

東京大学大学院工学系研究科

システム量子工学専攻

修士論文

マルチエージェント交通シミュレータを用いた

認知エラーに起因する事故再現手法の検討

“On Evaluation of Traffic Accident Model in the Cause of
Acknowledgement Error Using Multi-Agent based Traffic Simulator”

2009 年 2 月 5 日提出

指導教員 吉村 忍 教授

文屋 信太郎 講師

学籍番号 7 6 5 6 4

高 野 悠哉

目次

1	序論	1
1.1	交通事故と ITS	1
1.2	本研究の狙い	2
1.3	本論文の構成	2
2	背景	4
2.1	シミュレータ	4
2.1.1	既存のシミュレーションモデル	5
2.1.2	これからのシミュレータ	9
2.1.3	事故を評価するシミュレータ	10
2.2	交通事故	13
2.2.1	交通事故の概要	13
2.2.2	交通事故の原因	18
2.2.3	認知エラー	20
2.2.4	判断エラー	22
2.2.5	操作エラー	23
2.2.6	交通事故のモデル化	23
2.3	認知心理学	24
2.3.1	運転と視覚	24
2.3.2	中心視野と周辺視野	25
2.3.3	中心視野と周辺視野に関する関連研究	26
2.3.4	眼球運動による注視点移動	26
2.3.5	眼球運動の関連研究	29
2.4	本研究の位置づけ	29
3	シミュレータの計算内容	30
3.1	事故再現シミュレータの満たすべき要件	30
3.2	シミュレータ全体の計算の流れ	32

3.3	初期設定	34
3.3.1	データ読み取り	34
3.3.2	窓作成	37
3.4	車エージェントの挙動	39
3.4.1	危険判断	40
3.4.2	右左折減速	41
3.4.3	優先度判断	41
3.4.4	空走・制動距離	42
3.4.5	速度更新	43
3.4.6	位置更新	44
3.4.7	レーン更新	44
3.5	結果の掃き出し	45
3.5.1	画像データ保存	45
3.5.2	衝突判定	45
3.6	数値データ	46
3.6.1	車のサイズ	46
3.6.2	道のサイズ	47
3.6.3	塀のサイズ	48
3.6.4	信号のサイズ	48
3.6.5	その他のサイズ	49
4	2次元幾何学的モデル	50
4.1	計算内容	50
4.1.1	視野・死角による認知可能範囲の作成	50
4.2	簡易モデルの実装	51
4.3	結果と考察	52
5	画像処理モデル	56
5.1	計算内容	57
5.2	勾配を考慮した事故の実装	57

5.3	結果と考察	58
6	注視点モデル	63
6.1	周辺視野と中心視野	63
6.2	計算内容	66
6.2.1	視野角とウインドウ幅	66
6.2.2	視点とミラーの位置	67
6.2.3	周辺・中心視野作成	68
6.2.4	周辺視野内の情報取得	70
6.2.5	運転時における視点移動	70
6.2.6	受動的な視点移動	71
6.2.7	能動的な視点移動	72
6.2.8	中心視野による情報取得	72
6.3	注視点を考慮した事故	73
6.4	考察	84
7	感度解析	85
7.1	認知判断に用いられるパラメータ	85
7.2	マルチエージェントモデルを用いた感度解析	86
7.3	感度解析手法	87
7.4	結果	89
7.5	考察	95
7.6	補足・計算時間について	97
8	シミュレータの利用例—高齢者の視野狭窄	99
8.1	高齢者の事故	99
8.2	視野狭窄による周辺視野範囲	100
8.3	計算条件	101
8.4	結果	101
8.5	考察	102

9	結 論	103
	参 考 文 献	104
	謝 辞	107

図目次

図 2-1	ドライビングシミュレータを使った事故評価	11
図 2-2	自動車の属性	12
図 2-3	交通事故数・負傷者数の推移	14
図 2-4	交通事故死者数の推移	14
図 2-5	事故の種類別にみた近年の交通事故の推移	15
図 2-6	平成 18 年における車両相互事故の事故類型別割合	16
図 2-7	平成 18 年における事故の程度別にみた事故類型別割合 ...	17
図 2-8	運転行動のサイクル	18
図 2-9	第一当事者における認知エラーとその原因	21
図 2-10	第一当事者における判断エラーの内容とその要因	22
図 2-11	第一当事者における操作エラーの内容とその要因	23
図 2-12	視野の模式図	25
図 2-13	一点を注視している時の視点の動き	28
図 3-1	認知・判断・操作を考慮した運転モデル	31
図 3-2	死角付き視野モデル(2次元幾何学的モデル)での計算の流れ。	32
図 3-3	全体の流れ	33
図 3-4	初期設定	34
図 3-5	交差点レーンの形状	36
図 3-6	周遊型の道路形状	37
図 3-7	デモ用ウインドウモデル	38
図 3-8	計算用マルチウインドウモデル	39
図 3-9	車エージェントの挙動	40
図 3-10	危険判断のモデル	41
図 3-11	改良済車両幅員別延長比率	47
図 3-12	建築基準法におけるブロック塀の規制	48

図 4-1 死角の再現	50
図 4-2 視覚の可視判定用座標	51
図 4-3 見通しの悪い交差点と路上カメラの情報伝達	52
図 4-4 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供	153
図 4-5 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供	253
図 4-6 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供	353
図 4-7 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供	454
図 4-8 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供	554
図 4-9 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供	654
図 5-1 画像処理モデルにおける運転手の視野	56
図 5-2 RGB を用いた認知動作の再現	57
図 5-3 山道での事故	58
図 5-4 山道における事故 1	59
図 5-5 山道における事故 2	59
図 5-6 山道における事故 3	59
図 5-7 山道における事故 4	60
図 5-8 山道における事故 5	60
図 5-9 山道における事故 6	60
図 5-10 山道における事故 7	61
図 5-11 山道における事故 8	61
図 5-12 山道における事故 9	61
図 6-1 人間の周辺視野と中心視野の範囲	64
図 6-2 速度上昇による視野狭窄	64
図 6-3 周辺視野と中心視野の導入	65
図 6-4 視野角とウインドウ幅の関係	66
図 6-5 時速 40km の場合の中心視野と周辺視野	67
図 6-6 角度からピクセルの計算方法	67
図 6-7 車内の視点とミラーの位置関係	68
図 6-8 それぞれの視野のピクセル数(デモの場合)	69

図 6-9 カラー情報を配列に格納	70
図 6-10 視野領域の分割	71
図 6-11 中心視野の情報取得	72
図 6-12 注視点モデルにおける追突の様子 1	74
図 6-13 注視点モデルにおける追突の様子 2	74
図 6-14 注視点モデルにおける追突の様子 3	74
図 6-15 注視点モデルにおける追突の様子 4	75
図 6-16 注視点モデルにおける追突の様子 5	75
図 6-17 注視点モデルにおける追突の様子 6	75
図 6-18 注視点モデルにおける追突の様子 7	76
図 6-19 注視点モデルにおける追突の様子 8	76
図 6-20 注視点モデルにおける追突の様子 9	76
図 6-21 注視点モデルにおける追突の様子 10	77
図 6-22 注視点モデルにおける追突の様子 11	77
図 6-23 注視点モデルにおける追突の様子 12	77
図 6-24 注視点モデルにおける追突の様子 13	78
図 6-25 注視点モデルにおける追突の様子 14	78
図 6-26 注視点モデルにおける追突の様子 15	78
図 6-27 注視点モデルにおける追突の様子 16	79
図 6-28 注視点モデルにおける追突の様子 17	79
図 6-29 注視点モデルにおける追突の様子 18	79
図 6-30 注視点モデルにおける追突の様子 19	80
図 6-31 注視点モデルにおける追突の様子 20	80
図 6-32 注視点モデルにおける追突の様子 21	80
図 6-33 注視点モデルにおける追突の様子 22	81
図 6-34 注視点モデルにおける追突の様子 23	81
図 6-35 注視点モデルにおける追突の様子 24	81
図 6-36 注視点モデルにおける追突の様子 25	82
図 6-37 注視点モデルにおける追突の様子 26	82

図 6-38 注視点モデルにおける追突の様子 27	82
図 7-1 感度解析で用いるマップのサイズ	87
図 7-2 上空から見たシミュレーション画面	88
図 7-3 視点移動速度と認知台数の関係	89
図 7-4 視点移動速度と認知台数の各タイムステップにおける関係	90
図 7-5 認知切れ時間と認知台数の関係	91
図 7-6 認知時間と認知台数の関係	92
図 7-7 周辺視野の大きさと認知台数の関係	93
図 7-8 認知パラメータと認知台数の関係	94
図 7-9 車両台数と計算時間の関係	98
図 8-1 年代別事故件数の推移	99
図 8-2 周辺視野の年代別比較	100
図 8-3 周辺視野の大きさと事故台数の関係	102

表目次

表 2-1 各エラーの具体的な例	20
表 3-1 車の持つ変数	35
表 3-2 リンクの持つ変数	35
表 3-3 制動距離に用いる摩擦係数	43
表 3-4 衝突時に取得する結果の値	46
表 3-5 車のサイズ	46
表 6-1 視野角をウインドウ上で再現した際の値	68
表 6-2 視野角をウインドウ上で再現した際の値(計算用).....	69
表 7-1 認知判断に用いられるパラメータの基準値	85
表 7-2 視野角をウインドウ上で再現した際の値	86
表 7-3 感度解析でふったパラメータの値	88

1 序論

1.1 交通事故と ITS

近年 ITS(Intelligent Transport Systems)技術の普及は目覚しく、多くのシステムが実用化されてきた。日本でも政府による ITS 九開発分野の決定で ITS 技術の開発と実用化が促進された。例えば第一開発分野の「ナビゲーションシステムの高度化」ではカーナビゲーションに搭載した VICS(Vehicle Information & Communication System)の利用が始まり[1]、第二開発分野の「自動料金収受システム」では ETC(Electric Toll Collection System)技術が多くの車に搭載されている。

これに対して第三開発分野の「安全運転の支援」に関しては実用化が進んでいない。交通事故低減の技術は一部の高級車に採用されているが本格的実用化には程遠い。これは前二者に対し導入効果が見えにくいこと、システム導入のコストが多大にかかることが原因である。事故予防には①機器から運転手が危険を認識する「注意喚起」と②機器が危険を認識し自動ブレーキをかける「介入制御」の 2 種類がある。しかしどちらも実環境での実証テストは多くの困難を伴い、事故削減効果の定量的な評価が難しいためコストに見合った成果を期待できるか分からない。それだけではなく介入制御や一部の注意喚起においては事故が増加してしまう可能性すらある。

そこで ITS 導入による事故削減効果を事前に検証することが必要となり、精緻な交通シミュレーション上で評価する試みに大きな期待が寄せられている。ただし、そのためには、まず交通シミュレーション上で、交通事故を詳細に再現できなければならない。

事故を解析するにあたって運転挙動は認知動作・判断・操作の 3 ステップに分ける事が出来るが、事故に関与した当事者の 70%が認知動作においてエラーを起こしている[2]。認知ミスによる事故を未然に防ぐ様な

ITS の利用方法を考えていく必要がある。

1.2 本研究の狙い

ITS 導入にあたっては通常運転や衝突回避などにおけるドライバーの運転特性を十分に把握し、それらの特性を補完するか、あるいは阻害しないように ITS 機器やシステムの基本設計を行う必要がある。ドライバー特性を把握し、システム基本設計とその設計が妥当であることを確認する評価において、さまざまな方策が考えられるが、道路交通の予防安全のためには、衝突回避などの危険な状況での実験が必要となる。危険な状況での実験をテストコースなどにおいて実車を用いて行った場合、実際に衝突するかもしれないような状況での検討は困難である。

そこで ITS 導入時の事故低減効果を評価するシミュレータの作成が必要となる。本稿ではその第一段階として人間の運転挙動や視野の範囲等を再現し、実際の状況に近い事故を発生させる。まずは建物の死角に起因して事故が発生するモデルのプロトタイプを作成し、そこから発展させてより複雑な状況において事故が発生するモデルを作成する。

1.3 本論文の構成

第 2 章では、計算機工学・交通工学・認知神経学それぞれの分野の背景と本研究の立ち位置について述べた。

第 3 章では、開発したシミュレータにおいて認知部分を除いた計算手法について説明を行った。

第 4 章から第 6 章ではドライバーの認知の方法を 2 次元幾何学処理、画像処理、注視点処理と本研究における認知動作の計算手法を段階ごとに説明する。それぞれの計算手法で再現可能な事故を確認し、後半へ進むほどより人間の運転挙動に近付いた認知方法である事を示す。

第7章では、開発したシミュレータに用いたパラメータの感度解析を行い、シミュレータの性能を確認した。

第8章では、本シミュレータの利用例として高齢者の視野狭窄による事故の増加を評価する手法を検討した。

第9章では、研究成果を統括・検討し、結論とした。

2 背景

本研究は、シミュレータとしての側面と交通工学的な側面と認知心理学の側面というように3つの側面を持っている。それぞれの分野における研究の現状と、本研究の位置づけについて本章では述べる。

2.1 シミュレータ

交通シミュレーションは交通流における様々な現象を計算機上で仮想的に再現するもので、これまでは主に渋滞の発生原因や発生箇所の予測、一定区域からの排気ガス排出量の予測等に用いられてきた。

道路交通流シミュレータの開発は1960年代に盛んになった。日本では1973年にシミュレーション技術研究会で、当時の交通流シミュレーションについて特集されている。その後、交通渋滞の激化と共に、動的な交通配分やボトルネック交通現象研究が主要課題となるにつれ、最近再びまた新しい交通シミュレーションの開発が盛んになっている。これは、問題が変化したことによってシミュレーションに求められるものも変化しているということである。しかしその本質は変わっておらず、現実の交通システムが複雑で大規模なものであること、交通システムの構成要素には非決定論的なものが含まれていることから、分析にはシミュレーションが大きな力を発揮すると期待されている。

交通の分野に限らず、計算機シミュレーションがその力を発揮するのは、まず施策運用のための試算である。一般的な理論式による試算は、その一般性ゆえに多くの場合に用いられるものであるが、制限も多い。静的であり問題非依存性の強い理論式に対し、それでは汲み取れない部分を補完するツールが交通流シミュレータである。

動的なシミュレーションが持っている大きな利点として、分かりやす

さが挙げられる。交通の専門家が用いるマクロな指標を用いるためには、その正確な意味を汲み取ることが必要であるし、またその成立ちや本質を理解するのは簡単なことではない。それに対しシミュレーションに入力するデータは現実から得られる直接的な値であることが多く、本質的には何らかの解釈を行った後のマクロ量である必要はない。出力に関しても、近年におけるデータ可視化の技術やデータマイニング分野の技術、また計算機の持つ再現性などのおかげで、知識の有無に関わらず一定の情報を得ることが可能である。従来の試算で得ていたマクロな指標は、より直接的な出力結果から算出することが可能であり、上位互換性を持つともいえる。このように実用的な交通流シミュレータには、大きな社会的需要があると考えられる。

2.1.1 既存のシミュレーションモデル

交通シミュレータは車両のモデル化手法によって、大きく二つのカテゴリに分類することができる。交通を流体のような単純なモデルとなぞらえて管理する方法がマクロモデル、個別の車両の挙動について詳細に取り扱うものがミクロモデルである。以下にその特徴と著名なシミュレータを簡単に紹介する。紹介に当たっては、まず 1970 年代末に開発された、CONTRAM、SATURN、NETSIM といった、第 1 世代とでもいうべきネットワークシミュレーションモデルに加え、1980 年代後半～1990 年代の新たなモデルを取り上げる。

「マクロシミュレータ」

マクロモデルを用いたシミュレータの目的は、交通需要の大まかな流れを見ることと交通渋滞を的確に再現することにある。これにより、新たな道路の建設計画に対する事前評価が可能になる。以前の主流は Greenshields[3]、Greenberg[4]、Draw[5]らが導出した流体モデルを用いたマクロシミュレータであったが、最近では車両を離散的に扱う

モデルも増えている。マクロモデルによるシミュレーションは一般に計算量が少なく、広域を対象にしたシミュレーションが可能である。このカテゴリに含まれる著名なシミュレータには以下のものがある。

① SATURN

SATURN (Simulation and Assignment of Traffic in Urban Road Networks) は平面交差点における信号制御、右左折禁止などの交通規制の影響評価などを目的として、1979年に英国 Leeds 大学で発表されたモデルである [6][7]。

ネットワークはリンクとノードで構成され、交差点近傍はレーンのイメージを持つ。シミュレーション対象時間は 15～30 分程度の間隔に分割され、各時間帯に OD 交通量を与える。交通量は流体近似され、各リンクへの到着が 1 信号サイクルの間の IN パターンとして入力される。リンク下流端では IN パターンに応じて車郡の拡散を考慮した ARRIVE パターンが生成され、交通容量から求められる ACCEPT パターンにマスキングされて、リンク流出交通量の OUT パターンが計算される。捌け残った交通量は停止線部に待ち行列を形成する。この OUT パターンや待ち行列は次の単位時間でのフローの状態に影響するので、このような手続きを繰り返し、OUT パターンが収束した時点で、1 サイクルでの定常的なフローパターンを得るものである。SATURN は、動的な利用者均衡状態を再現することを目指している。

SATASS と呼ぶ経路選択モデルは SATSIM で得られた交通量－遅れの関係を利用し、利用者均衡配分を行う（SATURN では確率的均衡配分も実現している）。以前の時間間隔において捌け残った交通量がすでに決定された経路に固定されてしまうことや、過飽和時の密度管理が十分でないため、渋滞の延伸・解消が正しく再現されないという問題などがしばしば指摘される。

② SOUND

SOUND は東大生研において開発された、過飽和状態の都市内高速道路を対象としたモデルである[8]。車両は一台ずつ表現され、設定された車頭間隔－速度曲線によって、各時刻でのリンク上の位置が計算される。この手法により、ボトルネック容量の違いによる渋滞状況の違いなども正確に再現することができる。

また、SOUND は現在の旅行時間情報に従って、各車両が分岐点において確率的経路選択を行う、動的均衡配分を実現しており、首都高速道路の交通状況の分析に適用されている。最近の研究では、旅行時間を予測するモデルを組み込み、予測時間情報の提供効果の評価を行った報告がある。ただし SOUND は高速道路を対象としているため、詳細な車両の挙動は考慮されておらず、レーン変更や信号交差点などのモデル化は省略されている。

「ミクロシミュレータ」

従来のミクロモデルの主な目的は、道路網のうちの局所的な部分の詳細な再現であった。自動車は離散的に扱われ、車線変更や追い越しなどの挙動が再現されるシミュレータもある。著名なシミュレータには以下のものがある。

① TRAF-NETSIM

NETSIM (Network Simulation Model) は 1970 年代初頭に米国 FHWA (Federal Highway Administration) によって開発されたモデルである。現在は交通シミュレーションの統合システムである TRAF[9]の一部を構成し、TRAF-NETSIM と呼ばれている[10]。ネットワークはノードとリンクで構成され、リンクはレーンのイメージを持つ。交通流の表現は車両 1 台ごとの挙動を微視的・確率的に再現するもので、各車両には車種のカテゴリ、加速度などの車両性能、ドライバーの行動類型(受動的、ノーマル、能動的)、希望速度などの多数のパラメータが設定され、リンク上を追従走行する。そのほかにも交差点でのギャップ

待ちやレーン変更の判断などの挙動についても多くのパラメータが用意されており、車両挙動の柔軟なモデル化が可能である。

しかしながら、NETSIM では各車両は目的地の情報を持っておらず、リンクごとに設定された右左折分流率に従って、次に流入するリンクを決定している。したがって、交通状況に応じた経路選択を自身で行うことはできないため、面的な交通運用策を評価することは困難である。

②INTEGRATION

INTEGRATION はカナダ Queen' s 大学の Van Aerde と Waterloo 大学の Yagar らによって 1988 年に開発された、高速道路と一般街路を統合してシミュレーションを行うモデルである [11]。一般街路の信号制御と高速道路のランプ流入制限などの運用策を同時に一つのモデルで評価できるだけでなく、情報端末搭載車への情報提供なども評価することができる。

道路ネットワークはノードとリンクから構成され、レーンのイメージはない。交通流のモデリングは車両を一台ずつ表現するミクロモデルであるが、追従ではなく待ち行列によって交通状況を再現するものである。各車両には目的地が設定されており、決められた出発時刻にネットワークに流入する。リンクは流入率、流出率、および車両密度の属性を持ち、リンク上の車両のスタック (Link Data Stack)、流出可能な車両のスタック (Departure Stack) を扱う。リンクに流入した車両は Link Data Stack にいれられ、現在のリンクの車両密度から求められる旅行時間を用いて、次のリンクに流出することができる時刻 (Next Scheduled Departure Time : NSDT) が設定される。シミュレーション時刻が車両の NSDT をこえると、その車両は Departure Stack に移され、リンク容量、信号現示、下流側の待ち行列、などの状態をもとに流出できるかどうかの判断がなされる。リンク容量は交通が渋

滞しているかどうかによって変化する。このような計算手法で、SATURNで指摘されるような渋滞時の密度管理の問題は解消される。

INTEGRATIONでは、現在のリンク旅行時間情報をもとに一定時間ごとに最短時間経路が更新され、各車両は常に目的地への最短経路を選択することで、動的な均衡状態を再現する。最新のバージョンでは、交通状況にかかわらず決まった経路を選択するもの、日常の交通状況より予測される旅行時間に従って経路選択するもの、システム最適の規範に従って経路選択するものなど、複数の道路利用者層を扱うことができるようになっている。

2.1.2 これからのシミュレータ

現在の交通問題を解決し、また新たな交通問題の発生を防止するには、施策の事前評価が必要である。これは先に述べたハード的解決方法、ソフト的解決方法、情報利用の全てに関して言えることであるが、特にその実現に時間とコストのかかるハード的解決方法については、その効果を慎重に見極めなければならない。多くの工学分野において、この過程は実験という形で行われる。しかし交通工学においてはこのような実験を行うのは非常に難しい。交通現象は規模が大きく、実験規模が大きくなって莫大なコストがかかるからである。また、交通は生活に密着しているため、長期間にわたる実験というのも現実的ではない。そのため、ある施策がどの程度の効果をあげるのかという調査をするのは難しく、客観的に妥当であるかどうかを判断する指標を持つことができない。

そこで、実験と同種の効果を期待されるのがコンピュータシミュレーションである。ここでは、これまで述べてきた道路交通の現状と新たな動きを踏まえた上で、次世代のシミュレータに求められる要件をいくつか挙げる。

現在のシミュレータではITSの導入効果が評価できないだけでなく、既存の情報伝達手段による情報提供の効果も十分反映できているとは言

いがたい。今後 ITS を広く浸透させていくためにも、情報利用の有無を取り扱えることは必要である。

2.1.3 事故を評価するシミュレータ

Archer や堀口によれば交通シミュレーションを交通安全の評価に用いる為にはいくつかの解決しなければならない課題がある。課題の第一は車両の行動モデルをどのように定義するかである、交通事故の原因は注意不足や「だろう」運転による判断ミス、反応遅れなどヒューマンエラーである。ミクロシミュレーションの代表的な行動モデルである追従モデルではドライバーモデルを簡略化し過ぎており、ヒューマンエラーを取り入れる事が出来ない、より詳細な運転挙動を模したモデルを採用する必要がある。豊田中央研究所などによる新しいフェーズの事故評価シミュレータではより詳細なドライバーモデルが用いられている。

課題の第二は安全指標に何を採用するかである。交通事故は確率的には稀な現象である為、シミュレータにおいて事故を再現出来たとしても交通事故の原因と結果の結びつきは一般的に強くない。事故と高い相関がある交通現象を見出し、それを安全指標とする研究分野に錯綜分析がある。錯綜分析においては TTC 指標や PET 指標(Post Encroachment Time、前方車両がその時点にいる場所に後方車両が到達するまでの時間)などの安全指標が知られている。

課題の第三は交通事故の原因に含まれる、交差点や道路の物理形状をどのように交通シミュレーションに反映させるかである。

「ミクロシミュレータ」

交通シミュレーションを事故の評価に用いた例は多くない、高島は NETSIM 及び Simr といったミクロ交通シミュレータを用いて交差点の安全性評価を行っている。Archer は ISA(Intelligent Speed

Adaptation)という車両速度の上限値を抑制する技術が事故低減にどれだけ寄与するかを調べる為に交通シミュレータを開発している。

だが、我々の研究室で開発中の知的マルチエージェント交通流シミュレータ[12]をはじめ、従来のシミュレータは全ての車が任意の他車の位置座標を取得することができ、認知モデルを簡略化してしまっている。

「ドライビングシミュレータ」

ドライビングシミュレータは実験条件の再現性に優れていて、同一の走行状況を繰り返し多数の被験者に対して実験できるのが特徴であるため、事故評価のシミュレータは多く存在する(図 2-1)[13]。だが、限定的な状況で限られた回数しかシミュレーションを行えないといった問題点もある。またあらかじめ事故のシナリオを決定して実験を行うことから、新しいリスクを見つける事が出来ず、事故の原因も単純化したものになりやすい側面がある。



図 2-1 ドライビングシミュレータを使った事故評価

(国土交通省国土技術政策総合研究所高速道路交通システム研究室)

「事故再現シミュレータ」

数少ない類似の研究としては、豊田中央研究所にて STREET というシミュレータが開発されているが、認知操作にシンプルなモデルを用いており、ITS 導入評価の詳細なシミュレータが存在しないのが現状である。詫間電波高等専門学校も 2004 年の情報処理学会において交通事故の危険度を予測する為の交通シミュレータを提案したが、図 2-2 のように扇型の認知範囲に車が存在すれば認知できるというモデルを用いていて、現実の交通状況を再現しているとは言い難い。

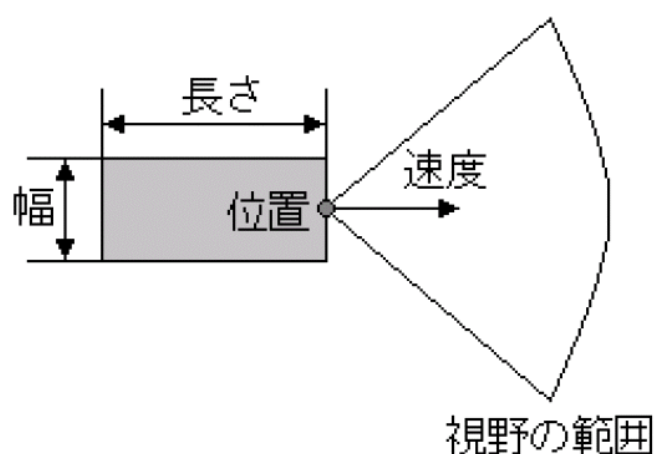


図 2-2 自動車の属性

本研究において、第一の課題に対しては詳細な視覚モデルを導入する事で見落とし等のエラーを単なる確率的な現象でなく周囲の状況から発生する創発的な現象として捉えた、判断モデルに関しても自分と他の車の位置や相対速度の関係から危険度を判断し減速道路を行うモデルを採用し現実のエラーに近い状況を再現した。第二の課題に対しては、事故の確率だけでなく、認知出来た台数を定量的に測定して、視覚モデル・見落とし量・事故件数の結びつきを評価する事でシミュレータの性能を評価した。第三の課題に対しては道路の勾配や曲線形状なども再現した。

2.2 交通事故

2.2.1 交通事故の概要

警察省の資料によれば、平成 18 年中の交通事故による死者数は 6,352 人で、6 年連続の減少となるとともに、昭和 30 年台以来 51 年ぶりに 6 千人台前半となった。これらはエアースタックなどの事故後に被害を抑える技術の開発が進んでいることが大きな理由である。

また、平成 16 年に過去最悪を記録した交通事故発生件数及び負傷者数も、平成 17 年に引き続き 2 年連続で減少している。しかしながら、負傷者数は 8 年連続で 100 万人を越えるなど、依然として憂慮すべき交通情勢にある(図 2-3,図 2-4)。事故を予防するための技術はまだ発展途上であり、事故件数や負傷者数が死亡者数に比べて減少していない。道路と自動車が通信を行い、事故予防に働きかけるインフラ協調システムに期待がかかっている。

