$$

次に、直線運動を想定することにより楕円体（ lon_{error_range} , lat_{error_range} , h_{error_range} と表される）の直径を最小化する手法について紹介する。

5.3.4 直線に射影された楕円体

5.3.2 節では、運動は平面運動であると定義したため、楕円体を二次元では円として表現することができる。図 5.3 に示す平面上の直線運動のモデルを利用することで、二次元から一次元へ幾何の射影が行われる。その射影によって測定誤差は補正されることとなる。図 5.4 に図 5.3 の詳細を示す。

これを実現するために、筆者は該直線と該円の交点を用いる。測定誤差範囲 r は、 d に射影される。円の中心は、補正前の GNSS 測定値の経度及び緯度に対応する。 h を式 5.5 に定義し、 d を式 5.6 にピタゴラスの定理と r および h を用いて定義している。

$$h = \frac{|ax_{lon} - y_{lat} + b|}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (5.5)$$

$$d = \sqrt{r^2 - h^2} \quad (5.6)$$

比 p （式 5.7）は、測定誤差の縮小の程度を示すものであり、提案手法の性能の指標となる。

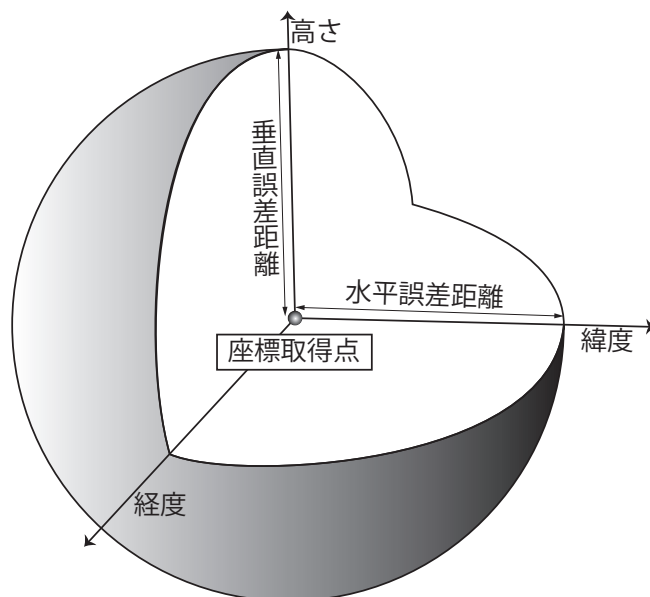


図 5.2. 誤差範囲を示す楕円体

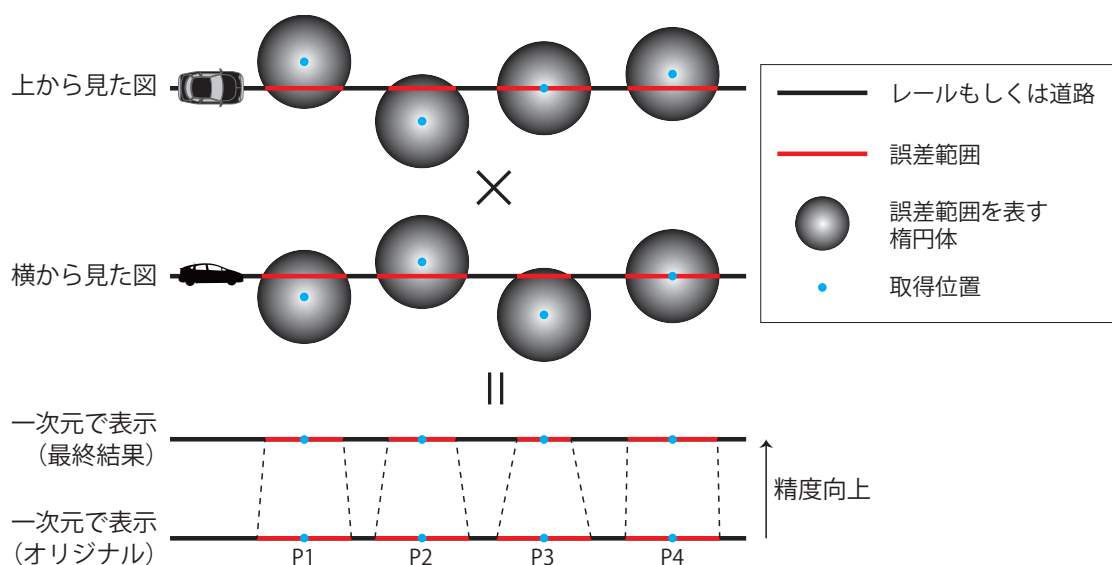
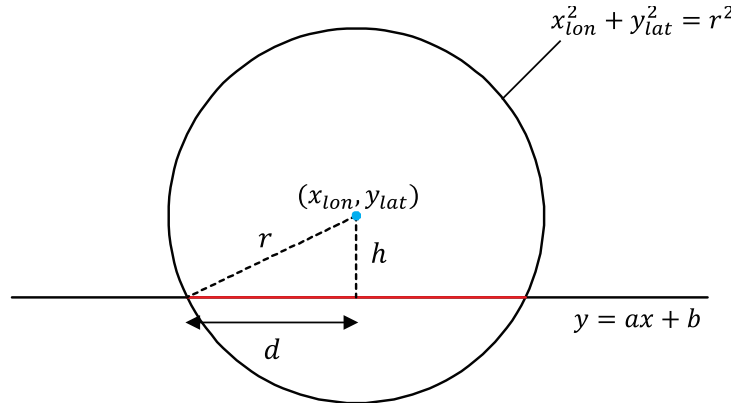


図 5.3. 一次元への射影による正確性向上の概念

$$p = \frac{d}{r} \quad (5.7)$$

図 5.4. r から d への誤差範囲補正

5.4 実験による評価

5.4.1 実験の流れ

実験の目的は、生の測定値を後処理した結果として正確性が向上していることを確認することである。この目的のために、筆者は次のアプローチを採った。

1. スライド上の直線運動における座標の取得
2. LMS を用いた線形回帰による直線の式の係数の計算
3. 元の座標の直線への射影
4. 補正座標の誤差範囲の評価

5.4.2 実験装置

筆者の戦略を実証するために、高精度 GNSS 装置 Topcon 社 GB-3 および RTK-GPS 法を用いた。Topcon 社 GB-3 および RTK-GPS 法を用いることにより、理想的な状況においては、RTK-GPS モードで、水平方向 $\pm 10\text{mm} + 1\text{ppm}$ および垂直方向 $\pm 15\text{mm} + 1\text{ppm}$ の誤差で絶対位置を取得することが可能である。実測値を次節 5.4.3 に記載する。

さらに、測定用のメモリを付けたスライダを用意し、図 5.6 の詳細とともに図 5.5 に示すように、GNSS アンテナをスライダに搭載した。静止位置で取得するために、ネジを用いてアンテナをスライダに固定することもできる。移動中の位置情報を取得するためには、ネジを緩めてスライダを直線的かつスムーズに手動にて動かした。アンテナの方向は固定し、測定誤差を除去するためにスライダごと重い定盤上に搭載した。さらに、システム全体を重いテーブルリフトに載せた。リフトのテーブル高さは、0.3m から 1.5m の間で任意に設定可能である。マルチパス問題による誤差を減らすため、高さを約 1.0m に設定した。さらに、データ記録・分析用機器として PC を用いた。

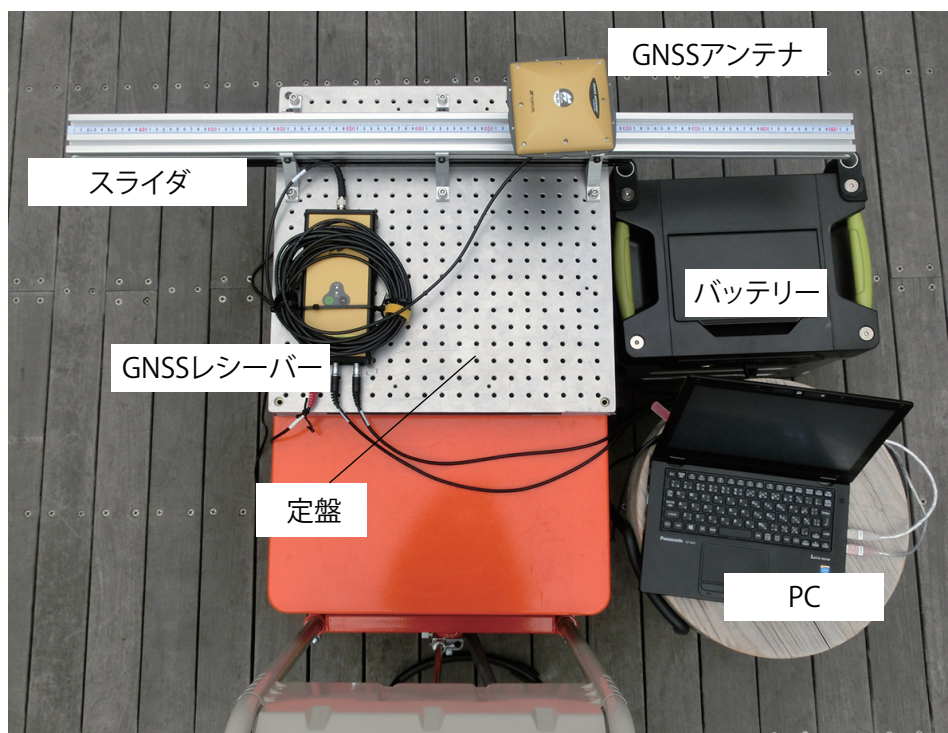


図 5.5. GNSS 装置，ハードウェア，PC，バッテリーを備えた実験装置

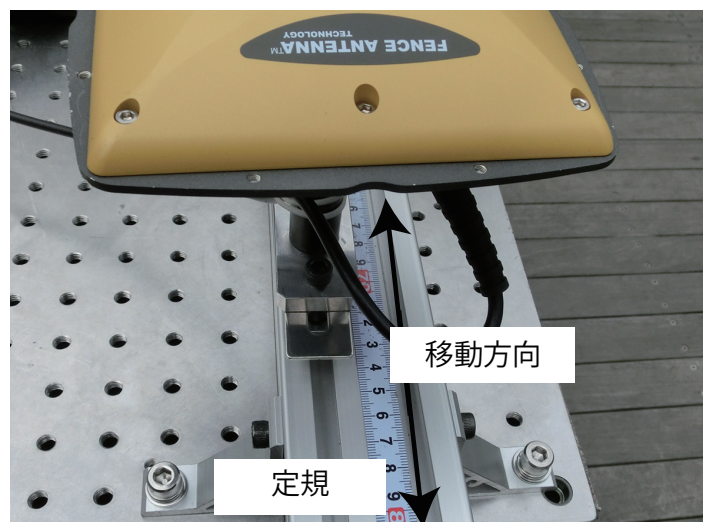


図 5.6. 移動方向を示すアンテナ拡大図

実験装置は、4 階建て建物である東京大学工学部 6 号館の屋上に設置した（緯度：139.761142，経度：35.714122）。いくつかの高い建物が周囲に存在するものの、約 10 個の衛星を常時検知できることを確認できた。

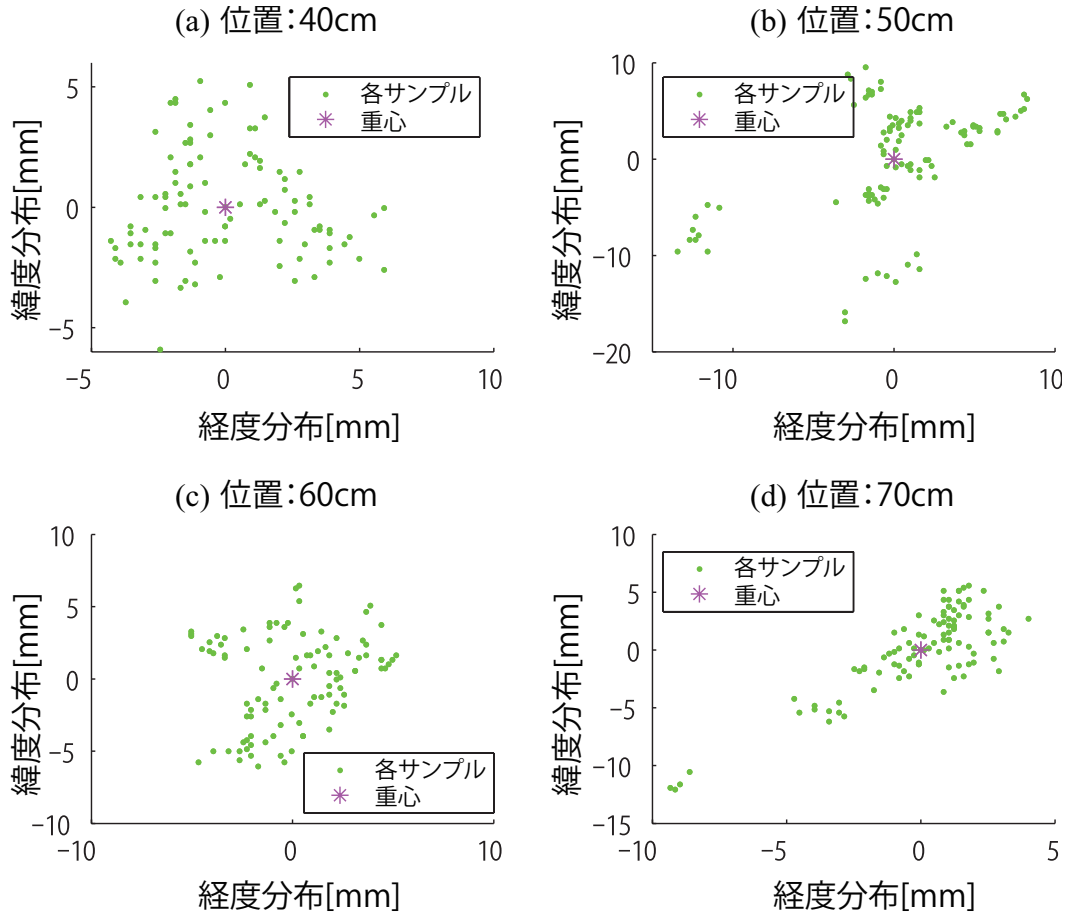


図 5.7. 10 秒間の静的 GNSS 測定値分布. 最大で, (b) 位置:50cm において幅 26.4mm および高さ 21.7mm.

