

# Three Intelligent Systems for Supporting Advanced Technology - Multi-agent, Image Recognition, and Machine Learning

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/45419">http://hdl.handle.net/2297/45419</a>

This work is licensed under a Creative Commons  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0  
International License.



# 博 士 論 文

## 先端技術を支える3つの知的 システムの開発

— マルチエージェント、画像認識、機械学習 —

金沢大学大学院自然科学研究科

電子情報科学専攻

学 籍 番 号	1424042017
氏 名	新田 雅道
主任指導教官氏名	木村 春彦
提 出 年 月 日	2016 年 1 月

# 目次

第1章 序論	1
第2章 スーパーマーケットにおける避難シミュレーションに関する基礎的検討	3
2.1 はじめに	3
2.2 本研究の避難シミュレーション	4
2.3 実験	9
2.4 考察	12
2.5 まとめ	17
第3章 自動二輪車における山道カーブ安全走行システムの開発	18
3.1 はじめに	18
3.2 提案システム	20
3.2.1 機能(a)の実現方法	20
3.2.2 機能(b)の実現方法	21
3.2.3 カーブ検出手法	22
3.3 実験・検証	31
3.3.1 提案システムの機器構成	31
3.3.2 2種類の実験による検証	31
3.4 おわりに	37
第4章 機械学習を用いた映像内に現れるお辞儀動作の認識システム	38
4.1 はじめに	38
4.2 お辞儀の定義	39
4.3 提案手法	40

4.3.1	関心領域の抽出	40
4.3.2	前処理	42
4.3.3	オプティカルフローの導出	42
4.3.4	機械学習アルゴリズムを用いた識別	42
4.4	実験	43
4.4.1	実験環境	43
4.4.2	実験方法	43
4.4.2.1	実験準備	43
4.4.2.2	実験過程	44
4.4.3	実験結果	45
4.4.4	考察	50
4.5	おわりに	51
<b>第5章 結論</b>		<b>53</b>
<b>謝辞</b>		<b>54</b>
<b>参考文献</b>		<b>55</b>

## 目次

2.1	売り場MAP	5
2.2	避難者の行動フローチャート	6
2.3	出口までの距離値	7
2.4	避難者の移動方向	8
2.5	可動障害物を動かして避難する例	8
2.6	将棋倒しになる状況	9
2.7	人数 300 人，可動障害物 100%のときの初期配置	10
2.8	避難完了時間の比較	11
2.9	避難完了までに将棋倒しが起こる回数の比較	11
2.10	1 ステップ目で将棋倒しが起こる回数の比較	12
2.11	将棋倒しに巻き込まれた人数	
	(a) 可動障害物 0%，出口に近い場	13
	(b) 可動障害物 0%，出口から遠い場所	14
	(c) 可動障害物 100%，出口に近い場所	14
	(d) 可動障害物 100%，出口から遠い場所	15
2.12	可動障害物 0%のときの人数の増減値	16
2.13	可動障害物 100%のときの人数の増減値	16
3.1	カーブにおける力の釣り合い	21
3.2	切り出したフレーム	23
3.3	基準点の設定	23
3.4	エッジ画像	23
3.5	特定画素抽出画像	24

3.6	マスク画像	24
3.7	輪郭画像	24
3.8	端点の取得方法	25
3.9	カーブ方向の判断方法	25
3.10	端点の取得方法	25
3.11	境界線抽出画像	26
3.12	特徴点の抽出	26
3.13	自動二輪車とカメラの位置関係	26
3.14	垂直方向の撮像範囲	27
3.15	水平方向の撮像範囲	29
3.16	最小二乗法による中心線の近似	
	(a) 実際の距離に補正された特徴点	30
	(b) 左右境界線の近似	30
	(c) 中心線の近似	30
3.17	実験環境	31
3.18	計測に使用したカーブ（付近全体）	32
3.19	計測に使用したカーブ（拡大図）	32
3.20	走行行程全体の記録表示画面	33
3.21	地点別の走行記録表示画面	33
4.1	お辞儀の種類とお辞儀の角度	
	(a) 会釈	40
	(b) 敬礼	40
	(c) 最敬礼	40
4.2	ROI の範囲	
	(a) 直立時の ROI の $y$ 軸の抽出	41
	(b) 屈曲時の ROI の $x$ 軸の抽出	41
	(c) ROI の範囲の抽出	41
4.3	実験環境	43
4.4	変数重要度の相対度数分布（1）	46

4.5	変数重要度の相対度数分布 (2)	47
4.6	角度 $\theta_b$ , $\theta_s$ と平均値との差のばらつき	
	(a) 頭頂部から臀部までがなす角度	49
	(b) 背部から臀部までがなす角度	49
	(c) $\theta_b$ と $\theta_s$ の平均値との差の散布図	49

## 表目次

3.1	平成 25 年度の事故状況	19
3.2	カーブの曲率半径の推定	34
3.3	カーブの曲率半径に対する正解値と予測	35
3.4	曲率半径の予測誤差	36
4.1	指示したお辞儀とシチュエーション	44
4.2	グレースケール値を入力した際の識別結果 (1)	45
4.3	お辞儀の動きを入力した際の識別結果 (1)	46
4.4	グレースケール値とお辞儀の動きの F 値の比較 (1)	46
4.5	グレースケール値を入力した際の識別結果 (2)	47
4.6	お辞儀の動きを入力した際の識別結果 (2)	48
4.7	グレースケール値とお辞儀の動きの F 値の比較 (2)	48
4.8	検証 1 と検証 2 のグレースケール値での F 値の比較	50
4.9	検証 1 と検証 2 のオプティカルフローでの F 値の比較	51

# 第1章

## 序論

私は1983年にコンピュータの分野に足を踏み入れ、その数年後には、人工知能という言葉が新聞紙面等で踊るようになった。当時は、人間の知能そのものをもつ機械、まさに人工知能の研究開発が中心だったと記憶している。私も人工知能に興味を持ったが、当時のもう一方の花形だった、コンピュータグラフィックス（以下CG）に没頭していった。

今日の人工知能の研究分野を見ると、実用性と発展性の観点から、人間が知能を使ってやる仕事をコンピュータにやらせることが主流となってきているようだ。その主な研究分野は、遺伝アルゴリズム、エキスパートシステム、音声認識、画像認識、感性処理、機械学習、情報検索、自然言語処理、データマイニング、ニューラルネットワーク、マルチエージェントなどである。

コンピュータは大量のデータ処理を得意とし、それを活かしたデータマイニングや情報検索技術を利用した製品・サービスは、私たちの生活を便利に、そして豊かにしている。一方、画像認識、音声認識、感性処理といった曖昧な情報処理が中心となる分野は、一部実用化されてはいるものの、まだ研究の余地が多い。たとえば、画像認識では、1枚の写真からある部品を特定しようとした場合、その形状を抜き出し、目的の部品であるかを認識しなければならない。このときに利用するのが、機械学習や遺伝アルゴリズムなどの技術である。つまり、これらの技術研究は、信頼性、正確性、迅速性などを高めるのはもちろん、他の人工知能の分野と組み合わせて利用されることが多いわけである。

コンピュータがやった方がふさわしい仕事は、コンピュータにやらせればいいという持

論もあり、再び人工知能に興味を持ったのが、木村研究室に入る動機である。

人工知能に関する分野はいずれも興味があったが、実験による試行錯誤をすることが好きだったこともあり、まずマルチエージェントの研究に取りかかった。マルチエージェントは、複数のエージェントで構成された人工社会を形成し、エージェントの相互作用によってどのような現象が起こるのかをシミュレーションするシステムである。

シミュレーションは、テーマがないと研究が進めにくいため、地震発生時の人々の行動をシミュレーションすることにした。このシミュレーションを、ひとつのシステムとして構築するのが一番目の研究テーマとなった。

次に取りかかったのが、画像認識である。CGについては、ある程度の基礎知識はあったので、その応用である画像認識システムの構築にも興味を持つことができた。画像認識では、前述したとおり、まず対象物の抽出をしなければならない。そのための様々な手法は、ある程度確立されたものだったので、次の段階の機械学習による「認識」の方に興味に移った。

そして最後に、人工知能の研究分野のほとんどに関わる機械学習を研究テーマに挙げた。機械学習なくして、人工知能を語ることはできないからである。マルチエージェントも、シミュレーションで終わらず、そこから見えてくる課題解決のためには、機械学習が必要になってくるのである。

このようなことから、私の興味とスキル、そして現在の人工知能を使った先端技術を支える知的システムの実用性も含めて、研究・開発を行うに至った。

## 第2章

# スーパーマーケットにおける避難シミュレーションに関する基礎的検討

### 2.1 はじめに

気象庁によると、日本では毎年 1,000 件以上の地震が発生している。近年発生した大地震に、東日本大震災や新潟県中越沖地震、能登半島地震などがある。特に東日本大震災では、死者数が 15,000 人以上となり、甚大な被害を及ぼした。地震が発生すると人的被害が起こる。人的被害には、建物の倒壊に巻き込まれたり、避難途中で人々の密集に巻き込まれたりして死傷する場合がある[1]。避難途中での死傷は、屋内における通路や出口付近に人が密集する場合に発生しやすい。

避難途中で起こる人的被害を防ぐためには、地震発生時の人間の行動を予測しておくことが重要である[2]。地震発生時に、私たちは自分の身を守り、安全な場所に避難するといった行動をとるため、個人の行動はある程度予測できる。しかし集団の行動については、群衆事故などで避難が難しくなる可能性があるため、予測することは容易ではない。

実際に地震発生時を想定した避難訓練を行えば、集団の行動を予測することはできるが、一時的に施設を封鎖しなければならず、避難訓練のために多くの人員も必要である。このため、既存研究ではシミュレータを用いるのが一般的である[1-6]。

避難シミュレーションは、地下鉄駅、地下街、百貨店など、人が集まる場所を対象とするものが多い。先行研究には、災害弱者を想定した避難シミュレーション[3]、地下街火災

における煙による視界不良を考慮した避難シミュレーション[4], 地下街における複数箇所同時火災時の避難シミュレーション[5], 地震による建物倒壊や火災などから逃げる避難シミュレーション[6], などがある。

本研究が対象とする, スーパーマーケットは, 比較的小規模かつ平屋である場合が多く, 避難シミュレーションまではせずに, 避難計画を立てている。スーパーマーケットは百貨店と違い, 買い物かごやショッピングカート (以下「可動障害物」) が利用されている。そこで, スーパーマーケットを対象とした避難シミュレーションを行い, 可動障害物があった場合に安全に避難できるまでの時間や将棋倒しが発生する状況などについて検証した。可動障害物の及ぼす影響を考慮したシミュレーションは, 先行研究には見当たらない。

なお, 現実性を増すために, 店内売り場 MAP は実在する建物をモデル化し, 来店人数も POS データから解析した。

## 2.2 本研究の避難シミュレーション

既存研究では主に物理モデル手法, セルオートマトン法, マルチエージェントシミュレーションを用いた避難シミュレータの開発が行われている。

物理モデル手法は, 人々の行動を流体とみなしてモデル化し, 物理現象を数式で表してシミュレーションするが, 複雑な避難経路を用いる場合や, 人々の歩行速度に変化がある場合については設定が困難となる。セルオートマトン法は, 近傍の状態遷移に依存し, 距離の概念がかかせない。しかし, スーパーマーケットにおける避難シミュレーションでは, 自律性に基づいた行動を重視したため, 近傍への依存性がないマルチエージェントシミュレーションを採用することにした。

マルチエージェントシミュレーションとは, エージェントと呼ばれるシステムの複数の要因を用いてシミュレーションする手法である[1], [2]。エージェントには与えられたルールに基づき自律的に行動する性質や, 他のエージェントと相互作用する働きを持つ。この特性を生かし, エージェントに避難時の行動ルールを与えることで, 人々が避難する様子を再現することができる。シミュレーション環境として, (株)構造計画研究所のソフトウェア artisoc academic Ver.2.6 を使用した。

マルチエージェントシミュレーションではステップと呼ばれる時間の単位を扱っている。シミュレータは1ステップごとに計算を行い, 避難者の動きの処理を行う。このため, 本研究では時間の単位としてステップを用いた。また本研究で開発した避難シミュレータは,

1 ステップ間に複数の避難者の動きを並列で処理するのではなく、一人ずつ逐次的に処理した。避難者の避難する速度を考慮した結果、1ステップは約1.4秒とした。

警視庁によると、地震発生時には第一に自分自身の身を守り、揺れがおさまってから安全な場所に避難することを推奨している。このため本研究においても、揺れがおさまった後にスーパーマーケットの店内から屋外へと避難する様子をシミュレータで再現することにする。

避難の様子を再現するにあたり、あらかじめシミュレータ上の店内売場に避難者を表すエージェント（以下「避難者」）を配置しておく。その後、避難者は配置された場所から出口に向かって避難するという流れでシミュレーションを行った。避難者全員の避難が完了すれば、シミュレーションは終了である。

スーパーマーケットには可動障害物があり、これらは避難の妨げとなるが、移動することは容易である。よって、避難者の正面に可動障害物が存在した場合、それらを避けて避難したり、避難の妨げとならない方向にそれらを移動させたりして、避難することが考えられる。そこで、本シミュレーションを実行するにあたって、可動障害物にも考慮した。それとは別に、地震により陳列されている商品などが落下し障害物となる可能性があるが、本研究は基礎研究であるため、このことについては考慮しないものとした。

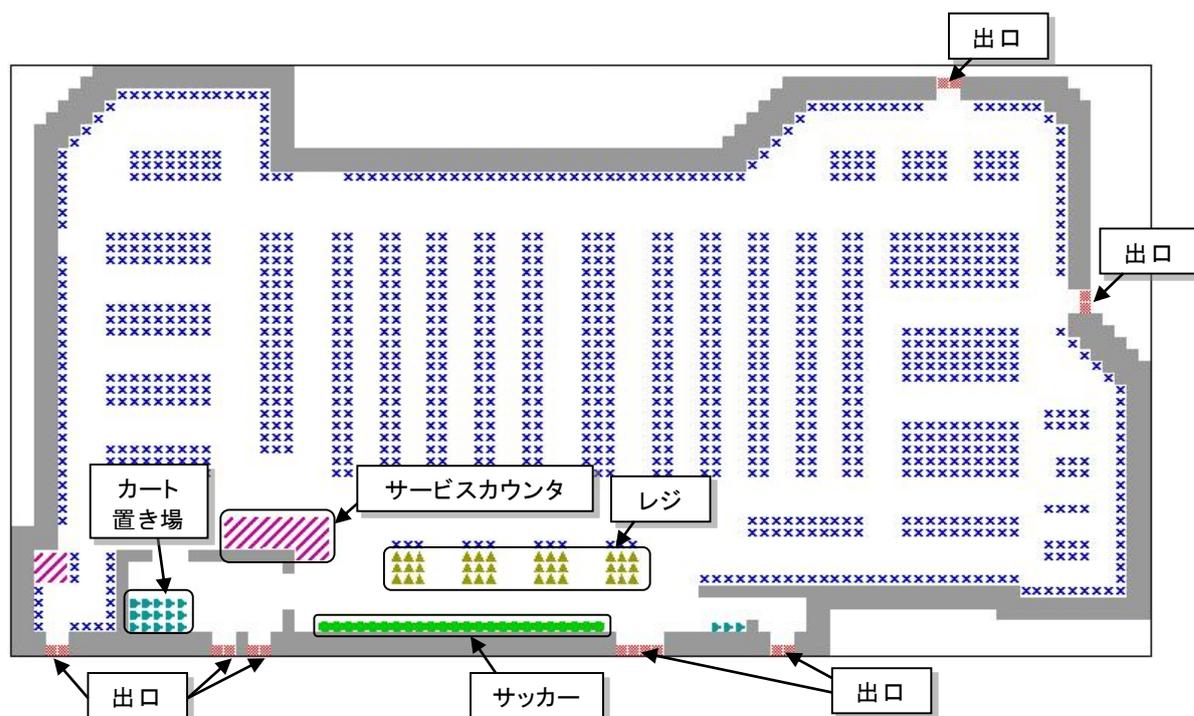


図 2.1 売り場MAP

店内売場 MAP として、避難者や可動障害物、商品棚、壁などを配置し、人々の避難の様子を再現するためのフィールドを設定した。本研究で扱う売場は、実際の店舗で扱われているレイアウトを参考に再現した。