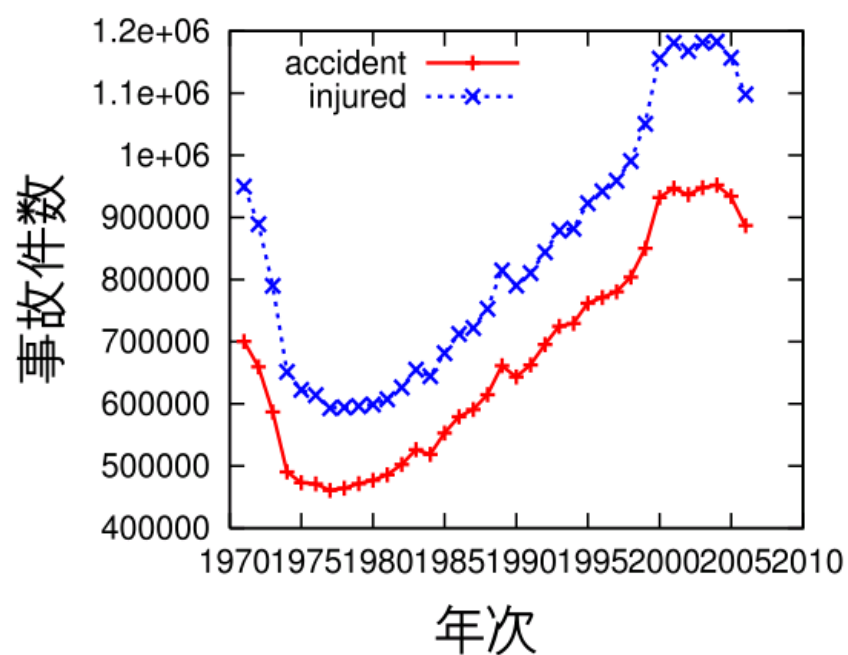


図 2-3 交通事故数・負傷者数の推移

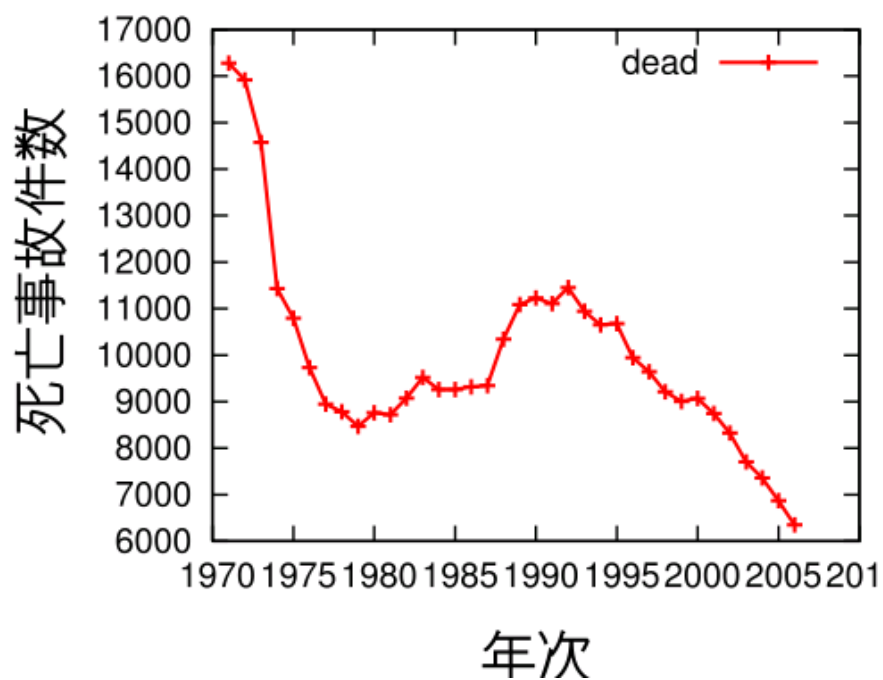


図 2-4 交通事故死者数の推移

道路交通における交通事故を大きく分類すると、人対車両の事故、車両相互の事故、そして車両単独の事故、というように分類できる。このうちの多くが車両相互の事故であり、車両単独の事故や人対車両の事故の 6 倍以上起きていることがわかる(図 2-5)。よって事故評価のシミュレーションを行うにあたっては、まずは歩行者の導入よりも車の挙動に重点を置くべきであると考えられる。

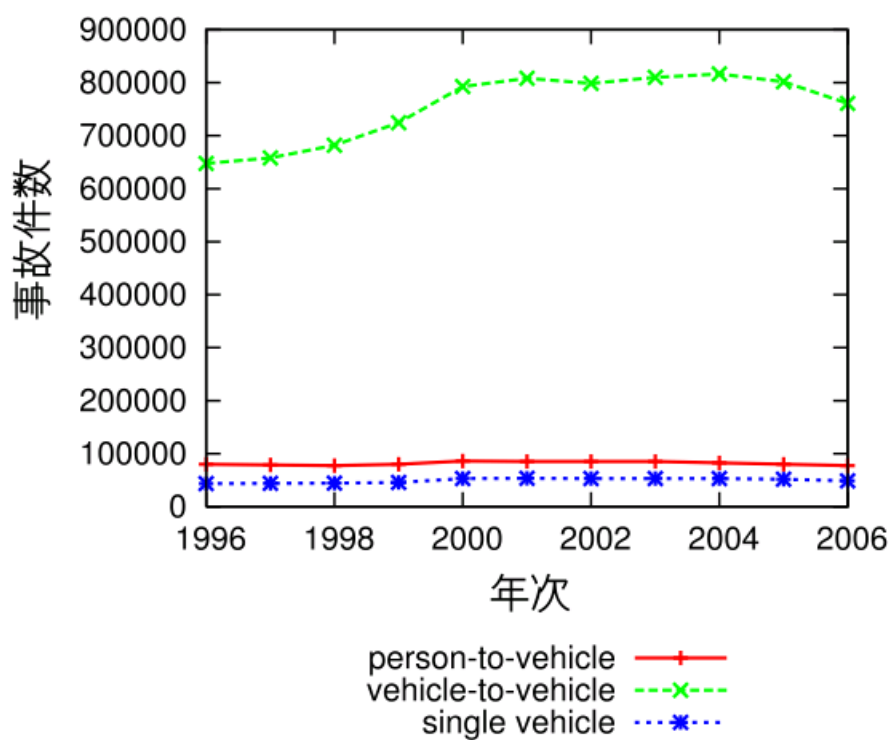


図 2-5 事故の種類別にみた近年の交通事故の推移

車両相互の事故の内訳は図 2-6 のようになっている。これによると、追突事故と出会い頭事故が車両相互の事故の 4 分の 3 近くを占めており、次いで、右折時・左折時衝突が多い。

事故が起きる状況は多岐にわたっていても、類型としては追突と出会い頭事故がほとんどであるという事が分かる。

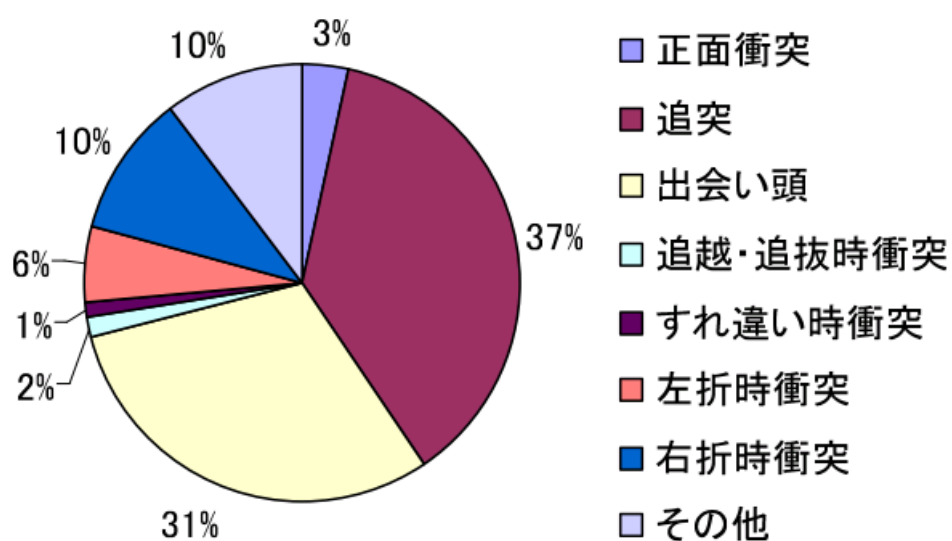


図 2-6 平成 18 年における車両相互事故の事故類型別割合

図 2-7 によると、車両相互事故を事故の程度によって分類した場合、死亡事故としては出会い頭事故・正面衝突が多く、重傷事故には出会い頭事故と右折時衝突事故、そして軽傷事故には追突事故と出会い頭事故が多い。

図 2-6 において正面衝突や右折事故の起きる割合はそれ程大きくなかったが、死亡事故・重症事故になる場合が多くリスクの高い事故である事がわかる。

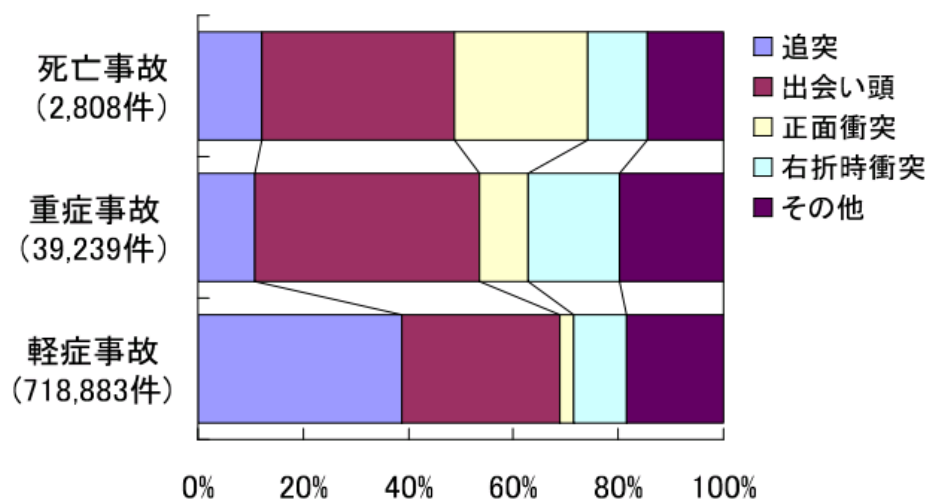


図 2-7 平成 18 年における事故の程度別にみた事故類型別割合

2.2.2 交通事故の原因

交通事故がどのようにして起こるのか、ということを議論するためには、運転行動がどのように行われているかということを知る必要がある。自動車を運転するという行為は、大きく分けると認知、判断、操作の3フェーズに分けて考えることができる(図 2-8)[14][15]。



図 2-8 運転行動のサイクル

認知

周囲の交通状況を視覚等により確認し、安全に運転する上で把握しておくべき対象を認識すること。認識すべき対象としては前方を走行中の車両や信号機などが挙げられる。

判断

認知した情報から対象の動静を予測し、次の行動を決定すること。見えない危険を積極的に避けようとするいわゆる防衛運転もこの判断の範疇に含まれる。例えば駐車車両の陰から人が飛び出してくるかもしれない、などといったことが防衛運転にあたる。

操作

判断に従ってアクセル・ブレーキによる加減速を行ったり、ハンドルによって方向転換を行ったりといった運転操作を指す。

認知した情報から判断を行い、判断に従って操作を行い、操作して変化した周囲の状況に対して認知を行ってというように、運転動作においてはこのサイクルを常に回し続ける事になる。

この 3 段階の運転行動のどれかが適切に行われなかった場合、交通事故が起こる可能性が生じる。この適切な行動がなされないことを、交通事故総合分析センター（以下 ITARDA）[14][15]などではエラーと呼んでおり、運転行動の 3 フェーズに合わせてそれぞれ、認知エラー、判断エラー、そして操作エラーと定義されている。それぞれのエラーの具体例を表 2-1 に挙げる。

エラーの種類	例
認知エラー	信号機や前方を走る車などの対象物が <ul style="list-style-type: none"> ・物陰になっていて見えない ・脇見などの不注意により見ようとししない ・いつも車がないので確認を怠った
判断エラー	<ul style="list-style-type: none"> ・先行車が加速すると思った ・相手が道を譲ってくれると思った ・自動車が出てくることはないと思った
操作エラー	<ul style="list-style-type: none"> ・ハンドル操作をあやまった ・ブレーキとアクセルを間違えた

表 2-1 各エラーの具体的な例

次に、交通事故総合分析センターが 300 件の交通事故について分析した事故の調査を参考に、それぞれのエラーについて紹介していく。先述の通り事故に対する過失が大きい側を第一当事者、他方を第二当事者と呼ぶ。

2.2.3 認知エラー

前方不注視、死角等により、横断歩行者、停止した前車、赤色信号等を発見しない、又は、その発見が遅れる事などが認知エラーにあたる。事故の直接の原因である第一当事者が認知エラーした対象と、認知エラーにつながった要因を図 2-9 にまとめる。認知エラーの対象で最も多いのは、交差直進者、即ち自分からみて横方向にいる車両や人であり、これは出会い頭の事故に直結する。また、第二番目に多いのは対向直進者、つまり対向車線を走行中の車両であり、このエラーは右折時の衝突事故や正面衝突事故につながる。第二当事者についても同様の傾向がある

認知エラーをした原因についてしてみると、認知エラーは、大きく分けて見通し不良であった場合とそうでなかった場合に分類できることがわかる。見通し不良とは、街路樹や建造物、他の車両などによって視界が遮られ、認知が物理的に困難であった場合をいう。図 2-9 を見ると見通し不良の割合は少ないとはいえないが、見通し不良よりも脇見運転や、視界に入っているにもかかわらず注意散漫による見落としによる事故の割合が高い事が分かる。

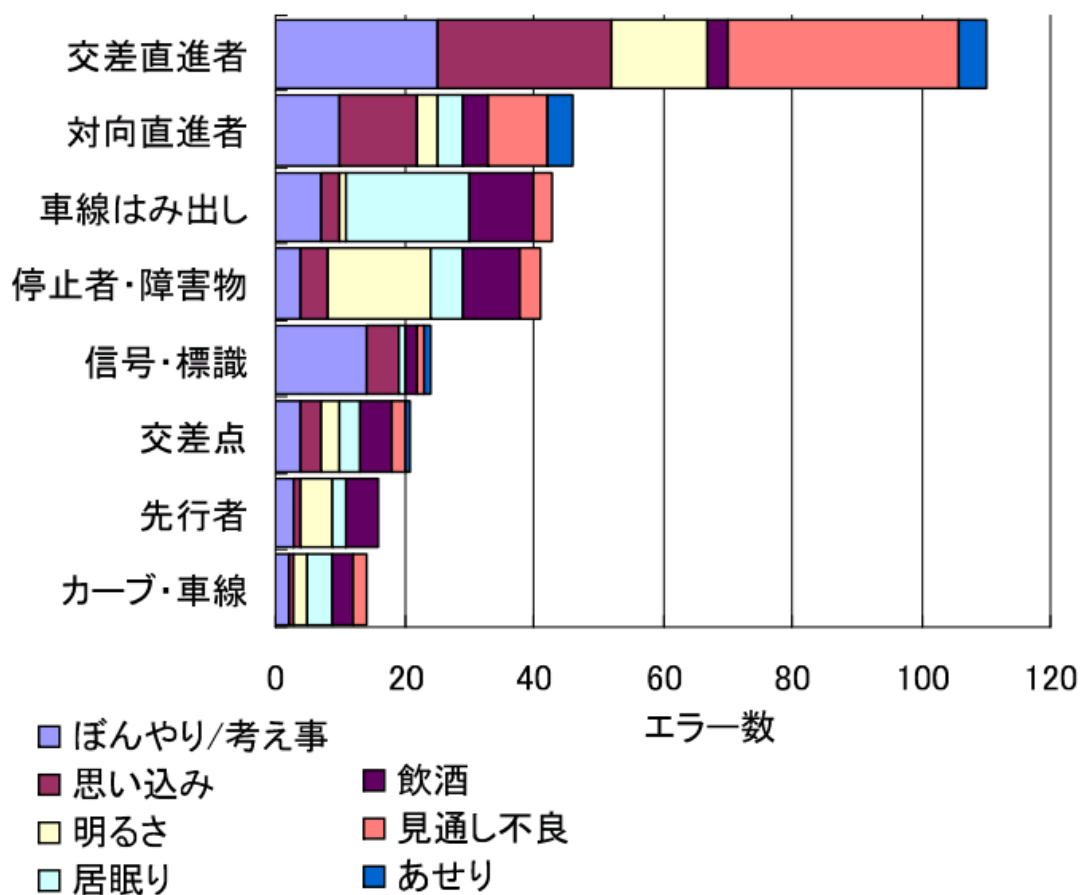


図 2-9 第一当事者における認知エラーとその原因

2.2.4 判断エラー

進路前方の危険要因を見つけても、「相手は止まるだろう」「車はいないだろう」などの判断を行う事が判断エラーにあたる。交通事故の第一当事者、第二当事者の主な判断エラーについて図 2-10 にまとめる。エラー要因としては「思い込み」と「ぼんやり」が全体の約 9 割を占めている。判断エラーとは自分に都合のよい判断・予測をしたものだを読みかえることができる。

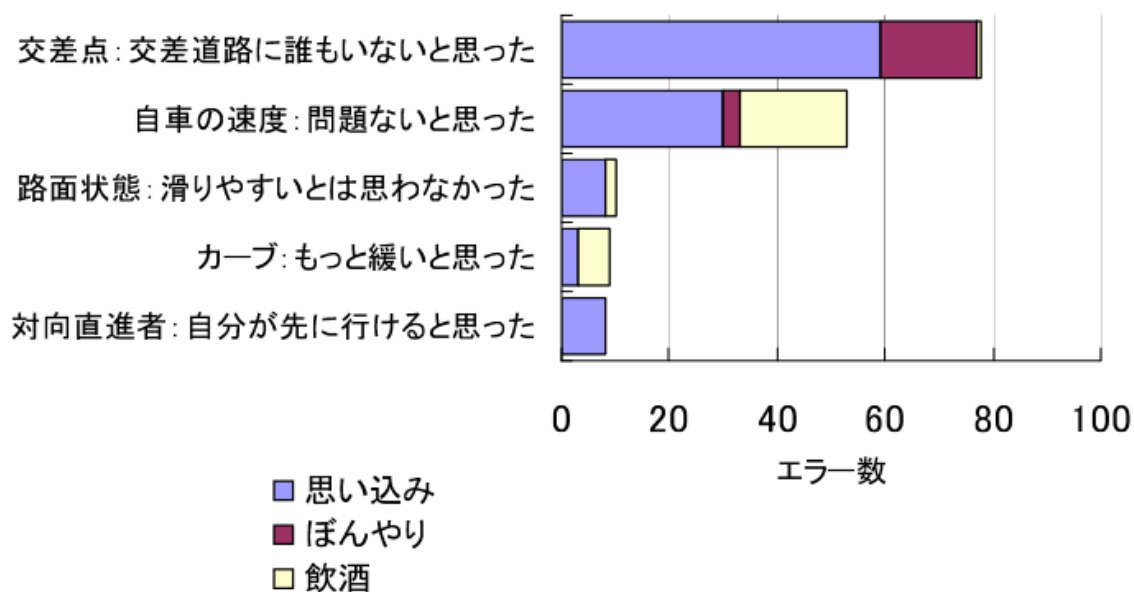


図 2-10 第一当事者における判断エラーの内容とその要因

2.2.5 操作エラー

ハンドルの切りすぎやブレーキの踏み加減、ギヤーチェンジ等の操作の誤りなどが操作エラーである。操作エラーは単独で起き辛く、件数もあまり多くない。図 2-11 は第一当事者の操作エラーについてまとめたものである。操作エラーの中には運転技量不足や飲酒など前提として自動車に乗るべきでない場合も含まれるが、それ以外では、慌て・パニックが最大の要因となる。なんらかの認知・判断エラーにより事故が起きそうになった時に心理的に不安定な状態になってしまい慌て・パニックが生じる場合が多い為、操作エラーは認知・判断エラーによって引き起こされるケースが多い。

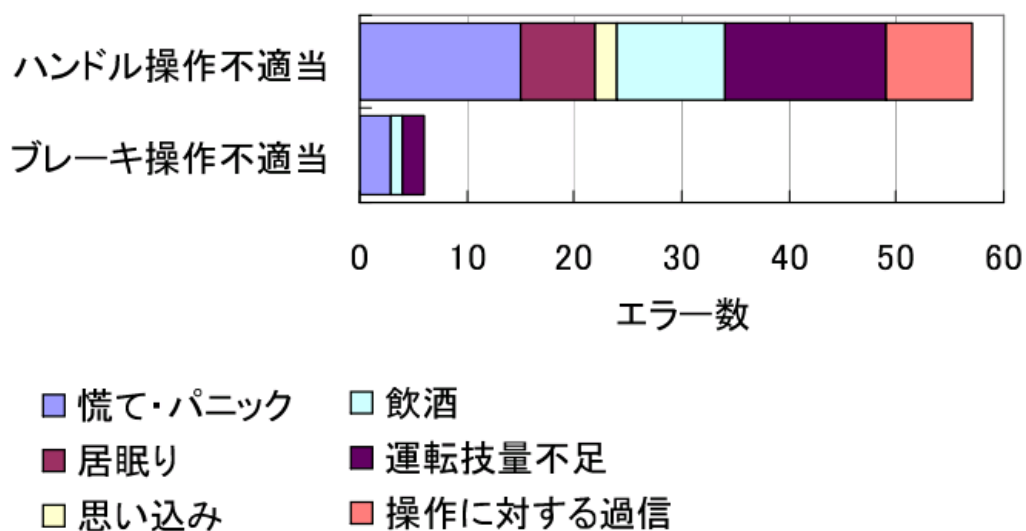


図 2-11 第一当事者における操作エラーの内容とその要因

2.2.6 交通事故のモデル化

交通事故の原因となるのは認知エラー・判断エラー・操作エラーである。このうち操作エラーは単独で起こりにくいことを考慮すると、交通事故を再現するためには、認知エラー・判断エラーのモデル化が必要であるといえる。

では、認知エラーや判断エラーはどのようにして起こっているのだろうか。認知エラーは 2.2.3 で述べたように、見通し不良が 2 割程度であり、それ以外は「ぼんやり」「思い込み」などの不注意に分類される原因によって引き起こされる。判断エラーについても 2.2.4 で述べたように、ほとんどが思い込みなどにより、自分の都合のいいように判断した結果として起こっており、判断エラーの原因も不注意に分類されるものであるといえる。

このように考えると、認知エラーのために必要なモデルは、見通し不良を表現するための運転者の視野・視界に関する情報を扱うモデルと、運転者の注意の分散を扱うモデルが必要であることがわかる。

2.3 認知心理学

2.3.1 運転と視覚

運転者の視覚情報の取り込み方と安全性について、認知心理学的な観点から考える。運転時には得られる情報のうち 90% が視覚情報であるといわれている[16]。ゆえに視覚認知の方法によって走行状況がどのように変化するのかに焦点をあてる必要がある。

わが国の交通事故のうち、約 60% が交差点内、および交差点付近で発生している、その中でも問題になるのは市街地の混雑した交差点である。集中して見えていても、こうした交差点では発見遅れや見落としが起こる。この問題には有効視野と眼球運動の限界が密接に関係している。

2.3.2 中心視野と周辺視野

外界の様子が投影される網膜のうち、解像度が高く細部までよく見る事の出来る部分は一部分に限られる。視力検査で測定する視力に近い解像度で見られる範囲は網膜の中心に限られる。網膜の中心とは注視点のまわり2度(これは1 m先での直径約3.5cm、10m先での直径約35cmの範囲)に過ぎない。この解像度の高い部分で見る事を中心視という(図 2-12)。網膜の中心から10° 離れるだけで、視力は中心視の20%も低下する。ゆえに眼球運動による注視点の移動が必要となる。この事はある一部分に注視点を固定したままにすると確認する事が出来る。しかし中心視している部分だけが認知に関わるわけではない、周辺視野の中で認知に關与する部分を有効視野という。これは中心視するのと同時に認知できる範囲であり、注視点の周りで比較的明確に意識される範囲である。

本稿ではこの有効視野の部分を中心視野、認知にほとんど關与されないが眼球運動に關与する部分を周辺視野として扱う。

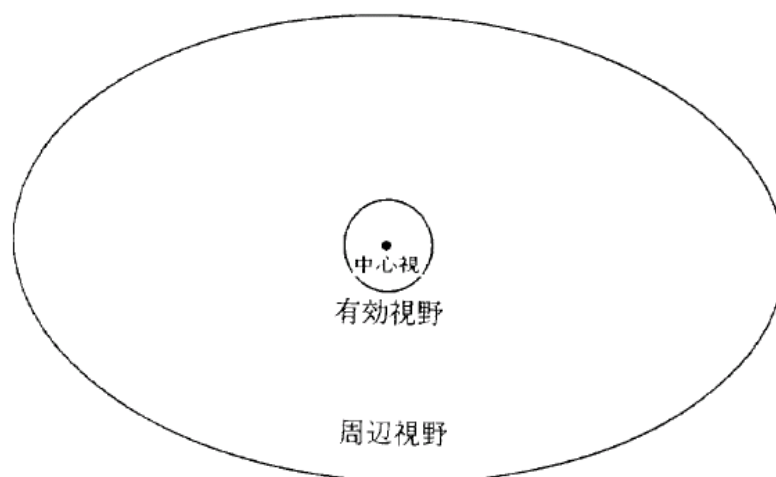


図 2-12 視野の模式図

2.3.3 中心視野と周辺視野に関する関連研究

中心視野と周辺視野の差は視力などで表される空間分解能の違いだけではない。色覚特性に関しても中心視野と周辺視野の性能には差がある。例えば周辺視野は2色性色覚異常特性を持ち、ある波長の赤色光と緑色光を区別できない[17]。一方臨界融合周波数の時間分解能、つまり移動する対象や点滅する光のように時間的に変化するものに対しては周辺視野の方が識別能力は高い[18]。また、色覚特性についても強い背景光と高輝度刺激においては中心視野と周辺視野はほぼ同じ性能を発揮する事が出来る。[19]

また周辺視野角の大きさに関しても、視覚的課題条件が多い状況では周辺視パフォーマンスの低下や有効視野での処理の深さと広さの相反関係—トレード・オフがあるといった研究結果[20]があり。周辺視野角は状況次第で大きさを変え、その性能も違う事が分かっている。

以上の点も踏まえつつ、本研究では中心視野は認知の為、周辺視野は視点移動の為に用いる。より詳細な視野のモデルを考える場合、こういった事を考慮していく必要がある。

2.3.4 眼球運動による注視点移動

注視点は眼球が運動する事によって移動する。眼球運動に注目すると、固視微動、随従運動、跳躍運動（サッカード）の3つに大別する事が出来る。

固視微動

一点を凝視しているとき、目は完全に止まっているように見えるが、実際には図 2-13 に示すようにたえず細かく動いている。これらの動きを固視微動と呼び、固視微動にはフリック（flick）やトレマー（tremor）、ドリフト（drift）と呼ばれる成分が含まれる。ドリフトは、小さな滑らかな動き、トレマーは非常に小さな高周波の振動、フリックは小さな跳ぶような動きで、跳躍運動（サッカード）を小さくした動きとして マイクロサッカードとも呼ばれている。固視微動は単なるノイズではなく、空間上に浮かんでいる眼球の方向を一定に保つための動きや、網膜像を鮮明に保つための動きと考えられている。フリックは神経のインパルスを反映しているとも考えられ、脳内の視覚情報処理機構を考える上で、見過ごすことのできない眼球運動である。