表 5.1. GNSS 位置の静的検出サイズ

位置 [cm]	幅 [mm]	高さ [mm]
(a) 40	10.2	11.1
(b) 50	21.7	26.4
(c) 60	10.2	12.5
(d) 70	13.4	17.6
平均	16.9	13.4
最大	26.4	21.7

5.4.3 誤差範囲取得のための予備実験の結果

予備実験として, 本研究手法を利用せずに GB-3 および RTK-GPS 法の誤差範囲を確認した. アンテナを 4 か所で測定し, それぞれの位置で 10 秒の間に 100 の座標を取得した. 4 つ

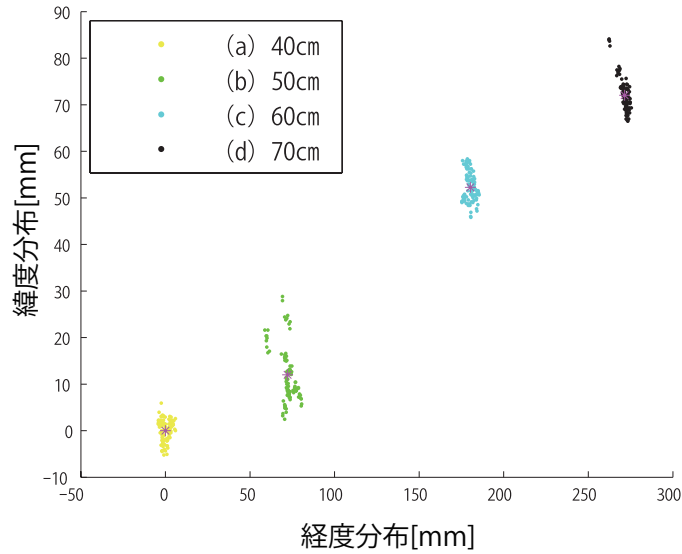


図 5.8. 各点の空間的關係（原点は (a)40cm の中心）

表 5.2. クラスタの各中心点間の距離 [mm] を示す混同行列

	(a)40	(b)50	(c)60	(d)70
(a) 40	-	73.2	187.7	280.9
(b) 50	73.2	-	115.3	208.2
(c) 60	187.7	115.3	-	93.4
(d) 70	280.9	208.2	93.4	-

の設置位置は、位置間の間隔が 10 cm になるように選んだ。位置はスライダのテープによる測定に基づいて設定した。位置を安定させるため、スライダ上の定盤が物理的に存在する位置に設定した。この結果を図 5.7 及び表 5.1 に示す。元の座標単位が度であったため、測定値をミリメートル単位に変換している。

この結果、最大幅は 26.4mm、最大高さは 21.7mm となり、公式の仕様はかなり近い値になった。しかしながら、図 5.7 によれば、(b) の誤差範囲が他よりかなり大きいことが分かる。したがって、これに加えて、アンテナ位置による精度の差異を確認した。図 5.8 に、各取得座標の空間的關係を示す。

また、各クラスタの中心座標間の距離を表 5.2 に示す。表内の値は 100mm の n 倍になるはずである。しかしながら、距離 (a)-(b) についての誤差は 26.8mm($100 - 73.2 = 26.8$) である。誤差 lon_{error_range} と誤差 lat_{error_range} が同じ場合、 lon_{error_range} と lat_{error_range} を ± 26.8 mm と定義する。この値は GNSS 位置の静的検出サイズよりも大きいので、誤差範囲については位置による依存性が支配的であることが分かった。

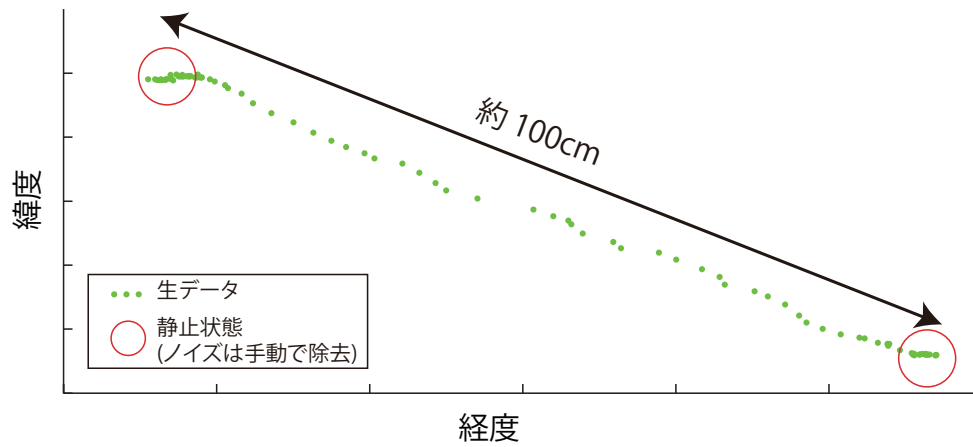


図 5.9. 10 秒間サンプリングして得た生データ

表 5.3. 直線パラメータ

試行	a	b
(a) 1st	-3.64	544.4
(b) 2nd	-3.97	590.6
(c) 3rd	-4.23	626.2
(d) 4th	0.14	15.6

5.4.4 実験結果

図 5.9 に、10 秒間の直線運動をサンプリングした生データを示す。データを処理する前に、運動前および後のスライダから取得した測定値を除外した。5.4.2 節に記載した通り、スライダ上の運動は直線的であるが、局所的にみると必ずしも直線とはなっていない。よって、線形回帰を適用し、測定値に最適の直線を求めた。

図 5.10 に、生データサンプルおよび線形回帰により導出した直線を表し、表 5.3 は、各直線のパラメータを表している。図 5.10(a)-(c) の値は、同様にして取得した。ただし (d) では、意図的に方向を変えて、運動の方向の依存性を調べた。しかしながら、確認できる通り、他と比較して差は認められなかった。

直線のパラメータを取得後、式 5.1、式 5.5、式 5.6 を用いて誤差範囲を縮小することができた。まず、元の座標を直線に射影した。射影後、元の座標から直線までの距離 h を求めることができた。図 5.11 にこれらの距離を示す。 h の最大値は 26.8mm 以内であるため、この結果により、5.4.3 節の予備実験の結果の妥当性を確認できた。

さらに、式により計算された他のパラメータを表 5.4 に示す。結果として、試行 (c) の状況では、 $p_{max} = 0.85$ を得た。これは、局所的な誤差範囲が最大で 15 % 縮小されたことを示す。この場合、 lon_{error_range} および lat_{error_range} は、22.4mm になった。しかしながら、サンプ

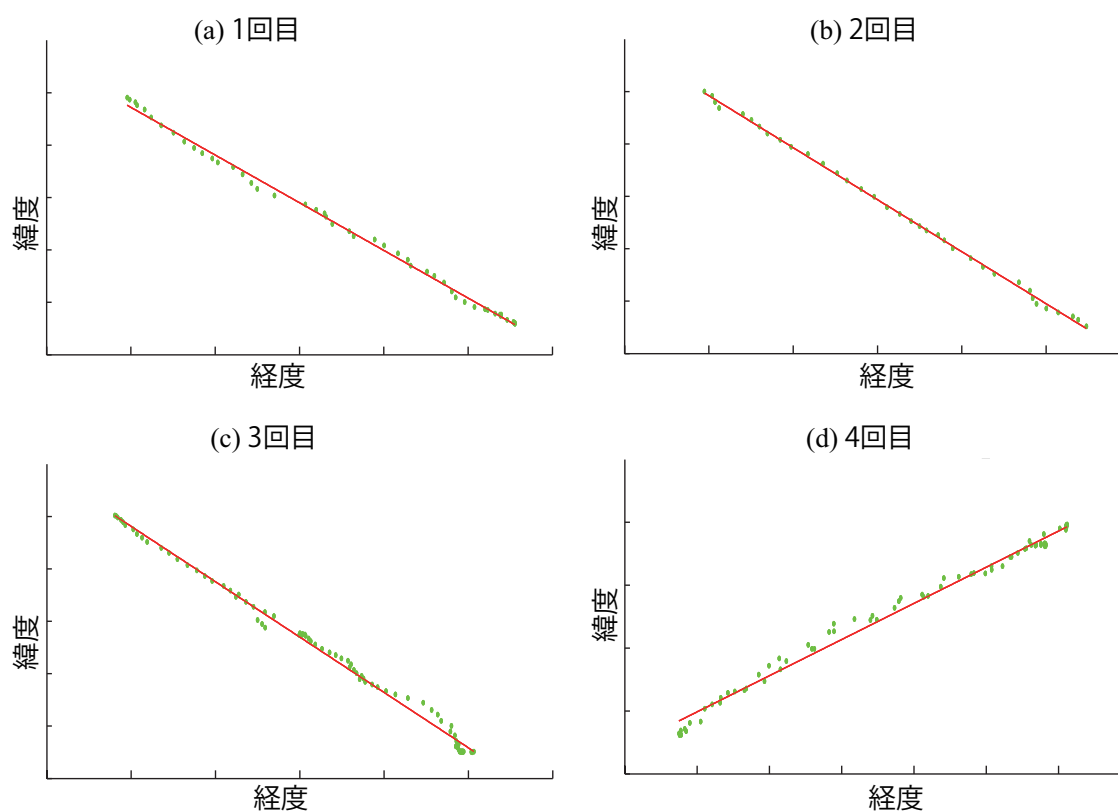


図 5.10. 直線運動の線形回帰の結果

表 5.4. 誤差範囲パラメータ

試行	h_{max}	h_{ave}	d_{max}	d_{ave}	p_{max}	p_{ave}
(a) 1st	11.0	3.0	24.4	26.6	0.91	0.99
(b) 2nd	8.4	1.8	25.4	26.7	0.94	0.99
(c) 3rd	14.7	3.9	22.4	26.5	0.85	0.99
(d) 4th	13.3	3.2	23.2	26.6	0.87	0.99
平均	11.9	3.0	23.9	26.6	0.89	0.99

ルへのノイズの影響はわずかだったため、全体としては3回目の試行では誤差範囲は1%しか縮小しなかった。他の試行でも誤差は縮小され、筆者の手法の有効性が実証された。平均して、誤差範囲の改善は大きいとは言えないが、直線への射影以前に線形回帰により最適化されていることを考えると、処理全体として精度が向上したと考えられる。

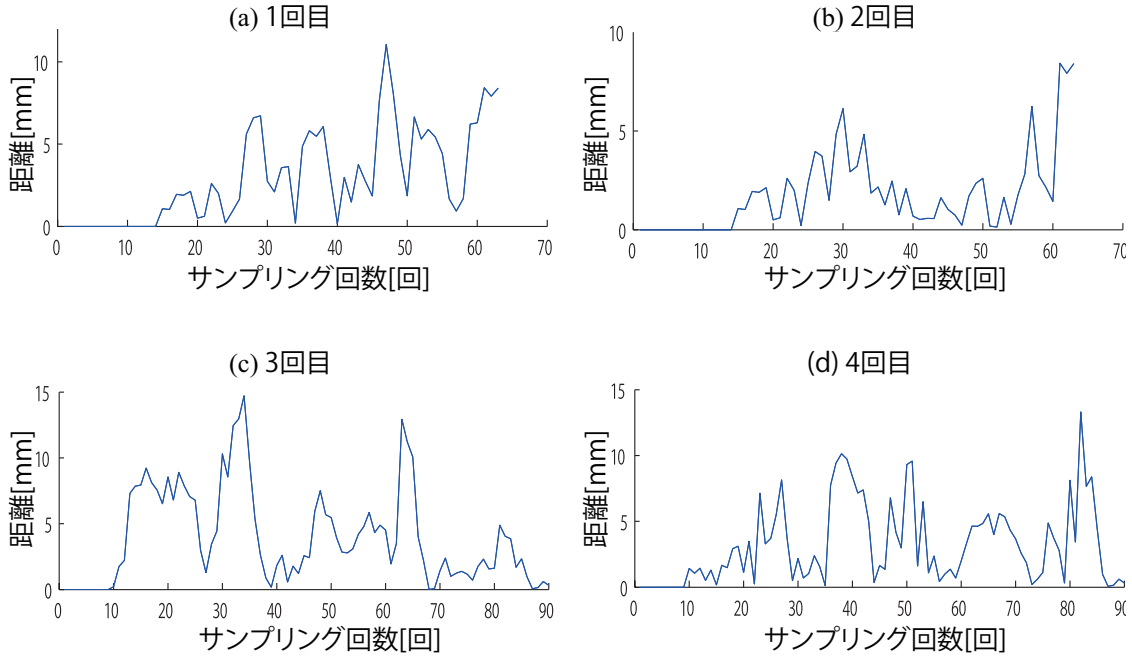


図 5.11. エラー距離

5.5 自己位置推定精度向上に向けた課題

5.5.1 誤差分布

5.4.4 節で提案手法の有効性を示したが、この手法にはさらなる可能性がある。 r が d と同等である場合、誤差範囲は 0 になる（誤差範囲が 100 % 減少する）。しかしながら、図 5.10 に示すように、誤差縮小処理をする以前にすでにサンプル点の分布は線形に見えてしまっていた。実験は理想的な環境で行われ、更に、実験の持続時間は 10 秒であったため、比較的ノイズを含まれないデータとなったと考えられる。しかしながら、予備実験は数分間つづけられたため、予備実験では測定時間が長いことによりより多くのノイズの影響を受けた可能性がある。この手法は、よりノイズの多い環境ではさらに有効であると考えられる。測定データ点が仕様の誤差分布に従う場合は、平均して最大 50 % 誤差範囲を縮小できた。これを式 5.8 に示す。

$$\frac{\int_0^r p \Delta d}{r} = 0.5 \quad (5.8)$$

本研究では、ガウス状分布の場合のサンプリングデータを分析することができた。全体の平均 p_{ave} は 0.99 であったが、これは LMS を用いた線形回帰が大変有効に機能したことも示している。