店内売場は 1 辺 50cm の正方形からなるセルに分割されており、そのセル上に壁や商品棚などを配置している。実際にシミュレータ上で作成した店内売場 MAP を図 2.1 に示す。なお、壁や商品棚（図 2.1 中の×記号）などは、店内売場にあらかじめ配置される固定の障害物である。

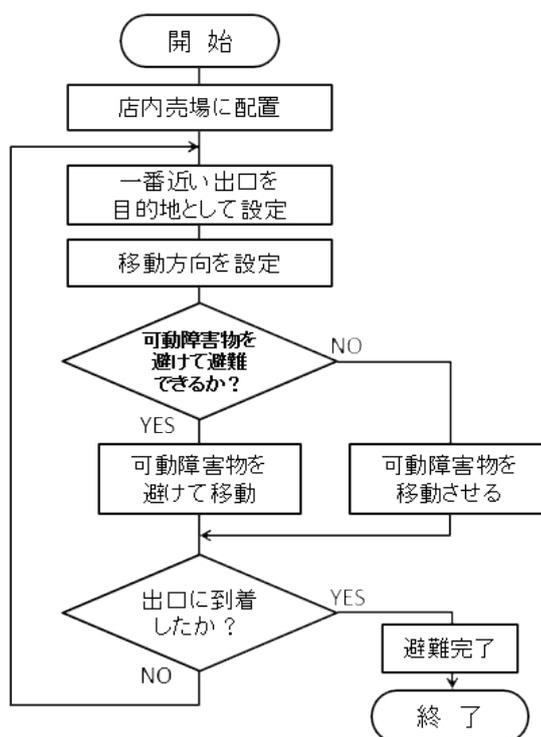


図 2.2 避難者の行動フローチャート

避難者は、避難時に最短距離で出口に向かって避難する。正面に可動障害物が存在した場合、その障害物を避けて避難するか、自分自身の避難の妨げとならない方向に移動するといった行動をとる。避難者は初めに店内売場に配置され、その場所から出口に向かって避難を行う。避難者の行動に関するフローチャートを図 2.2 に示す。

避難者は壁や商品棚などの固定の障害物を考慮して、最短距離で出口に避難するものとする。そこで、出口までの距離値を、避難者が移動する店内売場 MAP の床セルに格納しておく。その例を図 2.3 に示す。

本研究で対象としたスーパーマーケットは出口が計 7 か所存在するので、各出口までの

距離値をそれぞれ格納しておくことで、避難者が一番近くに存在する出口(避難の目的地)を見つけることができる。

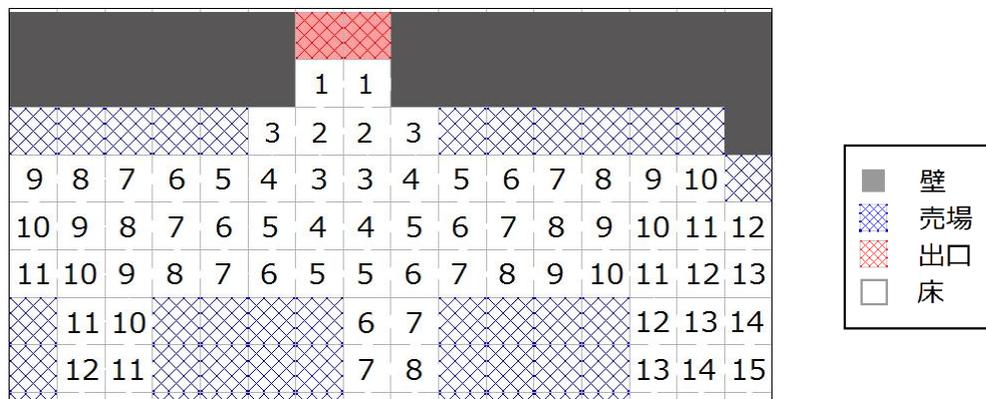


図 2.3 出口までの距離値

次に避難者は移動する方向を決める。本研究で扱う避難者は、前後左右の4方向に移動(斜め方向の移動は考慮せず)することができる。移動方向の決め方として、避難者は今いるセルに格納されている距離値と周囲4方向に存在するセルに格納されている距離値を比較し、距離値が最小となるセルが存在する方向を移動方向とする。しかし壁や売場といった固定の障害物には距離値が設定されていないため、それらが存在する方向は考慮しない。また他の避難者がいるセルの位置にも移動できないので、このような場合も比較対象から外す。周囲のセルで距離値が最小のものが複数存在した場合、可動障害物が存在しないセルの方向を優先して移動方向とする。これは避難者が他の避難者や可動障害物を避けて避難することを意味する。

しかし、周囲に距離値が小さくなる方向かつ他の避難者や可動障害物が存在しない方向が複数存在する場合は、今いる場所から出口までの距離を x 軸方向, y 軸方向についてそれぞれ求め、距離が大きい方向を移動方向とする(図 2.4)。

避難者の正面に障害物が存在しない場合、平均歩行速度を約 1.1m/s と設定し、最大3セル直線移動することができる[8]。しかし避難者の正面に障害物が存在する場合は、避難者は障害物の手前までしか移動することができない。また、避難者は、今いるセルに格納されている距離値よりも距離値が大きいセルには移動しない。

避難者の正面のセルに可動障害物が存在した場合、避難者は可動障害物を避けて避難するか、移動させて避難するといった行動をとる。周囲4方向について、避難者の今いるセ

ルに格納されている距離値よりも小さく、その最小値が格納されているセルで、可動障害物が存在しないセルがあれば、そのセルの方向に移動する。しかし、最小値のセルすべてに可動障害物が存在するのであれば、避難者は可動障害物を横に移動させる（図 2.5）。他の避難者や固定障害物により横に移動させることができなければ、避難者は可動障害物を正面に押し出す。可動障害物を横に移動させる場合は、最大 5 つの可動障害物を一度に移動させることができる。可動障害物を移動させた後は、避難者自身は移動しない。

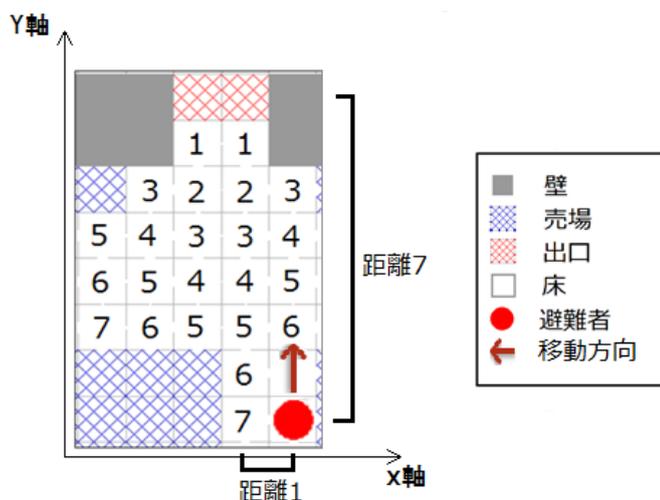


図 2.4 避難者の移動方向

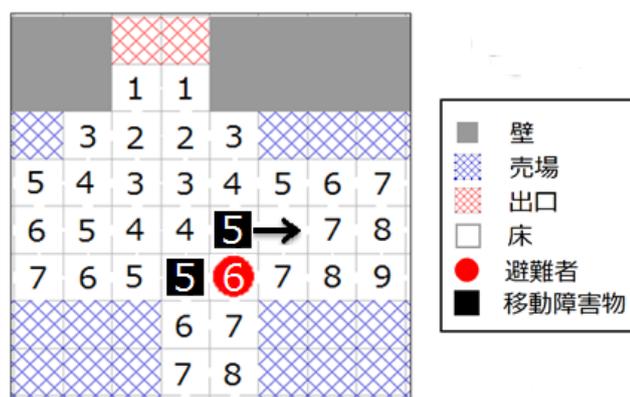


図 2.5 可動障害物を動かして避難する例

地震発生時には、建物の倒壊や地震に起因する火災に巻き込まれるケースが考えられるので、いち早く安全な場所に避難することが望ましい。そこで、すべての避難者が避難完了するまでに必要な時間を安全性の評価の対象とする。なお、避難完了時間の単位はステップとする。

人々が密集すると群衆事故が起こる可能性がある。群衆事故の一つに将棋倒しがある。一般的に、将棋倒しは人口密度が  $3\sim 5$  人/m<sup>2</sup> 程度で発生するといわれている[7]。そこで本研究では、避難者が  $2\times 2$  セルに集まったときに将棋倒しが起こると定義し、将棋倒しが起こる回数も安全性の評価の対象とする（図 2.6）。

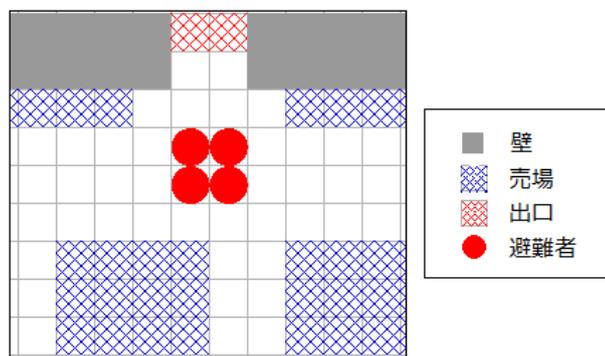


図 2.6 将棋倒しになる状況

## 2.3 実験

本研究の避難シミュレーションではスーパーマーケットを対象とし、買い物かごやショッピングカートといった可動障害物の考慮を行った。そこで可動障害物の割合の違いにより、避難者にどのような影響を及ぼすのか検証する。実験では避難者の人数と可動障害物の人数に対する割合を変化させ、避難シミュレータを動作させる。

シミュレーションの流れとして、初めに避難者と可動障害物を店内売場 MAP に配置する。配置方法はランダムであるが、同じ条件下における試行では配置は同じものとする。また買い物かごやショッピングカートは顧客（避難者）が利用しているため、可動障害物は避難者に隣接させて配置する。避難者と可動障害物を配置した後、避難者は出口に向かって避難する。全員の避難が完了した後、避難完了時間と将棋倒しが起こる回数を取得する。

本研究で扱っている店舗の POS データを解析したところ、繁忙時の 1 分間の平均来店人数は 15 人であり、閑散時の平均来店人数は 3 人であった。また、一般的に、顧客がスーパーマーケットで買い物に費やす時間は平均約 20 分といわれている[9]。このことから、繁忙時には 300 人、閑散時には 60 人がスーパーマーケットの店内に滞在していると考えら

れる。そこで本実験では、避難者の人数について 50 人から 300 人まで 50 人間隔で実験を行うことにした。また可動障害物の割合の違いにより、避難者にどのような影響を及ぼすのかを検証するため、可動障害物の割合は人数に対して 0% から 100% まで、10% 間隔の 11 通りで実験を行うことにした。

プログラムの実装方法やマルチエージェントシミュレーションの特性により、試行の度に結果が変わる可能性がある。そのため同じ条件下における試行を 10 回行い、その平均値を実験結果に用いた。

例として人数 300 人、障害物 100% の初期配置を図 2.7 に示す。図中の●が避難者、□が可動障害物である。

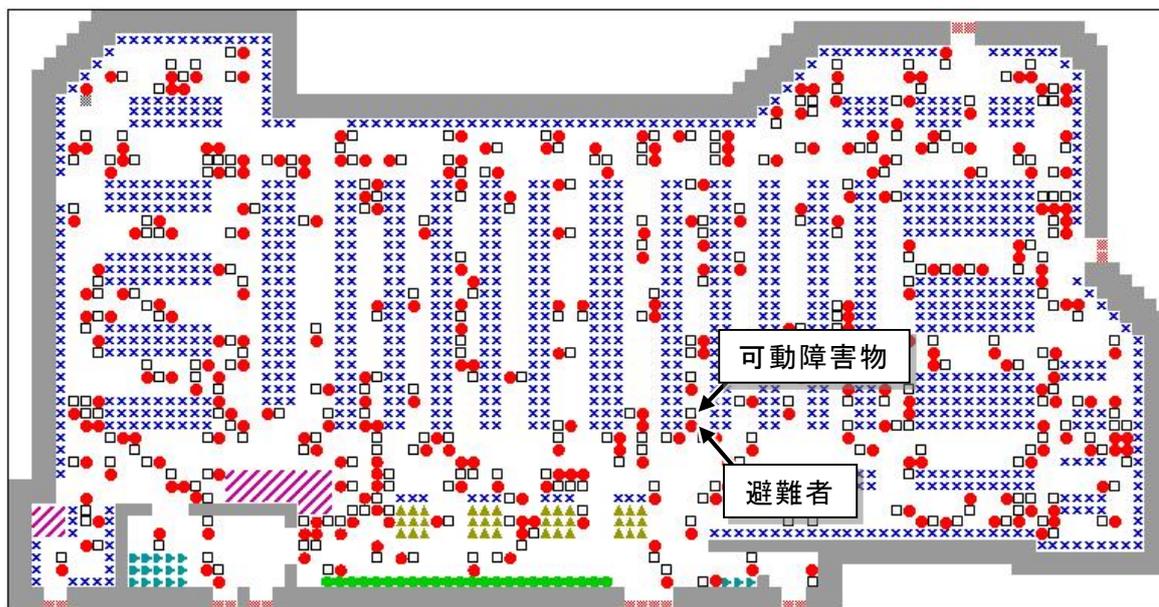


図 2.7 人数 300 人、可動障害物 100% のときの初期配置

シミュレーションを実行して得られた結果について、避難完了時間（ステップ数）の比較を図 2.8、避難完了までに将棋倒しが起こる回数の比較を図 2.9 に示す。また 1 ステップ目で将棋倒しが起こる回数の比較を図 2.10 に示す。

避難完了時間について、可動障害物の割合が増加するにつれて避難完了時間も増加する傾向がみられたが、避難者の人数が少ないときは、大きな変化はみられなかった。将棋倒しが起こる回数について、可動障害物の割合が増加するにつれて将棋倒しが起こる回数は減少する傾向がみられた。しかし避難者の人数が少ないときは、大きな変化はみられなかった。

