



# オプティカル・フローを利用した自動車の自動操舵制御システムに関する研究

伊能, 寛

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2016-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6444号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006444>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



# 博士論文

オプティカル・フローを利用した  
自動車の自動操舵制御システムに関する研究

伊能 寛

平成 27 年 1 月

神戸大学



# 摘要

近年、自動車の安全性に対する社会的なニーズから、「運転支援」「予防安全」「衝突安全」といった高度な安全システムが車両に搭載されるようになってきた。このうち、「運転支援」はドライバ、すなわち人に対する支援を目的とし、ACC(Adaptive Cruise Control)、LKA(Lane Keeping Assist)、IPA(Intelligent Parking Assist)などが既に実用化されている。これら技術領域は、今後、ITS 技術、情報網の整備、インフラの充実などとともに、さらに発展していくことが期待される。

運転支援システムの開発において対象とする系は『人間・自動車・環境』の3つの要素を含むため、各要素の視点から系を深く理解しアプローチすることが重要であると指摘されているが、これら要素のうちヒューマン・ファクタは「Human, the Weakest Link」と呼ばれるように、システムの中に組み込むには多くの課題が残っている。運転支援サービスを享受するのが人である以上、人間に対する深い理解を元にシステムの仕様策定や設計に取り組むのが本来ならば望ましい。

そこで本研究では自動車を対象とし、人間が運転操作時に利用している情報を用いて車両を制御することで人と親和性の高いシステムの具現化を目的とした研究を行う。まず、実車試験を通して技量の高いドライバが運転に利用している視覚情報を特定し、解析的な手法によるモデリングを狙う。その際、ドライバが自己運動を特定するために利用していると考えられているオプティカル・フロー、およびフローの湧き出し点である FOE(Focus of Expansion)候補点群の特徴に着目して数式化を行った。次に実際の走行条件を考慮してオプティカル・フロー・モデルを元にした数値シミュレーションを行い、車両の運動状態とドライバの見えの関係について FOE 候補点群の振る舞いの観点から考察する。ここでは数値シミュレーションを通してドライバ特性の深い理解が可能になり、過去に提案されたモデルとの比較・検討を行い、車両運動制御への適用における妥当性を議論した。最後に車両の軌道追従制御を想定し、FOE 候補点群を自在に制御するための非線形制御則を設計し、自動操舵システムを構築する。制御則の収束性について物理的意味解釈を行い、軌道追従性能について机上で議論した後、実車両を用いた走行試験を異なる路面条件で行い、提案手法の有効性を検証した。

Dissertation for the degree of  
Doctor of Engineering

Researches of Automatic Steering Control  
Systems Using an Optical Flow Model

Hiroshi Inou

January 2015

Kobe University



# Abstract

Recently various driving support systems have been developed to improve safety and reduce driver's stress. For example, ACC (Adaptive Cruise Control), LKA (Lane Keeping Assist), IPA (Intelligent Parking Assist) have been developed and these are put to practical use. In the future, these technologies will be expected to develop further with the maintenance of the ITS technology, the information network and the enhancements of the infrastructure.

These driving support systems consist of the three factors, "Human factor, vehicle dynamics, and recognition of environment." A human factor is generally thought to be "The Weakest Link" among these factors. To build the human factor into the system, a lot of problems remain. But, it is necessary to design systems based on information that human driver perceives and gives better feeling of confidence.

The purpose of the paper is the realization of the vehicle control system with high compatibility with human. In order to clarify the information the human driver uses, we focused on optical sensation. In generally, it is said that human perceives self-movement using optical flow and FOE (Focus of Expansion). From these previous knowledge, we pose working hypothesis "an expert driver uses optical flow that reflects vehicle movement and eye movement", and constructed a driver model focused on optical flow and FOE (Focus of Expansion) candidate points. In this paper, numerical simulation was done to analyze the characteristic of optical flow and FOE candidate points, and the relation between vehicle motion and optical sensation of the driver was discussed. Considering the results of numerical simulation, we compare the optical flow model with the driver models proposed in the past, and examined the possibility to apply the optical flow model to a vehicle control system.

And after that, we proposed a nonlinear controller to apply the optical flow model to path tracking control. When applying the proposed nonlinear controller to a vehicle control system, it is necessary to analyze the convergence performance from the aspect of physics. After the convergence performance was revealed analytically, we implemented the nonlinear controller to a vehicle control system, and in-vehicle researches were performed. Then, the experimental results were also presented.



# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	4
1.3 本論文の構成 .....	4
<b>第2章 オプティカル・フローに着目したドライバ操舵モデル</b> .....	7
2.1 はじめに .....	7
2.2 ドライバの注視点選択方略分析 .....	8
2.2.1 ドライビングと注視点 .....	9
2.2.2 実験の目的 .....	11
2.2.3 実験参加者 .....	11
2.2.4 実験課題 .....	11
2.2.5 ドライバ注視点および車両挙動解析システム .....	12
2.2.6 車両挙動解析方法 .....	13
2.2.7 ドライバ注視点解析方法 .....	14
2.2.8 計測結果 .....	15
2.3 モデリング .....	19
2.3.1 オプティカル・フローと方向知覚 .....	19
2.3.2 作業仮説 .....	20
2.3.3 モデリング方針 .....	21
2.3.4 座標系設定 .....	21
2.3.5 仰角方向 FOE 候補点群のモデリング .....	22
2.3.6 方位角方向 FOE 候補点群のモデリング .....	24
2.4 モデルに基づくエキスパート・ドライバの運転分析 .....	26
2.5 おわりに .....	27
<b>第3章 自動車運転時のオプティカル・フロー・シミュレーション</b> .....	29
3.1 はじめに .....	29
3.2 オプティカル・フロー・モデル .....	30
3.3 オプティカル・フローと車両運動シミュレーション .....	32
3.3.1 実環境における運転操作 .....	32

3.3.2	シミュレーションのための数式化	33
3.3.2	クロソイド曲線走行時のフロー・シミュレーション	34
3.3.2	走行シミュレーション条件	36
3.3.3	走行シミュレーション結果	37
3.3.4	実環境における運転操作	38
3.3.5	スタビリティファクタ変動シミュレーション	38
3.3.6	スタビリティファクタ変動シミュレーション結果	39
3.3.7	FOE 候補点群と操舵操作についての考察	41
3.4	過去に提案された自動車-人間系モデルとの比較検討	43
3.4.1	オプティカル・フロー・モデルの特徴	43
3.4.2	タンジェント・ポイント	43
3.4.3	1次予測/2次予測 前方注視点モデル	44
3.5	おわりに	46
<b>第4章</b>	<b>オプティカル・フロー・モデル を利用した操舵制御システム</b>	<b>47</b>
4.1	はじめに	47
4.2	FOE 候補点群制御則の導出	47
4.2.1	方針	47
4.2.2	制御則の導出	48
4.3	目標軌道に対する収束性	52
4.4	ドライバ操作との比較	56
4.4.1	実験の目的	56
4.4.2	実験参加者	56
4.4.3	実験課題	57
4.4.4	車両挙動解析システム	57
4.4.5	各制御則による操舵指令生成	57
4.4.6	結果	59
4.4.7	実システムへの適用に向けた考察	63
4.5	自動操舵システムへの適用	64
4.5.1	システム構成	64
4.5.2	実車試験条件	66
4.5.3	実車試験結果	67
4.6	おわりに	69
<b>第5章</b>	<b>結言</b>	<b>70</b>

謝辭 .....	72
參考文獻 .....	73
研究成果 .....	78



# 目次

Fig.1.1:Overview of Driving Support Systems . . . . .	1
Fig.1.2: Overview of “Human-Vehicle-Environment”. . . . .	2
Fig.1.3: Overview of Preview Model. . . . .	3
Fig.2.1:Working Hypothesis. . . . .	8
Fig.2.2: Examples of Eye Movement While Driving a Car . . . . .	10
Fig.2.3:Overview of Experimental Course. . . . .	11
Fig.2.4:Gaze Direction Measurement System . . . . .	12
Fig.2.5:Vehicle Motion Measurement System . . . . .	12
Fig.2.6:Over View of Strategy for Trajectory Control . . . . .	13
Fig.2.7:Over View of Angular Difference . . . . .	14
Fig.2.8:Result of Ordinary Driver: Gaze Angle / Target Point Angle . . . . .	16
Fig.2.9 :Result of Ordinary Driver: Difference between Gaze Angle and Target Point Angle . . . . .	16
Fig.2.10: Result of Expert Driver: Gaze Angle / Target Point Angle . . . . .	17
Fig.2.11: Result of Expert Driver: Difference between Gaze Angle and Target Point Angle . . . . .	17
Fig.2.12: Comparison of Ratios of Pursuit Eye Movement . . . . .	18
Fig.2.13: Comparison of Most Approached Distance to CP . . . . .	18
Fig.2.14: 3D Point Cloud Simulation. . . . .	19
Fig.2.15:Working Hypothesis. . . . .	20
Fig.2.16:Definition of Coordination. . . . .	22
Fig.2.17:Relation between Inscribed Angle and Central Angle . . . . .	24
Fig.2.18: Tracks of FOE Candidate Points. . . . .	26
Fig.3.1:Definition of Coordination. . . . .	30
Fig.3.2: The road where curvature changes . . . . .	32
Fig.3.3: The road where the friction of the road changes. . . . .	32
Fig.3.4:Calculation Flow of Numerical Simulation . . . . .	35
Fig.3.5:Overview of Simulation Course . . . . .	36
Fig.3.6:Overview of Curvature . . . . .	36
Fig.3.7:Result of Curve Running Simulation (Entrance). . . . .	37
Fig.3.8:Result of Curve Running Simulation (Exit). . . . .	37