随従運動

随従運動は、運動画像など動く視対象を追従する際のみに生じる動きで、最高速度は瞬間的に 30 度／秒に達するが普通は 15 度／秒程度といわれている。

跳躍運動

跳躍運動（saccade, サッカード）は、跳ぶような速い動きで、動いている画像を追従しているとき、画像が速すぎて追従できないときや、動きを予測しているとき生じる。また、跳躍運動は、本を読んでいるときや静止画を観察しているときに、注目している視対象を移動する際にも生じ、最高速度は 600 度／秒に及ぶといわれている[19]。眼球を 1 回転しても 360 度であることを考えると、その速さが理解できる。

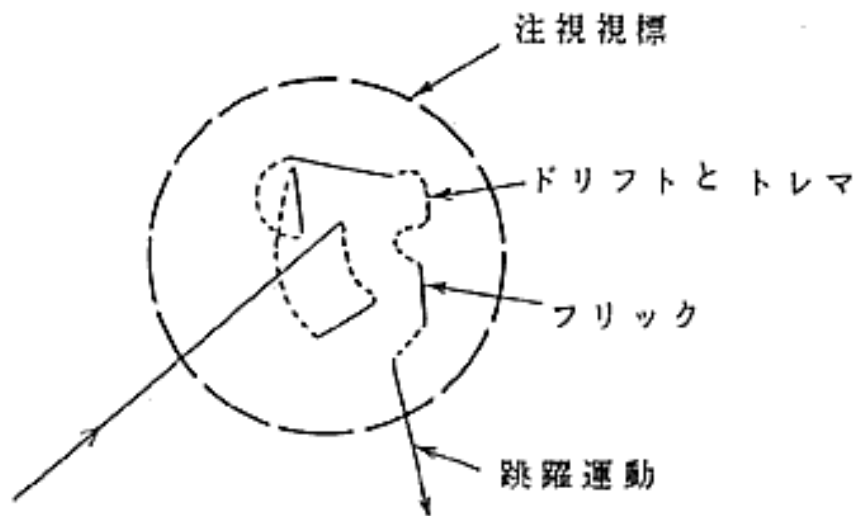


図 2-13 一点を注視している時の視点の動き

これらの3つの眼球運動は全て運転時にも行われる。信号や標識や車等、新しい注意対象物出現したものに気付いた場合の視線の動きは随従運動による視線動作と言える。視覚入力周辺視野によって決定される動作で、視野内の色や動きや形といった特徴のある部分に注視点を移動させ、そこを観測する。

それに対し、右左折時や信号の変わり目など注意を向けるべき対象を見る前から意識的に注視点を移動させていく能動的な視線動作を跳躍運動によって行う。ハンドル操作角の決定のために、路肩やセンターラインの位置など道路の形状情報を得る視線動を行ったり、ルームミラーに対して視線を移したりするものもこれにあたる。

そして2つの眼球運動の結果、注視点が対象を捉えてから識別するまでに固視微動が行われる。これらの眼球運動を正確にシミュレータでモデリングする事が人間の視覚動作を正確にする事につながる。

2.3.5 眼球運動の関連研究

大脳皮質における視覚情報処理の経路は大まかに新視覚路と旧視覚路の 2 つの経路がある[22][23]。新視覚路は受容した情報の特徴抽出や分析など主にパターン視に関わり、旧視覚路は系統発生的に古く、視対象の視野内での位置変化や注視反応など、視覚情報の処理としては間接的に関与する経路といわれている。眼球運動に直接関連する場所としては、サッカードについては比較的よく分かっており、特に目的を持って眼球を駆動する際には（視覚誘導性サッカード）、線条体というところにある尾状核や被核から大脳基底核にある黒質が強い抑制を受け、その結果、黒質の上丘への抑制が弱まり、サッカードが生じることが知られている[24]。固視微動は後頭葉に関連することが示唆されているが、他の眼球運動とともにあまり分かっていない。以上に述べたことは神経生理学や神経心理学の成果として得られたものだが、画像処理装置の電気回路の様に個々の特性やブロック間のタイミングまで細かく分かっているわけではない。我々の立場は、現在分かっている眼球運動の特徴を導入して運転時の、工学的に役に立つシステムの提案に結びつけようというものである。未知の領域における視覚認知動作の解明を行う事が目的ではない。

2.4 本研究の位置づけ

ここまで、3分野の背景について述べてきたが、本研究はマイクロシミュレータより更に詳細なドライバーモデルを用いる事で新規性を持ち、交通事故においてこれまで発見する事の出来なかったリスクを評価する有用性を持つ。

その際に用いられる認知心理学的な手法については既往研究で解明している有効視野と眼球運動の特徴を導入し、妥当性を明確にする。

3 シミュレータの計算内容

3.1 事故再現シミュレータの満たすべき要件

人間の運転動作は認知・判断・操作に分ける事が出来る。ドライバーモデルの詳細化を目的としたミクロシミュレータにおいてもこの3つの動作の分類が曖昧である事が多い。3フェーズに分かれていても、認知はどの車も漏れなく情報を獲得可能であったり、操作において速度が40kmからブレーキを踏むと次のステップで速度が0kmになってしまったり事故を再現するには単純なモデリングをしてしまったものが多かった。事故とは複雑な運転挙動があってはじめて成り立つものであり、認知・判断・操作それぞれのフェーズでのモデリングを詳細に行い、その上でエラーを導入する事で現実在即した事故を起こす事が出来る。

特に従来のミクロシミュレータは全ての車が任意の他車の位置座標を取得することができ、認知モデルを簡略化してしまっていた。しかし本シミュレータでは視覚による認知を行い、図 3-1 の様に認知された車に対してのみ判断を行い、エージェントが危険と判断した場合のみ減速を行う。以上の様に認知判断できる車を視野モデルで限定することにより、それぞれの認知のエラーが加速度操作ミスにつながり事故が生じる。

図 3-1 において車と道路環境描画から、速度操作までが1ステップとなっている。道路環境描画がなされた後、運転画面から情報取得+他車を認知したかまでが認知動作、現速度で危険かが判断動作、加減速が操作となる。運転動作はこれで全てではなく、例えば操作として右左折時にハンドルを切り減速を行う動作なども実装している。車エージェントの挙動については3.4にて説明する。

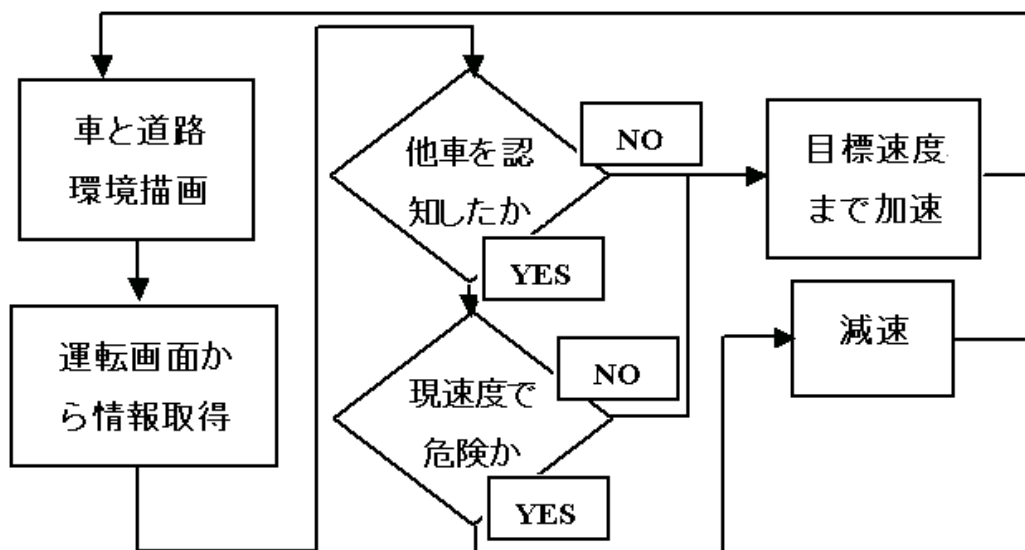


図 3-1 認知・判断・操作を考慮した運転モデル

認知と判断の具体的なドライバーモデルのイメージを示したものが図 3-2 である。図 3-2 において認知モデルにおいては緑色の車に近い 2 台の赤色の車は認知され判断モデルが適用されるが、塀の死角となる青色の車と車の死角となる紫の車は認知されず見えるまで判断モデルが適用されない。判断モデルとはこのままの速度で走行した場合に衝突してしまう場合に減速動作を行うというのが土台となっており、左側の 2 台は距離としては近いが衝突軌道にはない為減速は行わず、右側の 2 台は数ステップ後に衝突する為減速動作を行う。操作モデルについては、直前に気付いても減速し切れず衝突してしまう事故を再現するため、加減速制御を用いている。

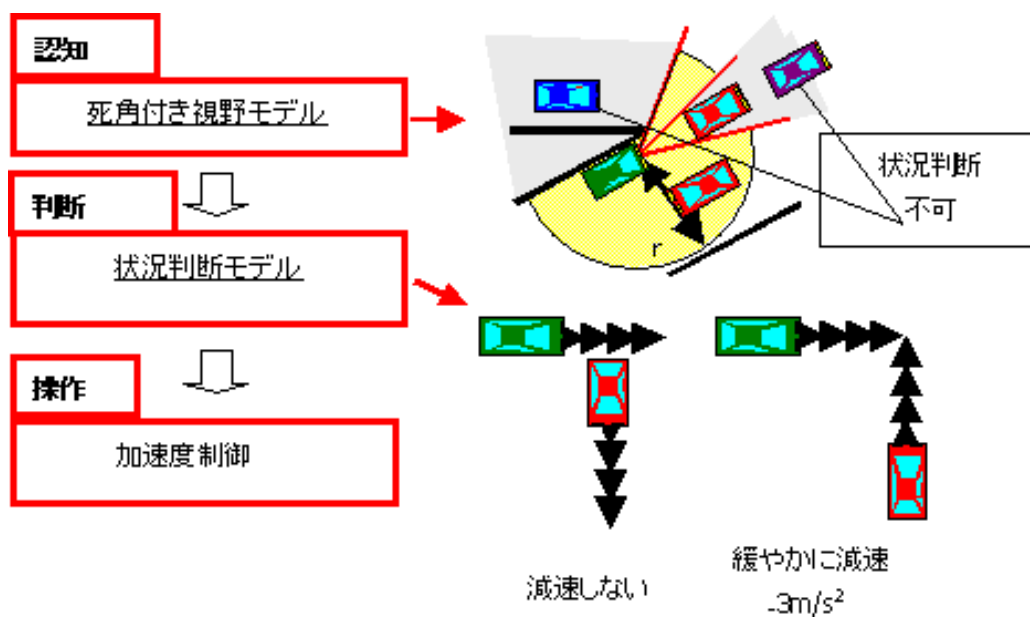


図 3-2 死角付き視野モデル(2次元幾何学的モデル)での計算の流れ。

認知における視野モデルは本研究において重点的に扱っており、4章から6章まで3段階に分け説明している。4章においては図 3-2 のように上空から見て車の位置関係から死角か否かを決定する2次元幾何学的モデル、5章においては車から見える映像を再現し見える車に対して判断を行う画像処理モデル、6章において車から見える映像の中で人間の視点の動きを再現し認知対象を決定していく注視点モデル実装した。

判断・操作モデルについては4章から6章で同じものを用いており。以下で初期設定の読み込みや結果データの取り扱い方も含め認知以外の計算手法を説明する。

3.2 シミュレータ全体の計算の流れ

シミュレータの計算の流れは図 3-3 のようになる。車や道路のデータを読み取り、ドライバー視点や上空視点など様々な視点からの映像を再現

する為に複数の窓を作成する所までが初期設定となる。

2 段目のように初期データを元に車と道路環境を窓の中に描画し、描画した画面から情報を取得し、取得した情報を元に運転動作を行い、運転動作によって変化した車の位置や周辺環境を描画するという繰り返しが主な計算内容である。この繰り返し部分において全ての車エージェントは図 3-1 の様に認知・判断・操作の挙動を行い、それを何ステップも繰り返す事で実際の交通状況をモデリングしたものを再現する。

繰り返し計算を行う中で事故が生じた場合に事故が起こるまでに車が認知出来た車の台数や走行 k m のデータを出力する。また本シミュレータにおいてどのような状況において事故が起こるか再現するデモ画面作成の為、ドライバー視点の画像も毎ステップ取得する。

以下 3.3 から 3.5 において全体の計算を初期設定・車エージェントの挙動・結果の掃き出しという 3 つの部分に分け、それぞれの計算手法を詳しく説明する。

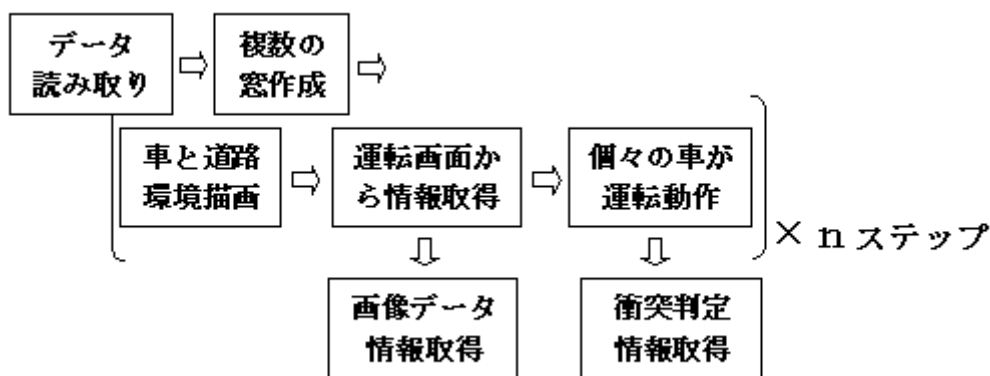


図 3-3 全体の流れ

3.3 初期設定

図 3-4 は図 3-3 のうち初期設定にあたる部分を抜き出したものである。本項では入力データの書式や計算を開始する前に作成する窓の形式について説明を行う。

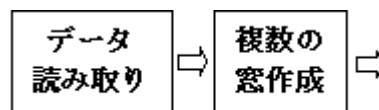


図 3-4 初期設定

3.3.1 データ読み取り

計算の前に車の初期データと道路形状データを読み取る。

車は表 3-1 の様に 8 種の変数を持っており、シミュレーション開始時の初期配置、または時間経過による車両流入の際に変数が定義され車が生成される。ID によって車を識別し、現在のレーンとレーンでの位置によって車の位置が決定する。認知値と認知後経過時間は認知モデルごとに扱いが異なるが、車体の色と含め認知方法に関わる部分なので後述する。

車の持つ変数	説明
ID	自動車の ID
現在のレーン	現在いるレーン
次のレーン	次に進むべきレーン
現在のレーンでの位置	レーン開始地点から何 m の位置にいるか
現在の速度	現在の速度 (m/sec)
車体の色	RGB それぞれに 0～255 の整数値を持つ
認知値	道路上に存在する各車に対してそれぞれ値を持つ、認知値が閾値を超えると認知状態となる。
認知後経過時間	認知状態になり一定時間経過すると認知が解かれ、認知値が 0 となる。

表 3-1 車の持つ変数

次にノードとリンクを読み取る。ノードはレーンの切れ目の x 座標、y 座標を表し、ID・x 座標・y 座標を値として持つ。リンクが 2 つのノードを繋ぎ自動車の走行するレーンを生成する。リンクは表 3-2 のような変数を持つ。

変数の種類	説明
ID	リンクを識別
始点のノード	始点ノードの ID
終点のノード	終点ノードの ID
直進か左折か右折か	直進 0・左折-1・右折 1

表 3-2 リンクの持つ変数

視点の動きを滑らかにし、車の挙動を実際のものにより近づける為に右左折のレーンは円弧を用いて近似した。これまでの直線の近似の場合、ドライバーの視野を再現した場合に不自然になる。そこでリンクの変数に直進か右折か左折かの値を持たせ生成時に曲線道路を区別させた。

具体的には交差点は図 3-5 のようになる。図を見ると右左折レーンの軌道が曲線になっている事が分かる。



図 3-5 交差点レーンの形状

完成した形状はデモ用と計算用に周遊型とランダム発生型が存在する。ランダム発生型は感度解析とシミュレータの応用例(以下計算とする)で利用する型であり第7章で後述する。周遊型は画像処理モデルと注視点移動モデルの事故を再現するデモを示す際に用いた。1台の車の視野を長時間表示する事が可能であり、事故を再現した際のデモムービーを作成する時に有効である。図 3-6 の様に交差点間の距離は 200m で白い線がレーン、茶色い正方形が壁を表しており、中央に一つ交差点があり、この部分で発生する事故をデモとして使用する。

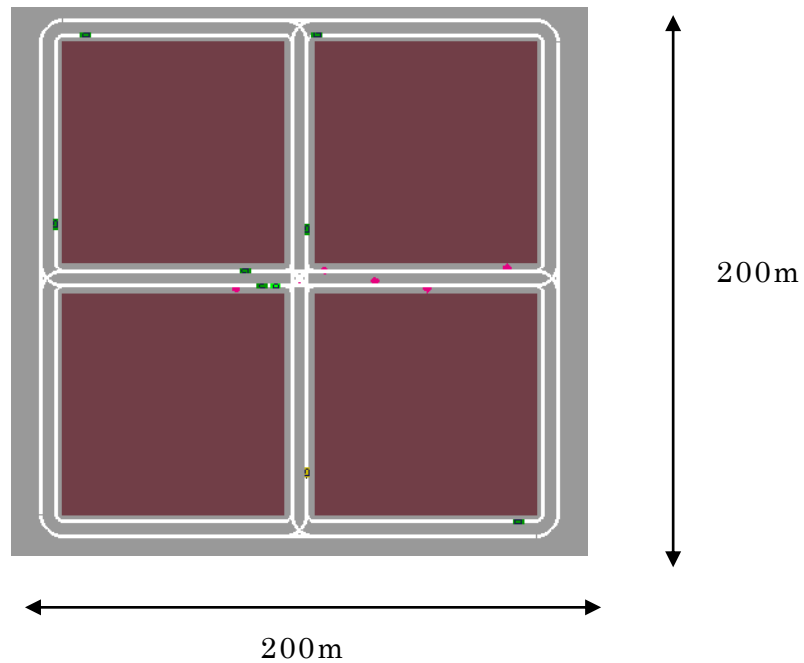


図 3-6 周遊型の道路形状

3.3.2 窓作成

窓とは計算の前にシミュレータの上空から見た映像や個々の自動車の運転画面を表す為に作成するウインドウの事を指す。4章のモデルでは窓は上空から見た映像のみ、5章と6章では1台の自動車の運転画面(これをデモ用と呼ぶ)、7章と8章では全自動車の運転画面用の窓(これを計算用と呼ぶ)を作成する。

デモ用に1台の車の画面を大きくする場合は図 3-7 の様にメインを横 1260 ピクセル×縦 726 ピクセルにする。計算機のディスプレイの横一杯が 1260 ピクセルであり、縦横比について人間の視野範囲とも関わる部分でありで後述する。

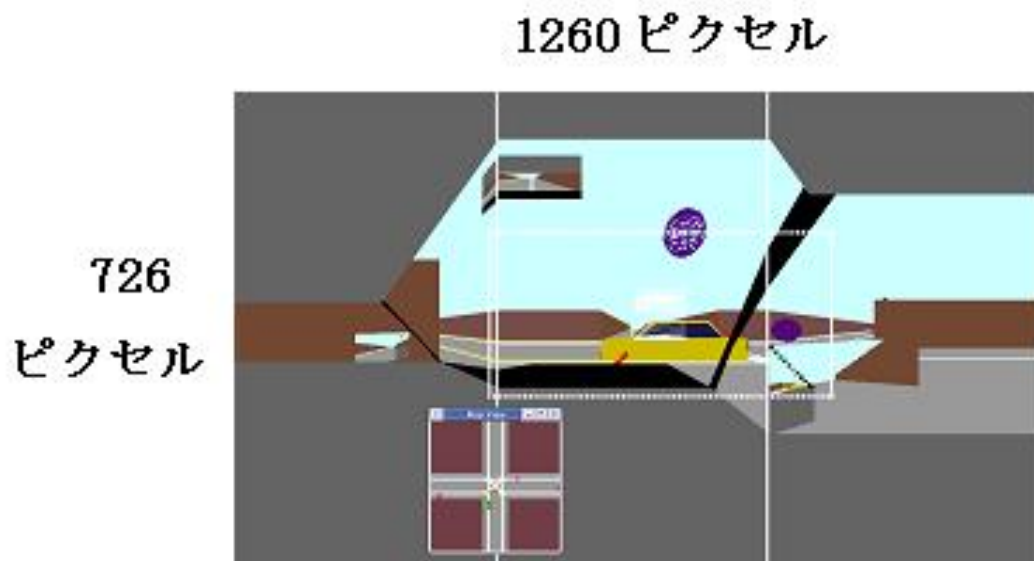


図 3-7 デモ用ウインドウモデル

実験による計算結果を求める場合は地図上に存在する全ての車の視野を再現し、それぞれが判断を行う必要がある為、図 3-8 の様に車の台数分の窓が必要となる。横 315 ピクセル×縦 180 ピクセルを一つの窓とすると横に 4 つ×縦に 5 つを並べられる。小さすぎると認知の判定に影響が生じると考えられるが、この大きさにおいては車の認知に関して問題とならないと考えられる。

計算用の窓に車台数×4 + 上空から見た映像用の窓を作成する。1 台あたり 4 つの窓が存在するのは 1 つのルームミラーと 2 つのサイドミラーに用いる為である。運転画面とは別にミラーに写る部分の映像を描画し、運転画面においてミラーの位置に貼り付ける事でミラーを再現する。図 3-8 では 20 個の窓と重なって 1 つの上空図の窓を確認出来るが、実際は 41 個の窓が存在する事になる。20 個の窓の内、11 個の色が変化している事が分かるが 11 台の車が動いている事を表している。残り 9 個のウインドウも車の増減に対応して動作を行う。

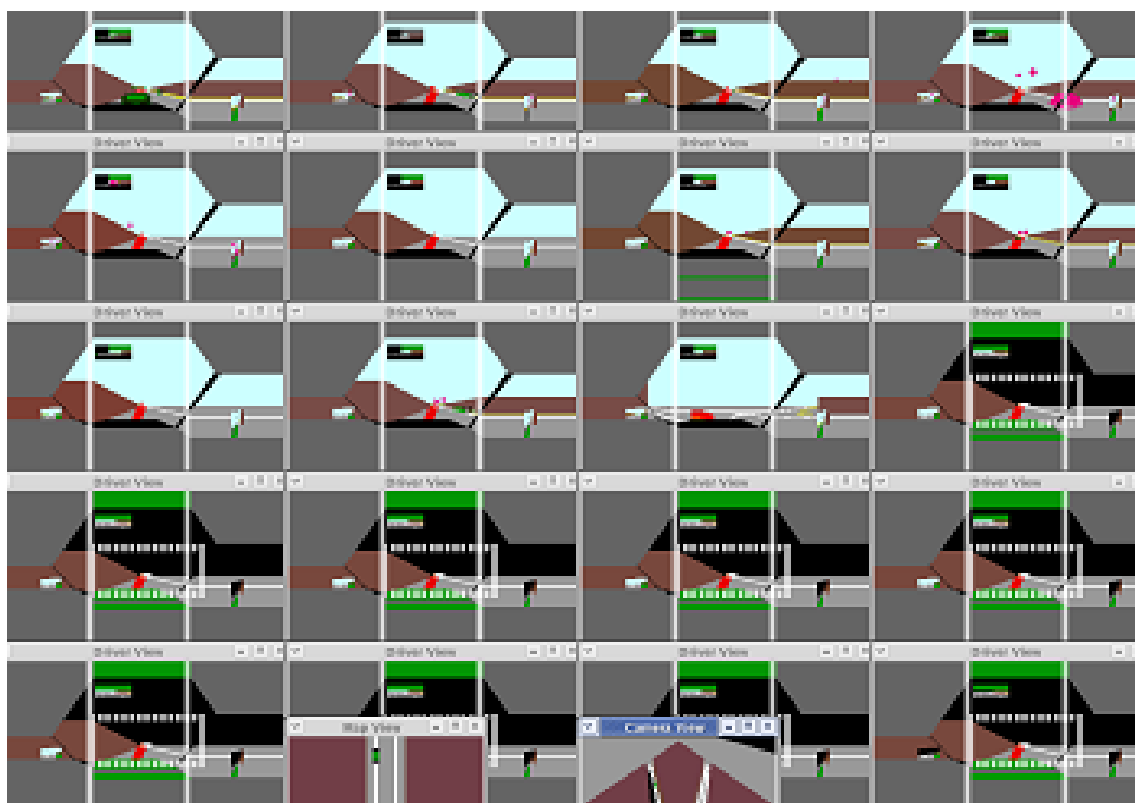


図 3-8 計算用マルチウィンドウモデル

3.4 車エージェントの挙動

図 3-9 は図 3-3 のうち主となる計算部分を抜き出したもので、1 タイムステップ中に行われる動作を表したものである。車と道路環境を描画した後、車エージェントが認知・判断・操作を行い道路の状況を変化させる。先述の通り認知は4章～6章で詳しく述べる為、本項では判断・操作部分にあたる個々の車の運転動作方法について述べる。

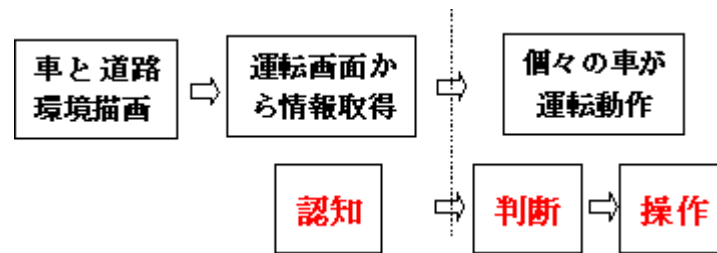


図 3-9 車エージェントの挙動

3.4.1 危険判断

人間の運転動作において加減速を決定する判断の指標としては、先行車両との車間距離を相対速度で除した **TTC(Time-To-Collision)**が使用されていると言われている。**TTC** とは式(1)で示され、お互いの車がそのままの速度で走行した場合、何秒で衝突するのかを表し、**TTC** が小さい場合に後方の車両は減速を行い、**TTC** が大きい場合や相対速度がマイナスでお互いが離れていく場合に車両は法定速度まで加速を行う。

$$TTC = L / V_r \cdots (1)$$

L = 2 車間の距離(m)

V_r = 相対速度(m/s)

TTC は同じレーンを走っている車両同士の加減速の判断として特に有用であるが交差点における加減速動作にも応用可能である。本研究では **TTC** の考え方を応用して危険判断のモデルを作成した。



図 3-10 危険判断のモデル

図 3-10 のように緑の車と赤い車は相対速度のまま進んでも危険ではないが、次のレーンで赤が曲がる為、数ステップ後に危険な状態が生じる。このように将来の通り得るレーンを考慮する事で危険判断を行う。

個々の車は周囲の挙動から判断、数秒以内に衝突する場合は減速。現在の速度で現在いるレーン上を進み終点まで着いたら、次のレーンに移って進む。0～4 秒後まで 0.1 ステップごとに 2 台の距離をとって 0.8m 以内になってしまう事があれば緩やかな減速の必要があると判断し、0～1 秒後までに 0.1 ステップごとに 2 台の距離をとって 0.8m 以内になってしまう事があれば衝突の危険があるとして急ブレーキによる減速を行う。4 秒前に衝突の危険があると分かっていたら 1 秒前までには緩やかな減速で安全な速度で走行可能な為、急ブレーキを用いるのは必然的に認知遅れの場合に限られる。