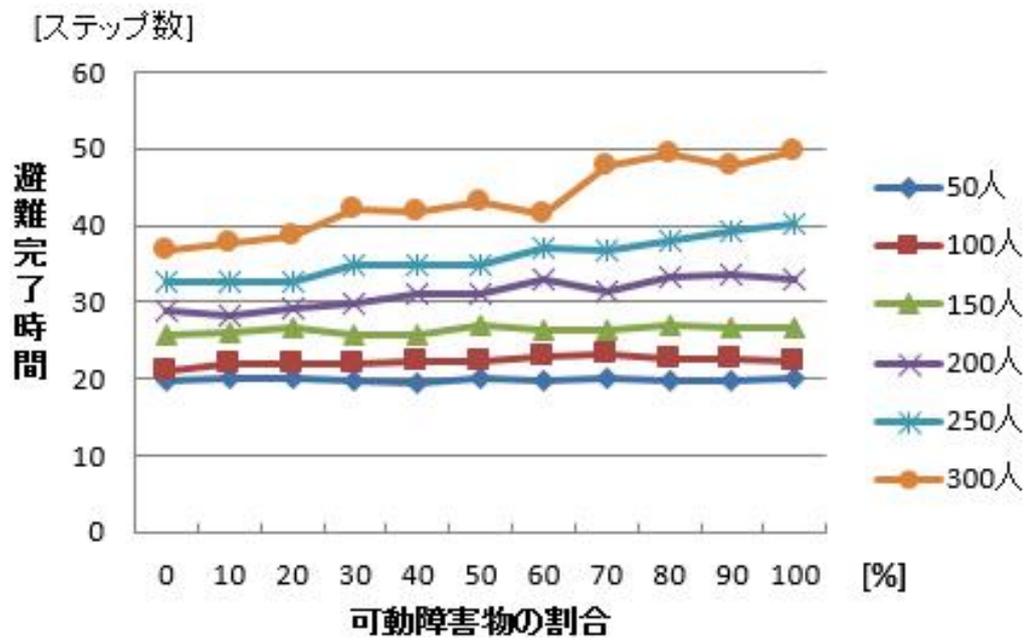


図 2.8 避難完了時間の比較

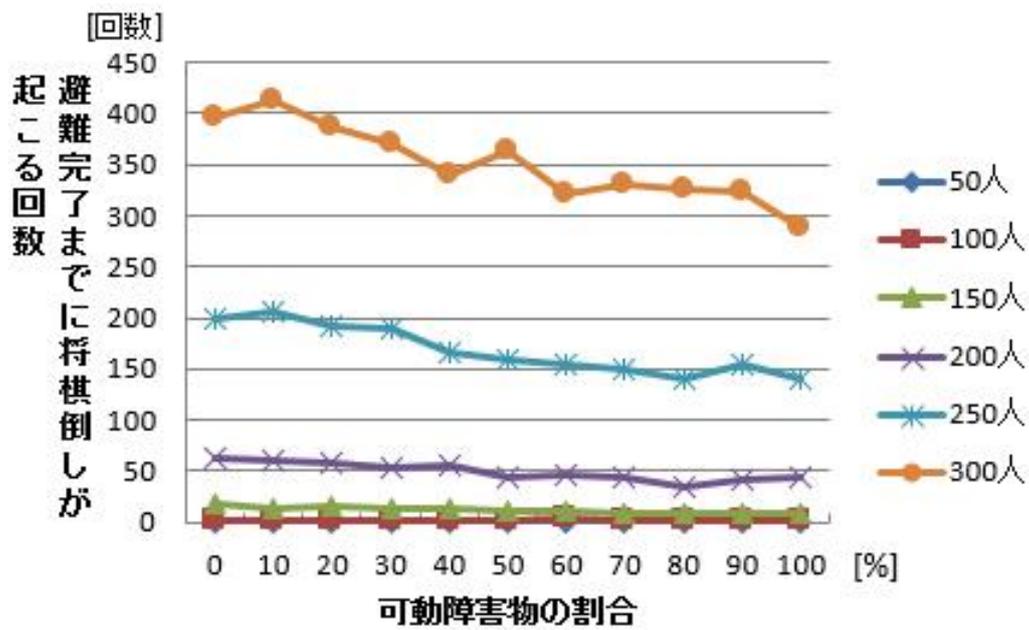


図 2.9 避難完了までに将棋倒しが起こる回数の比較

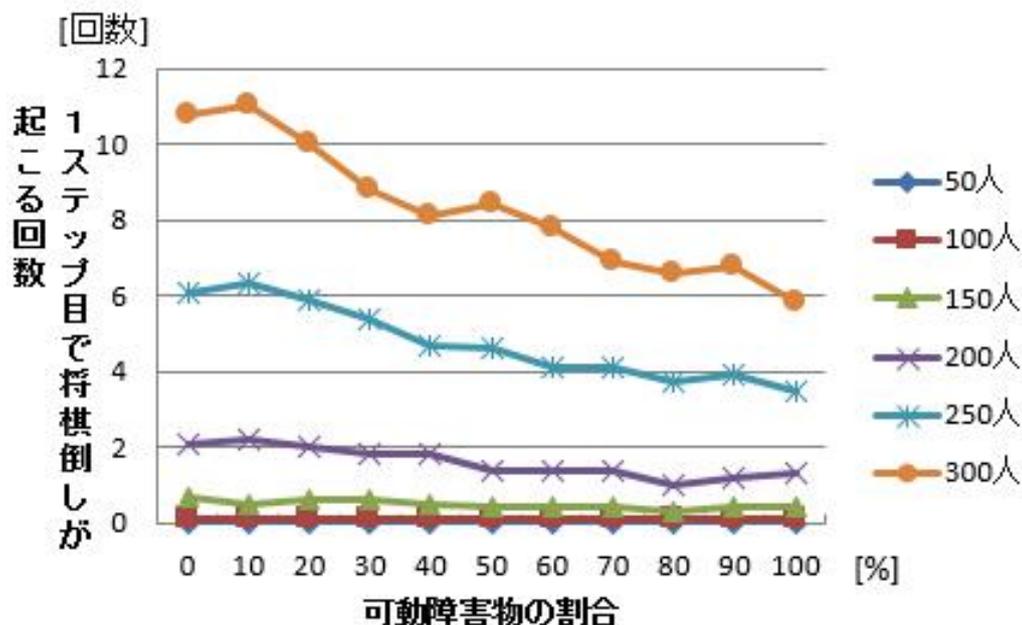


図 2.10 1 ステップ目で将棋倒しが起こる回数の比較

## 2.4 考察

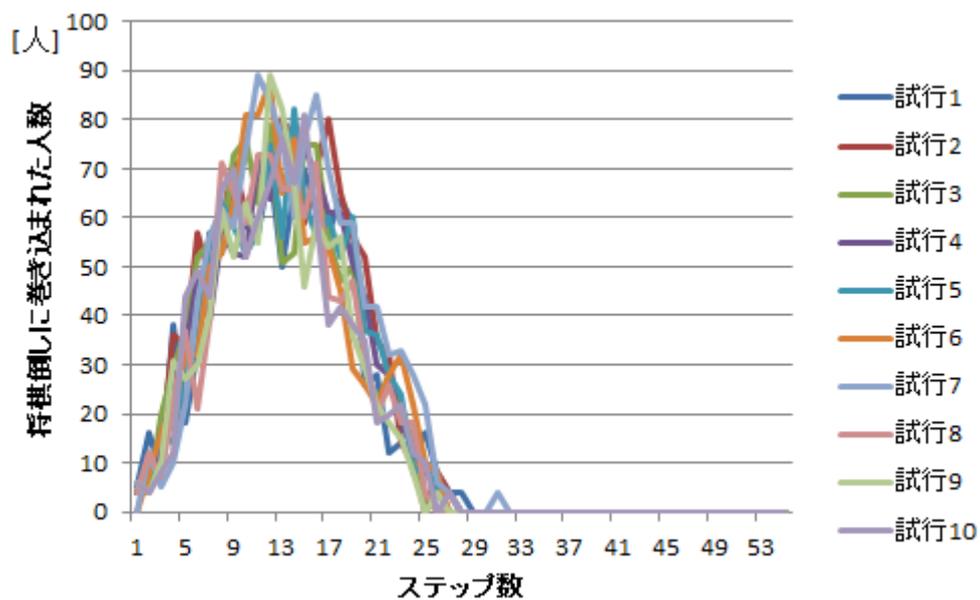
図 2.8 のように、可動障害物の割合が増加すると、それが避難の妨げとなるため、避難完了時間が増加する傾向がみられる。避難者は可動障害物をよけて避難するか、自分自身の避難の妨げとならない方向に移動させて避難しなければならないため、障害物が存在しないときと比べ、避難に時間がかかることになる。避難者の人数が少ないときは、可動障害物の割合に関わらず避難完了時間はほぼ一定であった。よって、避難者の人数が少ないときは、可動障害物が避難者に及ぼす影響は小さいと考えられる。

可動障害物の割合が増加するにつれて、1 ステップ目で将棋倒しが起こる平均回数は減少する傾向がみられた (図 2.10)。この理由として、可動障害物が少ないときはスムーズに避難することができるため、多くの避難者が短時間で出口付近まで到達することができる。しかし出口から屋外へ避難できる人数は限られているため、出口付近に避難者が密集し、将棋倒しが起こりやすくなる。一方、可動障害物が多いときは、避難者は可動障害物を考慮して避難しなければならないため、スムーズに避難することができない。このため出口付近では避難者はそれほど密集せず、将棋倒しが起こりにくいと考えられる。

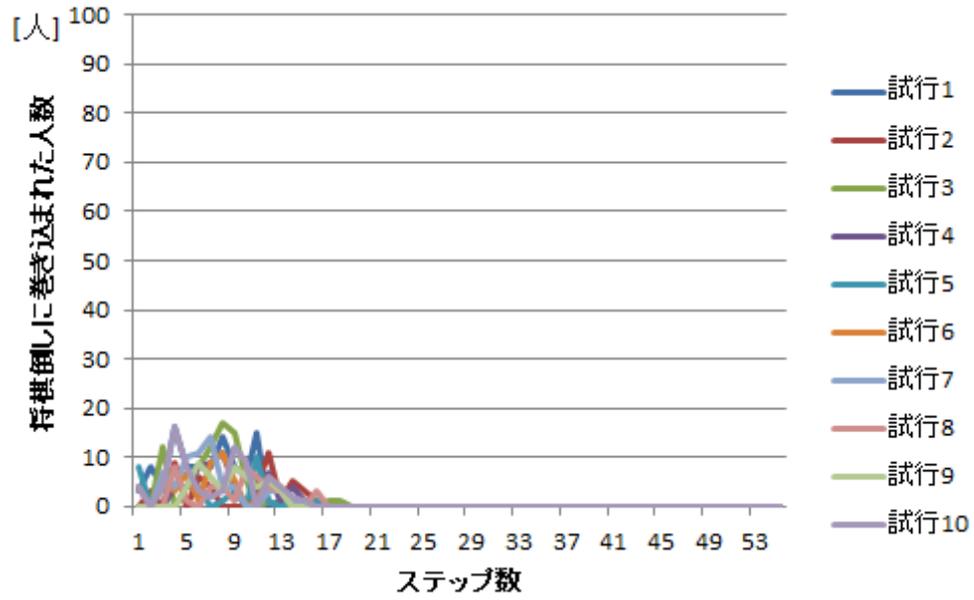
1 ステップで将棋倒しが起こる平均回数は、避難者の人数が 300 人のときにその差が顕著に表れた。可動障害物の割合の違いによる比較を行うため、可動障害物の割合は 0%と 100%の実験結果を用いて考察する。可動障害物の割合が 0%について、出口に近い場所で

将棋倒しに巻き込まれた人数を図 2.11(a)に、出口から遠い場所で将棋倒しに巻き込まれた人数を図 2.11(b)に示す。出口に近い場所と遠い場所は、出口までの距離値を3で割り、整数値の小さい方から 1/3 を出口に近い場所、整数値の大きい方から 1/3 を出口から遠い場所と定めた。たとえば、出口までの距離値が 15 であった場合、距離値が 1～5 は出口に近い場所、距離値が 11～15 は出口から遠い場所となる。

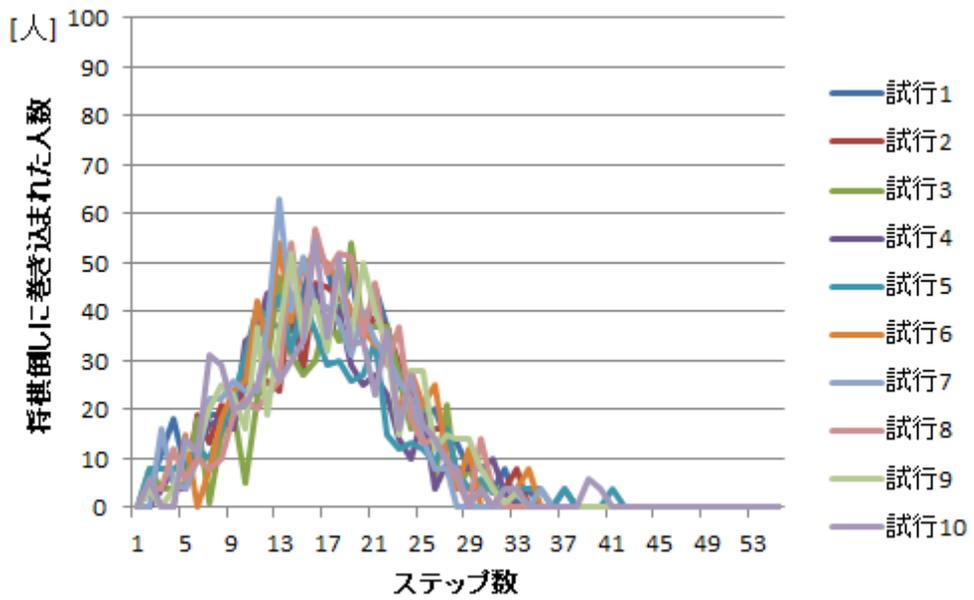
可動障害物の割合が 100%についても同様に、出口に近い場所で将棋倒しに巻き込まれた人数を図 2.11(c)に、出口から遠い場所で将棋倒しに巻き込まれた人数を図 2.11(d)に示す。図 2.11(a)、図 2.11(b)から、可動障害物の割合が 0%のときは、出口から遠い場所よりも近い場所で将棋倒しに巻き込まれる人数が圧倒的に多いことがわかる。また図 2.11(c)、図 2.11(d)から可動障害物の割合が 100%のときも同様に、出口から遠い場所よりも近い場所で将棋倒しに巻き込まれる人数が多い。しかし図 2.11(a)と図 2.11(b)、図 2.11(c)と図 2.11(d)のように可動障害物の割合の違いで結果を比較すると、出口に近い場所では可動障害物の割合が 100%よりも 0%の方が将棋倒しに巻き込まれる人数が多いが、出口から遠い場所では可動障害物の割合が 0%よりも 100%の方が将棋倒しに巻き込まれる人数が多い。



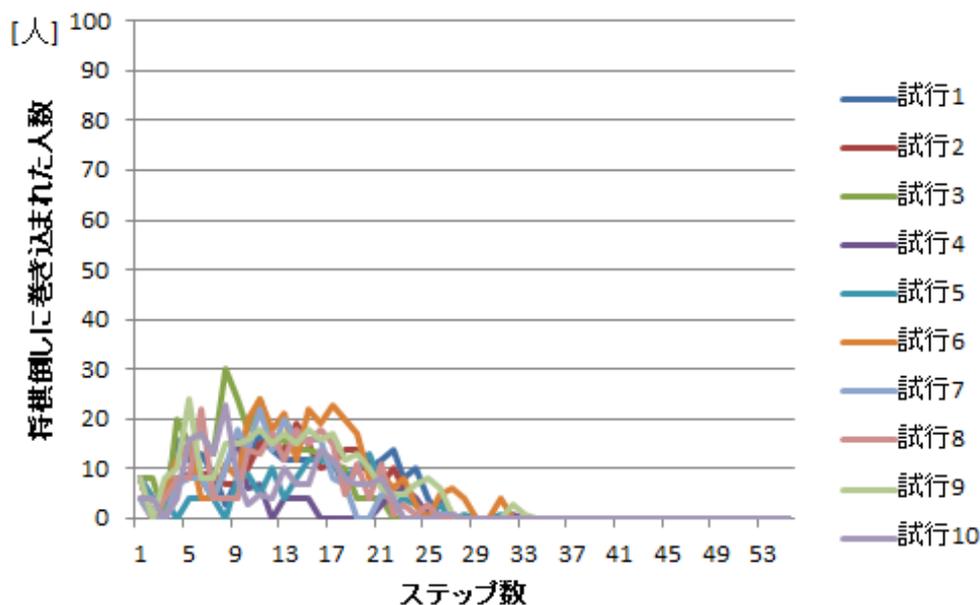
(a) 可動障害物 0%，出口に近い場所



(b) 可動障害物 0%, 出口から遠い場所



(c) 可動障害物 100%, 出口に近い場所



(d) 可動障害物 100%, 出口から遠い場所

図 2.11 将棋倒しに巻き込まれた人数

図 2.11(a), 図 2.11(b)から, 可動障害物の割合が 0%のときは, 出口から遠い場所よりも近い場所で将棋倒しに巻き込まれる人数が圧倒的に多いことがわかる。また図 2.11(c), 図 2.11(d)から可動障害物の割合が 100%のときも同様に, 出口から遠い場所よりも近い場所で将棋倒しに巻き込まれる人数が多い。しかし図 2.11(a)と図 2.11(c), 図 2.11(b)と図 2.11(d)のように可動障害物の割合の違いで結果を比較すると, 出口に近い場所では可動障害物の割合が 100%よりも 0%の方が将棋倒しに巻き込まれる人数が多いが, 出口から遠い場所では可動障害物の割合が 0%よりも 100%の方が将棋倒しに巻き込まれる人数が多い。

