

夜間車両運転のための遠赤外線
ハイパーステレオカメラ
の距離感に基づく構成法
- 論文内容の要旨 -

水津 俊介

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

電気情報工学専攻

要旨

夜間の安全運転を目的とした、遠赤外線カメラや赤外線センサを利用した運転支援システムは、すでに多くの自動車会社から商品化されている。これらの運転支援システムは通常の運転環境を想定して開発されており、災害現場での使用は想定されていない。災害が発生したときに被災者の救助を行うために、災害救助用車両が活躍している。夜間でも出動が要請される場合もあるが、車両のヘッドライトは照射範囲が限られるため、瓦礫や倒木などの障害物が散乱している現場での走行には不十分である。

そこで、遠赤外線映像による夜間運転支援が考えられる。一方、車両の運転では数十メートル先の環境を見ているため、距離感は両眼立体視からでは得られず、テクスチャ情報が重要である。遠赤外線映像は可視光カメラ映像と比べてテクスチャ情報が不足しているため一台のカメラ映像からでは正しい距離感が得られない。そこで、二台の遠赤外線カメラからの映像を運転席前方に置かれた3Dモニターで見て走行環境を立体的に把握することにする。しかし、3Dモニターを見ながらの運転では、通常の運転と比べて障害物までの距離感が一致しない可能性がある。この距離感の差異は、ステレオカメラと3Dモニターの配置によって制御することができる。

本研究では、障害物に対する3Dモニターからの距離感が走行環境を直接見た場合と一致するように、ステレオカメラと3Dモニターの配置法を検討する。このような運転システムの開発は、安全性を十分に配慮しなければならない。したがって、車両に3Dモニターを搭載して実際に走行するのではなく、まずはドライビングシミュレータによる検討、ついで実車による走行試験、最後に実用化と段階を踏んで開発してゆく必要がある。今回はドライビングシミュレータによる検討を行った。

車両の速度ごとに、ステレオカメラの基線長、基準面距離、及び運転者と3Dモニター間の距離について適切な配置を実験により求めることにした。この実験は

負担が大きいのので、まず被験者の中から代表者で実験を行い得られた結果を仮説とし、ついで残りの被験者による実験でこの仮説を裏付けることにした。

被験者に合わせたドライビングシミュレータを使って3Dモニタを見て運転したときのブレーキ位置を車両速度、基線長、基準面距離、運転者と3Dモニタ間の距離を変えて測定する。ドライビングシミュレータでのブレーキ位置が実環境でのブレーキ位置とほぼ一致する配置パターンを探索する。この結果、3Dモニタ位置と基準面距離は固定し、基線長を車両速度に合わせて伸縮させる必要があるという仮説を生成することができた。

この仮説を残りの被験者で検証した。車両速度ごとに基線長のみを変えてドライビングシミュレータを使ってブレーキ位置を測定し実ブレーキ位置と比較した。この結果、車両速度に比例して基線長を伸縮させることにより、実環境での距離感と同じ距離感を3Dモニタから得られ、同じタイミングでブレーキを踏むことができた。これにより、遠方両眼立体視をする場合、実環境に近い距離感を遠赤外線ステレオ映像で再現するために必要なステレオカメラと3Dモニタの配置法が明らかになった。

夜間車両運転のための遠赤外線
ハイパーステレオカメラ
の距離感に基づく構成法

水津俊介

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程
電気情報工学専攻

目次

第1章 序論	5
1.1 研究背景と目的	5
1.2 論文の構成	6
第2章 関連研究	7
2.1 従来手法における夜間運転支援システムの災害現場での利用	7
2.2 ステレオカメラ配置による3Dモニタ上での見え方	8
第3章 研究の概要	9
3.1 はじめに	9
3.2 実環境とステレオ映像での距離感	10
第4章 実環境における実ブレーキ位置の測定	11
4.1 はじめに	11
4.2 ブレーキタイミングの測定	12
4.3 車両から障害物までの距離の測定	13
第5章 ドライビングシミュレータにおけるブレーキ位置の測定	16
5.1 はじめに	16
5.2 ドライビングシミュレータの構築	16
5.3 3Dモニタ呈示映像の作成手順	17
5.4 遠赤外線ステレオ映像の撮影	17
5.5 カメラ較正	18
5.6 基準面距離	19
5.7 定速度映像の作成	21

第 6 章	実験と評価	22
6.1	はじめに	22
6.2	実車走行環境	22
6.3	実験用車両と使用機材	24
6.4	ドライビングシミュレータの設定	25
6.5	ステレオ視制御則仮説の生成	27
6.6	3D映像視聴時における不快感	34
6.7	近接物体問題	35
6.8	仮説の検証のための本実験	35
6.9	単眼映像からのブレーキ位置	37
第 7 章	結論	39

目 次

4.1	ブレーキタイミング測定機	12
4.2	上段：遠赤外線ステレオ画像，下段左：ブレーキ検出ウインドウ，下 段右：巻尺の目盛画像	13
4.3	巻尺撮影システム	15
5.1	ステレオカメラ固定台	18
5.2	左右遠赤外線カメラからの校正ボード	19
5.3	輻輳点，輻輳角，基準面距離の関係	20
5.4	アナグリフで表された走行環境のステレオ画像	20
5.5	リサンプリングによる呈示映像の作成	21
6.1	走行道路（上）と障害物（下）	23
6.2	ドライビングシミュレータ	25
6.3	運転席から見た3Dモニタ	26
6.4	被験者 TE のブレーキタイミング	33
6.5	被験者 MY のブレーキタイミング	36
6.6	被験者 YE のブレーキタイミング	37
6.7	単眼映像からのブレーキ位置	38

表 目 次

6.1	実ブレーキ測定実験	24
6.2	3 D モニタからのブレーキ位置	29
6.3	許容範囲内の測定結果	32
6.4	変数間の相関係数	32

第1章 序論

1.1 研究背景と目的

地震や火山噴火，台風などによって発生する災害では，災害救助用車両が活躍している．災害が発生するタイミングを正確に予測することは難しいため，災害救助用車両は昼夜関係なく出動する必要がある．災害現場では瓦礫や倒木などの障害物が散乱している現場では地形を正確に把握しなければ衝突の可能性が高まる．

また災害現場では負傷し，歩行することができない被災者の存在を無視することはできない．負傷した被災者は障害物の陰でうずくまったり，気を失って倒れている可能性がある．災害救助用車両のヘッドライトでは照射範囲が限られ，暗い色の服を着ている救助が必要な被災者を見逃してしまう可能性も考えられる．

運転支援に関しては交通事故防止のため自動運転技術では [1, 2] 走行環境を把握したり，歩行者を検出する技術が開発されているが，これらの技術はどれも災害現場での使用は想定されておらず，倒れている歩行者の検出は想定されない．

そこで，災害現場での使用のために赤外線カメラからの映像の利用が考えられる．しかし，走行環境の遠赤外線映像を見ながらの運転は，走行環境を直接見る場合に比べて，遠赤外線画像上のテクスチャは可視光カメラ画像上のテクスチャとは異なり，遠赤外線画像の人のテクスチャからは人であると認識することは容易にはできないので，見かけの大きさから距離感を得られない可能性がある．ゆえに，位置関係を正確に把握することは難しく，距離を見誤る可能性がある．そこで，遠赤外線カメラを2台にし，ステレオ映像を3Dモニタで見ることにより，いままで見分けにくかった障害物の位置関係を走行環境を立体的に把握できる運転システムであればよい．

しかしながら，3Dモニタを見ながら運転しても，通常の運転と比べて障害物までの距離感が一致しない可能性がある．この距離感の差異は，ステレオカメラと

3D モニタの配置条件を調節することによって制御することができる。本研究の目的は、障害物に対する3D モニタからの距離感が走行環境を直接見た場合と一致するように、ステレオカメラと3D モニタの配置法を検討することである。

運転システムの開発は、安全性を十分に配慮することが必要不可欠である。したがって、まず運転環境を再現したドライビングシミュレータによる検討、ついで実車による走行試験、最後に実用化と段階を踏んで開発してゆく必要がある。本研究は、ドライビングシミュレータによる基礎的検討の段階である。

1.2 論文の構成

本論文は、まず第2章で関連研究について述べる。従来手法における夜間運転支援システムと本論文での提案手法との違いを詳細に説明する。

第3章では、本研究の概要について述べ、実環境とステレオ映像での人が感じる距離感の違いについて説明をする。

第4章では、実環境で実験用車両を走行させたときのブレーキ位置、走行距離を測定する方法を説明する。本論文では、ドライビングシミュレータでのブレーキを踏んだ位置と実環境下でのブレーキを踏んだ位置を比較するうえで、必要なブレーキタイミング測定機、車両の走行距離の測定方法について説明する。

第5章では、ドライビングシミュレータに3D モニタから提示される映像から得られる距離感を検証するうえで必要になる遠赤外線ステレオカメラ映像の作成方法について述べる。

第6章では、実験を行い、結果及び評価を示し考察を行う。被験者の代表者に対して条件の異なるステレオ映像をドライビングシミュレータで呈示して仮説を生成して、その仮説を残りの被験者によって検証し、第7章で本論文をまとめ、今後の展望を述べる。