3.4.2 右左折減速

右左折時 10m 手前から減速し、右左折中は上限 6m/s で走行する。

3.4.3 優先度判断

危険判断モデルのみで加減速操作を行うと、危険判断を 2 台とも行い 2 台とも止まってしまう状況が存在する。それに対処するため、例えば ID

で優先順を決定すると直線で抜いてしまう為、優先度を明確に考慮する必要がある。直線側が最優先、左折が右折を優先という優先度をつけて走行する。

3.4.4 空走・制動距離

停止するまでに空走距離と制動距離の分、車は進む。空走距離とは人間の反応時間に起因しており、危険を察知してから操作するまでのタイムギャップとして現れる。また、制動距離とはタイヤの摩擦力からタイヤを完全にロックしてから速度が 0 になるまでに動く距離のことを指す。これらを実装することで止まりきれず事故が起こる様子を再現できる。空走距離と制動距離は以下の式で表される。

$$\text{空走距離} = \text{反応時間} \times \text{車の速度} \cdots (2)$$

予測反応時間は約 0.75 秒、驚愕反応時間は約 1.5 秒とされている [25]。本研究では反応時間の値として驚愕反応時間を採用した。

$$\text{制動距離} = \text{時速の2乗} / 254 \times \text{摩擦係数} \cdots (3)$$

表 3-3 制動距離に用いる摩擦係数のように摩擦係数は標準的なアスファルトにおいて 0.7 とされている。路面凍結時などは摩擦係数の値は小さくなる。シミュレータ内においては急ブレーキ時の減速度に関わる。

路面の種類	摩擦係数
乾いたアスファルトまたはコンクリート	0.7
ぬれたコンクリート	0.5
ぬれたアスファルト	0.45～0.6
砂利道路	0.55
乾いた非舗装道路	0.65
ぬれた非舗装道路	0.4～0.5
固くなった雪	0.15
氷	0.07

表 3-3 制動距離に用いる摩擦係数

「江守一郎、新版自動車事故工学、技術書院平成5年5月発行、45頁」

3.4.5 速度更新

加速度制御を行っているので速度の更新をまず行う危険判断により加減速の度合が決定する。1 タイムステップを DT とすると式(4)のように表す事が出来る。

$$v=v+a*DT \cdots (4)$$

基本加減速： $a=\pm 3\text{m/s}^2$

危険判断において緩やかに減速する必要が生じた場合・もしくは減速する必要がない状態で目標速度より現在速度が小さい場合は基本か原則による減速を行う。目標速度は $11\text{m/s}=40\text{km/h}$ とする。 3m/s^2 とはACC(Adaptive Cruise Control)という自動車の自動運転における加減速の指標になっている値で、これを超えると快適性を損なう。

減速の最大値： $a=-7\text{m/s}^2$ 危険判断において、急ブレーキの必要が生じた場合は減速の最大値を用いた減速を行う。最大値の求め方は式(5)のよ

うになる。摩擦係数に関しては表 3-3 の乾いたアスファルトでの値を用いた。摩擦を変化させる事によって雨や積雪等の天候状況や道路状態における自動車の挙動も再現する事が可能である。

制動の減速度＝摩擦係数(乾いたアスファルトで 0.7)×9.8≒7 . . . (5)

3.4.6 位置更新

現在のレーン上でどの位置にいるかの情報が更新される、ただし右左折中は四分円軌道を曲がる様になっているので右回りの場合。

- ・ 円の中心(x_0, y_0)
- ・ 右左折の視点 (x_1, y_1)
- ・ レーン上で進んだ距離 l とレーンの長さ L

を用いて

$$\begin{aligned}x &= x_0 + (\cos(\pi/2 * l/L)) * (x_1 - x_0) - \sin(\pi/2 * l/L) * (y_1 - y_0) \\y &= y_0 + (\sin(\pi/2 * l/L)) * (x_1 - x_0) + \cos(\pi/2 * l/L) * (y_1 - y_0) \dots\dots (6)\end{aligned}$$

として座標を出す。左回りも同様に考える。

3.4.7 レーン更新

レーン上で進んだ距離 l がレーンの長さ L を超えた場合現在レーンが次のレーンに移り、次のレーンが次の次のレーンに移る。交差点等で次の次のレーンが複数存在する場合は等確率でランダムに決定される。

3.5 結果の掃き出し

3.5.1 画像データ保存

毎ステップごとに、運転画面や上空から見た画面をファイルに書き出させる。運転手の視界内に入った画像のみの抽出や、認知出来た自動車のみを表示する事も可能。

3.5.2 衝突判定

事故により車と車が衝突した場合は計算を終了し、アウトプットファイルに表 3-4 の値を書き出させる。

毎ステップごとに全ての車が衝突しているかどうかを識別する必要がある、長方形同士の接触判定ではなく計算効率を考慮して、車の中心同士の距離が 0.5m 未満になると衝突したと判定する。

種類	単位
衝突した位置の x 座標・y 座標	(m)
衝突時の 2 台の速度 x 成分・y 成分	(m/s)
シミュレーション開始からの時間	(s)
全ての車が走行した距離の総和	(台×秒)
1 台あたりが認知出来た車の台数	(台)

表 3-4 衝突時に取得する結果の値

3.6 数値データ

3.6.1 車のサイズ

車のサイズは全て表 3-5 の値を用いており、表の値に関してはトヨタ・カローラ 日本国外仕様 E140/150 型の車高 1,490mm 車幅 1,760mm 車長 4,540mm を参考にした。

種類	サイズ
車高	1.5m
車幅	1.7m
車長	4.5m

表 3-5 車のサイズ

3.6.2 道のサイズ

建築基準法によると4 m未満だとみなし道路として、正式な道路扱いがなされない以外は特に規定がない。道路統計年報[26]の幅員別延長比率(図 3-11)を参考に一車線あたり6 mとした。

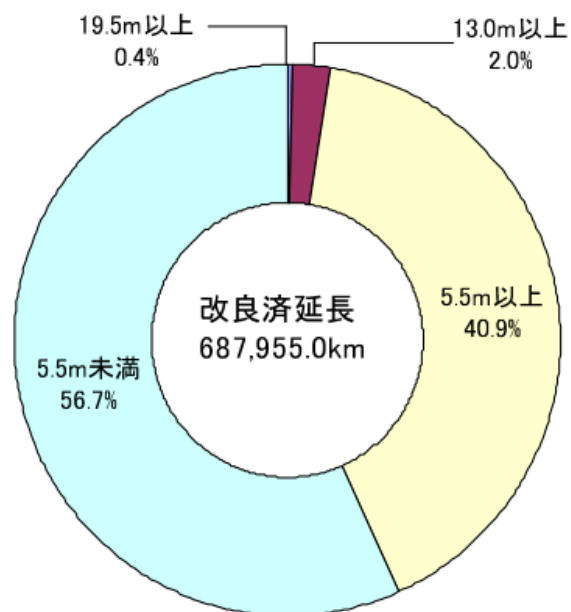


図 3-11 改良済車両幅員別延長比率

3.6.3 塀のサイズ

建築基準法によるとブロック塀の高さは 2.2m 以下である事が必要である。そこで塀の高さを 2 m とした(図 3-12)。

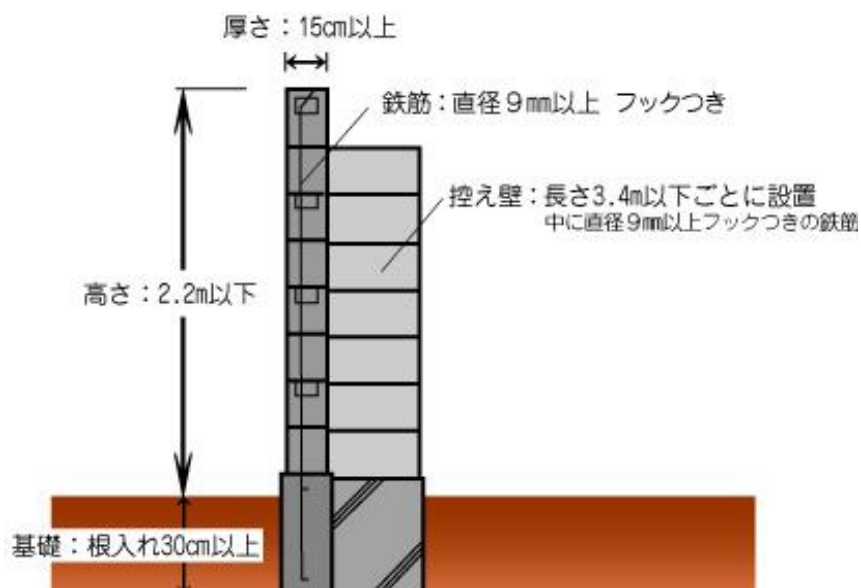


図 3-12 建築基準法におけるブロック塀の規制

3.6.4 信号のサイズ

日本信号製の薄型 LED 信号機の横幅が 1250mm である事から信号のライト一つの半径を 190mm とした $1250 - 190 \times 2 \times 3 = 170\text{mm}$ が余白となる、縦の高さは 41mm。高さは道路状況によって異なるので今回は 3.6 m の位置に信号を設置した。信号の認知も行う事が出来るが、信号の無い道路の視覚による判断動作を重視したかった為、本研究では信号は描画したが利用しなかった。

3.6.5 その他のサイズ

シートの高さ、ドライバーの座高(視点の高さ)、ボンネットの広さなど、視点の位置や視野の範囲に関わる部分のサイズについては 6 章で後述する。

4 2次元幾何学的モデル

4.1 計算内容

従来のシミュレータが用いてきたモデルを2次元幾何学的モデルと名付け、このモデルを用いたシミュレータをまず作成する。建物や車両の死角の再現に際して車同士を結んだ直線が壁と接触しているかで判定を行う。

4.1.1 視野・死角による認知可能範囲の作成

視野内にも関わらず建物や車の陰になって見えない場合を考慮し、図4-1の様に可視範囲を設定した。緑の車の可視範囲は赤い網状で表された部分であり、車と建物により死角が出来ているのが分かる。また陰になっていなくても半径20mの範囲しか見る事が出来ない。

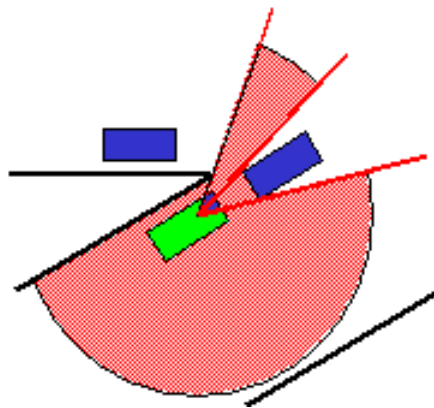


図 4-1 死角の再現

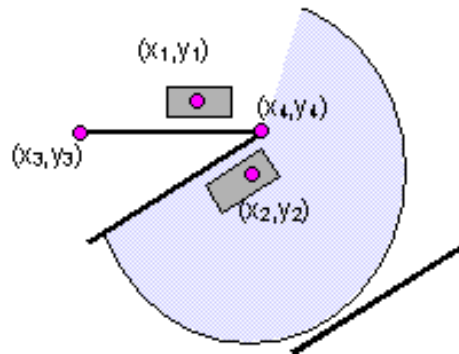


図 4-2 視覚の可視判定用座標

図 4-2 の様に 2 台の車の位置座標と道路の端点の座標を取り、

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_2 - x_1 & \Delta y &= y_2 - y_1 \\ \Delta x_2 &= x_4 - x_3 & \Delta y_2 &= y_4 - y_3\end{aligned}\quad (7)$$

とおくと、式(8)の範囲において、2 台の車を結んだ線分と道路の端点を結んだ線分に交点が存在する事になる。車と車の間に障害物が存在し、車はお互いを認知出来ない。

$$\begin{aligned}0 < \frac{\Delta y(x_3 - x_2) - \Delta x(y_3 - y_2)}{\Delta x_2 \Delta y - \Delta y_2 \Delta x} < 1 \\ 0 < \frac{\Delta y_2(x_3 - x_2) - \Delta x_2(y_3 - y_2)}{\Delta x \Delta y_2 - \Delta y \Delta x_2} < 1 \quad \dots (8)\end{aligned}$$

4.2 簡易モデルの実装

ここまで用意した運転モデルを用いて、事故の実装と ITS による事故の回避の簡易シミュレーションを行う。

図 4-3 で示す様な道幅 6 m で道沿いに建物が並び、見通しの悪い直角三叉路を用意する。2 方向から自動車を時速 40 km で走らせ、2 台の初期位置は交差点からそれぞれ 30m とする。そのまま走行させ、出会い頭事故を実装する。見通しの悪い交差点に一時停止せず進入する事になり、壁の影響で危険判断モデルが働かず事故が発生する可能性が生じる。

それに加えて、図 4-3 のように ITS 技術の一つであるカメラの映像情報を一方の車に受け取らせ、視野を補完するモデルを考える。路上カメラ自身にも可視範囲を持たせ、青色の車はカメラの可視範囲と自分の可視範囲のどちらかに緑の車が存在すれば認知する事が出来る。

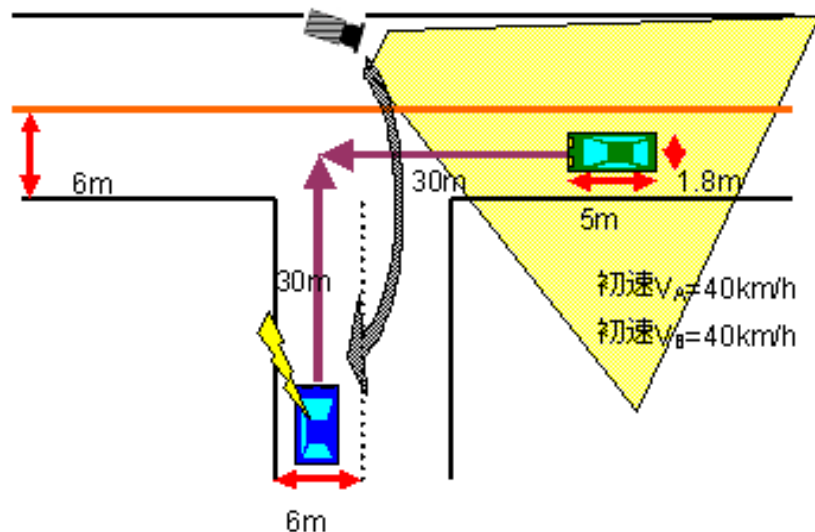


図 4-3 見通しの悪い交差点と路上カメラの情報伝達

4.3 結果と考察

簡易モデルのシミュレーション結果は以下の図 4-4 から図 4-9 となる。1 ステップ 0.1 秒でシミュレーションを行ったが 0.6 秒おきの画像を掲載した。左側が ITS 無しの場合で、右側が同ステップにおける ITS による情報提供を行った場合の画像である。右側では黒い塔の先端のカメラから得た視野情報を青い車に送っている。

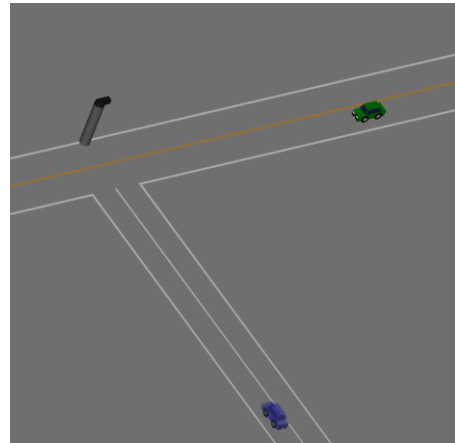
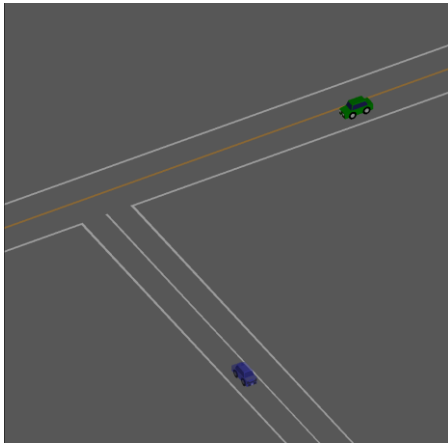


図 4-4 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供 1

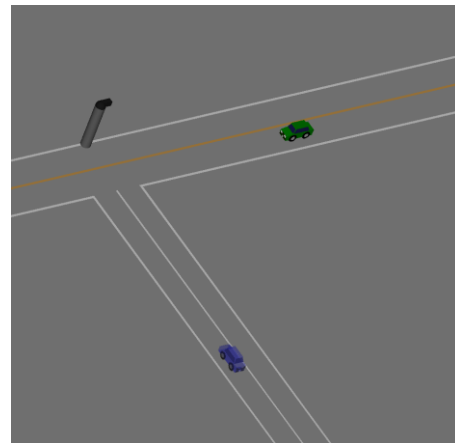
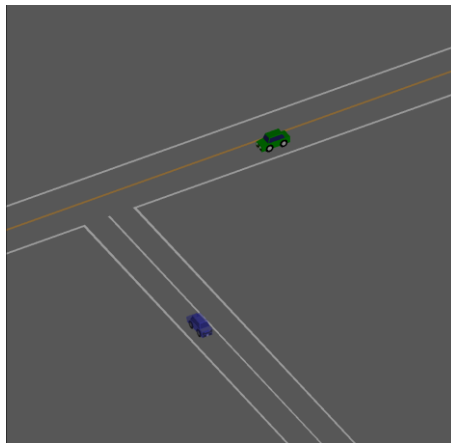


図 4-5 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供 2

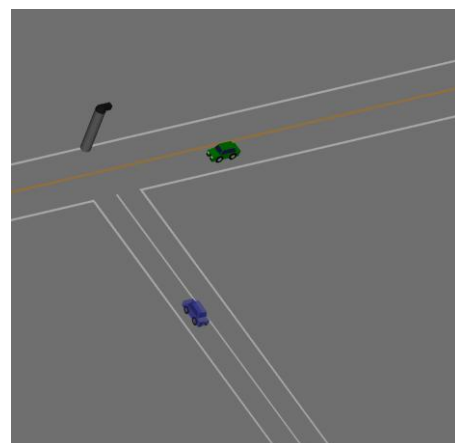


図 4-6 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供 3

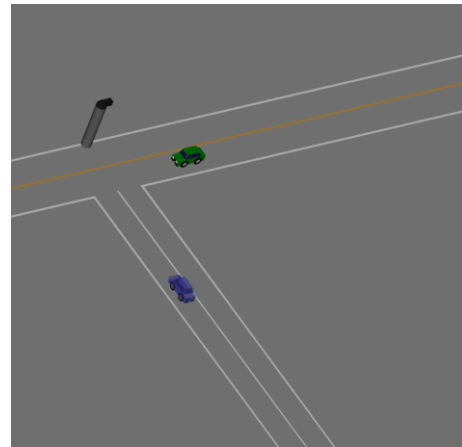
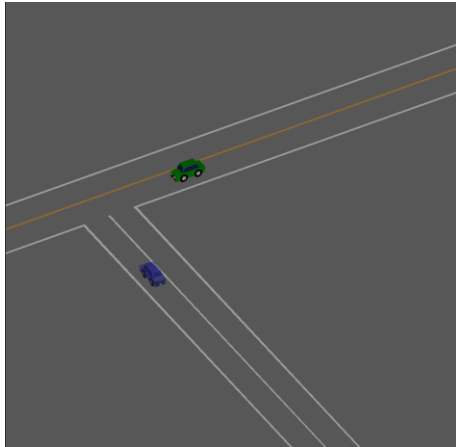


図 4-7 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供 4

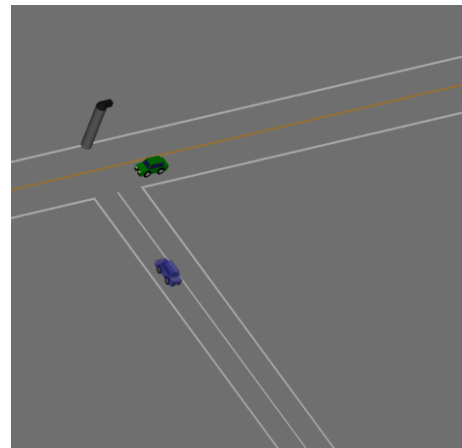
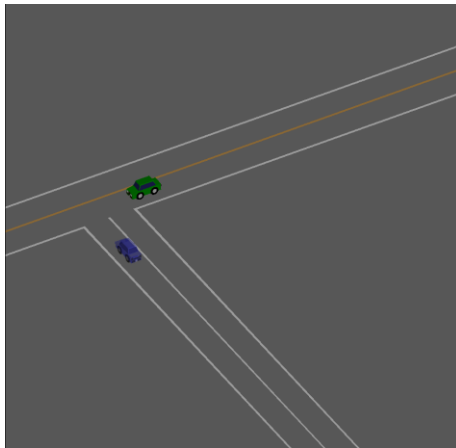


図 4-8 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供 5

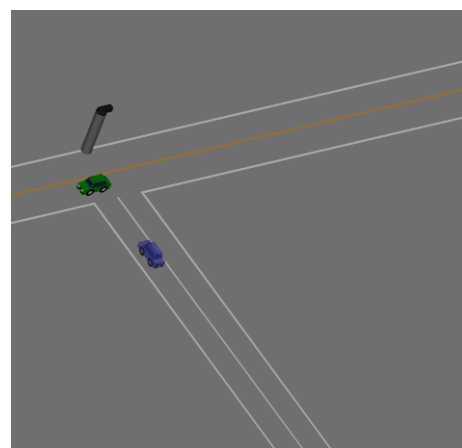


図 4-9 見通しの悪い交差点における死角と ITS による情報提供 6

そのまま走らせると道による死角で2台ともお互いを認知できない。
直前に認知しても、空走・制動距離の影響で止まり切れず衝突してしまう。
図 4-9 のように青い車にカメラの情報を付加すると、緑の車を認知し衝突を回避することができる。

以上の様に注意喚起から、視野補完を行って出会い頭事故を防ぐ試作品を作成した。

5 画像処理モデル

運転席からの景色を再現し状況判断を行う。2次元上で幾何学的な処理を行うだけでなく、画像処理から運転を行うモデルを作成することで、道路の勾配や車の高さ等の影響を考慮する事が可能になり、より効果的な視野による事故の評価ができる。

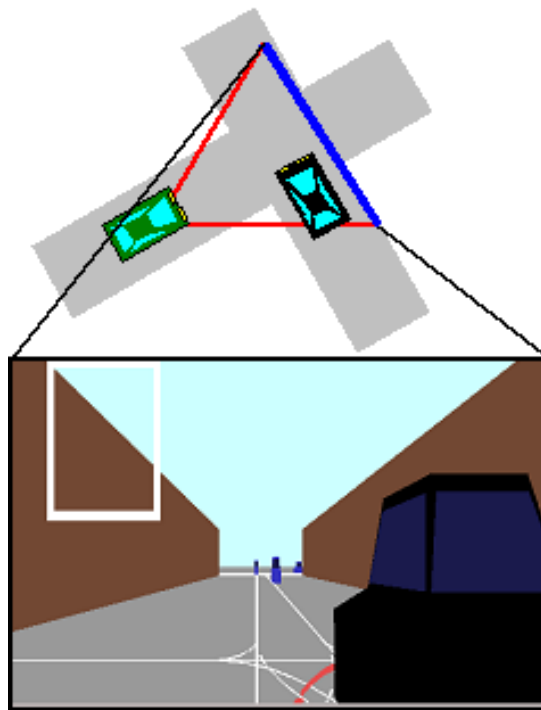


図 5-1 画像処理モデルにおける運転手の視野

図 5-1 は画像処理モデルにおける、ドライバー視野を示したものである。緑の車から見た2次元的な視野を上図で、緑の車から見える視界を下図のウィンドウで表示している。黒い車がどちらから見ても視界内に入っている状態である事が分かる。

5.1 計算内容

4 章で考慮した認知可能範囲を改良する。運転席からの景色を再現し、運転画面内に存在するものが認知可能範囲とする。その認知に基づいて状況判断を行う。

具体的にはドライバーから見える映像を再現し、映像内の 1 ピクセルごとの RGB 値を抽出してその中に車と同じ色があるかで認知を行う(図 5-2)。背景に車と全く同じ色がない状態にすれば、色だけで他車の確認動作を行える。自分の視野内に車が存在すると分かれば 3.4.1 の判断モデルを用いて加速度決定を行う。

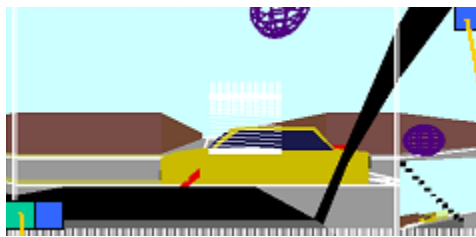


図 5-2 RGB を用いた認知動作の再現

視野内に存在するカラー情報は 0.1 秒ごとに取得し、imageByteArray という関数に格納する。1 ピクセルごとに $r \cdot g \cdot b$ の値がそれぞれ 0~255 までの整数で取得される。 $r \cdot g \cdot b$ の全ての値が一致する自動車は画面内に存在し、空走距離の項で考慮した反応時間 0.75 秒が経過すると認知状態となる。

5.2 勾配を考慮した事故の実装

車の走る道路に傾斜をつけることで、道路による死角が発生する。本

ケースでは高さ 30m 横幅 300m 傾斜 20% という急勾配の山道において、停車している車に時速 60km で車が近付き、道による死角で認知が遅れ事故が生じてしまうシチュエーションをあらわした。

図 5-3 は上記のシチュエーションを図示したもの山頂から高低差で 30m 低い位置から緑の車が発進し、山が陰となって黒い車を直前まで認知する事が出来ず止まりきれない状態を再現する。

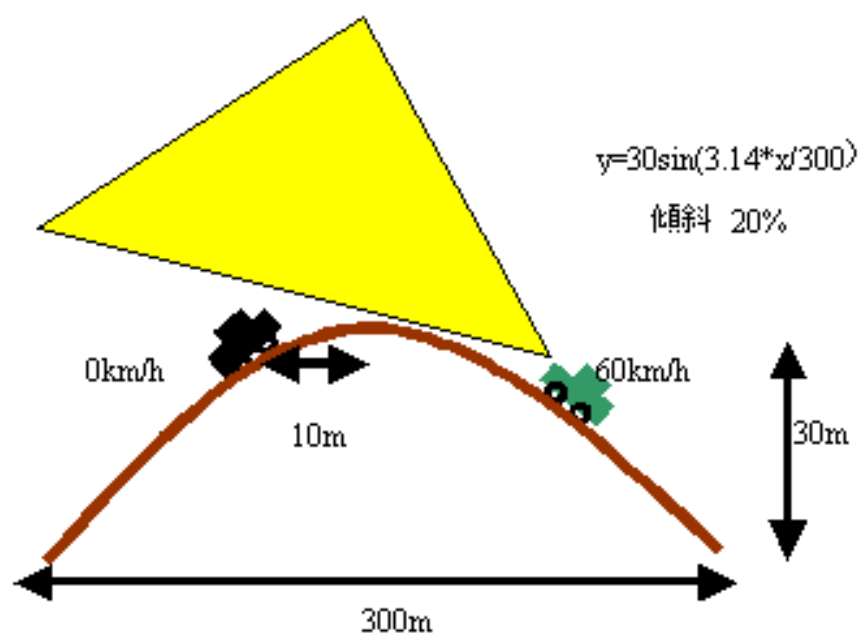


図 5-3 山道での事故

5.3 結果と考察

山道における事故を図 5-4 から図 5-12 のようにシミュレータ上で再現した。左側が緑色の車の視点を表し、右側が同時刻の 2 台の位置関係が分かる様に側面に視点を置いた画像である。シミュレーションは 1 タイムステップ 0.1 秒で行ったが、本稿には 1 秒間隔で 9 組掲載した。