ノイズの多い環境では、線形回帰の代わりに用いる手法を検討する必要がある。LSM は異常値に関してはノイズに弱いアルゴリズムである。そのため、事前にノイズを除去することで精度が向上すると考えられる（図 5.12 参照）。例えば、LMS と RANSAC の組み合わせは、線

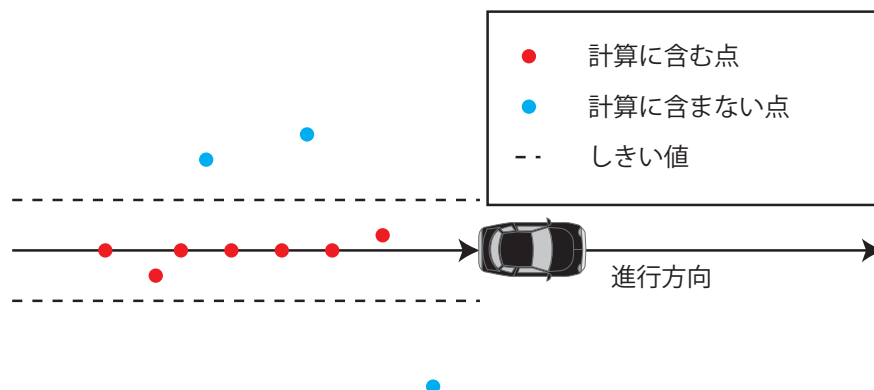


図 5.12. 基本的なノイズ除去戦略

り返し分布の仮説を生成してほとんどのサンプルにより支持される仮説を発見することにより最適パラメータ設定を求める強固な線形回帰法として知られている [83]。ただしこの場合は、計算コストも考慮する必要がある。

5.5.2 直線パラメータの正しさ

表 5.3(a)-(c) に、パラメータが似ていることを示しているが、期待されるものとは異なる。サンプルデータはすべてノイズの影響を受ける。すなわち、パラメータの値は実験により異なると予想される。実環境では、各アプリケーションは異なる仕様セットを有するため、より高い一貫性を必要とする場合は、以下の 2 つの解決策を用いて手法を改善することができる。

1 つは、サンプル数を増やすことである。筆者の実験では、10 秒間に 100 点をサンプリングしたが、サンプリング点 n が増加すれば誤差は \sqrt{n} につれて減少することが知られている。もう 1 つは、運動速度を上げることである。筆者の実験では、アンテナは 10cm/s で移動した。誤差範囲と比較して、このスピードは正確なパラメータを取得するには低すぎた。しかしながら、高速運動はドップラー効果の影響を受けるため、この場合は適当なパラメータを求めるには追加策を取る必要がある。

5.6 本章のまとめ

本章では、受信機や座標取得手法を変更することなく GNSS 測定値の誤差範囲を縮小する手法を提案した。提案手法では、1 次元の運動モデルを利用して、データを後処理することにより座標データを補正した。運動モデルを 1 次元とした場合、誤差範囲は直線と測定誤差を示す楕円体との交点間の距離にまで縮小され、測定値は最小二乗線形回帰法を用いて生成された直線に射影された。実験により、元データと比較して、局所的な誤差範囲は最大で 15 % 減少することを実証した。本章では直線運動モデルを扱ったが、提案手法は、曲線、円、角等で表現できる運動をモデル化することにも有効である。モデルが複雑になった場合は、別のセンサデータを融合させる必要がある。また、高精度測定のために高精度 GNSS を用いたが、1.0

メートルから 10 メートル級の誤差範囲を有する通常の GNSS にも提案手法は有効である。データにノイズが多く含まれることが予想されるため、5.5.1 節で言及した通り、ノイズに頑健な手法を用いることが望ましい。特に、提案手法は、地図がない環境において舗装や農業への応用に有効である。これらの応用では、車両の運動が多くの場合直線的だと考えられるためである。しかしながら、提案手法は、一般的に誤差を縮小する効果を有するため、マップマッチング適用前の前処理をすることで、マップマッチングの精度向上にも寄与しうる。今回の実験は建物の屋上でスライダーを手動で動かして行ったが、今後フィールドで車両に GNSS を搭載して技術の検証を行うことで、実用性についても検証可能と考えられる。

本章の結果は、本論文において高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の問題点として挙げた 4 点のうち、自己位置情報の変化に対して有効であると考えられる。特に高速で移動しているときには速度変化が少なく、また直線的に移動するものと考えられるため、本章で紹介した手法は高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術においてその他のセンシングデータとの位置情報の連動に対し寄与し得る結果を得ることができたと考えられる。本論文において事例として紹介してきたトンネルにおける点検では、トンネルの入口の絶対座標を高精度に得ることに利用可能であり、これにより構造物自身の絶対座標取得やトンネル入口の車両の自己位置精度向上による画像探索範囲の圧縮等への応用が考えられる。

第 6 章

誘電エラストマーを用いた光線位置制御に基づく三次元計測手法

これまで高速移動環境下における二次元の画像情報と位置情報のセンシングについて検討してきたが、対象の形状や対象までの距離変化を把握するため、二次元と同様に、高速移動環境下における三次元情報のセンシングも重要と考えられる。筆者はこれまで誘電エラストマーを用いた光線位置制御手法を開発 [84, 85] してきたこともあり、本章では高精度で且つ振動に強い固体の適応的光学デバイスについて説明し、三次元センシングへの応用例について考察していく。

6.1 背景

6.1.1 高速移動環境下における三次元センシングの重要性

高速移動環境下では二次元センシングだけでなく、三次元のセンシングも非常に重要である。インフラにとって直接的な被害は見た目（色情報）が変化することではなく、例えば、崩壊・崩落といったように構造そのものが規定の状態から逸脱することに端を発することが多いと考えられる。そのため、構造物を固定するネジや構造そのものの路面や車両からの距離を正確に計測することで、ネジの緩みや構造の崩落等を察知することが可能であると考えられる。こうしたある種の異常箇所は高速道路の場合、従来打音検査等によって構造上の異常が生み出す異音を熟練の作業員が聴き分けることによって発見されてきたが、この手法では作業員のスキルに依存することや二次元センシング同様道路の規制が困難であるため、自動化されたシステムに代替されることが望ましい状況にあった。そのため、二次元センシング同様、走行中の車両から高精度に三次元センシング可能な手法が必要と考えられる。

6.1.2 高速移動環境下におけるレーザー照射位置制御の問題点

レーザー及びレーザーの照射位置制御技術は、我々の身近に使われている技術の一つであり、デジタル生活を支えているといえる。昨今ではレーザーそのものや照射位置制御技術の向

上により、材料加工や三次元プリンター、三次元センシング等の用途によって高精度な仕上がりが要求されるアプリケーションにおいてもレーザーが活用されている。今後は従来と比べ短波長側の紫外線を照射可能なレーザー素子が開発されていることから [87]、これによりレーザー光線の照射位置における半径及び最小単位が縮小可能となり、さらに微細なレーザーの活用方法が模索されることが考えられる。

なかでも三次元計測には、これまで高精度で且つ高速にセンシング結果が得られるため数多くのレーザーを利用した手法が提案されてきており、応用の可能性も広がってきていると考えられる。応用例として高速移動環境下におけるレーザー測距を考えたとき、ある相対速度で移動するシステムから対象のセンシングを行うことで、一次元の連続的なセンシングを行うことが可能であるが、対象の1次元情報だけでは局所的な形状しか取得できない。これに対し、センシング対象を一次元から二次元に拡張することで、周囲の情報を得ることも可能となるため、レーザー光を連続的に動かしてセンシングを行う目的で、レーザー光の照射位置制御手法の研究や開発が行われてきた [88, 47, 93]。ここで、仮に三次元計測自体が高精度であったとしても、レーザー光の照射位置制御手法の精度によって全体の精度が低下してしまうため、精度を向上させるためには高精度の照射位置制御方式を採用する必要がある。しかしながら、照射位置制御デバイスの精度は制御方式により大きく異なるのが現状である。

顕著な例として、例えば液体を利用した適応的な光学デバイス [86] は、特に高速移動環境下において不向きだと考えられる。センシング機器が移動を行うとき、照射位置制御デバイスも連動して移動するが、この際に地面から受ける振動を中心とした外部の力を受けて、液体表面の形状が大きく変わってしまう。そのため、定量的な結果を得ることが著しく困難である。こうしたことから、液体を利用した光学デバイスを高速移動環境下で用いることは不向きであると考えられる。

次に、対象までの距離についても検討する必要がある。2章でも説明したように、高速移動環境下では対象とセンシング系の距離が比較的長い状況が想定される。そのため、距離が長くなっても精度が維持できる照射位置制御デバイスが必要になる。ここで一般的な照射位置制御デバイスの精度について考察すると、まず従来のレーザー光線の照射位置制御手法はコストや精度の面で問題があった。最も普及している制御手法として、図 6.1 のようなギアの組み合わせだった機械的な運動に基づく位置制御手法 [88] が挙げられるが、ギアはバックラッシュ等を起こすだけでなく、高精度になればなるほどコストが嵩むため、現実的には精度に限界があった。他に、図 6.2 のようなガルバノミラーを利用した手法 [47] も提案されてきており、ガルバノミラーはギアを利用した機械機構と比べ単純な構成であるため高精度を出すことが可能であるが、依然として機械機構であり、また、角度制御による位置制御となってしまうため、対象までの距離が長くなると精度が落ちる問題点があった。これに対し、図 6.3 のような KTN 結晶へ電圧をかけることにより光軸を制御する手法 [93] も挙げられるが、機械的な機構は一切含まないもののこちらもガルバノミラー同様角度に基づく制御となってしまうため、精度は距離に依存してしまっていた。以上のことから、機械機構ではなく、且つ図 6.4 のように角度制御に基づかないレーザー位置制御手法が実現することで、従来より性能を向上させられると考えられる。



図 6.1. 機械式の光軸位置制御装置に使われるギアのイメージ図([94]より引用)

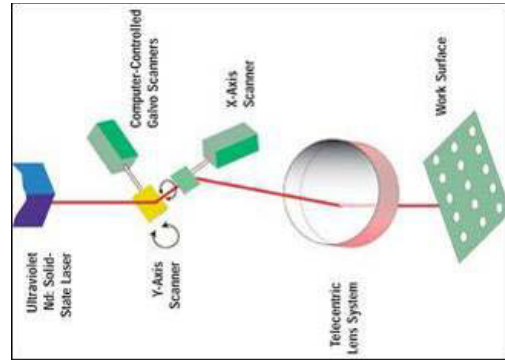


図 6.2. ガルバノミラーによる光軸制御 ([95]より引用)

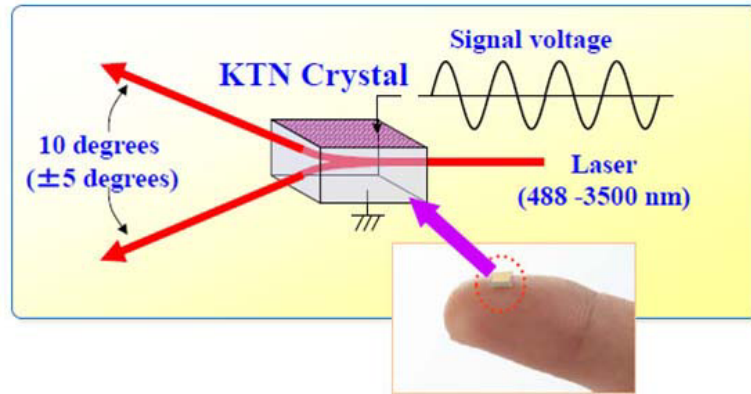


図 6.3. KTN Solid-State Laser Beam Deflection Technology ([96]より引用)