次に出口に近い場所における避難者の人数の増減値を, 図 2.12 で可動障害物の割合が 0%のときについて, 図 2.13 で 100%のときについて示す。人数の増減値とは, 出口から新たに入ってきた人の人数から, 避難が完了し出口から出て行った人の人数を引いた値を表す。

図 2.12, 図 2.13 についてステップ数の値が小さい, つまり避難の初期段階に注目すると, 可動障害物の割合が 100%のときより 0%のときの方が人数の増減値が大きい。これは出口に近い場所にいる避難者の人数が増加していることを表している。この結果から可動障害物の割合が 0%のときは 100%に比べ, 避難者がスムーズに出口付近まで到達していることがわかる。

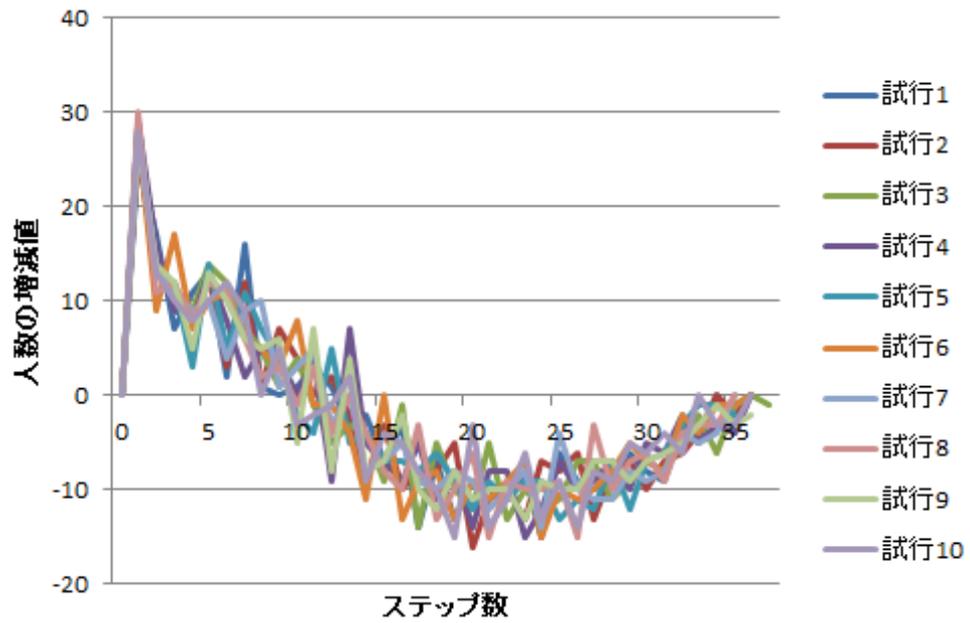


図 2.12 可動障害物 0%のときの人数の増減値

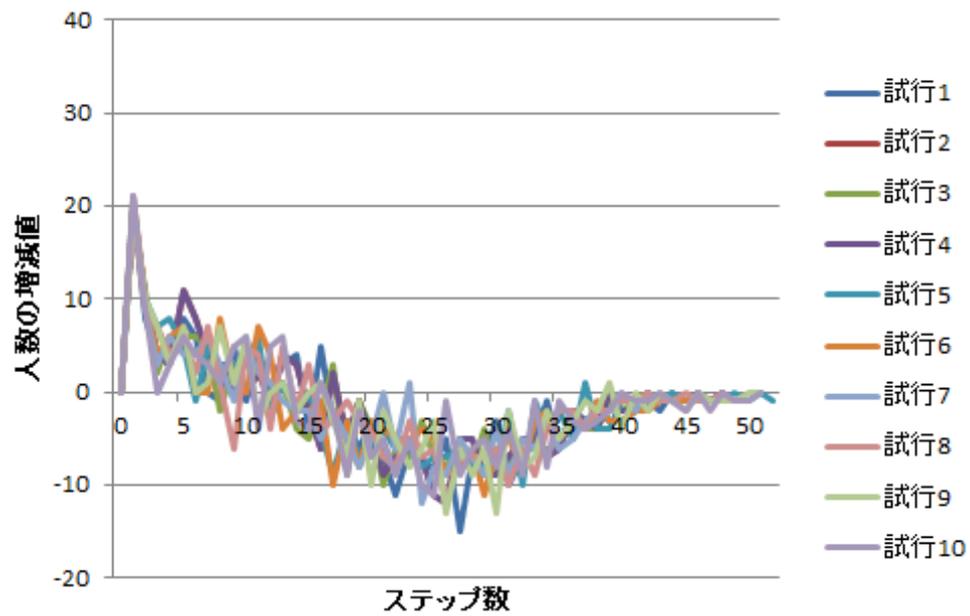


図 2.13 可動障害物 100%のときの人数の増減値

## 2.5 まとめ

本研究ではスーパーマーケットを対象に、避難者が店内から屋外へと避難する様子を再現する避難シミュレーションを行った。そのパラメータとして、買い物かごやショッピングカートといった可動障害物を与え、それらが避難時に及ぼす影響について調査した。その結果、可動障害物が少ないと避難完了にかかる時間は短くなるが、将棋倒しが起こる可能性が高くなることがわかった。将棋倒しが発生すると、そこは身動きの取れない「人の障害物」となり、被害が拡大する恐れがある。このため、非常口付近は、人がスムーズに流れやすくする導線を確認する必要がある。たとえば、非常口に向かって漏斗状に通路を作るとか、ひとつの非常口に殺到しないように、複数の非常口への誘導灯が点灯する仕組みを提案する。

今回は1種類の初期配置で実験を行ったため、初期配置によって結果が変わる可能性が考えられる。たとえば、地震により陳列されている商品や商品棚が落下し障害物となる可能性があるため、今後考慮する必要がある。また可動障害物の要素、たとえば、季節や時間帯、男女の割合や大人と子供の割合、服装や履物などでも状況が変わってくるので、それらに関する条件設定も必要であると考ええる。

災害時の人間行動については多くの研究がなされている。人間の行動心理などもパラメータとして与えれば、より現実的な結果が得られるであろうが、パラメータの数が多くなれば、それだけコンピュータへの負荷がかかる。パラメータ数とターンアラウンドタイムのトレードオフも考慮し、今後さらに研究を深めたい。

## 第3章

# 自動二輪車における山道カーブ安全走行システムの開発

### 3.1 はじめに

自動車に対する安全システムとして、エアバッグ、ABS、衝突被害軽減ブレーキなどが開発されている。しかし、自動二輪車については、その機構上安全システムの搭載が難しい。これは、自動二輪車の少ないスペースに搭載でき、有効に機能する装置の開発が難しいためであると考えられる。たとえば、エアバックは自動二輪車本体ではなく、ライダーズーツに内蔵されている。事故があったときは、ライダーが投げ出されることが多いため、スーツに内蔵するのは適切と思われるが、スーツ重量が重くなったり、ライダーの自由度を奪ったりする。また、夏などで気温が高いときに着用するのは、健康上よくないであろう。ABSについては、前輪のロックによる転倒が防止できるので、停止距離の短縮効果とあわせて、自動車よりも積極的に取り付けたほうがよいと考えられている。最近では、国土交通省が二輪車の安全性を強化する方針を打ち出し、新型車については平成30年10月から、継続生産車については平成33年10月からABSまたはCBS（前・後輪の制動力配分を適正に確保する機構）の装着を義務づけると発表している。衝突被害軽減ブレーキとは、レーダなどを使って、前方に障害物があると判断したときは、自動でブレーキがかかる装置であるが、自動二輪車への搭載事例は見当たらない。

表 3.1 は、自動車と自動二輪車の事故の発生確率を示している。事故確率・死亡確率と

もに自動二輪車のほうが高く，自動車に比べて危険な乗り物であることがわかる。また，交通事故の死者数が減少するなか，中高年の自動二輪車による死亡事故が10年で倍増している。これは若い頃の愛好者が中高年になって運転を再開するリターンライダーの増加が一因である[10]。

表 3.1 平成 25 年度の事故状況

	保有台数 (台)	事故件数 (件)	死亡数 (人)	事故確率 (%)	死亡確率 (%)
自動車	76,089,675	510,239	1,415	0.67%	0.28%
自動 二輪車	3,535,528	40,589	465	1.15%	1.15%

危険な要因としては，自動車に比べて安定性が低いこと，車体が小さいこと，自動車の死角に入りやすいことなどが挙げられる。また，直線道路とカーブでは，カーブのほうが事故が多い[11]。カーブを安全に走行するための既存研究としては，インフラ協調型の AHS カーブ進入危険防止支援システム[12]や，見通しの悪い道路における車載ミリ波レーダを用いた研究[13]，道路形状推定システム[14]などがある。しかし，文献[12]のシステムではコストがかかりすぎ，シャドウイング（大型車両による影部分）も発生する。文献[13]では適用範囲が狭く，複雑な道路形状や環境において誤推定率が高い。また，文献[14]では事前に曲率半径の情報が必要であり，白線がない道路では適用できない。

そこで本研究では，車体の安定性の低さに着目し，山道カーブでの制御ミスによる転倒を防止するために，デジタルカメラを用いてカーブの危険状況を推定するシステムの開発研究を行った。その手法は，カメラで取得した静止画像をもとにカーブの曲率半径  $R^*$  を求め，これと自動二輪車の走行速度から理想のバンク角を導く。またスマートフォンのアプリから，走行中の自動二輪車の速度とバンク角を求め，カーブの曲率半径  $R$  を計算する。そして  $R^*$  と  $R$  から危険状況を定量的に表わす数値を求め，理想のバンク角と危険状況値をライダーに提示する。これにより，安全な運転をするための情報，すなわち「内側に回りすぎて転倒しやすい」とか，「大きく回りすぎて外側のガードレールにぶつかりやすい」とか，「安全走行している」ことを示すことができる。なお，曲率半径とは，イメージ的には二輪車の回転半径を意味するものである。

本研究では，デジタルカメラとスマートフォンという，近年では誰しもが持っている機器構成とすることで，手軽にリアルタイムな情報提供ができるシステム開発を目指した。

## 3.2 提案システム

本研究で対象とする山道カーブは、提案システムを簡素化するために片側一車線のカーブとし、走行中のライダーに次の情報を提示する機能を搭載することにした。

### 【提案機能】

- (a) 理想のバンク角  $\theta$  (自動二輪車の傾き角) を提示する。
- (b) 危険状況  $S$  (内側に回りすぎて転倒しやすい。大きく回りすぎて外側のガードレールにぶつかりやすい。安全走行である。) を定量的に提示する。

### 3.2.1 機能(a)の実現方法

- ① 自動二輪車の先端に取り付けたデジタルカメラで撮影した動画像から静止画を取り出す。
- ② 道路の輪郭を抽出する。
- ③ 山道の左右の境界線の端点を取得する。
- ④ ②, ③で取得した結果をもとに、不必要な輪郭線を削除し、山道の左右の境界線を抽出する。
- ⑤ 最小二乗法により境界線の補正を行う。
- ⑥ ⑤の結果から、道路の中心線として、左右の境界線を表す関数の midpoint の関数を求める。
- ⑦ ⑥の関数から、解析的に曲率半径  $R^*$  を推定する。
- ⑧ 自動二輪車の走行速度  $v$  を次式に代入することにより、バンク角  $\theta$  を求める。

$$\tan\theta = \frac{v^2}{g \cdot R^*} \quad (3.1)$$

ただし  $g$  : 重力加速度,  $R^* \neq 0$  のとき

(3.1)式はカーブ走行中の自動二輪車に働く力の釣り合いから求めた (図 3.1)。具体的には、カーブ走行中の自動二輪車は、傾けた自動二輪車に働く遠心力と重力が釣り合った状態にある。実際は他にも微小な力が加わっているが、ここでは扱わないことにする。

このことから、物理方程式(3.2)が成り立つ[15],[16]。  $m$  は自動二輪車とライダーの合計重量 (質量) である。

$$\frac{mv^2}{R} \cos\theta = mg \cdot \sin\theta \quad (3.2)$$

ただし  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

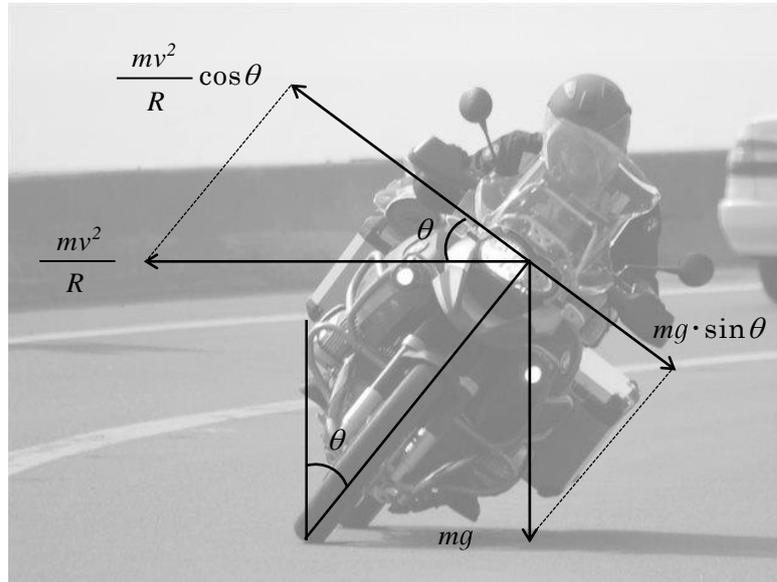


図 3.1 カーブにおける力の釣り合い

### 3.2.2 機能(b)の実現方法

カーブにさしかかった時に、自動二輪車の先端に取り付けたスマートフォンのアプリ (Diablo Super Biker) により、走行速度  $v$  とバンク角  $\theta$  を求め、それらを次式に代入して、カーブの曲率半径  $R$  を求める。(3.3)式は(3.2)式から導出したものである。ただし、この計算は、自動二輪車が地面に対して垂直のとき、すなわち  $\theta = 0^\circ$  のときは行わない。

$$R = \frac{v^2}{g \cdot \tan\theta} \quad (3.3)$$

ただし  $0^\circ < \theta < 90^\circ$

デジタルカメラから取得した静止画像をもとに得られたカーブの曲率半径  $R^*$  と、スマートフォンのアプリから取得したカーブの曲率半径  $R$  を使って、危険状況値  $S$  を求める。ただし、この計算は、自動二輪車が直進のとき、すなわち  $R = 0$  のときは行わない。

$$S = \frac{R^2 - R}{R} \quad (3.4)$$

求めた  $S$  の値によって、走行中の状態を次のように表すことができる。

- ・  $S$  が 0 に近づく程、安全走行であることを表す。
- ・  $S$  が負となり、その絶対値が大きくなる程、内側に回りすぎて転倒しやすいことを表す。
- ・  $S$  が正となり、大きくなる程、大きく回りすぎて外側のガードレールにぶつかりやすいことを表す。

ディスプレイ装置に、 $S$  の値をもとにしたカラーの棒グラフを表示することにより、危険度を視覚的に理解できるようにする。このとき、凝視しなければ読み取ることができないようでは危険なので、直感的に理解できるように、色の変化でも  $S$  の状態が把握できるようにする。 $S$  の仕様は次の通りである。

- ・  $S$  の取り得る範囲は、 $-1 < S < \infty$  である。
- ・  $\alpha 1 \leq S \leq \alpha 2$  のとき、安全走行であり、中心が 0 で  $-1 < S < \infty$  の幅をもつディスプレイ装置に、0 から  $S$  までの間を緑色で塗りつぶす。ただし、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$  は安全と危険の境界値であり、自動二輪車の専門家によって与えられるものである。
- ・  $-1 < S < \alpha 1$  のときは、内側への危険走行であり、ディスプレイ装置の 0 から  $S$  までの間を赤色で塗りつぶす。
- ・  $\alpha 2 < S < \infty$  のときは、外側への危険走行であり、ディスプレイ装置の 0 から  $S$  までの間を黄色で塗りつぶす。