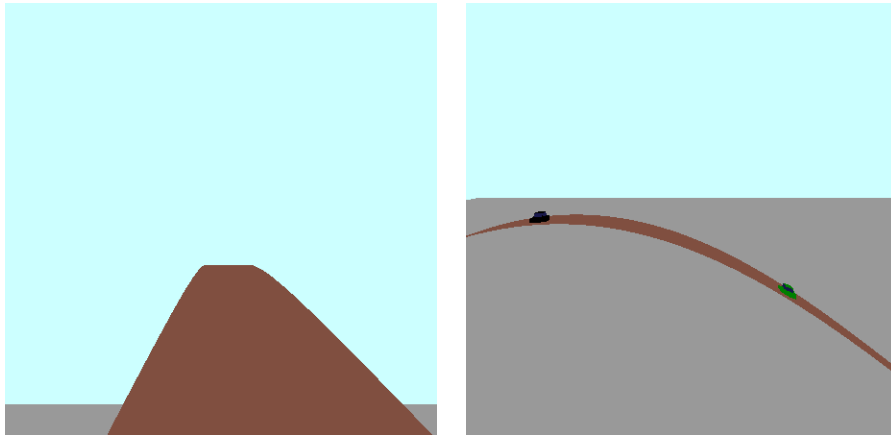


図 5-4 山道における事故 1

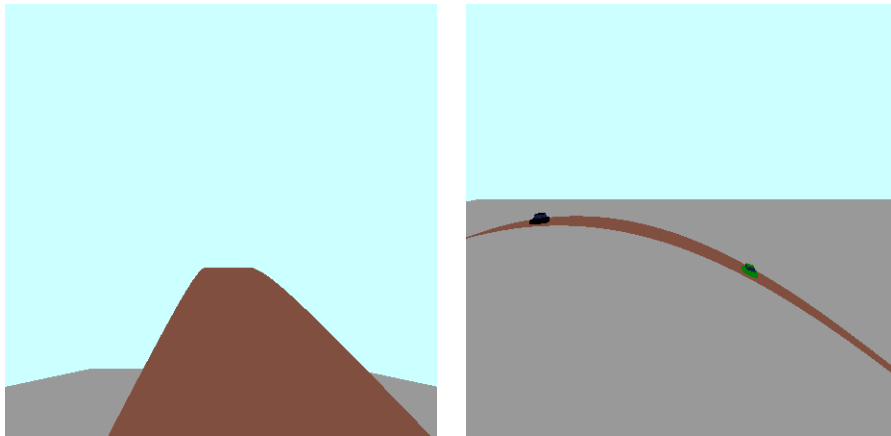


図 5-5 山道における事故 2

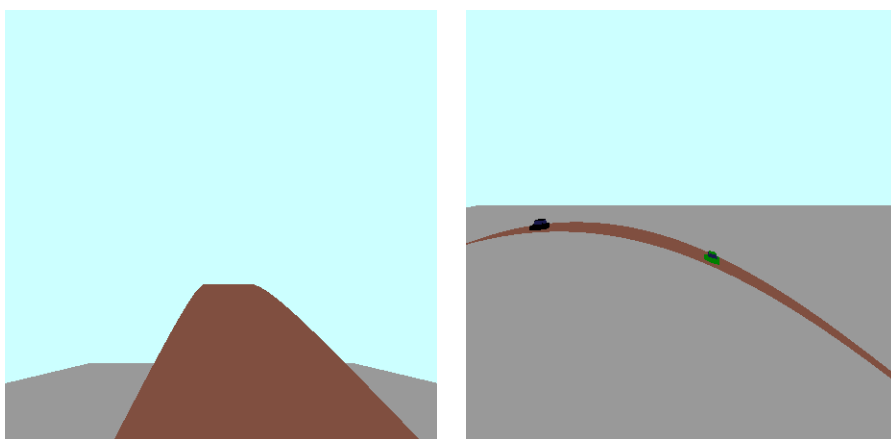


図 5-6 山道における事故 3

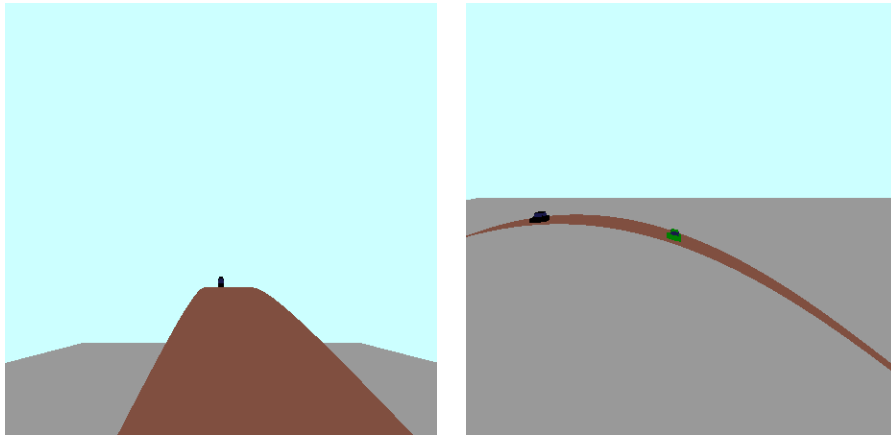


図 5-7 山道における事故 4

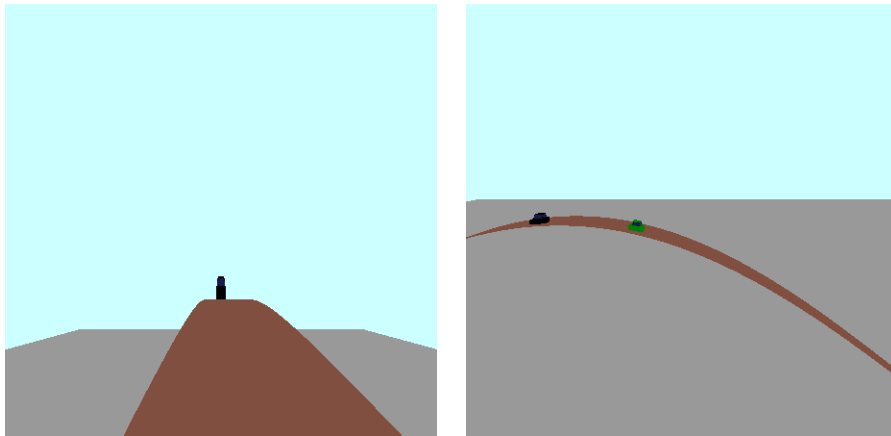


図 5-8 山道における事故 5

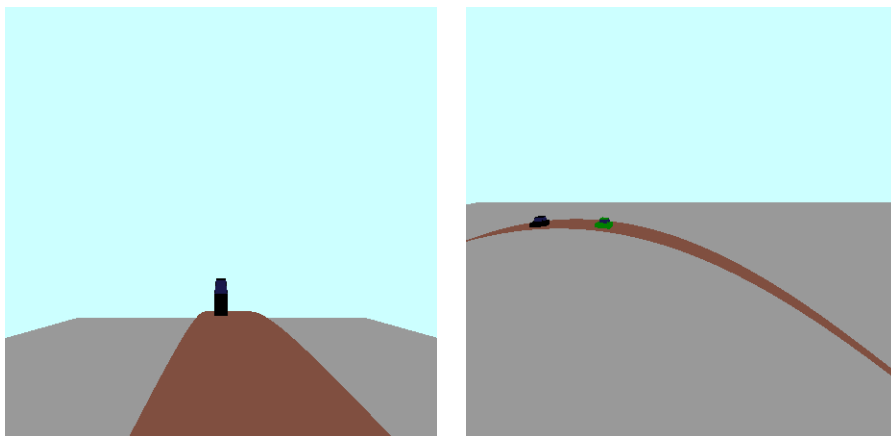


図 5-9 山道における事故 6

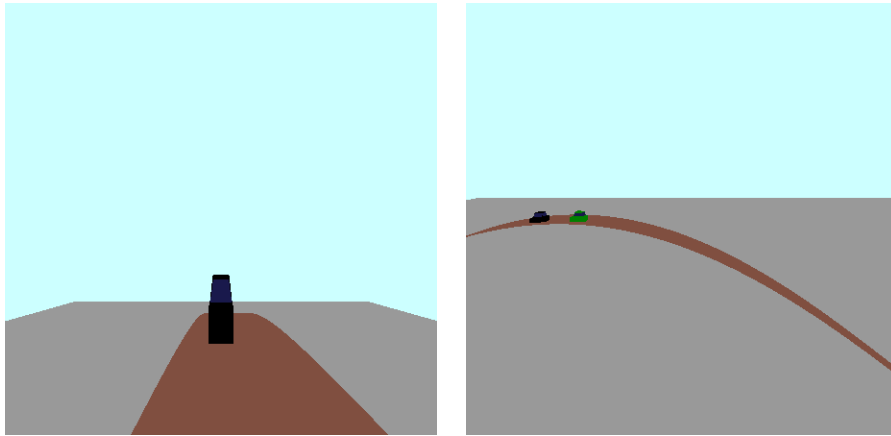


図 5-10 山道における事故 7

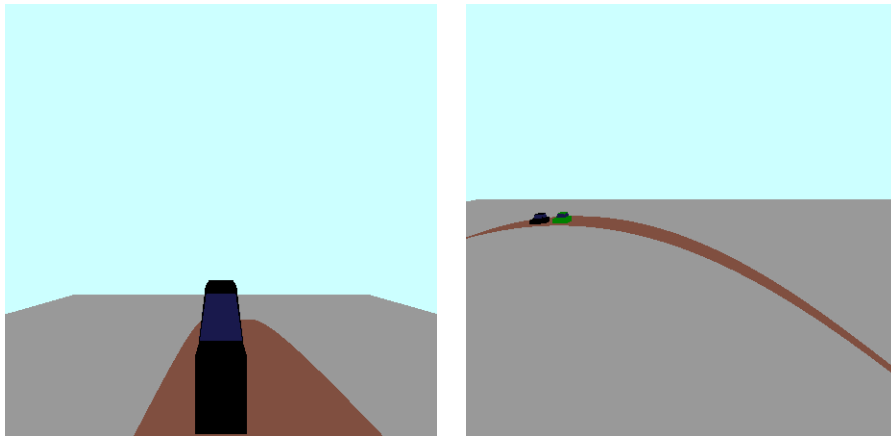


図 5-11 山道における事故 8

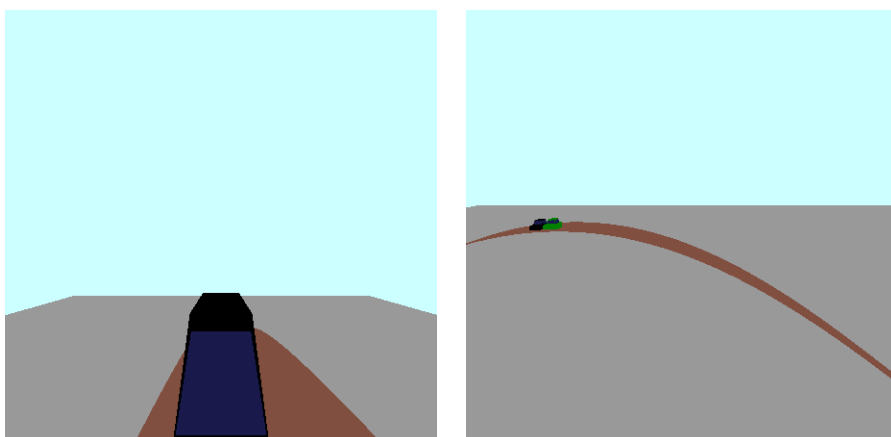


図 5-12 山道における事故 9

図 5-4 から図 5-6 では、直線距離としては緑色の車から黒色の車は視野の範囲内にいるのにも関わらず、道が陰となって黒色の車の位置が死角となり、図 5-7 になるまで見えていない。空走距離を経て、図 5-9 あたりから減速を始めていて、以降緑の車の速度が遅くなっている事が図から分かる。しかし、止まりきれず図 5-12 において衝突してしまっている。

このモデルを応用し高速道路の立体交差等で多発している追突事故の評価や山の頂上の交差点で起きてしまう事故などの評価が可能である。また画像判断モデルでは道の陰だけでなく、3次元で視界を捉えられるのでトラックの死角で信号機が見えない場合や、小さい子供が自車のボンネットが影となって見えない等、様々な事故現象を再現する事ができると考えられる。

6 注視点モデル

5章では画像処理モデルを用いて、より詳細な視野を再現する事が出来た。だが、実際の人間の認知動作においては視野範囲全てから情報を取得できるわけではなく、注視点付近の極めて小さい領域からのみ取得した情報を繋ぎ合わせて脳内に映像を作っているに過ぎない。注視点モデルはその様な人間の認知動作をシミュレータに導入する事で脇見運転や見落とし等による事故の再現を目指す。

6.1 周辺視野と中心視野

人間の視覚の中で解像度の高い部分を中心視野という。周辺視野は図6-1のように横 200° ・縦 130° の広がりを持ち、視界全域の中から特徴的な物を抽出する[27]。抽出後、眼球運動によって注視点を移動させ特徴的な対象を中心視野内におさめる。中心視野に存在する物体は一定時間が経過するとその物が何なのか識別され認知がなされる。その周りの周辺視野の部分も識別に関わる事もあるが、確率的に中心視野から離れる程情報を得られる確率は減っていく。本シミュレータにおいて周辺視野は注視点を移動させる為の補助的な役割の留めており、識別に関わらないようにモデリングした。

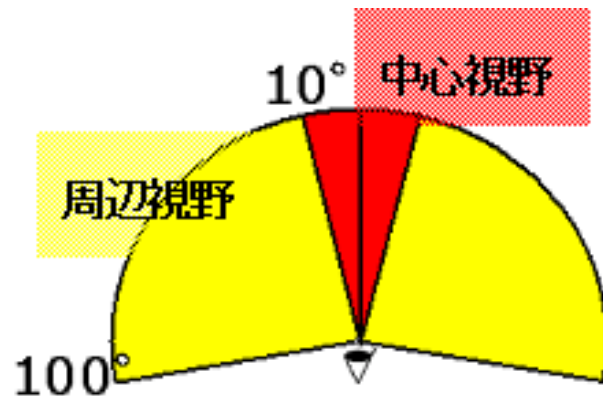


図 6-1 人間の周辺視野と中心視野の範囲

更に速度が上がれば上がる程人間の視野は狭窄し、周辺視野は狭まる。図 6-2 の様に速度 40km においては周辺視野の視野角は 100° になり、速度 100km においては周辺視野の視野角は 40° にまで狭まる。本研究においては高速道路ではなく一般道を 40km で走行する事を想定し、周辺視野角は 100° とした。本来、停止時に視野角は 200° まで広がり、速度に応じて周辺視野の角度は増減していくが、詳細な速度と周辺視野角の関係性については研究が進んでいない事や、個人差がより大きく生じる部分でもある為、本シミュレータにおいては一律で視野角 100° を採用した。

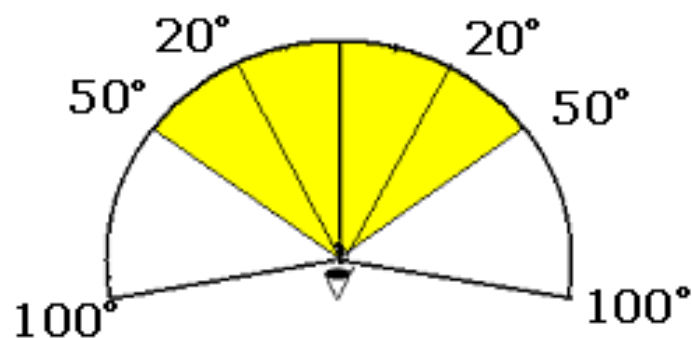


図 6-2 速度上昇による視野狭窄

この周辺視野を用いた移動から認知動作までのモデルを再現し、道路をトレースする眼球運動と併せ運転時の視点移動モデルとした。

図 6-3 において白い外枠は周辺視野、内側の白い正方形は中心視野を表す。自動車や標識等を模した球状の注意対象物に対し視点を移動させ状況を認知していき、判別後は認知した対象の色を変化させ、認知済みとして視点移動には関わらなくなる。

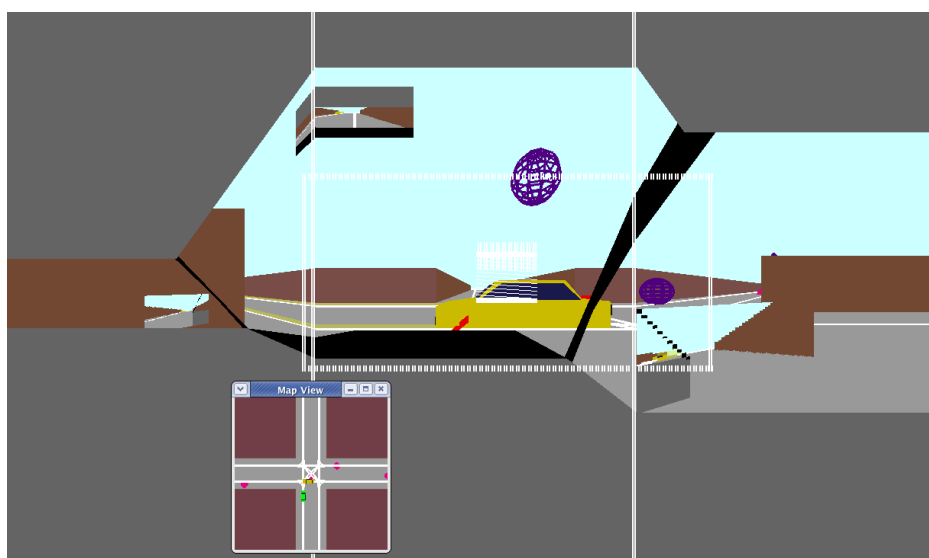


図 6-3 周辺視野と中心視野の導入

注視点の実装により、見落としから信号を無視し事故を起こしてしまうモデルを再現できる。視点移動対象物が大量に存在し、そちらに注視点に移っている間に自分と危険な位置関係にいる車を認知する事が出来ず事故が起きてしまう。このモデルは現実世界では事故の原因が運転手の注意散漫であるという場合を表現でき、建物や車による死角に対する注意不足という場合も表現出来る。

6.2 計算内容

6.2.1 視野角とウィンドウ幅

図 6-4 のようにドライバーから見て前方 90° ・左側面 90° ・右側面 90° の 3 面を 1 ウィンドウ上に表示する。縦方向はルームミラーの入る角度の 120° までを表示する。シミュレーションで利用したディスプレイの横幅が 1260 ピクセルである事からデモ用の画面では出来るだけ高い解像度でシミュレーションを行うため、横幅を 1260 ピクセルとした。

また図 6-4 では図 6-5 のような時速 40km での中心視野と周辺視野を導入していて、視野角をウィンドウに投影した結果、図の様なサイズになる。具体的なピクセル数については後述する。

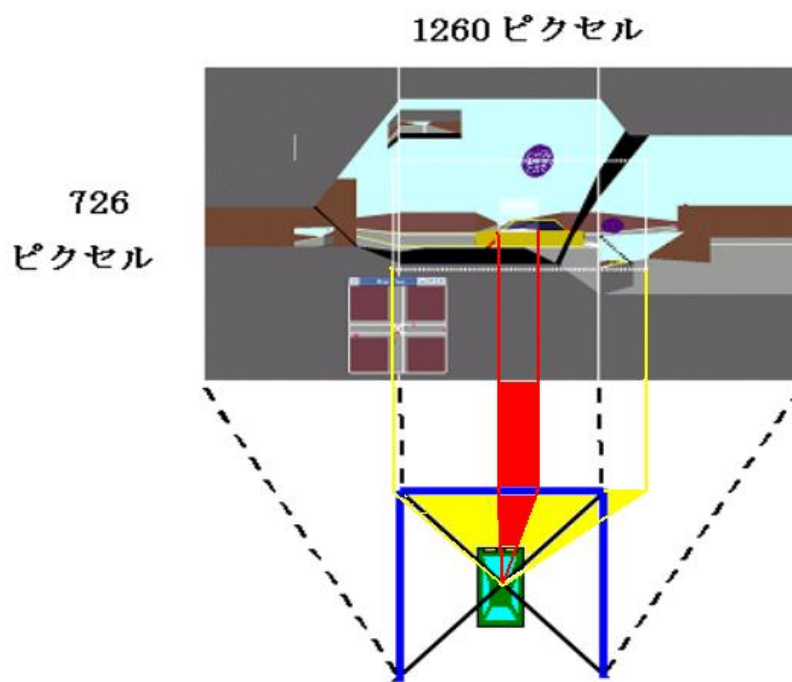


図 6-4 視野角とウィンドウ幅の関係

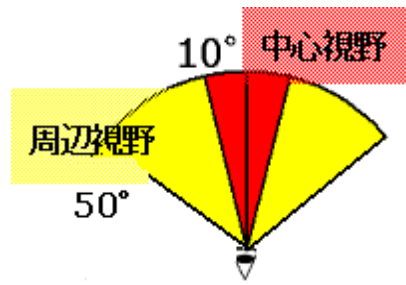


図 6-5 時速 40km の場合の中心視野と周辺視野

縦の視角が 120° である事からウインドウの縦横比を導出する。図 6-6 のような三角形を考えると①が $1260 \div 3 \div 2 = 210$ ピクセルと出来るので、縦のピクセル数は $210 \times \tan(60^\circ) / \tan(45^\circ) \times 2 \div 726$ ピクセルとなる。

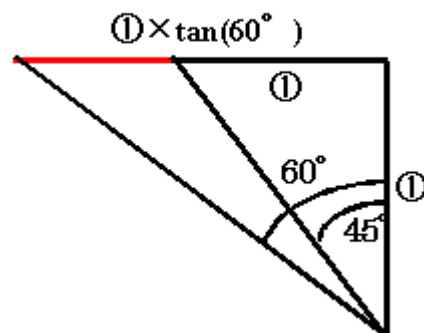


図 6-6 角度からピクセルの計算方法

6.2.2 視点とミラーの位置

運転席を右ハンドルとし、運転者の目とミラーの位置関係は図 6-7 のようになった。運転席が車の中央よりも右側に存在する為、図 6-4 のように左右非対称な運転画面となる。

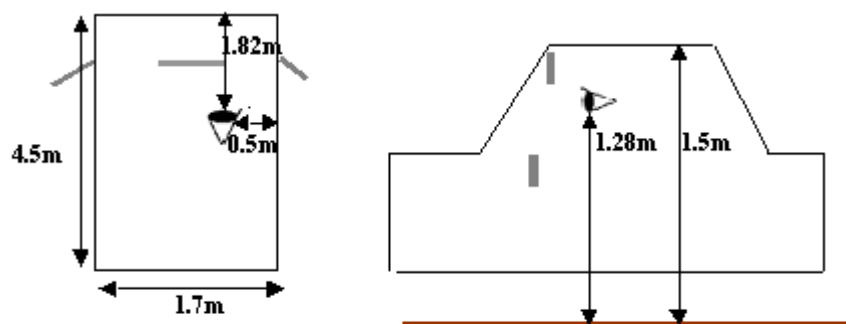


図 6-7 車内の視点とミラーの位置関係

その結果、図 6-4 のように窓から見える部分以外は車の陰となり灰色となる。下部の陰にはスピードメーターやハンドル等が存在する。

6.2.3 周辺・中心視野作成

2.1.1 で再現した視野の中に周辺視野と中心視野を導入する。周辺視野は時速 40 k m で横 100° , 縦 60° なのでどの速度でもその角度を採用する。 $100^{\circ} \times 60^{\circ}$ の周辺視野と $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ の中心視野はウインドウの横幅 420 ピクセルを基準として表 6-1 となるので図 6-8 のような大きさとなる、計算方法の影響で画像の中央と端ではピクセル数に差が出ると考えられるが中央付近の値で近似した。

周辺視野(横)	$420 \times \tan(50) / \tan(45) \div 500$ ピクセル
周辺視野(縦)	$420 \times \tan(30) / \tan(45) \div 120$ ピクセル
中心視野	$420 \times \tan(5) / \tan(45) \div 36$ ピクセル

表 6-1 視野角をウインドウ上で再現した際の値

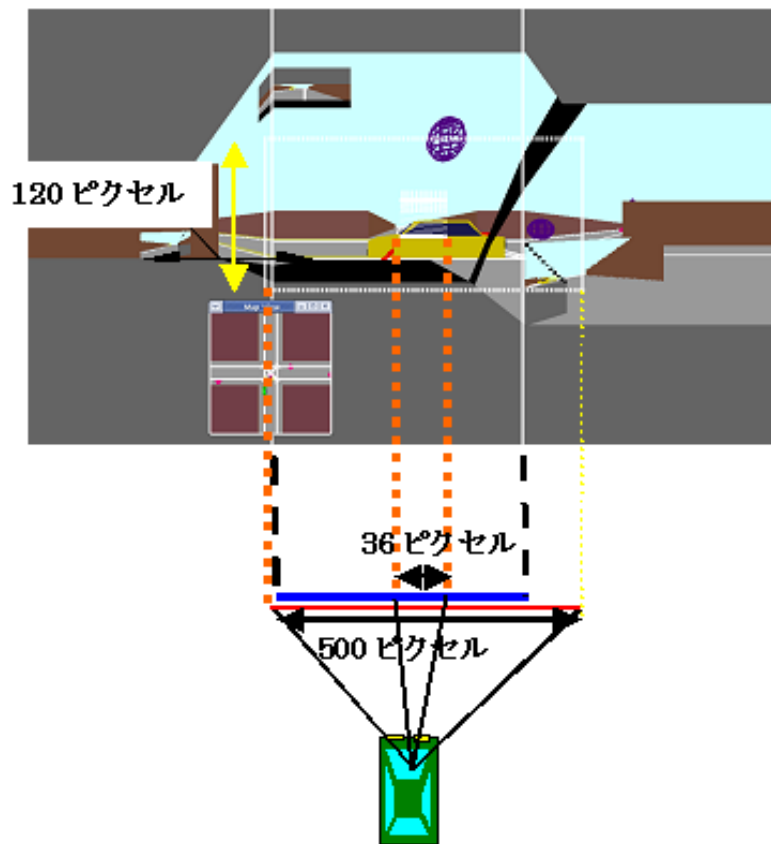


図 6-8 それぞれの視野のピクセル数(デモの場合)

またデモ画面でなく、7・8章で用いられる計算用に複数のウインドウで行う場合はサイズが異なり、表 6-2 のようになる。

周辺視野(横)	$128 \times \tan(50) / \tan(45) \div 120$ ピクセル
周辺視野(縦)	$128 \times \tan(30) / \tan(45) \div 60$ ピクセル
中心視野	$128 \times \tan(5) / \tan(45) \div 8$ ピクセル

表 6-2 視野角をウインドウ上で再現した際の値(計算用)

6.2.4 周辺視野内の情報取得

周辺視野内に存在するカラー情報は 0.1 秒ごとに取得し、`imageByteArray` という関数に格納する。1 ピクセルごとに $r \cdot g \cdot b$ の値がそれぞれ 0～255 までの整数で取得される。ここで取得した色情報を用いて周辺視野移動と中心視野認知の 2 つを行う。

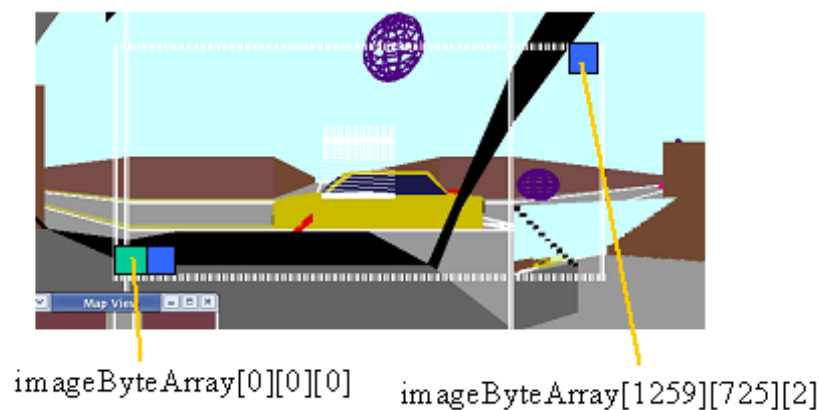


図 6-9 カラー情報を配列に格納

6.2.5 運転時における視点移動

運転時の視点移動は受動的な動作と能動的な動作に分けて考えられる。受動的な動作における移動速度は 1 秒あたり 15 度である[28]、よって 1 秒あたりに動くピクセル数は $420 \times \tan(15 \text{ 度}) = 113 \text{ pixel/sec}$ を用いる。本シミュレータは 0.1 秒を 1 ステップとしているので 1 回の計算に認知・判断操作ループにおいては $11 \text{ pixel}/0.1 \text{ sec}$ 移動する。計算用の視点移動速度に関しては 7 章にて後述する。