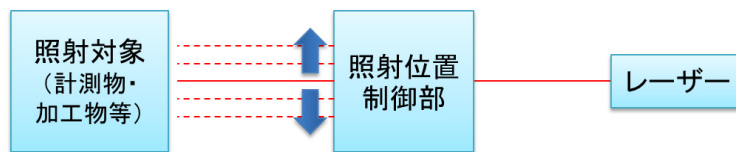


図 6.4. 角度に基づかないレーザー位置制御手法のイメージ図

そこで、本章では誘電エラストマーアクチュエータ（DEA）を用いた新しいレーザ位置制御手法を提案し、最後に実際に三次元計測器でスキャンした結果を示す。DEA は、電気的エネルギーを利用して形状変化を引き起こすことが可能な素材であり [89]、DEA の厚みを制御することにより、レーザビームの出射方向を精度よく操作する手法を提案する。誘電エラストマーのたわみは電圧印加により発生するため、システム内では機械的運動が発生しない。さらに、角度ではなく位置に基づいて方向が決定されるため、本用途は長距離でも有効である。

実験では、印加電圧を 0.0kV から 5.0kV へ増加するにつれてレーザ照射位置が変化することを確認した。応用例として、レーザ測距計の照射位置制御を行ったところ、対象の形状

に基づいた距離データを確認した。

6.2 DEA の厚み制御によるレーザー照射位置制御手法の原理

6.2.1 スネルの法則

図 6.5 のように，屈折率の異なる媒体の境界面を境に，光線の光軸は曲がることが知られているが，曲がる際の曲がり方は式 6.1 のスネルの法則に則っている．この際， i は光線の入射角を表し， i' は光線の出射角を表している．また， N は媒体の屈折率を表しており，もう片方の媒体はこの場合空気であると仮定している．

$$\sin i = N \sin i' \quad (6.1)$$

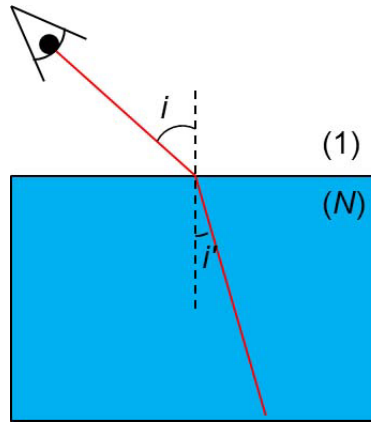


図 6.5. スネルの法則に基づき，異なる屈折率の媒体境界面を境に光軸が曲がる様子

6.2.2 透明な膜の厚さ制御による光軸位置変化

光線が透明な膜状の素材をある角度を持って通過する際，入射方向と出射方向の間には平行な変位が発生する．このときの変位 δ は図 6.6 に示され，図中では膜の厚さが変化すると，この変位が δ_0 から δ_1 へと変化することを表している．

また，入射光線の変位は次式により求められる．

$$\delta = d \sin i \left(1 - \frac{1}{N} \frac{\cos i}{\cos i'} \right) \quad (6.2)$$

ここで， i および i' は式 6.1 同様，それぞれ入射光線の角度および屈折光線の角度である． N は膜状素材の屈折率， d は膜状素材の厚みを表している．式 6.2 より，膜状の素材の厚さ d を変化させることで，光軸の移動量に該当する δ を変化させられることが可能なことが分かった．

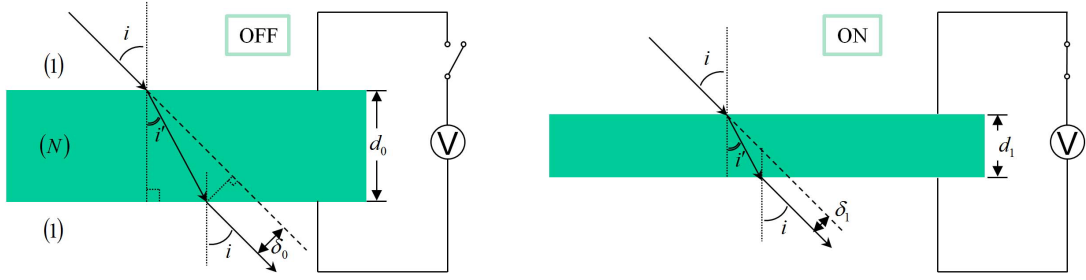


図 6.6. (左側)ある透明な膜状素材を入射光線が通過する際のずれ変位. (右側)膜状素材の厚さが変化すると, 変位 δ を制御可能.

6.2.3 高電圧印加により厚さの変化する素材：誘電エラストマー

ここで, 透明な膜状でなんらかの手法で厚さを制御可能な素材として, 誘電エラストマーに筆者は注目した. 誘電エラストマーは電圧を印加することで厚さが変化する性質を持つことから誘電エラストマーアクチュエータ (DEA) として知られており, 膜が DEA 材料により作成されている場合, その厚みは電圧印加により制御可能になり, 結果的に電気機械的圧力 p_{eq} により圧縮されることによって厚さ d が変化する仕組みとなっている. 電気機械的圧力 p_{eq} は, 次式により定義される.

$$p_{eq} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U^2}{d^2} d \quad (6.3)$$

ここで, ϵ_0 は真空誘電率, ϵ_r は DEA 材料の比誘電率, U は印加電圧である. 活性化領域は圧縮されるが周囲領域に拡大されるため, 屈折率は変化しないと考えられる. 式内で電圧 U は自乗で計算されるため, かける電圧に応じて二次関数的に値が変化していくとが想定される. さらに, DEA は 10kHz での駆動も確認されており [90], 高速に制御を行うことも可能と考えられる.

上記の性質を有することから, 近年 DEA は光学分野への応用用途でも注目されており, 手ぶれ補正等での活用手法が提案されている [91, 92]. しかしながら, 本論文で応用を目指している光軸の制御に直接的に用いた例は筆者の調べた限り存在していない. この DEA にを用いることで, 図 6.6 に示す通り, システムがオフの場合, 光線変位量は δ_0 であり, 電圧をオンにすると, DEA 材料は電気機械力を受け厚みが変化し, 変位量が δ_1 に変化する. このとき, オン・オフ間のずれ変位は, 絶対値 $|\delta_1 - \delta_0|$ として計算できる. 電気機械力は印加電圧を変化させることにより操作可能なため, DEA 材料の厚みを動的に制御でき, これにより光線の出射方向が制御可能となる.

6.3 予備実験：誘電エラストマーの透過率測定

レーザー光線の光軸位置制御をするにあたり，基本システムとして膜をレーザー光が通過することを想定しているため，膜自体の透過率が高くないといけない．というのも，膜を通した段階でレーザーの光量がたとえば 10 分の 1 になってしまうようでは，エネルギー効率的に 9 割は無駄になってしまうだけでなく，その 9 割が想定外の方向に反射する可能性が生じてしまう．特に光量が強力である場合は，反射光によってレーザー加工対象ではなく加工装置周辺の物や人体へのダメージも想定されることから，高い透過率は必須といえる．そこで，本章で使用する誘電エラストマーである 3M 社 VHB アクリルテープに対し，紫外可視分光光度計 UV-3600Plus 及び積分球付属装置 ISR-603 を利用した透過スペクトル測定を行った．

測定条件は下記の表 6.1 に示す通りであり，波長は 220nm の紫外から 2600nm の赤外に渡り測定を行った．

表 6.1. 測定条件

条件	パラメーター
測定波長範囲 [nm]	220 – 2600
スリット幅 [nm]	32
サンプリングピッチ [nm]	1.0

結果として，図 6.7 の測定結果が得られた．この結果により，380nm から 780nm の可視光領域ではいずれも 90% を超える透過率であることがわかり，不可視光領域でも約 300nm 以上約 2300nm 以下の領域では少なくとも 40% 程度の透過率があることがわかった．これにより，VHB アクリルテープを透過させたレーザー光の損失は理想的な条件で 10% 程度であることが分かり，今後，使用目的に合わせた波長の選定と，波長毎の透過率及び反射光の影響について考慮したシステム設計が可能になると考えられる．

6.4 基礎実験：DEA の厚み制御によるレーザー照射位置制御実験

6.4.1 実験の目的と流れ

DEA に対し電圧を印加した際に厚さが変化することはこれまで記述してきたように既知であるが，この厚みの変化を利用して光軸制御を行った際に，実際に光軸が動くか否かについて，これより実験で検証していく．

実験では DEA に対し 0.0kV から 5.0kV までの異なる電圧をかけ，UV 光，可視光，IR 光の 3 種類のレーザーに対しそれぞれレーザー照射位置制御が可能かどうかについて調べた．また，DEA 膜は複数膜重ねることで変位量が多くなる可能性があることから，1 枚の場合と 2

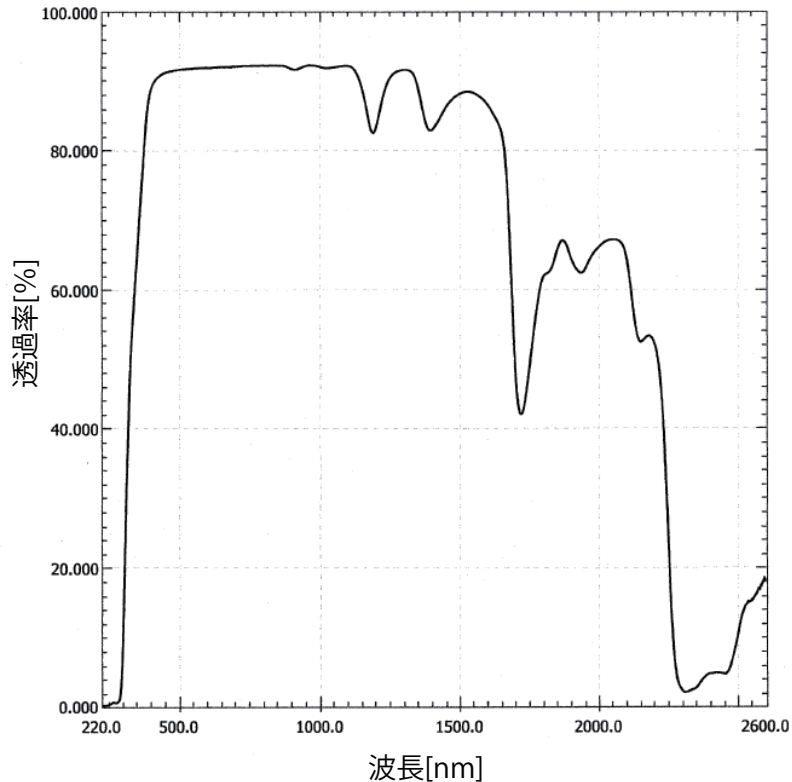


図 6.7. アクリルフィルム VHB の分光スペクトル特性

枚の場合の変位量を調べていく。

レーザー照射位置の変位量はレーザーと正対した位置に置いたカメラによって記録する。具体的に、DEA を通過したレーザー光が紙に照射され、紙に照射されたレーザーの位置をカメラで記録していく。電圧を加える前後の照射位置変化を変位量として解析した。

6.4.2 実験のセットアップ

図 6.8 に、実験装置のレイアウトを示す。レーザーは図中左側に設置し、表 6.2 のように UV 光、可視光、IR 光の計 3 種類を使用した。DEA は、光軸制御の際の変位量が最大化されるよう、主光軸に対して 45 度の角度に 2 枚配置した。カメラは図中右側に設置し、レンズはマイクロレンズを使用した。マイクロレンズを使用したことで、微細な変位量の変化も記録することが目的である。また、DEA を通過した先には ND フィルタと紙を設置した。これは、ND フィルタを置くことでカメラに対して強すぎるレーザーの明るさをカットすることが目的であった。

DEA は厚さ 1.0mm の誘電エラストマー（3M VHB 4910、屈折率 1.47）を 200% に伸展させ、環状リングに固定して作成した（図 6.9 及び図 6.10）。さらに、2 枚の導電性透明ゲル（積水化成工業株式会社、テクノゲル G-CR）を電極として DEA の両側から貼り付け、さらに導電性透明ゲルと金属性テープを接合し、最後に両サイドの金属性テープを高電圧電源の正

表 6.2. 実験に使用したレーザー

型番	波長
Edmund Optics, Miniature LDM Laser Diode	可視光 (633 nm)
Kikoh Technology, MLXG-D13-850-50	IR 光 (850nm)
Edmund Optics, Violet Laser Module 真円	UV 光 (405nm)