### 3.2.3 カーブ検出手法

3.2.1 の②から⑥を求めるにあたり、具体的に次のように処理を進めた。まず C 言語で作成したプログラムを使って動画を読み込み、以下に示す①から⑧の手順により、カーブの曲率半径  $R$  を推定する。

- ① 入力した動画の各フレームを取得する。(図 3.2)
- ② 基準となる点を設定する (図 3.3)。
- ③ 図 3.3 を元にエッジ画像 (図 3.4) と、舗装された道路の色の特徴を利用するために、青色要素が一番大きい画素のみを抽出した画像 (図 3.5) をそれぞれ作成する。
- ④ 得られた 2 つの画像の AND を取り、マスク画像 (図 3.6) を作成する。

- ⑤ 基準点からフリーマンのチェーンコード[17]を用いることで、輪郭線を取得する(図 3.7)。



図 3.2 切り出したフレーム

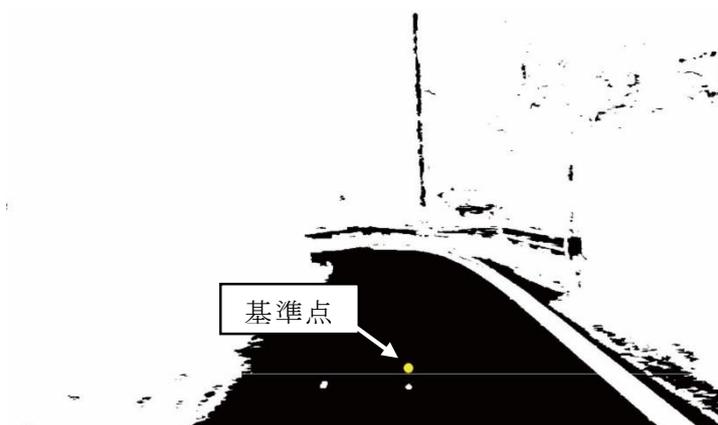


図 3.3 基準点の設定

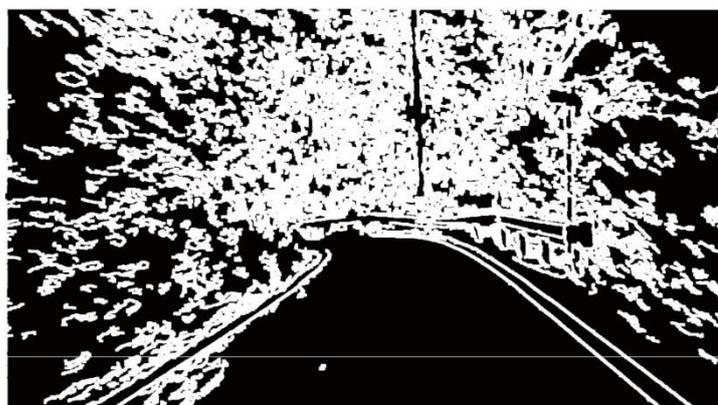


図 3.4 エッジ画像



図 3.5 特定画素抽出画像

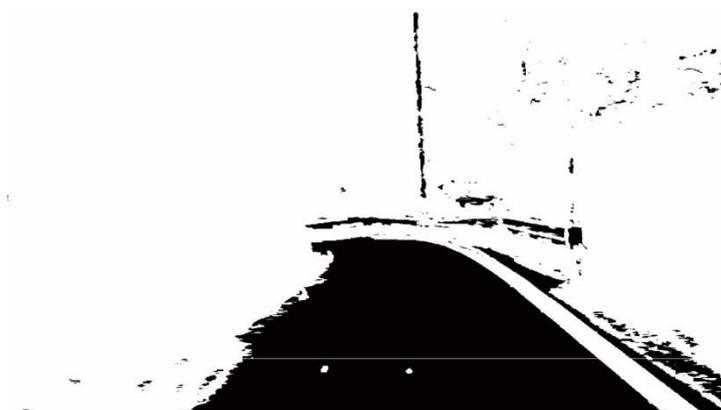


図 3.6 マスク画像

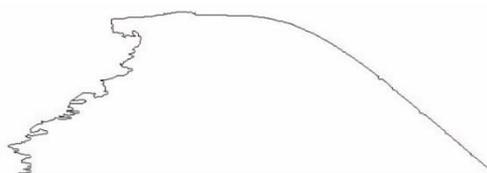


図 3.7 輪郭画像

輪郭線の形からカーブの向きを判断し、カーブと認識した場合に端点の取得を行う（図 3.8）。具体的には、輪郭の基準点水平方向に対する中心から、右方向と左方向にシフトしていき、画像上部から輪郭にあたる点までの距離を求める。シフト後とシフト前のギャップが一番大きい値を保持し、左右でその値が大きい方をカーブの向きとしている（図 3.9）。また、左右のギャップの差が閾値に満たなかった場合は、カーブでないと判断している。端点の取得は、カーブの向きによって取得方法が異なる。左カーブの場合、輪郭線の基準点水平方向上にある最も左の点から上方向にシフトしてギャップを求め、続いて最も右の

点から左方向にシフトしてギャップを求める。ギャップがそれぞれの閾値を超えた時点でその点を端点とみなす。右カーブの場合、同様の操作をシフトの方向を変えて行う(図 3.10)。

再びチェーンコードを利用して基準点から輪郭線を走査し、端点を通るごとにラインを描くか描かないかを変えることで境界線を取得する(図 3.11)。

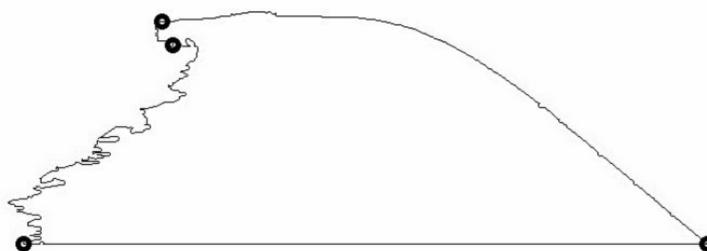


図 3.8 端点の取得方法

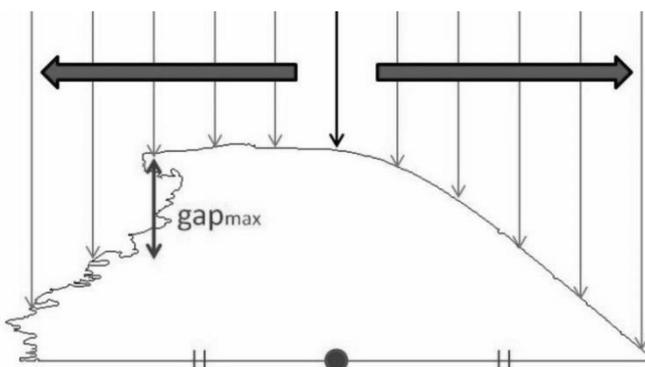


図 3.9 カーブ方向の判断方法

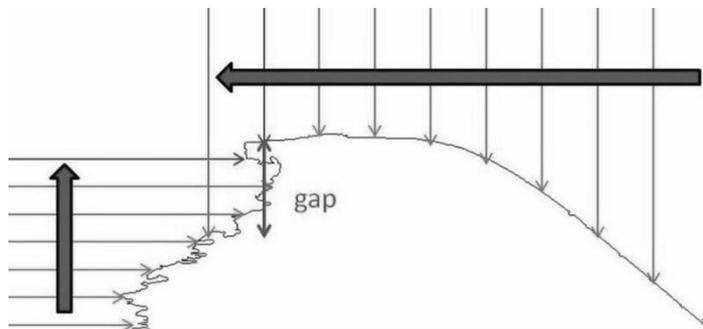


図 3.10 端点の取得方法

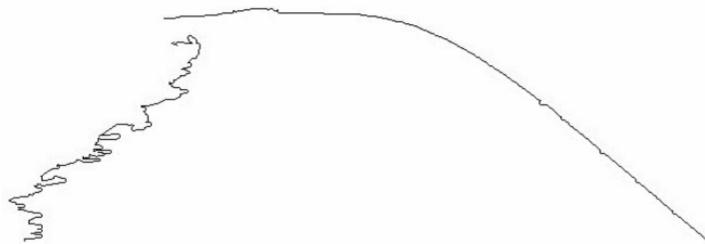


図 3.11 境界線抽出画像

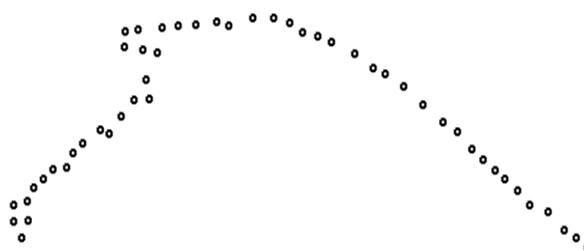


図 3.12 特徴点の抽出

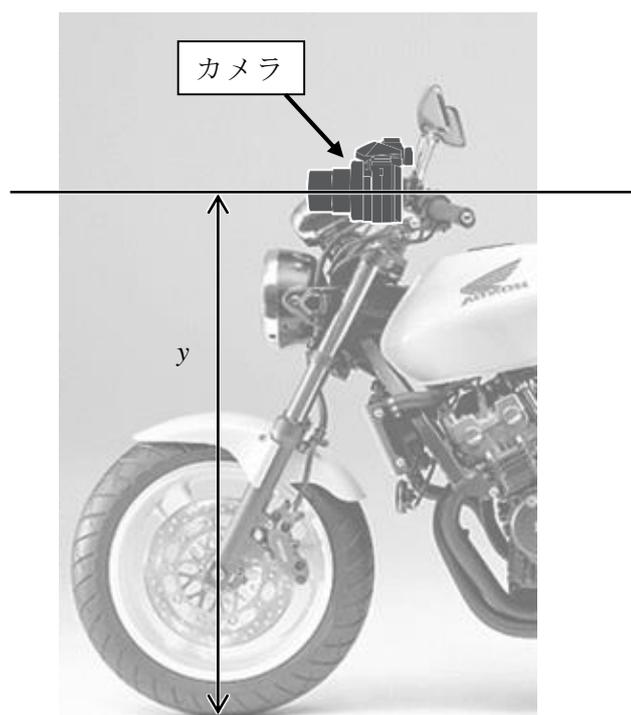


図 3.13 自動二輪車とカメラの位置関係

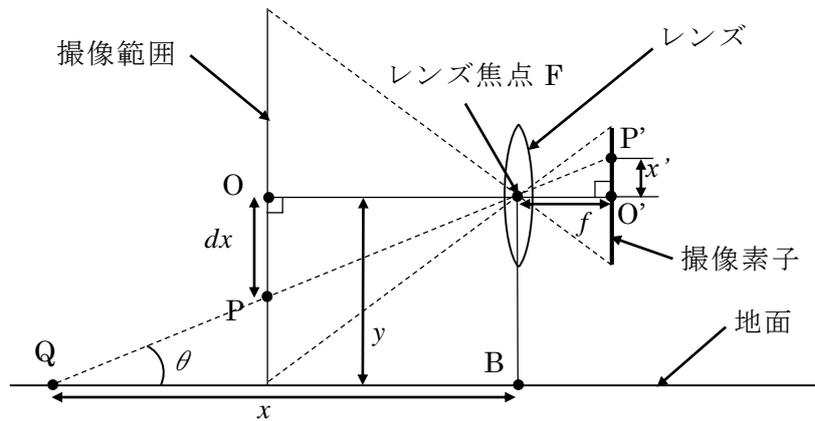


図 3.14 垂直方向の撮像範囲

- ⑥ Harris 検出器を用いたコーナー検出により，左右それぞれの境界線上の特徴点を抽出する（図 3.12）。
- ⑦ 抽出された特徴点について，カメラで撮影した画像上の位置から実際の位置を推定する。カメラは自動二輪車に水平に取り付けられ，自動二輪車と道路平面は垂直になっていると仮定する。つまり，カメラと道路平面の位置関係を横から見たときに図 3.13 のようになっていることになる。

まず，取得画像における垂直方向をカメラからの奥行き方向に変換する。

取得画像のサイズを  $W \times H (=1366 \text{ ドット} \times 768 \text{ ドット})$  とし，図 3.14 に示すように画像（撮像範囲）上の点  $P$  を用いて，カメラから実際の位置  $Q$  までの奥行き方向の距離  $x$  を求める。図中の，カメラの撮像素子のサイズを  $w \times h$ ，焦点距離  $f$ ，点  $P$  の画像の中心  $O$  からの垂直方向のずれを  $dx$ ，点  $P$  が撮像素子上に写された点を  $P'$ ，点  $P'$  の撮像素子の中心点  $O'$  からのずれを  $x'$  とすると，以下の(3.5)式の関係が成り立ち，(3.6)式が導かれる。

$$\frac{W}{2} : dx = \frac{h}{2} : x' \tag{3.5}$$

$$x' = \frac{h}{2} \cdot dx \cdot \frac{2}{W} \tag{3.6}$$

よって， $\angle P'FO' = \angle FQB = \theta$  とすると， $\theta$  は(3.7)式から求められる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x'}{f}\right) \quad (3.7)$$

これより、カメラの高さ  $y$  を用いて、奥行き  $x$  は(3.8)式で求められる。

$$x = \left(\frac{y}{\tan(\theta)}\right) \quad (3.8)$$

また、図 3.15 より点  $P$  の画像の中心  $O$  から水平方向のずれを  $dz$ 、点  $P'$  の撮像素子の中心  $O'$  からの水平方向のずれを  $z'$  とすると(3.9)式の関係が成り立ち、(3.10)式を得る。

$$\frac{h}{2} : dz = \frac{w}{2} : z' \quad (3.9)$$

$$z' = \frac{w}{2} \cdot dz \cdot \frac{2}{h} \quad (3.10)$$

よって、 $\angle P'FO' = \angle QFC = \theta'$  とすると、 $\theta'$  は(3.11)式で求められる。

$$\theta' = \tan^{-1}\left(\frac{z'}{f}\right) \quad (3.11)$$

また、カメラからの奥行き  $x$  は(3.8)式で求められているので、実際の水平方向のずれ  $z$  は、

$$z = x \cdot \tan(\theta') \quad (3.12)$$

と求めることができる。

上記の手法により、図 3.12 の各特徴点から実際の位置を推定すると、図 3.16(a)のようになる。

⑧ 左右の境界線上の特徴点から推定された点から，最小二乗法を用いて左右の境界線の近似式を求める。図 3.16(b)に，図 3.16(a)から求められた近似式をプロットしたものを示す。さらに，左右の近似式の中点を取り，カーブの中心線の近似式を得る。図 3.16(c)は図 3.16(b)から得られた近似式をプロットしたものである。