Fig.3.9:Overview of Simulation Course . . . . .	38
Fig.3.10:Behavior of Stability Factor. . . . .	39
Fig.3.11:Simulation Result of Yaw Rate . . . . .	40
Fig.3.12:Simulation Result of Slip Angle . . . . .	40
Fig.3.13:Simulation Result of FOE Candidate Point . . . . .	40
Fig.3.14:Result of Curve Running Simulation (Condition1) . . . . .	42
Fig.3.15:Result of Curve Running Simulation (Condition2) . . . . .	42
Fig.3.16:Result of Curve Running Simulation. . . . .	44
Fig.3.17:Overview of Preview-Driver Model . . . . .	45
Fig.4.1:Definition of Coordination . . . . .	48
Fig.4.2: Single-Track Model . . . . .	51
Fig.4.3: Definition of Arrangement . . . . .	52
Fig.4.4:Definition of Polar Coordination . . . . .	53
Fig.4.5:Experimental Course . . . . .	56
Fig.4.6: Vehicle Motion Measurement System . . . . .	57
Fig.4.7:Experimental Result of Preview Model Control (Ordinary) . . . . .	60
Fig.4.8:Experimental Result of FOE Candidate Points Control (Ordinary) . . . . .	60
Fig.4.9:Experimental Result of Preview Model Control (Expert) . . . . .	60
Fig.4.10: Experimental Result of FOE Candidate Points Control (Expert) . . . . .	60
Fig.4.11:Comparison of RMSE(Preview Model Control: T=1). . . . .	61
Fig.4.12: Comparison of RMSE(FOE Candidate Control: T=1) . . . . .	61
Fig.4.13:Comparison of RMSE (Preview Model Control: T=4) . . . . .	62
Fig.4.14: Comparison of RMSE(FOE Candidate Control: T=4) . . . . .	62
Fig.4.15 : Dry Pavement . . . . .	64
Fig.4.16:Snow Covered Pavement. . . . .	64
Fig.4.17: System Configuration . . . . .	64
Fig.4. 18: Definition of Arrangement. . . . .	65
Fig.4.19: Overview of Curvature of the Road . . . . .	66
Fig.4. 20: Result of Optical Flow Generated at Target Point (Dry) . . . . .	68
Fig.4. 21: Result of Lateral Error (Dry) . . . . .	68
Fig.4. 22: Result of Optical Flow Generated at Target Point (Snowy) . . . . .	68
Fig.4. 23: Result of Lateral Error (Snowy) . . . . .	68

# 表目次

Table 2. 1:Simulation Parameter .....	33
Table 4.1:Control Gain of $Kd / K$ (Ordinary).....	58
Table 4.2:Control Gain of $Kd / K$ (Expert).....	58
Table 4.3:Control Parameter.....	58
Table 4.4: Control Parameter .....	66



# 第 1 章 序論

## 1.1 研究背景

近年，自動車社会において世界の自動車保有台数は年々増加しており，2012 年には 10 億台を超えた[1]．日本国内でも保有台数は 7 千 500 万台を超え，自動車は人々の生活に欠かすことのできない存在となったと言える[3]．このように急速に普及を拡大している自動車の基幹機能を支える技術的背景には，「走・曲・止」を統合的に管理する電子制御技術の発展が挙げられる．2000 年代に入り，欧州を中心とした電子プラットフォームの標準化活動に代表されるように[2]，自動車の魅力の向上や安全性といった機能面に対する市場の要求を満たす上で，電子制御技術は大きな役割を果たしており，これにより「運転支援」「予防安全」「衝突安全」といった先進的で高度な安全システムを車両に搭載することが可能となり，ACC(Adaptive Cruise Control)，LKA(Lane Keeping Assist)，IPA(Intelligent Parking Assist)などは既に実用化されている(Fig. 1. 1)．



**Adaptive Cruise Control**



**Pre-Crash Safety (Vehicle)**



**Lane Keeping Assist**



**Pre-Crash Safety (Pedestrian)**

Fig.1.1:Overview of Driving Support Systems

これら高度先進安全システム領域は、今後、ITS 技術、情報網の整備、インフラの充実などと共に更に発展していくことが期待され、各個別システムをより高いレベルで統合した自動運転システムについても米運輸省の国家道路交通安全局（National Highway Traffic Safety Administration = NHTSA）により明確な技術レベルが定義されるなど[4]、技術領域のみならず、法整備や社会的受容性に関する検討といった実用化に向けた動きは活発化している。

自動運転に代表される高度先進安全システムは、交通事故の低減といった安全を保障することは当然のこと、ドライバの認知-判断-操作の一部をシステムが肩代わりすることで、ドライバのフィジカル・メンタルワークロードを低減させ、乗員にとって快適で安心なドライブを提供する必要がある。このとき対象とする系は『人間・自動車・環境』の3つの要素を含むため、各要素の視点から系を深く理解しアプローチすることが重要であると指摘されているが、これら要素のうちヒューマン・ファクタは「Human, the Weakest Link」と呼ばれるように(Fig. 1.2)、システムの中に組み込むには多くの課題が残っている[5]。そのため、こういった人間-機械系の研究においては、過去、工学分野のみならず、心理学など複数の学問領域に跨り人間特性が検討されてきた。

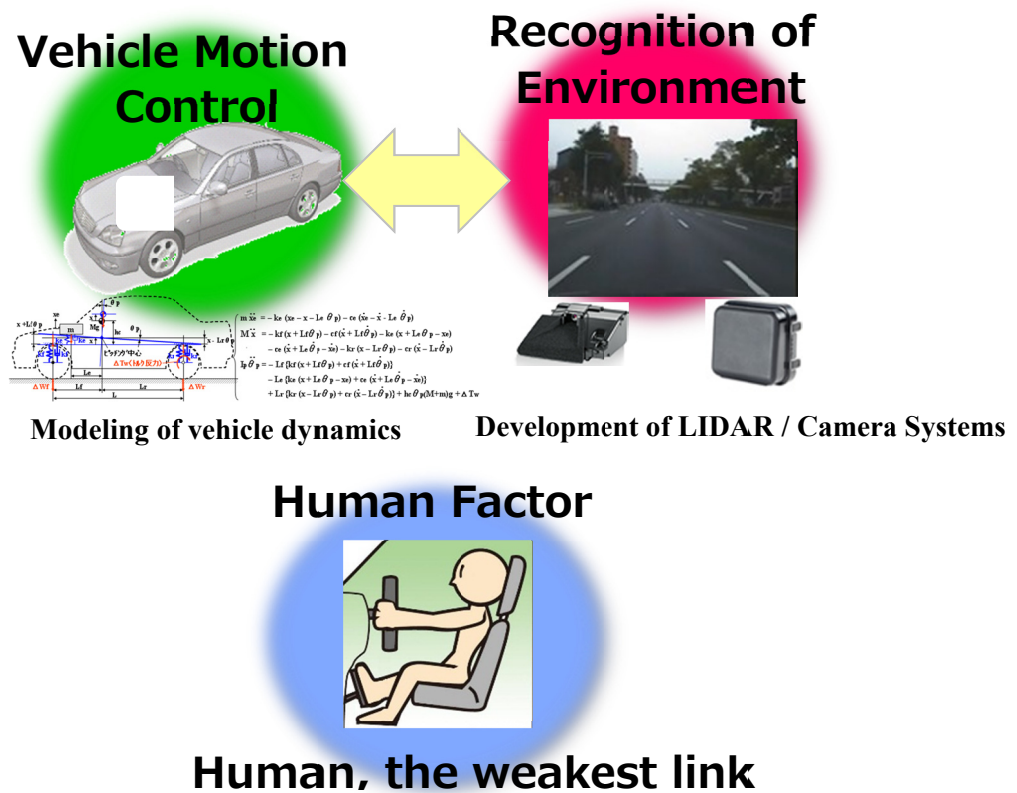


Fig.1.2: Overview of “Human-Vehicle-Environment”

心理学分野において、Gibson は航空機のパイロットの操縦を対象に、視覚による運動知覚について研究し理論的検討を加えた[13]. 環境側に内在する情報を如何に抽出し自己運動を知覚するのか、また、その知覚情報を次の行為や運動にどう利用するのか、という観点から知覚情報と運動制御との循環的な閉ループ関係に言及し、後にアフォーダンスや生態心理学と呼ばれる分野の礎を作った. その後、ドライバの注視方向と操舵角方向の相関関係について、静的なコーナー形状から説明した Lee らのタンジェント・ポイントなどがよく知られている[9].

工学分野では車両運動制御の観点からドライバの運転方略を理解しようとする近藤らの1次予測に基づいた前方注視点モデル、その発展系である2次予測モデル[6]などが実装上の有効性もあり盛んに研究されてきた(Fig. 1.3). これらは人間-自動車系の安定性分析に応用され、藤岡らは過去複数提案された前方注視点モデルの適合パラメータにおいて理論的な安定限界を示した[11]. また、車両運動制御の観点のみならず、AFS(Adaptive Front light System)といった可変灯火制御の指標としても利用されている[12].

これら先行研究は、ドライバの視覚情報に着目し、道路の幾何学形状と車両挙動をどのようにマッチングさせるか、という問いにアプローチしてきた. 一方、今後、高度先進安全システムで重要となるワークロードの低減や乗り心地を改善するためには、これら従来のアプローチに加え、より高度な運転方略をシステムに取り込まなければならない. すなわち、エキスパート・ドライバの高い運転技量を深く理解することが重要であるが、これについては十分な検討がなされているとは言い難いのが現状である.

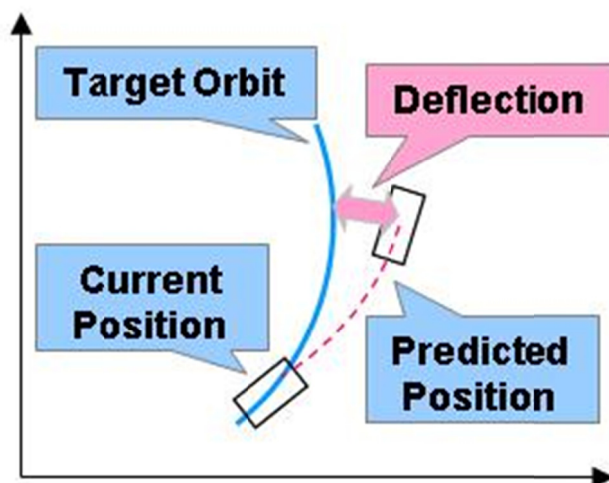


Fig.1.3: Overview of Preview Model

## 1.2 研究目的

運転技量は車両挙動，ひいては乗員の乗り心地の差異として明確に表れるため，「エキスパート・ドライバが一体どのような情報を知覚し，運転操作に利用しているか」を明らかにし，その情報を積極的に利用して車両を制御することができれば，乗員にとってより違和感がなく，かつ，高い制御性能を有する運転支援システムを構築できる可能性がある。

本研究では，エキスパート・ドライバの高度な運転方略に着目し，運転に利用している情報の特定・モデリングを通した目的変数の明確化，および車両の運動特性を考慮した制御則の提案，最後に実際の車両制御システムへ適用し評価を行うことで，人間と親和性の高い運動制御システムの具現化を進める。

エキスパート・ドライバと一般ドライバの差異が最も顕著に表れやすいのが，旋回時における車両コントロールである。エキスパート・ドライバは，旋回のための最適な車両姿勢，前後運動と横運動の適切なカップリングによるスムーズで違和感のない挙動を極めて短い時間で判断し実現する。また，雨や雪，凍結しているような未知の路面であっても適応的に動作しながら不安定になることなく，目標走行ラインへ精度よく追従していく。

エキスパート・ドライバが運転に利用している情報で車両を制御できれば，走行環境に適応しながら，かつ，乗員に違和感を与えない制御を実現できるのではないかと考える。経験的に，走行環境の条件が悪化するに従い，運転者の肉体的・精神的疲労は指数関数的に増加していくためドライバ支援の観点からもこのようなアプローチは有効である。このような考え方により，本研究では，駆動・制動・操舵といった基本性能のうち，まずは対象領域を操舵制御と設定し，エキスパート・ドライバの旋回運動時の視知覚に焦点を絞り，自動操舵システムへ適用することを本研究の目的とする。

