博士学位論文

曲がり角における出会い頭の際の歩行者の行動判断モデルに関する研究

A Study on Decision Models for Determining the Behavior of Pedestrians Encountering at a Blind Corner

指導教員　山田　陽滋　教授

名古屋大学大学院　工学研究科

機械理工学専攻　機械情報システム工学分野

学籍番号　481042016

岡本　球夫

平成 25 年 4 月

要約

本研究は，衝突のリスクが高い死角を有する曲がり角で，歩行者が 1 対 1 ですれ違う場合にコーナーのイン側を通るか，もしくはアウト側を通るかのコース選択に関する歩行者の行動判断のモデル化を目的としている．

筆者が提案するモデルは，歩行者同士のイン側を取るための駆け引きや，有利不利に関する情報が明確でなく確信を持てない場合の行動など，従来の位置関係によって確定的に行動が決定するモデルでは再現できない人の心理的な特性を考慮している．そして，環境条件や相手との相互影響による判断特性の変化も考慮している．以上を考慮したモデル化によって，より実際に近い行動判断を再現できる点に本研究の意義がある．

本研究では，まず，研究対象であるＬ字の曲がり角において歩行者の行動調査を行い，歩行者の特徴的な行動特性と，行動を決定する際の判断指標に関して提案を行っている．

そして，現場調査で見られた特徴的な行動を再現するために，ゲーム理論をベースに証拠理論で拡張を行った行動判断モデルを提案し，シミュレーションによってその有効性を検証している．

さらに，上記の提案モデルをベースに，歩行者の性質や行動特性に関するタイプとその指標の定式化を行い，その行動特性が，環境条件や相手との相互影響に適応して変化する動的モデルへの拡張を行っている．この動的モデルでは，進化ゲーム理論と強化学習の一つであるアクター・クリティック法を用いて，2 階層のスキームにより学習を行っている．そして，この動的モデルについても，シミュレーションによる有効性の検証を行っている．

以上の結果，歩行者の位置関係だけでなく，心理的な要因も考慮した歩行者の行動判断を再現し，さらに，外部環境や相手との相互影響に適応してその判断特性を変化させる行動判断モデルの構築に成功した．

目次

第 1 章　緒言 (Introduction) 1
1.1　研究背景 1
1.1.1　建物での衝突事故について 1
1.1.2　超高齢社会と移動支援機器 7
1.2　本研究の目的と内容 13
1.3　関連研究 15
1.3.1　セル・オートマトンを用いた方法 16
1.3.2　ポテンシャルを用いた方法 18
1.3.3　パーソナルスペースを考慮する方法 19
1.3.4　効用の最大化を図る方法 21
1.3.5　衝突防止システムに関する研究 23
1.3.6　従来技術の課題と本研究の特徴 23
1.3.7　本研究の位置付けとアプローチ 26
1.4　本研究の構成 28

第 2 章　歩行者の行動調査 (Investigation into pedestrians' behaviors) 31
2.1　行動調査の目的 31
2.2　行動調査の内容 32
2.3　実施場所 32
2.3.1　調査方法 32
2.4　調査結果と分析 34
2.4.1　結果の概要 34
2.4.2　歩行者の行動特性 36

2.4.3　評価指標の設定 39
2.4.4　評価指標による分析結果 42
2.4.5　分析結果の考察とまとめ 45

第 3 章　静的行動判断モデルの構築
(Construction of static decision model for behavioral judgment) 48
3.1　問題設定 48
3.2　行動判断モデルの構築 49
3.2.1　ゲーム理論による駆け引きのモデル化 50
3.2.2　証拠理論による不確かさを考慮に入れたモデルの拡張 55
3.3　静的モデルを用いたシミュレーション 58
3.3.1　シミュレーションの目的 58
3.3.2　シミュレーションの方法 58
3.3.3　シミュレーション 1：モデルの有効性検証 63
3.3.4　シミュレーション 2：パラメータによる挙動の変化の確認 68
3.3.5　静的モデルの成果と課題 77

第 4 章　判断特性の変化を考慮した動的行動判断モデルへの拡張
(Model expansion by considering dynamics of judgment characteristics) 79
4.1　歩行者の性質と判断特性を示す指標 79
4.1.1　歩行者の性質の表現 79
4.1.2　歩行者の判断特性 80
4.2　シミュレーションによる指標の検証 85
4.3　動的モデルへの拡張 94
4.3.1　学習による判断特性の変化 94
4.3.2　学習のフレームワーク 95
4.3.3　進化ゲーム理論による戦略選択確率の学習 98
4.3.4　強化学習による利得構造の学習 100
4.4　動的モデルによるシミュレーション 101
4.4.1　シミュレーションの目的 101
4.4.2　シミュレーションの処理フロー 101

4.4.3 シミュレーション 1:判断シミュレータ 103
4.4.4 シミュレーション 2:行動シミュレータ 115
4.4.5 シミュレーションの結論 125

第 5 章 結論 (Conclusions) 126
5.1 まとめ 126
5.2 今後の展望 128

参考文献 130

図目次

1.1 Scenery in Blind Corner 2
1.2 Number of People Transported Emergency by Collision 3
1.3 Cause of Collisions 4
1.4 Place of Collisions 4
1.5 Severity of Collisions 5
1.6 Deaths due to Collision between Pedestrians 6
1.7 Population in USA 8
1.8 Market of Wheelchair in USA 8
1.9 Robotic Bed 9
1.10 Environmental Sensor System 11
1.11 Structure of Environment Sensor System 12
1.12 Model using Cellular Automaton 17
1.13 Social Force Mode 18
1.14 Shapes of Personal Space 19
1.15 Robin’s Model 20
1.16 Asano’s Model 22

2.1 Place Map of Investigation 33
2.2 Dimension of the Passage for Investigation 33
2.3 Pictures of the Passage 33
2.4 Sample of Incident 36
2.5 Behavior of Pedestrians 38
2.6 Evaluation of Superiority 40

2.7 Superiority(p) and Distance 43
2.8 Distribution of In/Out Selections 44
2.9 Distance and Course Selections 45
2.10 Example of Course Selection 46

3.1 One-to-one Encountering Situation at L-shaped Corner 49
3.2 Best Response 52
3.3 Transition of Selection Probabilities 54
3.4 Screen of Simulation 59
3.5 Human Walking Model 60
3.6 Walking Path Model 61
3.7 Flow Chart(Static Model) 62
3.8 Superiority(p) and Distance 65
3.9 An Example of Passing Routes 67
3.10 Simulation Settings 69
3.11 Conditions of Simulation 70
3.12 Example of Pedestrians' Routes 76
3.13 Behavior in Tactics 77

4.1 Difference between the Actual and the Prediction Criteria 81
4.2 Characteristics of Judgment 82
4.3 Indicators of Gain Structure 83
4.4 Changes in Judgment Types by Indicators 84
4.5 Simulation Settings 85
4.6 Best Response of Pedestrians (Setting 1-3) 88
4.7 Best Response of Pedestrians (Setting 4-6) 89
4.8 Best Response of Pedestrians (Setting 7-9) 90
4.9 Structure of Learning 95
4.10 Structure of Actor Critic 97
4.11 Tendency of Strategy Choice 99
4.12 Flow Chart(Dynamic Model) 102

4.13 Place Map of Investigation 104
4.14 Pictures of Investigation Place 105
4.15 Situation of Judging Simulator 107
4.16 Result of Judging Simulator (Case 1) 109
4.17 Result of Judging Simulator (Case 2) 110
4.18 Result of Judging Simulator (Case 3) 111
4.19 Simulation Setting (Behavior Simulator) 116
4.20 Path of Pedestrians (Setting 1) 119
4.21 Result of Behavior Simulator (Setting 1) 121
4.22 Path of Pedestrians (Setting 2) 122
4.23 Result of Behavior Simulator (Setting 2) 124

表目次

1.1 Benchmark for Behavior Model of Pedestrians 25

2.1 Specifications of Sensors 34
2.2 Total Results of Investigation 35
2.3 Parameters for Evaluation 41
2.4 Transition of Superiority(p) 43

3.1 Game Settings 50
3.2 Game Setting (Strategy Map) 51
3.3 Basic Probability Assignments 56
3.4 Parameters for Simulation 63
3.5 Transition of Superiority(p) 64
3.6 Parameters of Simulation for Safe Condition 71
3.7 Results of Simulation (Safety) 71
3.8 Results of Simulation (Efficiency) 72

4.1 Simulation Parameters 86
4.2 Combination of Pedestrians 86
4.3 Results of Simulation (Acquisition Rate of the Inner Course) 92
4.4 Result of Simulation (Behavior with Tactics) 93
4.5 Pedestrians' Gain (Judging Simulator) 103
4.6 Learning Parameter 103
4.7 Parameter of Pedestrians (Behavior Simulator) 117
4.8 Ratio of Course Selection 118

第 1 章

緒言 (Introduction)

1.1　研究背景

1.1.1　建物での衝突事故について

建築空間において，部屋同士や建物の出入り口をつなぎ合わせる通路は重要な役割を持っている．特に，2 つの通路が交わる交差通路や屈曲路における曲がり角の部分では，歩行者の通行が集中し，その流れが停滞する．したがって，その建物の使い勝手を向上するためにも，歩行者がスムーズで効率的に通行できるようにすることは重要である．また，屋内通路の曲がり角では，構造的に壁面によって死角が存在する．図 1.1 は曲がり角での死角の例であるが，図の (a) に示すように曲がり角の向こうに立て看板が立っている．図の (b)〜(d) はこの曲がり角に向って壁沿いに歩く歩行者からの 1 歩ごとの視点を示している．撮影時の歩幅は約 0.6m であり，1，2 歩目ではコーナーの内壁による死角でまったく看板は見えていない．3 歩目にやっと一部が見えるようになるが，この時はすでに交差する通路に進入する直前の位置となっている．そして，交差する通路部に入った 4 歩目にやっと死角から抜けて全体が見える．この場所は，周辺にいる人の声などにより少しざわついた環境であり，死角の向こう側から人が来ても足音などの音の情報ではその存在は判らない状況であった．このように死角の向こう側が確認できないため，直線の通路に較べて歩行者等の衝突事故の発生の可能性が高く，安全上でも大きな課題となっている．

東京消防庁の調査 (1) によれば，東京都内での日常生活の事故による緊急搬送者は病気を含む全

(a) Situation

(b) Step 1

(c) Step 2

(d) Step 3

(e) Step 4

Fig. 1.1　Scenery in Blind Corner

Source: 「緊急搬送データからみる日常生活の事故」(2011)

Fig. 1.2　Number of People Transported Emergency by Collision

体の 18% にあたり，毎年 10 万人以上で平成 16 年～平成 22 年の 5 年間に 539,136 人が搬送されている．そのうち，「衝突」を原因とする搬送者は「転倒」「落下」に次ぐ 3 番目に多く図 1.2 に示すように，毎年 5500～7000 人，5 年で 30,855 人が搬送されている．図 1.3 に，その 5 年間の衝突による搬送者に関する事故要因のトップ 10 を挙げているが，「人とぶつかる」事故が 2 位の 2 倍近く差をつけて 1 位の要因となっていることが判る． また図 1.4 は，それら搬送者に関する衝突の発生した場所を示すが，住宅と学校および店舗など屋内での事故発生が 7 割近くを占めている．さらに，図 1.5 にそれら搬送者の「衝突」による事故の重篤度を示すが，自動車の交通事故とは異なり，衝突する相手の質量や衝突時の相対速度があまり大きくないため，多くの場合は軽傷となっていることが判る．また，これと同様のデータが神戸市消防局における調査 (3) でも報告されている．さらに，国土交通省国土技術政策総合研究所の行った調査 (10) では，日常生活の事故のうち約 17% が衝突によるものであるという調査結果もでている．以上のように，日常生活の事故において衝突事故による搬送者は 3 番目に多く，その衝突の一番の要因は人同士によるものであり，そのほとんどが屋内で発生していることが判る．このように，比較的重篤度は低いものの，屋内環境において人同士の衝突事故が数多く発生している．さらに，データに表れないようなヒヤリハットについては，ハインリッヒの法則 (6) を取りあげるまでもなく，もっと頻繁に多くの件数が発生して

Source: 「緊急搬送データからみる日常生活の事故」(2011)

Fig. 1.3　Cause of Collisions

Source: 「緊急搬送データからみる日常生活の事故」(2011)

Fig. 1.4　Place of Collisions

Source: 「緊急搬送データからみる日常生活の事故」(2011)

Fig. 1.5　Severity of Collisions

いると考えられる．

筆者らの行った医療機関における歩行者の行動調査 (104) では，施設内の 1 か所の L 字通路において 2 日間のべ 10 時間弱の調査を行った．結果として，衝突事故は発生していないが，ヒヤリハットとみなされる状況も 2 件発生している．また，衝突に至る可能性があり回避の必要なすれ違いも 25 件確認できた．このように，身近な場所でも事故に至り得る事象が頻繁に発生していることが確認できた．

上記のように，人との衝突は軽微な事故が多いが，走っている人同士がぶつかったり，ぶつかった相手が高齢者であった場合など重篤な事故となり，実際に死亡に至る事故も報告されている．世界保健機関（WHO:World Health Organization) では，病名や傷害に関する体系的な分類として国際疾病分類 (ICD:International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems) として定めているが，歩行者同士の衝突に関連して以下の項目が設定されている (4).

W03　　他人との衝突等に伴う転倒

W51　　人との衝突

Source: 「人口動態調査」(2002-2011)

Fig. 1.6　Deaths due to Collision between Pedestrians

厚生省大臣官房統計情報部が実施した人口動態調査 (5) では，この ICD をもとに死亡者の分類を行っているが上記の人同士の衝突に起因する死者は，図 1.6 に示すように少数ではあるが毎年コンスタントに死者が出ており，重篤な事故も確実に発生していることが判る．

日本スポーツ振興センター (12) では，学校で発生している歯，口の怪我の原因の調査を行っているが学校で発生した怪我のうち，小学校では 15.7%，中学校では 17.4%，高校では 20.7% が人の衝突によるものと報告がなされている．このような結果を受けて，国や地方自治体でも人との衝突に対する対策が検討されている．文部科学省の学校施設安全対策部会では，人同士の衝突への対策が一つの課題として取り上げられており，その報告書 (9) にも衝突への対策検討に関する記述が見られる．また，国土技術政策総合研究所では，建物事故に関するプロジェクト研究 (10) を行っており，事故事例の収集やその対策方法の提案がなされている．そして，その成果は「建物事故予防ナレッジベース (11)」として WEB に掲載されている．

身体的な弱者で衝突により重篤な事故につながる可能性のある病院患者や高齢者，身体障がい者などが多い病院や福祉施設等では，衝突に関する事故事例の収集や事故対策の検討が行われてい

る [13][14][15]．さらに，人同士の衝突以外にも車いすやシニアカートに関する衝突の事故も問題となっている．車いすは人と比較し，通行に幅やスペースを必要とし，人のように急な加減速や小回りが利かない．さらに，操作者の視点が車いすの座席の上部にあり，衝突時にぶつかる車いすの前面部より後ろに位置するため，曲がり角において対向する歩行者や車いすなどの確認が遅れ，衝突が発生しやすい．そのため，医療機関では安全に向けた現場レベルでは職場改善活動 [16] が進められている．一方で，各都道府県でも，医療・福祉関連の施設の建物設計に関して検討が進められている．例えば，滋賀県のまちづくり条例の中に盛り込まれている施設整備マニュアル [17] には，車いすの事故への具体的な安全対策が記されている．

一方，屋内だけでなく屋外でも死角がある見通しのきかない交差点などで同様の衝突事故が発生している．車いすは交通法上歩行者の扱いとなるため，歩行者との衝突は交通事故の統計として挙がらないが，事故の具体事例は多数報告されており，その対策が課題となっている．警察庁は，日本交通管理技術協会に安全利用に関するマニュアル [18] 作りを委託し，車いすや電動カートの利用者に向けて安全利用の教育を行っている．

以上のことより，死角を有する曲がり角において，歩行者同士もしくは車いすや電動カートなどの出会い頭の衝突を防ぐための研究は非常に有意義である．

1.1.2　超高齢社会と移動支援機器

移動支援機器への要望

世界的な超高齢社会の進展により，世界の総人口のうち 65 歳以上の人の割合が，1950 年の 5.2% から 2010 年には 7.6% に上昇している．さらに，2060 年には 18.3% にまで上昇するものと見込まれており，急激な高齢化が予測されている [19]．この 65 歳以上の人の割合を高齢化率といい，高齢化に関する指標となる．WHO や国連の定義によると，この高齢化率が 7 %を超えると「高齢化社会」，14 %を超えると「高齢社会」，21 %を超えると「超高齢社会」と言われている．日本の高齢化率は 1950 年には 5% 未満であり，他の先進国に較べると下位にあった．しかし，1970 年には 7.1% の「高齢化社会」の水準となり，1995 年には 14.5% となり「高齢社会」となった．そして，2007 年にはついに 21.5% に到達し「超高齢社会」となっている．さらに，2050 年には 35.7% に達すると見込まれており，日本人の 3 人に 1 人が 65 歳以上という世界に例を見ない速度で高齢化が進んでいる [20]．

Source: Global Industry Analysts, Inc.,

Fig. 1.7　Population in USA

Source: Global Industry Analysts, Inc.,

Fig. 1.8　Market of Wheelchair in USA

Fig. 1.9　Robotic Bed

高齢化に伴って歩行の不自由な人の数も年々増加の傾向を示している．図 1.7 は，米国の人口とその内 65 歳以上の高齢者，および歩行の不自由な人の数の遷移を示している．グラフから判るように，65 歳以上の高齢者とともに歩行の不自由な人の数が増加している．また，図 1.8 は各種車いすの市場の統計 [21] を示している．米国の車いす市場は，政府の保険政策に大きな影響を受ける市場特性を持つが，高齢化の進展と生活レベルの向上を求める人の増加もあいまって，グラフに見られるように右肩上がりに市場が増加している．また，全世界の車いす市場も同様に高齢化の進展に伴って，2009 年に 39 億ドルであった市場が 2015 年には 79 億ドルに倍増するとの市場予測がなされている [22].

国際連合の総会において 1991 年に採択された「高齢化のための国連原則 [23]」では，各国のプログラムに，高齢者の自立と社会参加や自己実現等を組み入れることを奨励している．また近年，移動の質は高齢者の生活の質（QOL:Quality Of Life）の向上に繋がるとの研究結果 [24][25] が報告されている．土井らとホンダ技研工業株式会社は，パーソナルモビリティによる実証実験を通じて，移動の質が高齢者の QOL に与える効果の検証を行っている [26]．これらの研究から，高齢者の社会参加には自分で移動できる手段を有することが必須であり，QOL の向上に向けて移動の質の向上が非常に重要な位置づけにあることが判っている．

超高齢社会を迎えているに日本では，元気な日本復活のシナリオとして，2010 年に新成長戦略[27] が発行された．その柱の一つである「ライフ・イノベーション」の施策として，日本の強みでもある最先端のロボット技術を応用した生活支援ロボットの実用化に向けた開発や実証を推進している．特に移動支援ロボットは，上記の高齢者の QOL 向上に関する研究の成果もあり，ニーズも明確であるため，実用化に近いアプリケーションとして様々なロボットの開発が行われている．例えば，代表的なものとして図 1.9 に示すパナソニック株式会社のロボティックベッドが挙げられる[28]．このロボットは，ベッドで寝ているユーザを乗せたまま，ベッドの一部が分離して車椅子に変形することができる．下肢の不自由な高齢者や障がい者などの車いすユーザには，ちょっとどこかへ行こうと思っても，ベッドと車いす間を移乗するために介助者のサポートを必要とするユーザが多数いる．このロボティックベッドによれば，このような下肢の不自由な高齢者や障がい者も介助者を必要とせず，自分で自由に車いすで移動できるようになるため，QOL の向上や自立の促進が期待できる．その他にも，移動を支援するロボットには，一般社団法人ベーダ国際ロボット開発センターの「RODEM」[29] や，トヨタ自動車株式会社の「MOBIRO」[30]，アイシン精機株式会社と富士通株式会社が共同で開発を行ったインテリジェント車いすの「TAO Aicle」などが挙げられる．各社とも早期商品化を目指して開発を進めており，近い将来，移動支援ロボットによってユーザの QOL が向上することが期待される．

移動支援機器の安全の課題

前述したとおり，車椅子は歩行者に較べて幅もあり，加減速や操舵性能においても人のような機敏な対応はできない．また，操縦者の頭が車体前部に較べて後ろに位置することから，死角において相手の発見が歩行者の場合より遅くなる．加えて，操縦者の運転能力が健常者よりも劣る可能性もあり，人のような柔軟性に富んだ回避は困難であり，衝突のリスクも高くなる．また，車椅子の普及が少ない現在でこそ事故の件数はそれほど多くないが，高齢化の進展に伴って台数が増加すると，事故の件数も顕著になっていくと予測される．したがって，これらの移動支援機器に関して，より一層の安全対策が必要になると考えられる．

高齢者の QOL 向上への貢献が期待される生活支援ロボットも，その実用化に際して安全性の担保が課題となっている．世界的にも生活支援ロボットの国際安全規格にあたる ISO13482[32] の策定が進められ，2013 年に発行される予定である．日本でも独立行政法人の新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) が推進している生活支援ロボット実用化プロジェクト [33] において，国際標準化機構（International Organization for Standardization 略称:ISO）への提案や，認証機関の設立を

Fig. 1.10　Environmental Sensor System

目指した安全基準と試験方法の開発，および安全なロボットを実現するための安全技術の開発が進められている．移動支援ロボットの安全性に関して，衝突回避は大きな課題となっている．特に死角のある曲がり角においては，ロボット本体に搭載されたセンサの計測データだけでは回避は困難であり，歩行者の特性や挙動を把握し，その動きを予測することが非常に重要である．また，安全性ばかりが重視されるが，効率性や経済性，すなわちコストパフォーマンスの面がおろそかになると，ロボットを使う意義が無くなってしまう．したがって，安全とコストパフォーマンスの両立が必要となってくる．これらの課題を解決することでユーザが安心，安全にロボットを使用することができ，ロボットの普及を促して，多くの人がその恩恵にあずかることができる．

以上のように，車いすや移動支援ロボットなどの移動支援機器は，進展する超高齢社会において人々の QOL を向上させることが期待されている．しかし，そのためには安全性と効率性や経済性の確保が不可欠となる．そのため，特に暴露頻度や発生頻度が高いと考えられる死角のある曲がり角での衝突に関して，ロボットの屋内走行速度や人間等の動的に変化する環境の認識，さらに，安全とコストパフォーマンスの両面においてバランスの取れた対策手段が必要となる．

筆者らも，死角の存在する曲がり角における衝突対策に向けて，環境センサシステムの開発[(130)(131)(132)(133)] を行っている．環境センサシステムとは図 1.10 に示すように，死角のある曲がり角や交差点において，環境に分散配置したセンサ (Sensor) によってロボット (Mobile Robot) の死

(a)Block Diagram of Environment Sensor System

(b)Decision Process for Safe Action

Fig. 1.11　Structure of Environment Sensor System

角を歩いている歩行者の存在を検知する．そして，センサーで取得した情報 (Sensor Information) を無線の送信手段を通じてロボットへ送ることで，ロボットの操縦者に歩行者の存在を伝えたり，ロボットの制御則の変更や修正をその情報に応じて行い，衝突回避や衝突による被害を軽減させることを目指すシステムである．

システムの全体構造は, 図 1.11 に示すようなものである [104]．環境センサシステムでは図 1.11(a) に示すように，環境に配置されたセンサ (Environmental Sensor) によって取得された死角での情報 (Blind Information) を歩行者 (Pedestrian)，ロボットの操縦者 (Driver) およびロボット (Mobile Robot) に通知している．歩行者や操縦者は，死角 (Blind) によって限定された取得情報 (Visible Information) に通知された情報を付加し，これらの情報をもとに「どのように行動するべきか」の

判断を行い，衝突によるリスクを低減するように行動 (Action) をおこしている．ロボット (Mobile Robot) は，操縦者による操縦とロボット自体が環境センサシステムより取得した情報をもとに動作を制御する．ここで，安全な行動を起こすための人の行動決定のプロセスに着目すると，図 1.11(b) にあるように環境センサで収集された情報 (Information) をもとに，歩行者や操縦者の行動判断モデル (Behavioral Judgment Model) によって歩行者の行動 (Safe Action) が決定されている．

このシステムの運用や制御において，歩行者の行動判断の理解を深め，歩行者が持つ衝突回避のための安全ノウハウを活用することができれば，より効果的に安全かつ効率的な歩行者やロボットの通行を実現することができると考えられる．

1.2　本研究の目的と内容

歩行者は，曲がり角の出会い頭において衝突することなくすれ違いを行っているが，これは人間の衝突回避のための体得的な安全ノウハウであると言える．これは衝突を対象とするヒヤリハットよりも多くのデータを収集することができるため，このすれ違いの歩行者の行動をモデル化することで，安全ノウハウを裏付ける知見として活かせるものと考えられる．

本研究の目的は，死角のある曲がり角で 1 対 1 ですれ違う歩行者がコーナーのイン側を通ることを選択するか，アウト側を選択するかを決定する行動判断モデルを構築することである．ここで「行動判断」とは，一方の歩行者が実際に行動を起こす際に，複数の取り得る「行動」の候補，すなわちすれ違う相手に対して「コーナーのイン側経路を通るように進む」か，「コーナーのアウト側経路を通るように進む」の 2 つの行動の候補から状況に合わせて，動的に適切な行動を「判断」し，これを選択することを言う．本研究では，他方から来る歩行者とのすれ違いを行う際の行動選択に関する判断プロセスのモデル化を行い，モデルから得られた知見をもとに安全ノウハウとして衝突回避に貢献することを目指す．

曲がり角の出会い頭において，歩行者はコーナーのイン側の領域を通るのに，相手よりも相対的に不利な位置にあっても，相手がアウト側を通ることを期待して，あえてイン側を通行するといった「駆け引き」の行動に出ることがある．行動判断のモデルとして，ベースにゲーム理論の混合戦略を用いることで，このような特徴的な「駆け引き」の行動を規範的に示すことができる．さらに，証拠理論により拡張を図り，相手との距離によって，イン側の通行に関して相手より有利か否かが不明確になった場合に，歩行者がとる特徴的なコース選択をモデルとして表現することができる．

また，相手との関係や環境の変化に適応する学習をモデルに導入することで，歩行者の行動判断における判断特性の変化を表すことを可能としている．この学習では，ゲーム理論を進化ゲームへと拡張することで，歩行者の利得構造を報酬とする学習を行って，コースの選択確率を遷移させている．さらに歩行者の利得構造を強化学習の一つであるアクター・クリティック法によって学習する．このような 2 階層のフレームワークによって，歩行者の判断特性の変化を再現し，回避行動の規範モデルに適応性を与えている．また，これらの学習のために歩行者の性質，および判断特性のタイプを示す指標の定式化を行っている．これによって，「タカ派」「ハト派」という 2 つの歩行者の性質と，「強引」「弱気」「戦略」「着実」の 4 つの歩行者の判断特性のタイプを示している．学習による判断特性の変化の例として，「強引」タイプの歩行者同士が出会った場合に，はじめは張り合ってイン側を取り合っていたものが，どちらかがアウト側に避けると，その後は避けた側が「弱気」タイプへと判断特性を変化させることで，両歩行者がスムーズにイン側とアウト側を分け合い，衝突することなくすれ違うといった行動が挙げられる．

本研究でのモデル化は，1 対 1 の歩行者同士のすれ違いを対象にしている．現場の調査結果では，1 対多，多対多でのすれ違いにおいて，先頭同士が 1 対 1 のすれ違いを行って後ろのメンバはそのコース選択に従う，もしくは，グループとしてひと固まりとしてすれ違いを行うという，２つの行動パターンが観察されている．したがって，1 対 1 のモデル化の考え方が 1 対多，多対多でのすれ違いにおいても応用できると考える．

さらに，歩行者同士でなく一方が車いすや搭乗型の移動支援ロボットの場合でも，その加減速や操舵の特性などには違いがあるが，運転は人が行っていることから，行動判断に関しては同様の特性を示すと考える．

また，すれ違う通路の形状はＬ字通路を対象としてモデル化を行ったが，例えば十字路の交差点など，通路の形状が異なる場合においても，その局面として，歩行者同士が互いに死角となって接近することになる曲がり角において適用可能と考える．歩行者の行動特性を示すパラメータや経路モデルは異なる可能性はあるが，基本的な行動判断に関して同様の特性を示すと考える．一方，十字路などの交差点での通行に関しては，通路が一致するのではなく交差となるため，本研究とは別な問題設定であると考える．この場合の行動判断は，交差点に進入するか止まるかの判断の選択となる．したがって，自動車の運転での判断に近いものであり，従来の自動車分野の研究で進められてきた交差点における運転手の判断モデルが使えると考える．

本研究で示すように，すれ違う歩行者の位置関係だけで決定する判断に加えて，歩行者の行動判断に関する駆け引きや判断特性の変化など，歩行者のコース選択の判断に伴う心理的な影響も考

慮することで，より実際の歩行者に近い行動を再現することができる．ただし，ここで扱う心理的影響は,「行動経済学」や「経済心理学」で扱われる個人の状況依存による判断のゆがみは意図していない．コース取りに伴う損得に関する心理的影響であり，経済学等で用いられる規範的なモデルによる表現を目指す．また，本研究で提案するモデルを用いたシミュレーションの結果は，安全ノウハウを裏付ける知見として活かすことで，衝突のリスクが高く，通行の流れを滞らせる場所となっている死角を有する曲がり角において，安全対策や効率的な通行方法の検討，さらにそれらの効果の検証に用いることができる．新しい建物の設計や，新しくロボット等を導入する場合においても，得られた知見をもとに安全対策を事前に検討ができるという利点がある．高齢者や障がい者の QOL を向上する車いすや移動支援ロボットが共存通行する局面において，人間の安全とコストパフォーマンスとのバランスを考慮した対策を検討することができる．そして，それら移動支援機器の普及を促し，今後の超高齢社会に向けて，多くの人々が恩恵を得ることができるという観点で意義が深いと考える．

1.3　関連研究

歩行者の行動や行動判断のモデル化に関する研究では，これまでは主に建築，都市工学の分野で混雑緩和や避難時の誘導などの目的のために，歩行者を集団として扱ったマクロ的視点による研究が進められてきた．この場合は，集団を流体や粒子モデルとして扱う研究 [34][35][36] や動物の群れを参考にした研究 [37][38] などがある．これらはいずれも群全体を連続体モデルとして扱っており，大きな集団の行動の表現は有効であるが，例えば，曲がり角や交差点，障害物と出会った場合に，それぞれの歩行者の挙動がどのようになるかのようなミクロ的視点を扱うものではない．しかしながら，コンピュータの性能の向上にともない，歩行者の個別の動きからボトムアップ的な現象の再現を目指すマルチエージェントでのシミュレーションが可能となり，個別の歩行者の動きを再現するモデル化に関する研究も盛んに行われるようになってきた．本研究は，このミクロ的視点にもとづいたマルチエージェントモデルに関する研究に分類されるものであり，歩行者の衝突回避に関する行動や行動判断のモデリングに関する研究として位置づけられる．

なお，マルチエージェントモデルとは各々の内部属性に関連付けられた独自の意思決定メカニズムと行動計画に基づき, 独立したルールによって自立的に行動する複数のエージェントが, 相互作用を及ぼすことによって, システム全体の流れを生みだすモデルである．そして，その全体の流れによってエージェントの個々の動きが動的に変化するモデルである．

このマルチエージェントモデルによる歩行者の衝突回避に関する行動および行動判断のモデル化の技術は，大きくは以下のように分類することができる．

- セル・オートマトンを用いた方法
- ポテンシャルを用いた方法
- パーソナルスペースを考慮する方法
- 効用の最大化を図る方法

以下では，まず上記それぞれの方法の概要と主な文献について紹介を行う．上記のうち，セルオートマトンやポテンシャルを用いた方法は，古くから多く取り組まれてきた基本的なモデルとして紹介する．本研究のモデルは，歩行者の心理的特性を考慮するものであり，パーソナルスペースは人間の心理的特性を用いた例として挙げる．また，本研究は歩行者の損得に関する心理的特性を考慮したコース選択を行うが，効用の最大化を図る方法はそのコース選択に関する従来モデルとして説明する．歩行者のモデル化以外にも，自動車や移動ロボット分野において，これら効用によるコース選択や心理的特性を用いたモデルに関連する研究があり，これについても併せて紹介する．さらに，参考としてモデル化以外の衝突防止システムに関する研究についても紹介を行う．