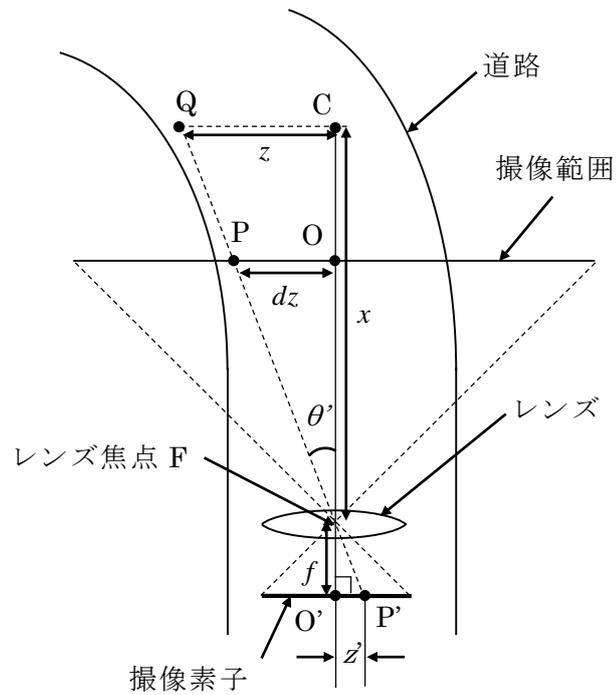


図 3.15 水平方向の撮像範囲

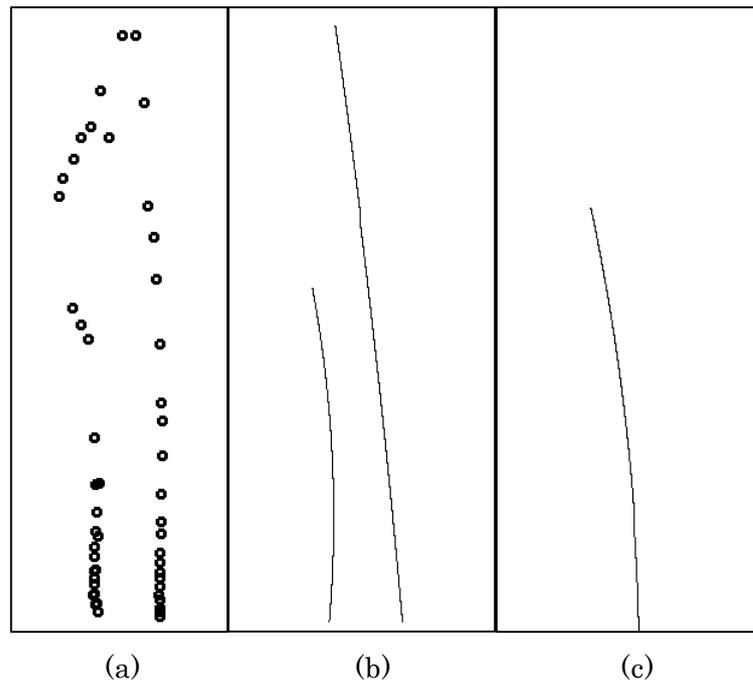


図 3.16 最小二乗法による中心線の近似

- (a) 実際の距離に補正された特徴点
- (b) 左右境界線の近似
- (c) 中心線の近似

最後に、中心線の近似式から曲率半径を求める。近似式をカメラからの奥行き方向の距離  $t$  を用いて  $f(t)$  と表すと、曲率半径  $r(t)$  は、

$$r(t) = \frac{(1.0 + f'(t)^2)^{3/2}}{f''(t)} \tag{3.13}$$

で求められる。本手法では、近似された中心線上で最小となる  $r(t)$  をカーブの曲率半径とする。

### 3.3 実験・検証

#### 3.3.1 提案システムの機器構成

カーブ半径を求めるために使用した機器について次に示す。

- ・自動二輪車 : HONDA ホーネット 250cc  
カメラ取り付け高さ  $y=1.05\text{m}$
- ・カメラ : FUJIFILM FINEPIX REAL 3D W3  
焦点距離  $f=6.3\text{mm}$ ,  
撮像素子サイズ  $h=5.9\text{mm}$ ,  $w=4.4\text{mm}$
- ・スマートフォン: Apple iPhone 4s
- ・スマートフォンアプリ : Diablo Super Biker

デジタルカメラとスマートフォンの自動二輪車上の設置位置を図 3.17 に示す。

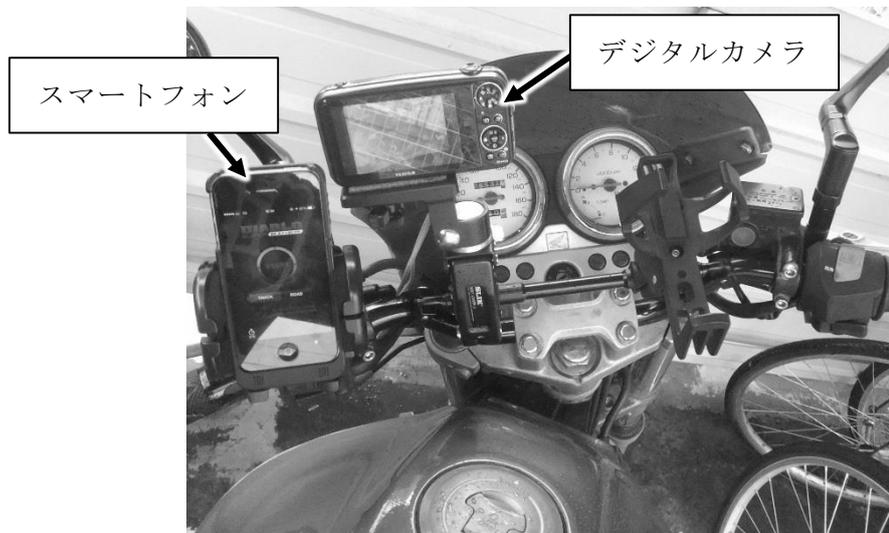


図 3.17 実験環境

#### 3.3.2 2種類の実験による検証

##### [実験1]

(3.3)式から算出されるカーブの曲率半径の精度を実験により求める。まず半径 10m の円軌道を作成し、その円周上を自動二輪車で走行する。このとき、スマートフォンアプリの Diablo Super Biker を用いて走行速度とバンク角を計測し、(3.3)式に代入してカーブの曲率半径を求める。

今回の測定に使用した場所は、石川県金沢市小菱池町内である（図 3.18, 図 3.19）。スマートフォンは、Diablo Super Biker を起動する（図 3.20, 図 3.21）。このアプリを用いて図 3.19 のカーブを走行したときの速度とバンク角を計測し、(3.3)式によって半径を算出した。



図 3.18 計測に使用したカーブ（付近全体）



図 3.19 計測に使用したカーブ（拡大図）



図 3.20 走行行程全体の記録表示画面



図 3.21 地点別の走行記録表示画面

### (結果)

計測した走行速度とバンク角に対する推定したカーブの曲率半径を表 3.2 に示す。この曲率半径の平均値は 9.90m であり、誤差が 1% であることが判った。このことから、(3.3)式で算出されるカーブの曲率半径は 99% の精度で正解データとして扱えることが判る。

表 3.2 カーブの曲率半径の推定

速度(km/h)	速度(m/s)	バンク角(deg)	曲率半径(m)
20.67	5.74	21.17	8.69
20.45	5.68	20.54	8.79
20.89	5.80	19.09	9.93
20.10	5.58	18.72	9.39
20.38	5.66	19.22	9.38
19.77	5.49	18.36	9.27
19.20	5.33	16.73	9.66
20.37	5.66	17.39	10.43
21.50	5.97	20.42	9.76
22.05	6.13	21.79	9.58
22.23	6.18	20.85	10.22
20.51	5.70	19.40	9.41
20.88	5.80	19.13	9.90
22.56	6.27	20.20	10.89
23.06	6.41	21.20	10.79
23.73	6.59	19.86	12.27

## [実験2]

機能(a)の実現で示した手続きにより, 実際の山道カーブの画像からカーブの曲率半径  $R^*$  を求める。また, その精度を示すために(3.3)式で示した  $R$  を正解値と見なして比較する。

(結果)

撮影した走行動画から3箇所カーブ動画を抽出した。それぞれのカーブ動画に対して, 提案手法を用いてカーブの検出と曲率半径の推定を行った。なお, 提案手法は, 『カメラが水平であること』, 『カメラと道路面が平行であること』を仮定した。また, 正解となるカーブの曲率半径は, カーブを通過している際のバイクのバンク角と速度から求めた。

表 3.3 に 3 箇所カーブの曲率半径に対する正解値と予測値を示した。予測値が複数あ

るのは、カーブ動画から取り出した静止画像毎にカーブがあるかないかを調べているためであり、検出される度に曲率半径の予測値を計算した。負の値は左カーブを表わし、正の値は右カーブを表わす。予測値にばらつきがあるのは、誤差のせいもあるが、山道のカーブは必ずしも奇麗な弧を描いている訳ではなく、また両端の木々等の影響を受けることがあるためである。

表 3.3 カーブの曲率半径に対する正解値と予測

カーブ番号	1	2	3
正解値	-56	-54	68
予測値	-48.1	-56.9	91.2
	-91.3	-39.5	142.2
	-41.6	-39.5	142.2
	-87.0	-47.9	110.5
	-59.7	-52.3	42.6
	-59.7	-43.5	89.0
	-55.9	-87.0	33.8
	-58.8	-60.0	36.6
		-60.0	36.6
		-75.2	40.0
			50.2
			54.8
		69.0	
		88.8	

さらに、正解値の地点と予測値の地点がずれているため、厳密な比較は不可能であるが、表 3.4 に誤差を示した。各カーブについて、カーブの検出回数と正解の曲率半径  $r$  と  $r$  に対する予測値の誤差の割合の二乗平均、最小値、最大値と誤差分散を示している。誤差の正負は、正解の曲率半径よりも大きく予測したか小さく予測したかを表す。例えば、カーブ番号 1 に対しては、 $r=56$  であり、予測誤差は最小で -0.2%、最大で 63% となっている。つまり、誤差最小の場合、正解の  $r=56\text{m}$  よりも 0.2% 小さい値である 55.9 と予測し、誤差最大の場合には 63% 大きな値である 91.3m と予測している。また、平均二乗誤差は以下の式で求めた。

曲率半径の予測値を  $x_i$  ( $1 \leq i \leq N$   $N$  はカーブ検出回数) とする。このとき、平均二乗誤差  $E_{rms}$  は、

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{\sum (r-x_i)^2}{N}} \quad (3.14)$$

となる。ここで、 $r$  は正解の曲率半径である。

表 3.4 曲率半径の予測誤差

カーブ番号	1	2	3
曲率半径(m)	56	54	68
カーブ検出回数	8	10	14
平均二乗誤差(%)	32	27	55
最小誤差(%)	-0.2	-3	2
最大誤差(%)	63	61	109
誤差分散	513	286	861

カーブの曲率半径が大きくなると誤差も大きくなる傾向がある。これは、曲率半径の大きいカーブは比較的に見通しがよく、進入する速度も速いことが多いため、カメラ上の点を実際の距離に変換する際の誤差が大きくなり、予測誤差も大きくなったと考えられる。また、実際にバイクの傾きと速度から曲率半径を計測した位置と検出したカーブの位置のずれの影響も大きいと考えられる。

現在の手法では、カーブ進入時の動画の各フレームに対して個別にカーブの検出と曲率半径の予測を行っているが、将来的には、フレーム間の差分や検出されたカーブの特徴点の全フレーム平均、また、ステレオ画像などを利用することで、精度を上げることは可能だと考える。

### 3.4 おわりに

本論文では、自動二輪車における山道カーブでの安全走行のためのシステム開発を提案した。今後の課題としては、以下のことがらが考えられる。

- ① 画像によるカーブの曲率半径の予測では、画像は自動二輪車に取り付けられたカメラで撮影したものを使用しているため、カメラの取り付け位置や角度、また山道の傾斜（上り、下りの角度）の影響を受けやすく補正が必要である。将来的には、位置情報から、カーナビの地図情報や航空写真を取り出して、曲率半径を求めるべきである。
- ② 山道のカーブでは、山の地形等の関係で、曲率半径が一定とは限らない。このような場合、曲率半径が最小となる最も危険度の高いケースを提示することは安全性の観点から最も重要である。
- ③ (3.13)式で算出されるカーブの曲率半径の精度が、まだ十分ではないので考慮する因子を検討する必要がある。

本論文では、安全と危険の境界値である  $\alpha 1$  ,  $\alpha 2$  について具体的に示していない。これらについては、今後自動二輪車の専門家の意見を聞きながら決定していきたい。また、本システムは、身近なデジタルカメラとスマートフォン、そして安価なスマートフォンアプリを利用したが、その性能の信頼性については、さらなる研究と検証が必要と考えている。

## 第4章

# 機械学習を用いた映像内に現れるお辞儀動作の認識システム

### 4.1 はじめに

お辞儀の歴史は古く、奈良から飛鳥時代に中国の礼法を取り入れて確立された。それ以前は、目上の者に対しては土下座をしていたことが「魏志倭人伝」に記されている[18]。お辞儀は世界各地に見られ、その多くは、挨拶、お礼、謝罪の行為である。日本のように頭を深く下げのお辞儀は、アジア圏では目にするが、欧米ではあまり見かけない。欧米では握手が一般的である。お辞儀をするときは、軽く頭を下げたり、わずかに膝を曲げたりする作法がとられる。とはいえ、西欧では、男性は **bow and scrape**、女性は **curtsy** という正式なお辞儀があり、公式の場や社交ダンスで見ることができる。また宗教との関係もあり、イスラム教では神に対してのみお辞儀をし、人間に対するお辞儀は忌み嫌われる。

このように、お辞儀は民族、宗教、性別などによってその作法が異なり、お辞儀が表す意味も違うため、適切な場所で適切なお辞儀をすることは、円滑なコミュニケーションを取る上で重要である。特に日本では、会釈、敬礼、最敬礼という3種類のお辞儀があり、場所、相互の関係、感情表現などによって使い分けている。お辞儀の仕方が不適切な場合、相手の感情を損ねることにもなりかねず、ビジネスマナー講座では必須の修得項目となっている[19][20]。

ビジネス系の検定試験では、立ち居振る舞いのひとつとしてお辞儀も審査基準になって

いる。たとえば、「秘書検定（(公財)実務技能検定協会）」では、準1級以上で行われる面接試験（ロールプレイング）において、態度、振る舞い、物腰の審査基準としてお辞儀の仕方も含まれている。

さらには、お辞儀の深さ、頻度、丁寧さなどから、対話している両者の上下関係を推測することもできる。また、長時間最敬礼のお辞儀をしていれば、謝罪していることも推測できる。このようにお辞儀のシーンからこれらの状況の推測が可能である。本論文では、以上のような情報を認識するための基礎研究として、3種類のお辞儀と、お辞儀でない動作を判別するための基本システムを開発した。また、本システムは、3種類のお辞儀を正確に行えるかどうかの確認システムにもなり、これを応用すれば、お辞儀の訓練システムも可能である。

以下に、4.2で3種類のお辞儀の定義を示し、4.3で3種類のお辞儀を認識するための提案手法を示す。また、4.4で実験結果と考察を述べ、4.5でまとめる。

## 4.2 お辞儀の定義

本研究では、次の3種類を日本におけるお辞儀として定義した（図4.1参照）。

### (a) 会釈

仏教用語の「和会通釈（わえつうしゃく）」の略語で、会通（えつう）ともいう。仏典においてお互いの矛盾を解消するという意味から、「挨拶」を表す動作へと変わっていったといわれている。

相手の目を見つめることなく頭を軽く下げ、のちにゆっくりと上げるというのが基本である。視線を合わせないのは敵意がないことを表しており、頭を下げながら、「こんにちは」などの時候の挨拶をすることも多い。上下関係がある場合は、目下の者がする敬礼に対して、これを受ける目上の者から応答のために行なわれる。