第2章 関連研究

2.1 従来手法における夜間運転支援システムの災害現場での利用

ICTを援用した車両の自動運転技術の開発が進んでいる。自動運転では走行環境をさまざまなセンサで把握する必要がある [1, 2]。遠赤外線センサは、歩行者や他の車両などの発熱体を夜間でも選択的に検出できる利点がある。単眼 [3] あるいはステレオ [4, 5] 遠赤外線センサ、さらにはレーザ [6] やレーダー [7] 等の他のセンサとの組合せにより歩行者の検出や追跡が可能である。ただし、これらの研究に限らず、自動運転では基本的には整備された走行環境が前提である。

これに対し、災害現場では道路の陥没や隆起、倒木や倒壊した建物、瓦礫などもあり、走行環境が整備されているとは言い難い。道路が寸断されていたり、障害物が散乱し、歩行者や車両が入り乱れているような状況になることも都市部での災害では十分ありえる。また、道路上に被災者が倒れている可能性もあり、最終的には人間の視覚による確認が必要と考えられる。

視覚による距離感の要因 [8] として、両眼視では輻輳や両眼視差があげられる。単眼視でも距離感を得ることができ、その要因として、ピント調節、運動視差、見かけの大きさ、視界における高さ、遮蔽、光源に対する陰影と影、空気遠近、テクスチャ密度、などがあげられる。それらの要因の効果は対象までの距離によって異なり [9]、最も一般的な要因と考えられる両眼視差は 10m 以内までとされる。それ以上は単眼視の要因の方が効果的であり、距離の大きさにつれて運動視差、視界における高さ、見かけの大きさの順に、効果的な要因が入れ替わってゆく。車両の運転の場合は、車両速度にもよるが、安全のためには少なくとも数十 m 先を見ているため、両眼視よりも単眼視から距離感を得ていると考えられる。

2.2 ステレオカメラ配置による3Dモニタ上での見え方

ステレオビデオカメラからの映像を3Dモニタで見るとき、両眼視差を利用して距離感を得ているが、実物体を見ているのとは異なり、疲労感や不快感を引き起こすことがある [10]。そのため、3D映像の視聴者や制作者に向けて、ガイドライン [11] が定められている。このガイドラインによれば、画面高さの3倍離れた位置から視聴し、両眼の視差角が 1° 以内となるように映像を制作することが望ましい。例として、ステレオカメラの基線長を瞳孔間距離 (65mm) とし、水平画角を 40° 、基準面距離を7mとすれば、人間の視覚に近い距離感が得られる [12]。ただし、2.1m以内の近接物体には視差が大きくなるが、5mから20mの範囲の物体には適度な視差が与えられる。20m以遠は単眼視と変わらない。20m以遠を両眼立体視するためには、基線長と基準面距離を拡大する必要がある。しかし、それに伴い近い物体の視差が大きくなり不快感を引き起こす [12]。なお、瞳孔間距離よりも大きな基線長を持つステレオはハイパーステレオ [13] と呼ばれ、被写体が実際のサイズよりも小さく見えてしまうミニチュア効果が起こる。この効果は演出面からは評価 [13] されているが、距離感を客観的に評価する試みはまだない。

乗り物に搭載されたステレオカメラからの映像を3Dモニタで見て操縦する試み [14, 15] が、無人飛行機を対象にシミュレーションではあるが行われている。ここでは、3D映像による操縦は2D映像による操縦よりも必ずしも優れているとは限らない [16]、とされている。その実験 [15] ではステレオカメラの基線長が瞳孔間距離の2倍程度に抑えられている。これは、近距離の物体に対する視差の拡大を抑えるためであるが、そのため飛行に必要な数十m先の距離感には両眼視差よりも運動視差の方が効果的となってくるからである。ただし、これは遠赤外線センサではなく可視光センサの使用を仮定している。

第3章 研究の概要

3.1 はじめに

ステレオカメラからの映像を3Dモニタで見て車両を運転するとき、安全のためには数十m先に存在する障害物が視認できることが必要となる。ステレオカメラ配置を人間の両眼の配置に似せた場合、数十m先の障害物を見ても両眼視の効果は得られず単眼視をしているのと変わらないので、このステレオカメラ配置で撮影された立体映像を見た場合、障害物までの安全な距離と車両のスピードコントロールやブレーキを踏むタイミングを誤ってしまう可能性がある。可視光カメラ画像からは身長が170cmの人が小さく見えればその見かけの大きさからその人までの距離感を得られるが、単眼の遠赤外線カメラで撮影した場合、遠赤外線画像上のテクスチャは可視光カメラ画像上のテクスチャとは異なり遠赤外線画像の人のテクスチャからは人であると認識することは難しいので、運転者が見かけの大きさから正しく距離感を得られない可能性がある。そのため、単眼視では正確な距離感を掴むことが難しい。実際、6章9節の実験では遠赤外線単眼視からの距離感は不正確であることを確認している。

そこで、通常は人間の両眼の配置に似せてステレオカメラ間の基線長を6.5cmと設定するところを本研究では、ステレオカメラ間の基線長と基準面距離を拡大する。つまりハイパーステレオ化することで、前方数十m先の距離感を両眼視差によって得ることとする。前章で例[12]として示した基線長(65mm)と基準面距離(7m)を、10倍に拡大する。すなわち、基線長を65cm、基準面距離を70mとすれば、相似関係により、50mから200mの範囲の物体には適度な視差が与えられ両眼視が有効となる。一方、副作用として21m以内の近接物体では視差が大きくなりすぎる恐れもある。この近接物体問題は6章7節で議論する。

3.2 実環境とステレオ映像での距離感

1章1節で述べた本研究の目的を実験によって達成する。すなわち、直線道路上に障害物を置き、その障害物を目指して一定速度で車両を走行させる。このとき、

- (1) 障害物を直接目で見て運転した場合に、ブレーキを踏み始めた位置と、
- (2) 障害物の遠赤外線ステレオカメラからの映像を、3Dモニタで見て運転した場合に、ブレーキを踏み始めた位置を測定する。
- (3) 両者のブレーキ位置が一致するようなステレオカメラと3Dモニタの配置を探索する。

距離感とは、対象までの距離を正しく把握する感覚であり、これは個人差がある。本研究は、この距離感といった主観的な量を、ブレーキ位置といった客観的な量によって評価することに特徴がある。具体的には、基線長65cm近辺、基準面距離70m近辺を探索する。すなわち、ステレオカメラ間の基線長を50cmから70cmまで5cm刻みに5通り、基準面距離を40m、70m、100mの3通りに設定する。3Dモニタの視距離は、画面高さの3倍が適切とされるが、必ずしもこの視距離が適切ではないという報告[17]もある。使用する3Dモニタ(Victor GD-463D10)の画面高さは57.3cmであるので、その3倍の1.6mを中心に、1.2m、2.0mの3通りに視距離を設定する。また、救助用車両の走行速度は低速であるとし、時速20km、30km、40kmの3通りに設定する。これらの設定の組合せの中から、適切なステレオカメラと3Dモニタの配置を求める。

この実験は、災害現場ではなく通常の直線道路を走行しブレーキ位置を測定するので、実験車両は災害救助用車両でなくても一般車両で充分である。また、(2)では実際に車両に3Dモニタを搭載して運転するのではなく、ドライビングシミュレータにより測定する。

第4章 実環境における実ブレーキ位置の測定

4.1 はじめに

一般的にブレーキを踏んだタイミングを顕出するには、加速度センサやドライビングレコーダの利用が考えられる。しかし、加速度センサはブレーキ以外の衝撃に対しても反応し誤動作の可能性があるため、ドライビングレコーダは検出頻度が低い。これらの二つの機器を用いて正確にブレーキを踏んだタイミングを検出することは難しい。

本研究でのブレーキの検出と車両から障害物までの距離測定の頻度は遠赤外線カメラに同期させてブレーキタイミングと障害物までの距離を記録する必要がある。同期させることによって、ブレーキを踏んだ位置と車両を発車させてから停車させるまでの各フレームごとの車両から障害物まで距離を cm 単位の正確な情報で得たい。これは5章7節で説明する車両を一定速度走行させた映像を作成する際に、実際に撮影された遠赤外線画像から精度の高い補間画像を作成するために必要である。同期させるためには遠赤外線カメラのフレームレートが1/30秒単位であるので、ブレーキの検出時間は1/30秒、またはそれ以下でなければならない。そこで本研究では、ブレーキを踏んだときのブレーキランプの点灯を反応時間が1/50秒である Macron International Group 社製の可視光センサで検出し、車両から障害物までの距離を巻尺を用いて測定する。

4.2 ブレーキタイミングの測定

作成したブレーキ光検出システム図 4.1 は、可視光センサ、リアルタイムクロックモジュールおよび Arduino マイコンボードから構成されている。可視光センサは、ブレーキランプを覆っている透明プラスチックカバーに貼り付ける。このとき、テールランプや街頭などからの光は遮光テープで遮蔽し誤検出を防ぐ。可視光センサからの照度値は、Arduino マイコンボードで A/D 変換され閾値処理によりブレーキランプの点灯が検出される。この検出情報は、リアルタイムクロックモジュールからの時刻信号とともに USB ケーブルで PC に送られ、ターミナルエミュレータを使って PC 上のウィンドウ内に表示される。図 4.2 下段左に表示ウィンドウを示す。ブレーキが踏まれていないときには、時刻のみが表示され、踏まれたときには stepped on the brakes という記載が時刻の前に加わっている。ブレーキの有無は 1/30 秒ごとに検出される。最新の検出はウィンドウの最下部に表示され、時間の進行とともに上方へスクロールされる。