そして，次に関連研究との対比から本研究の特徴を明らかにする．さらに，行動判断をモデル化する目的の観点から，本研究と従来の期待効用モデルの本質的な差異に言及し，その独創性を主張する．

1.3.1　セル・オートマトンを用いた方法

セル・オートマトン（Cellular Automaton，以下：CA）とは，Neumann[39] らが生物の自己複製機能を模擬する目的で考案したものである．空間をグリッドによって分割したセルがそれぞれの値を持っており，これが隣接するセルの値をもとに一定のルールに則って次のステップでの値を決めていく．歩行者の行動を決定するためのモデルでは，セル遷移ルールに従って次の時刻の歩行者位置を予測する．一般的にセル遷移ルールは，近傍のセルの状態によって規定される．セルの状態とは，「歩行者が存在する」「障害物である」「何も存在しない」などの各種の状態を指すものであり，次の時刻における歩行者の位置は，近傍のセルのいずれかとなる．多くの場合，グリッドの間隔を一定とし，全歩行者に同じ遷移ルールを与える．ただし，遷移ルールを複雑にすることにより，各歩行者の移動速度が異なるモデルや予測位置候補数を増加させて，複雑な動きを表現することも可

Fig. 1.12　Model using Cellular Automaton

能である．

大鋳ら [40] は，局所的なルールを用いた CA の手法によって避難流動を再現する研究を行っている．その研究では，衝突回避に関して同じセルに進む歩行者のうち，ランダムにそのセルに進入する歩行者を決定し，他の歩行者は元のセルに留まることで回避を行う様子を表現している．図 1.12 は，このモデルによる歩行者の挙動を図示したものである．左図のように，最初は 3 名の歩行者がそれぞれ赤，青，緑のセルにいるものとする．それぞれの歩行者は同色の線で囲まれた周囲のセルに移動できるものとし，この時は矢印の方向にある同じセルに進もうとしているとする．結局，右図に示すようにランダムに選択された赤の歩行者が目標のセルに進み，他の歩行者はその場に留まっている．このようなモデルとすることで，避難時に歩行者が出口に集中して渋滞する様子を再現している．Schadschneider[41] は，歩行者が各時刻において現在のセルの周囲にある数セルのいずれかに進むものとし，それぞれのセルに移動する確率を現在速度に基づいて算出するモデルを提案している．また，佐野ら [42] はセルに対応した微分方程式モデルを提唱し，これによる回避行動を再現している．その他では，主に避難行動に関する歩行者の行動モデルにおいて，さまざまな方法 [43][44][45][46][47] が提案されている．

CA によるモデル化では，モデルがシンプルで理解しやすく，セルの遷移に関して比較的自由にルール化ができるメリットがある．一方で，本来連続的な空間をセルに分割するため，現実の歩行者の挙動に制限を与えてしまうというデメリットがある．また，逆に連続的な空間での挙動を表現するには遷移ルールが複雑になりすぎるという欠点を有する．

Fig. 1.13　Social Force Mode

1.3.2　ポテンシャルを用いた方法

ポテンシャルを用いた方法では，物理学の重力やクーロン力などポテンシャルに類似のものを歩行者の通行空間に設定し，そのポテンシャルによって与えられる力の合力によって，歩行者の行動を決定する．歩行者へ与えるポテンシャル力の表現や，ポテンシャルを考慮する対象には様々なものが提案されている．

Helbing[51] は，図 1.13 に示すような社会心理学的な要素と物理的な力を結びつけた Social Force Model を提案している．目的地 (Goal) に向う歩行者 (Agent i) に対して，障害物 (図では壁:Wall) や他の歩行者 (Agent j) から受ける反力 (f_{iW}，f_{ij}) と，目的地からの引力 (f_{iG}) を設定し，これらの力の合力によって歩行者の運動方程式を解くことで行動を決定している．その他の研究では，岡崎[48] は磁気ポテンシャルを応用したモデルを提案しており，別の歩行者や障害物との間に磁石の同極による反発力にあたる力を設定することで歩行者の行動を決定している．清野ら[50] は個別要素法 (Distinct Element Method) と呼ばれる方法を用いている．人間を円形要素と考え，要素間の力の伝達を円形要素の接触点におけるバネによって表現し，これらのバネによって与えられる力によって各個体の運動方程式を解くことで歩行者の行動を算出している．また，Teknomo ら[54] は，歩行者間の距離に応じて 2 種類の衝突回避を考慮している．これら以外にもさまざまな研究[55] が行わ

(a) Shibuya's Research　　(b) Osaragi's Research

Fig. 1.14　Shapes of Personal Space

れている．

また，この方法は物理的な式で表現される合理的で判りやすいモデルであるため，移動型ロボットの障害物回避に関する研究において様々な方法 (56)(57) が提案されている．人間の行動に関しては，モデルの計算が容易であり，簡単な環境においては実際の現象に一致するが，一方で，複雑な環境においては行動が複雑になりすぎる可能性があり，また心理的な要素を考慮していないため，必ずしも歩行者の行動とは一致しないという欠点がある．

1.3.3　パーソナルスペースを考慮する方法

パーソナルスペース (Personal Space)(58) とは，個人の身体を直接取り巻く，目で見ることが出来ない空間領域であり，他人に近付かれると不快に感じる空間である．したがって，パーソナルスペースは，すれ違う際にどのようによけるのか，相手とはどれくらいの距離を空けるのかなど，歩行者の行動にも大きく影響を与えていると考えられている．例えば，渋谷ら (60) は歩行者のパーソナルスペースの形態について調査を行っている．大佛ら (63) は，歩行者の経路を心理的なストレスによって生じるものと考え，ストレス関数の概念を導入した歩行者の行動モデルを構築している．パーソナルスペースは簡易的に円で表す場合も多いが，詳細な調査研究によって進行方向に伸びた形状で示されることが判っている．図 1.14 は，以上の 2 つの研究のパーソナルスペースを図示したものであり，いずれも上方が進行方向を示している．(a) は渋谷らの研究での調査結果を示しており，ひし形の前方を伸ばした形状としている．その大きさは接近する側と接近される側の男女の

Fig. 1.15　Robin's Model

組合せで変化することが報告されている．(b) は大佛らの研究でモデル化された心理的ストレスを感じる領域を示しており，半円を引き延ばした形状をしている．そのパラメータは，実際の歩行者の歩行経路から推定を行っている．また，高久ら [61] は回避距離と通路の形態や幅との関係に関する調査を行っている．建部ら [64][94] は歩行者の回避行動について，歩行者の向き，歩行者の人数，性別に着目して統計的な分析を行っている．依田ら [65] は，人間同士のすれ違いでの回避行動について，人物が静止している場合と歩行している場合で回避領域に関する実験を行っている．また，回避経路のデータをもとにその回避行動特性を抽出し，そのモデル化を行っている [66]．山本ら [67] は，歩行者が交差する場合の減速による回避について解析を行っている．Bierlaire ら [68] は，歩行者の踏み出す方向に関する意思決定について，時空間的な解像度による分類を行っている．また，Collett ら [69] は女性と男性の性差による行動の違いに関して調査を行っている．Manenti ら [70] は歩行者がグループとなって歩く時，それぞれの歩行者はどのような挙動を取るのかに関してモデル化を行っている．

その他にも多くの研究 [71][72][75][76][68] で，パーソナルスペースを考慮した歩行者の挙動のモデル化が取り組まれている．また，関連する研究として，日比谷ら [62] は交差する経路における車椅子利用者の挙動の調査を行っている．

1.3.4　効用の最大化を図る方法

上記までに述べた方法に関しては，行動を判断する瞬間の環境条件によって，歩行者の行動が一意に決定されている．しかし，実際には移動可能な経路や位置はいくつか候補があり，その中から最適なものが選択されているものと考えられる．効用の最大化を図る方法では，各歩行者に対し，移動可能な経路や位置を離散的に多数の選択肢として与え，その中から最大効用をとる選択肢に進む．この方法の利点は，様々な歩行者の行動特性や環境条件に合わせて，選択方法を変えることで，より実際の歩行者の挙動に近い挙動を再現できることである．すなわち他の歩行者との相互関係を考慮して回避しつつ，ゴールに向けた次の 1 歩を選択するという一連の挙動を表現できる．この方法によるモデル化に関する研究には，次のようなものがある．例えば，Antonini ら [77] や，Robin ら [78] は，歩行者の次の位置の選択肢を扇形とし，それぞれの選択肢に進む確率を Cross Nested Logit により計算する．ここで，効用関数には，目的地に近づく効用，方向転換の不効用，加減速の不効用を考慮している．図 1.15 は Robin らの経路選択モデルを示している．このモデルでは歩行者の経路の選択肢として，11 通りの方向と加減速による 3 通りの距離によって計 33 通りの選択肢を設定している．これらの経路の選択肢に対して，下式の 5 つの観点により効用を算出して経路を決定している．

$$V_{vdn} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \tag{1.1}$$

ここで，

V_{vdn}　：効用関数

V_1　：現在の進行方向を維持する選択肢に高い効用を与える要素

V_2　：目的地に近づく選択肢に高い効用を与える要素

V_3　：加減速を行わない選択肢に高い効用を与える要素

V_4　：前方に追従可能な人物がいる選択肢に高い効用を与える要素

V_5　：前方から人物が接近しない選択肢に高い効用を与える要素

また，Hoogendoorn[79] は，他の歩行者に接近する損失と目的の方向に向かう利得とを考え，効用を最大化して進行方向を決定するモデルを提案している．衝突の可能性のある相手の歩行者の行動を予測して自分の経路を選択するモデルについてもいくつか提案されている．この研究は移動ロボットの分野で進んでいる技術であり，Berg ら [80] は，移動物同士の衝突回避を行うアルゴリズムの一つである Velocity Obstacles という概念を，歩行者の行動モデルに導入している．また，浅野

(a) Selectable Range for Velocity Vector

(b) Speed Control for Collision Avoidance

Fig. 1.16　Asano's Model

ら [81] は，交差する相手の行動を先読みし，交差の可能性のある時間と領域を通ることを避けるモデルを提案している．図 1.16 は浅野らのモデルを示している．(a) は歩行者 i に対して，選択可能な歩行者の速度ベクトルの集合を示しており，歩行者の希望速度を V_f，現在の速度を $V_i(t)$ とし，選択可能な方向角の上限を ψ としている．このような方向の範囲で他の歩行者や壁の無い方向への移動を選択する．また，交差する歩行者との衝突を回避するため，(b) のように別の歩行者 j の行動を先読みして通過待ちを行うことを考慮している．

この方法では，筆者らが本研究で提案するような，歩行者の通行の経路の選択肢に関しては別の

方法で算出しておき，どの行動を選択するのか，すなわち行動判断に関して論じているモデルもある．効用最大化の判断に関しては，自動車分野のマルチエージェントシミュレータにおける交差点等での運転手の判断モデルでの研究が進んでいる．例えば，喜多ら [82][98] のようにゲーム理論を用いた研究も多いが，歩行者と自動車では速度のスケールが異なるため，判断に要するタイミングが，歩行者には一歩一歩近づく間に相手を見ながら相手の行動を見る時間があるのに対し，自動車は一瞬での判断が要求される．そして，歩行者モデルが経路を算出することを目的とするのに対し，自動車分野でのモデルは決まった経路を進むか／止まるかの判断を行うことに主眼が置かれている．また，衝突が直接重篤な事故につながる可能性があり，判断の結果も歩行者の判断に対して保守的になるため，その判断にかなりの違いがあると考えられる．従って，これら自動車分野の判断モデルの研究は，参考になるがそのまま流用することはできない．

1.3.5　衝突防止システムに関する研究

衝突を防止することを目的とする研究では，上記のような対象となる人間の行動やその判断をモデル化し，知見として活かすことで衝突を防止しようとする研究以外に，例えば，音声や視覚により事前情報を与える衝突防止システムに関する研究開発も盛んに行われている．特に，自動車の分野では ITS(Intelligent Transportation System) に関連して様々な研究が行われている．例えば，岡田ら [84] は事故の防止のため，交差点での情報提示に関する研究を行っている．また，唐沢 [85] は車車間通信を用いて車の接近を音声で伝える電波カーブミラーに関する研究を行っている．歩行者同士の衝突防止に関しては，横山ら [86] が屋内の曲がり角において死角にいる歩行者の接近感を提示することで衝突を防ぐシステムの開発を行っている．これらの研究内容に関しては，本研究のモデル化によって明らかになった知見を衝突防止に活かす具体的な方策として検討したい．

1.3.6　従来技術の課題と本研究の特徴

上記に挙げた従来の研究において，セル・オートマトンやポテンシャルを用いたモデル化は簡易的なものであり，より実態に近い歩行者の挙動を表現するためには，人間の心理的特性を考慮したモデル化が欠かせない．リアリティを増すためには，複数の行動選択肢から相手との関係や環境条件等により最適な行動を選択する方法の導入も不可欠である．しかし従来の研究例では，行動選択において自らの行動を一意に決定することを前提としており，相手との駆け引きなど，人の行動心理的な影響による確率的な行動の変化を考慮するものではない．また，その行動を決定するための

判断基準が，相手との関係や環境条件によって変化していくことも想定されていない．

次章の歩行者の行動調査において，曲がり角での出会い頭の際に，歩行者は相手とどちらがコーナーのイン側をとり，どちらがアウト側に避けるのかに関して必ずしも両者の位置関係によって決定しておらず，相手との駆け引きによるものと考えられるコース選択が見られた．また，両歩行者間の距離が離れた場合にも，同様に位置関係に従わないコース選択を行う様子が確認されている．

また，例えば曲がり角で出会った 2 人の歩行者が，どちらも強気でイン側をゆずらないような性格であっても，両者がイン側のコース選択を選択し続けて衝突することはない．かならず途中でどちらかがアウト側に避けて，その後はスムーズにイン側とアウト側を分け合って進んでいる．このように，相手との相互関係や環境条件によって，途中でコース選択に関する判断特性が変化していくことが考えられるが，このような歩行者の判断特性の変化を再現するモデル化は，これまで研究されていない．

そこで，本研究では，そのような駆け引きや情報の不確かさに基づく行動など，通常の合理的な判断とは異なる人間特有の特徴的な行動判断に関してモデル化を行う．さらに，その判断特性の変化のメカニズムを提案し，これを再現するモデル化への拡張を図るものである．

このようなモデル化によれば，相手との駆け引きなど，人の行動心理的な影響による確率的な行動の変化や，相手との相互関係や環境条件による判断特性の変化を再現することができ，より実態に近い歩行者の行動をシミュレートできる．そして，このモデルを用いたシミュレーションによって，歩行者同士の衝突に対して効果的な安全対策の検討や，実施しようとしている安全対策の効果を確認することができる．さらに，モデルより得られた知見を活かすことで，車いすや移動ロボットの安全かつ効率的運用に関して，より効果的な対策を検討できる．

なお，表 1.1 に，本研究で提案する方法および従来の方法に関するベンチマークを示す．以下に，この表の説明を簡単に示す．

表の上 3 段は方式を説明している．まず 1 段目の「経路の設定方法」に関して，それぞれの方式の説明を行う．従来の方法 ① セルオートマトンを用いた方法 (以降，方法 ①) では，歩行者の移動空間を領域分割したセル単位で行き先が選ばれる．一方，従来の方法 ② ポテンシャルを用いた方法 (以降，方法 ②) では，ポテンシャルの合力により進行方法のベクトルが決定される．従来の方法 ③ パーソナルスペースを考慮する方法 (以降，方法 ③) では，人の心理的な距離感によって経路が設定される．また，従来の方法 ④ 効用の最大化を図る方法 (以降, 方法 ④) では，前記の方法 ② や方法 ③ なども考慮しながら歩行者の経路を複数設定し，これに対して効用が最大化するように経路が選択される．本研究で提案の方法では，方法 ④ と同様に経路候補の中から経路が選択される．

Table 1.1　Benchmark for Behavior Model of Pedestrians

		本研究で提案の方法	従来の方法			
			①セル･オートマトンを用いた方法	②ポテンシャルを用いた方法	③パーソナルスペースを考慮する方法	④効用の最大化を図る方法
方式	経路の設定方法	経路候補から選択	移動先セルを算出	経路を算出	経路を算出	経路候補から選択
	心理的要因の考慮	位置関係＋経路選定	考慮無し	考慮無し	位置関係のみ	位置関係のみ
	経路の決定方法	確定的＋確率的	確定的＋確率的可	確定的	確定的	確定的
比較	経路の精密さ	◎	×	◎	◎	◎
	経路決定の自由度	◎	◎	×	×	◎
	心理的行動の再現	◎	×	×	△	△

ただし，方法 ④ との違いとして，その選択方法に関して行動心理的な影響が考慮されている．上記のように経路選定における心理的要因の考慮が提案の方法と従来の方法の最大の違いである．2 段目の「心理的要因の考慮」に関しては，方法 ① や方法 ② では心理的要因が特に考慮されていない．また，方法 ③ や方法 ④ では，パーソナルスペースによって位置関係における心理的要因を考慮しているが，例えば，別の歩行者との駆け引きのように経路選択に関する心理的要因は考慮していない．他方，提案の方法では位置関係だけでなく，経路選定においても心理的要因が考慮されている．3 段目は「経路の決定方法」に関しては，方法 ② は環境との位置関係でポテンシャルを設定し，そのポテンシャルの合力によって行動が決定しているため，環境との物理的な位置関係によって確定的に経路が決定される．方法 ③ は環境との位置関係と心理的な距離に基づいて行動が決定されており，これも位置関係が確定すれば経路は確定的に決定される．方法 ④ も同様に，その効用は位置関係で決定されるため，経路も確定的に決定される．方法 ① については，通常は周辺のセルの状況で次にどこへ向かうかが決定されるため，基本は確定的に決定が行われるが，例えば複数の歩行者が同じセルに向う場合，ランダムにこれを決定するなど研究によっては，確率的に決定が行われる．提案法では，例えば心理的な要因で経路を選定する場合に，確率的にその経路が選定

される．

表の下 3 段では，上記の方式を踏まえた比較評価を行った．先ず「経路の精緻さ」に関して，方法 ① は歩行者の動作単位が空間を分割したセルになり，行動の精密さはそのセルサイズに依存するため×にしている．その他の方法に関しては，特にそのような制限はないため◎としている．「経路決定の自由度」に関して，方法 ② は経路の算出がポテンシャルの合力によるので，そこから外れる特別な動きなどは設定できない．方法 ③ も同様にパーソナルスペースで行動が限定されるため自由度は高くない．したがって，方法 ② と方法 ③ の 2 つは×としている. 提案の方法を含めて，その他の方法についてはそのような制限がないため評価は◎としている．また，「心理的行動の再現」に関しては，上記の「心理的要因の考慮」と同様に方法 ① と方法 ② は，心理的要因が考慮されていないため×としている．また，方法 ③ と方法 ④ については，心理的影響による行動のうちパーソナルスペースにまつわる行動のみが再現できるため△としている．一方，提案の方法は，パーソナルスペースだけでなく，判断に関する心理的な影響，すなわち対向する相手との駆け引きや，その判断特性が変化する様子も再現できるため◎の評価としている．

以上のベンチマークに示すように，本研究での提案の方法は従来の方法と比較し，より実際の歩行者に近い挙動を再現できると考える．

1.3.7　本研究の位置付けとアプローチ

歩行者の心理的要因を考慮したモデル化に関して，本研究では次の枠組みで研究を進めている．人間の行動あるいは意思決定に関するモデル構築に関連して，Schoemaker[100] が，Kahneman らを起点とする行動経済学を基盤とした期待効用モデル [101][102] に対し，次の３つの目的別分類を行っている．

1. 記述モデル
   人間行動を予見するだけでなく，モデルを作る時に設定された公理が現実と合っているか，モデルにおいてなされる情報処理が人間の実状と合っているか，すなわち，モデルによる結果だけでなく，途中経過が人間の実情に合っているかが問題になる．
2. 予見的 (predictive) あるいは実証的 (positivistic) モデル
   公理や情報処理のメカニズムの現実性は問題にならない．事象構造をモデルとして記述し，人間行動をどの程度高い精度で予見できるか，あるいは実証できるかが問題となる，
3. 規範的あるいは処方的 (prescriptive) モデル

工学における設計や経営科学における意思決定に関する人間行動は一般に複雑であり，そのための設計や意思決定を少しでも改良するための期待効用を規範とするモデルで，より良い決定結果が達成できることが問題となる．

これら 3 つの分類は目的だけでなく，モデルのレベルを表すものと考えることができる．**3** は事象の構造を記述するレベル．**2** はそのモデルで実証もしくは予見ができるレベル．ただし，処理が人間の実情と一致する必要がない．そして，**1** は結果だけでなく途中の過程までも人間の実情に合っているもっとも高度なレベルとなる．

本論文をモデル分類に当てはめると，直接 **1** を目指すものではなく，**3** の事象の構造記述を行い，さらに **2** 予見性を高めるモデルの構築を目指し，実証に向けた取り組みを行っている位置づけとなる．取り組みの目的についても，まず個別の事象の構造的理解すなわち，曲がり角における歩行者の出会い頭でのすれ違い時におけるコース選択に関する行動判断のモデル化を行い，そのモデル化から得られた知見をもとに安全ノウハウとして衝突回避に貢献することを目的としている．このような個別の構造的な分析からモデルを構築し，予測へと活かしていくというアプローチに基づいた人間の行動分析に関するモデル化の研究は，画像処理の例で人間個人の動作を対象としているが O’Rourke(103) が早くに行っている．また，歩行者の行動のモデル化においても岡崎 (48) が同様のアプローチで取り組んでいる．

本研究においても，まずは曲がり角の出会い頭のすれ違いにおいて見られた典型的な事象である駆け引きについて人間の行動の様を，ゲーム理論をベースとしたモデルによって規範的に示すことを第 1 の目的として目指している．ここで，本研究では歩行者の行動から安全に関する知見を効率よく得るために，実態の調査において，ほとんど発生しない「衝突」を対象とするヒヤリハットではなく，多くのデータを収集できる「すれ違いでの歩行者の挙動」を衝突回避のために人間が示す体得的な「安全ノウハウ」として考え，そのモデル化に取り組んでいる．

そして，得られた規範的モデルは，環境等による影響を強化学習により拡張し，精度を上げることで，例えば，出会い頭の 2 歩目までが駆け引きが表れる可能性が高いため，すれ違うまでに 3 歩の猶予を与えるよう早期に相手の情報を知らせるべきであるなど，回避行動を説明する規範モデルに適応性を与えることを第 2 の目的としている．ここで，知見として活かすために汎用性が必要となるが，現場調査の全ての例にモデルが有効であることと，追加で他の環境でのすれ違いにおいてもモデルの結果が合致することも確認することでモデルによるシミュレーションの結果が安全ノウハウを裏付ける知見として活かせるものと考える．

提案のモデルはベースとしてゲーム理論の考え方を用いているが，Kahneman らの提唱する行動経済学，すなわち個人の状況依存による判断のゆがみを扱うのではなく，歩行者の行動の様の規範として扱う．あくまで人の駆け引きという行動の発生を，ゲーム理論で表現される衝突と回避の利得のバランスで示そうとするものであり，個人の状況依存性を組み込むものではない．進化ゲーム理論についても，ゲーム理論によって与えられる利得を強化学習の報酬と考えて，ゲームによってコース選択に関して学習を行う，すなわち，歩行者の環境に合わせた適応性を表現する強化学習の手法として導入されるものであり，行動経済学とは異なるものと考える．

他方，人間の行動には個人差と状況依存性があるのは事実であり，例えば，老人か子供か，男か女かなどの歩行者の属性による影響等も考えられる．しかしながら，客観的に結果を判断できる位置や速度などに対して，これらの要件は主観的要素が大きく，そのモデル化やその検証は容易ではないこと，モデルで示す大きな法則性に対しての影響は小さく，最終的にはパラメータとして包含できると考えることから，本研究では，歩行者の位置や速度などにもとづいたモデル化を目指すものとする．

1.4　本研究の構成

本研究は全５章で構成される．以下に各章の概要を示す．

第１章　緒言

本研究の目的である歩行者の行動判断のモデル化に関する社会的背景とその研究の意義を述べ，これまでの関連する研究内容を紹介している．さらに，従来の研究における課題と本研究の目的を示し，著者が提案する新しい行動判断のモデル化は，従来のモデル化では表現できなかった，曲がり角で歩行者同士がすれ違った際に，自分が位置的に不利にも関わらず相手がアウト側に避けるを期待して，あえてイン側に向う「駆け引き」行動を引き起こす歩行者の心理的な行動判断の特性や，環境変化に伴うその特性の変化も再現できる点において意義があることを述べている．

第２章　歩行者の行動調査

歩行者の行動判断のモデル化を行うに際して，本研究の対象環境の一つであるＬ字通路において，そのコーナーを通行する歩行者の歩行経路や，対向する歩行者とすれ違う際の挙動についての調査を行っている．その結果，コーナーを通行する歩行者は最短距離となるコーナーのイン側を基

本的には選択しようとするが，すれ違いにおいては自然とイン側とアウト側を分け合い，衝突することなくコーナーですれ違う様子が見られた．その際に，対向する歩行者は多くの場合は，コーナーのイン側の角に近い方がイン側を選択し，もう一方がアウト側を通行していたが，場合によっては，位置関係が不利にも関わらず，相手がアウト側に避けることを期待してあえてイン側に向うような駆け引きの行動を示すことが確認できた．併せて，歩行者間の距離に応じてその位置関係の優位性が不明確になるため，その有利不利に合わない経路を取る様子も確認できた．最後に，その結果を受けて行動判断のモデル化において検討すべき課題について述べている．

第３章　静的行動判断モデルの構築

行動調査の結果をもとに，歩行者の静的な行動判断のモデル化について述べている．本研究では，モデルのベースとしてゲーム理論の混合戦略を用いることで，歩行者の駆け引きを含んだ行動判断を表現している．併せて，距離による情報の不確かさに起因する行動の変化についても，証拠理論によってモデルを拡張することで再現することに成功している．また，提案のモデルについてはシミュレーションによって歩行者の行動を再現し，調査結果の比較やとパラメータの変化に伴う挙動の変化に関して確認を行い，モデルの有効性について確認を行っている．そして，最後に静的モデルの課題について考察を加えている．

第４章　判断特性の変化を考慮した動的行動判断モデルへの拡張

静的モデルの課題を解決して，歩行者の判断特性の変化を考慮した動的モデルへの拡張について述べている．まず，歩行者の性質や判断特性のパターンおよびそれを表す指標に関して定式化を行っている．本研究では歩行者の判断特性の変化について，2 階層の学習のスキームによってその変化の再現を行っている．一つは，ベースとなるゲーム理論によるモデルを進化ゲームに拡張することで，歩行者の性質を決定する利得構造によって，判断特性が歩を進めるたびに変化する様子を再現している．もう一つは，逐次学習を行う強化学習の一つであるアクタークリティック法を用いて，環境の変化によってこの利得構造の学習を行い，修正された利得構造を進化ゲームのモデルに引き渡すことで，環境適応によってモデルを変化させている．動的なモデルに関しても同様にシミュレーションを行い，調査結果と比較するとともに，静的モデルとの挙動の違いを確認することで学習を含めた動的モデルの有効性の検証を行っている．

第５章　結論

本研究の結論ならびに今後の課題を示している.

第 2 章

歩行者の行動調査 (Investigation into pedestrians' behaviors)

2.1　行動調査の目的

本研究では，歩行者が相互にすれ違う際の行動判断のモデル化を検討するために，実環境における歩行者の行動調査を行った.

行動調査は，屋内通路における死角のある曲がり角を対象としており，そこを通行する歩行者の位置と速度に関するデータを取得した．そして，モデル構築のために調査で取得されたデータより次の分析を行った.

1. 曲がり角を通行する歩行者の通行にはどのような特徴があるか.
2. 特徴的行動を発現する因子は何か.