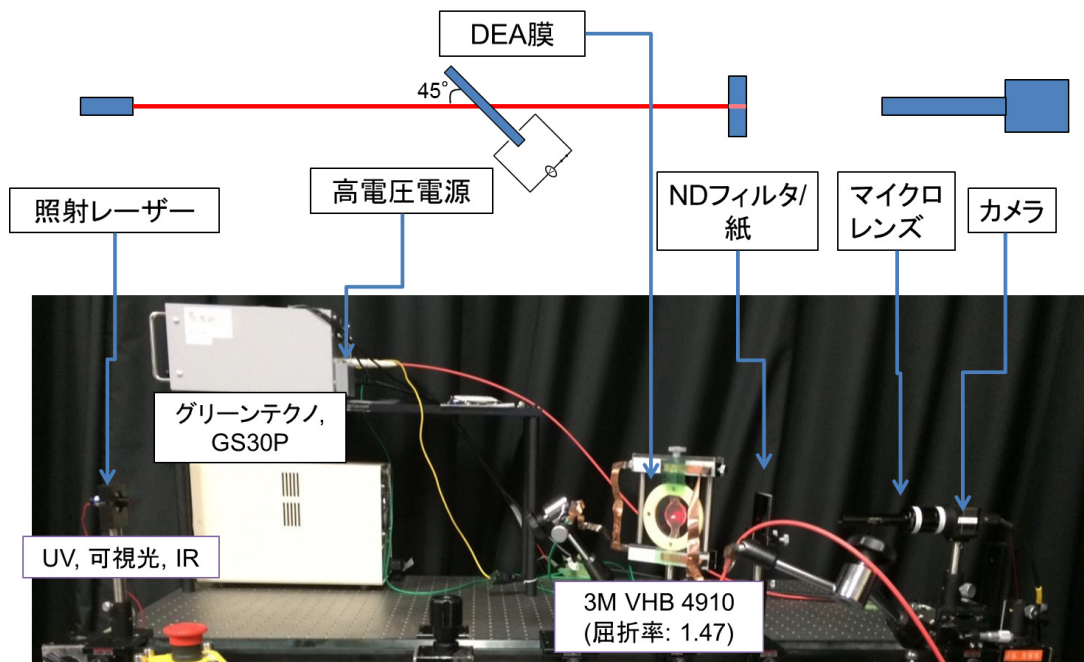


図 6.8. 実験装置のレイアウト

極・グラウンドにそれぞれ接続した。

6.4.3 画像処理の手順

次に、結果の一例として印加電圧が 0kV と 7.1kV の際のレーザー照射位置変化の様子を図 6.11 に示す。図から読み取れるように、電圧が加えられた際にレーザーの照射位置が変化していることがわかる。実際に実験で使用した電圧は 5.0kV であり、位置変化が 7.1kV に比べて少ないため、ここでは変化を明瞭に示すために本結果を示した。以降の実験で電圧を 5.0kV に制限したことは、高電圧による DEA の放電及び破損を防ぎ、実験データを確実に取得するためであった。

こうしてカメラで撮像された画像に対し、二値化処理を行い、重心座標を計測することで 0kV の際のレーザー照射位置と比べた重心座標の変位量を計測した。なお、重心座標から得られる変位量の結果はピクセル単位であるが、実際に紙面上で移動した距離に換算し、 mm もしくは μm 単位で計測するため、定規の写真を撮影した。図 6.12 のように、画像で 1103 ピクセ

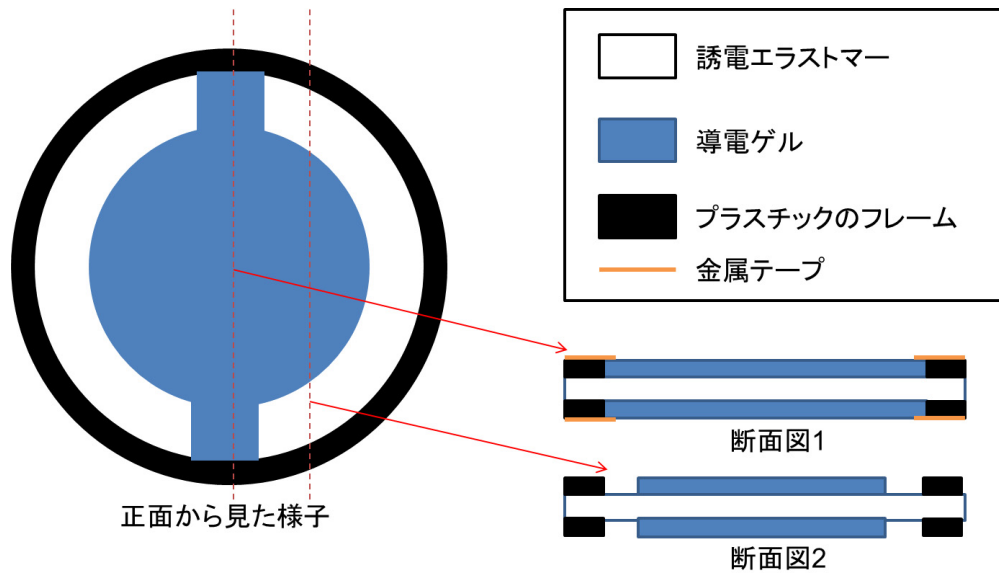


図 6.9. DEA の模式図

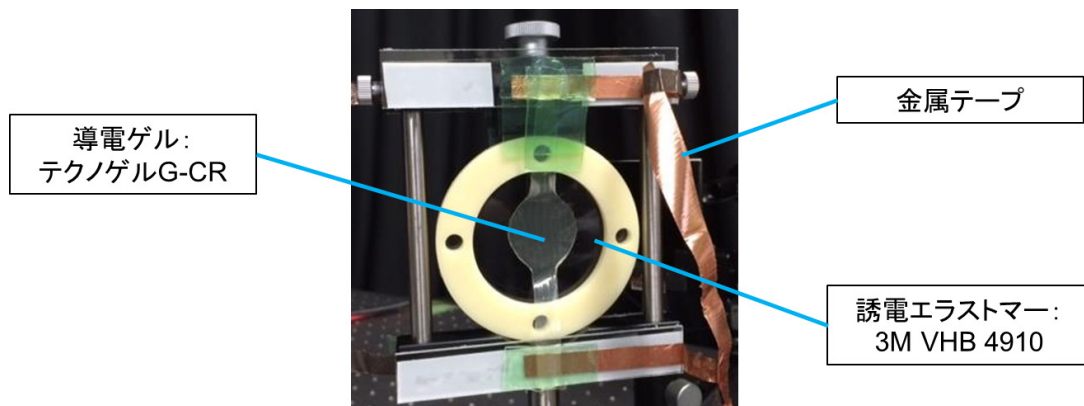


図 6.10. 製作した DEA

ルが 3mm に換算されるということがわかったので、以降この変換式に基づき計算していく。

6.4.4 実験結果及び考察

各波長のレーザーが紙に投影された様子を撮像した結果は図 6.13(a)–(c) となる。各波長で照射されたレーザーの形状やサイズが大きく異なるのは、同一の形状やサイズで波長のみ異なるレーザーを入手することができなかったためである。しかしながら、こうした形状やサイズのバラ付きに対して、本手法が適応可能かどうか検証するという意味ではセットアップの意義があったと考えられる。

電圧を 0.0kV から 5.0kV まで印加した際の各波長毎、各 DEA 枚数の変位量を図 6.14 に示す。この結果により、各波長のレーザー共にかけた電の値に応じて変位量が増すことがわかった。また、DEA の枚数が 1 枚のときと比べ、2 枚のときの方が変位量が増すこともわかった。

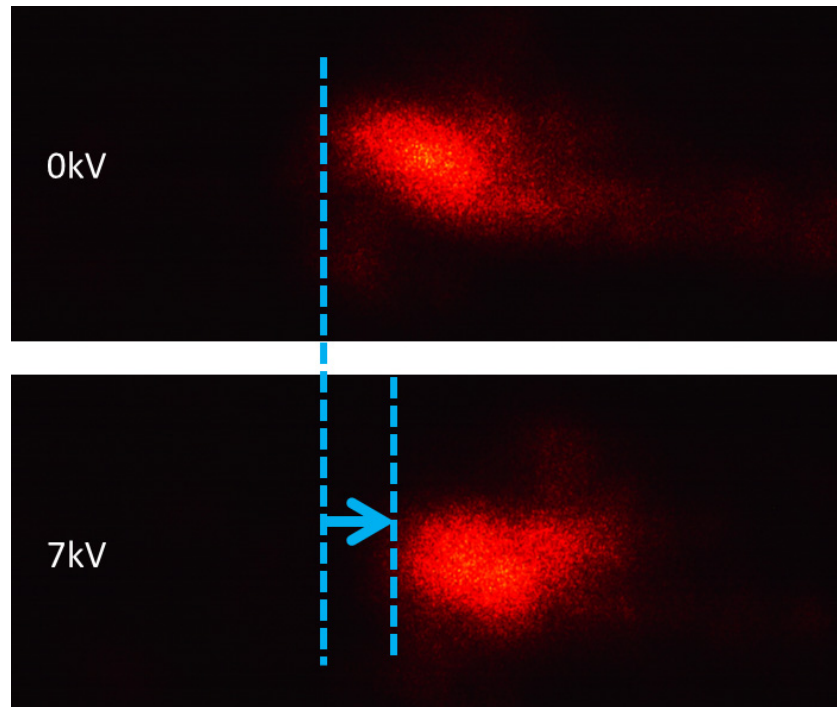


図 6.11. 印加電圧オン及びオフ時に撮像された画像

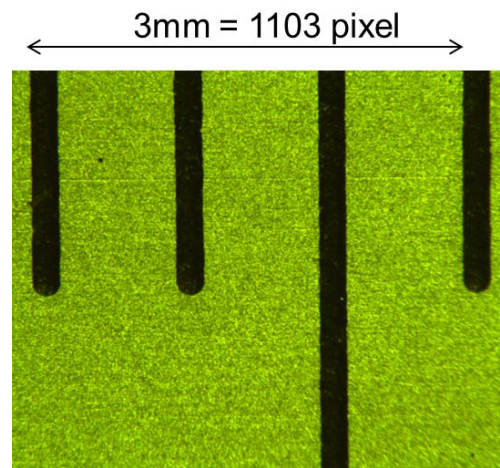


図 6.12. カメラから定規を撮像した様子

変位量が各波長で異なる点については、今回の画像処理方式が単純に二値化後の重心位置探索としてしまったため、画像中のノイズやスペックルノイズ、また各レーザーの照射形状・大きさによって影響を受けたものと考えられる。しかしながら、いずれの結果もマイクロメートルのオーダーで電圧に応じて変化が見られたことから、従来の制御方式と異なり、与える電圧の値に応じて連続的に変位量が変化したといえる。また、変化の様子がかける電圧に応じて二次関数的に値が変化したことから、式 6.3 の理論通りの結果となったといえる。変化の様子を今後より詳細に解析することで、従来の制御方式では得られなかった微細なレーザー照射位置制

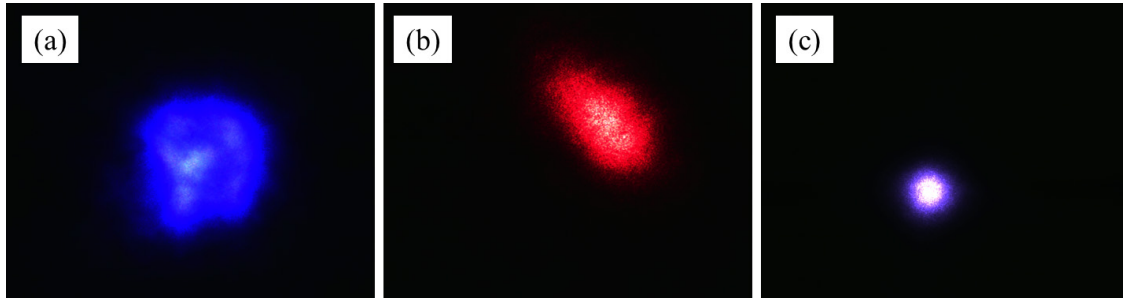


図 6.13. 電圧をかけていない状態で、各波長のレーザー照射位置をカメラで撮像した様子. (a) UV 光. (b) 可視光. (c) IR 光.

御ができると考えられる.

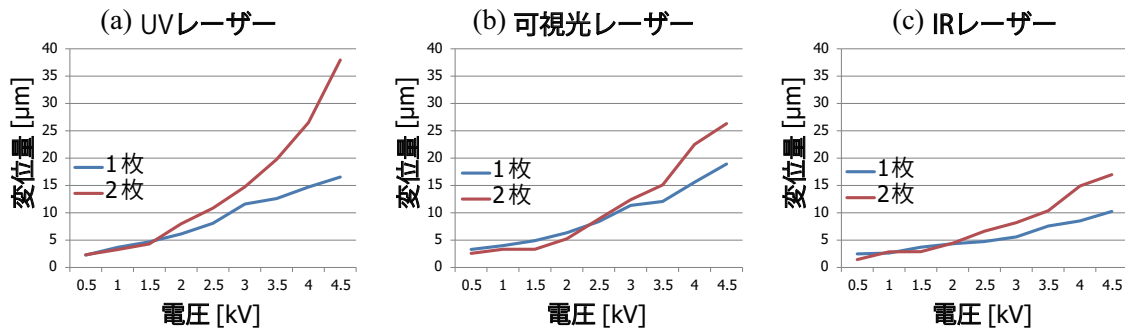


図 6.14. 各波長のレーザー毎に DEA の枚数を 1 枚と 2 枚で変えたときの変位量の様子. (a) UV 光. (b) 可視光. (c) IR 光.