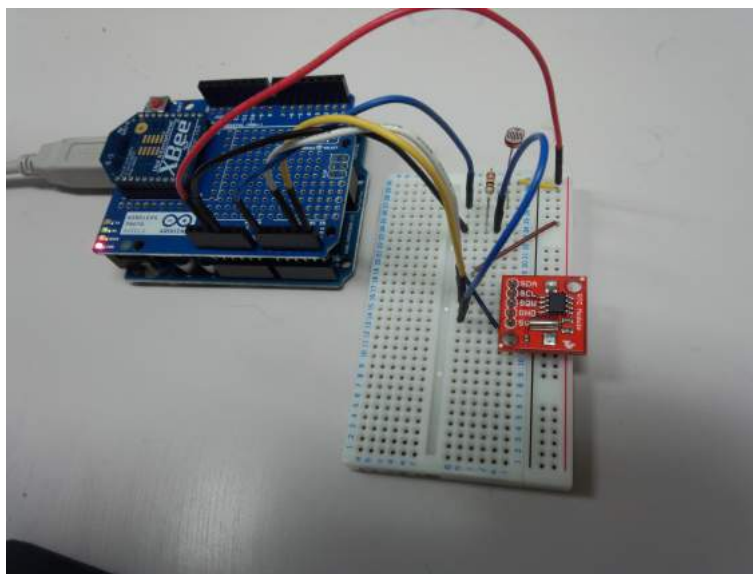


図 4.1: ブレーキタイミング測定機

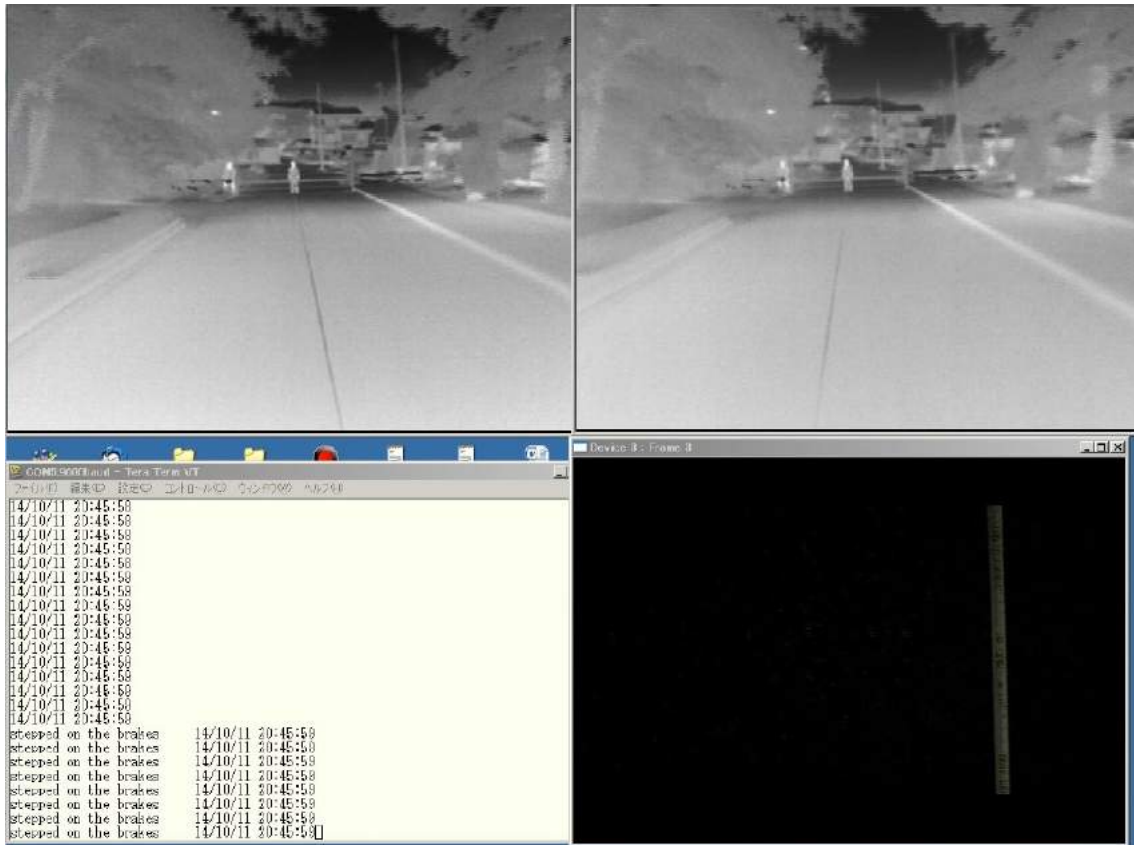


図 4.2: 上段：遠赤外線ステレオ画像，下段左：ブレーキ検出ウインドウ，下段右：巻尺の目盛画像

4.3 車両から障害物までの距離の測定

ブレーキペダルを踏んだ瞬間の車両から障害物までの距離の測定法として、GPS による位置の測定、レーザレンジファインダや遠赤外線ステレオカメラによる障害物までの相対距離の測定などが考えられる。しかし、既存の GPS やレーザレンジファインダは 1 秒間に 10 回程度 [18] しか距離を測定できない。

また、ステレオカメラを用いた検知対象物までの距離測定精度は、ステレオカメラ間の基線長、撮像素子の解像度に依存する [19]。本研究ではステレオカメラ間の距離を 5 段階に変化させるので変化させるたびに精度が変動することになり、遠赤外線ステレオカメラの画像解像度は横 320 画素と低いので車両から障害物までの距離を正確に測定することは難しいと考えられる。そこで、本研究では巻尺を使用することにした。距離を測定するために巻尺を使用するのはミニチュアカーでは報告 [20] があるが、実車での使用は例がない。巻尺を道路上に、障害物位置を基点

に一直線上に敷設する。車両は巻尺を跨ぎ、車両後部に取り付けられたビデオカメラで巻尺の目盛を撮影する。このとき、走行中のブレを抑えるためにシャッター速度を高速に設定する。夜間の撮影でもあり画面が暗くなるので、強力なLED照明により巻尺を照らす。図 4.3 に車両に取り付けられたビデオカメラとLED照明及び巻尺を示す。ビデオ映像はキャプチャボードを介しPCのウインドウに1秒間に30回の頻度で表示される。図 4.1 下段右はその表示例である。かなり暗い画像ではあるが巻尺が映っており、拡大することにより目盛を読むことができる。この表示はブレーキ検出ウインドウと同時に表示されている。ブレーキ検出ウインドウの最下部にブレーキ検出の表示が現れたときが、ブレーキをかけたタイミングであるので、同時刻の巻尺画像から障害物までの距離を読み取ることができる。



図 4.3: 卷尺撮影システム

第5章 ドライビングシミュレータに おけるブレーキ位置の測定

5.1 はじめに

3D モニタを見て運転したときのブレーキ位置は、走行する車両に3D モニタを搭載して測定するのではなく、車両運転時を再現したドライビングシミュレータを使用してブレーキ位置を測定する。

5.2 ドライビングシミュレータの構築

車両を停車させ車両の前方に3D モニタを置く。これを自動車を運転するドライビングシミュレータとする。モニタに呈示された走行時のステレオ映像を見ながら被験者が考える安全に考慮した距離感に基づきブレーキを踏む。ドライビングシミュレータとして使用する車両は被験者が普段運転している車両をとし、市販されているドライビングシミュレータは使用しない。これは仕様の異なる設備や車両でブレーキを踏むとブレーキペダルの大きさや座席シートの大きさや高さの違いなどの要因により、遠赤外線ステレオ映像を見ながらブレーキを踏むタイミングが早まったり、遅れたりする可能性がある。それを防ぎ被験者にとって最も違和感なく自然にブレーキを踏んでもらうことでより正確なブレーキタイミングを測定する。ブレーキタイミングは前章で述べたブレーキランプ検出方法で検出する。このとき、ステレオ映像がフレームごとに障害物までの距離と対応していれば、ブレーキ位置を知ることができる。呈示する遠赤外線ステレオ映像の作成法を次に示す。

5.3 3Dモニタ呈示映像の作成手順

3Dモニタで呈示させるステレオ映像として、ステレオカメラの基線長、基準面距離および車両速度を変えた映像を作成する。このうち、基準面距離を変えた映像は画像のアフィン変換で作成でき、車両速度を変えた映像は動画像のサンプリングと線形補間により作成できる。基線長の変化は、視点が変わると対象の隠れや隠れていた対象の出現が生じ、これらは画像から計算により作成することはできない。したがって、基線長を変えた映像は実際に車両を走行させて撮影し、この映像から基準面距離や車両速度を変えた映像を算出する。

5.4 遠赤外線ステレオ映像の撮影

3Dモニタに呈示させる映像は、実車を走行させて撮影する。遠赤外線カメラを2台、図5.1のカメラ固定台の両端に固定し、ステレオカメラを構成する。この固定台はスライド式に両端間の距離、すなわちステレオ基線長を伸縮させることができる。この固定台を車両屋根に取り付けられたキャリヤに固定する。

道路上に障害物を起点に巻尺を敷設しておく。走行中にビデオカメラで巻尺の目盛を撮影し、遠赤外線ステレオ映像と共にキャプチャボードを介してPCに内蔵されているハードディスクドライブに記録する。この記録から、遠赤外線ステレオ映像のフレームが撮影されたときの障害物までの距離は、巻尺の目盛から読み取ることができる。