上体の屈曲角度は、約15度とする。上体を傾けると同時に、腰を少し後ろに引くようにすると、きびきびとしたお辞儀になる。

### (b) 敬礼

最も頻繁に使われるお辞儀で、客を迎えるときや訪問先などで使用する。上体は約30度に屈曲する。顔を上げたまま行わないように注意する。

### (c) 最敬礼

お詫びのときや、深い感謝の気持ちを表すときに使う。頭だけを下げたりせず、背筋

を伸ばして、腰から身体を曲げる。上体の屈曲角度は45度を目安とする。通路などで行うときは、歩行などの移動は止め、直立した状態から行う。

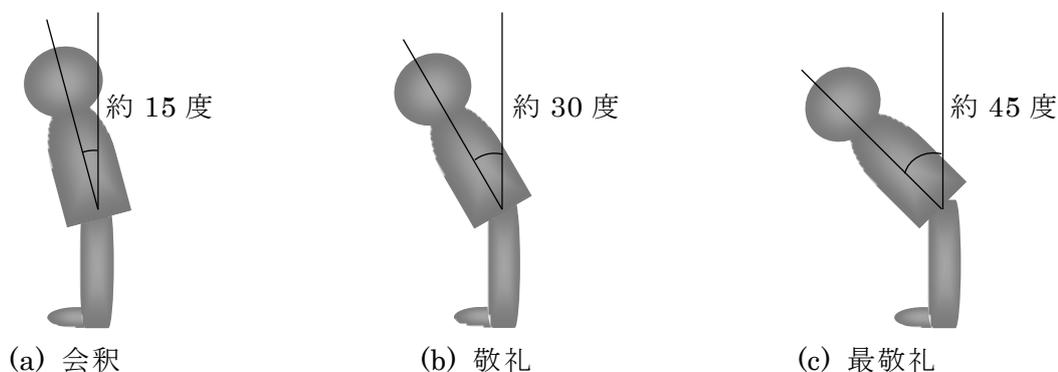


図 4.1 お辞儀の種類とお辞儀の角度

### 4.3 提案手法

お辞儀は日本では、挨拶や敬意を表す行為で、相手に対して上体を曲げる動作をする。お辞儀をされた方は、上体の変化を読み取って、お辞儀を受けたと判断する。よって、カメラも被験者の正面に設置すべきだが、お辞儀の種類は、上体の角度が重要であるため、カメラは被験者の側面に設置し、以下の過程でお辞儀を認識した。

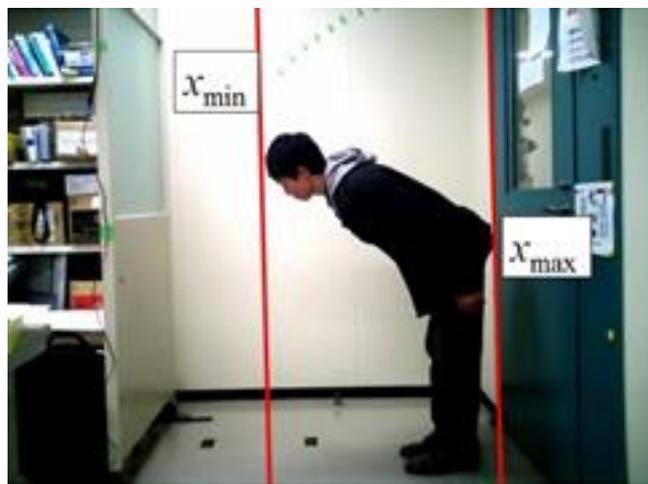
#### 4.3.1 関心領域の抽出

関心領域 (Region of interest : 以下 ROI) の抽出過程を図 4.2(a)~(c)に示す。図 4.2 (a) は直立時で、頭頂点  $y_{\min}$  から臀部  $y_{\max}$  までを ROI の  $y$  軸とする。図 4.2(b)は屈曲時で、頭頂点  $x_{\min}$  から臀部まで  $x_{\max}$  を ROI の  $x$  軸とする。よって、ROI は図 4.2(c)に示す四方となる。

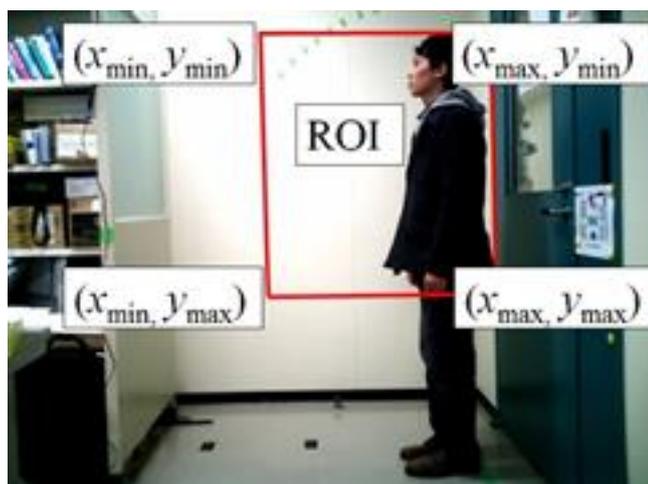
本研究ではお辞儀の屈曲を『上体を曲げ終えた状態』と定義し、ROI の範囲を指定してノイズを除去する。



(a) 直立時の ROI の  $y$  軸の抽出



(b) 屈曲時の ROI の  $x$  軸の抽出



(c) ROI の範囲の抽出

図 4.2 ROI の範囲

### 4.3.2 前処理

フィルタを使って画像の先鋭化をする。

ノイズ除去を行いお辞儀の輪郭を抽出するため、まずグレースケール化を行う。次に、バイラテラルフィルタを用いて画像の平滑化を行う。ガウシアンフィルタを用いることもあるが、輪郭がぼける性質があるため、本実験では使用しなかった。最後に、適応ヒストグラム均等化を行い、画像のコントラストを強調する。

### 4.3.3 オプティカルフローの導出

お辞儀の動きを抽出するために、オプティカルフローを求める。オプティカルフローを導出する方法には、ブロックマッチング法や勾配法などがある。

ブロックマッチング法は、ノイズに強いが、細かな動きが捉えられない、高速な処理が困難といったデメリットがある。一方の勾配法は、ブロックマッチング法とは逆に、細かな動きを捉えることができ、高速処理が可能である。しかし、ノイズに弱いというデメリットがある。提案手法ではリアルタイムの処理を考えているため、勾配法を用いてオプティカルフローを求めることにする。

オプティカルフローを求めるアルゴリズムは、Farneback 法[21]を用いる。Farneback 法は、Lucas-Kanade 法よりノイズに強いことで知られている[21]。お辞儀の動きは、オプティカルフローを時間積分し、求める。

$$b_{xy} = \int_0^T v_{xy}(t) dt \quad (4.1)$$

$v_{xy}(t)$  は、時刻  $t$  における画素  $I(x, y)$  におけるオプティカルフローである。

### 4.3.4 機械学習アルゴリズムを用いた識別

機械学習アルゴリズムを用いて、お辞儀の種類を識別する。説明変数は、4.3.3 節で抽出したお辞儀の動きを用いた場合と、屈曲時のグレースケール値を用いた場合の2通りを試した。また、目的変数は、お辞儀の種類とお辞儀以外の動作である。各画素のオプティカルフローを説明変数として入力し、お辞儀のパターンを目的変数として出力した。機械学習アルゴリズムが推定した動作が真の動作（入力データに対する目的変数）と同一であれば正解とした。機械学習アルゴリズムには、変数重要度が算出できる RandomForest[22]を

用いる。RandomForest は、識別する上で重要な変数を解析できる。変数重要度は、識別する上で重要な変数の度合いを表す。

## 4.4 実験

### 4.4.1 実験環境

実験環境を図 4.3 に示す。被験者の側面から Web カメラで動作を撮影する。被験者と Web カメラの距離は 2.7m とし、Web カメラの高さは 0.95m とした。被験者は、線にかかとをつけるよう立ち、線の中心が身体を中心となるよう立つ。

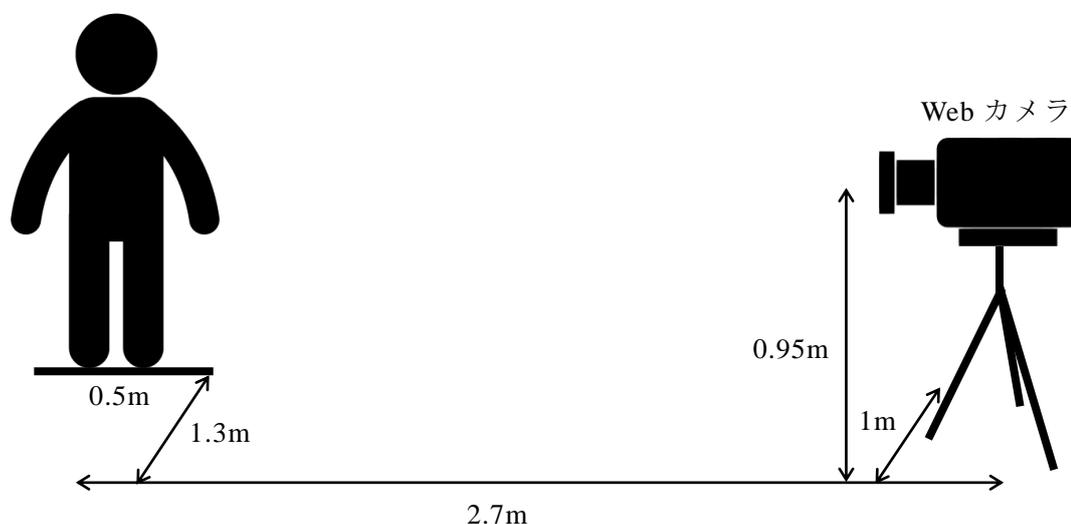


図 4.3 実験環境

### 4.4.2 実験方法

#### 4.4.2.1 実験準備

被験者は、20代男性10名で、お辞儀についての指導を受けた経験がない、つまり、お辞儀については素人である。

実験は、被験者にシチュエーションを指定し、各動作を10回ずつ行った。お辞儀の種類と指定したシチュエーションを表4.1に示す。

被験者には、実験前に次のような凡例を示した。

- ・足をそろえる
- ・屈曲時に背中を丸めない
- ・屈曲時に首を曲げない

- ・両手を横，あるいは前方に置く
- ・会釈は 15 度，敬礼は 30 度，最敬礼は 45 度のお辞儀をする
- ・お辞儀になっていない動作は首のみ屈曲

被験者には，実験前に自分が納得するまで練習を行ってもらった。練習の際は，壁に設置した分度器を使って，屈曲時の角度を確認できるようにした。

Webカメラの解像度は 640×480 ドットである。ROI のサイズは 290×310 ドットとした。

表 4.1 指示したお辞儀とシチュエーション

お辞儀の種類	動作時間	シチュエーション
会 釈 (bow ; BW)	2 秒以内	廊下で上司とすれ違いざま
敬 礼 (Salutation ; SL)	4 秒以内	来客時
最敬礼 (respectful bow ; RBW)	6 秒以内	感謝の気持ちを伝えるとき
お辞儀になっていない動作 (bad bow ; BBW)	4 秒以内	—

#### 4.4.2.2 実験過程

検証方法として，屈曲時の画像から抽出したグレースケール値で各動作を識別した場合とお辞儀の動きで各動作を識別した場合を比較した。これを検証 1 とする。次に，全被験者の動作を学習し，未知の被験者の動作を識別した結果と被験者ごとに各動作を学習し，各被験者の各動作を識別した場合を比較した。これを検証 2 とする，これらの検証結果から，被験者が，どのお辞儀をしたかを識別する。

##### [検証1]

屈曲時の画像を用いた識別は，お辞儀する際の過程の動きを考慮していない。検証 1 を行うことで，お辞儀の識別にお辞儀する際の過程が重要であることを示すことができる。

##### [検証2]

全被験者の動作を学習した場合，服の違いを考慮せず，お辞儀の個人差も考慮していない。検証 2 を行うことで，服の違いが各動作の識別に与える影響を示すことができる。また，お辞儀の個人差が各動作の識別に与える影響を示す。

屈曲時の画像は、動画を目視で確認し、それを手動で取得した後、グレースケール値に変換した。お辞儀の動きは、動画の0フレーム目から終了フレームまでのオプティカルフロー値を時間積分して求めた。

機械学習アルゴリズムには Random Forest を用いた。変数重要度は相対度数で表す。機械学習アルゴリズムのライブラリは統計解析ソフト R を用いた。説明変数の数は ROI のドット数から、 $290 \times 310 = 89900$  個となった。目的変数の数は、3種類のお辞儀とお辞儀以外の動作の合計4個である。評価値は、適合率 P と再現率 R、P と R の調和平均 F を用いる。

検証1では、1人をテストデータとし、それ以外をトレーニングデータとする 10-fold-cross-validation を行った。検証2では、被験者の各動作1個をテストデータとし、それ以外をトレーニングデータとする 10-fold-cross-validation を行った。

### 4.4.3 実験結果

#### [検証1]

グレースケール値を入力した際の識別結果を表 4.2 に示す。この表から、屈曲時の角度が類似している動作同士で誤識別していることがわかる。

グレースケール値を入力した際の変数重要度の相対度数分布を図 4.4 に示す。この結果から、最敬礼の際の頭頂点付近と手の位置付近の変数重要度が高いことがわかる。

表 4.2 グレースケール値を入力した際の識別結果 (1)

	BW	SL	DBW	BBW	R	P	F
BW	53	34	1	60	0.53	0.36	0.43
SL	22	33	28	8	0.33	0.36	0.35
DBW	0	32	71	0	0.71	0.69	0.70
BBW	25	1	0	32	0.32	0.55	0.41
AVG	-	-	-	-	0.47	0.49	0.47

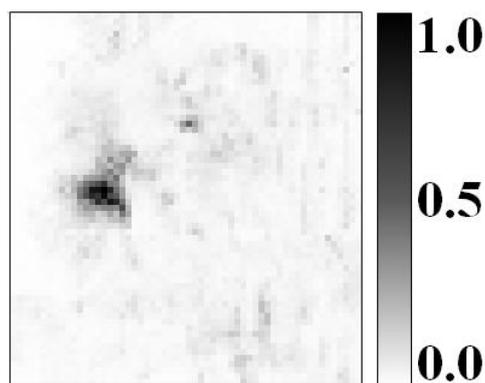


図 4.4 変数重要度の相対度数分布 (1)

次に、お辞儀の動きを入力した際の識別結果を表 4.3 に示す。これによると、屈曲時の角度が類似している動作同士で誤識別していたことがわかる。グレースケール値を入力した際の F 値の識別結果 (表 4.2) と、お辞儀の動きを入力した際の F 値の識別結果 (表 4.3) を比較すると、表 4.4 のように、すべての動作について、お辞儀の動きを入力した際の F 値の識別結果の方が高いことがわかる。

表 4.3 お辞儀の動きを入力した際の識別結果 (1)

	BW	SL	DBW	BBW	R	P	F
BW	59	21	0	26	0.59	0.56	0.57
SL	20	57	17	11	0.57	0.54	0.56
DBW	1	20	83	0	0.83	0.80	0.81
BBW	20	2	0	63	0.63	0.74	0.68
AVG	-	-	-	-	0.66	0.66	0.66

表 4.4 グレースケール値とお辞儀の動きの F 値の比較 (1)

	グレースケール値	お辞儀の動き	比較値
BW	0.43	0.57	0.14
SL	0.35	0.56	0.21
DBW	0.70	0.81	0.11
BBW	0.41	0.68	0.27
AVG	0.47	0.66	0.19

お辞儀の動きを入力した際の、変数重要度の相対度数分布を図 4.5 に示す。お辞儀の際の頭頂点の軌跡の変数重要度が高く、手の位置付近の変数重要度も高いことがわかった。特に、最敬礼の際は、頭頂点付近の変数重要度が高いことがわかった。

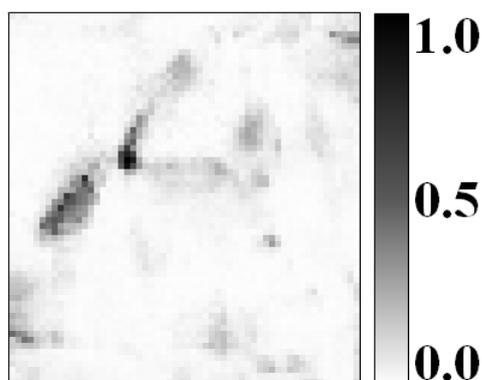


図 4.5 変数重要度の相対度数分布 (2)

#### [検証2]

グレースケール値を入力した際の識別結果を、表 4.5 に示す。屈曲時の角度が類似している動作同士で、誤識別していることがわかる。お辞儀の動きを入力した際の識別結果を表 4.6 に示す。表 4.5 と表 4.6 を比較すると、表 4.7 のように、すべての動作について、お辞儀の動きを入力した際の F 値の識別結果 (表 4.6) の方が高いことがわかる。

表 4.5 グレースケール値を入力した際の識別結果 (2)