6.5 応用実験：DEA を利用した三次元センシングのスキニング

ここまで扱ってきた DEA による光軸制御技術に基づき、レーザーによる三次元センシングデバイスのスキニングに対し、本手法を応用していく。

6.5.1 実験の背景及び目的

三次元センシング方式の中で、例えば TOF 方式はよく知られている方式であり、最近では Microsoft Kinect[97] といった民生機で二次元上に対象の距離がセンシングできることから、ジェスチャー入力デバイスとしても応用されつつある。しかしながら、TOF 方式はレーザー光が照射されてから受光されるまでの時間を計測する方式に基づくため、センシング機器自体の時間分解能に大きく依存した方式であり、ミリメートル程度の精度が一般的である。次に FSF 方式について紹介する [98]。この方式では 500m とした非常に長距離に対象が置かれた状況でも、距離をコンマ数ミリメートルの精度でセンシングできることが特徴であるが、装

置が非常に高額で大きくなってしまふことから、用途に限られる。最後に光切断法では三角測量に基づき対象までのレーザー光と受光素子の傾きが開いていればいるほどセンシング精度が上がるが、その分オクルージョンに弱くなるという特徴を有する。ただし、予めカメラとレーザーの位置が固定されている状態でキャリブレーションが行われている条件では、繰り返し精度 $2\mu\text{m}$ といった非常に高精度な製品も存在している。そこで、本章ではキャリブレーション済みの三角測量手法を採用して精度とコストが両立されている Keyence 社の LK-G500（繰り返し精度 $2\mu\text{m}$ ）を用い、対象の三次元距離センシングの可能性について検討していくこととする。

6.5.2 実験のセットアップ

先ほどの光軸制御実験と同様、照射されるレーザー光の光軸を DEA に電圧をかけることにより制御していく。このとき、光軸の先には実際に位置に応じて奥行きが変化する対象を設置し、計測することとした。図 6.15 に、実験装置のレイアウトを示す。三次元スキャナによって照射されたレーザーが斜めに設置された計測対象にあたり、その光が返ってくることで奥行き距離が計測される。電圧は 0.0kV から 5.0kV までかけた。なお、レーザー光は照射から三次元スキャナによる受光まで 2 回 DEA を通過することとなるが、DEA の厚さが一様に変化していれば通過による測定値の誤差は生じない。ここで、本研究では DEA の厚さは一様に変化すると想定しているため、このようなセットアップとした。

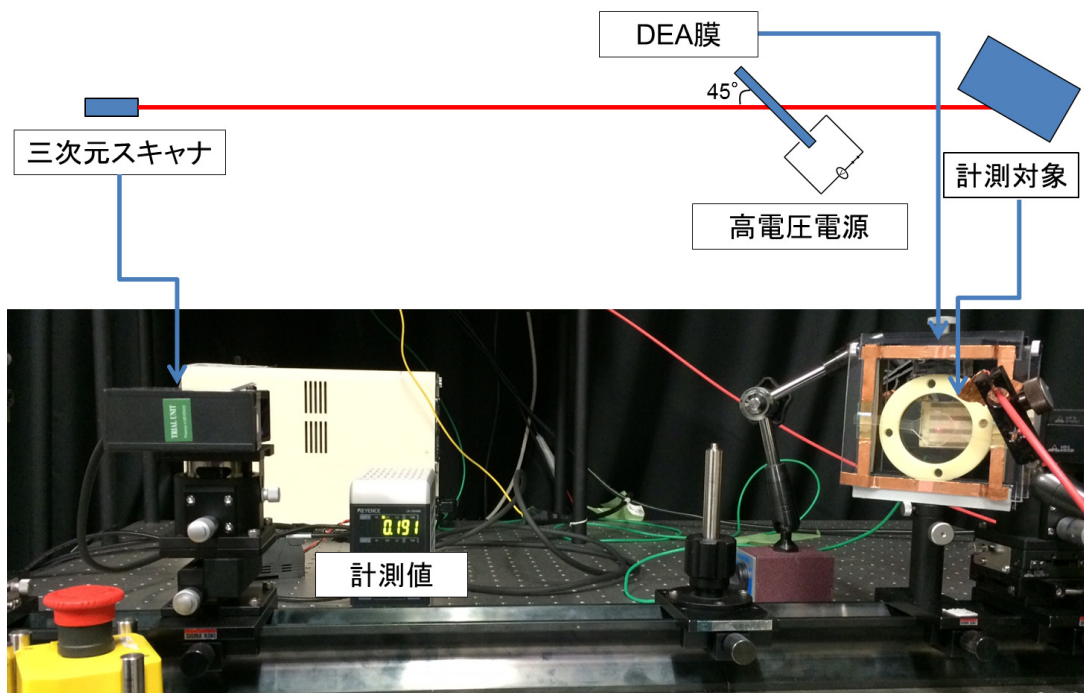


図 6.15. 実験装置のレイアウト

6.5.3 実験結果及び考察

電圧を 0.0kV から 5.0kV まで印加した際の奥行き距離の変化を図 6.16 に示す。下りのカーブは再現性を見るために 5.0kV から 0.0kV まで電圧を変化させた結果による。また、合計 4 回試行したが、結果どのグラフも電圧値に応じて距離が変化していることがわかった。ただし、1 回目の 3.5kV では大きく値が落ち込んでいることから、このときにノイズが発生したものと考えられる。この結果により、DEA を用いた光軸制御手法と三次元センシングを組み合わせ、振動の影響を受けない微細三次元スキャンングが可能であると考えられる。

また、各試行をよく見てみると、上下合わせて約 $20\mu\text{m}$ 程度の分散がある状態でセンシング結果が得られたことがわかった。実験では最大で $120\mu\text{m}$ 程度の距離変化が得られ、いずれもマイクロメーターオーダーの対象までの距離変化を取得できることから、非常に高精度な手法であるともいえる。

今回の実験ではスキャンング速度についての検証は行わなかったが、Keplinger らによって高速で制御可能なことが確認されていることから [90]、高速且つ高精度な三次元スキャンング手法を確立することも可能と考えられる。

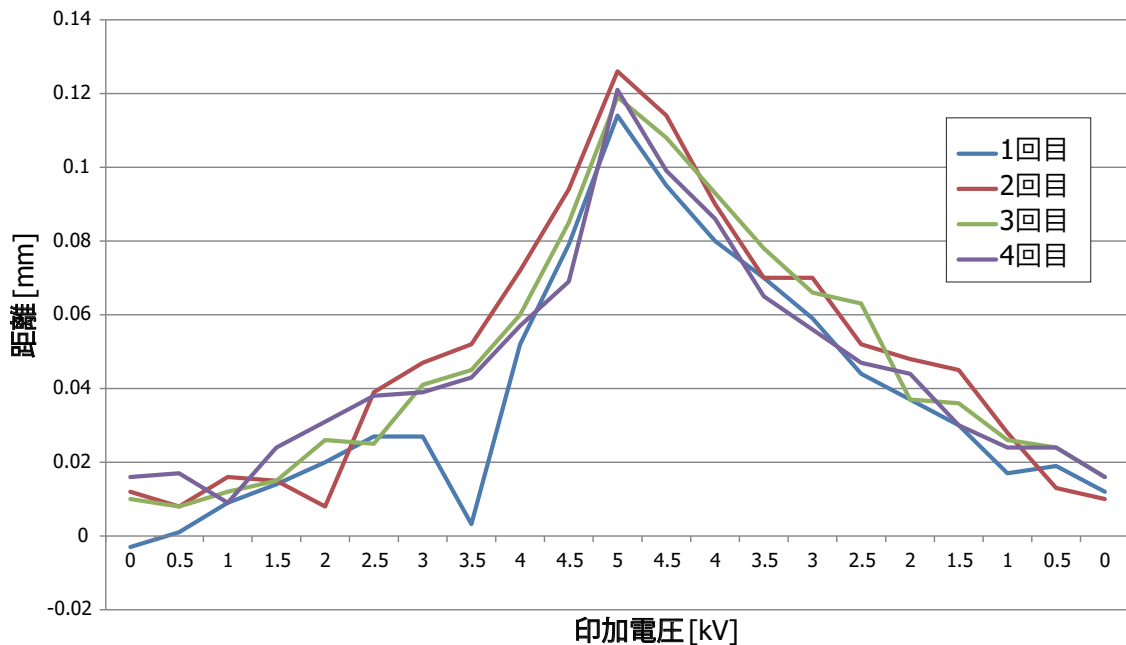


図 6.16. 印加電圧に対する奥行き距離の変化

6.6 本章のまとめ

本章では、DEA による光軸制御手法及び三次元スキャンング手法を提案した。結果として、光軸制御及び三次元スキャンングに対して一定の効果があることがわかったことから、今後様々な応用に用いられると考えられる。システムでは機械的な運動はなく、角度ではなく位置

に基づいて方向が決定されるため、本用途は長距離に有効である。また、今回の実験は実験室内で静的な環境下で実施したが、今後高速移動環境下で技術の検証を行うことで、実用性についても検証可能と考えられる。

本章の結果は、本論文において高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術の問題点として挙げた4点のうち、振動に対して有効であったと考えられる。本文中でも述べたように、装置を液体ではなく固体で構成したため、動的にスキャン可能な高精度光学デバイスを構築することができた。これにより、振動の影響を受けにくい光学デバイスとなったといえる。実際に三次元計測もスキャンしながら実施できたことにより、今後対象の三次元的な特徴を取得することで、例えば点検の場面では形状の変化等を察知するために応用することが可能と考えられる。

第 7 章

結論

本論文では、光軸を対象との相対速度に応じて高速で制御することで、時間軸の密度を積分し、センシング精度の大幅向上と制御ができることをモーションブラー補償装置を用いて示し、また自己位置推定技術、高精度光軸制御による三次元計測手法を組み合わせることにより、「高速移動環境下におけるアクティブビジョン技術」の必要性及び有効性を主張した。これにより、従来のアクティブビジョン技術を拡張し、高速移動体側から撮影するアクティブセンシングを行った点が新しく、これは従来のトラッキングと対になる概念であると共に、高速画像処理の 1 つの分野を切り開いたといえる。

また、高速移動環境下における問題点として挙げたモーションブラー、サンプリングレート不足、自己位置情報の変化、振動に対し、各章もしくは章をまたがって横断的に解決のアプローチを提案し、実際に本論文を通じて問題点の解決に寄与可能であると示してきた。

以下、本章以前に議論・検討を行った内容を章ごとにまとめる。

第 1 章

高速移動環境下におけるセンシングの意義、問題点、センシングシステムの例などについて述べた。また、動的なセンシング技術としてアクティブビジョン技術を応用することが、従来の高速移動環境下におけるセンシング性能を凌駕する新たなビジョンシステムの実現に繋がることを確認した。以降の章で開発を行うモーションブラー補償装置は、光学的に視線方向を制御するという性質上、高速移動環境下におけるモーションブラーの補償を実現するだけではなく、自己位置制御技術、三次元センシングに向けた光軸制御技術と合わせた総合的なセンシングシステムとしても期待される。従来高速移動環境下ではモーションブラー、サンプリングレートの不足、自己位置の変化、振動といった要因により、センシング精度を犠牲にして高速移動環境を実現していたのに対し、本システムは高い移動効率とセンシング精度を両立する枠組みを主張した。

第 2 章

センサーを追加せずにリアルタイムでモーションブラーを補償するために、モーションブラー補償を用いて高速カメラで連続画像を撮影するシステムを開発し、その有効性について他の手法と比較し述べた。モーションブラー補償は、ガルバノミラーの回転往復運動により実現

でき、リアルタイム動作を実現するために、背景トラッキングの概念を提案した。その結果、従来のアプローチと比較して、筆者のシステムではこの高周波数帯域においてモーションブレンダーが改善されることを実証した。筆者のシステムは、様々な分野（例えば、ベルトコンベアのラインでの欠陥部品の検索、道路状態の検査、高精度画像検索等）に応用できることもサンプルの画像を通して確認した。

第 3 章

一般的にガルバノミラーを利用した光学システムの高速な視線制御はガルバノミラーの応答性の不足により、システム全体の速度に限界があった。同様に、筆者がこれまで提案してきたモーションブレンダー補償装置においても 100Hz 周期でのシステム実行が限界であり、さらにリアルタイム性が要求されるアプリケーションに対して応答性を改善する必要がある。これに対し、プリエンファシス技術を利用して PID 制御における波形追従精度が高精度である周波数領域を拡張し、高精度な正弦波の追従が可能であることを主張し、また、実験的に実証を行った。具体的に、まず入出力信号比が 0dB となるようにプリエンファシス係数をあらかじめ求め、システム利用時の入力信号にそれらのプリエンファシス係数を乗算する手法とした。実験により、周波数は 100Hz から 500Hz まで範囲を拡張してガルバノミラーを使用可能となり、特に 400Hz と 500Hz においては約 3dB ほど減衰が改善した。また、プリエンファシス技術をモーションブレンダー補償装置に適用した結果、高周波でのガルバノミラー駆動でモーションブレンダーが著しく改善されることが分かった。2 章までの 100Hz に対し、333Hz で実現できたため、少なくとも 3.3 倍の応答性改善が果たされたといえる。

第 4 章

これまで研究開発を進めてきたモーションブレンダー補償装置の応用例として、インフラ維持・管理における目視点検の代替手法の提案を行った。モーションブレンダー補償装置をインフラ維持・管理に応用するにあたり必要な仕様を検討した上で、複数回の現地実験を経てモーションブレンダー補償技術の実用化に向けた検証を行った。結果、地面から天井までの高さ 7m で時速 120km 相当でのブレンダーキャンセルの成功しただけでなく、公道で他車が走行している環境下でもモーションブレンダーの補償をしたひび割れの画像を取得することができ、本装置の検証を行うことができた。筆者のシステムは、今後さらに開発が進むことで、実際に維持作業車両に搭載されることを始め、日常的な点検に活用されることが可能性として考えられる。