## 1.3 本論文の構成

本章に続いて，本論文は以下のように構成されている。

第2章では，実車試験を通しコーナリング時のエキスパート・ドライバの注視点選択について分析し，モデリングを行う。RTK-GNSS (Real Time Kinematic GNSS)，高精度ジャイロおよび注視点計測装置を利用し，実車試験を実施，車両挙動とドライバの注視点選択行動について統合的に分析を行う。特にエキスパート・ドライバが高精度のラインレースを行う時に見られるクリッピング・ポイントの追視と，そのときの目標軌道への追従精度について，定量的に評価する。次に，自己運動感覚を支える視覚情報としてオプティカル・フローの湧き出し点 (FOE: Focus Of

Expansion) に着目し、解析的にモデリングする。このとき車両運動によって発生するオプティカル・フローだけでなく、ドライバの追視行動によるフローも考慮して数式化する。モデリングを通して、自己運動という観点からオプティカル・フローの運動における物理的意味を再解釈することで、方向知覚のメカニズムについて明らかにする。最後に、この結果を通してエキスパート・ドライバが行っている走行ラインのトレース戦略について、車両ダイナミクスの観点から考察を行う。

第3章では、オプティカル・フローを利用した高精度なライントレース戦略について、実環境を想定し、数値シミュレーションを通して検討することで車両運動制御の指令値として利用できるか検討を加える。オプティカル・フローは通過する目標点をどこに設定するか、というドライバ意図を反映した上で、視覚感覚情報と運転操作戦略が密結合している変数であり、これをうまく制御することで高精度なライントレースを実現できる。一方、制御指標として適用する際には、走行路の曲率変化や、路面状態の影響で車両挙動が変動する場合など、実環境を想定した検討を進めることが重要となる。

そこでオプティカル・フローが実環境でどのような特徴を示すか、また、車両運動とどのような関係があるのか、車両の運動学・動力学を考慮した数値シミュレーションを通して分析する。このとき、路面状況の変化を想定しスタビリティファクタを変動させた場合についても目標軌道へ収束できるかについて考察する。また過去に提案された自動車-人間系のモデルとの関係についての考察を通し、制御指標としての妥当性についても検討する。特に工学的な応用について十分な実績がある前方注視点2次予測モデルとの比較、また、心理学分野で提案されているタンジェント・ポイントについてもオプティカル・フローの観点から解釈を加える。

第4章では、オプティカル・フローを制御するために非線形制御手法を提案した後、車両制御則の有効性を検討する。一般に画像情報を制御に利用するための手法としては、下記2つが存在する。

- ①カメラでオプティカル・フローを認識、位置情報を介さず画像上で直接制御を行う Image-Based Control
- ②カメラで認識した白線情報などから、位置情報へ変換し制御を行う Position-Based Control

本研究では、このうち人間の「見え」に近い情報を利用する Image-Based Control を採用する。Image-Based Control ではドライバと親和性の高い制御を構築できる可能性があるが、フロー・ベクトル演算を高精度かつ実時間で解くことに加え、環境外乱への頑健性への対処といった実装上の技術課題も存在する。そこで本論文では Image-Based Control で制御則を導出した後、安定したセンシングが可能な位置

情報や運動情報を用いて制御則を変換する手法を採用する。これにより制御則の物理的な解釈や理解が可能となると共に、将来的には GNSS や LIDAR といった位置計測可能な他の環境認識センサでも実現できるなどの利点がある。

前記手法で制御則を導出した後、同制御則をベースに所望の旋回半径への収束性について分析する。オプティカル・フローの制御則の収束性を解析的に証明することに加え、ドライバが運転に利用している視覚情報についても物理的な解釈を行う。

次に複合コーナー走行時の車両運動データを基に、非線形制御則から舵角指令値を算出し分析する。このとき、ドライバ操舵、および、従来幅広く利用されてきた前方注視点 2 次予測モデルと比較することで、ドライバの操作とのマッチングと車両運動制御に適用したときの特徴などを明確にしておく。

最後に自動操舵システムに適用した場合の目標経路への追従性能について、ドライ路面(路面摩擦係数  $\mu = 1.0$ ) / 及び圧雪路面(路面摩擦係数  $\mu = 0.2$ ) といった路面状態が異なる場合を対象に実車試験を実施し、制御則の有効性について検討する。

第 5 章では最後に考察および今後の展望を述べる。

# 第2章 オプティカル・フローに着目した ドライバ操舵モデル

## 2.1 はじめに

人間-自動車系の研究は、過去、工学分野のみならず、心理学など複数の学問領域に跨り検討されてきた [6][9]。これら先行研究は、ドライバの視覚情報に着目し、道路の幾何学形状と車両挙動をどのようにマッチングさせるか、という問いにアプローチしてきた。また、小島[10]らは運転技量にまで言及し、走行試験を通して熟練者と初心者における注視特性 / 運転特性の差異を示した。しかし、運転技量に応じた視知覚の差異が、運転戦略にどう影響するかについては十分な検討がなされていなかった。

運転技量は車両挙動、ひいては乗員の乗り心地の差異として明確に表れるため、「エキスパート・ドライバが一体どのような情報を知覚し、運転操作に利用しているか」を明らかにし、その情報を積極的に利用して車両を制御することができれば、乗員にとってより違和感のない運転支援システムを構築できる可能性がある。

コーナリングをはじめとする旋回制御では、自己運動の方向を知覚することが重要となる。工学/心理学分野では、オプティカル・フローによる方向知覚の研究が数多くなされてきたが眼球運動がオプティカル・フローにどのような影響を与えるかなど議論が分かれる部分も多い[14]。

このような背景より、本研究では、まず、実車試験を通しコーナリング時のエキスパート・ドライバの注視点選択について分析する。次に自己運動の方向知覚のメカニズムを明らかにするため、注視点選択方略を反映したオプティカル・フローをモデリングする。最後に、走行ラインのトレース戦略について、オプティカル・フロー・モデルによる解析的な分析に加え、車両のダイナミクスの観点から考察を行う。

## 2.2 ドライバの注視点選択方略分析

注視点を適切に選択することは巧みな運転操作を行う上で重要であり、運転技量の違いは、ドライバの注視点選択方略の差異としても表れている可能性がある。作業仮説を Fig. 2.1 に示す。ドライバは運転中、走行環境を知覚し注視点を選択する。選択した注視点を元に運転戦略が決定されアクセル・ブレーキ・ステアリング操作が行われる。これらドライバ操作の結果、車両挙動が変化し、走行環境情報の変化としてドライバは知覚することができる。このようにドライバの環境知覚-運転操作: 知覚と行為は連続的に行われている中で、最も重要であるのが注視点の選択であろう。遂行的な操作に入る前の運転戦略の決定のフェーズで利用されるため戦略形成の根幹を成していると考えられる。本節では、このような運転技量と注視点選択の差異を明確にすることを目的に、実車試験を通し分析を行う。

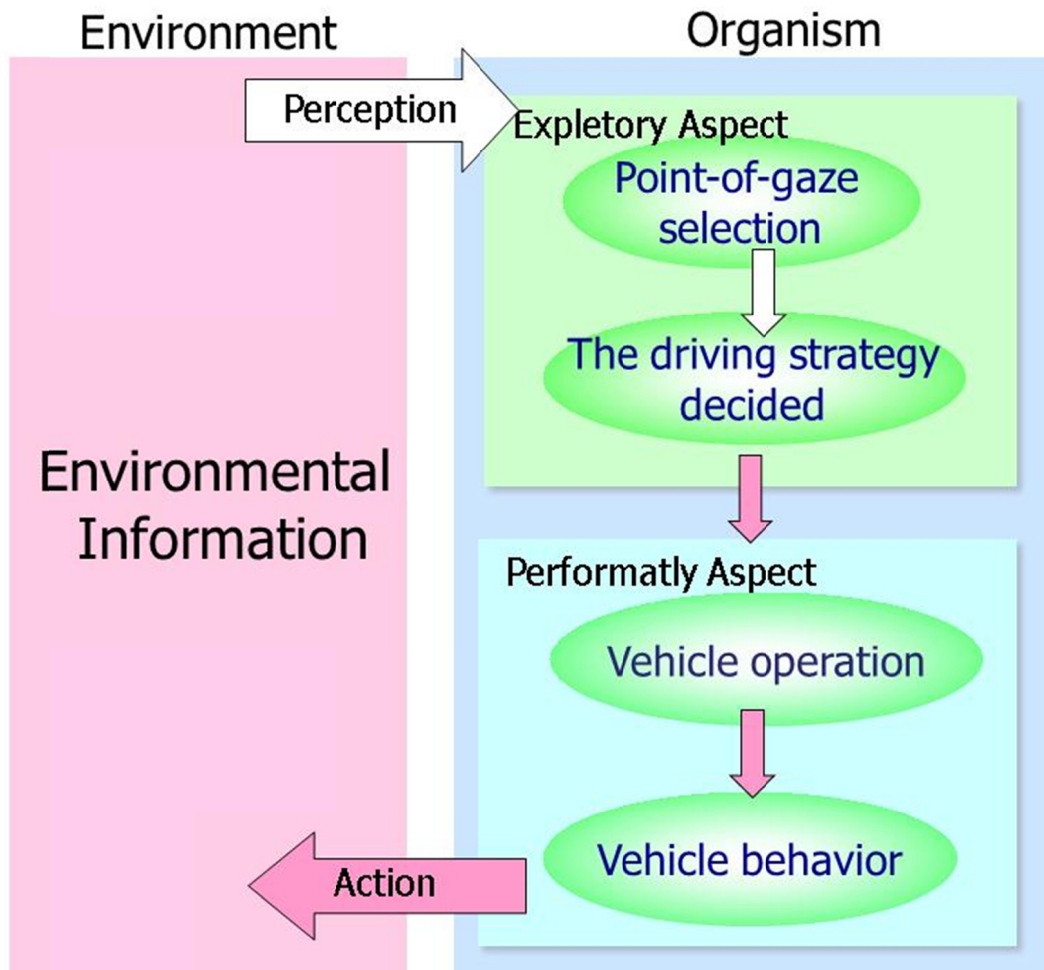


Fig.2.1:Working Hypothesis

## 2.2.1 ドライビングと注視点

運転中のドライバの注視点を分析する前に、随意的な2種類の眼球運動について整理する。ドライバの随意的な視線移動/注視点選択には、①注視方向を急速に変化させる衝動性眼球運動（サッカード）、②運動する視対象を網膜中心窩に保持するための追従性眼球運動（スムースパシュート:以下パシュート）があり、ドライバは運転中、サッカードとパシュートを適切に使いわけ、運転戦略を組み立てている。サッカードとパシュートにおける特徴を下記に示す。