6.2.6 受動的な視点移動

2.1.3 で取得した周辺視野内の **rgb** 値を使用する。周辺視野領域を図 12 のように 4 分割し、毎ステップでそれぞれのピクセル数をカウントする。

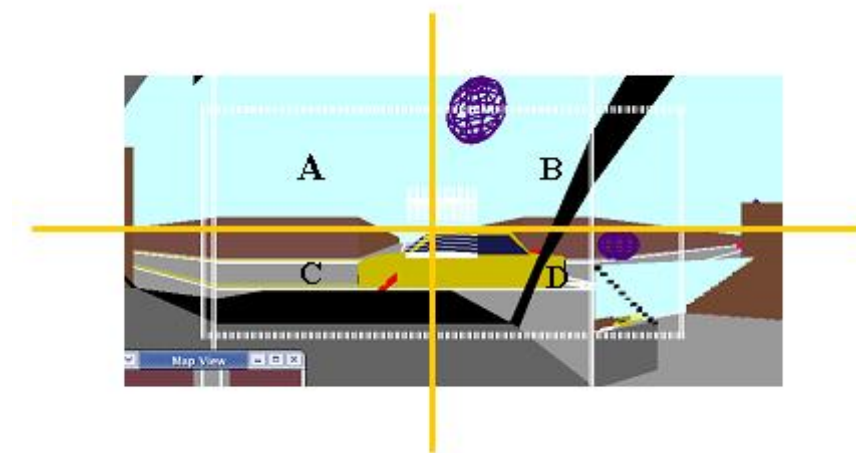


図 6-10 視野領域の分割

領域 A 内に含まれる注意対象物のピクセル数を **a** として、同様に **b** と **c** と **d** を定義する。注意対象物の量が多い方に視点を移動させる事を目的として **a, b, c, d** を用いる。

a+c と **b+d** の大小を比較し大きい方に 4 ピクセル移動させ横移動の方向を決定する、**a+b** と **c+d** の大小を比較し大きい方に 4 ピクセル移動させ縦移動の方向を決定する。この動作により周辺視野内で最も多くの面積を占める対象物に対して優先的に注視点を移動する事になる。

6.2.7 能動的な視点移動

運転動作において道路の形状確認や後方注意の為に運転者は定期的に道路とルームミラーとサイドミラー内に注意を向ける必要がある。それを再現する為。周辺視野に注視対象が存在しない場合は、80%の割合で道路(中央)に、10%の割合でルームミラーに、5%ずつの割合でサイドミラーに注視点を40ピクセル/sで移動する。この値は個人差があり、運転の習熟度によっても異なる。

6.2.8 中心視野による情報取得

図 6-11 の様に中心視野をあらわす、白い正方形内に注意対象物が入った場合、認知が開始される。認知にかかる時間を認知時間として、一定時間経過後に注意対象物は認知状態となる。以下で認知の仕組みに関して説明する。

まず、認知値を定義する。これは車1台1台がすべての注意対象物に対して持つ値であり、初期値は0でこれが一定値を超えた場合に認知状態であると判定する。1タイムステップごとに36ピクセル四方の中心視野内にある対象物に対して、認知値を加算する。

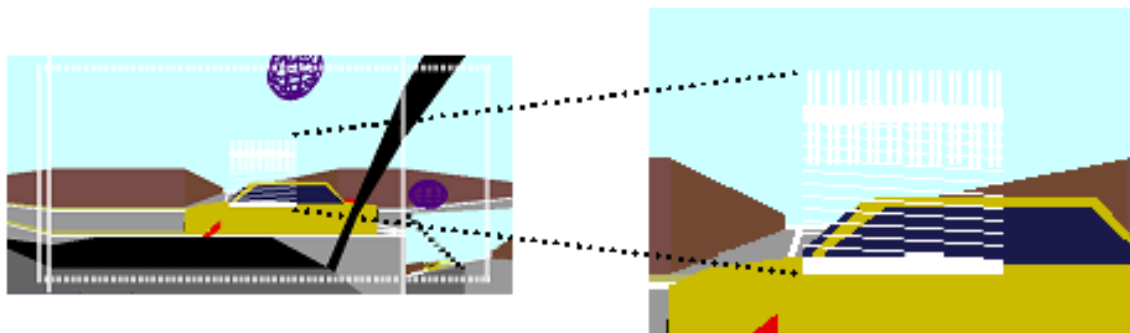


図 6-11 中心視野の情報取得

認知にかかる時間を 0.4 秒、1 タイムステップを 0.1 秒と決定した場合 認知値 > 4 になったら認知済みとする。認知済みになった物体は判断対象 となり、色に変化して視点移動に影響しなくなる。

認知した対象物が中心視野に入らず 5 秒経過したら、認知値を 0 にし て変化した色を元に戻す。これを認知切れ時間とする。これによって 5 秒 間は中心視野内に物体がなくても判断可能にする。0.4 秒と 5 秒という値 の根拠としては、感度解析の項で述べる。