2.2　行動調査の内容

2.3　実施場所

調査は，国立リハビリテーションセンター (埼玉県所沢市) の病院施設内の廊下で実施した．調査対象とする曲がり角の位置を図 2.1 に示す．調査対象は，施設の正面玄関ホール (Entrance Hall) と売店 (Shop) および食堂 (Resturant) を結ぶ屋内通路であり，Ｌ字型で死角を有する曲がり角の部分である．この通路では，売店や食堂や玄関を行き交うために，多くの歩行者の通行がある．主にリハビリを行う施設であるため，普通に歩くことができる患者およびその家族と医療関係者に加えて，車いすの患者が通行する．また，売店や食堂に出入りする業者が，台車に荷物を載せて通行することがある．通路のコーナーには，部屋 (Room) のドアがあるが，これらの部屋に向って通行することは少なく，ほとんどの歩行者が調査対象であるＬ字の曲がり角を曲がる経路を通行している．

通路の寸法を図 2.2 に示す．通路の幅は玄関側が 2.00m，売店側が 2.52m であり， また，コーナーの端部には，衝突防止のための凸面のミラー (Mirror) が設置されている．図中には記述されていないが，通路の天井の高さは 2.40m である．図中の矢印方向 (Picture (a)，Picture (b)) のアングルから取った写真を，それぞれ図 2.3(a)(b) に示す．写真内の人の大きさと対比することで，廊下の幅や高さ，およびミラーの取り付け位置等が確認できる．

なお，本調査は調査対象となる施設の倫理委員会に対して，正式な手順にもとづき，調査の実施と調査内容に関する承認を得た上で調査を行っている．

2.3.1　調査方法

調査では，歩行者の位置および歩行者の行動を計測するために，レーザーレンジファインダ (以下，LRF) とビデオカメラを用いている．LRF には北陽電機（株）製 URG-04LX を用い，ビデオカメラにはパナソニック（株）製 BB-HCM715 を用いている．上記の計測機器の主要な仕様を表 2.1 に示す．

また，図 2.2 において計測機器の設置位置を「Sensor Position」，各計測機の計測領域を「LRF Area」と「Camera Area」で示している．LRF は，床面から 48cm の高さに，その水平断面を計測

Fig. 2.1　Place Map of Investigation

Fig. 2.2　Dimension of the Passage for Investigation

(a) Picture 1

(b) Picture 2

Fig. 2.3　Pictures of the Passage

Table 2.1　Specifications of Sensors

Device	Laser range finder	Device	Video camera
Vendor	Hokuyo Automatic Co.Ltd	Vendor	Panasonic Corporation Co.Ltd
Productive name	URG-04LX	Productive name	BB-HCM715
Measuring area (length)	60 to 4095mm	Field of view (H)	69 degree
Measuring area (angle)	240 degree	Field of view (V)	51 degree
Scanning time	100 msec/scan	Pixels	1.3 M pix
Angular resolution	Step angle : approx. 0.36 degree (360 degree/1,024 steps)	Frame rate	30 fps (NTSC output)

できるように設置されており，人の足のひざ辺りの位置を検出する．ビデオカメラは，LRF で計測できない人の体や足の向きおよびその挙動を撮影する．ただし，プライバシー保護のため，人物を特定できる顔や上半身の情報が取得できないように，ビデオカメラの撮影領域を歩行者の腰の高さ程度以下としている．さらに，車いすの操縦者の顔が映らないように設置位置と角度を調整し，撮影を行っている．そのため，歩行者の老若男女などの人物属性や，歩行者の顔の向きおよび表情については，撮影映像から取得することができない．また，現場の音声データもビデオカメラに内蔵されたマイクにより取得しているが，今回の分析には使用していない．以上の計測装置を用いて，歩行者の「足の位置」と「足の向き」のデータを取得している．歩行者の左右の「足の位置」は，LRF の計測データから求めている．「足の向き」は，ビデオカメラの映像より，床面のタイル枠と着地した足のつま先との角度から求めている．ここで「足の位置」は，それぞれの足を上げる直前のタイミングのデータを用いている．そして，この時の着地している両足の中点を「歩行者の位置」として定義し，以降の分析に用いている．

2.4　調査結果と分析

2.4.1　結果の概要

調査結果の概要を表 2.2 に示す．調査期間は平日の 2 日間，のべ 9 時間 46 分間であった．対象のＬ字通路の通行者はのべ 1044 名であり，平均して 1 時間に約 107 名，約 33 秒に 1 名の頻度で通行が行われていた．特に，12〜13 時の昼食時間帯に通行が集中し，人波が途切れることはなかった．歩行者は，ほとんどが普通に歩行できる健常者であったが，車いすの通行ものべ 30 名ほどあった．また，売店への納入業者と見られるカートやワゴンを押す人の通行も，のべ 20 名ほど

Table 2.2　Total Results of Investigation

(a) Period of survey

Day	Time	Period
Day 1	11:50 - 16:00	4:10
Day 2	9:24 - 15:00	5:36
Total		9:46

(b) Kinds of passengers

	Day 1	Day 2	Total
Pedestrian	508	484	992
Wheelchair	17	11	28
Cart/Wagon	10	12	22
Blind People	2	0	2
Total	537	507	1044

(c) Behavior of passengers

	Day 1	Day 2	Total
Move Shop Side to Entrance Side	207	210	417
Move Entrance Side to Shop Side	214	220	434
Passings with Avoidance	11	14	25
Passings with Incident	2	0	2

あった．それ以外に，のべ 2 名の視覚障がい者の通行も見られた．

売店から玄関に向う歩行者と，玄関から売店へ向かう歩行者の数は，いずれも 1 日あたり 200 人強でほぼ同数であった．また，通行者同士がすれ違う際には，衝突回避のために経路を変化させる様子も見られた．本調査において，衝突回避のために経路の変更を伴ったすれ違いは，初日に 11 件，2 日目に 14 件の計 25 件観察されている．このうち，今回のモデル化の対象としている「1 対 1」とみなせるすれ違いは計 15 件であった．これらのすれ違いにおいて，衝突の発生は無かったが，歩行者同士が接近しすぎて，あわてて避けるようなヒヤリハットとみなせる状況は 2 件確認されている．このように，対象の L 字通路だけでも，日に 10 回以上も回避を必要とするすれ違いが発生しており，日に 1 回はヒヤリハットが発生している．このような結果からも，死角を有する曲がり角において回避を必要とするすれ違いが日々の生活の中で日常的に発生しており，事故発生のリスクが高いことが確認できた．

Fig. 2.4　Sample of Incident

2.4.2　歩行者の行動特性

詳細に歩行者の行動を分析するために，すべての歩行者の通行経路を記録した．また，特に回避が必要となったすれ違い 25 件に関して，両歩行者の足の位置とその向きを 1 歩ごとにプロットし，足が踏み出された時刻もすべて記録した．そして，プロットした結果を用いて行動分析を行った．ここで 1 例として，ヒヤリハットが生じたすれ違い 2 件のうちの 1 件について，実際に歩行者の足の位置をプロットした結果を図 2.4 に示す．

図では歩行者の足の着地位置を大きな丸で示し，進行方向に向くようにして歩行者の体を楕円で表している．図で示す例では，次のような様子が示されている．玄関側 (Entrance Side) から来た歩

行者がコーナー部付近に到着した際に，売店側 (Shop Side) から来る歩行者を見つけた (①)．しかし，両者とも避けることなく，コーナーのイン側を目指した方向に進んだ（②)．衝突の寸前になって，売店側からの歩行者がコーナーのアウト側への回避行動を取ったので衝突は避けられた (③)．この場合は，両者が同じイン側のコース取りを狙ったために，回避がぎりぎりになり，ヒヤリハットになったものと考えられる．この例では衝突前ぎりぎりになったが，歩行者は出会い頭で相手を発見すると，コーナーのイン側とアウト側を分け合うことで衝突を回避してすれ違いを行っている．このように，死角を外れて相手が見える位置関係になってから，相手と申し合わせることなくコースを分け合う行動は，他のすれ違いのケースにも共通する現象であった．現場に設置されたミラーを見たり，相手の足音を聞くなどによって，死角にあるうちに相手を察知することで，予め身構えたり，コースを変えるなどのすれ違いに準備するような行動は見られなかった．本研究では，この歩行者の行動判断，すなわちコース取りを決定する判断に注目し，歩行者はどのようにコースを選択しているかに関して調査結果の分析を行った．

分析の結果，すれ違いなく単独で曲がり角を通過する場合と，コーナー通過する際に対向する歩行者が来てすれ違う場合とで，次のような異なる傾向が見られた．まず，すれ違いなく単独で曲がり角を通過する場合は，図 2.5(a) に示すように該当する歩行者の 95 %が通路の半分より内側，すなわちコーナーのイン側を通っていた．そして残りの 5 %も通路の半分より外側，すなわちコーナーのアウト側ではあるが，ほとんどが通路中央部のイン側に近い部分を通っていることが判った．これは，コーナーのイン側を通行する方がアウト側を通行するより，距離も時間も短縮できることから，他に特別な理由もない場合にはより合理的なコース選択であり，人間の本質的な行動特性であると考えられる．

また，対向者とすれ違う場合には，図 2.5(b) で例示するような行動が見られた．双方の歩行者とも相手が見えるまでは，先ほど述べたようにコーナーのイン側を目指して進んでいる．死角を抜けて相手が見える (Noticing Each Other) 位置関係に来ると，その後の 1，2 歩のうちにどちらの歩行者がアウト側に回避するかが決まる．それによって双方の歩行者の通行経路がイン側とアウト側に分かれ，衝突することなくすれ違いを完了している．すなわちこれは，上記のように基本的にはイン側を通行したいと歩行者は考えるが，衝突の可能性がある場合は「イン側を通る」ことより「衝突を避ける」ことを優先する．そして，どちらか一方が仕方なくアウト側のコースを選択した結果，衝突の可能性が無くなるため，双方がそのままのコースを維持してすれ違いに至ったと考えられる．

調査結果で見られた 25 件の回避を伴うすれ違いのうち，1 対 1 とみなせる歩行者間同士のすれ

(a) Not Passing　　(b) Passing each other

Fig. 2.5　Behavior of Pedestrians

違いが 15 件あり，残りの 10 件は 1 対多，もしくは多対多でのすれ違いであった．1 対 1 でのすれ違いでは，コーナーのイン側とアウト側のコース選択に，双方の歩行者の相対的な位置関係や速度が大きく影響している様子が見られた．具体的には，コーナーのイン側の角に近い方の歩行者が，主にイン側のコース取りをしているように見られた．

上記のような歩行者のすれ違いでの挙動は，死角によってすれ違いの直前まで相手の存在が判らないため，すれ違いの準備ができないこと，さらに前述した歩行者がイン側を通りたがるように，曲がり角によって通行が一方に集中することによって生じていると考えらる．したがって，多少の曲がり角の形状が変わっても，上記の条件がそろえば基本的に歩行者の挙動はＬ字通路の場合と同様の挙動を示すものと考えられる．もちろん，すれ違いを行わない第 3 者の存在，例えば立ち話をする人などもすれ違いの行動に影響し，ヒヤリハットや衝突の原因にもなりうる．しかし，このような第 3 者は障害物と考えることで，経路形状と同様の環境条件として扱うこともできるのではないかと考える．もちろん，全てが上記で当てはまるものではなく，歩行者への声かけや，好き嫌いの関係によって歩行者が近づきたくない場合など，第 3 者の存在が歩行者の行動に何らかの影響を及ぼす場合も考えられる．しかし，その場合は今回のモデル化の対象には含まないものとする．

他方，1 対多や多対多の場合には，次の 2 つのパターンの歩行者の挙動が見られた．

（1）先頭の歩行者のコース選択に後ろの歩行者が従う

先頭の歩行者同士が 1 対 1 でのすれ違いと同様のコース選択をすると，それに続く後ろの歩行者が，先頭の歩行者の後ろをついていくようにすれ違う．

（2）複数人がグループでひと固まりとなってすれ違う

複数の歩行者がグループでひと固まりとなって，1 対 1 と同様にグループ対グループでコース選択を行ってすれ違う．

以上のように，基本のすれ違いである 1 対 1 のすれ違いでのコース選択の決定方法が判れば，多くの場合は 1 対多や多対多にも応用できると考えられる．

したがって，本研究ではＬ字通路における 1 対 1 で対向する歩行者のすれ違いを基本のモデルケースとして，コーナーのイン側とアウト側のどちらの経路を選択するか，すなわち歩行者がどのような行動を行うかを判断する「行動判断モデル」の検討を進めていく．

2.4.3　評価指標の設定

前項の分析より，歩行者のコース選択には，双方の相対的な位置や速度の関係が大きく影響しており，コーナーのイン側の角に近い歩行者が，主にコーナーのイン側のコースを通っている様子が確認されている．そこで，本研究では双方の歩行者が相手との相対的な位置関係と速度を意識していると仮定し，双方の歩行者の位置関係や速度のデータを用いて，歩行者のコース選択の結果を分析する．ただし，それぞれの歩行者がどのタイミングで相手に気づき，いつまで相手を意識しているのか，また距離や速度を正しく認識しているか否かは，取得したデータから直接判断することはできない．そこで，以下のような仮定をおいて分析を行う．

まず，コーナー内側の壁によって生じる死角から外れた位置関係となって最初の 1 歩目から，完全に双方の歩行者の交差が完了するまで，これを「1 回のすれ違い (試行)」と定義する．そして，その間は互いに相手を見落としなく認識しているものと仮定する．つぎに，コーナーのイン側もしくはアウト側へのコースを選択したかは，歩の進め方に現れる，すなわち，イン側を選択すればイン側の経路に向けて 1 歩が踏み出され，アウト側を選択すればアウト側の経路に向けて 1 歩が踏み出されると仮定する．したがって，歩行者によって為されたコース選択は，踏み出された足がコーナーのイン側に向かっているか否かによって判断する．さらに，踏み出す途中の足が上がっている状態で，臨機応変に下ろす位置を変更させていることは考えにくいため，足を踏み出す方向の決定は，足を踏み出す直前に行われるものとする．そして，同タイミングで計測された情報によって，そのコース選択の判断が行われるとする．

Fig. 2.6　Evaluation of Superiority

以上の仮定をおいて分析を行った結果，両歩行者のコーナー内側の壁からの距離の差が，コース選択との相関性が高く，ほとんどの場合，コーナー内側の壁に近い歩行者がコーナーのイン側を通っていることが判った．すなわち，陣取りゲームのように，イン側選択時に通るコーナーのイン側の領域を相手より先に確保できるか否かが，コース選択に大きな影響を及ぼすことが判った．そこで，式 (2.1) で示すような，一方の歩行者 (A) から見たもう一方の歩行者 (B) に対する優位性 p を，コース選択のための評価指標として設定した．

$$p = p_1 + p_2 \tag{2.1}$$

ここで，優位性 p はコーナーのイン側に先に到達できる条件を示す 2 つの指標 p_1, p_2 で構成されている．そして，その 2 つの指標はそれぞれ式 (2.2)～(2.4) に従って，5 段階の数値で与えられるものとする．また，式中の各パラメータの関係を図 2.6 に示す．

$$p_i = \begin{cases} -2 & (s_i < LL_i) \\ -1 & (LL_i \le s_i < L_i) \\ 0 & (L_i \le s_i \le H_i) \\ 1 & (H_i < s_i \le HH_i) \\ 2 & (s_i > HH_i) \end{cases} \qquad i = 1, 2 \tag{2.2}$$

Table 2.3　Parameters for Evaluation

Parameter		Value [unit]
(LL_i, L_i, H_i, HH_i)	$i = 1$	$(-0.60, -0.20, 0.20, 0.60)$[m]
	$i = 2$	$(4/7, 4/5, 5/4, 7/4)$
Ls		4.00 [m]
S_f		0.50 [m]

$$s1 = (Wa - Wb) * Ls/Lab \tag{2.3}$$

$$s2 = \mathrm{int}((La + S_f)/S_f)/\mathrm{int}((Lb + S_f)/S_f) \tag{2.4}$$

優位性の 1 つ目の評価 p_1 に用いた判断指標 $s1$ は,「コーナー内側の壁からの距離」の差を示しており，式 (2.3) の Wa, Wb は歩行者 A,B の位置からコーナーの内側の壁までの最短距離を示している．さらに $s1$ では，歩行者間の距離の基準値 Ls を歩行者間の距離 Lab で割ったものを係数として，この「コーナー内側の壁からの距離」の差 $(Wa - Wb)$ に掛けることで，同じ差でも歩行者間の距離が近いほど優位性への影響が大きくなるようにしている．

2 つ目の評価 p_2 に用いた判断指標 $s2$ は,「交差予測位置に到達するまでに要する歩数」の比を示している．式 (2.4) の La, Lb は歩行者 A,B の交差予測位置までの距離，S_f は歩行者の標準的な歩幅を示している．なお，交差予測位置には，2 人の歩行者の「コーナーによる死角から外れた最初の 1 歩目」となる位置を直線で結び，これを両者の速度比で分割した位置を用いている．

また，歩行者にとってすれば，これら 2 つの指標 $s1, s2$ について細かな値の変化による判断を行うことは実質的に不可能であり,「大幅に有利」,「少し有利」,「同程度」,「少し不利」,「大幅に不利」程度の離散的な判断を行っていると考える．そこで，p_1, p_2 は判定の閾値 LL_i〜HH_i によって，それぞれ 5 段階評価を行なうものとした．

以上の定式化より，p の値が小さいほどコーナーの内側に近く，すれ違い位置に早く到達することができると見込まれる．したがって，優位性 p は負の値では歩行者 A が有利で歩行者 B が不利，正の値では歩行者 A が不利で歩行者 B が有利となる．

2.4.4　評価指標による分析結果

調査で得られたデータに関して，すれ違い時の歩行者の 1 歩ごとの状況を，上記で定義した優位性 p により評価した．分析対象となる 15 回の 1 対 1 でのすれ違いにおいて，双方の歩行者が要した歩数はのべ 46 歩づつであり，双方合わせて 92 歩となった．すなわち，92 回分の歩行者の判断サンプルを取得できた．また調査結果から，1 回のすれ違い (試行) において歩行者の要した歩数はそれぞれ 2〜4 歩，平均は 3.1 歩 (46 歩/15 試行) となった．したがって，判断回数が 4 回程度ですれ違いが完了していることが判った．

ここで，評価に用いるパラメータの値は表 2.3 のように設定している．指標 $s1$ の閾値に関しては，一般的な人の体の幅 0.60m を大幅に有利/不利の閾値 (HH_1, LL_1) とし，その間を 3 等分して少し有利/不利の閾値 (H_1, L_1) を設定している．指標 $s2$ は，すれ違いでの最大判断回数 4 歩を用い，少しの差 (H_2, L_2) は 5 歩との比，大幅な差 (HH_2, LL_2) は 7 歩との比で設定している．また，歩行者間の距離の基準値 Ls には，死角から外れた最初の 1 歩目での歩行者間距離の実測値に基づき，切りの良い数値として 4.00m を設定している．歩行者の歩幅 S_f も同様に，実測値に基づき，切りの良い数値として 0.50m と設定している．このパラメータを基に算出した評価データによる分析の結果を以下に示す．

図 2.7 は，歩行者間の距離と優位性の値の関係を示している．図の横軸の数字は距離の上限の距離を示しており，グラフはそれぞれ左から 3.5〜4.5m，2.5〜3.5m，1.5〜2.5m，1.5m 以下での各優位性の値となった状態数の割合を示している．優位性の分布は，3.5〜4.5m の領域でほぼ均等だったものが，接近するにつれて絶対値が大きい状態が増加し，絶対値の小さい状態が減少している様子が見られる．相対距離が 1.5m 以下になると，全体の 7 割が絶対値の最大値 4 であり，絶対値が 1 以下の状態は無くなっている．この結果から，歩行者が歩を進めて接近することにより，両歩行者の有利／不利が明確になっていることが判る．これは，交差場所が接近するにつれて歩行者の優先事項が衝突回避となり，イン側とアウト側がはっきり分かれるように歩行者が経路の選択を行って，衝突回避が自然と行われている様子を示しているものと考えられる．

表 2.4 は，ある判断タイミング（Previous）から，1 歩踏み出した後の次の判断タイミング（After）への優位性の値の遷移を示している．表の上に示す優位性の絶対値から，左に示す値に遷移していることを示す．左に示す遷移後の値には，符号が変化しない場合と，＋から－，－から＋へと符号が変化する場合 (inversion：水色の領域) の 2 通りを示している．ほとんどの場合，優位性の値が

Fig. 2.7　Superiority(p) and Distance

Table 2.4　Transition of Superiority(p)

		Absolute Value of Superiority(Previous)				
		4	3	2	1	0
Superiority(After)	4	9		9		
	3	1	1	1		
	2		2	2	1	3
	1				1	
	0					
	Inversion 1				1	
	Inversion 2					
	Inversion 3					
	Inversion 4					

Inversion of Positive/Negative

維持，もしくは絶対値が大きくなる方向に遷移する黄色の領域にあることが判る．このように，1 歩ごとの優位性の遷移においても，イン側とアウト側がはっきり分かれていく様子が確認できる．逆に，値が小さくなった場合も 3 ケースあった．これは，もともと優位性の値が閾値の境界線上にあったため，指標 $s1, s2$ の微小な減少によって値が下振れして，優位性が減少したと判断された (3 → 2)，もしくは，優位性において不利な値にも関わらずイン側のコース選択をすることで優位性が

Fig. 2.8　Distribution of In/Out Selections

改善した (4 → 3 , 1 → –1)，のいずれかの要因によるものであった．特に後者の場合では，優位性の逆転も生じている (1 → –1).

図 2.8 は優位性によるイン側／アウト側のコース選択の分布を示している．同図から，優位性の値は，コース選択の特徴によって (i)～(iii) の 3 つの領域に分けることができる．それぞれの領域は，以下のような特徴を持つ．(i) 全てがイン側のコースを選択している ．(ii) 分布はほぼ 5 分 5 分である．(iii) ほとんどがアウト側のコースを選択している．このように，多くの場合が優位性に従ってコースが選択されているが，単純に優位性の有利／不利だけでコースが決まっていないことが判る．特徴的な結果として，優位性の絶対値が小さい領域ではコース選択が確定されていないことが判る．また，優位性の絶対値が大きい領域では，ほとんど場合で優位性が有利／不利によってコース選択が決まる．ただし，不利な場合にのみ逆コースの選択が若干ではあるが発生していることも確認された.

図 2.9 は，歩行者間の距離とコース選択の関係を示している．コース選択に関しては，優位性 p において有利なのでイン側のコースを選択した (Proper(IN))，不利なのでアウト側のコースを選択した (Proper(OUT))，有利にも関わらずアウト側のコースを選択した (Improper(OUT)，不利にも関わらずイン側のコースを選択した場合 (Improper(IN)) の 4 つの場合で分類した．その結果，近距離では優位性 p の有利／不利に従うが，距離が離れるに従って，優位性が不利であるにも関わらず

Fig. 2.9　Distance and Course Selections

優位性に反してイン側のコースを選択する確率が増えていることが判った．また，さらに遠く離れた状況においては優位性に反してアウト側のコースを選択する場合も見られた．

2.4.5　分析結果の考察とまとめ

以上の分析より，すれ違い時の歩行者の行動特性は次ようなものであると考える．歩行者は，基本的には優位性 p に従ってイン側／アウト側のコース選択を行っている．その結果，歩行者は選択したコースに向けて歩みを進めることになり，図 2.7 に示されるように，歩行者間の距離が縮まるにつれて有利／不利がより明確になり，優位性の絶対値が大きくなる．そして，最終的に両歩行者は優位性通りにイン側／アウト側に別れてすれ違いを行っている．

しかし，歩行者はできるだけイン側のコースを通りたいと思っているため，図 2.8 の領域 (ii) で示すように，優位性が不利でもイン側のコースを選択することがある．これは，交差までに猶予があり優位性を逆転してイン側のコースを取り返す可能性がある場合に，歩行者は優位性が不利にも関わらず，あえてイン側のコースを選択することで，相手がアウト側のコースへ避けてくれることを期待する行動と考えられる．本研究では，このような心理に基づいた優位性に反するイン側のコースの選択行動を「駆け引き」と呼ぶものとする．

(a) First Step　(b) Second Step

(c) Third Step　(d) Last Step

Fig. 2.10　Example of Course Selection

また，「駆け引き」以外にも，図 2.9 で示されたように，双方の歩行者の距離が離れた場合に優位性に反してイン側のコースを選択する場合がある．これは，相手との距離が離れることによって優位性自体の認識に「不確かさ」が発生し，「自分が不利であるという根拠」がない状態で判断が行われため，先述したように「基本的にはイン側のコースを進みたい」と考える人間の心理によってイン側のコース選択がなされたものと考えられる．これ以外にも，優位性の差が小さい場合は距離が離れると優位性の有利/不利が明確でなくなり，実際の優位性とは異なる判断をしてしまうことが考えられる．図 2.9 で見られた優位性に反してアウト側のコースを選んだケースは，そのような理由であると考える．

しかしながら,「駆け引き」によって優位性とは逆のコースを選択している場合，相手がアウトコースに回避しない場合は優位性の逆転は困難であり，歩が進むにつれて交差までの時間的や距離的な猶予が無くなり，不利を挽回できる可能性が低くなる．その場合,「駆け引き」を中止して優位性に従うコースを選択するようになる．また，距離が遠い時点で優位性の判断を間違えて逆のコースを選択した場合も，距離が近づくにつれて優位性が明確になり，相手との優位性の逆転が生じない限り優位性に従ったコースに戻る．一方,「駆け引き」が成功して両者の優位性が逆転した場合には，すでに両歩行者の距離が縮まりすれ違いまでに再逆転が困難な状況になっていることもあり，両歩行者はそれ以降，逆転した優位性に従ったコース選択を行う．そして，当初の優位性とは逆のコース選択ですれ違いを完了する．

図 2.10 は,「駆け引き」が実施された場合の優位性の遷移と，歩行者のコース選択の変化の例を示している．図中では，両歩行者は次に示すようなすれ違いを行っている．死角を外れて両者がお互いを認識した後の 1 歩目 (a) では，歩行者 A は優位性において有利であったためイン側のコース選択をした．他方，歩行者 B は不利ではあったが「駆け引き」によってイン側のコース選択をした．その結果，2 歩目 (b) には駆け引きが成功して優位性が逆転し，両歩行者は逆転した優勢性に従ってコース選択を行った．3 歩目 (c) では，さらに優位性の差が大きくなったため，逆転した優勢性に従ったコース選択を継続した．そして，最終的 (d) では当初の優位性とは逆のコースで交差し，すれ違いを完了した．

このように,「駆け引き」は最終的なすれ違いのコース取りを変えてしまうほど，大きな影響を及ぼす歩行者の特徴的な行動判断であるが，従来の歩行者の行動や行動判断のモデル化に関する研究では取り扱われていない．また同様に，距離によって生じる「不確かさ」に起因するコース選択の変化も，従来の研究による方法では表現できない特徴的な歩行者の行動判断である．

以上の考察から，歩行者の行動判断のモデル化を行うためには，以下の観点を考慮しなければならないと考えられる．

1. 優位性を判断基準とする「駆け引き」を考慮したコース選択
2. 距離によって生じる「不確かさ」のコース選択への影響

ここで，モデル化に関する前提として，上記観点を個人の状況依存による判断のゆがみとして考えるのではなく，これらの判断に関する特徴を規範的なモデルによって表現することを目指す．特に，1 については「駆け引き」に関する損得を扱う規範モデルを検討する．また，2 については情報の「不確かさ」を扱う規範モデルを検討する．

第 3 章

静的行動判断モデルの構築
(Construction of static decision model for behavioral judgment)

3.1　問題設定

本研究では，モデル化に際して図 3.1 に示すような問題設定を行う．対象とする条件は，図 3.1(a) のような屋内のＬ字通路を対象とし，歩行者同士の 1 対 1 のすれ違いを想定する．このような条件下ですれ違う歩行者は，前章の調査より同図に示すような行動をとることが判っている．死角によって相手が見えない間，歩行者はコーナーのイン側に向って進む．しかし，死角から外れて相手を発見すると，衝突をしないようにイン側とアウト側を分け合ってすれ違う．図 3.1(b) は，この時の歩行者が状況に応じてコースを選択している例を示している．通常は，コーナーのイン側への先着に対し，有利と見込まれる状態にある歩行者 A がイン側を通り，不利と見込まれる状態にある歩行者 B がアウト側の大回りの経路を通る．しかし，同図の歩行者 B に見られるように，不利であるにも関わらず，あえてイン側を選択することで相手がアウト側に譲ることを期待する「駆け引き」によって，イン側に向うこともある．

ここで，1 回の「すれ違い」を，前章の調査分析の場合と同様に，「死角から外れて相手が見える

(a) Situation of model　　(b) Sample behavior

Fig. 3.1　One-to-one Encountering Situation at L-shaped Corner

位置関係になってから，2 人の歩行者の交差が完了するまで」と定義する．そして，この「すれ違い」の間で歩を進める際に，イン側とアウト側のどちらに踏み出すかの行動を決定する判断のモデル化を行う．その判断は，足を踏み出す直前のタイミングで計測される歩行者の位置関係と速度の情報に基づいて行われるものとする．したがって，歩行者の人物属性など歩行者の位置や速度の計測データから取得できない情報に関しては，本モデルでは直接扱わないものとする．もちろん，個人の行動には個人差があり，環境や状況にも強く依存するが，ここでは規範的なモデルによる事象の構造的理解を図るものであり，事象理解にはこれらの影響を加味するが，モデル化に関して大きな影響はないと考える．

3.2　行動判断モデルの構築

本章では，前章で検討を行った 2 つの観点に対し，次の方針によりモデルの構築を行う．

1. 優位性を判断基準とする「駆け引き」を考慮したコース選択
   ゲーム理論を用いて駆け引きの行動を再現するベースモデルの構築を行う．
2. 距離によって生じる「不確かさ」のコース選択への影響
   証拠理論を用いて情報の不確かさによる行動判断の変化を考慮したモデルへの拡張を図る．

Table 3.1　Game Settings

Player	2 players : Pedestrian A, B
Strategy	2 strategies for each player ①Go **inside** / ②Go **outside**
Gain	Avoidance Gain (Aa,Ab) : when going **outside** Collision Gain (Ca,Cb) : when selecting the same route
Probability	Probability of choice to go **outside** (Pa,Pb)

以下では，モデル化の詳細について述べる．なお，本章ではすれ違いの間に判断特性，すなわちコース選択の閾値の変化までは考慮しない「静的」な行動判断モデルの構築を行う．そして，後の章において判断特性が一歩毎に変化する「動的」行動判断モデルへの拡張を行う．

3.2.1　ゲーム理論による駆け引きのモデル化

ゲーム理論 (111) とは，数学者の Neumann と経済学者の Morgenstern によって基礎が作られた理論である．複数のプレーヤ (Player) が存在し，それぞれの行動が影響し合う状況において，各人の利益 (Gain) に基づいて相手の行動 (Strategy) を予測し，意志決定を扱う理論である．本論文では，このゲーム理論を歩行者の駆け引きの事象理解の目的で用い，駆け引きに至る歩行者の判断を規範的なモデルとして示すことを目指す．

前章の行動調査より，すれ違いでの歩行者の行動判断は一つのゲームであると考えられる．対向する 2 人の歩行者がプレーヤとなり，それぞれがイン側コース，もしくはアウト側コースを選択するという 2 つの戦略を有している．そして，歩行者はできるだけイン側コースを選択したいと考え，遠回りとなるアウト側コースを選択したくない．しかし，同じコースを選択することにより生じる衝突はもっと避けたい．以上の 2 つの動機によりコースを選択していると考えることができる．

このゲームは，プレーヤ間の間に話し合いによる交渉はなく，それぞれが独立に戦略を決めるため，このすれ違いにおける行動判断は，ゲーム理論における「非協力ゲーム」(112) にあたる．また，調査結果における駆け引きの発生の様子からも判るように，イン側コースやアウト側コースの選択が必ずしも確定的に行われるのではなく，状況によって確率的に行われている．したがって，すれ

Table 3.2　Game Setting (Strategy Map)

		Pedestrian B	
		Go **inside**	Go **outside**
Pedestrian A	Go **inside**	(*Ca*, *Cb*) (*1-Pa,1-Pb*)	(*0* , *Ab*) (*1-Pa,Pb*)
	Go **outside**	(*Aa* , *0*) (*Pa,1-Pb*)	(*Ca+Aa* , *Cb+Ab*) (*Pa,Pb*)

違いにおける歩行者のコース選択は，ゲーム理論において戦略の選択を確率的に扱う「混合戦略」として扱うことができる．以上より，行動判断モデルのベースとして，ゲーム理論の非協力ゲームにおける混合戦略を導入する．

以下では，すれ違いにおける歩行者のコース選択へのゲーム理論の適用について説明する．まず，表 3.1 においてゲームを定義する．プレーヤとして対向する 2 人の歩行者を，それぞれ歩行者 A と歩行者 B とする．各記号の添え字 a，b は，この歩行者 A，B に関する値を示している．戦略を示す表 3.2 では，上段に各プレーヤの得る利得，下段にそれぞれの選択確率が示されている．それぞれの歩行者は，歩を進める際にイン側とアウト側の 2 つのコース選択の戦略を持ち，ゲーム全体では 4 つの戦略ケースがある．これらの 4 つの戦略ケースに対して，次のような利得を与えるものとする．両者が同じコースを選択した戦略ケースでは衝突の可能性が生じるため，両者に衝突利得 Ca，Cb が与えられる．また，アウト側コースを選択した歩行者は遠回りを強いられるため，回避利得 Aa，Ab が与えられる．したがって，アウト側コースを両歩行者とも選択した場合には，衝突利得と回避利得の両方が与えられる．ここで，どちらの利得を与えられる状態も歩行者にとって好ましくない状態であるため，衝突，回避の両利得とも負の値とする．また，それぞれの「アウト側コースの選択確率」を式 (3.1)(3.2) によって与えられる Pa，Pb $(0 \leq Pa, Pb \leq 1)$) とする．

$$Pa = p/9 + 1/2 \tag{3.1}$$

$$Pb = -p/9 + 1/2 \tag{3.2}$$

ここで指標 p は，前章で定義したように歩行者 A の歩行者 B に対するイン側コース取得に関する優位性を示しており，式 (2.1)～(2.4) によって算出される．なお，p は −4～4 で与えられるが，値の上下限の −4 や 4 においても実際にはイン側，アウト側へのコース取りが 100% にはならない．そこで，上式を $p = -4.5$ もしくは $p = 4.5$ の場合にイン側，アウト側へのコース取りの選択確率

Fig. 3.2　Best Response

が 100% ($Pa, Pb = 0$ or 1) となるようにし，優位性に優劣が無い場合 ($p = 0$) にイン側，アウト側へのコース取りの選択確率が 50% ($Pa, Pb = 0.5$) となるような線形の式で与えている．

ゲーム理論の混合戦略では，各プレーヤの戦略は最適反応戦略，すなわち「相手がいかなる戦略を選んでも自らの期待利得を最大化する戦略」[113] を選択することが合理的である．上記で設定したゲームにおいても，それぞれの歩行者が相手の状況も勘案し，期待利得を最大化する合理的判断である最適反応戦略に基づいてコースを選択しているものと仮定する．ここで，歩行者 A，B の期待利得 Ga，Gb は，以下の式 (3.3)(3.4) で示すように各ケースの利得と選択確率を掛けてプレーヤごとに総和を取ることで算出される．

$$Ga = Ca(1 - Pa)(1 - Pb) + AaPa(1 - Pb) + (Ca + Aa)PaPb \tag{3.3}$$

$$Gb = Cb(1 - Pa)(1 - Pb) + Ab(1 - Pa)Pb + (Cb + Ab)PaPb \tag{3.4}$$

上式を基に，このゲームの各プレーヤのアウト側コースの選択確率 (Pa，Pb) と最適反応戦略の関係を示すと図 3.2 のようになる．この図では縦軸，横軸に歩行者 A，B のアウト側コースの選択確率をとり，歩行者 A，B がそれぞれの選択確率にある場合に最適反応戦略となるコース選択を，歩行者Aの場合は太線，歩行者Bは点線にて示している．このグラフから判るように，相手の選択確率に関する一定の閾値 Ba，Bb に従って，選択されるコースが変化することが判る．すなわち，相手の選択確率が閾値より小さい時，最適反応戦略は $P_* = 1$ となり，アウト側コースを選択するこ

とが合理的となる．逆に閾値より大きい時，最適反応戦略は $P_* = 0$ となり，イン側コースを選択することが合理的となる．また，両者の最適反応戦略の交点であるグラフ上の丸印はナッシュ均衡 (113) の条件を示しており，最終的に両者が落ち着く状態とされている．ここで，このゲームの最適反応戦略の閾値 Ba，Bb は下式 (3.5)(3.6) で与えられる．

$$Ba = (Cb - Ab)/2Cb \tag{3.5}$$

$$Bb = (Ca - Aa)/2Ca \tag{3.6}$$

また，双方のコースの選択確率 Pa，Pb が $Pa = 1 - Pb$ の関係を満たすことから，両歩行者が取りうるコースの選択確率の組合せは，図 3.2 上の一点鎖線で表された直線 l 上に限定される．この直線 l は，最適反応戦略の閾値 Ba，Bb により 3 つの領域 I〜Ⅲ に分割することができる．そして，分割されたそれぞれの領域で，歩行者は次のようなコース選択を行うものとする．