図4.2の上段に遠赤外線ステレオカメラから撮影された左右の画像を示す。下段右に同時刻に撮影された巻尺の目盛も示されている。



図 5.1: ステレオカメラ固定台

5.5 カメラ較正

ステレオカメラは光軸が基線に対し直交し、それぞれの光軸が互いに平行になるように設定する。しかし、手動による設定ではこの条件を厳密に満たすのは難しい。そこで、設定したカメラを較正し、ステレオカメラ映像の平行化を計算により行う。

カメラ較正を OpenCV で行う。OpenCV で実装されているカメラ較正法では Zhang の手法 [21] をもとにカメラ較正を行っている。この手法では、サイズのわかっているチェッカーボードをカメラに呈示し、そのコーナーポイント座標から較正を行っている。遠赤外線カメラでは、ボードの温度が一定ならばパターンの白黒を判別することができないため、白熱電球を使用することにした [22]。

スチレンボードに、25cm 間隔で縦 3 行横 6 列に豆電球を埋め込み較正ボードを作成した。図 5.2 に左右の遠赤外線カメラで撮影した較正ボードを示す。発熱した豆電球が現れている。この豆電球の位置から、OpenCV に収録されている平行化手法 [23] により光軸が平行なステレオカメラ映像を得る。



図 5.2: 左右遠赤外線カメラからの校正ボード

5.6 基準面距離

平行化されたステレオカメラ映像では，障害物が近付くと視差が大きくなり立体視が難しくなる．これを避けるためには，ステレオカメラの向きを多少内側に傾けるとよい．

輻輳点，輻輳角，基準面距離の関係を表す概念図を図 5.3 に示す．平行化されたステレオカメラの光軸を，それぞれ内側に傾ければ光軸は交わる．交わった位置 p を輻輳点と呼ぶ，2つの光軸のなす角 α を輻輳角と呼ぶ．また，輻輳点と基線との距離 l が基準面距離である．輻輳点よりも手前，カメラ側にある物体は3D モニタから飛び出して見え，輻輳点よりも奥にある物体は3D モニタの奥に遠ざかって見える．したがって，基準面距離は奥行き感に関わる要因と考えられる．

基準面距離 l ，輻輳角 α ，基線長 d とすれば， $\tan(\alpha/2) = d/2l$ である．したがって， $\alpha/2 = \tan^{-1}(d/2l)$ となる．すなわち，基準面距離を l とするステレオカメラは，平行ステレオカメラを内側に $\alpha/2$ 傾けたカメラである．カメラ座標系の回転と再投影を行うことにより，輻輳したステレオカメラの映像は平行ステレオカメラ映像のアフィン変換で得られる．

図 5.4 に呈示用ステレオ画像の一コマをアナグリフ画像で示す．画像周囲の黒い領域は元画像の修正の跡である．

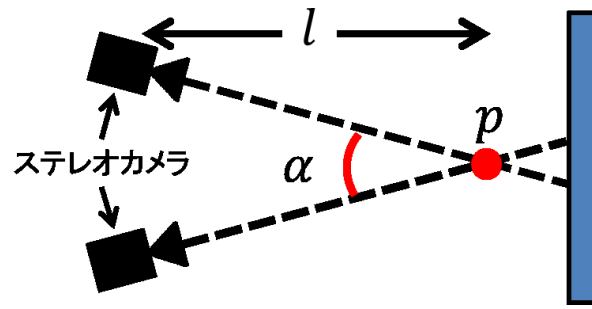


図 5.3: 輻輳点, 輻輳角, 基準面距離の関係



図 5.4: アナグリフで表された走行環境のステレオ画像

5.7 定速度映像の作成

実車を走行させて撮影した映像には、車両走行時のアクセルとブレーキの効果が含まれている。そのため速度調整を施さない映像をそのまま使用すると被験者にブレーキを踏むべきタイミング知らせていることになる。これではブレーキを踏むタイミングを比較する意味がなくなるので呈示映像には使えない。また、異なる走行速度の映像もあったほうがよい。そこで、撮影した映像から与えられた速度の映像を作成することにする。

遠赤外線ステレオ映像の撮影と同時に、路面に敷設された巻尺映像も撮影されているので、フレームごとに障害物までの距離を得ることができる。図 5.5 は、撮影された映像からリサンプリングにより呈示映像を作成するときの説明図である。横軸が障害物までの距離であり、上向きの短い線分が撮影されたフレームの位置を表す。この図では速度が速いと線分の密度は疎になり、逆に遅いと密になっている。

与えられた速度に対し、リサンプリング位置が下向きの短い線分で示されている。速度が一定ならば、この線分の間隔は等間隔である。例えば、時速 40km で走る映像を作成したい場合、1 フレーム間の走行間隔は 0.37m である。呈示すべき画像を下向きの線分位置 r とすると、呈示すべき画像は、その前後に撮影された画像から線形補間により生成できる。位置 r に対し、その前後に撮影された位置 p と q があつたとする。 p での画像の画素値を I_p 、 q での画像の画素値を I_q とする。このとき、 r での画像の画素値 I_r は線形補間、

$$I_r = \frac{q-r}{q-p} I_p + \frac{r-p}{q-p} I_q \quad (5.1)$$

で与えられる。

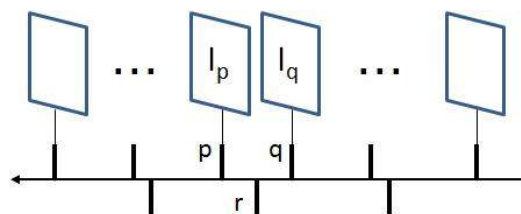


図 5.5: リサンプリングによる呈示映像の作成

第6章 実験と評価

6.1 はじめに

ステレオカメラの配置条件を段階的実験で求める。まず、実験に使用する機材と実験環境について述べておく。ついで、被験者の中から代表的な被験者を対象に、実車を走行させ実ブレーキ位置を測定する。一方、ドライビングシミュレータを使用して、車両速度、ステレオカメラ間の基線長、被験者からモニタまでの視距離、ステレオカメラの基準面距離を変えてブレーキ位置を測定する。両者のブレーキ位置の差が小さなステレオカメラの配置要件を求めそれを仮説とする。この仮説を残りの被験者により検証する。

6.2 実車走行環境

約 150m の直線道路を車両の走行環境とした。図 6.1 上に走行道路を示す。道路の終点は鉄門で閉ざされており、その後ろに人物を立たせ障害物と見なした。図 6.1 下に障害物を示す。この鉄門から 100m 離れた位置を実験用車両の発車位置とした。この位置からはすでに障害物（人物）は見えている。

鉄門を起点に巻尺を敷設し、車両は巻尺を跨いで走行する。この道路は僅かながら下り勾配である。そのため、アクセルを強く踏み込まなくても一定速度で走行することができる。



図 6.1: 走行道路 (上) と障害物 (下)

6.3 実験用車両と使用機材

表 6.1 に本実験で使用した車両の車種が示されている。使用した車両には、遠赤外線ステレオカメラ、巻尺撮影用ビデオカメラ (Victor GZ-HD7-S) と巻尺照射用 LED 光源、ブレーキランプ光検出器、PC とモニタ、およびポータブル電源 (高砂製作所, PP-2501A×2 台) が搭載されている。このポータブル電源は、大容量リチウムイオン電池内蔵で、全測定機器に AC100V 電源を最長 2 時間供給することができる。なお、巻尺撮影時のビデオカメラのシャッター速度は 1/4,000 に設定し、1 台 485 ルーメンの LED 照明 3 台を巻尺に照射した。

遠赤外線カメラは、FLIR Systems 社製の TAU 320 9MM を使用した。このカメラは f 値 1.25 で 9mm の短焦点広角レンズが備わり、320 × 240 画素の NTSC ビデオ映像を出力する。1 画素あたり 25 μ m であるので、横 320 画素では 8mm の受光幅となり、水平画角は 48° となる。映像信号はキャプチャボード (マイクロビジョン, MV-34) を介して PC にビデオレートで記録される。2 台のカメラは、外部同期端子を互いに接続することにより、一方をマスタ、他方をスレーブとして、映像信号を互いに同期させることができる。これにより、完全に同期したステレオ画像対が得られる。

キャプチャボードは最大 4 チャンネルの NTSC 映像を同時にキャプチャ可能で、図 4.2 に示すように赤外線ステレオ映像の他に巻尺のビデオ映像も PC (Windows XP, Intel core i7 CPU, 2.8GHz, 3.49GB RAM) のモニタ上に表示可能である。このモニタ上には、ブレーキ検出ウインドウも表示されている。これらの表示は画面キャプチャソフト Bandicam により、ビデオレートで PC に内蔵されているハードディスクドライブに記録される。

表 6.1: 実ブレーキ測定実験

被験者	年齢	運転歴	視力	車種
TE	25	6	矯正無 1.0	マツダ AZ ワゴン
MY	64	38	矯正有 1.0	日産 セレナ
YE	23	4	矯正有 1.0	日産 マーチ

6.4 ドライビングシミュレータの設定

本研究に使用したドライビングシミュレータを図 6.2 に示す。実験用車両を車庫内に停車させ、車両の前方に 3 D モニタ (JVC, GD-463D10) を設置させたものをドライビングシミュレータとした。

利用した実験用車両は被験者ごとに画面サイズは、縦 57.3cm× 横 104.3cm である。呈示されたステレオ映像から円偏光メガネを通して距離感を得る。図 6.3 に運転席から見える 3 D モニタを示す。