第 5 章

受信機や座標取得手法を変更することなく GNSS 測定値の誤差範囲を縮小する手法を提案した。提案手法では、1 次元運動を想定して、データを後処理することにより補正した。運動を 1 次元に制約した場合、誤差範囲は直線と測定誤差を示す楕円体との交点間の距離にまで縮小された。生の測定値は、最小二乗線形回帰法を用いて生成された直線に投影された。したがって誤差範囲は、直線と測定誤差を示す楕円体との交点間の距離にまで縮小された。実験により、生データと比較して、局所的な誤差範囲は最大で 15 % 減少することを実証した。

第 6 章

本章では、DEA による光軸制御手法及び三次元スキャニング手法を提案した。結果として、いずれもマイクロメーターのオーダーで光軸を制御できることから、非常に高分解能の光軸制御技術を提案することができたといえる。今後様々な応用が期待される。システムでは機械的な運動はなく、角度ではなく位置に基づいて光軸が決定されるため、本用途は長距離に有効であると考えられる。

また、全体を通して「高速道路における点検技術の高度化に関する研究」における表 1.1 の要求仕様及び機能要件を達成することができたため、今後本成果がインフラの安全に対し寄与すると考えられる。

発表文献と研究活動

本論文に関連する文献

1. T. Hayakawa, T. Watanabe, and M. Ishikawa, "Real-time high-speed motion blur compensation system based on back-and-forth motion control of galvanometer mirror," *Opt. Express*, Vol. 23, No. 25, pp. 31648-31661 (2015).
2. T. Hayakawa and M. Ishikawa, "Development of Motion-Blur-Compensated High-Speed Moving Visual Inspection Vehicle for Tunnels," *International Journal of Structural and Civil Engineering Research (IJSCER)* (accepted, 2016 年 5 月出版予定).
3. T. Hayakawa, T. Watanabe, T. Senoo, and M. Ishikawa, "Gain-improved sinusoidal scanning of galvanometer mirror in PID control using pre-emphasis technique for motion blur compensation," *Opt. Express* (2016, 投稿中).
4. T. Hayakawa and M. Ishikawa, "GPS Error Range Reduction Method based on Linear Kinematic Model," 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)/Proceedings, pp.1515–1520 (2015).
5. T. Hayakawa, L. Wang, and M. Ishikawa, "A Novel Precise Laser Manipulation Method with Dielectric Elastomer," OSA's 99th annual meeting, *Frontiers in Optics 2015 (FiO 2015)*(San Jose, California, USA. 2015.10.19)/ (Oral Session) Proceedings, pp. FM2G.5 (2015).
6. T. Hayakawa, L. Wang, and M. Ishikawa, "Dielectric Elastomer Based Laser Beam Pointing Method with Broadband Wavelength," in *Proceedings of SPIE, Photonics West 2016* (2016) (accepted).
7. T. Hayakawa and M. Ishikawa, "Development of Motion-Blur-Compensated High-Speed Moving Visual Inspection Vehicle for Tunnels," in *Proceedings of 3rd International Conference on Geological and Civil Engineering (ICGCE 2016)*(Penang, Malaysia. 2016.1.12) (2016).
8. 早川智彦, 小松由里子, 東晋一郎, 石川 正俊, "インフラ維持・管理におけるモーションブラー補償装置の利用, 第 31 回日本道路会議," in 第 31 回日本道路会議論文集, pp.2006:1–2006:2 (2015).

9. 早川智彦, 奥寛雅, 石川正俊, “ブラーレス画像撮像システム,” 特許第 5729622 号, 2015-4-27.

他 2 件出願中.

その他の文献

1. 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司:オノマトペを利用した触り心地の分類手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 15, No. 3, pp. 487-490, 2010.
2. N. Matsuzawa, K. Iwasaki, T. Hayakawa, and M. Ishikawa, “Critical point for human performance exists under 50 ms of delay in visio-somatosensory fusion task,” Nature Communications(to be appeared)
3. Y. Zou, L. Miyashita, T. Hayakawa, E. Siu, C. Reynolds, M. Ishikawa, “i-me TOUCH: detecting human touch interaction,” in SIGGRAPH Posters (2013)
4. J. Watanabe, T. Hayakawa, S. Matsui, A. Kano, Y. Shimizu, M. Sakamoto, “Visualizing tactile material relationships using sound symbolic words,” Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7283/2012 (Proceedings of EuroHaptics 2012, Tampere, Finland, June 12-15, 2012).
5. 早川智彦, 斎藤英雄, 小沢慎治, “グーテンベルク聖書における活字iの形状分類”, 電子情報通信学会総合大会, D-12-68 (2008).
6. 渡邊淳司, 加納有梨紗, 清水祐一郎, 早川智彦, 坂本真樹, “手触りの快不快とオノマトペの音韻の関係性に関する実験的検討,” 情報処理学会 研究報告音声言語情報処理 (SLP) 2010-SLP-84(31), pp. 1-5 (2010).
7. 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司, “触相図の音韻論的分析,” バーチャルリアリティ学会 (2009).
8. 篠原和子・宇野良子編 渡邊淳司・早川智彦・松井茂著: オノマトペ研究の射程一近づく音と意味 第6部 第18章 「オノマトペを(再)記号接地する試みー音声詩と触り心地のワークショップ」, ひつじ書房 (2013).
9. 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司:言葉の音韻を利用した触り心地の可視化ーワークショップにおける実践, 東京藝術大学映像研究科紀要, Vol. 2, pp. 111-127 (2012).

受賞等

1. 2016 年 International Conference on Geological and Civil Engineering, Best Presentation Award.

参考文献

- [1] マーシャル マクルーハン, “メディア論—人間の拡張の諸相,” みすず書房 (1987).
- [2] K. Daniilidis, C. Krauss, M. Hansen, and G. Sommer, “Real-Time Tracking of Moving Objects with an Active Camera,” *Real-Time Imaging*, Vol. 4, No. 1, 3–20 (1998).
- [3] Japanese Strategic market creation plan (roadmap), http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/rm_jpn.pdf
- [4] N. Joshi, S. B. Kang, C. L. Zitnick, and R. Szeliski, “Image deblurring using inertial measurement sensors,” *ACM Trans. Graph.*, Vol. 29, No. 4, 30:1–30:9 (2010).
- [5] Google Street View, <https://www.google.com/maps/about/behind-the-scenes/streetview/>.
- [6] 「高速で走行しながら画像処理により異常を検出する技術開発を開始」, http://www.cnexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/3459.html.
- [7] T. Asakura and Y. Kojima, “Tunnel maintenance in Japan,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, Vol. 18, No. 2–3, pp. 161–169 (2003).
- [8] Moving style tunnel measurement vehicle (MIMM), <https://www.youtube.com/watch?v=yIn-NI7VA5w>.
- [9] 西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社 イーグル, <http://www.w-e-shikoku.co.jp/business/eagle.html>.
- [10] CG-ARTS 協会, “デジタル画像処理,” CG-ARTS 協会, 1 章イントロダクション p. 14 (2006).
- [11] CG-ARTS 協会, “デジタル画像処理,” CG-ARTS 協会, 2 章画像入力装置 p. 19 (2006).
- [12] 株式会社 高速道路総合技術研究所, “保全点検要領 構造物編 平成 27 年 4 月版,” 株式会社 高速道路総合技術研究所 (2015).
- [13] 中村昇, “ベルクソン=時間と空間の哲学,” 講談社 (講談社選書メチエ) (2014).
- [14] Mikrotron 社 Eosens MC4083, <http://www.aprolink.jp/mc4083/>.
- [15] Photron 社 FASTCAM SA-X2, <http://www.photron.co.jp/products/image/hsvcam/fastcam/sa-x2.html>.
- [16] 早川智彦, 奥寛雅, 石川正俊, “ブラーレス画像撮像システム,” 特許第 5729622 号, 2015-4-27.

- [17] T. Hayakawa, T. Watanabe, and M. Ishikawa, "Real-time high-speed motion blur compensation system based on back-and-forth motion control of galvanometer mirror," *Opt. Express*, Vol. 23, No. 25, pp. 31648-31661 (2015).
- [18] R. A. Morgan, and F. E. Tarver, "Image motion compensation means for camera apparatus," US3687035, 1972-8-29.
- [19] E. Bodensterfer, J. Furtler, J. Brodersen, K. J. Mayer, C. Eckel, K. Gravogl, and H. Nachtnebel, "High-speed Line-Scan Camera with Digital Time Delay Integration," in *Proceedings of SPIE*, Vol. 6496, pp. 64960I-1-10 (2007).
- [20] B. Golik and D. Wueller, "Measurement Method for Image Stabilizing Systems," *Proc. SPIE* Vol. 6502, 65020O-1-10 (2007).
- [21] C. W. Chiu, P. C. P. Chao, and D. Y. Wu, "Optimal design of magnetically actuated optical image stabilizer mechanism for cameras in mobile phones via genetic algorithm," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 6, 2582-2584 (2007).
- [22] H. Oike, H. Wu, C. Hua, and T. Wada, "CLEAR IMAGE CAPTURE Active Cameras System for Tracking a High-speed Moving Object," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Informatics in Control* (2007), pp. 94-102.
- [23] K. Okumura, H. Oku, and M. Ishikawa, "High-speed gaze controller for millisecond-order pan/tilt camera," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (IEEE ICRA 2011), pp. 6186-6191 (2011).
- [24] Y. Yitzhaky, R. Milberg, S. Yohaev, and N. S. Kopeika, "Comparison of direct blind deconvolution methods for motion-blurred images," *Appl. Opt.*, Vol. 38, No. 20, pp. 4325-4332 (1999).
- [25] J. Zhang, Q. Zhang, and G. He, "Blind deconvolution of a noisy degraded image," *Appl. Opt.*, Vol. 48, No. 12, 2350-2355 (2009).
- [26] A. Levin, P. Sand, T. S. Cho, F. Durand, and W. T. Freeman, "Motion-invariant photography," *ACM Trans. Graph. - Proc. ACM SIGGRAPH 2008*, Vol. 27, p.71 (2008).
- [27] R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tumblin, "Coded Exposure Photography: Motion Deblurring Using Fluttered Shutter," in *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 Papers* (2006), Vol. 1, pp. 795-804.
- [28] Y. Qian, Y. Li, J. Shao, and H. Miao, "Real-time image stabilization for arbitrary motion blurred image based on opto-electronic hybrid joint transform correlator," *Opt. Express*, Vol. 19, No. 11, pp. 10762-10768 (2011).
- [29] M. Davis and P. Green, "Head-bobbing during walking, running and flying: relative motion perception in the pigeon," *J. Exp. Biol.*, Vol. 138, No. 1, pp. 71-91 (1988).
- [30] M. Ito, "Cerebellar control of the vestibulo-ocular reflex - around the flocculus hypothesis," *Annu. Rev. Neurosci.*, Vol. 1, No. 5, pp. 275-296 (1982).
- [31] J. Heo, J. Kim, and D. Lee, "Real-time digital image stabilization using motion

- sensors for search range reduction,” in *SoC Design Conference (ISOCC, 2012)*, pp. 363–366.
- [32] I. V. Romanenko, E. a. Edirisinghe, and D. Larkin, “Block matching noise reduction method for photographic images applied in Bayer RAW domain and optimized for real-time implementation,” in *Proceedings of SPIE*, Vol. 8437, p. 84370F (2012).
 - [33] O. Yang and B. Choi, “Laser speckle imaging using a consumer-grade color camera,” *Opt. Lett.*, Vol. 37, No. 19, pp. 3957–3959 (2012).
 - [34] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, “Digital Image Processing”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1992).
 - [35] V. Duma, J. P. Rolland, O. Group, A. Vlaicu, and R. Ave, “Advancements on galvanometer scanners for high-end applications,” *Proc. SPIE*, Vol. 8936, pp. 893612–1–12 (2014).
 - [36] T. Hayakawa, T. Watanabe, T. Senoo, and M. Ishikawa, “Gain-improved sinusoidal scanning of galvanometer mirror in PID control using pre-emphasis technique for motion blur compensation,” *Opt. Express* (2016, 投稿中).
 - [37] M. Bass, “Handbook of Optics,” Mc. Graw-Hill Inc (1995).
 - [38] G. F. Marshall and G. E. Stutz, “Handbook of Optical and Laser Scanning,” CRC Press (2011).
 - [39] R. P. Aylward, “Advanced galvanometer-based optical scanner design,” *Sens. Rev.* Vol. 23, 216-222 (2003).
 - [40] V. Duma, J. P. Rolland, O. Group, A. Vlaicu, and R. Ave, “Advancements on galvanometer scanners for high-end applications,” in *Proceedings of SPIE* (2014), Vol. 8936, pp. 1-12 (2014).
 - [41] V. F. Duma, K. Lee, P. Meemon, and J. P. Rolland, “Experimental investigations of the scanning functions of galvanometer-based scanners with applications in OCT,” *Appl. Opt.*, Vol. 50, 5735 (2011).
 - [42] C. Mnerie, S. Preitl, and V. F. Duma, “Control architectures of galvanometer-based scanners for an increased precision and a faster response,” in *Proceedings of SPIE* (2014), Vol. 8925, p. 89250O (2014).
 - [43] C. Mnerie, S. Preitl, and V.-F. Duma, “Mathematical model of a galvanometer-based scanner: simulations and experiments,” in *Proceedings of SPIE* (2013), Vol. 8789, p. 878915 (2013).
 - [44] C. A. Mnerie, S. Preitl, and V. Duma, “Performance Enhancement of Galvanometer Scanners Using Extended Control Structures,” 8th IEEE Int. Symp. Appl. Comput. Intell. Informatics, pp. 127130 (2013).
 - [45] V. F. Duma and C. Mnerie, “Optimization of Scanning and Command Functions of Galvanometer-based Scanners,” in *Proceedings of SPIE* (2011), Vol. 8083, pp. 808319-1-12 (2011).