### ① 衝動性眼球運動（サッカード：Saccade）

注視位置を横方向、縦方向、斜め方向に変える際に生じる急速な目の動き。Saccadeの最高速度は振幅により変化し、5degでは250deg/s、20degでは650deg/sとなる。刺激の位置情報に基づいて生起、潜時は200ms程度。また、頻度は最大で1秒間に5回程度。また、2つの視覚標的を呈示されると、最初のSaccadeは2つの指標の中間位置に向かう。SaccadeにはSaccade Suppressと呼ばれる特徴的な感度低下現象があり、これによりSaccade中の網膜像は抑制され、知覚されない。

### ② 滑動性眼球運動（パシュート：Smooth Pursuit Movement）

運動する視対象を網膜中心窩に保持するための随意性の眼球運動。Pursuitによる追視は30deg/sまで可能であるが、指標の動きに追いつかない場合はしばしばSaccadeで補われる。また、運動指標の速度情報によって生起、潜時は100~150ms程度。また、必ずしも中心窩に明確な視覚目標が現れる必要はなく、4deg~15deg隔たった2指標の midpoint: 仮想の指標に対しても起こる。テレビの砂嵐に一団の特異な固まりが知覚されるや否や、その集団の仮想的な動きに追従する滑動性眼球運動が現れる。このように、ゆっくりと移動していると知覚される対象に対して滑動性眼球運動は生成される。

具体的な運転のシチュエーションでの例として、交差点と高速道路でサッカード/パシュートがどのように利用されているかについて Fig.2.2. に示す。サッカードでの随意的な眼球運動をS, パシュートでの運動をPとしている。Fig. 2.2に示すように瞬間的な視線の移動はサッカードで、対象物を追視する視線移動はパシュートで行われており、多くのシチュエーションでこれら随意的な眼球運動を利用していることが理解できる。

### < Intersection >



### < Expressway >



Fig.2.2: Examples of Eye Movement While Driving a Car

本実験では、エキスパート・ドライバーが走行ラインを精度よくトレースする運転を行うとき、これら随意運動をどのように利用しているのか、特にパシュートによる追視行動に焦点を当て、車両挙動と合わせ解析を行う。

## 2.2.2 実験の目的

エキスパート・ドライバと一般ドライバといった技量の違う2群のデータを分析し、技量に応じた注視点選択戦略をより明確にすることを目的とし実験を行う。

## 2.2.3 実験参加者

文書によるインフォームド・コンセントを得た20代～40代の健常成人12名を対象とした。うち6名は、特別な運転訓練を受け、製品評価に従事しているエキスパート・ドライバであり、残り6名は普通運転免許を所有しているが、運転暦は様々である一般ドライバとした。

## 2.2.4 実験課題

実験はデンソーが所有するテストコースにパイロンコースを設置し実施した (Fig. 2.3)。パイロンコースは旋回半径50Rの直線-旋回-直線の単コーナーとした。定常状態を作りやすいように旋回に入る前の直線を100m程度確保しており、車両挙動を安定化させてから旋回試験を実施できるよう配慮した。また、コーナーの入口、出口には道路幅を規定するためゲートとしてのパイロンを4m幅で置いた。実際の一般道/高速道路の設定より道路幅を広めに設定することで、ライン取りに幅を持たせ技量の差異がより明確になると考えた。

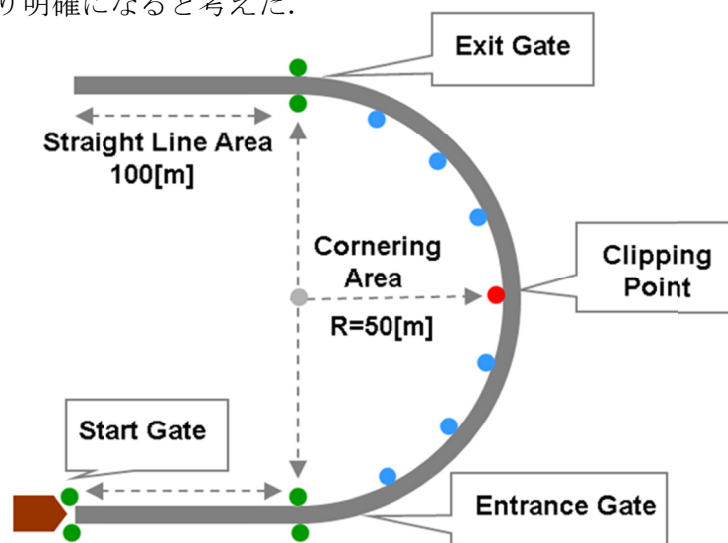


Fig.2.3: Overview of Experimental Course

実験参加者には、走行ラインをトレースするための課題として、アウト-イン-アウトの走行ラインを意識して運転するよう教示した。また、速度を意識し過ぎ、メータを注視してしまうことを避けるため 40km/h~50km/h を目標速度域として教示した。順応を避けるためテスト走行については必要最小限とした。

## 2.2.5 ドライバ注視点および車両挙動解析システム

眼球運動の計測にはナックイメージテクノロジー製の注視点計測装置 EMR-9 を用い(Fig. 2.4)、カメラで計測した頭部運動データと合わせて車軸基準の注視角度を算出した。また、VRS-GNSS (Virtual Reference Station GNSS) を車軸上に前後2つ取り付け(Fig. 2.5)、車両の位置と角度の計測を行った。VRS-GNSS はリアルタイムキネマティック測位相当の補正情報をネットワーク経由で取得し、高精度実時間測位するシステムで、オープンスカイで衛星配置が良好な場合、位置精度は $\pm 2.5$  cm、角度精度は $\pm 0.1$  deg 程度で計測することが可能である。



Fig.2.4:Gaze Direction Measurement System



Fig.2.5:Vehicle Motion Measurement System

## 2.2.6 車両挙動解析方法

コーナリング時において、技量の差異を説明する変数としては G-G ダイアグラムや、横加速度の変動など様々提案されている。しかし、アウト-イン-アウトの走行ラインを選択した場合 (Fig. 2.6), 技量が最も明確に出るのは、コーナーの内側に最接近するクリッピング・ポイント (以下 CP) との位置関係である。CP により接近することができれば、旋回半径を大きくとることができ、結果として、大きく減速せずとも横加速度/加速度の最大値を抑えられるといった車両運動・乗り心地の両側面から効率的・経済的な運転を実現できる (Fig. 2.6)。

このような理由から、旋回中ドライバーが強く意識するであろう CP までの角度、CP からの横偏差、コーナー出口までの角度を、高精度地図データと走行中の VRS-GNSS データより算出し、注視点計測データを時間同期させて解析する。

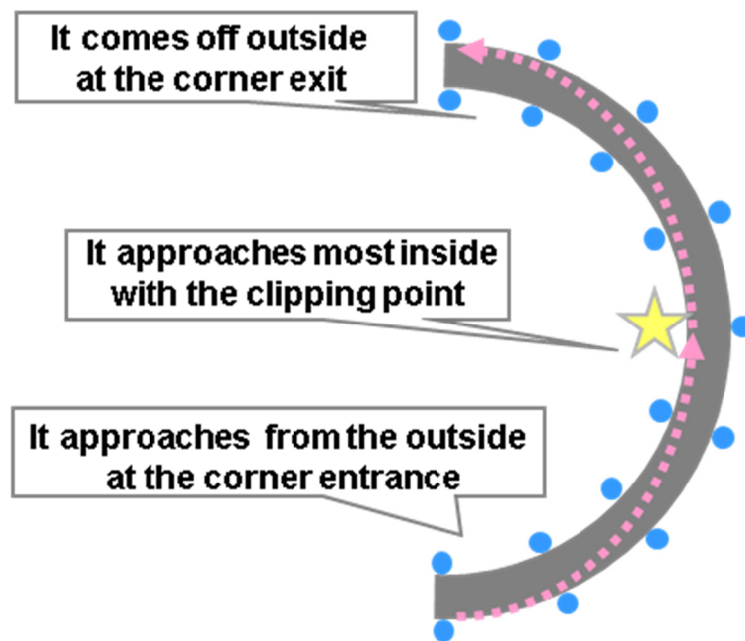


Fig.2.6:Over View of Strategy for Trajectory Control

## 2.2.7 ドライバ注視点解析方法

ドライバの随意的な視線移動のうち、サッカードの最高速度は振幅により変化し、5deg で 250deg/s, 20deg で 650deg/s 程度であり、高速な視線移動が可能である。パシユートによる追視は 30deg/s まで可能であるが、それを越え指標の動きに追いつかない場合はしばしばサッカードで補われる。パシユートは必ずしも明確な視覚目標のみを対象とせず、数 deg 隔たった仮想の目標に対しても起こる。

ドライバが CP やコーナー出口をどの程度パシユートで追視しているかを解析するため、注視角度と CP までの角度偏差、注視角度とコーナー出口までの角度偏差を演算する (Fig. 2.7)。パシユートに準ずる追視行動の判定については、追視可能な 30 deg/s 以下、また、明確な視覚目標から多少乖離した場合でも発生するため、角度偏差は 5deg 以下とした。

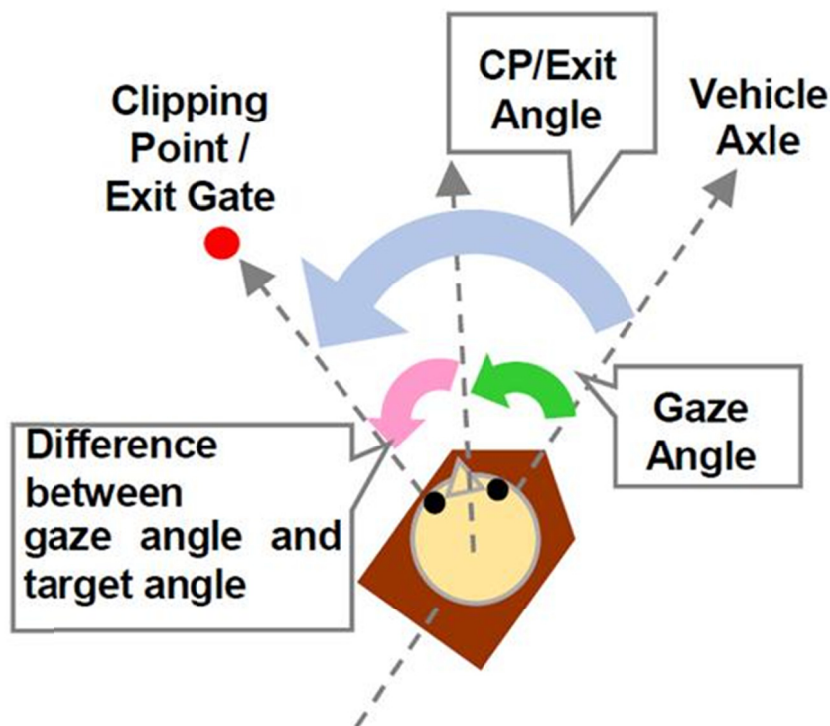


Fig.2.7:Over View of Angular Difference

## 2.2.8 計測結果

エキスパート・ドライバ/一般ドライバそれぞれ1名のデータを例として示す。コーナー入口のポイントが時間軸の原点となるようにし、コーナー出口に至るまでを切り出して表示した。このとき、車両がCPに再接近するタイミングを線で示した。どの程度対象を追視しているか直感的に理解し易いよう、計測した注視角度と、CPまでの角度、コーナー出口までの角度を合わせて表示した(Fig. 2.8, Fig. 2.10)。また、ドライバの注視点の移動速度を演算し、注視角度とターゲット(CPおよびコーナー出口)との角度偏差を示した(Fig. 2.9, Fig. 2.11)。なお前節で示したパシュートに準ずる追視行動を判定するための条件を満たす領域を網掛けで示している。