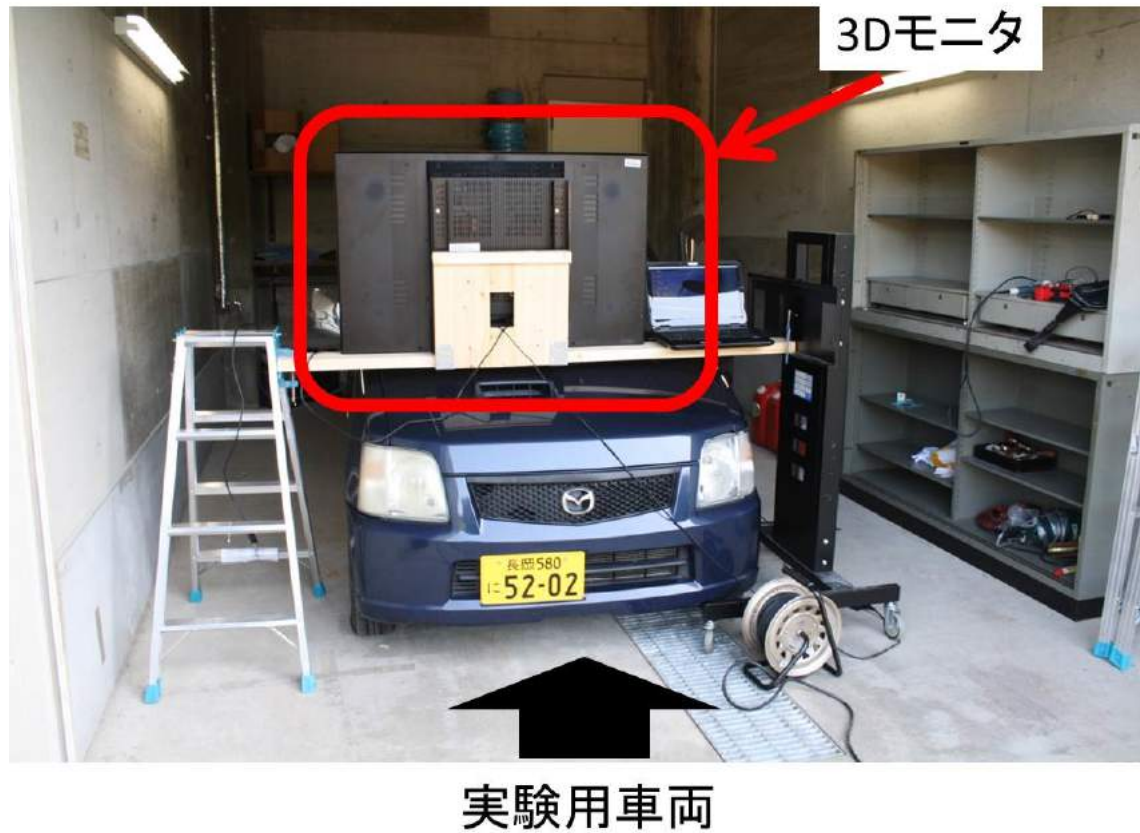


図 6.2: ドライビングシミュレータ



図 6.3: 運転席から見た 3D モニタ

6.5 ステレオ視制御則仮説の生成

被験者のうち代表者に対し、ステレオ基線長、基準面距離、運転者から3Dモニタまでの距離、車両速度の条件が異なる135通りの遠赤外線ステレオ映像を呈示し実験を行った。そのとき、呈示される遠赤外線ステレオ映像に目を慣らすために、納得のゆくまでブレーキを踏む練習を繰り返した後、それぞれ3回測定しブレーキ位置の平均値と分散値を求めた。この平均値をブレーキ位置とする。3Dモニタを見たときのブレーキ位置が実ブレーキ位置と一致するようなステレオカメラと3Dモニタの配置パターンを探索する。得られた配置パターンを仮説とする。

表 6.2 は、測定結果を時速 20km, 30km, 40km に分けて示している。表の第2列は基線長、第3列は3Dモニタの位置、第4列は基準面距離、第5列は走行速度、第6列はドライビングシミュレータからのブレーキ位置である。第7列は実ブレーキとの差であり、正值はオーバーランを、負値は実ブレーキよりもブレーキタイミングが早すぎることを意味している。第1列は配置パターン番号とし、時速ごとに分けられた表中の同じ番号は、ステレオカメラと3Dモニタが同じ配置であることを意味している。

配置パラメータは、ステレオ基線長を、50cm から 5cm キザミに 70cm まで 5通り、基準面距離は 40m, 70m, 100m の 3通り、運転者と3Dモニタ間の視距離は、1.2m, 1.6m, 2.0m の 3通り、車両速度は時速 20km, 30km, 40km の 3通りとした。実際に撮影したステレオ映像は、基線長を変えた5通りのみで、車両速度を時速 10km/h で撮影した。

低速走行は短い移動間隔で映像が撮れるため、式 (5.1) では $I_p \simeq I_q$ となり、補間により計算された画像は撮影された画像に近くなる。5つの走行映像から作成した呈示映像は、 $5 \times 3 \times 3 = 45$ 通りである。これらを3Dモニタの3通りの設置位置ごとに呈示した。それぞれ3回の測定実験を行い、それらの平均値をブレーキ位置とした。

ここでは、両ブレーキ位置の差が一定の許容範囲内であれば、ブレーキ位置が一致していると見なす。許容範囲を 1.5m とし、この許容範囲内の車両速度とステレオ配置のパターンを抜き出した結果、全 $45 \times 3 = 135$ 通りの配置のうち、1.5m の許容範囲を満たす配置は表 6.3 に示す 15 通りであった。

表 6.3 の結果を見ると，車両速度と基線長のみに関連があるとわかる．ちなみに相関をとると表 6.4 に示すように高い値が得られた．この結果により，他の 2 つのパラメータ，視距離と基準面距離は，車両速度との関連はないので，可変にする必要はなく適当な値に固定しておけばよい．

3D モニタ間の視距離については，モニタの高さの 3 倍程度，視差は 1 度以内が適切とされている [11]．使用したモニタの高さは 57.3cm であるので，適正視距離は 1.6m となる．基準面距離は 40m，70m，100m のいずれでも良い．しかし，基線長の増加に伴い 40m では視差角が大きくなりすぎ眼精疲労などの不快感を起こす可能性があり，100m では逆に視差角が小さく距離感が鈍くなる可能性がある．したがって，今回は視距離を 1.6m，基準面距離を 70m に固定する．

図 6.4 は被験者の代表者 TE について視距離を 1.6m，基準面距離を 70m に固定し，ステレオカメラ間の基線長ごとに車両速度に対するブレーキ位置の平均値と分散値，および実ブレーキ位置を示している．グラフの縦軸が車両から障害物までの距離，横軸が各走行速度を表している．青いひし形のマーカーが各速度における被験者の実ブレーキ位置，それに沿って引かれているのが実ブレーキ位置の近似直線であり，赤い正方形のマーカーが模擬環境におけるブレーキ位置を表している．グラフから，車両速度 20km/h では基線長 50cm，30km/h では 55cm と 60cm，40km/h では 60cm と 65cm のときが実ブレーキ位置に近い位置でブレーキを踏んでいることがわかる．これにより基線長は車両速度に合わせて伸縮させる必要があると言える．

表 6.2: 3 Dモニタからのブレーキ位置

#	BL(cm)	DF3(m)	CD(m)	RS(km/h)	D(m)	DF(m)
1	50	1.2	40	20	34.92	-2.3
2	50	1.2	70	20	35.09	-2.47
3	50	1.2	100	20	34.73	-2.11
4	50	1.6	40	20	32.63	-0.01
5	50	1.6	70	20	35.93	-3.31
6	50	1.6	100	20	33.09	-0.47
7	50	2.0	40	20	33.49	-0.87
8	50	2.0	70	20	34.49	-1.87
9	50	2.0	100	20	33.23	-0.61
10	55	1.2	40	20	50.27	-17.65
11	55	1.2	70	20	50.63	-18.01
12	55	1.2	100	20	46.55	-13.93
13	55	1.6	40	20	50.76	-18.14
14	55	1.6	70	20	51.45	-18.83
15	55	1.6	100	20	47.45	-14.83
16	55	2.0	40	20	42.27	-9.65
17	55	2.0	70	20	47.19	-14.57
18	55	2.0	100	20	45.52	-12.9
19	60	1.2	40	20	47.53	-14.91
20	60	1.2	70	20	49.22	-16.6
21	60	1.2	100	20	50.20	-17.58
22	60	1.6	40	20	55.20	-22.58
23	60	1.6	70	20	53.43	-20.81
24	60	1.6	100	20	53.81	-21.19
25	60	2.0	40	20	54.94	-22.32
26	60	2.0	70	20	51.03	-18.41
27	60	2.0	100	20	45.69	-13.1
28	65	1.2	40	20	44.18	-11.56
29	65	1.2	70	20	46.28	-13.66
30	65	1.2	100	20	43.68	-11.06
31	65	1.6	40	20	47.86	-15.24
32	65	1.6	70	20	48.19	-15.57
33	65	1.6	100	20	41.04	-8.42
34	65	2.0	40	20	41.26	-8.64
35	65	2.0	70	20	40.66	-8.04
36	65	2.0	100	20	42.09	-9.47
37	70	1.2	40	20	23.02	9.6
38	70	1.2	70	20	22.20	10.42
39	70	1.2	100	20	24.59	8.03
40	70	1.6	40	20	22.63	9.99
41	70	1.6	70	20	21.42	11.2
42	70	1.6	100	20	23.77	8.85
43	70	2.0	40	20	21.80	10.82
44	70	2.0	70	20	18.89	13.73
45	70	2.0	100	20	19.33	13.29