領域 I　優位性の有利不利どおりに A がイン側，B がアウト側のコースを選択する．

領域 Ⅱ　どちらの歩行者もイン側のコースを選ぶのが合理的であるが，どちらも確実にイン側がとれるとは限らないため，結果的に確率的なコース選択が行われる

領域 Ⅲ　優位性の有利不利どおりに A がアウト側，B がイン側のコースを選択する．

本モデルでは，領域 Ⅱ において，実際の歩行者同士のすれ違いの際に，多くの事例で特徴的に見られた「相対的な位置関係において不利であってもあえてイン側コースを進み，相手がアウト側へ譲ることを期待する」駆け引きを再現する．式 (3.1) を用いて，選択確率 Pa を優位性 p で置き換えて考えると，図 3.2 の 3 つの領域は，前節で分析した図 2.8 の (i)〜(iii) の領域と，その特徴においてほぼ一致する．したがって，上記で説明したゲーム理論によるモデルが，駆け引きの行動を考慮した歩行者の行動判断を再現するモデルとして有効であると考える．

歩行者の行動とこのゲーム理論によるモデルとの関係を考えると，歩行者が死角から外れて相手を認識してからのち，相対位置から優位性を判断して自分の利得を最大化する方向，すなわち最適反応に向けてイン側やアウト側へのコース選択を行って行動を起こす．その後，歩行者は 1 歩ごとに位置関係を見直し，判断を変えていく．最終的に歩行者はイン側とアウト側を分け合ってすれ違いを完了するため，通常は図 3.2 の直線 l 上を左上もしくは右下のナッシュ均衡へ収束していくことになる．

図 3.3 は，すれ違いにおけるコースの選択確率が遷移する様子を示した例である．歩行者が死角から外れて相手を認識して最初の 1 歩目 (1st Step) は，図左上に示すように歩行者 A が位置関係に

Fig. 3.3　Transition of Selection Probabilities

おいて優位であったが，図左下の最適反応戦略のグラフから判るように領域 II にあったため，歩行者 B は駆け引きによってインコースを選択した．その結果，図中上に示すように 2 歩目 (2nd Step) では，歩行者 B の駆け引きが成功して優位性の逆転が生じている．この時，最適反応戦略のグラフより領域 II にあったが，両歩行者ともに駆け引きは行わず優位性に従ったコース選択を行っている．そして，図右上に示すように 3 歩目 (3nd Step) では，さらに歩行者 B の優位性が増して，最適反応戦略のグラフより領域 III となり，両者とも優位性に従ったコース選択を行っている．最終的には，図右下に示すように歩行者 A がアウト側，歩行者 B がイン側で交差し，すれ違いを完了している．最適反応戦略のグラフでも領域 III となり，ナッシュ均衡の近辺となっている．

このように，コース選択確率の遷移は，通常は 2 歩目以降のように歩が進むにつれて，最適反応戦略のグラフの右下もしくは左上のナッシュ均衡の方向に進んでいく．しかし，このケースにあるように駆け引きを行った場合は，その成功によって逆方向に進むこともある

3.2.2　証拠理論による不確かさを考慮に入れたモデルの拡張

前節において，ゲーム理論の混合戦略を用いてベースとなるモデル化を行ったが，モデルにより期待される結果と図 2.8 に示される調査結果を詳細に比較すると，一致しない部分が見られる．図 3.2 の領域 Ⅲ では，ゲーム理論の判断に従うと全てがアウト側を選択することになる．しかし，実際の図 2.8 の領域 (iii) ではイン側に向かうケースが見られる．これは前章の調査で述べたように，距離によって優位性に不確かさが発生し，根拠が無い状態で判断を行った結果であると考えられる．そこで本研究では，意思決定においてその根拠となる情報があいまいであったり，欠落しているような不確実な知識や情報の下で，適切な意思決定を行うための推論と決定の過程の数理的解析を扱う Dempster-Shafer の証拠理論 [128] を導入してモデルの拡張を図る．

すれ違いの行動判断においては，基本となる 3 種類の信念確率割当が以下のように与えられる．

m(IN)　：確実にイン側のコースを選択すべきである確率

m(OUT)　：確実にアウト側のコースを選択すべきである確率

m(X)　：どちらのコースを選択すべきか判らない確率

例えば，優位性の差が駆け引きができないくらいに十分に大きい時，有利である歩行者はイン側のコースを取るべきであるため，この信念確率割当は $m_{adv}(\mathrm{IN}) = 1$，$m_{adv}(\mathrm{OUT}) = 0$，$m_{adv}(\mathrm{X}) = 0$ と与えられる．一方，不利な歩行者は逆に $m_{dis}(\mathrm{IN}) = 0$，$m_{dis}(\mathrm{OUT}) = 1$，$m_{dis}(\mathrm{X}) = 0$ と与えられる．しかし，これらの歩行者に距離によって情報の不確かさが発生した場合 (ここで，不確かさの確率を δ とする)，有利な側の歩行者は $m_{adv}(\mathrm{IN}) = 1 - \delta$，$m_{adv}(\mathrm{OUT}) = 0$，$m_{adv}(\mathrm{X}) = \delta$ と与えられる．不利な側の歩行者は $m_{dis}(\mathrm{IN}) = 0$，$m_{dis}(\mathrm{OUT}) = 1 - \delta$，$m_{dis}(\mathrm{X}) = \delta$ と与えられる．

この時のコース選択は，その情報の確信度に応じて判断することになる．この確信度の上下限は Belief 関数 (Bel)，Plausibility 関数 (Pls) として，式 (3.7)(3.8) で与えられる．

$$Bel(\mathrm{IN}) = m(\mathrm{IN}) \tag{3.7}$$

$$Pls(\mathrm{IN}) = m(\mathrm{IN}) + m(\mathrm{X}) \tag{3.8}$$

ここで，Belief 関数は「信じられる根拠が無ければ信じない」とする考え方で確信度の下限を示す関数である．他方，Plausibility 関数は「疑う根拠が無ければ疑わない」とする考え方で確信度の上限を示す関数である．例えば，曲がり角の死角によって対向者が見えないところでは，相手が来るという根拠がないためイン側に向っている．このように，歩行者は基本的にイン側を通りたいと考えている．したがって，すれ違いの場合には，距離によって生じた不確かさ m(X) は，すべてイン

Table 3.3　Basic Probability Assignments

	$\alpha = 2*(0.5-Pa), \beta=1-\alpha$ $\gamma = 2*(Pa-0.5), \beta=1-\gamma$		**Correct Judgement** dc: distance with certainty Distance →	du: distance with uncertainty **Change by Uncertainty** $\delta = k * du$
Area		**Objective belief**	**Subjective belief (Near)**	**Subjective belief (Far)**
Ⅰ	**IN**	$m(IN)=\alpha$ $m(X)=\beta$	$m(IN) = 1.0$	$m(IN) = 1.0-\delta$ $m(X) = \delta$ $Pls(IN) = 1.0$
Ⅱ $Pa<0.5$	α β	$m(IN)=\alpha$ $m(X)=\beta$	$m(IN) = 1.0$	$m(IN) = 1.0-\delta$ $m(OUT) = \delta$
Ⅱ $Pa=0.5$	$\beta=1$ **X**	$m(X) = 1.0$	$m(IN) = 0.5$ $m(OUT) = 0.5$	$m(IN) = 0.5$ $m(OUT) = 0.5$
Ⅱ $Pa>0.5$	γ β	$m(OUT)=\gamma$ $m(X)=\beta$	$m(OUT) = 1.0$	$m(OUT) = 1.0-\delta$ $m(IN) = \delta$
Ⅲ	**OUT**	$m(OUT)=\gamma$ $m(X)=\beta$	$m(OUT) = 1.0$	$m(OUT) = 1.0-\delta$ $m(X) = \delta$ $Pls(IN) = \delta$

側のコース選択への確信度に割り振られると考えられる．よって，イン側のコース選択に関する確信度は Plausibility 関数で，アウト側のコース選択に関する確信度は Belief 関数で与えるものとする．すると，距離によって δ の不確かさが発生した場合，優位性において有利であった歩行者のイン側コースの選択確率 Pls_{adv}(IN) と，不利であった歩行者のイン側コースの選択確率 Pls_{dis}(IN) は，次のように算出される．

$$Pls_{adv}(\mathrm{IN}) = m_{adv}(\mathrm{IN}) + m_{adv}(\mathrm{X}) = (1-\delta) + \delta = 1 \tag{3.9}$$

$$Pls_{dis}(\mathrm{IN}) = m_{dis}(\mathrm{IN}) + m_{dis}(\mathrm{X}) = 0 + \delta = \delta \tag{3.10}$$

すなわち，有利な側の選択確率は変化せず，不利な側でコース選択の逆転が起こり得るという結果が得られた．これは，実際の調査結果で見られたゲーム理論と一致しない歩行者の行動特性を合理的に説明できるものとなっている．

以上の証拠理論の考え方を導入して，歩行者間の距離に従って領域 Ⅰ～Ⅲ の信念確率割当が変化

するものと考える．もちろん，位置関係における優位性，すなわち客観データに基づく判断がベースとして設定されているため，実際のコースの選択確率は，客観的要素と，不確定性から来る主観的要素の組合せで判断が決定していると考えられる．そこで，本研究では客観的な信念確率と，主観的な信念確率を表 **3.3** のように割当てるものとする．客観的な信念確率 (Objective belief) は，客観データである優位性 p を基に算出される選択確率 Pa に従って，表中に示す α，β，γ を次式のように設定する．

$$\alpha = 1 - 2Pa \tag{3.11}$$

$$\beta = \begin{cases} 2Pa & (Pa < 0.5) \\ 2(1 - Pa) & (Pa > 0.5) \end{cases} \tag{3.12}$$

$$\gamma = 2Pa - 1 \tag{3.13}$$

他方，主観的な信念確率 (Subjective belief) は，次のように設定する．歩行者間の距離が情報に不確かさが発生しない dc 以下の範囲 (Near) では不確かさを 0 とする．そして，距離が dc を超える範囲 (Far) では，超えた距離 du に比例して不確かさを $\delta = k\,du$ のように与える．ここで，その比例定数 k は，図 2.9 の結果を基に設定している．また，前章の調査結果に従って，各領域における不確かさの扱いも以下のように割当てた．領域 Ⅱ では，優位性の差が小さいため，不確かさが優位性とは逆判断になったものとしている．領域 I，Ⅲ では，この不確かさを判断の根拠がなくなった $m(X)$ として扱っている．

以上のように，ゲーム理論により設定された客観的な信念確率と，証拠理論による主観的な信念確率を結合させることで，ゲーム理論によるベースモデルの拡張を図る．この時，式 (3.14)(3.15) に示される Dempster の結合規則 [129] を用いることで，表 3.3 で示される客観的な情報と主観的な情報を結合することができる．

$$q(E) = \sum_{F \cap G = E} m1(F)\, m2(G) \tag{3.14}$$

$$m(E) = q(E)/(1 - q(\phi)),\ E \neq \phi \tag{3.15}$$

ここで，　$F, G = \{In, Out, X\}$

$m1$：客観的要素の信念確率割当

$m2$：主観的要素の信念確率割当

式 (3.14) 中の $q(E)$ は予備割当関数と呼ばれ，これを解くと以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
q(IN) &= m1(IN)\,m2(IN) + m1(IN)\,m2(X) + m1(X)\,m2(IN) \\
q(OUT) &= m1(OUT)\,m2(OUT) + m1(OUT)\,m2(X) + m1(X)\,m2(OUT) \\
q(X) &= m1(X)\,m2(X) \\
q(\phi) &= m1(IN)\,m2(OUT) + m1(OUT)\,m2(IN)
\end{aligned}
$$

ここで，$q(\phi)$ は論理的に矛盾となる信念確率を示している．式 (3.15) によって，その影響を取り除くことで結合した情報による信念確率割当を得る．以上のように結合された情報から，式 (3.8) の plausibility 関数 Pls(IN) を求めることによって，歩行者間の距離によって生じる不確定性による歩行者の行動判断の変化を考慮したモデルが得られる．

3.3　静的モデルを用いたシミュレーション

3.3.1　シミュレーションの目的

前節までに検討したモデルを用いたシミュレーションにより，モデルの検証と，パラメータの変化による歩行者の挙動の変化を確認した．

【シミュレーション 1】 調査結果との比較によるモデルの有効性の検証

現場調査と同様の設定によってシミュレーションを行い，その結果を調査結果と比較することで本モデルの有効性を検証する．

【シミュレーション 2】 パラメータの変化による挙動の変化の確認

本モデルに用いたパラメータを変化させることにより，本モデルの挙動の変化を確認し，パラメータによる安全性や効率性などへの影響に関して検討を行う．

3.3.2　シミュレーションの方法

シミュレーションソフト

シミュレーションは，MathWorks 社の MATLAB Simulink を用いて開発した自作のシミュレーションソフトによって行っている．シミュレーションの計算のサンプリング周期は 0.1ms とし，リアルタイムに歩行者の動きを描画している．シミュレーションの画面のイメージを図 3.4 に示す．図のように，画面にはＬ字の経路と 2 人の歩行者を表示している．歩行者には 2 足歩行モデルを用い，図の右上のように歩行者の左右の足跡と歩行者の頭の位置および向きを表示している．また，

Fig. 3.4　Screen of Simulation

画面には上記の歩行者の挙動の表示に加えて，歩行者の頭の位置同士を結び歩行者の死角の状況を示すラインや，後述する歩行者の経路に関する補助線を表示している．

歩行者の行動判断モデル

歩行者の行動判断には，前節で提案したゲーム理論の混合戦略をモデルのベースとし，証拠理論により拡張したモデルを用いるものとする．ただし，簡略化のため歩行者 A，B は，それぞれ同じタイミングで歩を進めるものとして判断処理を行っている．また，歩行者の優位性の評価には，前章で提案した式 (2.1)～(2.4) を用いるものとする．優位性の計算に用いたパラメータは，前章の分析で用いたものと同様に表 2.3 の値を用いている．

歩行者の歩行モデル

歩行者の行動は，その一歩一歩の歩みの結果であり，回避のための方向転換なども歩の進め方で決まる．したがって，シミュレータでは図 3.5 に示す 2 足歩行モデル [125][126] を用いて，その一歩

(a) Physical constraints　　(b) Time chart

Fig. 3.5　Human Walking Model

一歩を再現した．図 3.5(a) は，身体の拘束条件を示している．同図において，左右のそれぞれの足は，歩行者の方向転換が可能な角度 (Turn Angle) の範囲内 (Motion Range) に，次の 1 歩を交互に踏み出すものとする．頭の位置 (Head Position) は，両足の中間の線上を進んでいくものとする．また，図 3.5(b) は，足の踏み出しのタイミングを示している．ここで，左右の足は「Foot Landing Period」の間は着地，それ以外は 1 歩を踏み出す途中の足が上がっている状態とする．そして，両足が着地している間は，次の 1 歩を踏み出すための重心移動を行っているものとする．重心移動の際の歩行者の頭の位置は，両足の中間位置 ① から，踏み出す際の軸足の向きと平行に垂直真横の位置 ② へ移動 (Ws) する．1 歩を踏み出す際は，② の位置から，踏み出し後の両足の中間位置 ③ まで移動 (Ss) する．判断のタイミングと，その判断材料となる歩行者の位置や速度のデータ取得は，各々の足を上げる直前に行われるものとする．

歩行者の歩行経路モデル

歩行者の歩行経路には，図 3.6 に示すモデルを用いた．まず，図 3.6(a) に示すように，円状に設定したパーソナルスペース (Personal Space) を考慮して，コーナーのイン側の角 C を中心とする半径 $d1$ の目標円 R_s を設定する．すれ違いが無い場合は，歩行者はこの目標円めがけて，その接線方向にコーナーへ侵入し，コーナーではその目標円に沿うものとする．そして，コーナーを抜けた後は，壁に平行のコースを進むものとしている．

すれ違いが生じる場合は，図 3.6(b) に示すようなモデルとした．この場合は，コーナーに向かう

(a) Not passing　　(b) Passing each other

Fig. 3.6　Walking Path Model

2 人の歩行者の位置，速度から，優位性 p の設定に用いた交差予測位置（Passing Point）を決定し，その交差予測位置を通って，双方の歩行者を結ぶ直線と垂直に交わる直線 (Passing Line) を中心線とするイン側とアウト側歩行者の円状のパーソナルスペースを設定する．そして，コーナーのイン側の角を中心として，イン側パーソナルスペースの中心までの距離 $d2$ を半径とする，イン側歩行者の目標円 R_i，さらにイン側の目標円 R_i に対して，２つのパーソナルスペースの中心間距離 $d3$ だけ離れる経路を描くアウト側歩行者の目標円 R_o を設定する．歩行者はそれぞれのコース選択時に，選択コースの目標円の接線方向に進むものとする．

フローチャート

シミュレーションに用いた処理のフローチャートを図 3.7 に示す．図中では左が歩行者 A，右が歩行者 B のフローを示している．ここで，歩行者 A を例にとって上から 1～7 の処理を順に説明していく．

1. すれ違い中か，死角エリアもしくはすれ違い完了後の単独歩行時かの処理分岐 (すれ違い中は 2 へ，単独歩行時は 6 へ)

Fig. 3.7　Flow Chart(Static Model)

2. 両歩行者の位置と速度から，相対距離と優位性を算出 (3 へ)
3. 優位性から，ゲーム理論のアルゴリズムによりコース選択確率を算出 (4 へ)
4. コース選択確率と相対距離から，証拠理論のアルゴリズムにより補正したコース選択確率を算出 (5 へ)
5. コース選択確率から，実際に進むコースを選択 (7 へ)
6. 位置と速度から，単独歩行時の歩行モデルと歩行経路モデルにより，次の一歩の位置と速度を算出 (1 へ)
7. 位置，速度とコースの情報から，すれ違い時の歩行モデルと歩行経路モデルにより，次の一歩の位置と速度を算出 (1 へ)

ここで，歩行者 A と歩行者 B の処理に関して同期の必要性はないが，本シミュレーションでは計算の簡略化のため 2 人の歩行者の処理を同期させている．

3.3.3　シミュレーション 1：モデルの有効性検証

検証内容

シミュレーションでは，現地調査で 1 対 1 のすれ違いが発生した 15 件の設定を再現し，歩行者の行動特性が一致するか確認を行った．シミュレーションにおいて歩行者が通行する通路モデルは，図 2.2 に示されるような実際の現場調査と同様のＬ字通路である．そして，Ｌ字で交わる 2 つの通路の幅も調査場所の実測値と同じとしている．シミュレーションでは，現場調査で確認された 1 対 1 の歩行者同士のすれ違い 15 件において，その時の双方の歩行者の「死角から外れて最初の 1 歩目の位置および速度」を歩行者の初期値として与え，すれ違い完了までのシミュレーションを行った．シミュレーションのスタートである死角から外れた最初の 1 歩目からすれ違い完了までを 1 回の試行として，15 通りのすれ違い設定毎に 3 回づつ，計 45 回の試行を行った．

シミュレーションに用いた主要なパラメータを表 3.4 に示す．これらのパラメータの数値に関して，衝突利得と回避利得は，図 2.8 のグラフと同じ領域分割となるように設定した．距離による不確かさの算出に用いた比例定数 k と，不確かさが発生しない距離 dc は，図 2.9 のグラフをもとに設定した．また，経路の目標円を決定する際に用いたパーソナルスペースの半径は，実際の調査データで計測された歩行者と壁との距離と，すれ違い時の歩行者間の距離の平均データに基づいて，パーソナルスペースに関する文献 (127) のデータを考慮した切りの良い数値を設定した．

Table 3.4　Parameters for Simulation

Pedestrian Parameter			
Stride of Walking	0.5 m	Turn Angle (Normal)	10 deg.
Width of Body	0.6 m	Turn Angle (Avoidance)	60 deg.
Step Interval	0.5 s	Weight Shift Period	0.15 s
Corner Distance:*d1*	1.2 m	Pedestrians' Distance:*d3*	1.3 m
Corner Distance:*d2*	0.5 m	Threshold of Incident	0. 7m
Judgment Parameter			
Collision Gain	4	Certain Distance :*dc*	2m
Avoidance Gain	1	Uncertain Coefficient :*k*	0.8 %/m

Table 3.5　Transition of Superiority(p)

(a) Simulation

		Absolute Value of Superiority(Previous)				
		4	3	2	1	0
Superiority(After)	4	49	11	6		
	3		12	9	3	3
	2		1	3	6	3
	1				1	6
	0				2	
	Inversion 1				1	
	Inversion 2					
	Inversion 3					
	Inversion 4					

Inversion of Positive/Negative

(b) Actual pedestrian

		Absolute Value of Superiority(Previous)				
		4	3	2	1	0
Superiority(After)	4	9		9		
	3	1	1	1		
	2		2	2	1	3
	1				1	
	0					
	Inversion 1				1	
	Inversion 2					
	Inversion 3					
	Inversion 4					

Inversion of Positive/Negative

結果と考察

シミュレーションの結果，45 回の試行によって双方の歩行者がのべ 161 歩，すなわち 161 回の判断を行っており，2 人合わせて計 322 回分の判断データを取得することができた．歩行者の 1 試行当たりに要する歩数は 3～5 歩（調査結果：2～4 歩)，平均で 3.6 歩（調査結果：3.1 歩) となり，調査結果より若干増加している．また，同じ設定で行った 3 回の試行の結果，その 3 回で経路が異なる場合が 4 つの設定であった．そのうち 2 つの設定では，すれ違い時のイン側，アウト側のコースで入れ替わりが発生していた．

(a) Simulation

(b) Actual pedestrian

Fig. 3.8　Superiority(p) and Distance

図 3.8 は，歩行者間の距離と優位性の値の関係を示している．図 3.8(a) はシミュレーションの結果であり，(b) は前章の調査で得られた実際の歩行者の結果である (調査結果の図 2.7 と同じ)．それぞれの図の横軸の数字は距離の上限の距離を示しており，グラフはそれぞれ左から 3.5〜4.5m，2.5〜3.5m，1.5〜2.5m，1.5m 以下での各優位性の値となった状態数の割合を示している．この図に示されたように (a) の結果も (b) と同様に，距離が近くなるにつれて絶対値が大きい状態の割合が増加する傾向が見られる．とくに，歩行者間距離が 1.5m 以下のデータでは，調査結果と同様に，絶対値が 1 以下の状態，すなわちイン側とアウト側のコース選択が不確定な領域 (ii)(図 3.2 上では領域 Ⅱ）の状態が無くなっている．これは，調査結果と同様に，両者が近づくにつれて歩行者の経路がイン側とアウト側にはっきり分かれていく様子が判る．そして，最終的に駆け引きができない領域となり，優位性に従ったコース選択によって，すれ違いを行っている様子が再現できている．

表 3.5 は，判断タイミング（Previous）から，1 歩踏み出した後の次の判断タイミング（After）への優位性の値の遷移を示している．表 3.5(a) はシミュレーションの結果であり，(b) は前章の調査で得られた実際の歩行者の結果である（調査結果の図 2.4 と同じ）．表に示されたように，(a) の結果も (b) と同様に，ほとんどの場合で黄色の領域内にあり，優位性の絶対値が維持または増加している様子が確認できる．このように，優位性の遷移においても，調査結果と同様にイン側とアウト側がはっきり分かれていく様子が分かる．また，駆け引きの領域である絶対値が 1 からの遷移において，調査結果 (b) でも見られた (1 → –1)，優位性の絶対値の減少や符号の逆転が（1 → 0，1 → –1）見られる．この時のデータを詳しく調べたところ，いずれの場合も駆け引きが行われており，優位性に従うと通常アウト側に向うところをイン側に向ったことにより，優位性の絶対値の減少や符号の逆転が起きていた．このように，提案の行動判断モデルのベースに用いたゲーム理論によって，調査結果と同様の駆け引きが再現できている．また，駆け引きの領域以外でも，調査結果 (b) でも見られたように (4 → 3，3 → 2)，優位性の絶対値の減少を見ることができた（3 → 2）．この時のデータを詳しく調べたところ，(b) の前者 (4 → 3) と同様に，優位性に従うと通常アウト側に向うところをイン側に向ったことにより絶対値の減少が生じていた．この現象は，駆け引きの領域の外で起こっていることから，情報の不確かさによる行動の変化に起因するものと考えられる．したがって，提案の行動判断モデルに用いた証拠理論によって，調査結果と同様の情報の不確かさによる行動判断の変化を再現することができている．

図 3.9 は，駆け引きが行われた試行での経路の例を示している．図の (a) はシミュレーションの結果，(b) は調査において観察された歩行者の歩行経路を示している．(a)(b) いずれの場合も，次のような歩行者のコース取りの様子が確認できる．歩行者 A は出会い頭からすれ違い完了まで有利

(a) Simulation　　(b) Actual pedestrians

Fig. 3.9　An Example of Passing Routes

な位置関係にあり，優位性に従ってイン側のコースを選択している．他方，歩行者 B は優位性に関して不利でありながらも，駆け引きで 2 歩目にイン側のコースを選択して，コースをイン側に変えている．しかしながら，3 歩目で優位性が改善されなかったため，インに進むのを中止してコースをアウト側に戻している．このように，歩行者の経路においても，実際と同様の挙動を再現することができている．

以上の結果より，提案のモデルによって，駆け引きの行動および不確かな情報による行動の変化が再現できていることが確認できた．すれ違いにおける歩行者の大枠の行動に関しても，調査結果と同様に，歩が進むにつれてイン側とアウト側へと明確に分かれていき，最終的には駆け引きの領域が無くなって，イン側とアウト側に分かれてすれ違う様子が確認できた．したがって，提案の行動判断モデルによって行動判断の大枠の法則性を再現できたと位置付けることができる．

ただし，詳細に見ると，いくつかの点で調査データとシミュレーションの間に相違があることもわかった．例えば，すれ違いまでの判断回数が若干増えていること．歩行者間の距離と優位性の値の関係において，1.5m 以下の距離で絶対値 4 の割合が調査データに比べかなり多くなっていること．優位性の値の遷移が，調査データとは同じ初期設定にも関わらず，必ずしも同じではないこと等が挙げられる．これらの違いは主に，シミュレーションに用いた歩行モデルと歩行経路モデルが，代表的かつ簡易的なモデルを用いており，個々のケースにおいて実際の歩行者の動きに合わせたものではないこと，また，行動判断のパラメータが，厳密にチューニングされたものではないこ

とに起因すると考えられる．したがって，これらの差異については，モデルに合わせてパラメータ精査を行うことで再現の精度が上がっていくものと考える．ただし，一部課題と思われる挙動についても確認できているため，後の節においてその課題の検討を行う．

3.3.4　シミュレーション 2：パラメータによる挙動の変化の確認

安全で効率的な通行のための条件

シミュレーションに先だって，前章の調査結果をもとに，歩行者の通行に関する安全性と効率性に関する条件について検討を行った．ここで，シミュレーション結果を知見として活用できるように，挙動の変化を確認するパラメータの選定に関しては，実際の安全対策として用いることが可能なものを採用する．したがって，歩行者の歩行特性を変えるような強制的な条件づくりは行わず，筆者らが開発に取り組んでいる環境センサシステムのように，環境から収集された情報を歩行者に提供することによって歩行者の行動判断に変化を加え，その結果として安全で効率的な通行を実現することを目指す．

まず，前章の調査結果からニアミスとなったすれ違いに関して分析すると，ニアミスの原因が，対向する歩行者の発見の遅れや判断の遅れであることが判った．発見や判断が遅れることによって回避行動が遅れ，避けようにも相手が接近しすぎていて，物理的に回避がぎりぎりの状態であったり，回避が不可能な状態になっていた．したがって，安全のためには回避のための時間的猶予を作ることが課題であり，事前の情報提示によって，回避のための準備行動を早く行わせることが効果的であると考えられる．また，図 2.4 に例示したように，駆け引きや不確かさによって両者が同じ方向に移動することで，衝突したり，回避行動が遅れることも考えられる．そこで，駆け引きや，情報の不確かさによって双方の歩行者が同じコースを選択することを防ぐために，双方の歩行者のコース選択を優位性に従わせることが有効であると考えられる

他方，効率化に着目すると，通行の停滞や通行時間が延びる原因は，両者が同じコースを選択してお見合いをしたり，方向転換を繰り返すことによる減速が原因であると考えられる．したがって，駆け引きや情報の不確かさによって双方の歩行者が同じコースを選択することを防ぎ，さらに減速を招くコース変更の回数を減らすためにも，双方の歩行者のコース選択を優位性に従わせることが有効であると考えられる．また，事前の情報提示によって早めにコースを確定させることで，より効率的な経路を通らせることも有効な方策であると考えられる．

以上を整理すると，次の 2 つの方策を実施することにより，安全性，効率性ともに向上すること

Fig. 3.10　Simulation Settings

が期待される．

- 通常の出合い頭で相手を視認するより早いタイミングで相手の情報を与えること
- 双方の歩行者に優位性に従ったコース選択をさせること

したがって，シミュレーションでは上記に挙げた方策を行うことで挙動がどのように変化するかを確認し，その方策の違いが安全性や効率性にどのように寄与するかに関して確認を行う．

シミュレーションの設定

上記で検討した条件をモデルに導入し，その有効性およびその変化による挙動の違いを確認するために，以下に示す設定でシミュレーションを実施した．

図 3.10 に示すような 3.0 mの通路幅を持つ L 字の曲がり角を想定し，双方から歩行者をスタートさせてすれ違いを生じさせる．歩行者は，一方 (歩行者 A) はコーナーのイン側の角から 6.0 mのところで，内側の壁から各 0.5m，1.5m，2.5m の 3 通りの場所を初期位置とし，また，もう一方 (歩行者 B) はコーナーのイン側の角から 4.0m と 6.0 mの 2 つの距離で，内側の壁から各 0.5m，1.5m，2.5m の 3 通りの計 6 か所を初期位置としている．そして，歩行者はいずれかの初期位置から双方同時にスタートする．シミュレーションでは，これら初期位置の組合せにより計 18 通りの初期設定があり，各設定において 3 回づつの試行を行い，1 つの条件において計 54 回の試行を行った．

また，安全で効率的な通行のための条件を導入するために，図 3.11 に示すような方法でモデル

(a) Prior information

(b) No tactics

Fig. 3.11　Conditions of Simulation

に組み込んだ．通常の視認より早いタイミングで相手の情報を与える，すなわち事前の情報提示については，図 3.11(a) に示すように，仮想的にコーナーの角落しを行うことで実現した．角から L_p だけ透過しているものとし，コーナー接近時にその部分を通じてお互いの情報が取得できるものとした．そして，歩行者はその情報を取得した時点で，提案の行動判断モデルによる行動判断を開始するものとした．また，双方の歩行者に優位性に従ったコースを選択させるために，図 3.11(b) に示す戦略図（最適反応戦略を示した図）のように，衝突利得と回避利得の関係を変化させることで駆け引きの領域 II を無くした．さらに，情報の不確かさに関する比例定数 k を 0 とすることで，情報の不確かさが発生しないようにした．

シミュレーションは，以下の条件設定によって実施した．

条件 (1)　ノーマル条件 (調査結果と同条件で比較対象の基準)

条件 (2)　事前情報提示（4 パターン：L_p = 0.5m/1.0m/1.5m/2.0m)

条件 (3)　駆け引きと情報の不確かさを無くす

条件 (4)　事前情報提示 (2m)+ 駆け引きと情報の不確かさを無くす

また，シミュレーションに用いたパラメータを表 3.6 に示す．表のパラメータのうち，歩行者のパラメータ [Pedestrian Parameter] は，シミュレーションの条件 (1)～(4) において共通で用いた．判断のパラメータ [Judgment Parameter] については，上記の条件 (1)(2) には (Normal) を，条件 (3)(4) には (No tactics ＆ No uncertainty) の設定を用いている．

Table 3.6　Parameters of Simulation for Safe Condition

Pedestrian Parameter			
Stride of Walking	0.5 m	Turn Angle (Normal)	10 deg.
Width of Body	0.6 m	Turn Angle (Avoidance)	60 deg.
Step Interval	0.50 s	Weight Shift Period	0.15 s
Corner Distance:d1	1.2 m	Pedestrians' Distance:d3	1.3 m
Corner Distance:d2	0.5 m	Threshold of Incident	0. 7m
Judgment Parameter(Normal)			
Collision Gain : Ca,Cb	4	Certain Distance :dc	1
Avoidance Gain : Aa,Ab	1	Uncertain Coefficient :k	0.8 %/m
Judgment Parameter(No tactics & No uncertainty)			
Collision Gain : Ca,Cb	4	Certain Distance :dc	2m
Avoidance Gain : Aa,Ab	0	Uncertain Coefficient :k	0.0 %/m