一般ドライバの注視点は、ある注視角度(=25 deg程度)付近を中心に推移するプロファイルであった(Fig. 2.8)。ラインをトレースする直前のみ、ターゲットとするCPとコーナー出口付近を見てはいるものの、長い時間追視することはせず走行していた(Fig. 2.8)。

エキスパート・ドライバの注視点はCPを通過する数秒前から次第に注視角度は減少し、CP通過直後に増加、また出口に向けて減少していくプロファイルであった。これはCPおよびコーナー出口を追視していることを示している(Fig. 2.10)。

また、ラインをトレースする際にターゲットとなるCPやコーナー出口への視線の移動速度も比較的緩やかで、ターゲットとの角度偏差が小さい値で推移するなど(Fig. 2.11)、パシュートによりターゲットを追視する眼球運動が発生している場合の特徴的な動きが発生していた。

各実験において、技量とパシュートの関係を分析するため、コーナー入口から出口まで抜ける時間に対し、パシュートに準ずる眼球運動を行っている時間の割合を算出し、エキスパート・ドライバ(6名)と一般ドライバ(6名)のデータにMann-Whitney検定を行った。結果をFig. 2.12に示す。この結果より、エキスパート・ドライバは一般ドライバよりパシュート運動を多く行っていることが確認できた(有意確率 $p < 0.01$ )。また、このときのCPへの近接距離に対しても同様の検定をかけた結果(Fig. 2.13)、エキスパート・ドライバの方がCPに接近したラインで走行していたことが分かった(有意確率 $p < 0.01$ )。

これらから、エキスパート・ドライバは一般ドライバに比べ対象を追視するような追従性眼球運動を多く行っており、また、同時にCPにより近接するような効率的な軌道で、運転していることが分かった。

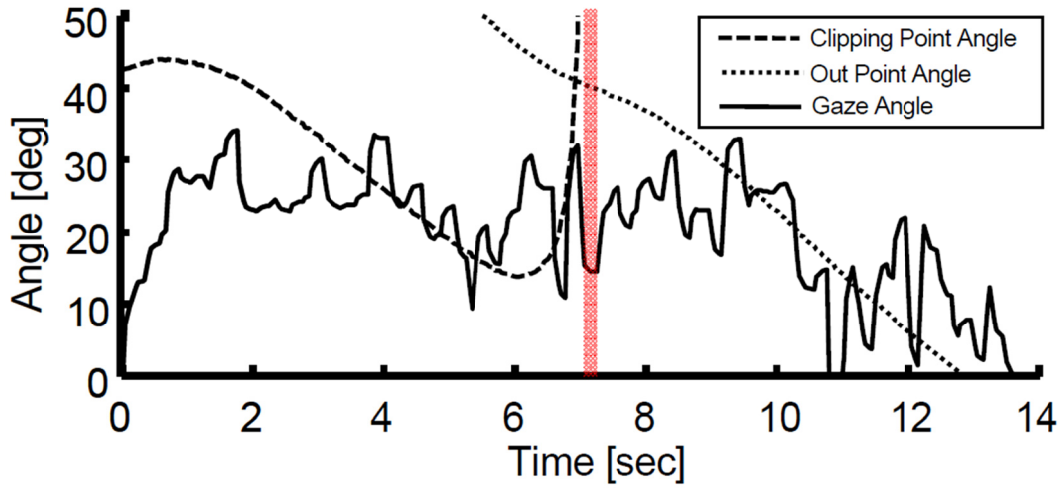


Fig.2.8:Result of Ordinary Driver: Gaze Angle / Target Point Angle

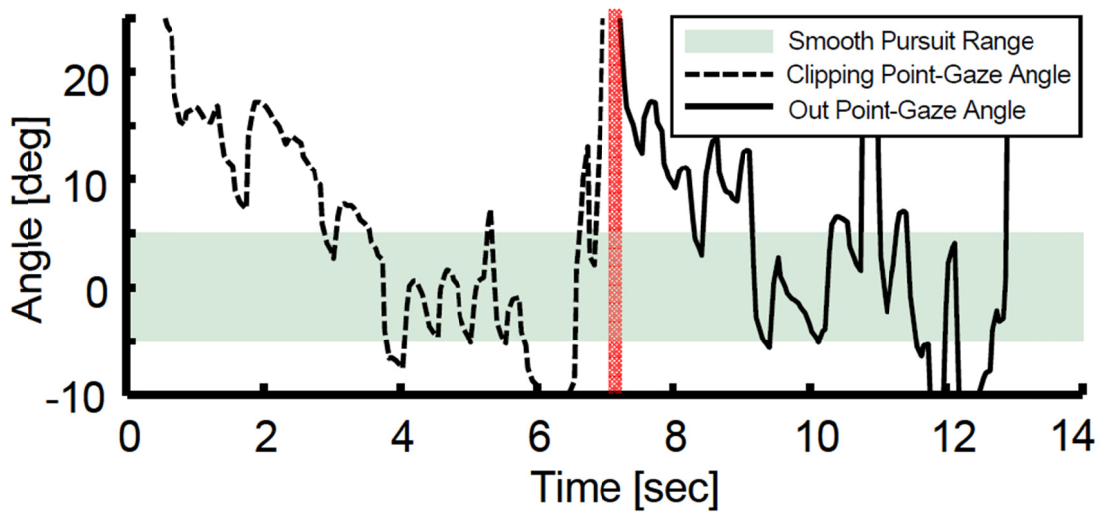


Fig.2.9 :Result of Ordinary Driver: Difference between Gaze Angle and Target Point Angle

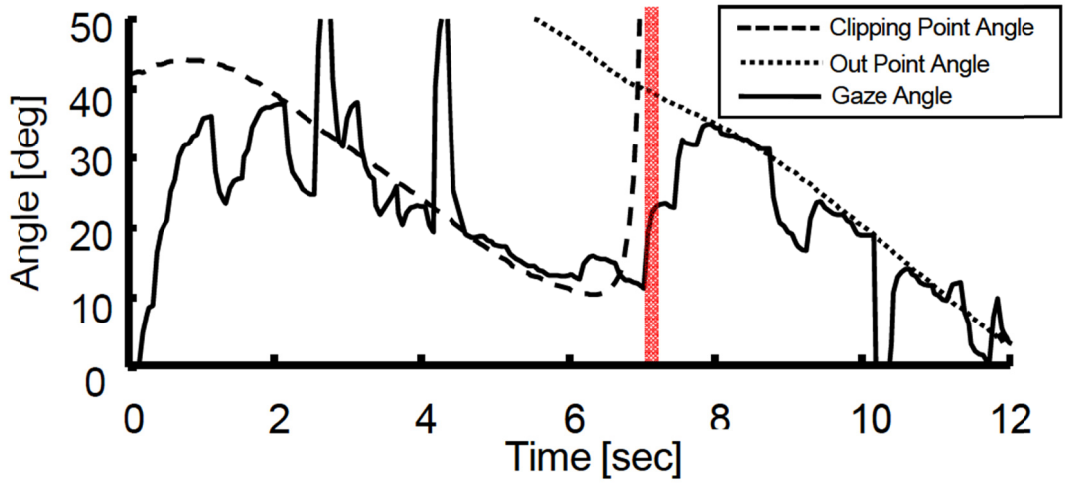


Fig.2.10: Result of Expert Driver: Gaze Angle / Target Point Angle

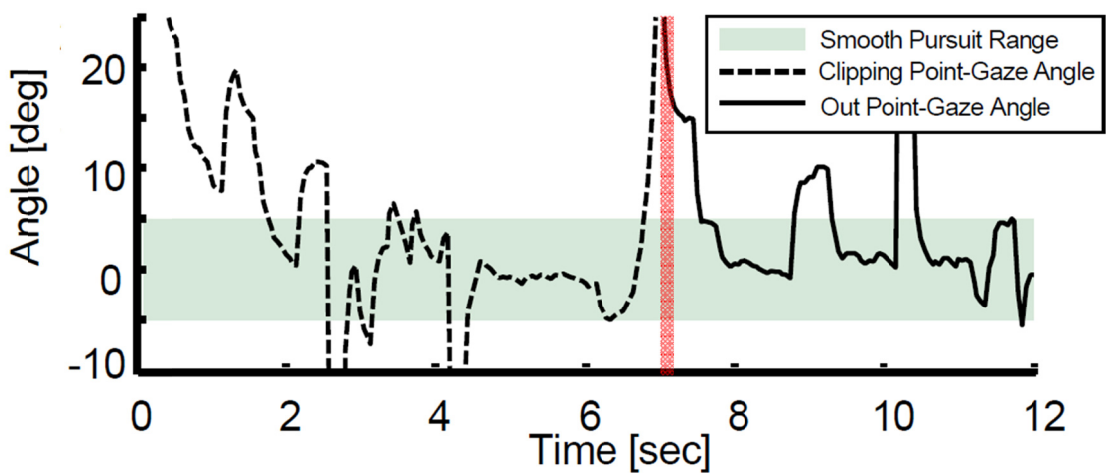


Fig.2.11: Result of Expert Driver: Difference between Gaze Angle and Target Point Angle