#	BL(cm)	DF3(m)	CD(m)	RS(km/h)	D(m)	DF(m)
1	50	1.2	40	30	26.20	18.2
2	50	1.2	70	30	28.23	16.17
3	50	1.2	100	30	29.00	15.4
4	50	1.6	40	30	31.66	12.74
5	50	1.6	70	30	28.70	15.7
6	50	1.6	100	30	24.31	20.1
7	50	2.0	40	30	29.49	14.91
8	50	2.0	70	30	27.91	16.5
9	50	2.0	100	30	23.53	20.87
10	55	1.2	40	30	41.75	2.65
11	55	1.2	70	30	41.93	2.47
12	55	1.2	100	30	38.74	5.66
13	55	1.6	40	30	42.57	1.83
14	55	1.6	70	30	39.84	4.56
15	55	1.6	100	30	41.89	2.51
16	55	2.0	40	30	35.50	8.9
17	55	2.0	70	30	34.76	9.64
18	55	2.0	100	30	42.18	2.26
19	60	1.2	40	30	46.36	-1.96
20	60	1.2	70	30	42.74	1.66
21	60	1.2	100	30	45.10	-0.7
22	60	1.6	40	30	46.79	-2.39
23	60	1.6	70	30	43.01	1.39
24	60	1.6	100	30	43.51	0.89
25	60	2.0	40	30	44.34	0.06
26	60	2.0	70	30	40.92	3.48
27	60	2.0	100	30	38.57	5.83
28	65	1.2	40	30	62.43	-18.03
29	65	1.2	70	30	65.49	-21.09
30	65	1.2	100	30	63.80	-19.4
31	65	1.6	40	30	57.43	-13.03
32	65	1.6	70	30	65.82	-21.42
33	65	1.6	100	30	61.06	-16.66
34	65	2.0	40	30	55.60	-11.2
35	65	2.0	70	30	64.01	-19.61
36	65	2.0	100	30	55.17	-10.77
37	70	1.2	40	30	24.09	20.31
38	70	1.2	70	30	19.02	25.38
39	70	1.2	100	30	18.86	25.54
40	70	1.6	40	30	20.70	23.7
41	70	1.6	70	30	19.10	25.3
42	70	1.6	100	30	21.66	22.74
43	70	2.0	40	30	19.82	24.58
44	70	2.0	70	30	15.66	28.74
45	70	2.0	100	30	17.26	27.14

#	BL(cm)	DF3(m)	CD(m)	RS(km/h)	D(m)	DF(m)
1	50	1.2	40	40	32.18	24
2	50	1.2	70	40	38.89	17.3
3	50	1.2	100	40	35.50	20.68
4	50	1.6	40	40	36.72	19.46
5	50	1.6	70	40	38.66	17.52
6	50	1.6	100	40	37.56	18.62
7	50	2.0	40	40	35.01	21.17
8	50	2.0	70	40	35.01	21.17
9	50	2.0	100	40	31.04	25.14
10	55	1.2	40	40	52.23	3.95
11	55	1.2	70	40	48.87	7.31
12	55	1.2	100	40	47.55	8.63
13	55	1.6	40	40	61.10	-4.92
14	55	1.6	70	40	48.39	7.79
15	55	1.6	100	40	50.31	5.87
16	55	2.0	40	40	47.67	8.51
17	55	2.0	70	40	47.91	8.27
18	55	2.0	100	40	47.55	8.63
19	60	1.2	40	40	58.06	-1.88
20	60	1.2	70	40	54.85	1.33
21	60	1.2	100	40	57.31	-1.13
22	60	1.6	40	40	56.30	-0.12
23	60	1.6	70	40	60.11	-3.93
24	60	1.6	100	40	54.83	1.35
25	60	2.0	40	40	54.74	1.44
26	60	2.0	70	40	55.99	0.19
27	60	2.0	100	40	54.50	1.68
28	65	1.2	40	40	59.09	-2.91
29	65	1.2	70	40	59.43	-3.25
30	65	1.2	100	40	58.25	-2.07
31	65	1.6	40	40	62.38	-6.2
32	65	1.6	70	40	61.24	-5.06
33	65	1.6	100	40	62.28	-6.1
34	65	2.0	40	40	50.28	5.9
35	65	2.0	70	40	55.23	0.95
36	65	2.0	100	40	54.68	1.5
37	70	1.2	40	40	43.15	13.03
38	70	1.2	70	40	33.87	22.31
39	70	1.2	100	40	27.27	28.91
40	70	1.6	40	40	25.35	30.83
41	70	1.6	70	40	36.87	19.31
42	70	1.6	100	40	34.35	21.83
43	70	2.0	40	40	21.47	34.71
44	70	2.0	70	40	30.39	25.79
45	70	2.0	100	40	25.47	30.71

表 6.3: 許容範囲内の測定結果

#	BL(cm)	DF3(m)	CD(m)	RS(km/h)	D(m)	DF(m)
4	50	1.6	40	20	32.63	-0.01
6	50	1.6	100	20	33.09	-0.47
7	50	2.0	40	20	33.49	-0.87
9	50	2.0	100	20	33.23	-0.61
21	60	1.2	100	30	45.10	-0.7
23	60	1.6	70	30	43.01	1.39
24	60	1.6	100	30	43.51	0.89
25	60	2.0	40	30	44.34	0.06
20	60	1.2	70	40	54.85	1.33
21	60	1.2	100	40	57.31	-1.13
22	60	1.6	40	40	56.30	-0.12
24	60	1.6	100	40	54.83	1.35
25	60	2.0	40	40	54.74	1.44
26	60	2.0	70	40	55.99	0.19
35	65	2.0	70	40	55.23	0.95

表 6.4: 変数間の相関係数

RS(km/h)	1			
BL(cm)	0.874	1		
DF3(m)	-0.1	-0.042	1	
CD(m)	0.044	0.129	-0.34	1
	RS(km/h)	BL(cm)	DF3(m)	CD(m)

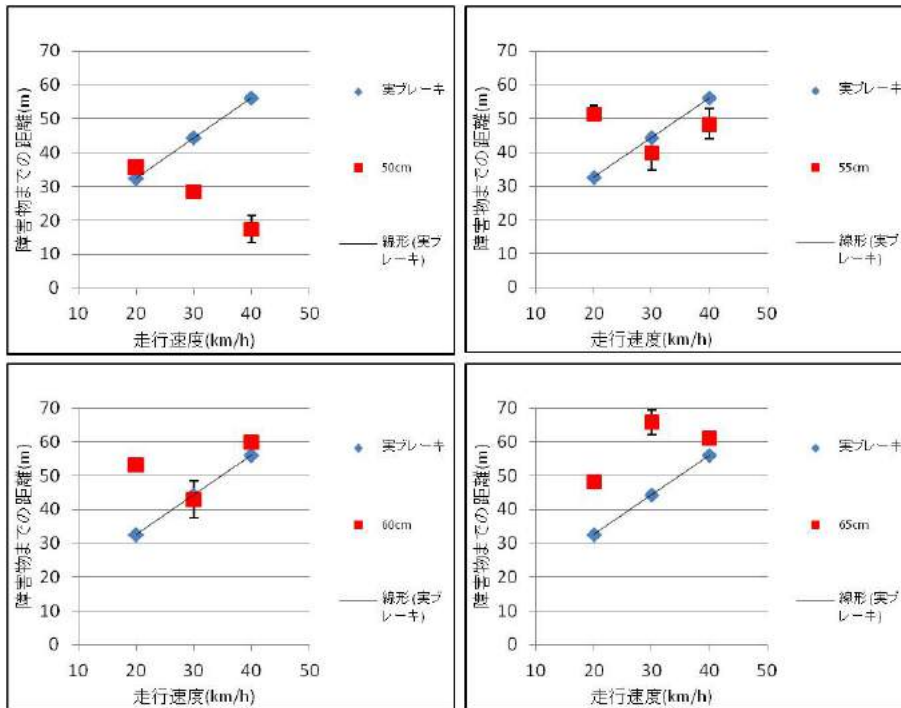


図 6.4: 被験者 TE のブレーキタイミング

6.6 3D映像視聴時における不快感

仮説生成実験において、基線長70cmの映像を見た場合にすべてオーバーランし、許容範囲内でブレーキを踏めたデータは一つもないという結果が得られた。また被験者は実験後に強い眼精疲労を訴えていた。

ガイドライン [11] によれば、快適な立体視をするには視差角は1度以内が推奨されている。この範囲を超えてしまうと不快領域に陥り、視聴者は不快感を覚えるようになる。不快感の自覚症状としては、眼精疲労、頭痛、めまいなどが引き起こされる。

眼精疲労などの不快感に関する客観的測定法は、視覚誘発電位 [25] や視機能（調節機能、輻輳機能） [26] を利用した例があるが標準化された方法は存在しない。当該被験者においてドライビングシミュレータによる実験中にこれらのような客観的な測定は行っていない。これはあえて3Dモニタの前に測定器などを置かないことで被験者のブレーキペダルを踏む動作に影響をなるべくあたえず、自然な形で遠赤外線ステレオ映像を見てもらうためである。オーバーランは当該被験者の融像範囲を超えていた可能性があり、正しい距離感を得られなかったと推定される。したがって、基線長70cmの実験結果は除外した。