- [46] C. Wang, P. Shumyatsky, F. Zeng, M. Zevallos, and R. R. Alfano, "Computer-controlled optical scanning tile microscope.," *Appl. Opt.*, Vol. 45, 1148-1152 (2006).
- [47] M. Jofre, G. Anzolin, F. Steinlechner, N. Oliverio, J. P. Torres, V. Pruneri, and M. W. Mitchell, "Fast beam steering with full polarization control using a galvanometric optical scanner and polarization controller," *Opt. Express*, Vol. 20, pp. 12247 (2012).
- [48] X. Liu, M. J. Cobb, and X. Li, "Rapid scanning all-reflective optical delay line for real-time optical coherence tomography.," *Opt. Lett.*, Vol. 29, pp. 80-82 (2004).
- [49] Y. Li, "Laser beam scanning by rotary mirrors. II. Conic-section scan patterns.," *Appl. Opt.*, Vol. 34, pp. 6417-6430 (1995).
- [50] A. Visiol, "Practical PID control," Springer (2010).
- [51] K. J. Astrom, T. Hagglund, C. C. Hang, and W.K.Ho, "Automatic Tuning and Adaptation for PID controllers- a Survey," *Control Eng. Pract.* Elsevier, Vol. 1, pp. 699-714 (1993).
- [52] R. Ortega and R. Kelly, "PID Self-Tuners: Some Theoretical and Practical Aspects," *IEEE Trans. Ind. Electron.* IE-31, pp. 332-338 (1984).
- [53] R. Farjad-rad, S. Member, C. K. Yang, M. A. Horowitz, and T. H. Lee, "A 0.4- μm CMOS 10-Gb/s 4-PAM Pre-Emphasis Serial Link Transmitter," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 34, pp. 580-585 (1999).
- [54] J. F. Buckwalter, M. Meghelli, D. J. Friedman, and A. Hajimiri, "Phase and amplitude pre-emphasis techniques for low-power serial links," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 41, pp. 1391-1398 (2006).
- [55] S. Le, K. Blow, and S. Turitsyn, "Power pre-emphasis for suppression of FWM in coherent optical OFDM transmission," *Opt. Express*, Vol. 22, pp. 13 (2014).
- [56] Cambridge Technology 社 ガ ル バ ノ ミ ラ ー M3s,
<http://www.gsig.co.jp/precision/M-VMall.pdf>
- [57] J. Montagu, "Scanners-galvanometric and resonant," in *Encyclopedia of Optical Engineering*, R. G. Driggers, C. Hoffman, and R. Driggers, ed., Taylor Francis (2003).
- [58] 早川智彦, 小松由里子, 東晋一郎, 石川 正俊, "インフラ維持・管理におけるモーションブロー補償装置の利用, 第 31 回日本道路会議," in 第 31 回日本道路会議論文集, pp.2006:1-2006:2 (2015).
- [59] T. Hayakawa and M. Ishikawa, "Development of Motion-Blur-Compensated High-Speed Moving Visual Inspection Vehicle for Tunnels," in *Proceedings of 3rd International Conference on Geological and Civil Engineering (ICGCE 2016)*(Penang, Malaysia. 2016.1.12) (2016).
- [60] T. Hayakawa and M. Ishikawa, "Development of Motion-Blur-Compensated High-Speed Moving Visual Inspection Vehicle for Tunnels," *International Journal of Structural and Civil Engineering Research (IJSCER)* (accepted, 2016 年 5 月出版予定).
- [61] Express Highway Research Foundation of Japan, Technical history of highway

tunnels-Construction and management of tunnels, Express Highway Research Foundation of Japan, in a preface (2015).

- [62] J. A. Richards, "Inspection, maintenance and repair of tunnels: International lessons and practice," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, Vol. 13, No. 4, pp. 369-375 (1998).
- [63] 舟原トンネルの外観, http://www.geocities.jp/p_road12/gifu_tn/gh_funahara.htm
- [64] 通信規格 CoaXPress, <http://www.coaxpress.com/coaxpress.php>
- [65] T. Hayakawa and M. Ishikawa, "GPS Error Range Reduction Method based on Linear Kinematic Model," 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)/Proceedings, pp.1515–1520 (2015).
- [66] I. Skog, P. Hndel, and S. Member, "In-Car Positioning and Navigation Technologies — A Survey," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Vol. 10, No. 1, pp. 421 (2009).
- [67] J. A. Perez, J. . Castellanos, J. M. . Montiel, J. Neira, and J. D. Tardos, "Continuous Mobile Robot Localization: Vision vs. Laser," *Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Vol. 4, pp. 29172923 (1999).
- [68] U. Larsson and J. Forsberg, "Mobile Robot Localization : Integrating Measurements from a Time-of-Flight Laser," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 43, No. 3, pp. 422431 (1996).
- [69] K. Lingemann, A. Nchter, J. Hertzberg, and H. Surmann, "High-speed laser localization for mobile robots," *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 51, No. 4, pp. 275296 (2005).
- [70] G. Klein and D. Murray, "Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces," *Proc. 2007 6th IEEE ACM Int. Symp. Mix. Augment. Real.*, pp. 110 (2007).
- [71] J. V. Stafford, "Implementing Precision Agriculture in the 21st Century," *J. Agric. Eng. Res.*, Vol. 76, No. 3, pp. 267275 (2000).
- [72] B. K. Krishnamurthy, H. Tserng, R. L. Schmitt, J. S. Russell, H. U. Bahia, and A. S. Hanna, "AutoPave : towards an automated paving system for asphalt pavement compaction operations," *Autom. Constr.*, Vol. 8, No. 2, pp. 165180, 1998.
- [73] M. Kihara, "Study of a GPS Satellite Selection Policy to Improve Positioning Accuracy," *IEEE Position Locat. Navig. Symp.*, pp. 267 273, 1994.
- [74] N. Kubo and A. Yasuda, "Evaluation of Multipath and Accuracy Improvement Method in a Stand-alone Positioning," *J. Inst. Electron. Inf. Commun. Eng. B*, Vol. J84B, No. 12, pp. 21232131 (2001).
- [75] J. Meguro, T. Murata, J. Takiguchi, Y. Amano, and T. Hashizume, "GPS Accuracy Improvement by Satellite Selection Using Omnidirectional Infrared Camera," *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 18041810, 2008.
- [76] W. L. Mao, and A. B. Chen, "New code delay compensation algorithm for weak GPS signal acquisition," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 63, No. 8, pp. 665677 (2009)
- [77] S. Brakatsoulas, R. Salas, and C. Wenk, "On Map-Matching Vehicle Tracking Data,"

- Proc. 31st Int. Conf. Very large data bases, pp. 853864, 2005.
- [78] C. Wenk and D. Pfoser, “Addressing the Need for Map-Matching Speed : Localizing Global Curve-Matching Algorithms,” Proc. 18th Int. Conf. Sci. Stat. Database Manag., pp. 379388, 2006.
- [79] Y. Lou and W. Wang, “Map-Matching for Low-Sampling-Rate GPS Trajectories,” Proc. 17th ACM SIGSPATIAL Int. Conf. Adv. Geogr. Inf. Syst., pp. 352361, 2009.
- [80] R. G. Baraniuk, V. Cevher, and M. F. Duarte, “Model-Based Compressive Sensing,” IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 56, No. 4, pp. 19822001, 2010.
- [81] J. R. Bergen, P. Anandan, K. J. Hanna, and R. Hingorani, “Hierarchical Model-Based Motion Estimation,” Proc. Second Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV ’ 92), pp. 237252, 1992.
- [82] Z. Zhang, T. Tan, K. Huang, and S. Member, “Three-Dimensional Deformable-Model-Based Localization and Recognition of Road Vehicles,” IEEE Trans. Image Process., Vol. 21, No. 1, pp. 113, 2012.
- [83] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” Commun. ACM, Vol. 24, No. 6, pp. 381395, 1981.
- [84] T. Hayakawa, L. Wang, and M. Ishikawa, “A Novel Precise Laser Manipulation Method with Dielectric Elastomer,” OSA’s 99th annual meeting, Frontiers in Optics 2015 (FiO 2015)(San Jose, California, USA. 2015.10.19)/ (Oral Session) Proceedings, pp. FM2G.5 (2015).
- [85] T. Hayakawa, L. Wang, and M. Ishikawa, “Dielectric Elastomer Based Laser Beam Pointing Method with Broadband Wavelength,” in *Proceedings of SPIE, Photonics West 2016* (2016) (accepted).
- [86] L. Wang, H. Oku, M. Ishikawa, “Variable-focus lens with 30 mm optical aperture based on liquid–membrane–liquid structure,” Applied Physics Letters, Vol.102, 131111 (2013).
- [87] D. L. Elliott, “Ultraviolet laser technology and applications,” Academic press (2014).
- [88] D. K. Borah and D. G. Voelz, “Estimation of laser beam pointing parameters in the presence of atmospheric turbulence,” Appl. Opt., Vol. 46, pp. 6010-6018 (2007).
- [89] M. Bozlar, C. Punckt, S. Korkut, J. Zhu, C. C. Foo, Z. Suo and I. A. Aksay, “Dielectric elastomer actuators with elastomeric electrodes,” Applied Physics Letters, Vol. 101, 091907 (2012).
- [90] C. Keplinger, J.-Y. Sun, C. C. Foo, P. Rothmund, G. M. Whitesides, and Z. Suo, “Stretchable, Transparent, Ionic Conductors,” Science, Vol. 341, No. 6149, pp. 984–987 (2013).
- [91] 喜多一記, “手振れ補正装置、撮像装置,” 特開 2010–81243, 2010-4-8.
- [92] 恩田和彦, “手ぶれ補正ユニットおよび撮影装置,” 特開 2007–155912, 2007-6-21.

- [93] S. Yagi, and K. Fujiura, “Electro-optic KTN Devices,” Physics Procedia, Vol.56, pp. 40-47 (2014).
- [94] http://www.first-jp.com/item-images/items/IT_1103DIA00004.JPG
- [95] <http://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/resources/images/cdn/cms/vector%20scanning.jpg>.
- [96] http://www.ntt-at.com/product/ktn_scanner/.
- [97] Microsoft 社 Kinect, <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect>.
- [98] 宮原利治, 中村孝一郎, 吉田真人, 原武文, 伊藤弘昌, “FSF レーザによる長距離高精度 OFDR の計測限界の検討,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 1998, No. 1, p. 369 (1998).

謝辞

博士過程に入学したのが2010年のこと。それから博士論文提出に至るまで約6年が経過してしまいました。この6年間というもの、辛抱強く見守り、ときに叱咤激励していただいた皆様に対し、感謝の気持ちが止むに止まれません。特に、指導教官であります石川正俊教授には、修士で入学した2008年から8年間もの間、辛抱強くご指導していただき、感謝という言葉では感謝を伝えきれません。研究のイロハを教わっただけでなく、人として社会にどのような向き合うか、これからの時代をどのように見据えていくかを身をもって体現されている石川教授から、たくさんのことを学ばせていただきました。今後は石川教授に教わったことを後輩たちに教えることが、感謝の示し方の一つと捉え、石川教授のようにときに優しく、ときに厳しく後輩の指導に携わっていく所存であります。

また、研究活動の相談に度々乗っていただきました渡辺義浩講師、妹尾拓助教、山川雄司助教には研究で行き詰ったときにどのようにすべきか、抽象的にも具体的に学ばせていただきました。特に妹尾助教には共著の論文を始めとし、普段からお世話になっており、感謝しております。今後はできる限り自立を目指しますが、もしものときはよろしくお願いいたします。

共に研究グループ等で切磋琢磨してきたニクラス・ベリストロム特任助教、王立輝特任研究員、末石智大氏、安井雅彦氏からは、ときに鋭く、カジュアルに研究に対して意見を言い合える状態であり、博士論文執筆にあたり研究生活を実り豊かなものとしていただきました。特に王氏には目的は異なれど、手を動かしながら研究を楽しく行うことを思い出させてもらい、博士号を取るにあたっても支えてもらい、大変感謝しております。また、研究活動とは直接関係ありませんが、同じ研究室の黄守仁特任研究員と一緒にプールに行く仲であり、研究の息抜きの時間を共有させてもらい感謝しております。

共に共同研究プロジェクトで研究を進めてきた渡邊高之進氏、早川裕彦氏、畑中智貴氏、草野翔子氏、斎藤謙二郎氏、中井啓貴氏にも大変お世話になりました。特に渡邊高之進氏には研究に限らず技術的にコアなノウハウや将来設計の仕方等、たくさんのことを学ばせていただきました。今後よろしくお願いいたします。

中日本高速道路株式会社の小松由里子様、小林寛様、東晋一郎様は、共同研究「高速道路における点検技術の高度化に関する研究」の実験の機会を提供してくださり、お世話になりました。実験には小松様や関連会社の皆様が立ち会う必要があり、お忙しい中貴重なお時間を作ってくださいましたこと、大変感謝しております。これからもどうぞよろしくお願いいたします。

最後に、これまでの学生生活及び研究活動を応援して下さった家族に心より感謝いたします。ありがとうございました。