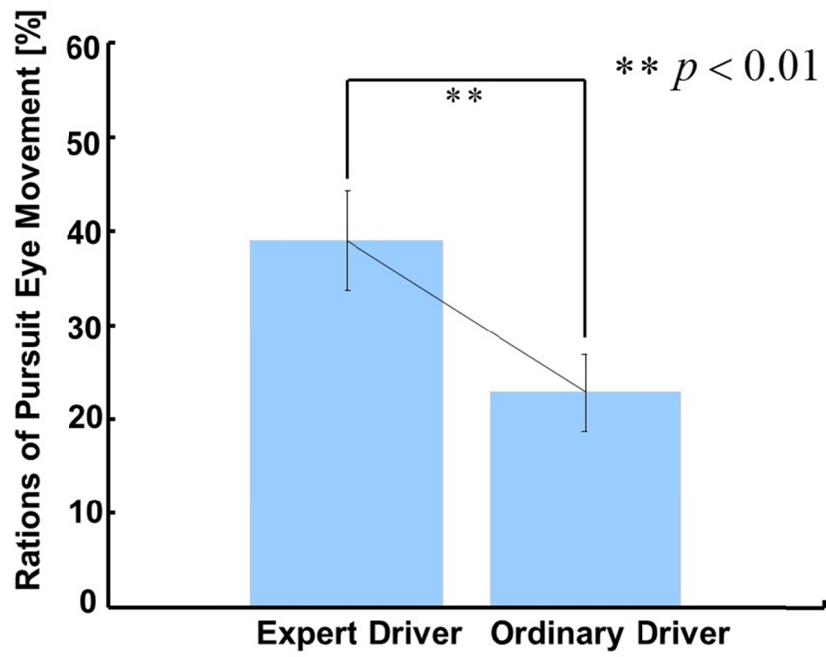


Fig.2.12: Comparison of Rations of Pursuit Eye Movement

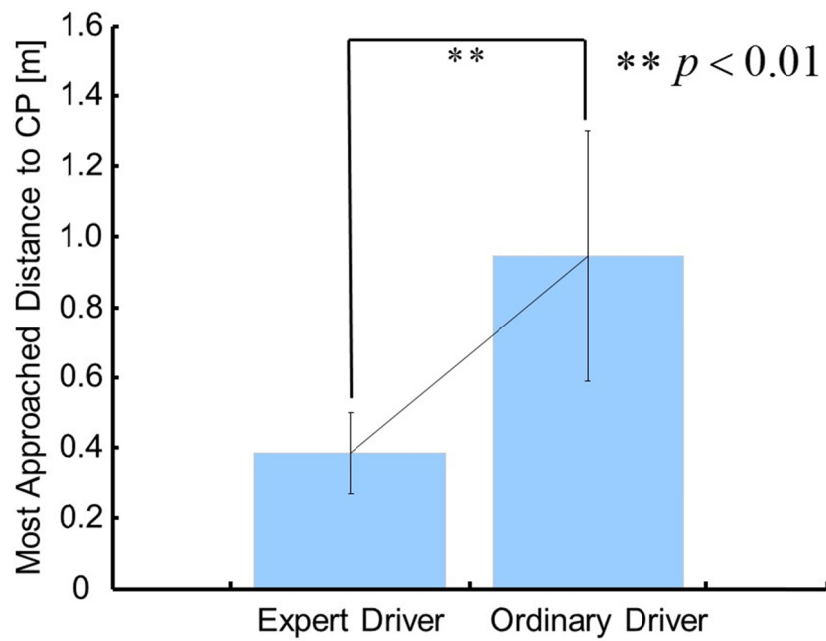


Fig.2.13: Comparison of Most Approached Distance to CP

## 2.3 モデリング

前節の実車試験における結果から、熟練ドライバーは追視行動をより積極的に利用するような注視点の選択方略を採用していた。本節ではこれら実験結果を一次情報として、熟練ドライバーの方向知覚を支える視覚情報をモデリングしていく。

### 2.3.1 オプティカル・フローと方向知覚

視覚系による自己運動の方向の知覚のメカニズムに関する理論的検討は Gibson らによって与えられた[13]。自己運動によって生じられる視覚刺激が自己運動の方向に位置する拡大中心(Focus Of Expansion:以下 FOE)から放射状に広がっていく速度場、すなわちオプティカル・フローとなることを示した。運動状態を与えて3次元の点群によるオプティカル・フローのシミュレーションを行った概念図を Fig. 2.14 に示す。Fig. 2.14 のように自車が向かっている方向付近に FOE が位置するため、FOE は自己運動を知覚するための情報であると言われてきた。一方、従来のオプティカル・フローでは眼球運動や頭部運動が考慮されておらず、網膜上に発生するフローとは乖離していることが指摘されている。特に影響が大きいのがパシュートによる眼球運動が網膜に生成するフローである。(サッカードはサッカード サプレスと呼ばれる網膜像の抑制作用があるため網膜上にフローを生成しない)。

眼球や頭部による追視行動が方向知覚に与える影響については、①運動情報を神経系の信号などで打ち消している[18][19][21]、②運動情報を方向知覚に積極的に利用しているという[17][20]、2つの立場から未だ活発な議論がなされており結論が出ていない。



Fig.2.14: 3D Point Cloud Simulation

### 2.3.2 作業仮説

前節での実車試験を通して、エキスパート・ドライバはパシュートを行い、ターゲットとなるポイントを追視していた。またこのとき、より効率的なラインを高い精度で走行することができていた。この結果は対象への追視行動が、方向知覚の精度を向上させている可能性を示唆する。すなわち本研究では、②の立場と同様に、エキスパート・ドライバは追視によるフローを積極的に利用していると考え、対象への追視行動のフローと車両運動によるフローとを合わせてオプティカル・フローを数式化し、解析的な分析を行う (Fig. 2.15)。

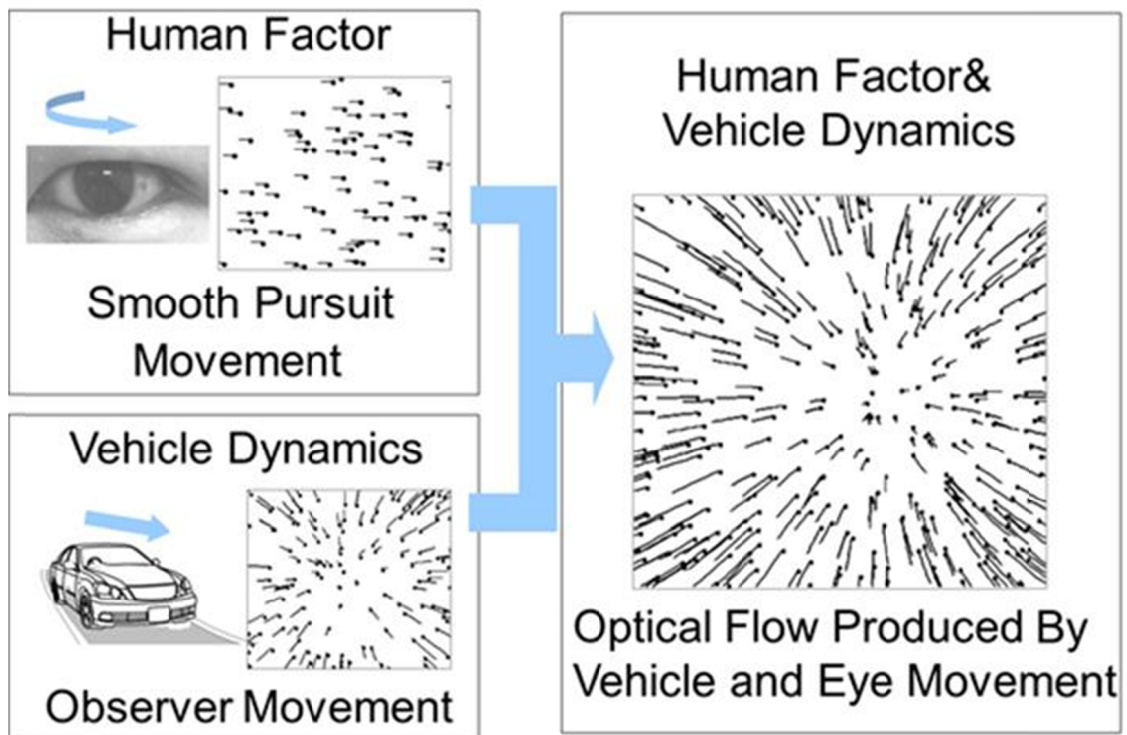


Fig.2.15:Working Hypothesis

### 2.3.3 モデリング方針

自己運動の方向知覚では FOE が重要な特徴量となる．本研究では，追視行動と車両運動を反映したオプティカル・フローの中で，フローの大きさが最小となる点を探索することを意味する．このときフローを仰角方向成分と方位角方向成分に分解し，それぞれの成分で最小となる FOE 候補点群を探索，その後，双方の積集合をとることとした．

< 仰角方向成分 FOE 候補点群 >

$$\text{条件①} : (x_{Elv}, y_{Elv}, z_{Elv}) \in \operatorname{argmin}(\text{OpticalFlow}_{Elv})$$

< 方位角方向成分 FOE 候補点群 >

$$\text{条件②} : (x_{Azm}, y_{Azm}, z_{Azm}) \in \operatorname{argmin}(\text{OpticalFlow}_{Azm})$$

フローの表現については，過去心理学分野で多くモデリングされているように網膜上の角度変化率として数式化する．同手法は画像処理分野でモデリングされているオプティカル・フローとの相互変換が可能である．

### 2.3.4 座標系設定

従来，オプティカル・フローは車両挙動と走行環境から演算されていたが，本研究では，さらに，ドライバーが能動的に行う追視行動を考慮してフローを演算する．そこで独立して設定すべき座標系は絶対座標系，車両固定座標系，網膜座標系の3つとした (Fig. 2.16)．網膜座標系は頭部及び眼球運動による追視の影響を反映する．回転運動の記述をし易くするため，絶対座標系と車両固定座標系は同じ向きに設定する．網膜座標系はドライバーが任意の方向を向いていることを想定し，車両固定座標系と方位角  $\theta_r$ ，仰角  $\phi_r$  だけ回転しているとする．

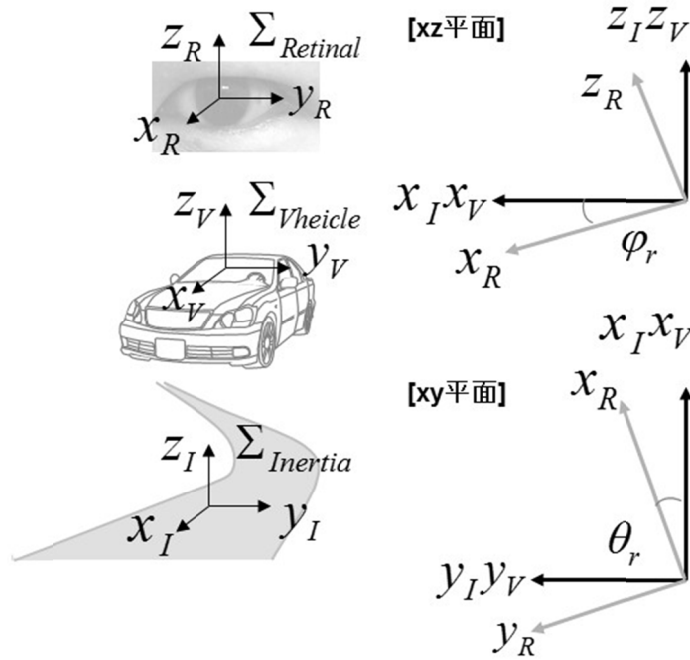


Fig.2.16:Definition of Coordination

### 2.3.5 仰角方向 F0E 候補点群のモデリング

モデリングの手順として、パシユートした場合の追視行動によるフローを求める。次に車両運動によるフローと合わせてオプティカル・フローを定式化する。最後にオプティカル・フローの最小点を求めることを考える。