6.3 注視点を考慮した事故

事故を再現した結果は以下の様になる。1 タイムステップ 0.01 秒でシミュレーションを行ったが本稿では 0.2 秒おきの画像を掲載した。

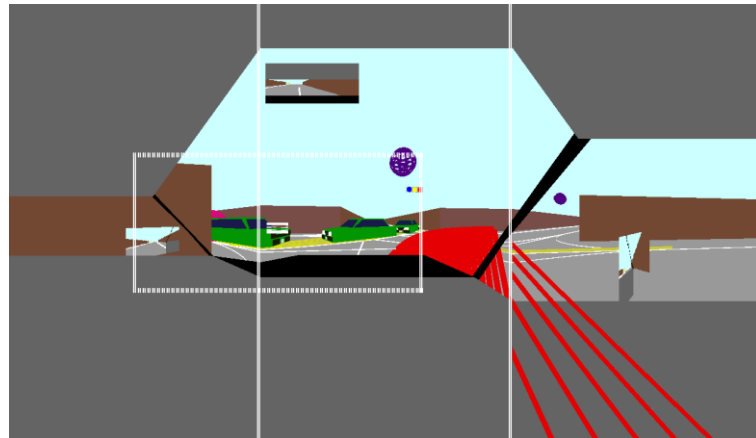


図 6-12 注視点モデルにおける追突の様子 1

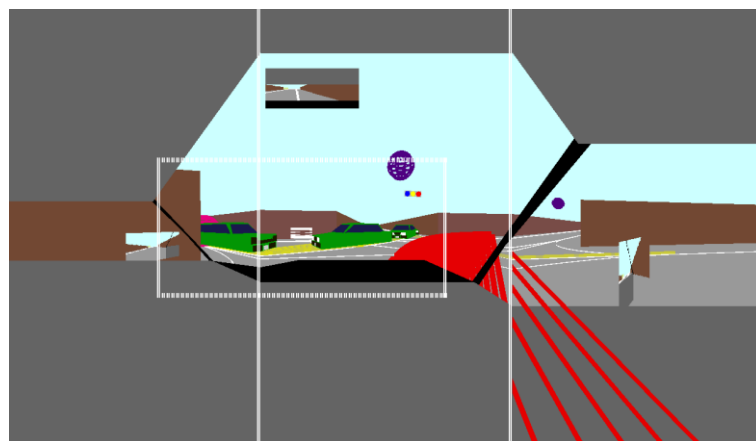


図 6-13 注視点モデルにおける追突の様子 2

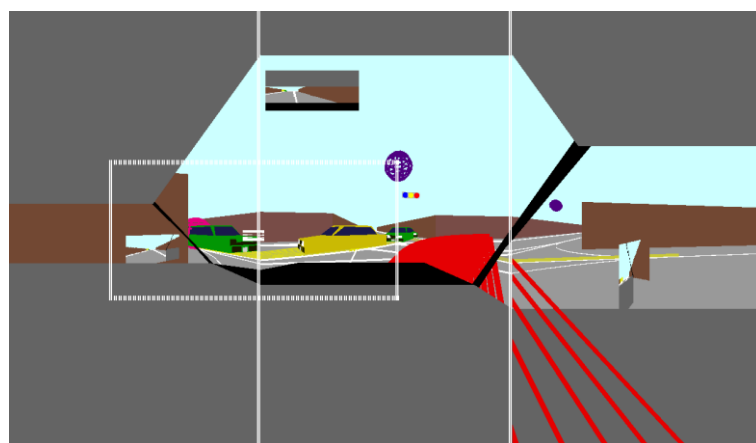


図 6-14 注視点モデルにおける追突の様子 3

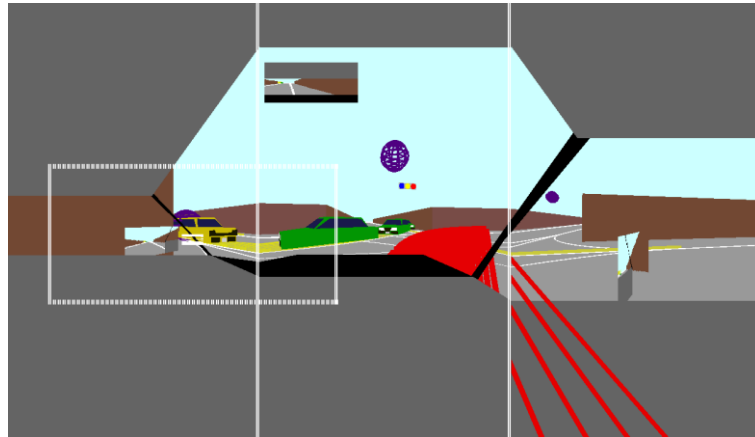


図 6-15 注視点モデルにおける追突の様子 4

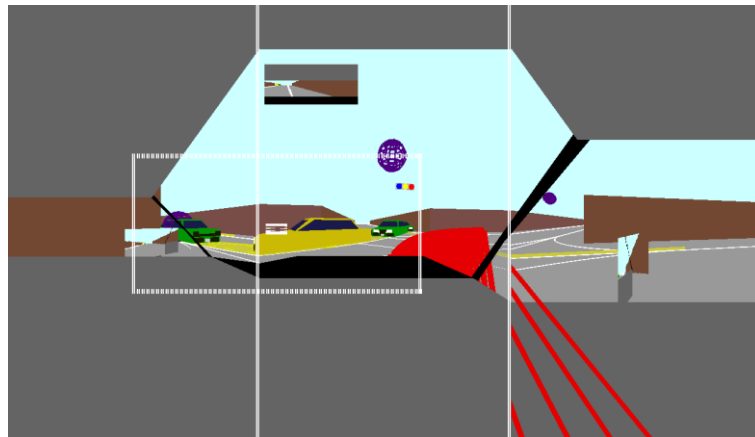


図 6-16 注視点モデルにおける追突の様子 5

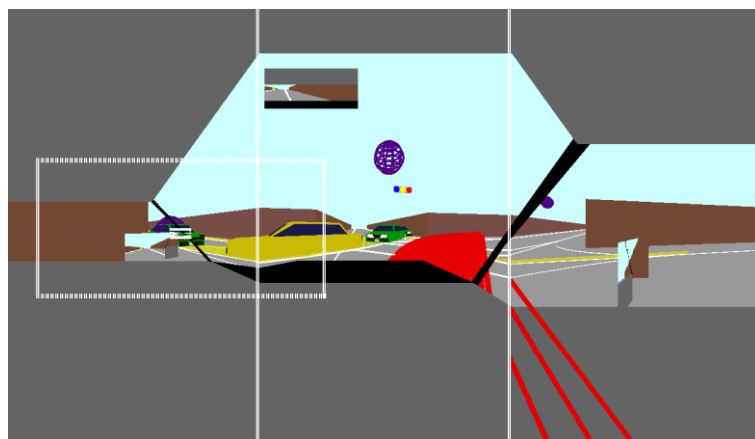


図 6-17 注視点モデルにおける追突の様子 6

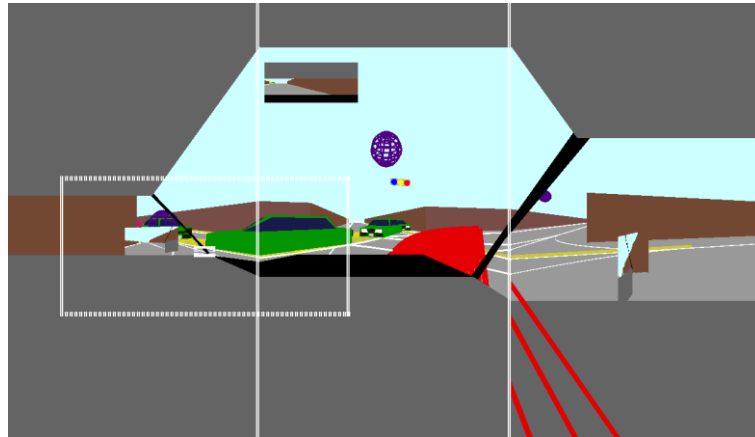


図 6-18 注視点モデルにおける追突の様子 7

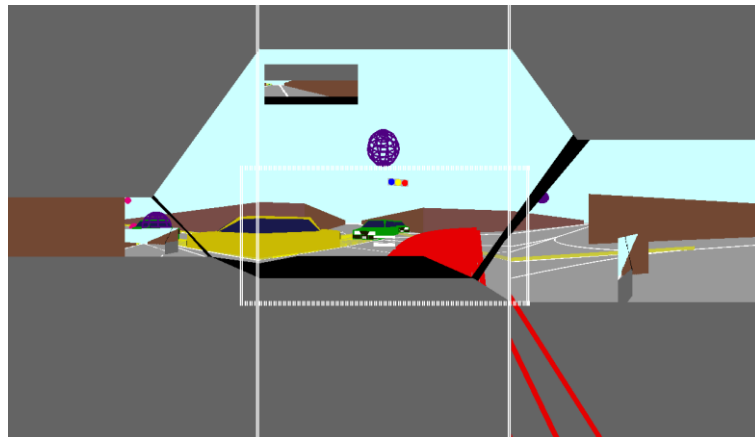


図 6-19 注視点モデルにおける追突の様子 8

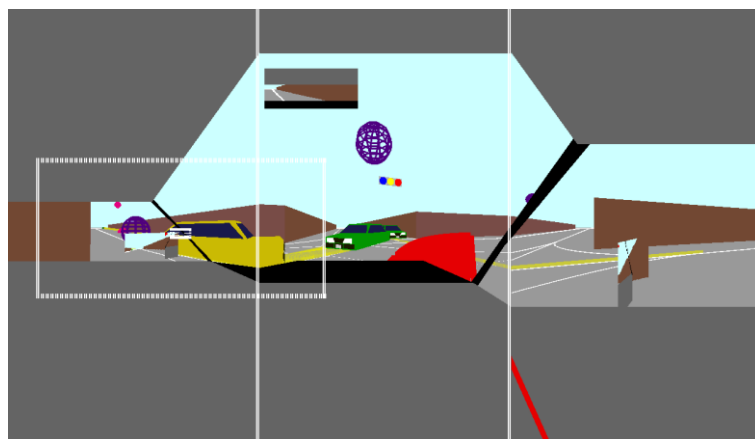


図 6-20 注視点モデルにおける追突の様子 9

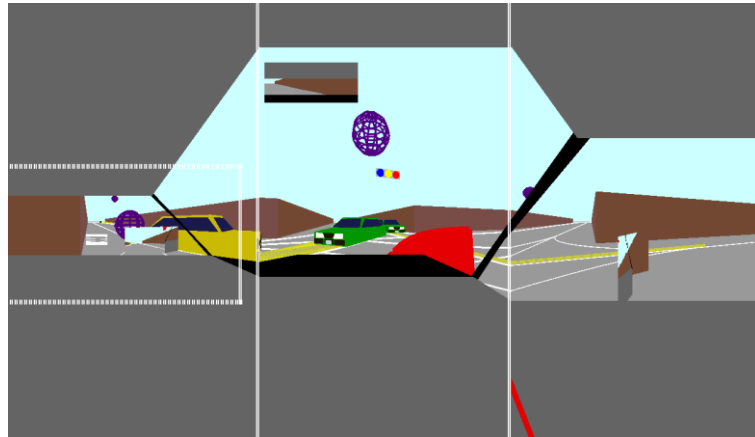


図 6-21 注視点モデルにおける追突の様子 10

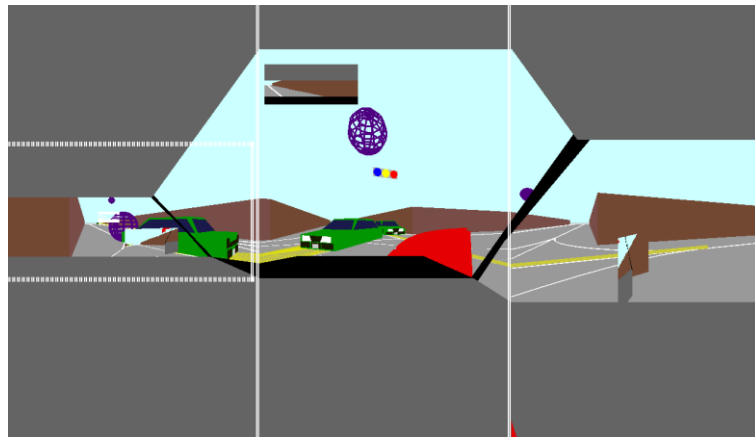


図 6-22 注視点モデルにおける追突の様子 11

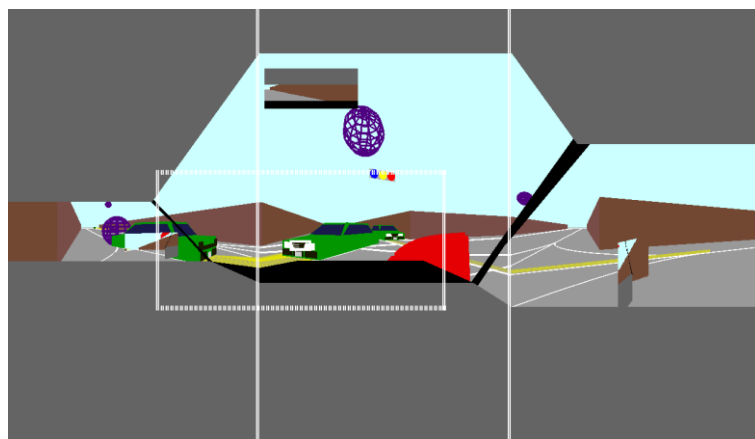


図 6-23 注視点モデルにおける追突の様子 12

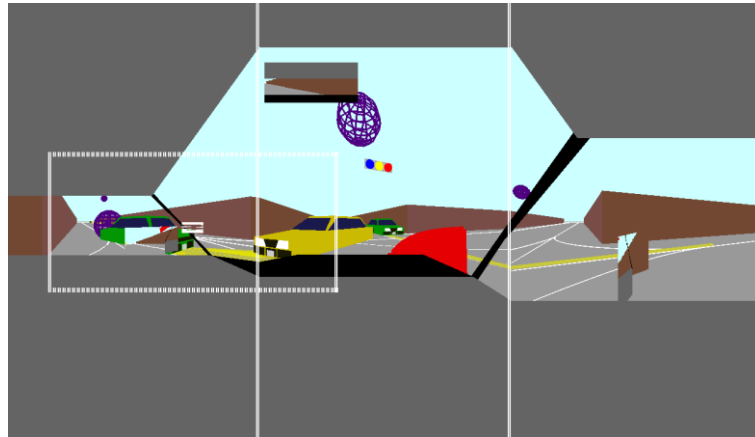


図 6-24 注視点モデルにおける追突の様子 13

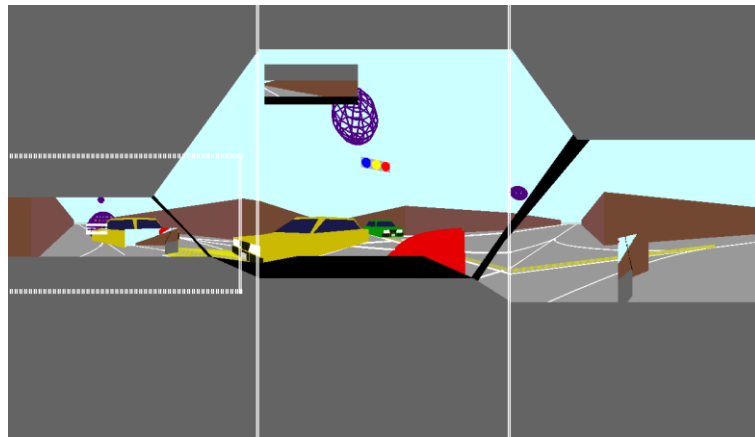


図 6-25 注視点モデルにおける追突の様子 14

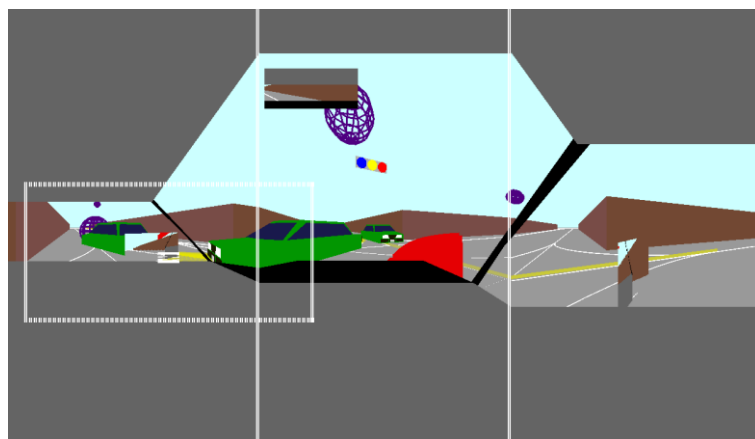


図 6-26 注視点モデルにおける追突の様子 15

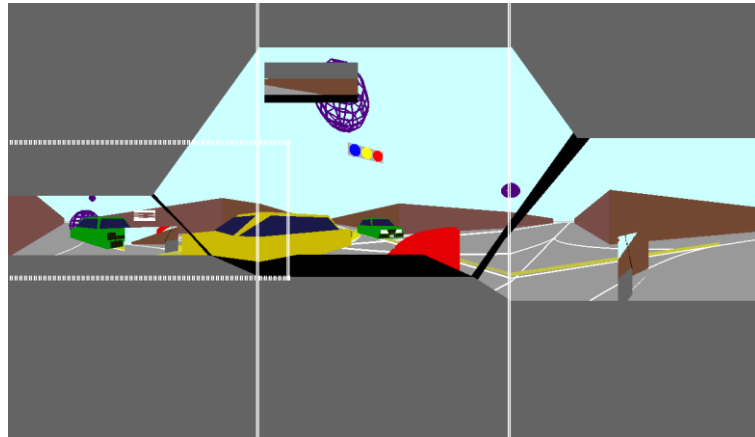


図 6-27 注視点モデルにおける追突の様子 16

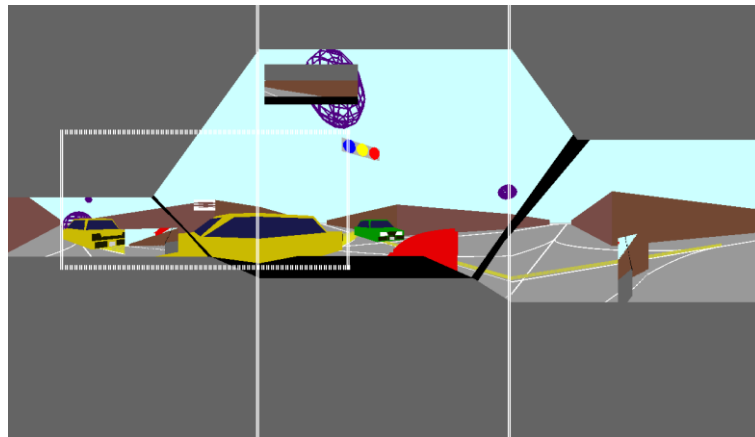


図 6-28 注視点モデルにおける追突の様子 17

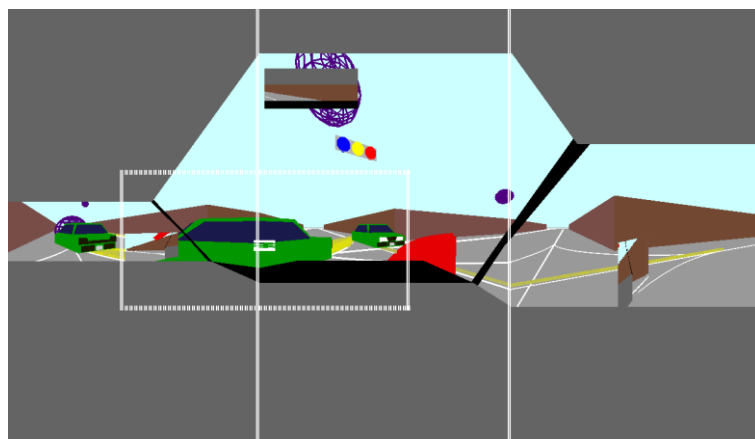


図 6-29 注視点モデルにおける追突の様子 18

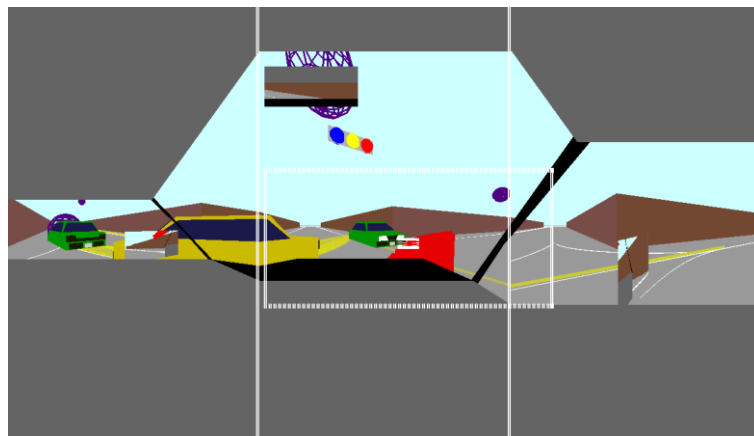


図 6-30 注視点モデルにおける追突の様子 19

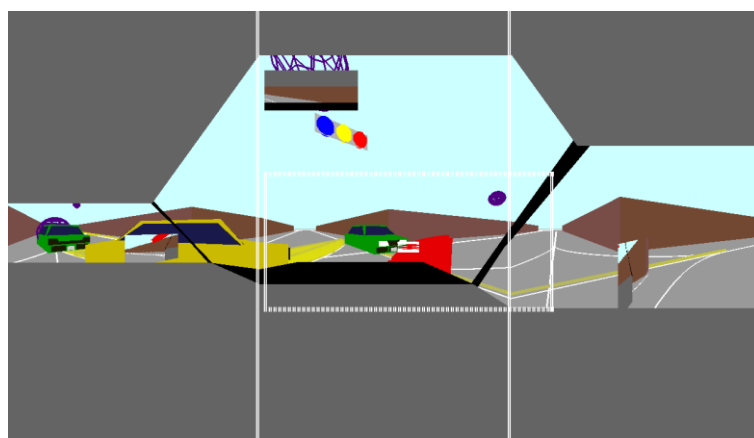


図 6-31 注視点モデルにおける追突の様子 20

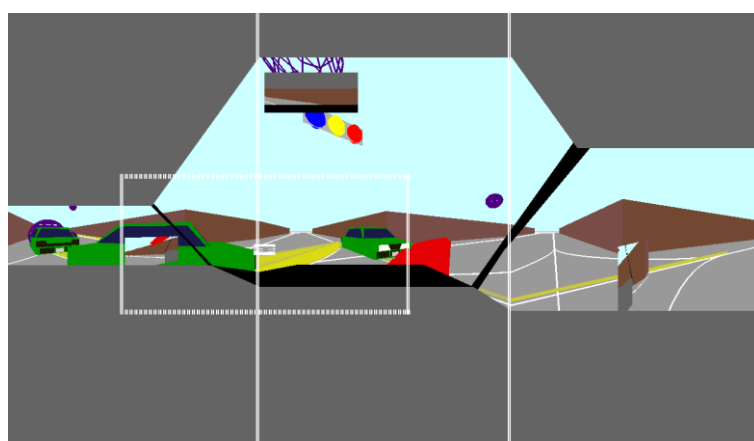


図 6-32 注視点モデルにおける追突の様子 21

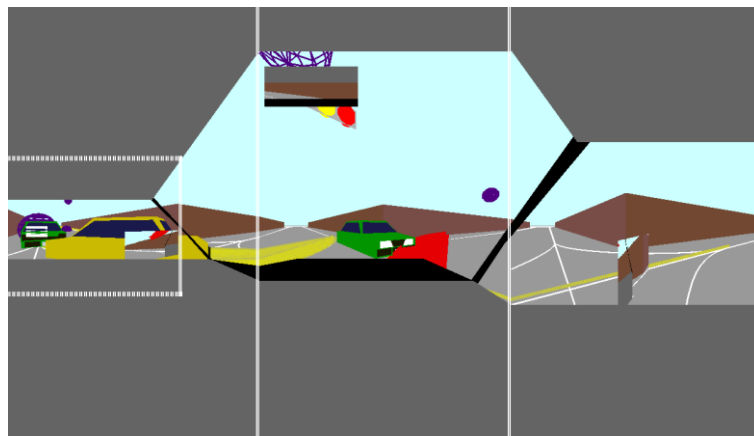


図 6-33 注視点モデルにおける追突の様子 22

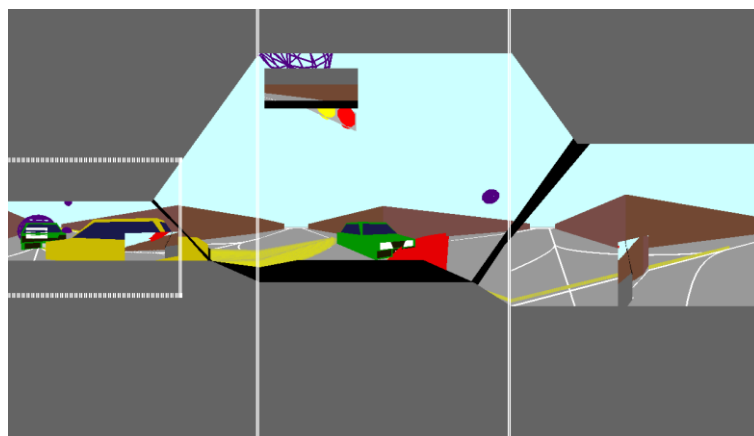


図 6-34 注視点モデルにおける追突の様子 23

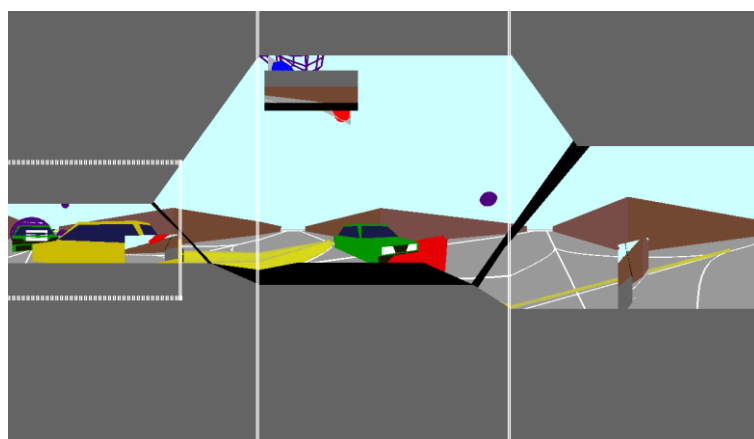


図 6-35 注視点モデルにおける追突の様子 24

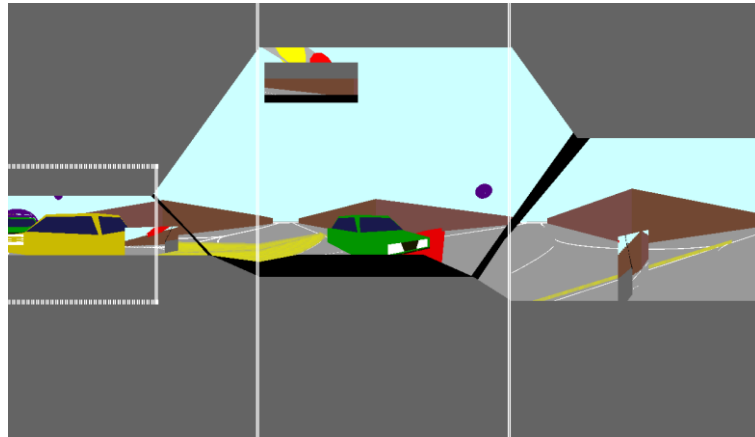


図 6-36 注視点モデルにおける追突の様子 25

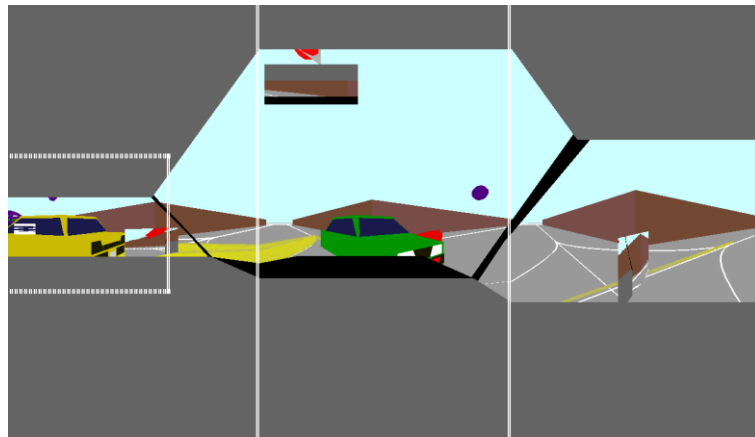


図 6-37 注視点モデルにおける追突の様子 26

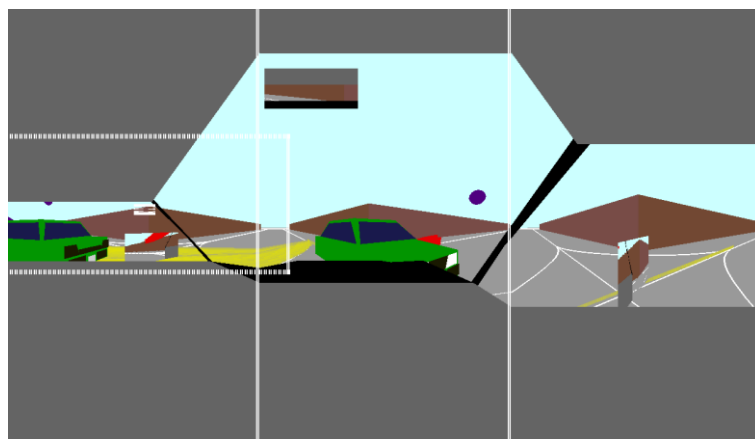


図 6-38 注視点モデルにおける追突の様子 27

図 6-38 のように注意対象過多により、車を見落として減速をせず、追突してしまう。車が認知済みの場合緑から黄色に変化する為、認知ミスが起きている事が分かる。

また、図 6-25・図 6-26・図 6-29・図 6-32 のように周辺視野内に認知されていない緑の車が存在する場合、認知に一定時間かかるため、進行方向の車ではなくそちらの方向に視点が移動している。今ケースでは認知にかかる時間を中心視野に 0.2 秒とらえた場合に認知状態になるようにした。そのため、図 6-31 から図 6-33 の部分を見ると図 6-32 で左側の車が一旦認知切れを起こしているが、0.2 秒後の図 6-33 で 0.2 秒とらえすぐに認知状態となっている。

そして、図 6-29 から図 6-32 において左側の車を見てみると、一定時間が経過後、認知が切れて黄色い車が緑色にもどり未認知状態になっている事も確認できる。未認知になると、もう一度緑色の車を確認する為、視点がそちらに移動している。

さらに、図 6-12 から図 6-14 において、前 3 台の車が死角となり一番後方の車の存在を交差点に入るまで確認する事が出来ない。

図の中には信号機や紫色の球が存在するが、球は標識などの注意対象物を意図している。それらに対し注意を向けさせることもできるが、今回の事故においては事故の原因を分かりやすくするため、注意対象を車にしぼった。

6.4 考察

注視点移動による人間の運転挙動を再現し、2次元の幾何学的手法では処理出来ない事故を再現できた。画像認識モデルにより現実在即した事故を現したといえる。シミュレータ上では対向車を確認しすぎて、自車の走行軌道上の危険を察知出来なかったわけだが、実際の運転動作においても何度か対向車を確認しようと、注意をむけ過ぎてしまい見落としてしまうことはあり得る。

また注視点が、周辺視野内の注意対象物の存在や認知状態などの情報をうけて移動していく様子も確認でき、人間の視線移動を再現することができた。注視点の移動以外においても前3台の車の死角を現実在即した形で再現する事が出来た。

7 感度解析

ここまでシミュレータの特性、利用方法などについて述べてきたが。このシミュレータの妥当性や正確性については述べられていない。本章ではシミュレータが実際の運転状況をどの程度正確に表しているのか、注視点モデルに用いられるパラメータは妥当なのかを検証する。

7.1 認知判断に用いられるパラメータ

注視点モデルにおける認知判断に用いられるパラメータは表 7-1 のようなものがある。数値として妥当性のあるものもあれば、関連研究の中で厳密な値が求められておらず、本シミュレータ独自で採用したものもある。

本章では、これらの値を基準値とし、定数倍した時の計算結果と比較することで感度解析を行う。

パラメータの種類	大きさ
周辺・中心視野窓の大きさ	周辺 100° ・ 中心 10°
受動的な視点移動速度	15(deg/s)
能動的な視点移動速度	180(deg/s)
中心視野内で認知にかかる時間	0.4 秒
能動的な視点移動の割合	ルーム 10/100 ・ サイド 5/100
認知後の他車挙動の予測	認知後 5 秒は完全に予測
視野内の優先順位	視野内で占める面積が大きい順

表 7-1 認知判断に用いられるパラメータの基準値

7.2 マルチエージェントモデルを用いた感度解析

表 7-1 のパラメータについて、周辺視野・中心視野の大きさ[27]と視点移動速度[28]に関しては、認知心理分野における数値的な共通認識が存在する。

また認知にかかる時間は空走距離を求める際に用いる驚愕反応時間 1.5 秒から周辺視野内に存在する対象物を中心視野内まで移動する為に要する平均時間 1.1 秒(対角線の長さを視点移動速度で除した)を引いた 0.4 秒を基準とした。認知切れ時間に関しては本シミュレータ独自で採用した値であり、この値の妥当性を確かめる必要がある。上記の角度をウインドウ上で表すと表 7-2 の大きさとなる。注視点モデルに用いられるパラメータは妥当なのか、パラメータによって認知性能はどう変わるのか検証する。

パラメータの種類	ウインドウ上での大きさ
周辺視野(横)	$128 \times \tan(50) / \tan(45) \div 120$ ピクセル
周辺視野(縦)	$128 \times \tan(30) / \tan(45) \div 60$ ピクセル
中心視野	$128 \times \tan(5) / \tan(45) \div 8$ ピクセル
視点移動速度	$128 \times \tan(15) / \tan(45) \div 40$ ピクセル

表 7-2 視野角をウインドウ上で再現した際の値

パラメータの感度解析を行う為に、マルチエージェントの創発現象を利用する。パラメータごとに事故の頻度を測定する。流入点からは 5 秒に 1 台車が排出する。車は右折・直進・左折をランダムに選択する。信号無し交差点で希望速度は 16m/s、右左折時は 6m/s まで減速する。

車同士の距離が 0.5m 以下になった場合に衝突とし。それまでにかかった時間、走行距離の総和を測定する。

7.3 感度解析手法

パラメータの感度解析を行うために、マルチエージェントモデルを利用する。図 7-1 のようなマップを用いてパラメータを変え、各運転手が認知する車の総台数を測定する。ランダムな流入点から 2 秒に 1 台車が出現し、20 台になったら測定を開始する。マップの端点から車が消滅した場合、新たに車が流入して常に 20 台に保たれる。

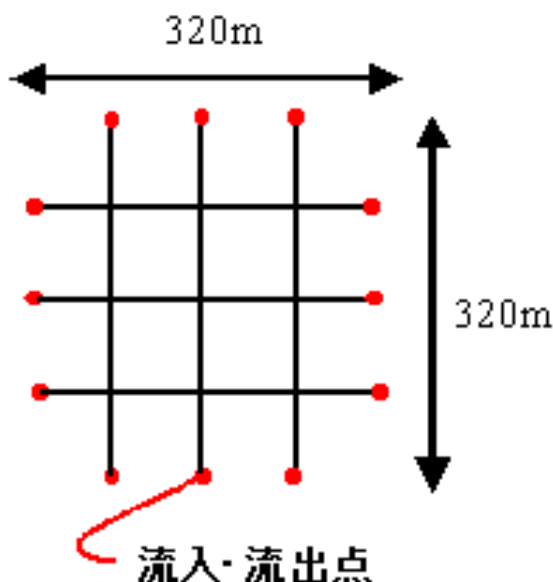


図 7-1 感度解析で用いるマップのサイズ

シミュレーション時間で 20 分間計測を行い、各車が認知した他車台数の総和を求める。まずは視点移動速度を変化させ、認知台数との相関を調べる。次に認知切れ時間・認知にかかる時間・周辺視野の大きさを表 7-3 のように基準値から同じ比率で変化させ、認知台数を計測する。それにより各々のパラメータの持つ影響力を調べる。以上のような方式で本シミュレータを用いた場合の上空から見た画面は図 7-2 のようになる

	1/8	1/4	1/2	基準	2 倍	4 倍	8 倍	16 倍	32 倍
視 点 移 動 速 度 (pixel/0.1s)		1	2	4	8	16	32	64	
認 知 切 れ 時 間 (s)	0.6	1.2	2.5	5	10	20	40		
認 知 時 間 (s)		0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.4	12.8
周 辺 視 野 の 横 幅 (pixel)	15	30	60	120	240	480			

表 7-3 感度解析でふったパラメータの値

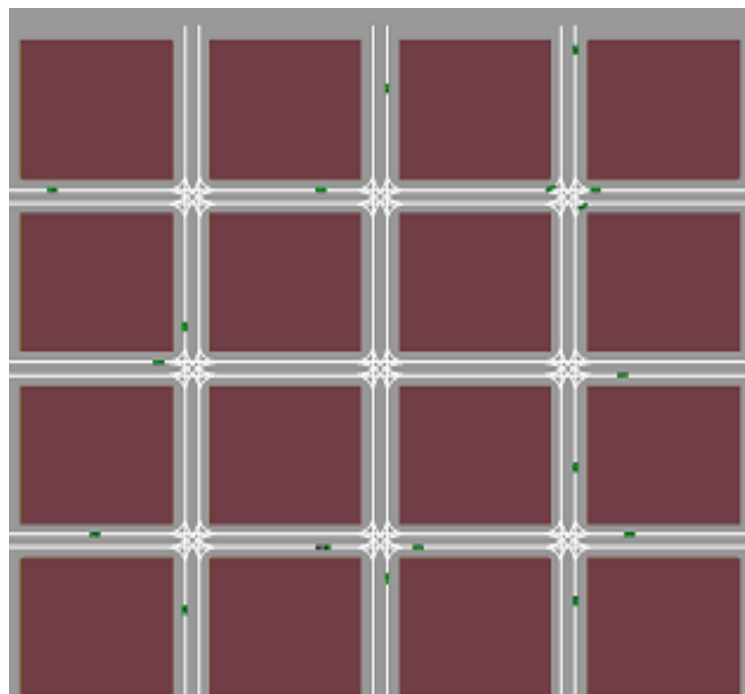


図 7-2 上空から見たシミュレーション画面

7.4 結果

図 7-3 は視点移動速度と認知台数の相関を示したものである。実現象では視点移動速度が速い程、遠くのものや早いものをとらえられ、認知台数は増加すると考えられるが、グラフによると 4(ピクセル/0.1sec)をピークに減少している。視点移動速度が 32 ピクセル以上の場合、認知する事はほぼ出来なくなる。

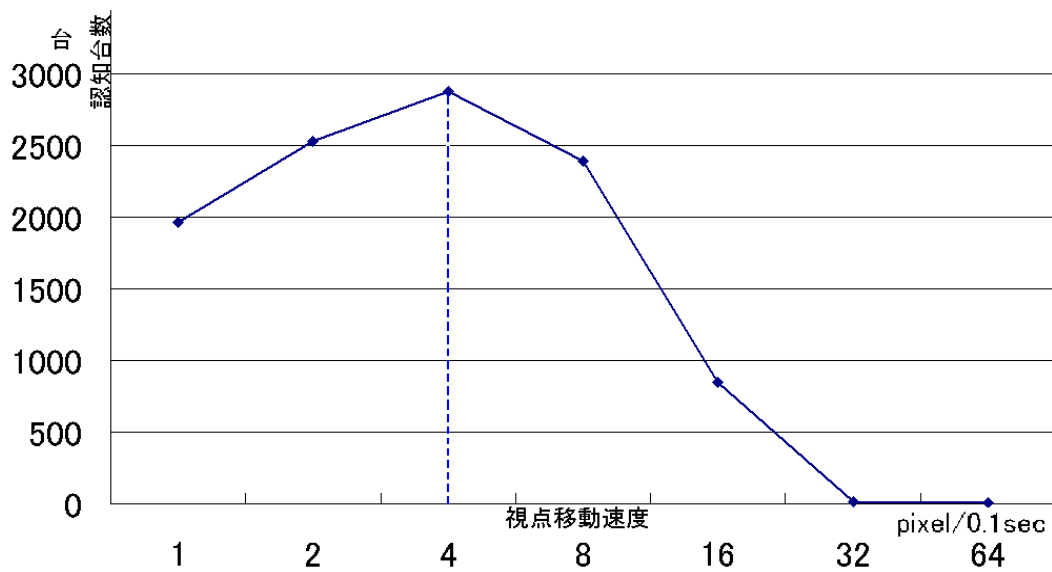


図 7-3 視点移動速度と認知台数の関係

図 7-4 は図 7-3 を各タイムステップでみた値である。シミュレーション時間で 20 分という長さが妥当なのかを評価するために、各タイムステップでの認知台数を確認した。

図によるとどのステップにおいても視点移動速度による認知台数の大小関係は変わらず、比率もほぼ変わらない。20 分という時間が認知台数をはかる上で十分な時間である事がわかる。

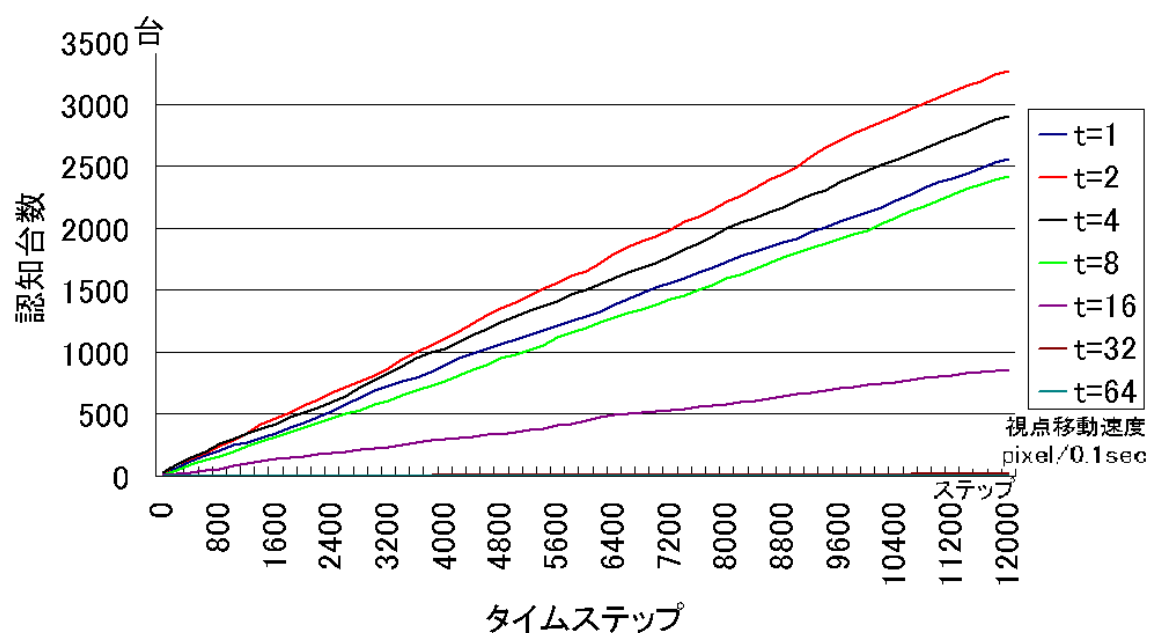


図 7-4 視点移動速度と認知台数の各タイムステップにおける関係

図 7-5 は認知状態に入ってから、対象が中心視野を外れてから認知状態が切れるまでの時間(認知切れ時間)と認知台数の関係を示したものである。高い負の相関があり(相関係数=-0.896)、認知切れ時間が長くなるにつれ認知台数が一定の割合で減少している事がわかる。

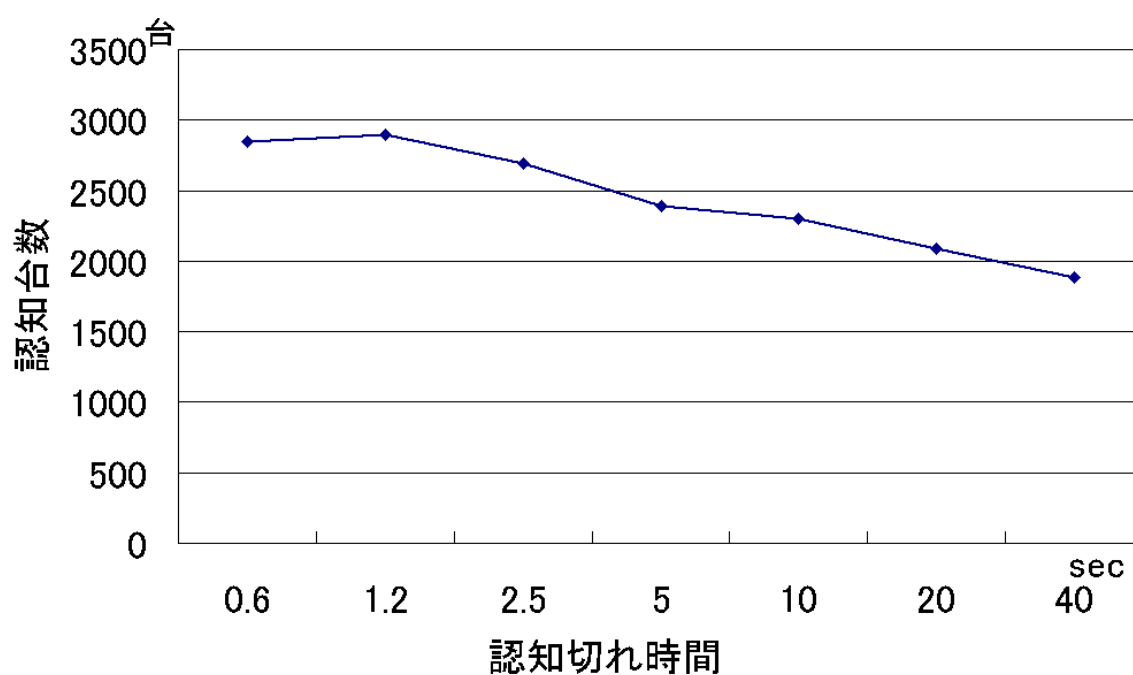


図 7-5 認知切れ時間と認知台数の関係

図 7-6 は車が中心視野に入ってから認知状態になるまでの時間(認知時間)と認知台数の関係を示したものである。両者には統計的に有意な負の相関関係があり(相関係数=-0.629)、認知時間に 4 秒以上かかるとほぼ車を認知できなくなることが分かる。

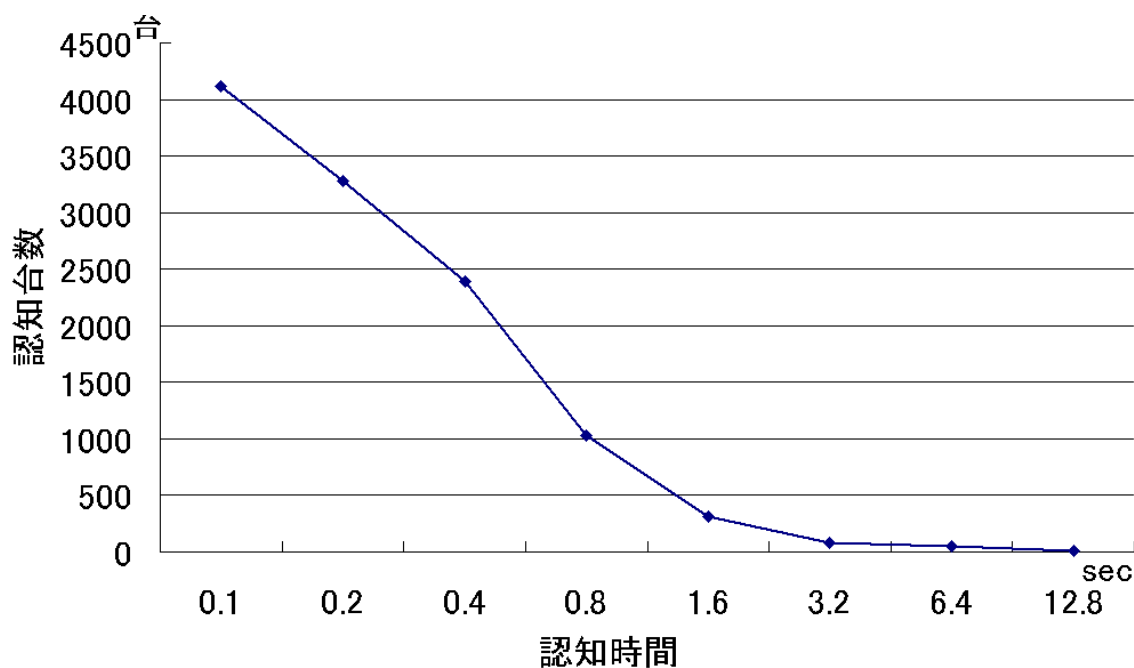


図 7-6 認知時間と認知台数の関係

図 7-7 は周辺視野の大きさと認知台数の関係を示したものである。周辺視野の大きさとは、周辺視野の横のピクセル数によって比較した。

周辺視野の大きさは一定以上に達すると認知台数に影響を与えないが、人間の取り得る視界の大きさ横 120 ピクセル以下では統計的に有意な正の相関関係があり(相関係数=0.673)。15 ピクセルと僅かな大きさの周辺視野においても一定数の認知が行えている事も分かる。