	BW	SL	DBW	BBW	R	P	F
BW	95	2	0	32	0.94	0.74	0.83
SL	2	93	4	11	0.92	0.85	0.88
DBW	0	5	96	0	0.95	0.95	0.95
BBW	4	0	0	57	0.56	0.93	0.70
AVG	-	-	-	-	0.84	0.87	0.84

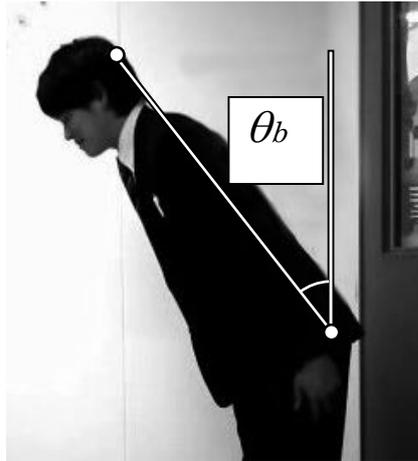
表 4.6 お辞儀の動きを入力した際の識別結果 (2)

	BW	SL	DBW	BBW	R	P	F
BW	96	3	0	12	0.96	0.86	0.91
SL	2	95	0	14	0.95	0.86	0.90
DBW	0	2	100	0	1.00	0.98	0.99
BBW	2	0	0	74	0.74	0.97	0.84
AVG	-	-	-	-	0.91	0.92	0.91

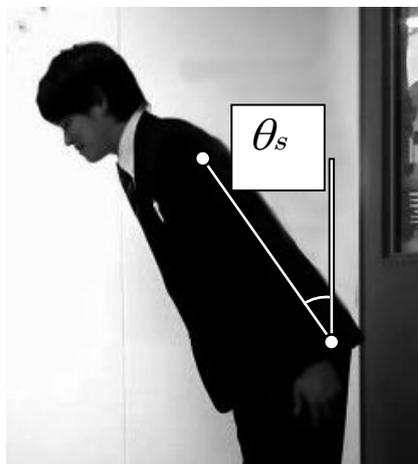
表 4.7 グレースケール値とお辞儀の動きの F 値の比較 (2)

	グレースケール値	お辞儀の動き	比較値
BW	0.83	0.91	0.08
SL	0.88	0.90	0.02
DBW	0.95	0.99	0.04
BBW	0.70	0.84	0.14
AVG	0.84	0.91	0.07

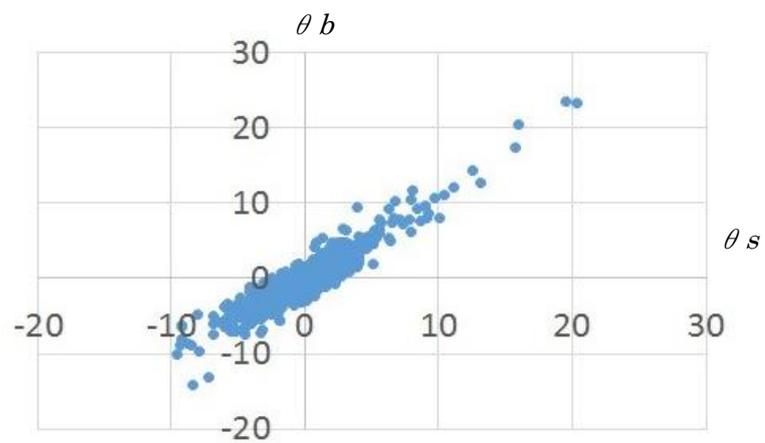
また、お辞儀の個人差が各動作の識別に影響を与えていることを裏付けるため、お辞儀時の後頭部から臀部までの角度と背部から臀部までの角度のばらつきを調べた。図 4.6 は、後頭部から臀部がなす角度を  $\theta_b$ 、背部から臀部がなす角度を  $\theta_s$  として、各動作の平均角度から各動作の測定値を引いた値を散布図で表したものである。この図から各角度が回数ごとにばらついていることがわかる。これらのことから、回数ごとの角度のばらつきも識別結果に影響を与えていることが示唆される。



(a) 頭頂部から臀部までがなす角度



(b) 背部から臀部までがなす角度



(c)  $\theta_b$  と  $\theta_s$  の平均値との差の散布図

図 4.6 角度  $\theta_b$ ,  $\theta_s$  と平均値との差のばらつき

#### 4.4.4 考察

図 4.4, 図 4.5 から, お辞儀を識別する上で身体の動きより頭頂点の動きが重要であることがわかった。このとき, 服の様相がお辞儀の識別に影響していることもわかった。その根拠として2つあげられる。

ひとつは, 検証1においてグレースケール値で識別した方が, オプティカルフロー（お辞儀の動き）で識別した場合よりも, すべての動作で低かったことである。オプティカルフローは, 現在のフレームと一つ後のフレームから動きベクトルを求める。このため, オプティカルフローは, 個人ごとに服の様相が異なっても追跡可能である。したがって, オプティカルフローは, 服の様相の影響を受けないといえるが, グレースケール値は, 服の様相によって値が異なるからである。

もうひとつは, 表 4.2 と表 4.5 から検証1のグレースケール値で識別した場合の方が, 検証2のグレースケール値で識別するよりもすべての F 値において低かったことである（表 4.8）。これは, 個人ごとに学習すると, 同一の服で屈曲時のグレースケール値を比較することになるため, 服の様相の影響を受けないからであろう。

表 4.8 検証1と検証2のグレースケール値での F 値の比較

	検証1のグレースケール値で識別	検証2のグレースケール値で識別	比較値
BW	0.43	0.83	0.40
SL	0.35	0.88	0.53
DBW	0.70	0.95	0.25
BBW	0.41	0.70	0.29
AVG	0.47	0.84	0.37

次に, お辞儀の動きの過程が, 識別に影響していることがわかった。このことは, 検証2の結果から考えられる。表 4.5 と表 4.6 から, グレースケール値で識別した方がオプティカルフローで識別した場合よりすべての動作で低かった。検証2では, 個人ごとに学習をしているため, 服の様相の影響はうけない。したがって, オプティカルフローとグレースケール値の違いは, お辞儀の過程を考慮するか否かである。

さらに、お辞儀に個人差が存在し、それが識別に影響していることがわかった。このことは、検証1と検証2のオプティカルフローで識別した結果から示唆される。表4.3と表4.6より、検証1のオプティカルフローで識別した方が、検証2よりもすべての動作のF値が低かった。お辞儀の動きを説明変数に用いている点は同様である。服の模様の影響も受けていない。異なる点は個人で学習を行っているか、全体で学習を行っているかの違いである。個人差は背丈とお辞儀の姿勢にある。図4.5から頭頂点の動きでお辞儀を識別している。首を曲げないよう指示を出したが、実際には首を曲げてお辞儀する人もいた。

表 4.9 検証1と検証2のオプティカルフローでのF値の比較

	検証1のオプティカルフローで識別	検証2のオプティカルフローで識別	比較値
BW	0.57	0.91	0.34
SL	0.56	0.90	0.34
DBW	0.81	0.99	0.18
BBW	0.68	0.84	0.16
AVG	0.66	0.91	0.25

## 4.5 おわりに

日本人にとってお辞儀は、感情表現のひとつであるため、良好な対人関係を築くための重要な動作となる。「おもてなしの国」日本の文化を世界に広める第一歩として、きれいなお辞儀をすることは重要であろう。2020年に東京オリンピック・パラリンピックを控え、その必要性はますます高まると思われる。よって、本システムの活用意義は十分にあると考える。

また、防犯カメラによる対象者のお辞儀の様子は、対象者が街中の防犯カメラ等で追跡される際の有意義な情報となりえる。なぜならば、挨拶を交わした相手の方が上位であるとわかれば、捜査が限定されることが期待できるからである。

本研究は、お辞儀の種類を認識する基礎的研究であるため、カメラの設置場所や撮影場所などの制約がある。今後一般化するためには、これらの制約を受けずに撮影・解析・判

定ができるものとしなければならない。たとえば、斜めから撮影された画像を、座標変換で解析しやすい位置に調整する方法などが考えられる。

また、防犯カメラを活用したシステムにすれば、日常的にお辞儀の種類を認識することができるようになる。この場合は上方からの撮影となるため、複数台のカメラの連携によって情報を補完することも考えなければならないが、今後そのような発展的な研究も進めていきたい。

## 第5章

### 結論

私が研究論文とした、「マルチエージェント」、「画像認識」、「機械学習」はいずれも人工知能の分野に属するという点では一致する。しかし、本来は、それぞれが深く研究されている分野である。私は、それらを網羅的に研究することによって、相互作用や相乗効果の可能性を探求する基礎ができたと感じている。

「マルチエージェント」、「画像認識」、「機械学習」をサブシステムとして捉えると、その上位となるメインシステムは、いろいろなサブシステムの組み合わせで実現することができるようになる。たとえば、エージェントの判断アルゴリズムに画像認識や機械学習を組み込めば、より現実に近い人間の行動を表現できるようになるだろう。人工知能の初期の狙いであった、「人間の知能そのものをもつ機械」に近づけるかもしれないのである。

人工知能のそれぞれの分野をサブシステムとし、必要に応じて組み合わせるという発想は、従来のソフトウェア工学に基づいたシステム設計と同じであり、システム設計を教育分野のひとつとしている私には、大変有意義な発見であった。

今後は、木村研究室で培った知識を、学問としての人工知能から、実用性のあるシステム設計とその教育に携わりたい。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、ご指導、ご鞭撻を賜りました、理工研究域 電子情報学系教授の木村春彦博士に心より感謝を申し上げます。木村博士には多くのご助力を賜り、あるときは叱咤激励し、またあるときは、大変多くの資料提供をしていただくなど、過分なまでのご指導をしていただきました。また、ほぼ毎週の会議から、研究者とはどうあるべきか、博士取得とは何たるかを教えていただきました。改めまして、心より感謝申し上げます。

研究遂行において、貴重なご指導、ご支援を賜りました同大学准教授の南保英孝博士に心より感謝申し上げます。特に、国際会議では、論文の添削だけでなく、旅行手続きのお世話役までしていただきました。おかげで、初めての国際会議ですが、安心して参加できそうです。

学会論文の記載において、貴重な情報を提供していただいた、立命館大学情報理工学部情報システム学科助教の梶原祐輔博士に心より感謝申し上げます。梶原博士には、論文が照会后判定となったときも、追加資料の提供とアドバイスなどもしていただきました。おかげで、無事に載録となりました。

私の将来の道を切り開いていただきました、小松短期大学学長の長野 勇学長に、心より感謝申し上げます。長野学長には、本大学院への進学のお勧め、研究分野のご助言、勤務におけるご配慮など、大変多くのご支援をいただきました。

最後になりますが、家庭を顧みず、この歳で学位取得を目指した私を、励まし支えてくれた妻に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 堀宗朗, 犬飼洋平, 小国健二, 市村強 : 地震発生時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究, 社会技術研究論文集, vol.3, pp138-145, 2005.
- [2] 近田康夫, 廣瀬智士, 城戸隆良 : CA を用いた避難シミュレーションに関する考察, 構造工学論文集, vol.49, pp217-224, 2003.
- [3] 新井健, 増田浩通, 落合哲郎 : 災害弱者を考慮したマルチエージェント避難シミュレーションモデル, 第 3 回 KKMAS コンペティション論文集, pp117-125, 2003.
- [4] 宇田川金幸, 増田浩通, 新井健 : 都心地区での災害時避難シミュレーションモデルの開発, 第 4 回 KKMAS コンペティション論文集, 2004.
- [5] 新淵恵介 : 同時多発火災における最適消火割当方法に関する研究, [http://mas.kke.co.jp/event/mas\\_competition5/result/07\\_paper.pdf](http://mas.kke.co.jp/event/mas_competition5/result/07_paper.pdf), 第 5 回 KKMAS コンペティション論文集, 2005.
- [6] 新淵恵介 : DIG への適応を目的としたマルチエージェント避難行動シミュレータの試験的開発, 第 10 回 KKMAS コンペティション論文集, 2010.
- [7] 伊藤悠太郎, 鈴木智彦 : エージェントアプローチによる群集流動のシミュレーション分析, [http://mas.kke.co.jp/event/mas\\_competition4/result/17\\_paper.pdf](http://mas.kke.co.jp/event/mas_competition4/result/17_paper.pdf), 第 4 回 KKMAS コンペティション論文集, pp195-202, 2004.
- [8] 兼田敏之 編集代表 : artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション, (株)構造計画研究所, 2010.
- [9] 小林隆一 : ビジュアル 流通の基本(日経文庫), 日本経済新聞出版社, 2008.
- [10] 「リターンライダーの“過信” 中高年バイク事故死増加 「若い頃ともう違う」注意を」, 産経ニュース, <http://www.sankei.com/affairs/news/141223/afr1412230028-n1.html>
- [11] イタルダ・インフォメーション (二輪車事故), 交通事故総合分析センター, [http://www.itarda.or.jp/itardainfomation/info07/info07\\_1.html#part5](http://www.itarda.or.jp/itardainfomation/info07/info07_1.html#part5)
- [12] 沖 良晃, 山田富美夫, 牧野浩志, 水谷博之 : AHS カーブ進入危険防止支援システムの実道検証, 東芝レビュー, Vol.59, No.4, pp.11-14, (2004.04)
- [13] 寺師慎屋, 中林昭一, 大山 卓, 徳田清仁, 中川正雄 : 見通しの悪い道路における車載ミリ波レーダの可能性, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.27, No.8, pp.197-202, (2003.02)
- [14] 吉浜勇樹 : 道路形状推定システム (特許 WO2012137354 A1) , トヨタ自動車株式

会社（公開日 2012.10.11）

- [15] 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, Ohmsha, (2008)
- [16] 力学で考えるオートバイの旋回動作について,  
<http://prime-racing.ready.jp/2006/03/01/力学で考えるオートバイの旋回動作について/>
- [17] 長尾智晴: 画像処理プログラミング入門, 昭晃堂, (2011)
- [18] 佐原真: “魏志倭人伝の考古学”, 岩波書店 (2003)
- [19] 柴崎直人: “いま生きる礼儀作法”, 新潮社 (2000)
- [20] 白井芳奈, 鈴木紀子, 阪田真巳子: “お辞儀の定量的分析: インタビュアーの振る舞いが挨拶行動に与える影響”, 電子情報通信学会技術研究報告, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.15, No.3, pp.145-150 (2013.5)
- [21] Farneback, G.: "Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion", Image Analysis, Springer Berlin Heidelberg, pp.363-370 (2003)
- [22] 平井有三: “はじめてのパターン認識”, 森北出版 (2012)
- [23] M.Hori, Y.Inukai, K.Oguni, and T.Ichimura (2005) Study on Developing Simulation Method for Prediction of Evacuation Processes after Earthquake. Socio Technica, Vol.3, pp138-145
- [24] Y.Chikada, T.Hirose, and T.Kido (2003) Evacuation Simulation by CA. Journal of Structural Engineering, Vol.49, pp217-224
- [25] K.Arai, H.Masuda, and T.Ochiai (2003) Multi-Agent Evacuation Simulation Model in Consideration of the Disaster Weak. Journal of KKMAS competition, Vol.3, pp117-125
- [26] K.Udagawa, H.Masuda, and K.Arai (2004) Development of Disaster Evacuation Simulation Model in the City Center District. Journal of KKMAS competition, Vol.4
- [27] K.Nibuchi (2005) A study on the Optimum Extinguishing Allocation Method in Multiple Simultaneous Fire. Journal of KKMAS competition, Vol.5
- [28] K.Nibuchi (2010) Test development of multi-agent evacuation simulator for the purpose of adaptation to DIGA. Journal of KKMAS competition, Vol.10
- [29] S.Ito, T.Suzuki (2004) Simulation Analysis of Crowd Flow by the Agent Approach. Journal of KKMAS competition, Vol.4
- [30] R.Kobayashi (2008) Basic visual distribution (Nikkei Bunko). Nikkei Publishing Inc.