網膜座標系から絶対座標系の点  $P(x_p, y_p, z_p)$  を追視した場合の  $P$  までの仰角を求めると

$$\varphi_p = -\tan^{-1}\left(\frac{z_p}{r_p}\right) \quad (2.1)$$

ただし  $r_p$  は以下である。

$$r_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (2.2)$$

対象を追視した場合の仰角方向フローは (2.1) 式を一階微分して求めることができる。

$$\dot{\varphi}_p = -\frac{\dot{z}_p r_p - z_p \dot{r}_p}{z_p^2 + r_p^2} \quad (2.3)$$

$(\dot{z}_p, \dot{r}_p)$  は点  $P$  の網膜座標系から見た絶対座標系の見かけの運動であり、車両の並進・回転運動成分を用いて以下のように記述される。

$$\begin{aligned}\dot{z}_p &= -\dot{z}_v + \dot{\phi}_v r_p \\ \dot{r}_p &= -\dot{r}_v - \dot{\phi}_v z_p\end{aligned}\quad (2.4)$$

絶対座標系から見た車両固座標系の速度を  $(\dot{x}_v, \dot{y}_v, \dot{z}_v)$ 、仰角変化率を  $\dot{\phi}_r$  とした。また、絶対座標系に配置された点  $P$  は静止しているため、網膜座標系での運動は車両の運動成分と逆向きとなる。また、 $\dot{r}_v$  は以下である。

$$\dot{r}_v = \frac{x_p \dot{x}_v + y_p \dot{y}_v}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}} \quad (2.5)$$

(2.4)式, (2.5)式を(2.3)式に代入し、点  $P$  を追視した場合仰角フローを求めると以下となる。

$$\dot{\phi}_p = \frac{\sqrt{x_p^2 + y_p^2}}{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2} \dot{z}_v - \frac{x_p \dot{x}_v + y_p \dot{y}_v}{(x_p^2 + y_p^2 + z_p^2) \sqrt{x_p^2 + y_p^2}} z_p - \dot{\phi}_v \quad (2.6)$$

次に、仰角フローの最小点の探索のため、対象点を網膜座標系からみた絶対座標系の任意の点  $(x, y, z)$  に拡張し、仰角フローを求める。(2.1)～(2.3)式と同様に仰角フローを求める。

見かけの運動  $(\dot{z}, \dot{r})$  は追視行動によるフロー  $\dot{\phi}_p$  を考慮し、下記のように求められる。

$$\begin{aligned}\dot{z} &= -\dot{z}_v + (\dot{\phi}_v + \dot{\phi}_p) r \\ \dot{r} &= -\dot{r}_v - (\dot{\phi}_v + \dot{\phi}_p) z\end{aligned}\quad (2.7)$$

これより仰角方向のオプティカル・フローは以下のように定式化できる。

$$\dot{\phi} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{x^2 + y^2 + z^2} \dot{z}_v - \frac{x \dot{x}_v + y \dot{y}_v}{(x^2 + y^2 + z^2) \sqrt{x^2 + y^2}} z - (\dot{\phi}_v + \dot{\phi}_p) \quad (2.8)$$

(2.8)式に(2.6)式を代入し，仰角フローが最小になる点を $\varphi=0$ から求めると以下となる．

$$(x, y, z) = (x_p, y_p, z_p) \quad (2.9)$$

すなわち，追視している点が仰角フロー最小の点となる．

### 2.3.6 方位角方向 FOE 候補点群のモデリング

仰角方向のモデリングと同様の手順で網膜座標系から絶対座標系の点  $P$  を追視した場合を考える．このとき点  $P$  までの方位角を $\theta_p$ とする．走行軌道として半径  $r_p$  の定常円旋回を仮定し，点  $P$  を円上の任意の点に配置する．円周角の定理により，現在の位置から点  $P$  までの距離は中心角が張る弧の長さに等価なので $l=2r_p\theta_p$  となる (Fig. 2.17)．

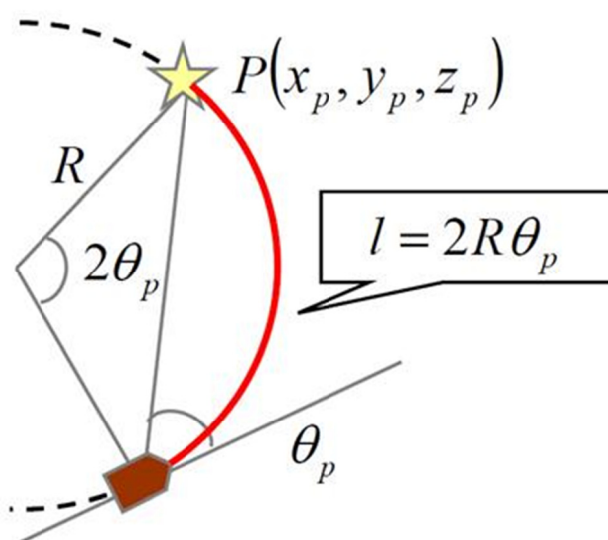


Fig.2.17:Relation between Inscribed Angle and Central Angle

これを一階微分すると

$$\dot{l} = 2R_p \dot{\theta}_p \quad (2.10)$$

追視によるフローは車両速度を  $v$ , ヨーレートを  $\gamma$  とすると

$$\dot{\theta}_p = -\frac{v}{2R_p} = -\frac{\gamma}{2} \quad (2.11)$$

と求まる. このとき  $v$  は  $xy$  平面上の速度で以下である.

$$\dot{l} = -v = -\sqrt{\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2} \quad (2.12)$$

網膜座標系からみた絶対座標系の任意の点  $(x, y, z)$  までの方位角は

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.13)$$

このとき方位角成分のフローは(2.13)式を一階微分し

$$\dot{\theta} = \frac{x\dot{y} - \dot{x}y}{x^2 + y^2} \quad (2.14)$$

と求まる.  $(\dot{x}, \dot{y})$  は車両固定座標系から見た絶対座標系の点 P の見かけの運動である. また車両の方位角変化率を  $\dot{\theta}_v$  とする. このとき, ドライバの追視行動によるフロー  $\dot{\theta}_p$  を考慮すると

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\dot{x}_v + (\dot{\theta}_v + \dot{\theta}_p)y \\ \dot{y} &= -\dot{y}_v - (\dot{\theta}_v + \dot{\theta}_p)x \end{aligned} \quad (2.15)$$

となる. ここで  $\dot{\theta}_{vp} = \dot{\theta}_v + \dot{\theta}_p$  として(2.15)式を(2.14)式に代入し整理すると, 方位角方向のオプティカル・フローは

$$\dot{\theta} = \frac{1}{x^2 + y^2} \left\{ \dot{\theta}_{vp} x^2 + \dot{y}_v x - \dot{x}_v y + \dot{\theta}_{vp} y^2 \right\} \quad (2.16)$$

方位角フローが最小になる点を  $\dot{\theta} = 0$  から求めると, 方位角フローが最小となる FOE 候補点群は下記の関係式を満たす.

$$\dot{\theta}_{vp} x^2 + \dot{y}_v x - \dot{x}_v y + \dot{\theta}_{vp} y^2 = 0 \quad (2.17)$$

整理すると，方位角フロー最小となる条件式は以下となる．

$$\left(x + \frac{\dot{y}_v}{2\dot{\theta}_{vp}}\right)^2 + \left(y - \frac{\dot{x}_v}{2\dot{\theta}_{vp}}\right)^2 = \frac{\dot{x}_v^2 + \dot{y}_v^2}{4\dot{\theta}_{vp}^2} \quad (2.18)$$

ただし， $(\dot{x}_v, \dot{y}_v)$ は車両速度を $v$ ，車体のすべり角を $\beta$ ，網膜座標系と絶対座標系の回転角を $\theta_r$ とすると以下である．

$$\begin{cases} \dot{x}_v = v \cos(\beta - \theta_r) \\ \dot{y}_v = v \sin(\beta - \theta_r) \end{cases} \quad (2.19)$$

## 2.4 モデルに基づくエキスパート・ドライバの運転分析

前節で求めた FOE 候補点群のうち，特に方位角成分について解析的に分析を行う．(2.18)式で表現される点群を幾何学的に図示すると Fig. 2.18 のように車両固定座標系から車体のすべり角 $\beta$ ずれた位置に中心 $R_{FOE}$ ，半径 $O_{FOE}$ の円軌道を描く．

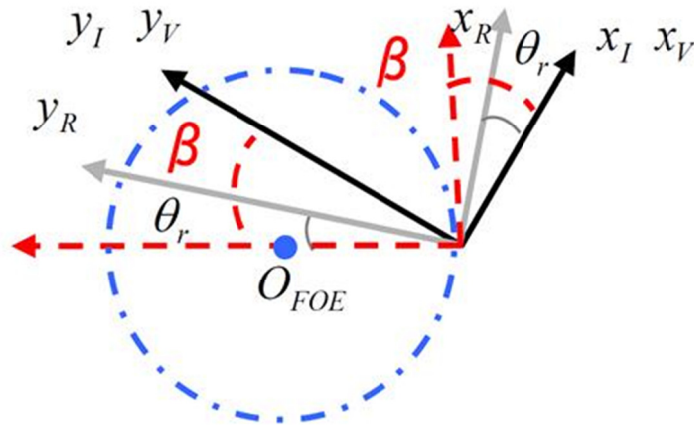


Fig.2.18: Tracks of FOE Candidate Points

$$O_{FOE} = \left( -\frac{v \sin(\beta - \theta_r)}{2\dot{\theta}_{vp}}, \frac{v \cos(\beta - \theta_r)}{2\dot{\theta}_{vp}} \right) \quad (2.20)$$

$$R_{FOE} = \left| \frac{v}{2\dot{\theta}_{vp}} \right| \quad (2.21)$$

ここで車両運動と追視行動によるフローを考える。車両のヨーレートを  $\gamma$  とすると  $\dot{\theta}_v = \gamma$  なので、(2.11)式と合わせると  $\dot{\theta}_{vp} = \gamma/2$  となる。これを(2.21)式に代入すると以下となる

$$R_{FOE} = \left| \frac{v}{\gamma} \right| = R_p \quad (2.22)$$

(2.20)式～(2.22)式が示す方位角フローが最小となる点群は、現在の速度、角速度、車体のすべり角といった状態量によって一意に決まり、横すべり角を接線とした半径  $R_{FOE}$  の円となる。この点群は車両が現在の状態を維持した場合にトレースする走行軌道と一致する。

エキスパート・ドライバーが走行ラインをトレースする際、かなりの割合で行っていたパシュートによる対象の追視が網膜上に生成するフローは、車両運動によるフローに影響を与え、将来の走行軌道を視覚的に知覚可能な特徴点群を形成している可能性を示唆する。