6.7 近接物体問題

基線長を瞳孔間隔の 10 倍程度に拡大することに伴い、20m 以内の物体に対し視差が大きくなりすぎる可能性がある。しかし、ドライビングシミュレータにおいてブレーキを踏む位置は実ブレーキ位置の近辺であり、それは 30m 以遠であった。したがって、ブレーキを踏むまでに視差の拡大により不快領域に陥り、眼精疲労や頭痛といった症状を引き起こされることはない。

6.8 仮説の検証のための本実験

仮説生成実験の結果より、3D モニタを見て踏んだブレーキ位置が実ブレーキ位置と一致するためのステレオカメラ配置は、モニタ位置と基準面距離を固定し、車両速度に応じて基線長を伸縮させればよい、ということがここまでの結論である。しかし、代表者による結果であるので、この結論を仮説とし、この仮説を残りの被験者で検証する。

残りの被験者について、それぞれ実車による走行実験を行い実ブレーキ位置を測定した。ドライビングシミュレータでは、視距離を 1.6m、基準面距離を 70m に固定し、車両速度ごとに基線長を 50cm から 65cm まで 5cm おきに変えてブレーキ位置を測定した。予備実験では 135 通りの測定であったのに対し、本実験では 4(基線長) × 3(車両速度) = 12 通りの測定である。

図 6.5, 6.6 はそれぞれ被験者 MY と YE について、ステレオカメラ間の基線長ごとに車両速度に対するブレーキ位置の平均値と分散値、および実ブレーキ位置を示している。グラフの縦軸が車両から障害物までの距離、横軸が各走行速度を表している。被験者 MY は、車両速度 20km/h では基線長 50cm、30km/h では 55cm、40km/h では 60cm のときが実ブレーキとの差が最も小さくなっている。被験者 YE は、速度 20km/h では基線長 50cm、30km/h では 55cm と 60cm、40km/h では 60cm のときが実ブレーキとの差が最も小さくなっている。以上により、車両速度に合わせて基線長を伸縮させることにより、実環境での距離感と同じ距離感を 3D モニタから得られることが明らかになった。

これまで、ステレオカメラと 3D モニタの配置パラメータは、快適な視差 [11, 24, 14, 15] や大きな立体効果 [12] を得るため、あるいはスケールの大きな対象を立

体的に把握する [13] ために定められてきたが、本論文のように距離感を客観的に評価しようとする試みはなかった。一旦定められた配置パラメータは、無人飛行機の操縦 [14, 15] を含めて多くの場合固定されている。不快な視差を避けるために可変にする例 [24] はあるが、CG 映像作成のための仮想カメラ用であり、実世界での試みではない。

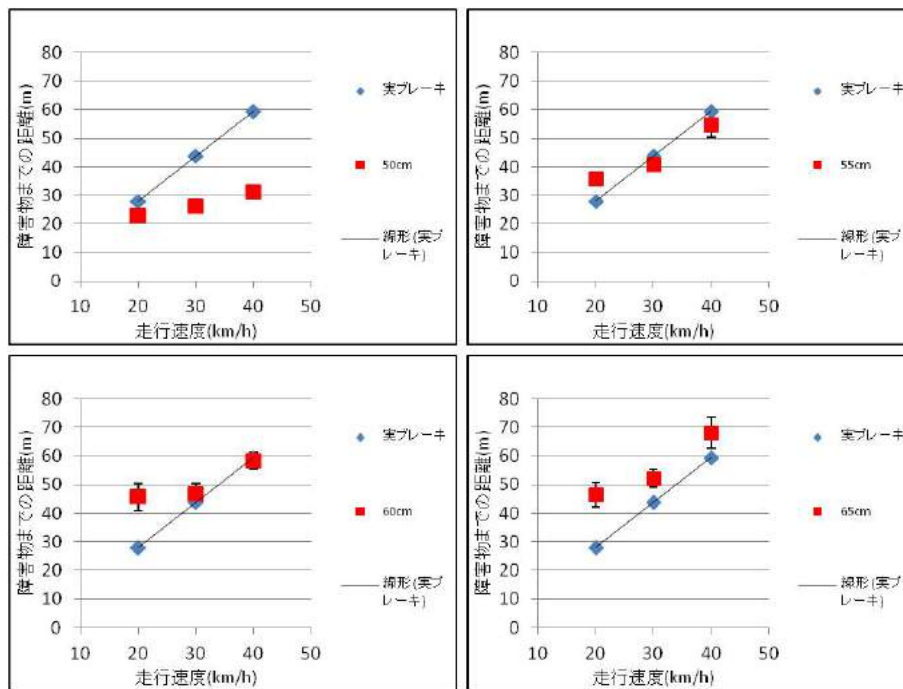


図 6.5: 被験者 MY のブレーキタイミング

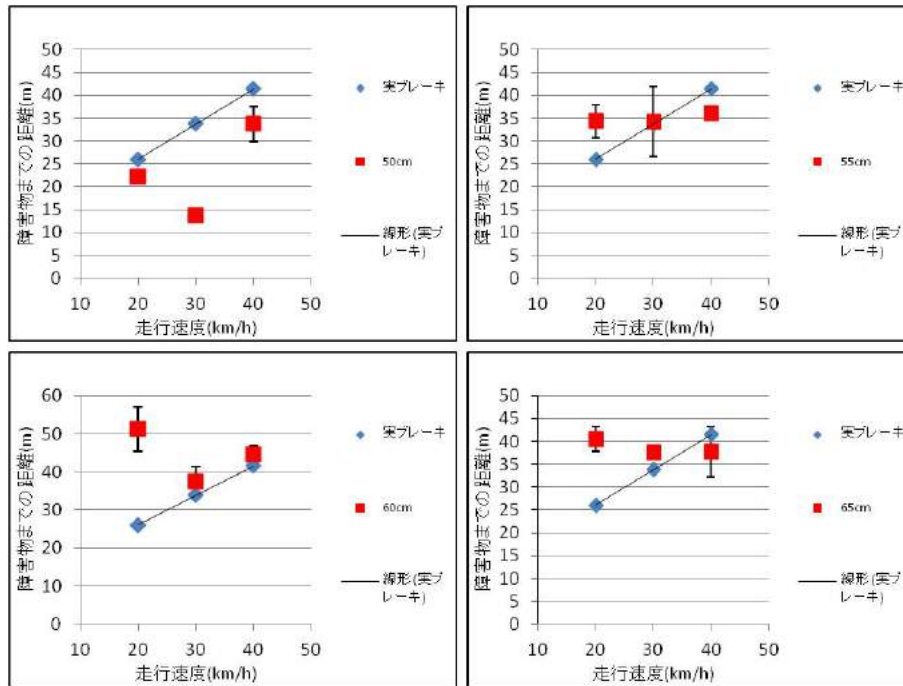


図 6.6: 被験者 YE のブレーキタイミング

6.9 単眼映像からのブレーキ位置

最後に、本研究におけるステレオ映像の有用性について確認しておく。人は一枚のモニタ映像からでも距離感を得ることができる。遠赤外線ステレオ映像のうち一方の映像を 3D モニタの左右映像に同時に提示し、ブレーキ位置を測定した。モニタの位置を 1.2m, 1.6m, 2.0m の 3 通り、車両速度を 20km, 30km, 40km の 3 通りに変えて、運転模擬環境によりブレーキを踏み始めた位置をそれぞれ 3 回測定し平均した。代表者の結果を図 6.7 に示す。青いひし形のマーカーが各速度における被験者の実ブレーキ位置、それに沿って引かれているのが実ブレーキ位置の近似直線であり、赤い正方形のマーカーが模擬環境におけるブレーキ位置を表している。時速 20km では実ブレーキ位置と模擬環境下でのブレーキ位置はほぼ一致しているが、それ以外では模擬環境下でのブレーキ位置は実ブレーキ位置を大きくオーバーランしている。これにより、1つの遠赤外線カメラからの映像だけでは、安全な位置でブレーキが踏めないことが確認された。