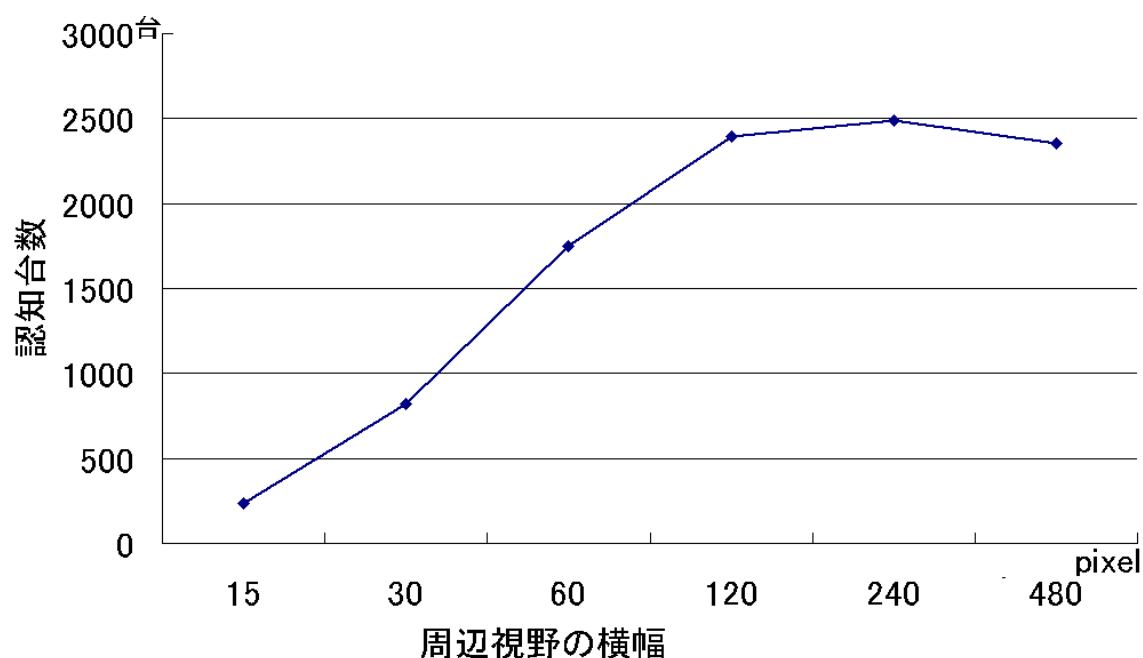


図 7-7 周辺視野の大きさと認知台数の関係

図 7-8 は図 7-3 と図 7-5 と図 7-6 と図 7-7 を全て一つの図で表したものである。表 7-1 のパラメータ値を 1/8 から 8 倍の間で変化させ、パラメータ毎の認知台数の増減を表している。認知切れ時間が他の要素に比べて、認知台数への影響力が少なく、認知時間が最も認知台数への影響が大きい事が分かる。視点移動速度と認知時間は表 7-1 の値で 0.4 ピクセルと 0.4 秒であり 1 ステップ 0.1 秒でシミュレーションしている事から 1/8 の値を取る事が出来ない、周辺視野サイズは横 240 ピクセルの時点で認知台数に有意な差が見られなかった為、計測を行わなかった。

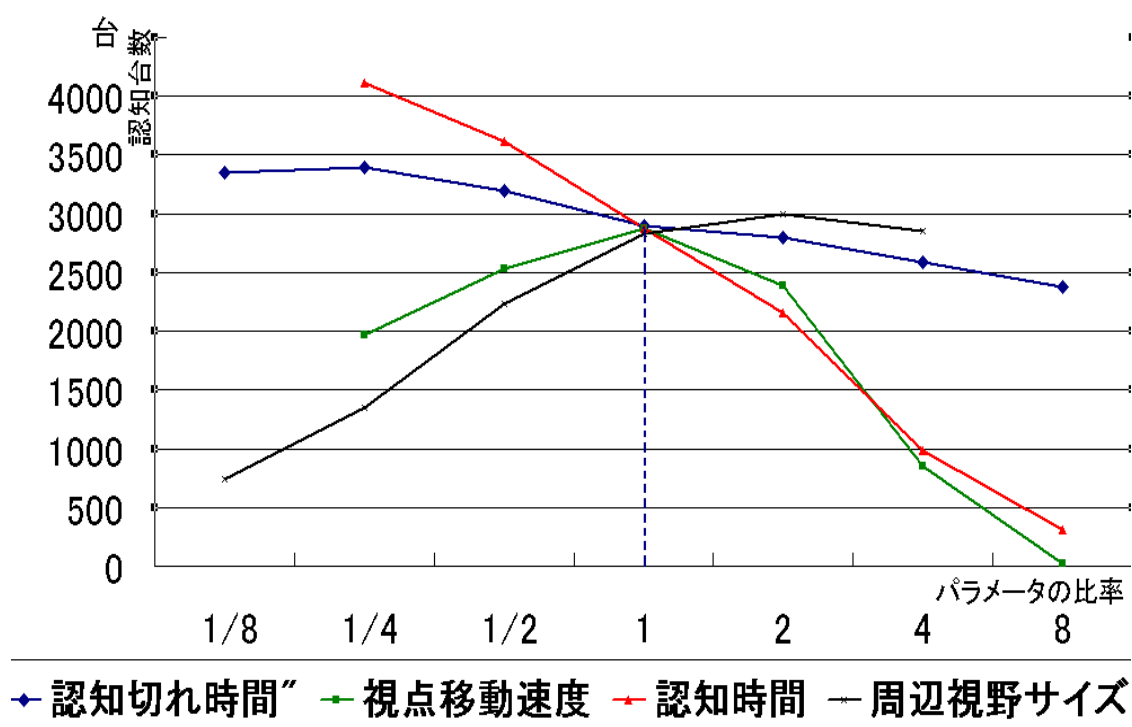


図 7-8 認知パラメータと認知台数の関係

パラメータの比率が 1 の部分のデータは同じものを用いたため、認知パラメータの値に関わらずパラメータの比率が 1 の時の認知台数は 2803 台となる。

7.5 考察

認知切れ時間

一度認知した車がずっと視界内に存在して認知切れ時間が経過し、再び認知した場合は認知台数に加える事になるため、認知時間が短い程、繰り返し同じ車を認知する現象が起き認知台数が増える。

視点移動速度

実現象では視点移動速度が速いほど認知台数は増加すると考えられるがグラフによると 4(ピクセル/0.1sec)をピークに減少している。これは 1 ステップで移動幅が大きすぎると対象物を飛び越し、認知できないことが原因と考えられる。高速な視点移動を実装するにはタイムステップをより小さく取る必要がある。

だが人間の視点移動速度である $40/10=4$ (ピクセル/0.1sec)では高い認知台数を保持していて、飛び越しが生じていないと考えられるので本研究においてこのタイムステップ幅は適切であることが分かる。

認知時間

認知時間は認知にかかる時間と認知台数の相関が強い。実際の運転においても毎回認知に 4 秒以上かかると危険である事は感覚的にも理解しやすい現象なのではないか。逆に 0.1 秒で毎回認知が出来る状態も人間の反応時間からするとありえない速度になるため、認知時間のパラメータは感度解析と実際の状況の両方を判断基準に限定していく事が出来る。

周辺視野

周辺視野が半分以下の場合、強い相関がある、遠く前方にある車は小さい周辺視野の大きさでもとらえられるが、それ以外の認知に支障をきたす事が分かる。

周辺視野が 2 倍以上において認知台数はほぼ変わらない、ある程度はなれた距離にある車は視野角 100 度の範囲で全てとらえる事が可能であると考えられる。しかし、この感度解析のモデルでは横からの急な飛び出しなどの場合でも視野角 100 度で認知出来ているのかは分からない。もしそういった場合に認知が出来ていなくても、この感度解析ではその様な状態が起こる割合が少ないからである。次の章では、周辺視野の大きさと事故件数の関係を調べる。横からの飛び出し時に認知が出来ない場合、事故につながるので、今回の感度解析よりは危険状態での認知状況をはかる事が出来る。

以上のような感度解析によって、パラメータの範囲をある程度限定することができ、シミュレータの性質を評価できた。次の章では認知台数の変化がシミュレータにおいてどのように事故につながるかを調べる。

ここで、本シミュレータの計算速度、1 ケースについてかかる計算時間について考察する。

7.6 補足 - 計算時間について

本シミュレータの認知モデルでは何台の車まで同時にシミュレーション出来るのであろうか。運転画面に関しては液晶に表示されなくても認知判定は可能であるので、ボトルネックは計算時間であると考えられる。

そこで、感度解析で用いたモデルを用いて車の台数を 5 台から 5 台ずつ増やしていき、実時間で 5 分の計算を行いシミュレーションにかかる時間を計測した。

その結果が図 7-9 である。単調増加していて、55 台を超えたあたりから計算時間がより増大している事が分かる。相関係数の正の高い相関があり、回帰分析の結果として(9)の回帰式が推定される。回帰式より $120.05 \times 5 \div 600 \text{ 秒} = 10 \text{ 分}$ であることから、5 台ごとに約 10 分、計算時間が増加すると考えられる。

$$\text{計算時間(s)} = -771.73 + \text{台数} \times 120.05 \cdots (9)$$

65 台において計算時間は 7860 秒=2 時間 11 分となり、感度解析に用いた 20 分の計算を 25 ケース行くと $2 \text{ 時間 } 11 \text{ 分} \times (20/5) \times 25 = 218 \text{ 時間} \div 9 \text{ 日}$ となり、現実的な計算時間である。

しかし、70 台を超えると計算が止まってしまう。原因についてはメモリの容量不足などが考えられる。また、計算が止まる問題を解決したとしても(9)の式を用いると 500 台の計算を行うには約 $500 \times 120.05 \times 25 \div 70 \text{ 日}$ となり、非現実的な計算時間となってしまう。このシミュレータを用いて広域な評価を行う際には並列化や GPU の利用が必須となるであろう。

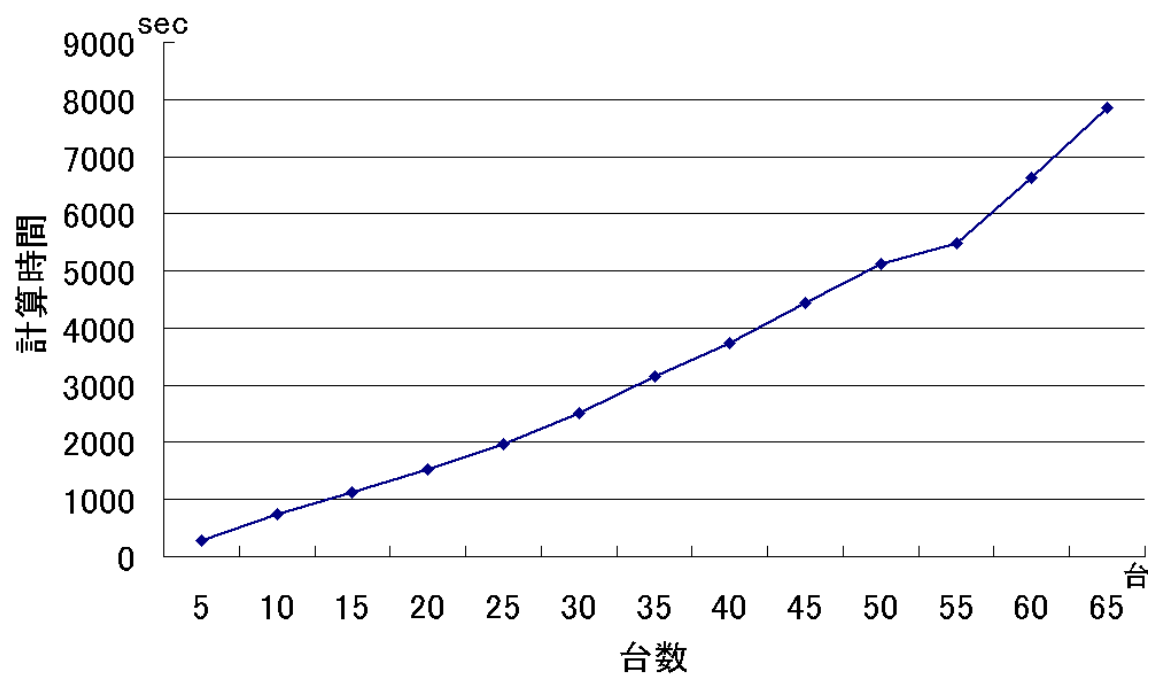


図 7-9 車両台数と計算時間の関係

8 シミュレータの利用例—高齢者の視野狭窄

8.1 高齢者の事故

我が国では社会全体の高齢化にともない高齢運転者による交通事故件数が近年増加してきている。図 8-1 は自動車の運転者が第一当事者である場合の交通事故件数の推移を3つの年齢層について示したものである。第一当事者とは交通事故に関与したものの中で過失が最も重いものの事をさす、過失が同程度の場合は人身損傷程度が軽いものとなる。図より高齢者による事故件数が顕著に増加している事がわかる。高齢化にともない事故件数は今後も増え続ける事が考えられる為、高齢者の認知に関する特性を評価し、それらの特性がどのように事故につながるかを評価していく必要がある。事故につながる特性を特定できれば、それを補助する ITS 技術としての役割も明確となる。

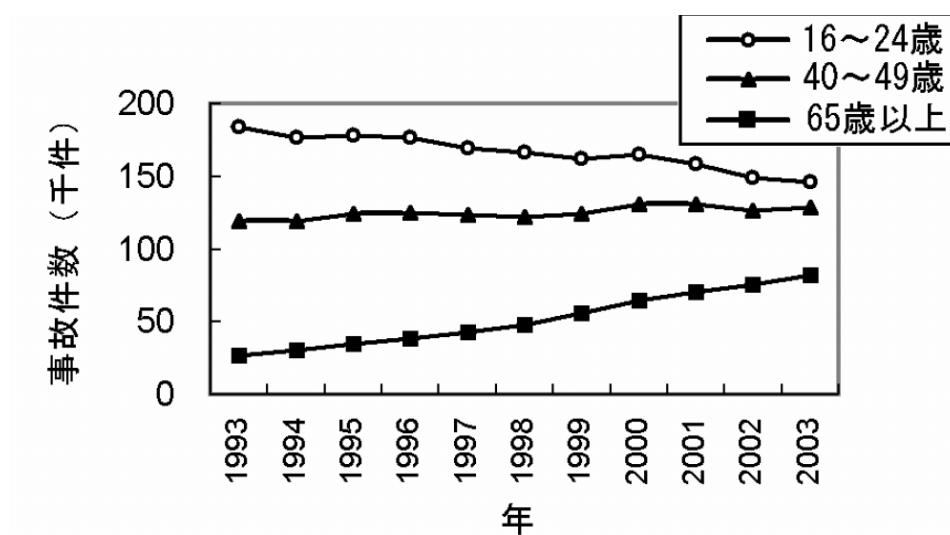


図 8-1 年代別事故件数の推移

高齢運転者の特徴として視力、有効視野、判断遅れ、視点移動速度の減少などが挙げられる。それらのパラメータを本シミュレータで再現し事故率の増減を評価する事で高齢運転者の運転特性と事故の関連性を調べ、高齢運転者を支援する為に有効なシステムについて評価する事が可能となると考えられる。

8.2 視野狭窄による周辺視野範囲

図 8-2 のように高齢者の視野範囲は若年者の四分の一以下である。この視野狭窄により運転時に注意すべき対象物に目が向かない等、様々な悪影響を及ぼすと考えられる。高齢者の視野狭窄による認知特性の違いに関する研究[29]はあるが視野狭窄の程度は言及しておらず、それが及ぼす影響の大きさも示されていない。本シミュレータを用いて視野狭窄の程度とそれに伴うリスクについて評価を行う。

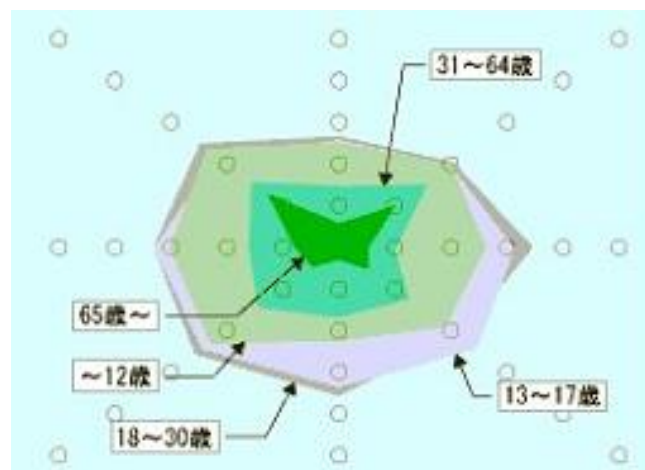


図 8-2 周辺視野の年代別比較

出典： 愛知工業大学 石垣尚男教授ヘルシスト156号

8.3 計算条件

7章と同じマルチエージェントモデルを用いる。周辺視野の大きさを変化させた時に事故の量がどれ程増加するかを評価する。車同士の距離が0.5m以下になった場合に衝突とし、40分間で事故が何件起こったかを測定する。また、判断モデルの性能を調べるために認知モデルを導入せず、常に全ての車の状況を認識できるモデルで同様の実験を実行した。

8.4 結果

図 8-3 は周辺視野の基準からの比率と事故台数の関係を表している。視野狭窄が進むほど事故の割合が増加していて、視野狭窄のリスクを確認できる。周辺視野の大きさが八分の一になると事故件数は4倍になっている。

また、周辺視野が2倍の場合では事故件数は少し増加しているがほぼ変わらない。どちらの場合においても事故はなくなり、一定数の事故が発生している。

シミュレーションの結果完全に認知が出来る状態でも、6件の事故が発生する事から本シミュレータで用いた判断モデルでは常に一定数の事故が発生する事がわかる。

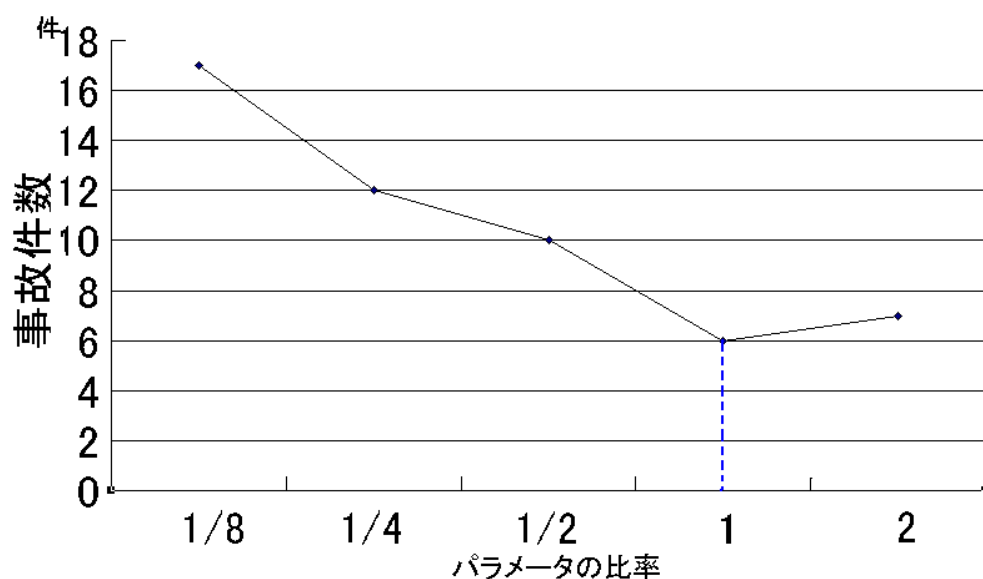


図 8-3 周辺視野の大きさと事故台数の関係

8.5 考察

事故件数が周辺視野の大きさに依存する事が確認できた。今後は定量性の確認が必要だが、これに ITS 機器による補助を導入してシミュレーションを行う事で、リスク減少効果を評価できるであろう。

周辺視野がいくら広くても、一定数の事故が発生している。その原因は判断モデルによるものと考えられるが、周辺視野をいくら広くしても認知漏れが生じている可能性も否定できない。認知漏れを調べるためには、常に全ての車の状況を認識できる判断モデルを実装していく必要がある。

周辺視野が 2 倍の場合でも事故件数はほぼ変わらず、図 3.3 の結果でも認知台数に殆ど変化がなかったことから、本モデルでは視野 100 度で運転中の視界がある程度網羅できていることが分かる。これが実現象に近い状態なのか検証出来れば、シミュレータの特性をより深く理解できると考えられる。

9 結論

本研究では運転手の視点から見た景色を OpenGL により毎ステップ画像を作成し、その画像を処理することで認知モデルを実装した。画像内を注視点が移動することで認知エラーを発生させ、見落としによる交通事故を実現できた。数台の車に目をとられ衝突してしまうデモにより、2次元幾何学モデルなどに比べても、より複雑な視覚的状况で起こる事故を再現した。

また、本シミュレータの注視点移動モデルにおける様々なパラメータの設定法を吟味する事で、

パラメータの取り得る値を限定し、シミュレータの性質を確認した。

そして、シミュレータの応用事例として高齢者の視野狭窄が運転に与える影響を評価した。視野が狭くなる程、事故件数が多くなったことから定性的に視野狭窄のリスクを評価するために本シミュレータを適用することの有効性を示すことができた。しかし、事故の件数はパラメータに左右される部分が多く、実験データが存在しないため定量的な妥当性を持たせることはできなかった。実験によって実現象をどれ程正確に再現できているかについて検証を行うことができれば、将来的には高齢者の視野の特徴による事故のリスクを定量的に評価出来るようになると考えられる。

今後の展望としては、視点からの画像内に ITS 機器による補助を実装することで ITS 導入の事故削減評価を行ったり、認知モデルに輝度差の概念を導入することで夜間走行時のリスク評価を行ったりといったことが考えられる。

参考文献

- [1] (社) 交通工学会編：「ITS インテリジェント交通システム」,丸善,1997.
- [2] 交通事故総合分析センター：ITARDA Information No.33 人はどんな時に事故を起こすのか,2001
- [3] B.D.Greenshields：” A Study in Highway Capacity” , Highway Research Board Proceedings, Vol.14, 1995
- [4] H. Greenberg：” An Analysis of Traffic Flow” , Operations Research, Vol.7, No.1,1959.
- [5] D. R. Drew：” Deterministic Aspects of Freeway Operations and Control” , Texas Transportation Institute, Research Report, 1965
- [6] J. D. Bolland, M. D. Hall, D. Van Vleet：SATURN: A Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Institute for Transport Studies Working Paper 106, Leeds University, 1979.
- [7] M. D. Hall, D. Van Villet, L. G. Willumsen：SATURN -A Simulation-Assignment Model for the Evaluation of Traffic Management Schemes, Traffic Engineering & Control, Vol. 21, pp. 168-176, April, 1980.
- [8] 吉井稔雄, 桑原雅夫, 森田綽之：都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発, 交通工学, Vol.30, No.1, pp.33-41, 1995.
- [9] C. C. Liu: Integrated Network Modeling with TRAF, Preprint at the Second Multinational Urban Traffic Conference, Beijing, China, May, 1991.
- [10] A. K. Rathi, A. J. Santiago: Urban Network Simulation: TRAF-NETSIM Program, Transportation Engineering, Vol. 116, No. 6, pp.734-743, 1992.
- [11] M. Van Aerde, S. Yagar: Dynamic Integrated Freeway / Traffic Signal Networks: A Routing-Based Modeling Approach, Transportation Research

- A, Vol. 22A, No. 6, pp. 445-453, 1988.
- [12] 藤井秀樹・仲間豊・吉村忍：知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES(Multi-Agent based Traffic and Environment Simulator)の開発,第2報：歩行者エージェントの実装と歩車相互作用の理論・実測値との比較、シミュレーション,Vol.25, No.4, pp.274-280, 2006
 - [13] 宗広祐司他：ドライビングシミュレータを活用した出会い頭事故のヒューマンエラー分析と対策の提案，土木学会，2006
 - [14] (財)交通事故総合分析センター：イタルダ・インフォメーション No43, 2003
 - [15] (財)交通事故総合分析センター：イタルダ・インフォメーション No56, 2005
 - [16] E.Hartman :”Driver vision requirements”, Society of Automotive Engineers , Technical Paper Series,700392,pp,629-630,1970
 - [17] Moreland,J.D,and Cruz,A,Colour perception with the peripheral retina,Optica Acta,6,117-151,1959
 - [18] Rovamo,J.and Raninen,A.Critical flicker frequency and M-scaling of stimulus size and retinal illuminance,Vision Res,24,1127-1131,1984
 - [19] Stabell,U.and Stavell,B.Wavelength discrimination of peripheral cones and ITS change with rod intrusion,Vision Res,17,423-426,1977
 - [20] 三浦利章,自動車運転時の視覚的探索特性 ,No.05-01,JSAE Symposium,pp35-41,2001
 - [21] 渡部,坂田,長谷川,吉田,畑田：“視覚の科学”, pp.43-51, 写真工業出版社 (昭 50)。
 - [22] 岩井栄一：パターン認識の神経機構 [I], 電子情報通信学会誌, 1, 66, 44-46 (1983)
 - [23] 菊池礼司：パターン認識の神経機構 [II], 電子情報通信学会誌, 2, 66, 173-178 (1983)
 - [24] 彦坂興秀：眼球運動と大脳基底核, 神経進歩, 6, 34, 953-961 (1990)
 - [25] 自動車安全運転センター：適正な車間距離に関する調査研究,2006

- [26] 国土交通省道路局：「道路統計年報」，2005
- [27] 沢喜四郎：交通安全概論,2007
- [28] 小高泰他：円滑追跡眼球運動と追従眼球運動の相互作用,旧電子技術総合研究所,彙報,2001
- [29] 森田和元他：高齢運転者の認知・操作特性に関する実験的検討、文部科学省技術振興調整費重要課題解決型プロジェクト，自動車安全研究領域,2006

謝辞

吉村先生、研究の大枠や方針を決める中で大変お世話になりました。シミュレータの感度解析の重要性を教えていただき、定性的な議論で終わらないためにやるべき事を色々教えていただきました。学会も含め論文提出ごとに文章の書き方についても詳しく指導していただき、ありがとうございました。研究に必要なことに関して多くの示唆を与えていただきました。秘書の井上さん、上さんには提出物遅れでご迷惑をおかけしました。

文屋先生、交通シミュレーションの基本的な所から論文提出の所まで全てを通してお世話になりました。研究方針が迷走していた頃何度も一緒に悩んで戴いて助かりました。困るとすぐ質問していましたが、そのたびに丁寧なご指導していただき感謝しております。

河合さん、視野モデルをシミュレータに導入するにあたって有益なアドバイスの数々ありがとうございました。OpenGLでの可視化のきっかけを与えていただきました。

杉本さん、研究室のゼミでは参考になる指摘の数々ありがとうございました。グラフの単位や計算条件など、基本的なことができていなかった私を鍛えていただきました。

川手さん、4階にいくと常にいらっしゃってのぞきに來ただけの僕にも毎回挨拶していただいて癒されました。研究室での生活面でお世話になりました。

藤井さん、交通シミュレータのモデリングについて参考になるアドバイスをいくつも戴きました。常に研究室にきていて院生のあるべき姿を教えてくださいました。

南さん、物理工学専攻からこられた南さんの研究発表はシミュレーションの研究室内ではとても刺激的で理数系の研究のありかたを学ばせていただきました。

犬塚さん、安藤さん M1 の頃から色々と面倒を見ていただきありがとうございました。研究室での過ごし方や研究の進め方など参考にさせていただきました。

留学生のさん Sena さん、Margon さん、英語が苦手な私とも意思疎通をはかって下さってありがとうございました。特に Sena さんは同じ階の住人だったこともあって、よく朝に話していましたね。

卒業論文生の舟山君、大島君、論文提出時期が近くて1月2月是一緒に苦労しました。土日に来てもらってくれて、孤独にならずに済みました。

最後に M2 の大貫君、木村君、小橋君、2年間ありがとう。特に M1 の頃は、授業関係や学会関係で色々お世話になりました。大貫君とは西表島に行きましたし、木村君とはゴルフ練習によく行きました、小橋君とは席が近くてお笑いの話から就職など将来の話まで色々しました。3人とも個性的で毎日会っていても話題が絶えず楽しかったです。今後も定期的にご飯食べにいたりしましょう。