Table 3.7　Results of Simulation (Safety)

	Collisions	Closest Distance[m]	
		Avg	min
(1)Normal	10	0.956	≦ 0.7
(2)Prior information(0.5m)	6	1.044	≦ 0.7
(2)Prior information(1.0m)	0	1.101	0.733
(2)Prior information(1.5m)	0	1.192	0.768
(2)Prior information(2.0m)	0	1.244	0.765
(3)No tactics + no uncertainty	6	1.038	≦ 0.7
(4)Pre info.(2.0m) + No tactics	0	1.223	0.765

結果と考察

シミュレーションの結果を，表 3.7 と表 3.8 に示す．安全性に関しては，表 3.7 で示すように衝突回数と最接近距離のデータを取得した．最接近距離に関しては，試行毎の最接近距離対して平均

Table 3.8　Results of Simulation (Efficiency)

	Times of Judgement (Encounter～Passing)	Time[s] (Start～Passing)
(1)Normal	4.593	5.621
(2)Prior information(0.5m)	5.741	5.797
(2)Prior information(1.0m)	6.352	5.769
(2)Prior information(1.5m)	6.815	5.667
(2)Prior information(2.0m)	7.389	5.510
(3)No tactics + no uncertainty	4.167	5.427
(4)Pre info.(2.0m) + No tactics	7.222	5.427

値，最小値のデータを取得している．衝突が発生した場合は，最小値に衝突の閾値である 0.7m 以下 (≤ 0.7) を設定している．ここで，衝突回数が少ないほど安全だと考えることができる．最接近距離に関しては，平均値が小さいほど歩行者間が接近することになり，衝突もしくはヒヤリハットとなる可能性が高くなるため，値が小さいほど安全性が低く，大きいほど安全性が高いと考えられる．なお，最小値に関しては，歩の踏み出しと実際に歩行者同士が最接近するタイミングが異なるため参考値とする．

シミュレーションでは，衝突回数に関して次のような結果が得られた．ノーマル条件 (1) では，両者がコーナー内側の壁沿いを歩いたため，相手を見つけてから物理的に回避が間に合わず衝突した試行が 6 回あった．それ以外にも，駆け引きなどにより両者が同じコースを選択したため，回避が間に合わなくなって衝突した試行が 4 回あった．ここで，前者 6 件の衝突を「物理的条件による衝突」，後者 4 件の衝突を「行動判断による衝突」と分類する．事前情報を与えた条件 (2) では，いずれの場合も「行動判断による衝突」は防ぐことができたが，「物理的条件による衝突」に関しては距離によって違いが生じている．0.5 mの場合は「物理的条件による衝突」を防ぐことができなかったが，それ以上の距離 (1.0m，1.5m，2.0m) では，「行動判断による衝突」も防いでいる．また，駆け引きや情報の不確かさを無くした条件 (3) では，「物理的条件による衝突」を防ぐことはできなかったが，「行動判断による衝突」は防いでいる．条件 (2) と (3) の組合せである条件 (4) については，「物理的条件による衝突」と「行動判断による衝突」の両方を防いでいる．

以上の結果について，次のように考察する．まず，条件 (2) の事前の情報提示については，早く情報を入手することで，すれ違いまでにノーマル条件よりも多くの行動判断を行うことができる．

前項で得られたように，歩行者は歩を進める毎に優位性の差が大きくなっており，ある程度歩が進むと優位性が駆け引きの行われない領域に入る．したがって，ノーマル条件で見られた衝突のうち「行動判断による衝突」に対しては，事前の情報提示による判断回数の増加によってすれ違いまでに優位性に差がつき，衝突の原因となった同じ方向へのコース選択を防止することができたため，衝突を防止できたものと考えられる．また，ノーマル条件の衝突のうち「物理的条件による衝突」については，衝突までに判断が行われていないか，もしくは行われても距離が近づきすぎていて，両者でイン側とアウト側のコースを分け合っても衝突する状況にあった．そのため，条件 (2) のように事前の情報提示を行うことで，行動判断を行う機会が得られ，判断した行動によって十分に避けれるだけの距離もあったので，衝突を防ぐことができたものと考えられる．ただし，0.5m の場合においては，回避に十分な距離が得られなかったため，「物理的条件による衝突」を防げなかったと考えられる．また，条件 (3) のように駆け引きと情報の不確かさを無くした場合は，優位性に反するコース選択がなくなるため，同じコースを選択したことが原因で衝突がおきている「行動判断による衝突」を防ぐことができたと考えられる．しかし，判断結果が替わるだけで十分に避けれるだけの猶予はないため，「物理的条件による衝突」を防ぐことができなっかたと考えられる．条件 (4) については，すでに事前情報の提示だけで「物理的条件による衝突」と「行動判断による衝突」の両方の衝突は防いでいるため，駆け引きと情報の不確かさを無くすことによる効果は確認できないが，優位性に従うコース取りをさせることで，より確実に衝突を防いでいると考えられる．

また，最接近距離の平均値 (Avg) に関して，ノーマル条件 (1) に対し，事前情報を与える条件 (2) では，L_p が大きくなり早く情報を与えるほど値が大きくなっている様子が確認できる．また，駆け引きや情報の不確かさを無くした条件 (3) では，条件 (2) の 0.5m と同程度である．事前情報の提示に加え，駆け引きや情報の不確かさを無くした条件 (4) では，条件 (2) の駆け引きや情報の不確かさが有る条件とほぼ同じ結果が得られており，駆け引きや情報の不確かさを無くすことによる更なる効果は確認できていない．

これらの結果に関して，次のように考察する．歩行者の歩行経路モデルにおけるイン側とアウト側の経路間の距離は，本シミュレーションの設定では 1.3 mとなっている．したがって，両者でイン側とアウト側を分け合って歩行している場合は 1.3m 近辺になることが期待され，衝突やヒヤリハットが生じることで最接近距離が小さくなっていると考えられる．ノーマル条件での衝突のうち「行動判断による衝突」ついては，衝突回数での考察でも検討したように，条件 (2)(3)(4) ともに十分にイン側とアウト側に分かれていると考えられる．したがって，いずれの場合も歩行経路モデルに近い幅ですれ違っていると考えられるため，条件による違いはあまりないと考えられる．そのた

め，各条件における最接近距離の差は「物理的条件による衝突」が主因であり，回避のための物理的余裕が値に影響していると考えられる．条件 (2) の 0.5m は,「行動判断による衝突」が生じていない分，ノーマル条件より値が大きくなっているが,「物理的条件による衝突」が発生している分，他の条件より値が小さくなっていると考えられる．条件 (2) の 1.0 m，1.5 m，2.0 mでは,「物理的条件による衝突」も発生していないが，経路モデルの経路の間隔には至らず，事前提示の距離に従って間隔が大きくなっている．これは，事前提示によって稼いだ物理的余裕が，経路モデルに従い両者の経路の間隔を空けるほどの余裕はなく，物理的余裕を生じる事前提示の距離に従って間隔が大きくなっているものと考えられる．上記のように，値の差が主に「物理的条件による衝突」に向けた余裕の差であり，駆け引きや情報の不確かさを無くした判断による効果が値の差に反映されないため，条件 (2) の 0.5m と条件 (3)，条件 (2) の 2.0m と条件 (4) において，ほぼ同じ値となっているものと考える．

以上のように，安全性に関して，事前情報を与えることが，衝突を防ぎ，最接近距離を大きくしている．特に，事前情報は早く与えるほど安全性に関して効果が高いことも確認できた．一方，駆け引きや情報の不確かさを無くすことによる衝突回避や最接近距離への影響は限定的であり，安全性に関して効果は限定的で有ることが確認された．安全面に関しては，死角等の物理的な制約条件が主たる問題であり，駆け引きなどの心理的な影響は，若干の効果はあっても副次的な解決策であることが判った．

通行の効率性に関しては，表 3.8 で示すように，相手を見つけてからすれ違い完了するまでの判断回数（＝歩数）と，スタートからすれ違い完了までの平均時間の平均データを取得している．いずれも値が小さいほど，時間や歩数もかからずにすれ違いを完了できるため，効率的であると判断する．ただし，判断回数に関しては，事前の情報提示によって相手を見つけるタイミングが変わることから参考値と考え，評価はすれ違い完了までの平均時間によって行うものとする．

すれ違いの時間において，ノーマル条件 (1) に対し，事前情報を与えた場合 (2) は次のような結果となった．L_p が 0.5m の場合に，一旦すれ違いまでの時間が延びており，L_p が長くなるにつれて，その時間は短くなり，最終的に 2.0m ではノーマル条件より早くすれ違いを完了している．事前の情報提示によって，ゲーム理論による判断回数が増えて，駆け引きなどによるコース変更の可能性も増えるため，ノーマル条件の場合より全体的に時間がかかっていると考えられる．しかし，早く情報を与えるほど，優位性に差がつくのが早まり，すれ違い時のコースが早期に決定され，効果的な経路取りができるようになっていくものと考えられる．そして，最終的に 2.0m では，その効果がマイナス分を上回ったものと考える．一方，駆け引きや不確かさの影響を取り除いた条件

(3)(4) の場合，ノーマル条件よりすれ違いの時間を短縮できている．これは，優位性に反する行動が無くなるため，駆け引きの行動などによるコースの変更とそれに伴う時間のロスが無くなる．そして，イン側とアウト側がすんなりと分かれることで，すれ違いの場所に早く到達できているのではないかと考える．また，駆け引きなどによる時間短縮の効果が，2.0 m手前の事前の情報提示の場合より大きいこと，条件 (3)(4) のデータに違いが無いことから，条件 (4) の結果は駆け引きなどの影響を無くす場合の効果の方が支配的であると考えられる．

以上のように，効率性に関しては駆け引きや情報の不確かさを無くし，優位性と異なる余分な行動をとらせないようにすることが効果的であることが確認できた．また，事前の情報提示に関しては，場合によって効率性を悪化させることが確認された．

図 3.12 に，それぞれの場合の経路の 1 例を挙げる. (a) はノーマル条件，(b) は駆け引き等を無くした場合, (c) は事前情報を与えた場合で 0.5 mの場合, (d) は 2.0 mの場合の歩行者の歩行した経路を示している．歩行者 A は左下をスタートする青線で，歩行者 B は右上からスタートする赤線で経路を表している．経路のデータは，それぞれスタートから同じ時間（6.5 秒間）のデータを用いている．また，マーカは毎歩を進めた際の歩行者の体の位置を示しており，グラフの太線部は相手を発見してからすれ違いまでの行動判断を行った領域を示している．

(a) では，両者共が駆け引き等でアウト側に進んだため結果的に衝突を発生している．一方，(b) は駆け引き等を排除したため，コース取りに変化はなく順調にすれ違いを行っている．そのため，4 例の中でもっとも効率よくコーナーを通過できており，歩行者 B はすでにコーナー部の通過を完了している．また，(c) では (a) より早めに回避を開始し，衝突には至らなかったが，大きな方向転換が必要とされたため，無駄に大回りの経路をとっていることが判る．一方 (d) は，もっと早い時点で経路の選択を開始することで，(c) に較べて効率的な経路を通っていることが判る．以上より，本モデルのシミュレータの挙動に関して不自然なものはなく，よくそれぞれのパラメータによる挙動を示しているものと考えられる．

シミュレーションによって得られた知見をまとめると, 次のようなものとなる．安全性に関しては，事前の情報提示が効果的であることが判った．更に，事前の情報提示は早めに行うほど効果が高いことも明らかになった．駆け引きや情報の不確かさを無くすことも，効果はあるが限定的であることが判った．また，効率的な通行に関しては，駆け引きや情報の不確かさを無くすことが効果的であることが判った．事前の情報提示は，距離が短い場合に逆効果となることがあるが，早めに提示を行うほど逆効果は薄れ，ある程度の距離となると若干であるが効果が見られることが判った．もちろん，このシミュレーションは目的の設定条件を単純化したモデルで表したものであり，

(a) Normal

(b) No tactics and no certainty

(c) Prior Information(0.5m)

(d) Prior Information(2.0m)

Fig. 3.12　Example of Pedestrians' Routes

実際の環境下において歩行者は別の影響を受けて，異なる挙動を示す可能性も考えられる．しかし，本シミュレーションで得られた歩行者の挙動の傾向については，この設定条件における知見として活用できるものと考える．

(a) Characteristic Behavior (Actual Pedestrian)　　(b) Unnatural Behavior (Simulation)

Fig. 3.13　Behavior in Tactics

3.3.5　静的モデルの成果と課題

シミュレーション 1 より，提案の行動判断モデルによって，すれ違いにおける駆け引き発生の法則性を再現できることが確認できた．したがって，前節で提案した静的な行動判断モデルに関しては，すれ違い中における瞬間的な判断を示す上では，歩行者の判断特性を良く表していると考えられる．そして，シミュレーション 2 では，行動判断モデルの駆け引き発生の再現性を活かして，駆け引きに関係する安全性や効率性に対して，影響を与える環境条件の知見を得ることができた．以上のことより，ゲーム理論をベースとしたこの静的な行動判断モデルによって，すれ違いにおいて見られた典型的な事象である駆け引きについて，人間の様を規範的に示すことに成功したと言える．

しかし，他方で行動調査の結果 (104)(106) から，実際の歩行者の駆け引き時の行動には，動的な判断特性の変化によるものと思われる次の特徴が確認されている．

・駆け引きは相手を発見後，最初の 1，2 歩目のみで開始されている．
・駆け引き行動の継続は優位性が改善した場合のみで，現状維持や悪化した際には中止されている．
・駆け引きが一度中止された場合に，再度駆け引きは行われていない．

すなわち，本モデルで特徴的に扱っている駆け引きの行動に関して，その発現が一定ではなく，動的に変化していることが考えられる．しかしながら，前節にて提案したモデルは静的なモデルであ

り，判断特性の変化が考慮されておらず，環境変化に対する適応性にかけるため，次のような不自然と感じられる挙動も見られている．図 3.13 に，実際の歩行者の挙動 (a) と，シミュレーションに見られた不自然な挙動 (b) を示す．図 3.13(a) に示すように，実際の歩行者は駆け引きを中止した場合には，再び駆け引きを行うことなく，優位性の結果に従い，インとアウトを分け合ってすれ違っている．一方，図の (b) に示すように，静的な行動判断モデルによるシミュレーションでは，駆け引きの開始と中止を繰り返してフラフラと迷走する不自然な挙動が起こり得る．これは，双方の位置関係が領域Ⅱの中に維持されると，歩行者は確率的に駆け引きの発生と中止を繰り返してしまうことが原因である．一方，実際の歩行者は歩が進むにつれて交差するまでの時間的，空間的な猶予が無くなり，位置関係の優位性を逆転する可能性が低くなるため，歩行者が駆け引きを行わない方向に判断特性を変化させていると考えることができる．その他にも，次のような動的に判断特性が変化する場合が考えられる．例えば，回避を嫌う強引な歩行者同士が出会った場合も，衝突するまで両者がイン側を取り合うことはほとんどない．チキンレースのようにどちらか一方が脱落すると勝負が決してしまい，脱落した側は再びイン側に向うことはなく，アウト側に避けて相手にイン側を譲る．その場合には，脱落側の判断特性は，少なくとも強引にイン側に進むようなタイプではなくなっており，アウト側に譲る弱気なタイプに変化していることが考えられる．それ以外の場合にも，人は相手の様子を見ながら，相手の動きに合わせて自分の行動を変えていると考えられる．

したがって，環境条件の変化に適応し，より実際の歩行者に近い判断を再現するためには，このモデルの判断特性を決定するパラメータが歩を進める毎にどのように遷移していくのか，動的な判断特性の遷移に関しても検討を行っていかなければならない．

第 4 章

判断特性の変化を考慮した動的行動判断モデルへの拡張
(Model expansion by considering dynamics of judgment characteristics)

4.1　歩行者の性質と判断特性を示す指標

4.1.1　歩行者の性質の表現

本章では，歩行者が行動判断を行う際の判断の仕方やその特徴を示す「判断特性」の変化を考慮した動的な行動判断モデルの構築を行う．そのモデル構築に先だって，まず歩行者の「判断特性」に関して分類と定式化を行う．前節で提案したゲーム理論をベースとする静的行動判断モデルでは，次のような仕組みで歩行者の「判断特性」が表現されている．歩行者 A を判断の主体とし，歩行者 B をその相手とする場合，歩行者 A は自分の利得 Ca，Aa によって，「相手がイン側に進むだろうか，もしくはアウト側に進むだろうか」に関する閾値 Bb を判断する．さらに，相手の利得

Cb，Ab によって，「自分がイン側に進むべきか，もしくはアウト側に進むべきか」に関する閾値 Ba を判断する．この 2 つの条件によって，自分が確実にイン側を通れると考えられる領域，アウト側に行った方が良いと考えられる領域，イン側に向う方が合理的であるが，相手もイン側に向って来る可能性がある領域が決定する．

式 (3.5)(3.6) から判るように，この行動判断の閾値 Ba と Bb は，次の「回避と衝突の利得の比 Ki」によって決定されている．

$$Ki = Ai/Ci \quad (i = a, b) \tag{4.1}$$

ここで，通常は衝突利得が大きくなるため Ki は 0.0〜1.0 の値を取る．そして，Ki の大きさは歩行者の性質を示している．Ki が小さい歩行者，すなわち回避利得が衝突利得に比べて十分に小さい歩行者は，「衝突したくないため回避を優先する」という考えに基づいた判断が行われる，いわゆる「ハト派」の性質を示す．一方，Ki が大きくなり回避利得が衝突利得の大きさに近づくと，歩行者は「多少の衝突のリスクを負っても回避はしない」という考えに基づいて判断が行われる，いわゆる「タカ派」の性質を示す．

式 (3.5)(3.6) を式 (4.1) によって書き換えると，次の式 (4.2)(4.3) が得られる．

$$Ba = (1 - Kb)/2 \tag{4.2}$$

$$Bb = (1 - Ka)/2 \tag{4.3}$$

式 (4.2) より，相手の利得の比 Kb が小さくなると閾値 Ba は大きくなって 0.5 に近づいていく．逆に Kb が大きくなると Ba は小さくなって 0.0 に近づいていく．すなわち，相手がハト派の場合，回避を優先するのでアウト側に避ける可能性が高くなるため，自分が「イン側に進むべき」という判断となることを示しており，逆に相手がタカ派の場合，自分は「アウト側へ進むべき」との判断となることを示している．また式 (4.3) より，自分の利得の比 Ka に対する閾値 Bb の関係も同様であり，自分がハト派の場合，相手が「イン側へ進むだろう」と判断し，自分がタカ派の場合，相手が「アウト側に進むだろう」と判断することを示している．

4.1.2　歩行者の判断特性

前項の式 (4.2)(4.3) で示したように，本モデルでの歩行者の行動判断の閾値は，相手の利得の比で決定する．歩行者は自分の利得の比については理解している．もちろん実際は，数値として理解しているのではく，自分の性質から感覚的に把握していることになる．しかし，相手の利得の比に

(a) Criteria of Pedestrian A　　(b) Criteria of Pedestrian B

Fig. 4.1　Difference between the Actual and the Prediction Criteria

関しては，必ずしも正しく理解できている訳ではなく，「自分の想像する相手の性質」にもとづいて判断しているものと考えられる．

前節の静的行動判断モデルを扱う際には，特に相手の性質への理解に関しては言及していなかったため，双方の歩行者が相互に正しく相手の性質を理解し，同じ戦略図 (最適反応戦略を示した図) を共有しているという仮定を用いていたことになる．しかし実際には，曲がり角ですれ違うだけの相手の性質を正しく理解できていることはほとんどなく，前述の通りに相手に関する予想によって行動を決定している．そのため，実際の性質と予測する性質は必ずしも一致しないため，共通した戦略図を使用することはできず，歩行者毎に戦略図を持つことになる．

例えば，図 4.1 に示すように，

(a) 歩行者 A は実際の歩行者 B のことを，実際よりハト派と考えている．

(b) 歩行者 B も同様に歩行者 A のことを，実際よりハト派と考えている．

この時，お互い相手がアウト側に避けてくれると予想して，2 人ともイン側に進んで衝突する可能性が考えられる．この例とは逆に，相手を実際よりタカ派と勘違いをした場合には，お互いに相手の行動に対して必要以上に警戒することになり，2 人ともアウト側に避けあってお見合いする可能性もある．

このように，相手の性質に関して実際と予測との間に差が生じれば，相手が予想外の行動を取ることになり，歩行者同士の衝突や通行が滞る原因にもなり得る．

Fig. 4.2　Characteristics of Judgment

このような歩行者の性質のモデルを用いて，自分と，予測する相手の性質を組合せることで，歩行者の判断特性のタイプを示せると考えられる．図 4.2 では，歩行者 A が歩行者 B に相対した際の判断特性の特徴的な 4 つのタイプを戦略図によって示している．ただし，ここでは歩行者 A と B が同じ性質 ($Ka = Kb$) であった場合を基準に比較を行っている．

例えば，相手は無理にイン側へは来ないと予測して，自身は回避せずにイン側を通ろうとする，いわゆる「強引 (Pushy)」な判断をする歩行者の戦略図は，図 4.2(a) に示すように，領域 I が大きくなり，領域 Ⅲ が小さくなる．

Fig. 4.3　Indicators of Gain Structure

逆に，相手がイン側に来ると予測して，自身は無理をせず少しでも不利になればアウト側を通ろうとする，いわゆる「弱気 (Wimpy」な判断をする歩行者の戦略図は，図 4.2(b) に示すように，領域 I が小さくなり，領域 Ⅲ が大きくなる．

また，位置関係の優位性にあまり捕らわれず，積極的に駆け引きの行動にでる，いわゆる「戦略 (Tactics)」的な判断をする歩行者の戦略図は，図 4.2(c) に示すように，領域 Ⅱ が大きくなる．

逆に，位置関係の優位性に従った行動を取り，駆け引きの行動は極力行わない，いわゆる「着実 (Steady)」な判断をする歩行者の戦略図は，図 4.2(d) に示すように，領域 Ⅱ が小さくなる．

このように考えることで，歩行者の判断特性を示す指標も定式化することができる．この時，図 4.3 に示すように，M_B と W_B が歩行者の判断特性を端的に示す指標として与えることができる．M_B は最適反応戦略の閾値 Ba と Bb の中間値であり，この中間値はイン側のコース選択を行う領域 I と，あきらめてアウト側のコース選択を行う領域 Ⅲ の大きさの差で決まる．したがって，この指標が小さくなれば「弱気」タイプの判断特性となり，逆に大きくなれば「強引」タイプの判断特性となる．一方，W_B は最適反応戦略の閾値 Ba と Bb の差であり，優位性に反して駆け引きを行う領域 Ⅱ の大きさを示す．したがって，この指標が大きくなれば駆け引きの領域が大きくなり，「戦略」タイプの判断特性となる．逆に，この指標が小さくなれば「着実」タイプの判断特性となる．以上より，判断特性のタイプとその指標は図 4.4 のような関係となる．M_B と W_B を 2 軸とする平

Fig. 4.4　Changes in Judgment Types by Indicators

面座標の上で，M_B 軸で大きくなるほど「強引」タイプとなり，小さくなるほど「弱気」タイプとなる．また W_B 軸で大きくなるほど「戦略」タイプとなり，小さくなるほど「着実」タイプとなる．したがって，両軸とも大きい場合には「強引」かつ「戦略」タイプとなり，逆に両軸とも小さい場合は，「弱気」タイプかつ「着実」タイプとなる．

ここで，M_B と W_B は，式 (4.4)(4.5) で与えられる

$$M_B = ((1 - Bb) + Ba)/2 \tag{4.4}$$

$$W_B = (1 - Bb) - Ba \tag{4.5}$$

また，Ba と Bb の代わりに衝突と回避の利得の比 Ka，Kb を用いると次式となる．

$$M_B = (2 + Ka - Kb)/4 \tag{4.6}$$

$$W_B = (Ka + Kb)/2 \tag{4.7}$$

したがって，M_B と W_B を与える Ka と Kb は次のように求められる．

$$Ka = 2M_B + W_B - 1 \tag{4.8}$$

$$Kb = -2M_B + W_B + 1 \tag{4.9}$$

Fig. 4.5　Simulation Settings

以上の定式化によって，目的とする判断特性の歩行者を再現するためのパラメータを設定することが可能となる．

4.2　シミュレーションによる指標の検証

検証内容

前節では歩行者の性質を利得の比を用いて定式化し，その性質をもとに歩行者の判断特性の 4 つのタイプと，これを示す指標を与えた．本節では，与えられた指標を用いたシミュレーションによって，期待されるタイプと一致した歩行者の挙動が再現できるかを確認し，この指標の定式化の有効性に関して検証を行う．シミュレーションでは，双方に同じ，もしくは異なるタイプの歩行者の組合せによってすれ違いのシミュレーションを行い，イン側取得率の違い，駆け引きの回数などを比較する．なお，前章で用いたシミュレーションのソフトを流用し，行動判断モデル，歩行モデル，歩行経路モデルには，静的行動判断モデルのシミュレーションで用いたモデルをそのまま用いている．

シミュレーションの想定シーンと設定

シミュレーションは，図 4.5 に示すような 3.0 mの通路がＬ字に曲がった通路を想定し，双方から歩行者をスタートさせてすれ違いを生じさせる．歩行者は双方とも，曲がり角から 6.0 mのとこ

Table 4.1　Simulation Parameters

Pedestrian Parameter			
Stride of Walking	0.5 m	Turn Angle (Normal)	10 deg.
Width of Body	0.6 m	Turn Angle (Avoidance)	60 deg.
Step Interval	0.5 sec	Weight Shift Period	0.15 sec
Corner Distance:d1	1.2 m	Pedestrians' Distance:d3	1.3 m
Corner Distance:d2	0.5 m	Threshold of Incident	0. 7m

Table 4.2　Combination of Pedestrians

Setting	Pedestrian A					Pedestrian B				
	Ka (Nature)	Predicted Kb (Nature)	Type	M_B	W_B	Kb (Nature)	Predicted Ka (Nature)	Type	M_B	W_B
1	0.25 (Standard)	0.25 (Standard)	Standard	1/2	1/4	0.25 (Standard)	0.25 (Standard)	Standard	1/2	1/4
2	0 .00 (Pigeon)	0.25 (Standard)	Wimpy	7/16	1/8	0.25 (Standard)	0 .00 (Pigeon)	Pushy	9/16	1/8
3	1.00 (Hawk)	0.25 (Standard)	Pushy	11/16	5/8	0.25 (Standard)	1.00 (Hawk)	Wimpy	5/16	5/8
4	1.00 (Hawk)	0 .00 (Pigeon)	Pushy	3/4	1/2	0 .00 (Pigeon)	1.00 (Hawk)	Wimpy	1/4	1/2
5	0 .00 (Pigeon)	1.00 (Hawk)	Wimpy	1/4	1/2	0 .00 (Pigeon)	1.00 (Hawk)	Wimpy	1/4	1/2
6	1.00 (Hawk)	0 .00 (Pigeon)	Pushy	3/4	1/2	1.00 (Hawk)	0 .00 (Pigeon)	Pushy	3/4	1/2
7	0 .00 (Pigeon)	0 .00 (Pigeon)	Steady	1/2	0	0 .00 (Pigeon)	0 .00 (Pigeon)	Steady	1/2	0
8	1.00 (Hawk)	1.00 (Hawk)	Tactics	1/2	1	1.00 (Hawk)	1.00 (Hawk)	Tactics	1/2	1
9	1 .00 (Hawk)	1.00 (Hawk)	Tactics	1/2	1	0 .00 (Pigeon)	0 .00 (Pigeon)	Steady	1/2	0

ろに，内側の壁から各 0.5m，1.5m，2.5m の 3 通りの場所を初期位置としており，歩行者はここを同時にスタートする．シミュレーションでは，双方 3 通りの組合せで計 9 通りの初期条件があり，初期条件毎に 20 回づつの試行を行い，各設定において 180 回の試行を行った．

シミュレーションで用いた各種パラメータを表 4.1 を示す．また，歩行者の判断特性の組合せの設定を表 4.2 に示す．表では，歩行者 A，B のそれぞれの自分と，予測した相手の利得の比 (Ka, Kb)，および判断特性のタイプとその特徴を示す指標 (M_B，W_B) を示している．特に，予測した相手の利得の比が実際とは異なる場合は，そのパラメータを下線のある赤字で示している．

以下に，各設定に関する説明を行う．また，図 4.6～4.8 には，それぞれの設定での歩行者の戦略図を示している．

【設定 1】　両歩行者の利得の比を現場調査 (106) の平均値 $Ki = 0.25(i = a, b)$ と同じとした設定.，歩行者はそれぞれが相手の性質を正しく把握しているものとしている（これを歩行者の性質や判断特性の「標準」とおいて，他の設定に対する基準とする）.

【設定 2～4】　両歩行者の間で判断特性が異なり，一方が「強引」タイプで，もう一方が「弱気」タイプの判断特性となる設定．設定 2～4 はそれぞれ M_B の差，すなわち「強引」と「弱気」の度合いが異なる．歩行者は，それぞれが相手の性質を正しく把握しているものとしている．

【設定 5～6】　両歩行者が同じ判断特性同士にもかかわらず，相手の性質を見誤った場合の設定.

【設定 7～8】　タカ派同士やハト派同士の組合せにより，「戦略」タイプや「着実」タイプの判断特性とした設定．歩行者はそれぞれが相手の性質を正しく把握しているものとしている．

【設定 9】　タカ派とハト派の異なる性質の組合せにも関わらず，相手が自分と同じ性質と勘違いした場合の設定.