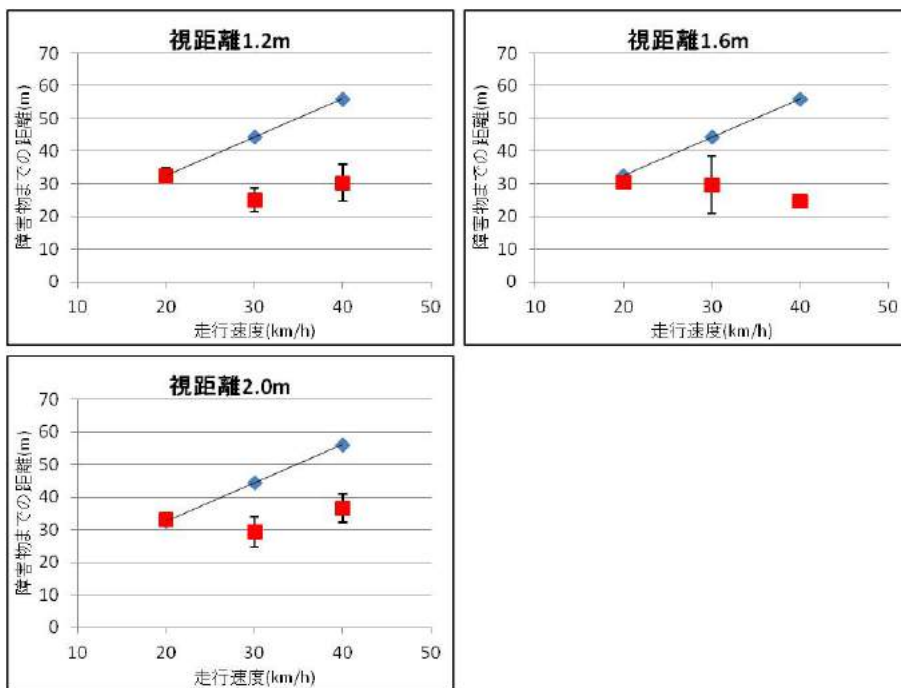


図 6.7: 単眼映像からのブレーキ位置

第7章 結論

運転環境を直接を見たときの距離感と3D モニタ越しに運転環境を見たときの距離感を比較し、ステレオ配置の変化によって距離感に及ぼす影響について検討を行った。道路上の障害物に向けて車両を走行させ、実ブレーキ位置と遠赤外線ステレオカメラからの映像を3D モニタで見たときのブレーキ位置を比較した。両者が一致するようなステレオカメラ配置パラメータを求めた。その結果、基準面距離と3D モニタまでの視距離を一定に保ち、基線長を車両速度に応じて伸縮させることにより、視差が不快領域に陥らず、被験者が眼精疲労や頭痛などの不快感を感じることなく、正しいタイミングでブレーキが踏めることが明らかになった。

本研究で得られた結果は車両に留まらず、移動体一般の夜間での運転方法に貢献ができる。たとえばカメラ付きのドローンの操縦システムに応用すれば、もし原子力発電所などの人が立ち入ることが難しい場所で事故が発生しても、安全に事故現場で飛行させることができると考えられる。

また、ドローンの操縦システムに組み込んで実用化することを考えるならば、ヘッドマウントディスプレイの利用の方が現実的と思われる。本論文の結論をヘッドマウントディスプレイを用いた実験を行い、確認する必要がある。ただしヘッドマウントディスプレイは、映像酔いや乗り物酔いなどの新たな問題が起こる可能性がある。

一方、ステレオカメラの基線長を車両速度に応じて変更できる方法も検討する。カメラや鏡を機械的に可動にする方法や固定された多眼カメラから可変基線長映像をソフトウェアで作成する方法も検討する。本研究の目標は災害救助車両用の運転システムであるが、本論文では災害現場ではなく通常の走行環境を想定して実験を行った。災害現場では、路面の傾きの変化によりカメラからの映像も変化することが想定されるが、実車を停車させたドライビングシミュレータでは対処できていない。カメラの傾きを検知し傾いた映像を補償する方法も開発する必要がある。

参考文献

- [1] T. Gandhi, M. M. Trivedi: “Pedestrian Collision Avoidance Systems: A Survey of Computer Vision Based Recent Studies”, Proc. the IEEE ITSC 2006, pp.976–981, (2006)
- [2] D. Geronimo, A. M. Lopez, A. D. Sappa, T. Graf: “Survey of Pedestrian Detection for Advanced Driver Assistance Systems”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **32** (7), pp.1239–1258, (2010)
- [3] A. Broggi, A. Fascioli, M. Carletti, T. Graf, and M. Meinecke: “A Multi-resolution Approach for Infrared Vision-based Pedestrian Detection ”, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, pp.7–12, (2004)
- [4] T. Tsuji, H. Hattori, M. Watanabe, and N. Nagaoka, “Development of Night-Vision System ”, IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, **3** (3), pp.203–209, (2002)
- [5] X. Liu, K. Fujimura: “Pedestrian Detection Using Stereo Night Vision”, IEEE Trans. Vehicular Tech., **53** (6), pp.1657-1665, (2004)
- [6] U. Scheunert, H. Cramer, B. Fardi, G. Wanielik: “Multi-Sensor based Tracking of Pedestrians: A Survey of Suitable Movement Models”, IEEE Intelligent Vehicle Symposium, pp.774–778, (2004)
- [7] P. Marchal, M. Dehesa, D. Gavrilu, M.-M. Meinecke, N. Skellern, and R. Viguerra: “SAVE-U. Final Report”, technical report, Information Soc. Technology Programme of the EU, (2005)

- [8] J. E. Cutting, P. M. Vishton: “Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth”, In W. Epstein, S. Rogers (eds.) Handbook of perception and cognition, Vol 5; Perception of space and motion, pp.69–117, Academic Press, (1995)
- [9] 長田昌次郎: “視覚の奥行距離情報とその奥行感度”, テレビ誌, **31** (8), pp.649–655, (1977)
- [10] 水科晴樹: “基礎 2:3D 映像における疲労を避けるには”, 映情学誌, **65** (3), pp.297–301, (2011)
- [11] 3D コンソーシアム安全ガイドライン部会編: “人に優しい 3D 普及のための 3D 安全ガイドライン”, 3D コンソーシアム, (2010)
- [12] 和田学明: “応用 4 :二眼式 3D カメラ”, 映情学誌, **65** (8), pp.1167–1172, (2011)
- [13] 大口孝之, 川島基展, 羽倉弘之, 三田邦彦, 宮島英豪: “立体視 3DCG アニメーション制作指導者用教材”, CG-ATRS 協会, (2011)
- [14] S. C. de Vries, P. Padmos: “Steering a simulated unmanned aerial vehicle using a head-slaved camera and HMD”, Proc. SPIE 3058, pp.24–33, (1997)
- [15] S. C. de Vries, P. Padmos: “Steering a simulated unmanned aerial vehicle using a head-slaved camera and HMD: Effects of HMD quality, visible vehicle references and extended stereos cueing”, Proc. SPIE 3362, pp.80–91, (1998)
- [16] J. P. McIntire, P. R. Havig, E. E. Geiselman: “Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review”, Displays, **35**. pp.18–26, (2014)
- [17] 鈴木紀子, 安藤広志: “立体画像の見やすい視距離と画面サイズに関する一検討”, 映情学誌, **67** (1), pp.J16–J23, (2013)
- [18] 奥迫伸一, 坂根茂幸: “レーザレンジファインダを用いた移動ロボットによる人の追跡”, 日本ロボット学会誌, **24** (5), pp.605-613, (2006)

- [19] 志磨健, 魔野春樹, 掛川晋司, 門司竜彦: “自動車向け画像認識技術とステレオカメラによる距離計測”, 光学 **41**(5), pp.287-291, (2012)
- [20] 赤羽弘和, 畠中聡志: “複数のビデオカメラによる車両走行軌跡の連続観測”, 第2回 ITS シンポジウム, (2003)
- [21] Z. Zhang: “A flexible new technique for camera calibration”. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22** (11), pp.1330-1334, (2000)
- [22] 橋本謙太郎, 高松淳, 小川原光一, 池内克史: “赤外線画像のステレオ処理に基づく手の形状推定”, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1283-1284, (2001)
- [23] J. Y. Bouguet, “Camera Calibration Toolbox for Matlab”, <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj>, (2010)
- [24] T. Oskam, A. Hornung, H. Bowles, K. Mitchell, M. Gross: “OSCAM - Optimized stereoscopic camera control for interactive 3D”, ACM Trans. Graphics, **30** (6), Article 189, (2011)
- [25] 江本正喜, 矢野 澄男: “立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係”, 映像情報メディア学会誌 **56**(3), pp.447-454, (2002)
- [26] 矢野 澄男, 江本正喜, 三橋哲雄: “両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因”, 映像情報メディア学会誌 **57**(9), pp.1187-1193, (2003)

発表論文

論文

水津俊介, 遠藤孝彬, 山本正信 :

“遠方両眼立体視による適切な車両ブレーキタイミングのための遠赤外線ハイパーステレオカメラ配置”,

映像情報メディア学会, 平成 28 年 7 月 25 日発行 オンラインジャーナル Vol. 70, No. 8, pp. J191~J199 (2016)

国際会議

Shunsuke Suidu, Takaaki Endo, Masanobu Yamamoto :

“ Development of 3D night driving assistance system for disaster rescue vehicle”, ICAI 2015 , T108-01 (2015)

全国大会

水津俊介, 遠藤孝彬, 山本正信 :

“3D テレビと遠赤外線暗視映像による夜間運転支援方式の検討”, 電子情報通信学会総合大会, Mar,19, 2014, A-17-2, (2014)

水津俊介, 遠藤孝彬, 山本正信 :

“3D テレビを用いた災害救助用車両用夜間運転支援システムの開発”, 電子情報通信学会総合大会, Mar,11, 2015, A-17-15, (2015)

支部大会

水津俊介，遠藤孝彬，山本正信：

“遠赤外線ステレオカメラと3Dテレビによる夜間運転支援方式 ドライビングシュレータによる検討”，

電子情報通信学会信越支部大会，Oct, 5, 2013, 5B-2, (2013)

謝辞

本研究と論文作成にあたり，御指導，御指摘をして頂きました山本正信名誉教授，牧野秀夫教授，木竜徹教授，山崎達也教授，林隆史教授，林貴宏准教授に感謝の意を表します。

そして，本研究において主要メンバーとして参加，協力して頂きました遠藤孝彬君，実験に参加および準備協力して頂きました高橋健太君，近藤恭弘君，遠山卓也君，小林大将君，青柳将貴君，遠藤由樹君，海津真太郎君，清田大樹君，長谷川拓君に感謝の意を表します。