期待される結果

本シミュレーションでは，先に歩行者の判断特性のパラメータから妥当と思われる結果について事前に検討を行い，実際に取得された結果と比較することで，行動特性の指標の妥当性について検証を行う．以下では，まず歩行者の判断特性から期待される結果について検討を行う．

シミュレーションでは，全体的な評価用のデータとして，衝突が起こった試行数，衝突を起こさずに無事すれ違いを完了した試行数，無事すれ違いを完了した試行のうち歩行者 A が最終的にイン側を通った試行数とその割合を記録する．また，本研究の特徴である駆け引きに関する評価用のデータとして，駆け引きによって優位性に反する行動を行った試行数と，そのうちで優位性の逆転が起きた試行数を記録する．また，この駆け引きに関するデータは歩行者 A，B 別で記録を行う．

全体的なデータについては，歩行者 A のイン側取得率に判断特性の違いによる影響を見ることができると考えられる．歩行者 A，B の初期位置の設定には差が無いため，両歩行者の判断特性が同じであればイン側取得率はお互いにほぼ 50.0% になると予測される．一方，歩行者の判断特性に差があればその差の分だけ取得率に差が出ること考えられ，以下のような結果になると予測される．

「強引」vs「弱気」:「強引」タイプの歩行者のイン側取得率が高くなる．これは，「強引」タイプの歩行者は無理にでもイン側に進み，「弱気」タイプの歩行者は少しでも不利だとアウト側に進むた

(a) Setting 1

(b) Setting 2

(c) Setting 3

Fig. 4.6　Best Response of Pedestrians (Setting 1-3)

(d) Setting 4

(e) Setting 5

(f) Setting 6

Fig. 4.7　Best Response of Pedestrians (Setting 4-6)

(g) Setting 7

(h) Setting 8

(i) Setting 9

Fig. 4.8　Best Response of Pedestrians (Setting 7-9)

め．また，M_B の差が大きいほどイン側の取得率に差が出る．
「戦略」vs「着実」:「戦略」タイプの歩行者のイン側取得率が高くなる．「戦略」タイプの歩行者は多少の不利でも駆け引きによりイン側に向い，「着実」タイプの歩行者は優位性に従うようにコース選択を行う．したがって，「戦略」タイプの歩行者には駆け引きによる逆転の可能性があるが，「着実」タイプの歩行者は駆け引きを行わないため，逆転されることはあっても逆転することが無い．

また，駆け引きに関するデータについては，特に駆け引きの様子の違いに，判断特性の違いによる影響を見ることができると考えられる．$W_B = 0$ となる設定では，駆け引きの領域がなくなるため，その挙動は優位性に従って，駆け引きの行動が見られないと予測される．また，W_B が大きくなるに従って，駆け引きの領域が広がるため，それに伴って駆け引きの回数が増加し，逆転の回数も増えると予測される．そのため，「戦略」タイプと「着実」タイプの組合せの場合には，「戦略」タイプの歩行者が「着実」タイプの歩行者に較べての駆け引きや逆転が多くなると予測される．「強引」タイプと「弱気」タイプの組合せの場合は，「強引」タイプの歩行者が，多少の不利でも駆け引きによってイン側に向うため，駆け引きや逆転の回数も多くなると予測される．また，その差が大きいほど駆け引きや逆転の回数も増えると予測される．一方，「弱気」タイプの歩行者は，あえてイン側に進むことはほとんどないと考えられるため，駆け引きや逆転はほとんど見られないと予測される．「強引」タイプ同士の組合せの場合は，両者とも積極的に駆けと引きを行うタイプであるため，どちらも駆け引きや逆転の回数は多くなると予測される．「弱気」タイプ同士の組合せの場合も，駆け引きや逆転が見られるが，場合によっては有利にも関わらずアウト側へ向かうような逆転も見られると考えられる．

結果と考察

シミュレーションの結果を表 4.3 と表 4.4 に示す．表 4.3 では全体的な結果を示していおり，各 180 回の試行 (すれ違い) における衝突回数，衝突を起こさずに無事すれ違いを完了した試行の回数，無事すれ違いを完了した試行のうち歩行者 A が最終的にイン側を通った試行の回数とその割合を示している

表 4.3 より，双方が同じタイプである設定 1 と設定 5〜8 についての歩行者 A のイン側取得率は 50% 前後（48.8〜51.9%) で，歩行者 A と B のイン側取得率の差は最大 3.8%(6 回) であり，ほぼ同等の取得率である．「強引」vs「弱気」となる設定 2〜4 では，「強引」タイプの歩行者のイン側取得率が大きくなっている．歩行者 A と B の差は，設定 2 が最も小さく 6.3%(18 回)，設定 3 が 16.3%(26 回)，設定 4 が最も大きくて 23.8%(38 回) の差になっており，M_B の差が大きいほどイン

Table 4.3　Results of Simulation (Acquisition Rate of the Inner Course)

Setting	Collisions [times]	No Collision [times]	Acquisition of IN by A[times]	Acquisition Rate of IN [%]
1	20	160	83	51.9
2	20	160	71	44.4
3	20	160	93	58.1
4	20	160	99	61.9
5	20	160	82	51.3
6	20	160	79	49.4
7	20	160	80	50.0
8	20	160	78	48.8
9	20	160	90	56.3

側取得率の差が大きくなっている．また,「戦略」タイプと「着実」タイプの組合せである設定 9 では,「戦略」タイプの歩行者のイン側取得率が大きくなっており，その差は 12.5%(20 回) となっている．以上の結果は，判断特性のパラメータから期待される結果と一致している．なお，衝突回数はすべての設定で 20 回であったが，すべて両者がコーナーの内側の壁に近い位置からスタートした場合に発生している．この試行では，歩行者は内壁に近い位置を通行するため，コーナーの死角を抜けて相手を見つけたときには，すでに接近しすぎて物理的に回避不可能な状態であり，判断特性が衝突の原因ではない．これ以外に衝突は見られず，本シミュレーションの結果だけでは，歩行者の判断特性の違いによる衝突への影響を確認することはできなかった．衝突に関しては，回避能力等や環境設定等の物理的な要因が大きいため，判断特性よりも主にシミュレーションの設定に起因するものと考えられる．

表 4.4 では，各 180 回の試行（すれ違い）において駆け引きのために優位性に反する行動を行った試行の回数と，その結果として優位性の逆転が起こり，当初の優位性とは異なるコース取りを行った試行の回数を示している．さらに，それぞれに関して歩行者別の回数も示している．

表 4.4 より，$W_B = 0$ となる設定 7 では駆け引きの行動は見られていない，また，設定 7 に対して，より「戦略」タイプ同士の組合せとなる設定 1，8 では，それぞれ駆け引きが 10 回と 24 回見

Table 4.4　Result of Simulation (Behavior with Tactics)

Setting	Behavior with tactics			Reversal of superiority		
	Total	A	B	Total	A	B
1	10	6	4	6	4	2
2	13	1	12	8	0	8
3	16	14	2	12	12	0
4	22	21	1	18	18	0
5	20	11	9	15	8	7
6	21	10	11	17	8	9
7	0	0	0	0	0	0
8	24	13	11	17	7	9
9	13	13	0	11	11	0

られており，W_B が大きくなるにつれて回数が増加している．また，両歩行者の判断特性が同じことから，両歩行者の回数の差は駆け引き，逆転とも 2 回と小さい．一方，W_B に差がある設定 9 では，「着実」タイプの歩行者側で駆け引きは見られず，もう一方の「戦略」側だけが駆け引きを行っている．「強引」タイプと「弱気」タイプの組合せである設定 2～4 では，「強引」タイプが 10 回を超える駆け引きを行っているが「弱気」タイプの歩行者による駆け引きは，1 または 2 回とほとんど行われていない．また，タカ派同士，ハト派同士である設定 5，6 では，相手の性格を勘違いしていることもあり，いずれの場合も双方とも 9～11 回と活発に駆け引きを行っている．さらに，設定によってそれぞれで駆け引きの様子に違いも見られた．タカ派同士の設定 6 では，互いに相手がハト派と勘違いしているため，優位性が不利な時にイン側に向かう，通常の駆け引きの行動が見られた．しかし，ハト派同士の設定 5 では，互いにタカ派と勘違いしているため，設定 6 では見られなかった優位性が有利にも関わらずアウト側に向う，逆の駆け引きの行動が見られた．以上の結果も，判断特性のパラメータから期待される駆け引きや逆転の傾向と結果と一致している．

以上のシミュレーションの結果と考察より，表 4.3 と表 4.4 のどちらの結果も，事前に検討した妥当と思われる結果と一致しており，本研究で提案する歩行者のタイプを示す指標の有効性を確認できた．

4.3　動的モデルへの拡張

4.3.1　学習による判断特性の変化

前章の静的行動判断モデルの課題で述べたように，実際の歩行者は判断特性を変化させていると考えられる．前節では，ベースとなる歩行者の性質とそれによる判断特性について 4 つのタイプを挙げて，特徴を示す指標について定式化を行った．では，歩行者はどのように判断特性のタイプを変化させているのだろうか.

まず，前章で挙げた課題の例を用いて，どのようにタイプに変化を起こしていたのかを考える．図 3.13(a) で示したように，一度駆け引きを中止した後に駆け引きを繰り返さなくなった例については，歩が進むごとにすれ違うまでの時間的，空間的な猶予が無くなって，駆け引きによる逆転が困難になり，より優位性に従う「着実」タイプへと変化したためではないかと考えられる．また，相手が 1 度もアウト側に向うことなく，ずっとイン側を通ってきたことにより，相手が譲る可能性が無いことを悟り，「弱気」タイプへの変化も起こしているのではないかとも考えられる．このように，判断特性の変化については，予め決められた変化ではなく，自分が行動を起こした結果によって生じる環境条件の変化や，相手の出方を見ながら判断特性を変化させる．そして，その判断特性にもとづく行動判断を行い，選択したコースに向けて行動を起こし，その結果をもとに更に行動特性を変化させるといった学習によって，判断特性を変化させていると考えられる．なお，ここで扱う「学習」とは，歩行者が一歩毎に判断を行いながら，相手との相対関係や自分の位置の変化などの環境条件によって，逐次自分の判断特性を最適化させていくことを表している.

この「歩行者は環境条件や相手の特性の学習によって判断特性を変化させている」という仮説は，経験的に納得がいくものである．例えば，もうひとつの例のように，お互いに「強引」タイプの判断特性を持つ歩行者同士が出会った場合にも，当初は「強引」タイプでの判断故にお互いにイン側を取ろうと張り合うが，どちらかが確率的にアウト側に避けると，それによって避けられた側は，避けた側が自分より「弱気」タイプの可能性があることを学習する．すると，相手がアウト側に避けることを期待して更に「強引」さを増してイン側に固執する．他方，避けた側はその行動により位置関係が不利になりイン側を取れる可能性が下がる．更に相手がイン側を固執することを学習し，さらに「弱気」タイプへと遷移していく．その結果，それまで張り合っていたのがウソのようにスムーズにイン側とアウト側へ分かれていく.

それ以外にも，相手の性質に関して当初の予想と実際が異なる場合に，相手の行動からその性質

Fig. 4.9　Structure of Learning

を学習し，自分の想像する「相手の性質 (利得の比)」を修正することでスムーズにすれ違いを実現していると考えられる．

以上のような「歩行者は環境条件や相手の特性の学習によって判断特性を変化させている」という仮説に従い，従来の静的行動判断モデルに判断特性に関する学習を組み込んで，相手の行動や環境条件に対して動的に適応する動的行動判断モデルへと拡張する．

4.3.2　学習のフレームワーク

本研究で対象とするすれ違いに学習を導入するにあたり，次のことを検討しなければならない．静的モデルで対象としているゲーム理論は非協力ゲーム理論でありナッシュ均衡という概念を用いて分析を行う静学的な理論体系である．これを，歩行者が 1 歩を踏み出す場合のイン側とアウト側のどちらに向けて足を踏み出すかの行動を判断するモデル化に用いており，静的行動判断モデルでは 1 歩毎に独立して判断を行っているとして扱っている．しかし，相手を見つけてからすれ違いを完了するまでに歩行者は 3～6 歩程度の歩行を要しており，1 歩毎に行っている判断を連続して行っている．その場合，独立した 1 回毎のゲームであれば，その挙動は単純にナッシュ均衡

を中心に分布する形になるが，これを繰り返すことによって，環境や歩行者の前回までの行動選択によってその分布は変化していく．このような動的な変化を扱うために，本研究では進化ゲーム理論を導入する．進化ゲーム理論は，前述の非協力ゲーム理論に関して，戦略分布や戦略プロファイルで表現される環境状況の変化を考慮して，動学的にゲーム理論の拡張を図った理論体系である．Smith[114] は，ゲーム理論を基に動物の進化の過程を表す進化ゲーム理論に発展させた．進化ゲーム理論は，遺伝ダイナミクスと学習ダイナミクスの大きく 2 つに分類される [115]．遺伝ダイナミクスは，先述の Smith らのように生物が出生死滅して何世代にも渡って代がわりを繰り返す中で，どのような戦略を持ったプレーヤが生き残り，繁栄するかを再現するための理論である．遺伝ダイナミクスの主なものとしては，リプリケータダイナミクス [117] がある．遺伝ダイナミクスが戦略を変化させないのに対し，学習ダイナミクスはゲームを繰り返す中で戦略を学び，修正させていく様子を再現するダイナミクスである．本研究で扱うすれ違いでは，歩を進めることで環境条件が変化する中，相手の挙動を見ることでうまくすれ違いを完了するために戦略を変更することが必要となる．そこで，本研究ではゲーム理論によるベースモデルを，進化ゲーム理論の学習ダイナミクスを用いて拡張する．

進化ゲーム理論の学習ダイナミクスは，その戦略修正のアルゴリズムによって，大きく 3 つのダイナミクスに分類される．1 つ目は，相手の真似をすることで学習を行う模倣ダイナミクス [116] である．2 つ目は，プレーヤが試行錯誤を繰り返すことによって学習を行う試行錯誤ダイナミクス [118][119] である．3 つ目は，相手の採用する戦略を経験的に推定して，もっとも利得が高くなるように学習を行う最適反応ダイナミクス [120] である．これらのアルゴリズムにおいて，模倣アルゴリズムや最適反応ダイナミクスは，いずれも自分の利得構造だけでなく，相手のプレーヤの戦略や利得を入手できる必要があるのに対し，試行錯誤ダイナミクスは自分の利得が判れば実行可能である．今回対象とするすれ違い中の歩行者の場合，相手の利得構造 (衝突および回避利得の値とその比率) は正しく把握できない状況であり，その想定やアプローチが試行錯誤ダイナミクスと一致する．したがって，本研究では試行錯誤ダイナミクスを採用し，この進化ゲーム理論によって，与えられた利得構造における戦略選択の変化を表すモデルを構築する．

上記の試行錯誤アルゴリズムでは，基本的に与えられた利得構造における戦略選択の変化を示すため，本研究で期待する判断特性の変化，すなわち利得構造の変化を求めることはできない．したがって，進化ゲーム理論に加えて新たな学習のスキームを追加し，この判断特性の変化に関しても学習を行い，判断特性の変化の様子を再現できるようにする．この学習のスキームには，強化学習を用いる．強化学習にも，動的計画法，モンテカルロ法，TD 学習法の大きく 3 つの分類があるが，

Fig. 4.10　Structure of Actor Critic

動的計画法が完全なモデルを要求し，モンテカルロ法では，すれ違いのように一歩一歩学習しながら次の行動を選択するような斬新的な計算に適していないため，今回のモデル化には合わない．そこで，本研究では TD 学習を用いるものとする．特に上記に挙げた進化ゲームを方策部として使用するため，TD 学習法の一つであるアクター・クリティック法 (121)(122) を採用する．図 4.10 にアクタークリティック法のアーキテクチャを図示する．この学習では，現在の状態 (State) とその時点で環境 (Environment) より得られる報酬 (Reward) から，将来に渡る報酬予測を行うクリティック (Critic) と，現在の状態とクリティックの予測から方策 (Policy) に従って行動 (Action) を決定するアクター (Actor) から構成される．そして，クリティックの報酬予測誤差である TD 誤差 (TDerr) が，クリティックとアクターの両者の学習の鍵として用いられる．ここで，方策部であるアクターに上記の進化ゲームが組み込まれる．また，アクター・クリティック法は人間の脳の学習の構造に近いとされており，脳の学習モデルとして成功している (123)(124)．したがって，歩行者の判断特性において最適な学習方法であると考えられる．

以上のように，本研究では図 4.9 に示す次の 2 つの枠組みでモデル化を考える．一つは Framework1 で示すような歩行者の相互影響に伴う戦略選択確率の変化のモデル化であり，進化ゲーム理論によって前章で提案した静的なゲーム理論のモデルを拡張する．もう一つは，Framework2 で示すように環境条件の変化等に伴う判断特性の変化のモデル化であり，上記の進化ゲームをアクター (Actor) とするアクター・クリティック法での強化学習により利得構造の学習を行う．ここでは，2

つクリティック (Critic) を持ち，前節で挙げた M_B と W_B の 2 つの観点から学習を行う．そして，進化ゲームは特定の利得構造における戦略選択の変化を取り扱い，ここに強化学習で学習した利得構造を導入する．また，この学習は歩行者 A，B が環境 (Environment) を共有する形でそれぞれが学習を行っており，その結果は環境にフィードバックされ，双方の行動の結果によって次の学習が行われる．

4.3.3　進化ゲーム理論による戦略選択確率の学習

歩行者の相互影響によるコース選択確率，すなわち戦略選択確率の変化のモデル化について，進化ゲーム理論の試行錯誤ダイナミクスを以下のように適用する．

試行錯誤ダイナミクスでは，ロスとエレブのモデルを採用する．このモデルでは，表面的なプレーヤの行動の変化だけでなく，その試行錯誤の過程において 1 種の行動規範のような心理的な評価の変化を扱っている．この心理的な評価が行動に繋がり，試行錯誤の過程において変化しているものと考えている．そして，ある戦略に関する「心理的な評価」がその戦略を選択する「傾向」に相当し，高い「傾向」を持つ戦略が高い確率で選択され，低い「傾向」を持つ戦略は低い確率でしか選択されない．

式 (4.10) は，ロス・エレブの基本方程式 [118] であり行動結果に伴う心理的な評価の「傾向」を差分方程式で表現している．

$$T_{ij_{t+1}} = (1-\phi)T_{ij_t} + R_{ij_t} \tag{4.10}$$

ここで，T_{ij_t} は離散的な時刻 t で歩行者 i (a:A or b:B) が戦略 j (in:イン or ot:アウト) をとろうとする「傾向」を示し，R_{ij_t} は学習の強化値を，ϕ は忘却を示す係数を示している．このとき，戦略の選択確率 x_{ij_t} は下式で表される．

$$x_{ij_t} = T_{ij_t} / \sum_k T_{ik_t} \tag{4.11}$$

また，x_{ij_t} の時刻 t から $t+1$ の間における戦略の選択確率の変化量 Δx_{ij} は下式で与えられる．

$$\Delta x_{ij} = (R_{ij_t} - x_{ij_t} \sum_k R_{ik_t}) / \sum_k T_{ik_{t+1}} \tag{4.12}$$

ここで，強化値 R_{ij_t} を固定値 R_{ij} として戦略選択時の利得構造，すなわち歩行者 A，B の回避利得と衝突利得を代入することで，戦略の選択確率の変化が求まる．すれ違いのモデルに関して，歩行

Area	Δx_{ij}	
	$i=a$, $j=ot$	$i=b$, $j=ot$
1	−	+
2	−	−
3	+	+
4	+	−
	↓ ΔPa	↓ ΔPb

Fig. 4.11　Tendency of Strategy Choice

者はそれぞれ相手のことが正しく認識できているわけではないので，代入する利得には自分の利得と想像する相手の利得が代入される．

表 3.2 をもとに戦略の選択確率，すなわちアウト側コースの選択確率（*Pa*，*Pb*）の変化の期待値を算出すると図 4.11 のようになる．左表は，右グラフに示す各 Area でのコースの選択確率の変化の正負を示している．例えば，*Pa* と *Pb* が Area 1 内に位置する場合，*Pa* は小さくなる方向に変化し，*Pb* は大きくなるように変化することが期待されることを示している．結果として，右グラフで示すように左上方向に変化することが期待される．同様に Area 毎の *Pa*，*Pb* の遷移方向は，グラフ中の細矢印で示される方向となる．このような Area 毎の遷移によって，系全体としては太矢印に示すような大きな遷移の流れとなる．そして，最終的には左上，右下のいずれかの点に収束する．各 Area の境界は最適反応戦略の閾値 (*Ba*，*Bb*) で与えられ，左上，右下の斬近安定点はこのゲームにおけるナッシュ均衡にあたる．すなわち，歩行者は歩を進めることによってコースの選択確率の遷移は，両歩行者がインとアウトを分け合うナッシュ均衡の方向に向かっている．そして，両者がコースを分け合って衝突を回避し，無事すれ違いを完了するように遷移していくことが期待される．

4.3.4　強化学習による利得構造の学習

歩行者の判断特性を決定する利得構造の学習では，逐次学習を行う TD 誤差学習の一つであるアクター・クリティック法を以下のように導入する．

ここでは，アクターは前項の進化ゲームのモデルとなり，クリティックによって評価した結果が利得構造として引き渡される．また，本モデルでは判断特性を表す M_B と W_B を学習するために 2 つのクリティックを設けている．以下に，アクター・クリティック法による強化学習の基本式を示す．

$$TD_{err_{ij}} = r_{ij_{t+1}} + \gamma_{ij} V_{ij}(S_{ij_{t+1}}) - V_{ij}(S_{ij_t}) \tag{4.13}$$

$$V_{ij}(S_{ij_t}) = V_{ij}(S_{ij_t}) + \alpha_{ij}(TD_{err_{ij}}) \tag{4.14}$$

式 (4.13) は学習の内容 i (1:M_B or 2:W_B) と歩行者 j (a:A or b:B) に関する TD 誤差 $TD_{err_{ij}}$ の算出式で，r_{ij_t} は時間 t における報酬を，$V_{ij}(S_{ij_t})$ は時間 t の状態 S_{ij_t} の価値関数を，$\gamma_{ij}(0 \le \gamma_{ij} \le 1)$ は割引率を示す．また，式 (4.14) は価値関数の更新式で，$\alpha_{ij}(0 \le \alpha_{ij} \le 1)$ は学習率を示す．

ここで，前述のように利得構造において M_B と W_B の 2 つの観点から学習を行っている．クリティック 1 側では M_B の学習を行っており，状態 S_{1j_t} を相手のコース選択（イン or アウト）とし，価値関数 $V_{1j}(S_{1j_t})$ を相手のイン側選択率の期待値 (0～1) とし，実際に相手がイン側コースを選択した確率との差分を報酬として与える．アクターでは相手のイン側コースの選択確率の実績が，価値関数の値より上回るの場合，相手が予想より「強引」タイプであったと判断して，自分を「弱気」タイプとなる方向に M_B を下げて，相手に譲る方向で学習を行う．逆の場合は，相手が「弱気」タイプであったと判断して，自分を「強引」タイプとなる方向に M_B を上げて更新し，自分がイン側を取りに行く方向で学習を行うものとする．

一方，クリティック 2 側では W_B の学習を行っている．W_B の学習では，状態 S_{2j_t} を優位性 p とし，価値関数 $V_{2j}(S_{2j_t})$ を駆け引き成功の可能性の増減として与える．ここでは，優位性が改善した場合に正の報酬を，優位性が現状維持もしくは悪化の場合には負の報酬を与える．アクターでは，これらの報酬により算出された TD 誤差が正の場合は優位性が逆転する可能性が増すと考え，駆け引きを許す領域の幅を示す W_B を広げる．逆の場合は，逆転の可能性が減ったと考えて W_B を狭める方向で更新する．これによって，相手との位置関係が有利に変化した場合に，歩行者は駆け引きによる逆転の可能性が上がると考え，より高い確率で駆け引きを行うようになる．そうでない場合には，駆け引きによる逆転の可能性が下がると考えて，駆け引きを控える様子を再現する．

以上の定式化によって，それぞれのコース選択や優位性の実績に基づき M_B，W_B が学習される．そして，式 (4.4)(4.5) によって Ba，Bb が算出され，式 (4.8)(4.9) によってそれぞれの利得の比 Ka，Kb に変換することができ，最終的に歩行者の利得構造を算出することができる．この学習においては，相手を見つけてから交差を完了するまでに 3～6 歩程度しか要さないため，歩行者は数歩分しか学習できず，必ずしも収束を目指すものではない．また，回避利得の絶対値は衝突利得より小さいことを前提としているため，利得の比 Ka，Kb は 0.0～1.0 となり，学習もこれらの値の範囲に限定されるものとする．

4.4　動的モデルによるシミュレーション

4.4.1　シミュレーションの目的

前節で提案した動的行動判断モデルを導入した以下のシミュレーションによって，モデルの有効性の検証を行う．

【シミュレーション 1】判断シミュレータによる判断の妥当性の検証

現場調査で得られたすれ違いでの歩行者の挙動をそのまま入力データとして用い，提案のモデルによってどのようなコースを選択するのかの行動判断の遷移の様子をシミュレートし，そのシミュレーションの判断結果と実際の歩行者の判断した結果を比較することでモデルの有効性を検証する．また，静的モデルとの判断結果に関して比較を行い，動的モデルの有効性も併せて検証する．

【シミュレーション 2】行動シミュレータによる挙動の検証

特定の状況を設定し，行動判断モデルと行動モデル（歩行モデルと歩行経路モデル）によって，その時の歩行者の判断や挙動のシミュレーションを行い，判断や挙動の変化について確認を行う．また，静的モデルとの判断結果に関して比較を行い，動的モデルの有効性も併せて検証する．

4.4.2　シミュレーションの処理フロー

シミュレーションに用いた動的モデルでの処理フローチャートを，図 4.12 に示す．図中では左が歩行者 A，右が歩行者 B のフローを示している．ここで，歩行者 A を例にとって上から 1～8 の処理を順に説明していく．

Fig. 4.12　Flow Chart(Dynamic Model)

1. すれ違い中か，死角エリアもしくはすれ違い完了後の単独歩行時かの処理分岐 (すれ違い中は 2 へ，単独歩行時は 7 へ)
2. 両歩行者の位置，速度から，相対距離と優位性を算出 (3 へ)
3. 優位性と過去のコースから，強化学習のクリティックのアルゴリズムにより利得構造を算出 (4 へ)
4. 優位性と利得構造から，進化ゲーム理論のアルゴリズムによりコース選択確率を算出 (5 へ)
5. コース選択確率と相対距離から，証拠理論のアルゴリズムにより補正したコース選択確率を算出 (6 へ)
6. コース選択確率から，実際に進むコースを選択 (8 へ)
7. 位置と速度から，単独歩行時の歩行モデルと歩行経路モデルにより，次の一歩の位置と速度を算出 (1 へ)
8. 位置，速度とコースの情報から，すれ違い時の歩行モデルと歩行経路モデルにより，次の一歩の位置と速度を算出 (1 へ)

Table 4.5　Pedestrians' Gain (Judging Simulator)

Pedestrian A		Pedestrian B	
Collision Gain: Ca	0.173	Collision Gain: Cb	0.173
Avoidance Gain: Aa	0.081	Avoidance Gain: Ab	0.081
Collision Gain: Cb	0.173	Collision Gain: Ca	0.173
Avoidance Gain: Ab	0.081	Avoidance Gain: Aa	0.081

Table 4.6　Learning Parameter

Learning Parameter　*(j =a,b)			
Discount Rate(Critic1):γ_{1j}	1.00	Learning Rate(Critic1): α_{1j}	0.20
Discount Rate(Critic2):γ_{2j}	1.00	Learning Rate(Critic2): α_{2j}	1.00
Forgetting Factor: φ	0.00	Reward of V_{2j} : r_{t2j}	0.50 or -1.00
Initial Value: V_{1j} (St_{1j})	0.50	Initial Value:V_{2j} (St_{2j})	0.00

ここで，歩行者 A と歩行者 B の処理に関して同期の必要性はないが，本シミュレーションでは計算の簡略化のため 2 人の歩行者の処理を同期させている．なお，式 (4.14) で与えられる強化学習の価値関数 $V_{ij}(S_{ij_t})$ は，すれ違いの開始時点で初期値にリセットしている．

また，比較に用いた静的モデルの処理は，前章のシミュレーションに用いた図 3.7 のフローチャートに従うものとする．

4.4.3　シミュレーション 1:判断シミュレータ

検証内容とシミュレーションの設定

このシミュレーションでは，行動調査で得られた実際の歩行者のデータをもとに，その時の歩行者の行動判断をシミュレートし，実際に歩行者が下した判断結果と比較を行うことでモデルの有効性を検証する．シミュレーションに用いた行動判断のモデルには，本章で説明した動的モデルと，前章で説明した静的モデルの 2 種類のモデルを用いている．

検証には，2 カ所で実施した現地調査で得られた歩行者の挙動のデータを用いている．1 カ所目は 2 章で紹介した現地調査から 1 対 1 のすれ違い 15 件のデータを用いている．2 カ所目は，以下

Fig. 4.13　Place Map of Investigation

に説明する別の病院内の廊下での調査結果を用いている．

2 カ所目の調査は，図 4.13 の黄色枠に示すような屋内通路の曲がり角部を対象に行っている．対象の場所は，建物入口のホール (図の下部) より続く通路であり，正面に中庭を望む変形の十字交差となっている．ホールから調査対象部に向う少し手前には，エスカレータのスロープがあり，幅が 2.4m 程度に狭くなっている部分があるが，対象部付近は幅 4.8m の小さなホール状の空間となっている．曲がり角は幅 5.7m の右折方向の通路との交差部に当たるが，この通路の先は診療部門となっているため，窓越しに中庭を望むこの通路には待合用のベンチが設置されており，実質 2.4m

(a) Picture 1

(b) Picture 2

(a) Picture 3

(b) Picture 4

Fig. 4.14　Pictures of Investigation Place

の幅が通行可能となっている．また，調査対象部より図で上の方向には中庭横を通る診療部門に繋がる通路が続いており，左折方向は別の診療部門の入口となっている．また，曲がり角手前にはトイレの入り口がある．図 4.14 は，それぞれ図 4.13 の緑矢印方向を撮影した写真である．

以上の立地条件にある調査対象部では，主に上下方向と，右折方向通路への人の流れが主となる．また，各方向よりトイレに向う人の流れもある．通行者は主に患者およびその家族と医師，病院関係者であり，ほとんどが歩行者であるが，時折シニアカートや車いすの患者も見られる．本シミュレータでは青矢印に示す右折方向通路との曲がり角の往来に着目し，約 6 時間の調査で得られた，回避行動を要する 1 対 1 の歩行者同士のすれ違い 5 件のデータを用いた．

表 4.5 にシミュレーションに用いた歩行者の利得構造を，表 4.6 に学習に用いたパラメータを示す．利得構造に関しては，静的，動的の各モデルに用いた歩行者の判断特性の初期値 (静的モデル

の場合は，変化しないため固定値となる) を設定している．これらの利得構造は，2 カ所の現場調査から得られた歩行者の利得特性の平均値を用いている．学習のパラメータには，現場調査の結果から想定される利得構造の変化が，起こり得る領域をまず算出し，シミュレーションの試行を繰り返す中で，不自然な挙動が発生しないように絞り込んだ値を用いている．

本シミュレーションの処理フローでは，判断のみシミュレーションを行っている．したがって，動的モデルでは図 4.12 の 2〜6 の処理を行っている．また，静的モデルでは図 3.7 の 2〜5 の処理を行っている．歩行者の位置と速度は，実際の現場で収集された計測結果を用いている．

結果と考察

ここでは，1 カ所目の現場調査のデータを用いた 15 例のうち，特に特徴的な挙動が見られた 2 つのケース (Case 1，Case 2)，また 2 カ所目の現場調査のデータ 5 例のうち 1 つのケース (Case 3) に関して，実際の調査結果と判断シミュレーションの結果の照合を行っていくものとする．

Case 1　駆け引きを行ったが優位性を逆転できずアウト側に戻ったケース

一方の歩行者は 2 歩目に駆け引きでイン側コースを選択したが，その駆け引きは成功しなかったためアウト側コースに戻った．結果として最初の優位性通りのコースによってすれ違いを行った．

Case 2　駆け引きを行うことで優位性が逆転したケース

一方の歩行者が 1 歩目に駆け引きによってイン側コースを選択した結果，優位性が逆転した．その結果，相手がアウト側にコースを変更し，最初の優位性とは逆のコースによってすれ違いを行った．

Case 3　駆け引きを行ったが優位性を逆転できずアウト側に向ったケース

一方の歩行者が 1 歩目に駆け引きでイン側コースを選択したが，その駆け引きは成功しなかったためアウト側コースに向った．結果として最初の優位性通りのコースによってすれ違いを行った (Case 1，Case 2 とは異なる環境条件でのシミュレーション)．

図 4.15 に，上記ケースにおける歩行者の歩いた経路を示している．それぞれ，(a) は Case 1，(b) は Case 2，(c) は Case 3 の経路を示している．歩行者の経路において「すれ違い中」の箇所を濃色とし，その間の 1 歩ごとの位置を点で示している．ここで，いずれのケースともすれ違い中に要した歩数は 4 歩であり，その歩数は以降の結果のグラフの横軸に反映している．なお，(c) の Case 3 のグラフは，Case 1 と Case 2 にあわせて曲がり角部をクローズアップしている．実際の通路は，

(a) Case 1　　(b) Case 2

(c) Case 3

Fig. 4.15　Situation of Judging Simulator

図 4.13 に示す形状をしており，グラフに表示されている以上に広い空間である．グラフ右上部は，実際の通路ではエスカレータが有るため，グラフに示すように通路幅は狭くなっている．またグラフ下部は，実際の通路ではベンチが並んでいるため通行可能な領域は限定される．グラフではこの部分について，通行可能な通路幅を点線で示している．

シミュレーションの結果に関して，Case 1 の結果を図 4.16 に，Case 2 の結果を図 4.17 に，Case 3 の結果を図 4.18 に示している．それぞれの結果の図に関して，(a) は歩行者 A の優位性と歩行者 A，B の選択したコースを示している．(b) は歩行者 A の判断特性の変化とアウトコースの選択確率を示している．(c) は歩行者 B の判断特性の変化とアウトコースの選択確率を示している．(b)(c) のグラフは，共にコースの選択確率 (Selection Probability) が 0.5 を境に，上に行くほど歩行者がアウト側コースを選択する確率が上がり，下に行くほどイン側コースを選択する確率が上がる．動的モデルによって変化する判断特性として，領域 I〜領域 Ⅲ の閾値と，その時の M_B の遷移を示している．静的モデルの場合は，領域 I〜領域 Ⅲ の 3 つの領域に変化が無いため，固定された領域 (Fixed Area) の閾値を点線で示している．また，アウト側コースの選択確率に関して，動的モデルについては P_* $(* = a, b)$，静的モデルについては P_* fix $(* = a, b)$ としてグラフに示している．

図 4.15(a)，図 4.16(a) より，Case 1 では歩行者は以下に記す行動に基づいたコース選択を行っていると考えられる．歩行者 A は 1 歩目から位置的に不利な状況にあったため，最初はアウト側コースを選択している．2 歩目では優位性 $(3 \Rightarrow 2)$ が改善したため，駆け引きの行動に出てイン側コースを選択した．しかし，3 歩目で再び優位性が悪化した $(2 \Rightarrow 4)$ ため，駆け引きの行動を中止し，再びアウト側コースを選択している．一方，歩行者 B はすれ違いの間，常に位置的な優位な状況にあったため，優位性に従ってイン側コースを選択している．

Case 1 における歩行者の判断のシミュレート結果を図 4.16(b)(c) に示す．まず，動的なモデルでの判断特性の遷移を確認すると，判断特性は両者とも領域 Ⅱ の大きさが大幅に減少しているのが見られる．これより，歩行者 A，B ともに「戦略」タイプの特性が弱まり，「着実」タイプの判断特性に変化していることが判る．また，M_B の値の遷移より，歩行者 A は若干 0.5 を下回り，歩行者 B は若干上回っている様子が見られる．これより，歩行者 A は「弱気」タイプの特性を，歩行者 B は「強引」タイプの特性を示しつつ「着実」タイプへと判断特性を変化させていることが判る．その結果，コースの選択確率は，歩行者 A がイン側を選択した 2 歩目だけが駆け引きの領域 Ⅱ となっている．そして，それ以外は両者とも領域 Ⅲ にあって，歩行者 A がアウト側，歩行者 B がイン側のコース選択を行っている．すなわち，歩行者 A の 2 歩目のみ駆け引きを行う機会があり，歩行者 A は駆け引きの行動に出たが，それ以外は両歩行者とも優位性に従ってコースが確定されてい

(a) Superiority and Course Selection

(b) Judgments and Selection probability (Pedestrian A)

(c) Judgments and Selection probability (Pedestrian B)

Fig. 4.16　Result of Judging Simulator (Case 1)

(a) Superiority and Course Selection

(b) Judgments and Selection probability (Pedestrian A)

(c) Judgments and Selection probability (Pedestrian B)

Fig. 4.17　Result of Judging Simulator (Case 2)

(a) Superiority and Course Selection

(b) Judgments and Selection probability (Pedestrian A)

(c) Judgments and Selection probability (Pedestrian B)

Fig. 4.18　Result of Judging Simulator (Case 3)

たことが判る．この判断の結果は，実際の歩行者の行動に一致している．そして，駆け引きとなる判断は歩行者 A の 2 歩目だけと必要最小限に設定されている．また，駆け引き中止後に再び駆け引きを行わないという，実際の調査で見られた法則性にも一致している．

一方，判断特性が変化しない静的モデルの場合，歩行者 B のコースの選択確率も 2 歩目が駆け引きの領域（Fixed Area の内側）となっている．その他の判断に関しては動的モデルと同様である．したがって，歩行者 B の 2 歩目において優位性に従ったイン側が選択されれば，実際の判断結果と一致する結果が得られる．この判断の結果は，実際の歩行者の行動にも一致する．

コースの選択確率に関しては，動的モデルで歩行者 B の 3 歩目にアウト側を選択する側にずれた以外はほとんど違いは見られない．一方，判断領域に関しては，上記で述べたようにかなりの違いが見られる．特に，歩が進むにつれて動的モデルの方が領域 II が減少するとともに，M_B の値に見られるように両者の判断特性に変化が見られる．結果的に，どちらの行動判断モデルも歩行者の実際の挙動を再現可能なものではあるが，歩行者 B の 2 歩目だけが異なる判断状況となっている．この歩行者 B の 2 歩目は，動的モデルでは確定的にコースが設定されるのに対し，静的モデルでは優位性と違う判断を許容している．

図 4.15(b)，図 4.17(a) より，Case 2 では歩行者は以下に記す行動に基づいたコース選択を行っている．1 歩目は歩行者 B が位置的に優位であったが，歩行者 A が駆け引きの行動に出たため，両者ともイン側のコースを選択している．この時の歩行者 A の駆け引きは成功し，2 歩目に優位性が逆転している ($1 \Rightarrow -1$)．以降は両者とも優位性に従ってコース選択を行い，歩行者 A がイン側，歩行者 B がアウト側のコースを通っている．そして，歩を進めるごとに位置的な優位性の差が大きくなって ($-1 \Rightarrow -2 \Rightarrow -4$) すれ違っている．

Case 2 における歩行者の判断のシミュレート結果を図 4.17(b)(c) に示す．まず，動的なモデルでの判断特性の遷移を見ると，M_B は歩行者 A では 3 歩目から 0.5 を上回り，歩行者 B では徐々に 0.5 を下回っていく様子が見られる．これより，両者が異なるコース選択を行った 2 歩目以降で，歩行者 A は「強引」タイプの判断特性に変化したのに対し，歩行者 B は徐々に「弱気」タイプの判断特性に変化していることが判る．一方，領域 II は両者とも若干大きさが減少しており，若干ではあるが両者とも「着実」タイプに判断特性が変化している様子も確認できる．その結果，コースの選択確率は歩行者 A,B とも 2 歩目までは駆け引きの領域 II にあったが，それ以降は，歩行者 A がイン側，歩行者 B はアウト側のコース選択を行う領域 I に遷移している．すなわち，1 歩目に歩行者 A が駆け引きの行動に出たことによって優位性の逆転を引き起こした．この時，歩行者 B は 2 歩目も領域 II にあったため，逆に駆け引きを行い逆転を狙うことも可能であったが，このケース

では駆け引きを行わなかった．そして，その結果 3 歩目で確定的にコース選択が行われる状況になり，以降はそのまま優位性に従ってコース選択が行われていたことが判る．この判断の結果は，実際の歩行者の行動に一致している．そして，駆け引きとなる判断は，2 歩目までと必要最小限に設定されており，「駆け引きは 1，2 歩目のみで開始」という実際の調査で見られた法則性にも一致している．

一方，判断特性が変化しない静的モデルの場合，歩行者 A，B のコースの選択確率がどちらも 3 歩目も領域 II にある．その他の判断に関しては，動的モデルと同様となっている．3 歩目に両者とも優位性に従うコースを選択した場合には，実際の判断結果と一致する結果が得られる．

コースの選択確率に関して，動的モデルの方が静的モデルよりも全体的にアウト側を選択する方向にずれた遷移を行っているが，増加，減少の傾向はほぼ同じである．また，判断領域は Case 1 のように領域 II の大きさが大きく減少することはない．歩行者の判断に関しては，領域 II の大きさよりも，M_B に示される領域 II のオフセットの変化が影響している．特に 3 歩目について，歩行者 A の動的モデルでは領域 II が上側にずれたことにより，判断が確定的に行われる領域 I となった．一方，静的モデルでは領域 II に残っている．結果的に，どちらの行動判断モデルも歩行者の実際の挙動に一致するものであるが，動的モデルでは 3 歩目がどちらの歩行者も確定的にコースが選択されるのに対し，静的モデルでは優位性と異なる駆け引きの判断を許容している．したがって，例えば調査で得られた法則性に反して歩行者 B が 3 歩目に駆け引きを行うと，イン⇒アウト⇒イン⇒アウトのようなコース選択となり，フラフラするような不自然な挙動を生じる可能性がある．

図 4.15(c)，図 4.18(a) より，Case 3 では歩行者は以下に記す行動に基づいたコース選択を行っている．1 歩目は歩行者 B が位置的に優位であったが，歩行者 A が駆け引きの行動に出たため，両者ともイン側のコースを選択している．この時の歩行者 A の駆け引きは成功せず，2 歩目の優位性は変化はなかった (1 ⇒ 1)．以降は両者とも優位性に従ってコース選択を行い，歩行者 A がアウト側，歩行者 B がイン側のコースを通っている．そして，歩を進めるごとに位置的な優位性の差が大きくなって (1 ⇒ 2 ⇒ 4)，すれ違っている．

Case 3 における歩行者の判断のシミュレート結果を図 4.18(b)(c) に示す．まず，動的なモデルでの判断特性の遷移を見ると，M_B は歩行者 A では 0.5 を下回り，歩行者 B では 3 歩目からに 0.5 を上回っている様子が見られる．これより，両者が異なるコース選択を行った 2 歩目以降で，歩行者 A は「弱気」タイプの判断特性に変化したのに対し，歩行者 B は徐々に「強引」タイプの判断特性に変化していることが判る．一方，領域 II は両者とも若干大きさが減少している様子が見られ，若干ではあるが両者とも「着実」タイプに判断特性が変化している様子も確認できる．その結果，

コースの選択確率が歩行者 A では 1 歩目のみ，歩行者 B では 2 歩目まで駆け引きの領域Ⅱにあったが，それ以降は歩行者 A がアウト側，歩行者 B はイン側のコース選択を行う領域Ⅲに遷移している．すなわち，1 歩目に歩行者 A が駆け引きの行動に出てイン側に向ったが優位性の逆転はできず，アウト側に向わざろうえない状況となった．他方，歩行者 B は 1 歩目に相手が駆け引きによりイン側に向ってきたため，2 歩目もイン側のコース選択が確定できず領域Ⅱにあったが，優位性に従ってイン側コースをに選択することで，3 歩目に確定的にイン側コースを選択できるようになった．そして，以降はそのまま優位性に従ってコース選択を行っていたことが判る．この判断の結果は，実際の歩行者の行動に一致している．そして，駆け引きとなる判断は，歩行者 A では 1 歩目のみ，歩行者 B では 2 歩目までと必要最小限に設定されており，「駆け引きは 1，2 歩目のみで開始」という実際の調査で見られた法則性にも一致している．

一方，判断特性が変化しない静的モデルの場合，歩行者 A，B のコースの選択確率が，歩行者 A の 2，3 歩目と歩行者 B の 3 歩目も駆け引きの領域Ⅱにある．その他の判断に関しては，動的モデルと同様となっている．歩行者 A の 2，3 歩目と歩行者 B の 3 歩目に優位性に従うコースを選択した場合には，実際の判断結果と一致する結果が得られる．

コースの選択確率に関して，動的モデルの方が静的モデルよりも全体的にアウト側を選択する方向にずれた遷移を行っているが，増加，減少の傾向はほぼ同じである．また，判断領域は領域Ⅱの大きさが減少しており，M_B に示される領域Ⅱのオフセットも変化している．歩行者の判断に関しては，これら両方による判断領域の変化が影響している．特に 2 歩目について，歩行者 A の動的モデルでは領域Ⅱが下側にずれたことにより，判断が確定的に行われる領域Ⅲとなった．また，両者の 3 歩目も同様に判断が確定的に行われる領域Ⅲとなっている．一方，静的モデルでは領域Ⅱに残っている．結果的に，どちらの行動判断モデルも歩行者の実際の挙動に一致するものであるが，動的モデルでは歩行者 A の 2，3 歩目と歩行者 B の 3 歩目が確定的にコースが設定されるのに対し，静的モデルでは優位性と異なる駆け引きの判断を許容している．したがって，例えば調査で得られた法則性に反して歩行者 A が 3 歩目に再び駆け引きを行うと，イン⇒アウト⇒イン⇒アウトとなり，コース選択によってフラフラするような不自然な挙動を生じる可能性がある．

シミュレーション 1 のまとめ

Case 1～3 のいずれの場合も，提案の動的モデルで算出された判断結果が，実際の歩行者のコース選択に一致することが判った．また，駆け引きが可能な判断に関しても，実際の調査結果で確認された「最初の 1，2 歩で駆け引きの判断が行われる」，「中止した場合には再び駆け引きは行わな

い」という法則性も満たしており，必要最小限に駆け引きの判断が行われている．一方，静的モデルで算出された判断結果も実際の歩行者のコース選択に一致する．しかし，駆け引きを許容する判断機会が動的モデルに対して多く，判断の自由度が高いため一致したように見えたとも言える．したがって，現場調査では見られなかった「3 歩目の駆引き」も可能であり，インとアウトを不連続に繰り返してフラフラするような不自然な行動も許容する判断モデルとなっている．すなわち，駆け引きの判断に関して，動的モデルは必要十分の駆け引きが行われているのに対し，静的モデルは必要以上に駆け引きは設定されていることが判る．

以上の結果，提案の動的モデルによって，より実際の歩行者に一致する行動判断を再現することができた．さらに必要最小限に駆け引きの判断が行われており，静的モデルのような不自然な挙動を生じることも少なく，より実態に近い判断を行うことができる．このシミュレーションでは，1 カ所目の現場調査では 2 ケース，2 カ所目の現場調査では 1 ケースのみ具体的な結果を示しているが，残りのケース (1 カ所目：13 ケース，2 カ所目：4 ケース) においても同様の結果が得られている．また，モデル化のデータを収集したＬ字通路だけでなく，異なる建物で変形の十字路という形状の異なる通路でも，実際の行動判断と一致する結果が得られた．この結果より，提案のモデルの適用が 2 章で現場調査を行った場所限定ではなく，一定の汎用性を有することが確認できた．今回はどちらの現場のシミュレーションにも同じパラメータを用いてシミュレーションを行ったが，現場にあわせて調整することで，更に適用範囲が広がると考えられる．

4.4.4　シミュレーション 2:行動シミュレータ

検証内容とシミュレーションの設定

このシミュレーションでは，特徴的な挙動が期待される歩行者の判断特性の組合せ条件を設定し，その条件下での歩行者の行動判断およびその挙動を再現することで検証を行う．ここでは，歩行者の判断特性の遷移だけでなく，その挙動に関しても確認を行う．合わせて静的モデルの場合との比較を行い，動的モデルの有効性を検証する．

シミュレーションで用いる行動判断モデルには，本章で説明した動的モデルと，前章で説明した静的モデルの 2 種類のモデルを用いている．また，歩行者の挙動を再現するための歩行モデルと経路モデルには，前章のシミュレーションに用いた図 3.5 と図 3.6 で示されるモデルを用いるものとする．想定環境は，図 4.19 に示すＬ字通路とし，2 人の歩行者 A，B は図中に示す初期位置より同時にスタートするものとする．また，シミュレーションでは，次の歩行者の判断特性の組合せ条件

Fig. 4.19　Simulation Setting (Behavior Simulator)

のもとですれ違いをシミュレートした.

Setting 1　2 人の歩行者の判断特性が異なる：「歩行者 A:強引」対「歩行者 B:弱気」
Setting 2　2 人の歩行者の判断特性が同じ：「歩行者 A:強引」対「歩行者 B:強引」

シミュレーションに用いた歩行者の利得構造や歩行者のパラメータを表 4.7 に示す．利得構造に関しては，静的，動的の各モデルに用いた歩行者の判断特性の初期値（静的モデルの場合は変化しないため固定値となる）を設定している．各利得の値に関しては，現場調査の結果で見られた範囲で，各歩行者の判断特性である「強引」「弱気」のタイプを強調した設定値としている．また，学習に用いたパラメータは表 4.6 に示す設定とした．本シミュレーションでは動的モデルは図 4.12, 静的モデルは図 3.7 の処理フローに基づいて計算を行っている.

結果と考察

行動シミュレータによって，歩行者の各判断時のコース選択の確率を算出することが可能となる．その選択確率をすれ違い完了まで順に算出して掛け合わせていくと，あるコースの選択パターン（例えば，イン⇒イン⇒イン　のようなコース選択）が，どのくらいの確率で選ばれるのかを算出することができる．このように，実際の現場調査で見られた下記の特徴を満たすコース選択が，どの程度の確率で生じるかを静的なモデルと動的なモデルによって比較を行った.

Table 4.7　Parameter of Pedestrians (Behavior Simulator)

Pedestrian Parameter				
Stride of Walking: *Sf*	0.50 m		Personal Space:*d1*	1.20 m
Step Interval : *Ts*	0.60 m		Personal Space:*d2*	0.50 m
Standard Distance: *Ls*	4.00 m		Personal Space:*d3*	0.80 m
Pedestrians' Gain				
Pedestrian A (Setting 1)	Collision Gain: *Ca*	0.173	Avoidance Gain: *Aa*	0.157
	Collision Gain: *Cb*	0.173	Avoidance Gain: *Ab*	0.042
Pedestrian B (Setting 1)	Collision Gain: *Cb*	0.173	Avoidance Gain: *Ab*	0.042
	Collision Gain: *Ca*	0.173	Avoidance Gain: *Aa*	0.157
Pedestrian A (Setting 2)	Collision Gain: *Ca*	0.173	Avoidance Gain: *Aa*	0.157
	Collision Gain: *Cb*	0.173	Avoidance Gain: *Ab*	0.042
Pedestrian B (Setting 2)	Collision Gain: *Cb*	0.173	Avoidance Gain: *Ab*	0.157
	Collision Gain: *Ca*	0.173	Avoidance Gain: *Aa*	0.042

・駆け引きは相手を発見後，最初の 1，2 歩目のみで開始されている
・駆け引き行動の継続は優位性が改善した場合のみで，現状維持や悪化した際には中止されている
・駆け引きが一度中止された場合に，再度駆け引きは行われていない

表 4.8 にその結果を示す．表は，上記の条件を満たすコース選択のパターンと，Setting 1 と Setting 2 における静的モデル (Static) と動的モデル (Dynamic) でのそのパターンの発生確率を示している．また表中の灰色のマスは，この設定条件では発生しないパターンを示している．表より，どちらの設定条件においても上記条件を満たすパターンの発生確率の合計は，動的モデルの方が高くなっていることが判る．Setting 1 は「強引」と「弱気」の組合せで，比較的両者のコース取りがはっきりしやすいため，静的モデルも高い確率で上記条件を満たし，大きな差は見られなかった．しかし，この場合でも動的モデルの方が高い確率で条件を満たしており，コース選択のパターンも静的モデルより少なく，確率的に様々なコースを取るのではなく，ある程度絞りこまれたコース取りを高い確率で選択していることが判る．Setting 2 では「強引」同士の組合せのため，動的モデルの効果が顕著に表れている．静的モデルでは両者が張り合って，確率的なコース選択が多くなるた

Table 4.8　Ratio of Course Selection

Patterns of Course Selection　(A : B)			Setting 1		Setting 2	
1st Step	2nd Step	3rd Step & later	Static	Dynamic	Static	Dynamic
IN : IN	IN : IN	OUT : IN	0.24%	0.00%	5.48%	8.55%
IN : IN	OUT : IN	OUT : IN	1.29%	3.66%	13.28%	41.22%
OUT : IN	IN : IN	OUT : IN	3.49%	4.96%	15.09%	15.68%
OUT : IN	OUT : IN	OUT : IN	5.16%	7.56%	22.28%	23.92%
OUT : OUT	OUT : OUT	OUT : IN	1.18%	0.00%	0.00%	0.00%
OUT : OUT	OUT : IN	OUT : IN	0.80%	0.00%	0.14%	0.00%
OUT : OUT	IN : IN	OUT : IN	1.18%	5.20%	0.21%	0.17%
OUT : OUT	IN : OUT	OUT : IN	1.75%	0.00%	0.00%	0.00%
IN : OUT	OUT : OUT	OUT : IN	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
IN : OUT	OUT : IN	OUT : IN	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
IN : OUT	IN : IN	OUT : IN	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
IN : OUT	IN : OUT	OUT : IN	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
IN : IN	IN : IN	IN : OUT	3.60%	0.44%	3.33%	1.12%
IN : IN	IN : OUT	IN : OUT	8.56%	4.73%	0.31%	0.00%
IN : OUT	IN : IN	IN : OUT	0.64%	6.59%	0.21%	0.44%
IN : OUT	IN : OUT	IN : OUT	34.19%	28.95%	0.21%	0.17%
OUT : OUT	OUT : OUT	IN : OUT	2.35%	0.00%	0.00%	0.00%
OUT : OUT	IN : OUT	IN : OUT	5.12%	16.79%	0.00%	0.00%
OUT : OUT	IN : IN	IN : OUT	3.47%	2.04%	0.01%	0.00%
OUT : OUT	OUT : IN	IN : OUT	3.47%	0.00%	0.01%	0.00%
OUT : IN	OUT : OUT	IN : OUT	1.34%	0.00%	0.00%	0.00%
OUT : IN	IN : OUT	IN : OUT	0.91%	0.19%	0.00%	0.00%
OUT : IN	IN : IN	IN : OUT	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
OUT : IN	OUT : IN	IN : OUT	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
		合計	78.76%	81.11%	60.57%	91.28%

め，上記の条件を満たす確率が約 60% と低くなっている．一方，動的モデルでは判断特性に変化により，どちらかがイン側に向うのを諦めるとコース選択がはっきり分かれる様子を再現しており，上記の条件を 90% を超える高い確率で満たしている．また，設定条件 1 の場合と同様に，取り得るコース選択のパターンも静的モデルよりも絞り込まれていることが判る．以上のように，より実際の歩行者のコース選択のパターンに近いコース取りを再現していることが判る．

また，シミュレータによるコース選択と歩行者の歩行経路の典型的な例を以下に示し，モデルによる違いを明らかにしていく．図 4.20 と図 4.21 は，Setting 1 でのシミュレーションの結果の例を示している．また，図 4.22 と図 4.23 は，Setting 2 でのシミュレーションの結果の例を示している．図 4.20 と図 4.22 は動的な行動判断モデルによって算出された判断結果をもとに，歩行者のモデルから算出された経路を示している．歩行者の経路において「すれ違い中」の箇所を濃色とし，

Fig. 4.20　Path of Pedestrians (Setting 1)

その間の 1 歩ごとの位置を点で示している．ここで，すれ違い中に要した歩数は Setting 1 では 6 歩，Setting 2 では 5 歩であり，図 4.21 と図 4.23 のグラフの横軸に反映している．図 4.21 と図 4.23 において，(a) は歩行者 A の優位性と歩行者 A，B の選択したコースを示している．(b) は歩行者 A の判断特性の変化とアウトコースの選択確率を示している．(c) は歩行者 B の判断特性の変化とアウトコースの選択確率を示している．(b)(c) のグラフは，共にコースの選択確率 (Selection Probability) が 0.5 を境に，上に行くほど歩行者がアウト側コースを選択する確率が上がり，下に行くほどイン側を選択する確率が上がる．判断特性として，動的モデルにおける領域 I～領域 Ⅲ の閾値と，その時の M_B の遷移を示している．静的モデルの場合は，初回の領域から変化が無いため各領域の閾値を Fixed Area として点線で示している．また，アウト側コースの選択確率に関して，動的モデルを P_* $(* = a, b)$，静的モデルを P_* fix $(* = a, b)$ としてグラフを示している．

図 4.20 と図 4.21(a) より，Setting 1 において以下のような歩行者の挙動が確認できた．優位性に関して，すれ違い中は常に歩行者 B が優位性を保ち続け，その優位性に従って歩行者 A がアウト側，歩行者 B がイン側のコースの選択を続け，歩を進めるごとに歩行者 B の優位性が増している (1 ⇒ 2 ⇒ 4 ⇒ 4 ⇒ 4 ⇒ 4)．その結果，当初「弱気」タイプの歩行者 B がそのままイン側を勝ち取

り，当初「強引」タイプの歩行者 A がアウト側ですれ違いを行っている．

動的モデルを用いてシミュレートされた Setting 1 での判断特性の遷移は，図 4.21(b)(c) より以下のようになっている．歩行者 A は，判断特性の変化を領域Ⅱの遷移に見ると，当初「強引」タイプであったものが，歩が進むごとにその大きさが減少しており「着実」タイプの特性を強めている．最終的には，領域Ⅱの領域がほぼ無くなって優位性に従った判断を行っていることが判る．併せて M_B の遷移を見ると，「着実」タイプへの遷移に合わせて徐々に 0.5 に近づき「強引」タイプの特性を失っていることが判る．一方，歩行者 B は，判断特性の変化を領域Ⅱの遷移に見ると，当初「弱気」タイプであったものが，歩が進むごとに歩行者 A と同様にその大きさが減少しており「着実」タイプの特性を強めている．最終的には，領域Ⅱの領域がほぼ無くなって優位性に従った判断を行っていることが判る．併せて M_B の遷移を見ると，最初の 3 歩で「弱気」タイプであったものが 0.5 を超えて「強引」タイプに変化し，3 歩目には「強引」さにおいて歩行者 A を上回っている．その後は「着実」タイプへの遷移に合わせて 0.5 に近づき「強引」タイプの特性を弱めていることが判る．

1 歩毎の状況変化と判断特性の遷移との関連は，次のようになっていると考えられる．最初の 1 歩目は両者とも駆け引きの領域Ⅱにあり，この試行では優位性通りに歩行者 A がアウト側，歩行者 B がイン側のコースを選択している．この 1 歩目のコース選択の結果によって，歩行者 B は自分が位置的に優位であること，さらに相手がイン側に向って来ないことから，「弱気」タイプの判断特性を大幅に「強引」タイプの方向に遷移させている．一方，歩行者 A は 1 歩目の結果により位置的にさらに不利な状況になること，相手がイン側に向って来たことから「強引」タイプの傾向を徐々に弱めている．2 歩目では更に優位性に差がついたため，両者とも依然領域Ⅱの内側であるが，再び優位性通りのコース選択を行っている．2 歩目のコース選択の結果によって，歩行者 B は自分の判断特性を完全に「強引」タイプへと遷移させている．一方，歩行者 A はさらに「強引」タイプの傾向を徐々に弱め，結果的に歩行者 B との「強引」さが逆転している．以降は，優位性の差が大きくなって両歩行者とも領域Ⅲに遷移し，コース取りが確定した状態となっている．そして，両者とも優位性に従うように「着実」タイプへと判断特性が遷移し，すれ違いを完了している．歩行者 B の判断特性の変化を，優位性の遷移と関連させて見ると，優位性が有利になっていくごとに特性が「強引」タイプへ向い，優位性が最大となった時に相手の「強引」さを逆転し，その後は勝負があったかのように「着実」タイプの方向に特性を変化させている．この遷移の様子は，主観的な判断ではあるが人の心情の変化を見ているようで興味深い．

一方，この状況を静的モデルではどのような判断特性の遷移となるかを確認する．この試行で

(a) Superiority and Course Selection

(b) Judgments and Selection probability (Pedestrian A)

(c) Judgments and Selection probability (Pedestrian B)

Fig. 4.21　Result of Behavior Simulator (Setting 1)

Fig. 4.22　Path of Pedestrians (Setting 2)

は，両歩行者のコース選択確率 (*Pa* fix，*Pb* fix) は，最初から最後まで駆け引きを行う領域の中 (Fixed Area の間) に位置するため，常に駆け引きを行うことが可能であり，優位性に逆らったコースも選択することができる．したがって，コース選択として動的モデルで算出したものと同じ経路を選ぶことも可能ではあるが，逆にその他の経路となる可能性もある．コース選択が確率的となり，どのように選択されるかは定かではなく，優位性で明らかに差があるにも関わらず，優位性に逆らうコース選択をしたり，コース選択が不連続となって迷走したりと，不自然な行動を取ることが予測される．

以上のように動的モデルでは，当初の「強引」「弱気」タイプであった両歩行者の判断特性が，歩を進めるごとに環境や相手の状態によって逆転するように変化し，最終的には優位性に従うように落ちついていく様子が確認できた．このような判断特性の遷移によって，現場調査で確認できたように最初の 1，2 歩目に駆け引きが可能な状態にはなるが，その間に最終的なコース取りが確定し，3 歩目以降では駆け引きが発生しないような歩行者の判断のプロセスの再現が確認できた．一方，静的モデルでは常に駆け引きを行う状況となり，コース選択が常に確率的となって，歩行者の挙動が確定できず，不自然な挙動を発生する可能性が確認できた．

図 4.22 と図 4.23(a) より，Setting 2 において以下のような歩行者の挙動が確認できた．優位性

に関して，すれ違い中は常に歩行者 B が優位性を保ち続け，歩行者 B は優位性に従ってイン側のコースの選択を続けている．一方，歩行者 A は 1 歩目に駆け引きによってイン側のコースを選択したが，2 歩目に駆け引きを中止し，以降は優位性に従ってアウト側のコースを選択し，すれ違いを完了している．また，優位性の遷移に関しては，当初 1 であったが歩行者 B が駆け引きの行動を行った効果もあり，2 歩目も値が維持された．しかし，その後は両者とも優位性に従う行動となったため，3 歩目以降は 2 ⇒ 4 ⇒ 4 と歩行者 B の優位性が増加している．

動的モデルを用いてシミュレートされた Setting 2 での判断特性の遷移は，図 4.23(b)(c) より以下のようになっている．歩行者 A，B 共に，領域 II の遷移を見ると，当初「強引」タイプであったものが，歩が進むごとに領域が小さくなり「着実」タイプの特性を強め，それに合わせて M_B も 0.5 に近づき「強引」タイプの特性を弱めていることが判る．特に，歩行者 B に関しては変化の度合いが大きく，すれ違い直前の 5 歩目には領域 II の領域がほぼ無くなり，優位性に従った判断を行っていることが判る．

1 歩毎の状況変化と判断特性の遷移との関連は，次のようになっていると考えられる．最初の 1 歩目は両者とも駆け引きの領域 II にあるが，この試行では歩行者 B は優位性に従ってイン側のコースを選択している．一方，歩行者 A は駆け引きの行動に出たため，優位性に逆らってイン側のコースを選択している．2 歩目も両者とも依然駆け引きの領域 II にあるが，歩行者 A は前回の駆け引きによって優位性の改善に至らなかったことにより，駆け引きを中止して優位性に従ったアウト側のコース選択を行っている．歩行者 B は優位性に従ってイン側のコース選択を行っている．この選択により状況は大きく変化し，両者の判断特性が「着実」タイプへと遷移し，両者の優位性の差も大きくなり，両者ともコースの選択確率が領域 I に遷移し，確定的にコース選択が行われている．この 1 歩によって，この試行でのコース取りが確定した状態となり，以降は両者とも優位性に従ってコース選択を行い，すれ違いを迎えている．これと併せて，両者の判断特性は「着実」タイプへと遷移している．

一方，この状況を静的モデルではどのような判断特性の遷移となるかを確認する．この試行では，歩行者 B のコース選択確率 (Pb fix) は動的モデルと同様に，2 歩目までが駆け引きの領域で，以降は確定的にイン側を選択する領域にある．しかしながら，歩行者 A のコースの選択確率 (Pa fix) が常に駆け引きの領域の中にあるため，常に駆け引きを行って優位性に逆らったコース選択が可能である．したがって，動的モデルで算出したものと同じ経路を選ぶことも可能ではあるが，その他の経路となる可能性もある．この場合，コース選択が確率的となりどのように選択されるかは定かではなく，優位性で明らかに差があるにも関わらず，優位性に逆らうコースを選択したり，

(a) Superiority and Course Selection

(b) Judgments and Selection probability (Pedestrian A)

(c) Judgments and Selection probability (Pedestrian B)

Fig. 4.23　Result of Behavior Simulator (Setting 2)

コース選択が不連続となって迷走したりと，不自然な行動を取ることが予測される．

以上のように，動的モデルでは「強引」タイプの判断特性の歩行者同士が出会った場合に，当初イン側を取り合っていたものが，一方がアウト側に向ったことで，その判断特性が変化が生じ，最終的には優位性に従うように落ちついていく様子が確認できた．この場合も，最初の 1，2 歩目に駆け引きが可能な状態にはなるが，その間に最終的なコース取りが確定し，3 歩目以降では駆け引きが発生しないような歩行者の判断プロセスの再現が確認できた．一方，静的モデルでは一方の歩行者で常に駆け引きが可能な状況となっているため，コース選択が常に確率的となって歩行者の挙動が確定できず，不自然な挙動を発生する可能性が確認できた．

シミュレーション 2 のまとめ

Setting 1 と Setting 2 のいずれの場合も，動的モデルに基づく判断特性の変化によって，現場調査で得られた歩行者の特徴的なコース取りを高い確率で実現することができた．また，典型例において最初の 1，2 歩で駆け引きの判断が行われ，中止した場合には再び駆け引きは行わないという調査で確認された法則性を満たす判断となる様子が確認できた．一方，静的モデルでは駆け引きが可能な状況が多く発生し，現場調査で得られた法則性を満たさない不自然な挙動を生じる可能性が確認できた．

以上の結果，提案の動的モデルに基づく判断特性の変化によって，静的モデルに比べ早期にコース取りが確定し，確率的な判断が続くことによる不自然な挙動を防ぎ，より実際の歩行者の行動に近い挙動を再現できていると考えられる．

4.4.5　シミュレーションの結論

上記のシミュレーションによる検証の結果，提案の動的モデルを用いた歩行者の判断シミュレータによって，実際の歩行者と同様の行動判断を再現することができた．また，行動シミュレータによって，より実態に近い歩行者の行動判断やそれに伴う行動の変化の様子を再現できた．更に，静的モデルは必要以上に駆け引きが設定されており不自然な行動を生成しうるのに対し，動的モデルでは駆け引きが必要最小限に行われており，現場調査で得られた歩行者の行動に関する法則性を満たす行動が高い確率で再現できた．以上より，判断特性の動的な変化を考慮した提案のモデルの有効性を確認することができた．

第 5 章

結論 (Conclusions)

5.1　まとめ

本研究は，衝突のリスクが高い屋内の曲がり角での歩行者が 1 対 1 ですれ違う場合にすれ違う相手に対してコーナーのイン側を通るか，もしくはアウト側を通るかのコース選択に関する歩行者の行動判断をモデル化することを目的としている．

筆者は，本研究において次のような取り組みを行った．

第 1 章では，本研究の目的である歩行者の行動判断のモデル化に関する社会的背景とその研究の意義を述べ，これまでの関連する研究内容を紹介した．そして，関連研究との対比から従来技術の課題を示し，本研究で提案する駆け引きなどの行動心理的な影響を考慮した行動判断のモデル化の新規性や，その研究意義を明らかにした．さらに，本研究の枠組みやアプローチについて，行動経済学を基盤とした期待効用モデルとの差異にも言及し，本研究の位置づけやその独創性に関する主張を行った．

第 2 章では，歩行者の行動判断のモデル化を行うに際して，本研究の対象環境の一つであるＬ字通路において，そのコーナーを通行する歩行者の歩行経路や，対向する歩行者とすれ違う際の挙動についての行動調査を行った．その結果，コーナーを通行する歩行者は最短距離となるコーナーのイン側を基本的には選択しようとするが，すれ違いにおいては自然とイン側とアウト側を分け合い，衝突することなくコーナーですれ違うことを確認した．さらに，対向する歩行者は多くの場合

は，コーナーのイン側の角に近い方がイン側を選択し，もう一方がアウト側を通行していたが，場合によっては，位置関係が不利にも関わらず，相手がアウト側に避けることを期待してあえてイン側に向うような駆け引きの行動を示すなど，行動心理的な影響によって歩行者の行動判断が変化することを明らかにした．そして，行動調査の結果を基に行動判断のモデル化における検討課題の抽出を行った．

第 3 章では，行動調査の結果をもとに，歩行者の基本的な行動判断のモデル化に成功した．モデルのベースとしてゲーム理論の混合戦略を用いることで，歩行者の駆け引きの様子を再現する行動判断モデルを構築し，さらに，証拠理論によってモデルを拡張することで，距離による情報の不確かさに起因する行動の変化についても再現することに成功した．提案のモデルについては，シミュレーションによって歩行者の行動を再現し，調査結果の比較やとパラメータの変化に伴う挙動の変化に関して確認を行い，モデルの有効性について確認を行った．そして，提案モデルに関し，人の動的な判断特性変化への対応の必要性を明らかにした．

第 4 章では，第 3 章で提案した静的な基本モデルに，環境変化や相手との相互影響に対する学習を導入することで，歩行者の動的な判断特性の変化を再現する動的モデルへの拡張を行った．歩行者の性質や判断特性を表す指標の定式化を行い，2 階層の学習のスキームによってそれら指標の動的な変化を再現した．学習では，まず，ベースとなるゲーム理論のモデルを進化ゲームに拡張することで，歩行者の性質を決定する利得構造によって，歩を進めるたびに判断が変化する様子を再現した．もう一つは，その歩行者の利得構造を，強化学習の一つであるアクタークリティック法を用いることで，環境の変化に応じた歩行者の性質や判断特性の変化を再現した．動的に拡張したモデルに関しても同様にシミュレーションを行い，行動調査の結果と比較するとともに，静的な基本モデルとの挙動の違いを確認し，動的モデルの有効性を検証した．

そして，本章において，本研究の結論ならびに今後の課題を示している．

筆者が提案するモデル化は，歩行者同士のイン側を取るための駆け引きや，自分が有利不利に関する情報が明確でなく確信を持てない場合の行動など，従来の位置関係によって確定的に決定するモデルでは再現できない人の心理的な特性を考慮するとともに，自分の位置や相手との相対位置等の環境条件やコース選択に関する相手との相互影響に基づいてその判断特性を変化させることで，より実態に近い行動判断を再現できる点に意義がある．

以上，本研究の結果，歩行者の位置関係だけでなく，相手との駆け引きなど，行動心理的な影響による確率的な行動変化を考慮した歩行者の行動判断を再現し，さらに，外部環境や相手との相互影響により，その判断特性が動的に変化する行動判断モデルを構築することができた．このモデル

によって，より実態に近い歩行者の行動判断を再現することが可能となった．

5.2　今後の展望

本研究では，モデル化を中心にシミュレーションによる検証を行ってきた．今後は，シミュレーションで得た知見を，筆者らを含め，所属する企業の開発チームが取り組んでいる環境センサシステムのようなシステムに導入し，安全や効率性に関して実際に貢献できるように取り組んでいきたい．

また，本研究ではＬ字通路における 1 対 1 での歩行者同士のすれ違いを対象にモデル化を行ってきたが，次なる課題として，例えば 1 対多や多対多によるすれ違いという本論とは異なり，その延長上の位置づけとして想定される状況への対応もある．

本研究で行った調査の中では，歩行者集団のすれ違い行動に関して次の 2 つの傾向が確認されている．一つは，集団の先頭が支配的となる傾向であり，先頭とのすれ違いに他の集団のメンバが従う様子が確認されている．もう一つは，集団を一つの塊とみなす傾向であり，相対する歩行者が集団全体を大きく避けようとする様子も確認されている．以上のように，実態の歩行者は数多くの相手を一度に意識しながら行動するのではなく，まずは一番近い歩行者を意識していると推測される行動が見られることから，本研究の 1 対 1 でのすれちがいのモデルを拡張することで，1 対多や多対多での歩行者の挙動を再現できると考える．また，Manenti ら [70] は，グループを構成する歩行者が示す挙動についての研究を行っており，このような集団心理を取り入れることで更なるモデルの拡張が図れるものと期待される．

その他にも，車いすや移動支援ロボットとのすれ違いの状況に対して，本研究の成果が貢献できるものと考える．この場合，歩行モデルの代わりに移動体のダイナミクスを導入することで，そのまま本論のモデルが使えると考える．ただし，歩行者が一歩毎に判断を行っているのに対し，連続的に判断を行っていることから判断の連続性に関して検討が必要になることが考えられる．また，日比谷ら [62] らの研究で得られた車いすの操縦者の操縦特性を加えることで，より精緻なモデル化が期待される．

これ以外にも，経路の形状が異なる場合が想定される．この場合，経路に死角が存在する曲がり角という条件がそろえば，Ｖ字であってもＳ字であっても，本質的な違いは無いと考える．したがって，形状に関するパラメータを調整するだけで本論文の提案のモデルに適用可能ではないかと考える．一方，交差点に関しては，局部的に見た「曲がり角」部の通行に関してはこのモデルを用

いることは可能であるが，十字路のような通路の交差に関しては，また別なモデル化が必要になると考えられる．ただし，本研究の知見を活かすことは可能と考えられ，今後の取り組みとしても検討の余地がある．

参考文献

(1) 東京消防庁 防災部 防災安全課，緊急搬送データからみる日常生活の事故, (2011).

(2) 東京消防庁 防災部 生活安全課，平成 22 年版 火災と日常生活事故のデータからみる高齢者の実態 (平成 21 年中), (2010).

(3) 神戸市 消防局 救急課，平成 23 年 日常生活における事故予防（一般負傷関係）, (2012).

(4) World Health Organization, *International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th-Revision*, Version 2010, (2010).

(5) 厚生労働省 大臣官房統計情報部, 人口動態調査, (2002-2011).

(6) H.W.Heinrich , *Industrial Accident Prevention A Scientific Approach*, Mc.Grw-Hill Book Company, (1931).

(7) 文部科学省 大臣官房文教施設企画部施設企画課, 学校施設安全対策部会（第 4 回） 議事録, (2008).

(8) 文部科学省 大臣官房文教施設企画部施設企画課, 学校施設における事故防止の留意点について, (2009).

(9) 文部科学省 大臣官房文教施設企画部施設企画課, 学校施設における事故防止の留意点について,(2008).

(10) 砺波 匡, 小野 久美子, “ 日常生活時における建物内での事故についてのアンケート調査（その１）－個人属性と事故状況の実態分析－ ”, 安全工学シンポジウム 2007, (2007), 5-3.

(11) 国土交通省 国土政策技術総合研究所 建築研究部, “ 建物事故予防ナレッジベース ”, http://www.tatemonojikoyobo.nilim.go.jp/kjkb/ (参照日 2013 年 1 月 10 日).

(12) 独立行政法人 日本スポーツ振興センター, 学校での事故防止対策集, (2008).

(13) 財団法人 日本医療機能評価機構　医療事故防止センター, 医療事故情報収集等事業　第 12 回報告書, (2008).

(14) 財団法人 日本医療機能評価機構　医療事故防止センター, 医療事故情報収集等事業　第 15 回報告書, (2008).

(15) 財団法人 日本医療機能評価機構　医療事故防止センター, 医療事故情報収集等事業　第 26 回報告書, (2011).

(16) 坂田 知子, “ 医療機関における参加型職場環境改善活動―患者の安全確保 ” , 日本産業衛生学会生涯教育委員会 Good Practice Samples, No.35 (2009).

(17) 滋賀県健康福祉部健康福祉政策課, 施設整備マニュアル（移動に関する事項２）, だれもが住みたくなる福祉滋賀のまちづくり条例, (2004).

(18) 財団法人 日本交通管理技術協会, 電動車いすの安全利用に関するマニュアル, (2003).

(19) United Nations, Development of Economics and Social Affairs, “World Population Prospects : The 2010 Revision”,(2010), http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm (accessed 2013-01-10).

(20) 内閣府 共生社会 政策統括官, 平成 24 年度 高齢化白書, (2012).

(21) Global Industry Analysts, Inc., *Wheelchairs (powered and manual): A Global Strategic Business Report*, (2009).

(22) Winter Green Research, Inc., *Worldwide Market of wheelchair and scooter*,(2009).

(23) United Nations, General Assembly, “United Nations Principles for Older Persons”, 74th plenary meeting 46/91 (1991).

(24) 木村 一裕, 清水 浩志郎, “ 高齢者のアクセシビリティに影響を与える要因について ” , 土木計画学研究講演集, Vol.21, No.1 (1998),pp543-546.

(25) 大森 宣暁, 室町 泰徳、原田 昇、太田 勝敏, “ 生活行動パターンを考慮した高齢者のアクセシビリティに関する研究～秋田市をケース・スタディとして～ ” , 土木計画学研究・論文集,Vol.15 (1998), pp671-678.

(26) 土井 健司, 長谷川 孝明, 小林 成基, 杉山 郁夫, 溝 端光, “ 超高齢化を迎える都市に要求される移動の質に関する研究 ” , IATSS 新学際プロジェクト H971 成果報告 (2009).

(27) 首相官邸, 新成長戦略 -「元気な日本」復活のシナリオ-,(2010).

(28) 久米 洋平, 河上 日出生, 塚田 将平, 中村 徹, “ ロボティックベッドの開発 ” , 自動車技術,Vol.64, No.5 (2010), pp.31–34.

(29) 高杉 紳一郎, 上島 隆秀, 草葉 隆一, 藤田 曜生, 太田 祐子, 高本 陽一, 川久保 勇次, 橋爪 誠 , 岩本 幸英, “ 安全かつ容易な移乗方法と移動支援ロボットの開発 ” , Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery, Vol.12, No.3 (2010), pp.198-199.

(30) 山岡 正明, “ パーソナルモビリティロボット ” , 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 8 (2008) pp.885–886.

(31) 畑瀬 勉, 若松 喜美, 西村 英記, 山本 博利, 戸田 広二, 後藤 茂樹, 松本 治, 小森 谷清, “ 愛・地球博におけるインテリジェント車いす”TAO Aicle”の実証実験 ” , ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2006).

(32) ISO/DIS 13482, “Robots and robotic devices – Safety requirements for non-industrial robots – Non-medical personal care robot ”,(2012).

(33) 貞本 敦史, “ NEDO 生活支援ロボット実用化プロジェクトの概要 ” , 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 9 (2011), pp.760-764.

(34) L. F. Henderson, “The Statistics of Crowd Fluids”, *Nature*, Vol.229 (1971), pp.381–383.

(35) L. Roger, A. Hughes, “Continuum Theory for the Flow of Pedestrians”, *Transportation Research Part B*, Vol.36 (2002), pp.507-535.

(36) 山本 江, 岡田 昌史, “ 交差流の粒子モデル化と時間・空間周波数に基づく歩行者群制御 ” , 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2011), 1A1-K07.

(37) C. W. Reynolds, “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model”, *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, (1987), pp.25–34.

(38) X. Tu, D. Terzopoulos, “Artificial fishes: physics, locomotion, perception, behavior”, *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press,(1994), pp.43–50.

(39) J. von Neumann, *Theory of Self - Reproducing Automata*, University of Illinois Press,(1966).

(40) 大鋳 史男 , 小野木 基裕, “ セルオートマトン法による避難流動のシミュレーション ” , 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, No.51 (2008), pp.94–111.

(41) A. Schadschneider, “Cellular automaton approach to pedestrian dynamics - theory”, *M. Schreckenberg and S.D. Sharma (eds.): Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, (2002), pp.75–85.

(42) 佐野 健一、河野 光雄, “ 歩行者の流れに関する解析的アプローチ ” , 総合政策研究, Vol.19 (2011), pp.135–144.

(43) C. Burstedde, A. Kirchner, K. Klauck, A. Schadschneider and J. Zittartz, “Cellular Automaton Approach to Pedestrian Dynamics - Applications”, *M. Schreckenberg and S.D. Sharma (eds.):*

Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer, (2001), pp.87–97.

(44) A. Kirchner, K. Nishinari and A. Schadschneider, “Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics”, *Physical Review E*, Vol.67 (2003).

(45) A. Kessel, H. Kluepfel, J. Wahle and M. Schreckenberg, “Microscopic simulation of pedestrian crowd motion”, *M. Schreckenberg and S. D. Sharma (Eds.) : Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, (2002), pp.193–200.

(46) M. Muramatsu, T. Irie and T. Nagatani, “Jamming transition in pedestrian counter flow”, *Physica A: Statistical and Theoretical Physics*, Vol.267, No.3-4 (1999), pp.487–498.

(47) J. Kerridge, J. Hine and M. Wigan, “Agent-based modeling of pedestrian movements: the questions that need to be asked and answered”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 28, No. 11 (2001), pp.327–341.

(48) 岡崎 甚幸, “ 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究: その 1. 磁気モデルの応用による歩行モデル ” , 日本建築学会　論文報告集, No.283 (1979), pp.111–119.

(49) 岡崎 甚幸, “ 建築空間における歩行のためのシミュレーションモデルの研究: その 2. 混雑した場所での歩行 ” , 日本建築学会　論文報告集, No.284 (1979), pp.101–109.

(50) 清野 純史，三浦 房紀，瀧本 浩一, “ 被災時の群衆避難行動シミュレーションへの個別要素法の適用について ” , 土木学会論文集，No.537 (1996)，pp.233–244.

(51) D. Helbing and P. Moln ´ ar. “Social force model for pedestrian dynamics”, *Physical Review E*, Vol.51, No.5 (1995), pp.4282–4286.

(52) D. Helbing, “A Mathematical Model for The Behavior of Pedestrians”, *Behavioral Science*, Vol.36 (1991), pp.298–310.

(53) R. Paris, J. Pettr’e and S. Donikian, “Pedestrian Reactive Navigation for Crowd Simulation: a Predictive Approach”, *Eurographics ’ 07 Conference Proceedings*, Vol.26, No.3 (2007), pp.665–674.

(54) K. Teknomo, “Application of microscopic pedestrian simulation model”, *Transportation Research Part F: Traffic psychology and Behaviour*, Vol.9, No.1 (2006), pp.15–27.

(55) 中村 和男, 吉岡 松太郎, 稗田 哲也, “ 歩行者流動モデルとそのシミュレーション”, 人間工学, Vol.10, No.3 (1974), pp.93–102.

(56) 北村 喜文, 田中 貴秋, 岸野 文郎, 谷内田 正彦 “ ostree とポテンシャル場を用いた三次元環境での経路探索”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.8 (1996) pp.1186–1193.

(57) J. Gulder and V. I. Utkin, “Sliding Mode Control for Gradient Tracking and Robot Navigation Using Artificial Potential Fields”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.11, No.2 (1995), pp.245-247.

(58) R. Sommer, *Personal Space: The Behavior Basis of Design*, , Englewood Cliffs, N.J, (1969).

(59) E. T. Hall, *The Hidden Dimension*, Doubleday and Company, (1996).

(60) 渋谷 昌三, “ パーソナルスペースの形態に関する一考察 ”, 山梨医科大学紀要, Vol.2 (1985), pp-41-49.

(61) 高久 洋介, 柳瀬 亮太, “ 建築空間における通路の形態と復員に関する基礎研究－印象評価実験による回避行動の検討－ ”, 日本建築学会計画系論文集, Vol.74, No.638 (2009), pp-809-814.

(62) 日比谷 朱子, 大野 隆造, “ 交差する経路における車椅子利用者の挙動に関する研究 ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2008) pp.578-580.

(63) 大佛 俊泰, 佐藤 航, “ 心理的ストレス概念に基づく歩行行動のモデル化 ”, 日本建築学会計画系論文集, No.573 (2003), pp.41–48, .

(64) 建部 謙治, 辻本 誠, 志田 弘二, “ 回避行動開始点の判定と前方回避距離: 歩行者の回避行動に関する研究 (II) ”, 日本建築学会計画系論文集, No.465 (1994), pp.95–104.

(65) 依田 光正, 塩田 泰仁, “ 人間同士のすれ違い行動における回避領域の実験的研究 ”, 人間工学, Vol.35, No.1 (1999), pp.9-15.

(66) 依田 光正, 塩田 泰仁, “ 人間同士のすれ違い行動における動作特性および回避行動アルゴリズム: 屋外と屋内での基本実験結果 ”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.619 (1998), pp.959–265.

(67) 山本 智規, 柴田　論, 神代　充, “ 人間の交差運動における減速による衝突回避挙動の解析 ”, 日本人間工学学会誌, Vol.42, No.6 (2006), pp.402–407.

(68) M. Bierlaire and T. Robin, “Pedestrian choices”, In H. Timmermans (Ed.), *Pedestrian Behavior: Models, Data Collection and Applications*, Emerald Group, (2009), pp.1–26.

(69) P. Collett, P. Marsh, “Patterns of public behavior: Collision avoidance on a pedestrian crossing”, *Non-verbal Communication; interaction and gesture, Approaches to Semiotics* (1981), pp.199–217.

(70) L. Manenti, S. Manzoni, G. Vizzari, K. Ohtsuka and K. Shimura, “Towards an Agent-Based Proxemic Model for Pedestrian and Group Dynamic”, *Proceedings of the 11th Workshop on Objects and Agents*, CEUR Workshop Proceedings, vol.621 (2010).

(71) 小塚 滋久, 中 祐一郎, 小林 健二, “ 交錯する歩行者の衝突回避行動に関する観測と解析 ”, 日本建築学会学術講演梗概集. E, (1988), pp.563–564, .

(72) 朝田 伸剛, 大佛 俊泰, “ 歩行者の回避行動に関する考察 ”, 日本建築学会　研究報告集 II, No.71 (2001), pp.105–108.

(73) 朝田 伸剛, 大佛 俊泰, “ 歩行者の回避行動シミュレーションモデル ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1 (2001), pp.773–774.

(74) 朝田 伸剛, 大佛 俊泰, “ 歩行者空間における歩行者と自転車の回避行動 ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, E-1 (2000), pp.1059–1060.

(75) S. J. Rymill and N. A. Dodgson, “A Psychologically-based simulation of human behavior”, *EG UK Theory and Practice of Computer Graphics*, (2005), pp.35–42.

(76) 劉 建宏, 大枝 良直, 角 知憲, “ パーソナルスペースを用いた障害物を回避する歩行者の群衆流動 ”, 土木学会論文集, Vol.64, No.4 (2008), pp513–524.

(77) G. Antonini, M. Bierlaire and M. Weber, “Discrete Choice Models of Pedestrian Walking Behavior”, *Transportation Research Part B: Methodological* , Vol.40, No.8 (2006), pp.667-687.

(78) T. Robin, G. Antonini, M. Bierlaire and J. Cruz, “Specification, estimation and validation of a pedestrian walking behavior model”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.43, No.1 (2009), pp.36–56.

(79) S. P. Hoogendoorn, “Pedestrian flow modeling by adaptive control”, *Proceedings of Transportation Research Board Annual Meeting*, (2004).

(80) J. V. D. Berg, L. Ming, M. Dinesh, “Reciprocal Velocity Obstacles for Real-Time Multi-Agent Navigation”, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation - ICRA’08*, (2008), pp.1928–1935.

(81) M. Asano, T. Iryo and M. Kuwahara, “A Pedestrian Model Considering Anticipatory Behaviour for Capacity Evaluation”, *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee 2009*, Springer: New York, (2009), pp.559–581.

(82) 喜多 秀行, 谷本 圭志, “ ドライバーの交通ルール認識と危険回避行動の推移に関するモデル分析 ”, IATSS Review, Vol.26, No.1 (2000), pp.23–31.

(83) 布施 孝志, 中西 航, “ 歩行者挙動モデルを統合した人物自動追跡手法の構築 ”, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.2 (2012), pp.92–104.

(84) Y. Okada, T. Wada, M. Horie, F. Nakase and H. Okada, “Experimental Performance Evalua-

tions on Reflect-Transmission Control Scheme for Vehicle-Pedestrian Communications:VPEC”, *IEICE Trans. Communication*, Vol.E90-B, No.10 (2007), pp.2931-2939.

(85) 宮田 なつき, 唐沢 好男, “ ITS 車車間通信における情報伝送効率改善:車間距離を基にした送信制御の提案 ” , 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.110, No.421 (2011), pp.137–141.

(86) 横山 牧, 岡野 裕, 福嶋 政期, 古川 正紘, 梶本 裕之, “ 曲がり角における出会い頭の衝突回避を目的とした周辺視野への接近感提示装置の制作 ” , 情報処理学会シンポジウム論文集, No.3 (2011), pp.573–574.

(87) 島田 陽子 , 河村 廣 , 谷 明勲 , 瀧澤 重志, “ 通路空間におけるニューラルネットワーク学習型人間歩行モデル: シミュレーションと実験結果との比較 ” , 日本建築学会近畿支部研究報告集. 構造系, No.45 (2005), pp.25–28.

(88) 岡田 公孝, 和田 剛, 高橋 幸雄, “ 個人行動をベースにした歩行モデルと歩行流シミュレーション ”, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会アブストラクト集, Vol.2003 (2003), pp.102–103.

(89) L. Sun and W. Qin, “A Data-Driven Approach for Simulating Pedestrian Collision Avoidance in Crossroads”, *2011 Workshop on Digital Media and Digital Content Management*, (2011), pp.83-85.

(90) F. Feurtey, “Simulating the collision avoidance behavior of pedestrians”, *Master ’ s thesis, Department of Electronic Engineering*, University of Tokyo, (2000).

(91) R. Simmons and S. Koenig, “Probabilistic Robot Navigation in Partially Observable Environments”, *In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (1995), pp.1080-1087.

(92) K-S. Hong, T. A. Tamba and J-B. Song, “Mobile Robot Control Architecture for Reflexive Avoidance of Moving Obstacles”, *Advanced Robotics*, 22 (2008), pp.1397-1420.

(93) 加藤 晋, 西山 栄枝, 武野 純一, “ 交通ルールの適用による複数の移動ロボットの協調行動 ” , 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2 (1994), pp.291-298.

(94) 建部 謙治, 中島 一, “ 静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動 : 歩行者の回避行動に関する研究 ” , 日本建築学会計画系論文報告集, No.418 (1990), pp.51-57.

(95) 依田 光正, 塩田 泰, “ 人間とすれ違い行動を行う移動ロボットの研究 ” , 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2 (1999), pp.202-209.

(96) 筆脇 晃朗, 中内 靖, 松原 隆, “ パーソナルスペースを考慮した人型ロボットの間合い制御に関

する研究 ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, (2005), 1PS1-S-008.

(97) T. Kitamura, “Animal-like Behavior Design of Small Robots by the Model of Subjective World and Behavior”, *Biomedical Fuzzy and Human Sciences*, Vol.3, No.1 (1997), pp.39-46.

(98) 福山 敬, 喜多 秀行, 保科 博靖, “ ドライバーの危険運転行動の社会的均衡に関する研究 ”, 京都大学防災研究所年報, No.42, B-2 (1999).

(99) 山田 誠二, “ リアクティブプランニング ”, 人工知能学会誌, Vol.8, No.6 (1993), pp. 729-735.

(100) P. J. H. Schoemaker, “The Expected Utility Model:Its Variants, Proposes, Evidence and Limitations”, *J. Econ. Literature*, XX (1982),pp.519-563.

(101) D. Kahneman, A. Tversky, “Prospect theory: An analysis of decisions under risk”, *Econometrica*, Vol.47, No.2 (1979), pp.263-291.

(102) A. Tversky, D. Kahneman, “The framing of decisions and the psychology of choice”, *Science*, Vol.211, No.4481 (1981), pp.453-458.

(103) J. O ’ Rourke, N. I. Badler, “Model-based image analysis of human motion using constraint propagation”, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.2 (1980), pp.422-536.

(104) T. Okamoto, and Y. Yamada, “Analysis of Human Behavior and Collision Risks at an Indoor Crossroad to Prevent Broadside Collisions”, *IARP Workshop on the Role of Robotics in Assisted Living*, (2011), TB1.

(105) 岡本 球夫, 山田 陽滋, “ 屋内交差通路における出会い頭の事故防止に向けた人の行動特性と衝突リスクの分析 ”, 安全工学シンポジウム 2011 講演予稿集, (2011), pp.136-139.

(106) 岡本 球夫, 山田 陽滋, “ 相手の駆け引きと情報の不確かさによる行動変化を考慮した出合い頭における歩行者の行動判断のモデル化 ”, 第 17 回ロボティクスシンポジア, (2012), pp.574–579.

(107) 岡本 球夫, 山田 陽滋, “ 交差通路をすれ違う歩行者の出合い頭における行動判断モデルの構築: 1 対 1 でのすれ違いのモデル化とその運用規範に関する考察 ”, 日本人間工学会 第 53 回大会講演集, Vol.48 (2012), pp.208-209.

(108) 岡本 球夫, 山田 陽滋, “ 交差通路でのすれ違いにおける相手との相互影響による判断特性の変化を考慮した歩行者の行動判断モデルの構築 ”, 第 18 回ロボティクスシンポジア, (2013), pp.322–329.

(109) T. Okamoto and Y. Yamada, “Study of Conditions for Safe and Efficient Traffic in an Indoor Blind Corner-based Decision Model with Consideration for Tactics and Information Un-

certainty”, *The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, (2012), pp.682-688.

(110) T. Okamoto and Y. Yamada, “Decision Model for Determining the Behavior of Pedestrians Approaching from Both Sides of a Blind Corner by Considering Tactics and Information Uncertainty”, *Proceeding of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (2012), pp.1494-1501.

(111) J. V. Neumann, O. Morgenstern, A. Rubinstein and H. W. Kuhn, *Theory of games and economic behavior*, Princeton University Press, (1944).

(112) J. F. Nash, “Non-cooperative Games”, *Annnals of Mathematics*, Vol.54 (1951), pp.286-295.

(113) J. F. Nash, “Equilibrium Points in n-Person Games”, *Proceedings of the National Academy of Science of USA*, Vol.36, No.1 (1950), pp.48–49.

(114) J. M. Smith “The theory of games and the evolution of animal conflicts”, *J. Theor. Biol.*. Vol.47 (1974), pp.209–221.

(115) 大浦 宏邦, 社会科学者のための進化ゲーム理論, 勁草書房,(2008).

(116) J. W. Weibull, *Evolutionary Game Theory*, MIT Press, (1995).

(117) J. Hofbauer and K. Sigmund, *Evolutionary Games and Population Dynamics*, Cambridge University Press, (1998).

(118) A. E. Roth and I. Erev, “Learning in Extensive-Form Games: Experimental Data and Simple Dynamic Models in the Intermediate Term”, *Games and Economic Behavior*, Vo.8 (1995), pp.164-212.

(119) I. Erev and A. E. Roth, “Predictiong How People Play Games: Reinforcement Learning in Experimental Games with Unique, Mixed Strategy Equilibria”, *The American Economic Review*, Vol.88, No.4 (1998), pp.848–881.

(120) G. W. Brown, “Iterative Solutions of Games by Fictitious Play”, *Activity Analysis of Production and Allocation*,T. C. Koopmans(ed.), Wiley, (1951).

(121) I. H. Witten, “An Adaptive Optimal Controller for Discrete-Time Markov Environments”, *Information and Control*, Vol.34, No.4 (1977), pp.286–295.

(122) R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*, A Bradford Book, (1998).

(123) J. C. Houk J. L. Adams and A. G. Barto, “A model of how the basal ganglia generate and use

neural signals that predict reinforcement”, In J. C. Houk, J. L. Davis and D. G. Beiser (Eds.), *Models of information processing in the basal ganglia*, The MIT Press, (1995), pp.249–270.

(124) A. G. Barto, “Adaptive critics and the basal ganglia”, *Models of Information Processing in the Basal Ganglia*, MIT Press, (1994), pp.215–232.

(125) S. Mochan and T. A. McMahon, “Ballistic walking”, *J. Biomechanics*, Vol.13 (1980), pp.49–57.

(126) R. Boulic, N. M. Thalmann and D. Thalmann, “A Global Human Walking Model with Real-Time Kinematic Personification”, *The Visual Computer*, 6 (1990), pp.344–358.

(127) 日本建築学会, 建築資料集成【人間】, 丸善株式会社, (2003), pp.60.

(128) G. Shafer, *A Mathematical Theory of Evidence*, Princeton University Press, (1976).

(129) 松山 隆司, 栗田 充隆, “ Dempster-Shafer の確率モデルに基づくパターン分類ー観測情報からの信念の形成と仮想信念空間を用いた信念の統合ー ”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J76-D-II, No.4 (1993), pp.843-853.

(130) 岡本 球夫, “ 衝突防止システムおよび電動車両 ”, 日本国特許, 特願 2011-202635, (2011).

(131) 岡本 球夫, 榊原 瑞穂, “ 信号表示機 ”, 日本国意匠, 第 1422594 号, (2011).

(132) 岡本 球夫, 榊原 瑞穂, “ 信号表示機 ”, 日本国意匠, 第 1422595 号, (2011).

(133) 岡本 球夫, 榊原 瑞穂, “ 信号表示機 ”, 日本国意匠, 第 1422596 号, (2011).

謝辞

本研究は，名古屋大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 安全知能学グループ 山田陽滋教授の指導のもと行われたものである．多忙な御身であるにも関わらず，研究の方針や手法の議論に加え，論文の書き方など，多くの助言を賜り，最後まで熱心にご指導頂き，深く感謝の意を表します．また，博士論文の予備審査から最終審査会において，貴重なご意見を頂き，ご指導頂いた名古屋大学 エコトピア科学研究所 大日方五郎教授，名古屋大学 大学院工学研究科 中村英樹教授，名古屋大学 大学院工学研究科 古橋武教授に感謝の意を表します．

本研究で行った現場調査に対して快く承認を頂き，調査においても多大なるご協力を頂いた国立障害者リハビリテーションセンター研究所　井上剛伸氏，硯川潤氏，ならびに，博士課程への進学に後押し頂き，大学での研究活動に多大なるご支援を頂いた大阪工業大学 (元パナソニック株式会社)　本田幸夫教授に深く感謝いたします．また，本研究および関連する研究開発にご協力頂いたパナソニック株式会社　河上日出生氏，久米洋平氏，塚田将平氏，パナソニックプロダクションテクノロジー株式会社　谷本伊佐夫氏に感謝の意を表します．

数々の書類の処理して頂き，研究が円滑に進むよう尽力してくださった，安全知能学研究グループ 秘書 河合礼子氏に敬意を表します．

研究を進めていく上で議論の機会を提供してくださり，貴重なご意見を頂いた，原進准教授，岡本正吾助教に深謝の意を表します．そして，研究室での日々の生活でお世話になり，本研究に関しても様々なご意見やアドバイスを頂いた安全知能学グループの皆様，ならびに，シミュレーションでのデータ取りに協力頂いた名古屋大学の大川正暉さんに謝意を表します．

最後に，今まで関わった全ての方々に感謝の意を表し，謝辞とさせて頂きます．

平成 25 年 4 月

岡本　球夫