＜仰角方向成分 FOE 候補点群＞

- ▶ ドライバが見ている任意の点のみ候補点となる

＜方位角方向成分 FOE 候補点群＞

- ▶ 車両が現在の運動状態を維持したとき、トレースするであろう走行軌道上の点が候補点群となる

## 2.5 おわりに

本章では、技量の高いエキスパート・ドライバーが高精度なライントレースを行う際にクリッピング・ポイント(CP)や出口ポイントを追視する特徴があることを実車試験により確かめた。また、高精度 GNSS による車両挙動計測結果の解析により、CP を追視している時間と CP への近接度合いについて高い相関があることが分かった。

この試験結果を背景とし、エキスパート・ドライバーは能動的な追視行動を行うことで高精度なライントレースを実現している可能性が示された。追視行動は自己運動知覚に利用されているとされている網膜上のオプティカル・フローに影響することから、車両の運動により生成されるフローに加え、能動的な追視行動により生成されるフローを含めた網膜上のオプティカル・フローをモデリングし、フローの湧き出し点：FOE により自己運動知覚のメカニズムの説明を試みた。

モデリングにおいてはオプティカル・フローを仰角方向成分，方位角方向成分に分解し，それぞれの成分についてFOE候補点群を算出し，それらの積集合を取る手法を採用した．モデリングした結果，FOE候補点群の特徴について解析的に分析した結果，方位角方向のFOE候補点群は現在の旋回半径と同じ半径を持った円軌を描くことが分かった．すなわち，FOE候補点群は車両が将来進む軌道と一致する軌道を網膜上に描く．

網膜上に描かれるFOE候補点群という特徴点を利用することで，ドライバは将来の車両軌道を直接的に知覚することができ，走行軌道の制御にFOE候補点群を利用することで，高精度のライントレースを実現する可能性が示唆された．

# 第3章 自動車運転時のオプティカル・フロー・シミュレーション

## 3.1 はじめに

人間-自動車系の課題に対し前章では、Gibson らによって与えられた視覚による自己運動知覚の理論的検討を背景に、オプティカル・フローを数式化し、ドライバの運転方略の解明を進めてきた。自己運動知覚に有効であるフローの拡大中心 (Focus Of Expansion:以下 FOE)をモデリングした結果、通過したい任意の目標点が FOE 候補点群となるよう操作することで、そこに到達することが解析的に示された。また同時に、目標点を追視することで網膜上に発生する追視行動のフローが FOE 候補点群に与える影響が重要であることも確認された。オプティカル・フローは通過する目標点をどこに設定するか、というドライバ意図を反映した上で、視覚感覚情報と運転操作戦略が密結合している変数であり、これをうまく制御することで高精度なライントレースを実現できる。そのため、今後、運転支援システムの制御指標として適用していくことで、ヒトの感覚と親和性の高い運転支援を実現できる可能性がある。一方、制御指標として適用する際には、走行路の曲率変化や、路面状態の影響で車両挙動が変動する場合など、実環境を想定した検討を進めることが重要となる。

本章ではオプティカル・フローが実環境でどのような特徴を示すか、また、車両運動とどのような関係があるのか、数値シミュレーションを通して分析する。また過去に提案された自動車-人間系のモデルとの関係についての考察を通し、制御指標としての妥当性についても検討する。

### 3.2 オプティカル・フロー・モデル

前章で提案したオプティカル・フロー・モデルはドライバの眼球運動と、車両運動の影響を反映する。この際、自己運動の知覚に利用される FOE は仰角方向成分と方位角方向成分双方の最小値の積集合となる。

<仰角方向成分 FOE 候補点群>

$$\text{条件①} : (x_{Elv}, y_{Elv}, z_{Elv}) \in \operatorname{argmin}(\text{OpticalFlow}_{Elv})$$

<方位角方向成分 FOE 候補点群>

$$\text{条件②} : (x_{Azm}, y_{Azm}, z_{Azm}) \in \operatorname{argmin}(\text{OpticalFlow}_{Azm})$$

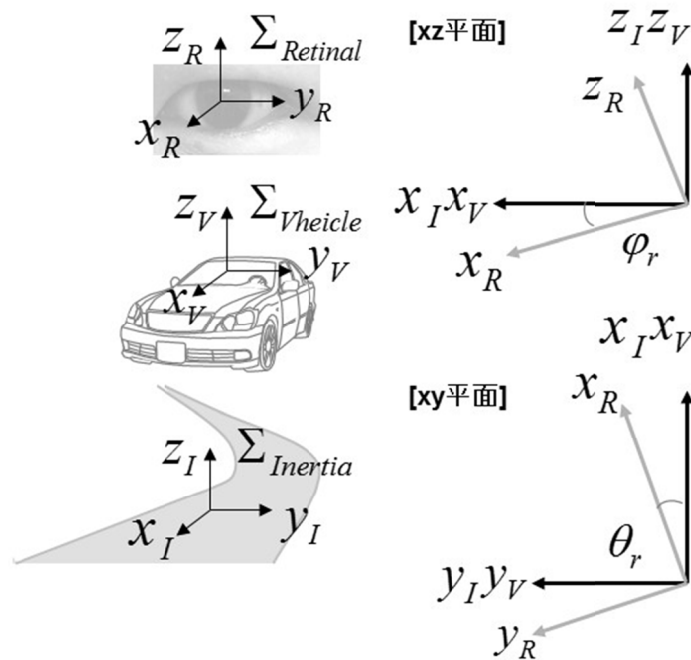


Fig.3.1:Definition of Coordination

ドライバが能動的に行う追視行動を考慮してフローを演算するため、独立して設定すべき座標系は絶対座標系、車両固定座標系、網膜座標系の3つとした (Fig. 3.1)。回転運動の記述をし易くするため、絶対座標系と車両固定座標系は同じ向きに設定する。網膜座標系はドライバが任意の方向を向いていることを想定し、車両固定座標系と方位角  $\theta_r$ 、仰角  $\phi_r$  だけ回転しているとする。条件①、②を満たす点群は、網膜座標系でドライバが追視している点  $P(x_p, y_p, z_p)$  となり、特に方位角方向成分の FOE 候補点群は

$$\left(x + \frac{\dot{y}_v}{2\dot{\theta}_{vp}}\right)^2 + \left(y - \frac{\dot{x}_v}{2\dot{\theta}_{vp}}\right)^2 = \frac{\dot{x}_v^2 + \dot{y}_v^2}{4\dot{\theta}_{vp}^2} \quad (3.1)$$

を満たす点群となる。ただし、 $(\dot{x}_v, \dot{y}_v)$ は車両速度を $v$ 、車体のすべり角を $\beta$ 、網膜座標系と絶対座標系の回転角を $\theta_r$ とすると以下である。

$$\begin{cases} \dot{x}_v = v \cos(\beta - \theta_r) \\ \dot{y}_v = v \sin(\beta - \theta_r) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここで $\dot{\theta}_{vp}$ は車両の方位角変化率 $\dot{\theta}_v$ と眼球運動によるフロー $\dot{\theta}_p$ により以下のように表せる。

$$\dot{\theta}_{vp} = \dot{\theta}_v + \dot{\theta}_p \quad (3.3)$$

(3.1)式で表現される点群を幾何学的に図示すると車体のすべり角 $\beta$ ずれた位置に中心 $R_{FOE}$ 、半径 $O_{FOE}$ の円軌道を描く

$$O_{FOE} = \left( -\frac{v \sin(\beta - \theta_r)}{2\dot{\theta}_{vp}}, \frac{v \cos(\beta - \theta_r)}{2\dot{\theta}_{vp}} \right) \quad (3.4)$$

$$R_{FOE} = \left| \frac{v}{2\dot{\theta}_{vp}} \right| \quad (3.5)$$

(3.4), (3.5)式は『ドライバが走行経路上の任意の点を注視している』と仮定すると、定常円旋回時には車両の走行軌道と一致することが解析的に求められている。これらは将来の走行軌道を視覚的に知覚可能であることを示しており、高精度のライントレースを支える情報であると考えられる。

### 3.3 オプティカル・フローと車両運動シミュレーション

前節で示したように、定常円旋回を対象とした場合、FOE 候補点群は将来通過する軌道と一致する。しかし、実環境で実際にドライバが運転に利用するためには定常状態のみならず過渡状態における振る舞いが重要となる。そこで本節では実環境を想定してオプティカル・フローの振る舞いを深く理解するための数値シミュレーションを行う。

#### 3.3.1 実環境における運転操作

旋回における車両運動の変化はドライバが操作することで能動的に変化するものと、環境や車両姿勢の変化で受動的に変動してしまうものがある。前者はアクセル・ブレーキ・ステアを操作し車両の横運動を変化させ、ラインをトレースしていく場合などである。一方後者は、路面 $\mu$ の変化や車両の前後荷重バランスの変化、サスペンションのジオメトリの変化などにより起こりうる。このような目標に対する追従と、特性変化や外乱に対する対処を、日常的に行いながらドライバは運転操作している。

本節ではこれら状況に対し数値シミュレーションを通して、オプティカル・フローがドライバの操舵戦略にどのように利用されているか考察する。具体的には、シミュレーションの前準備としての数式化を行った後、①クロソイド曲線のように曲率が変わる軌道を走行する場合 (Fig. 3. 2), ②外的要因によって車両運動が変動した場合 (Fig. 3. 3), の2つの状況について検討を行う。



Fig.3.2: The road where curvature changes

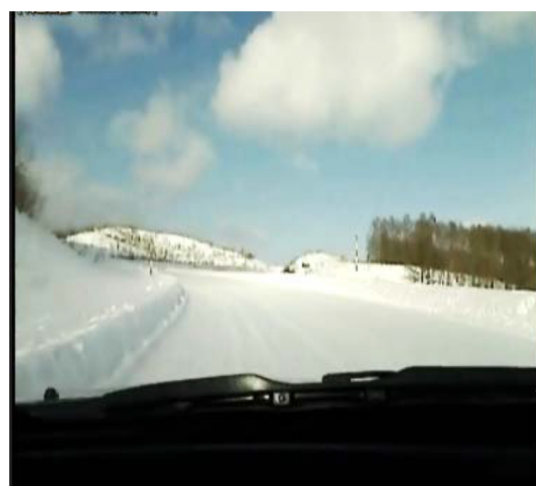


Fig.3.3: The road where the friction of the road changes

### 3.3.2 シミュレーションのための数式化

(3.3)～(3.5)式は、車両のダイナミクス、および、ヒューマン・ファクタであるドライバの追視行動がFOE候補点群に影響を与えることを示している。追視行動によるフローは、ドライバの意図を直接反映する因子であるため取り扱いが難しいが、本研究では走行経路上の任意の点に注視点を設定し、その点を追視することで発生するフローを算出する。絶対座標系に任意の走行経路  $P_{Trj}(x_{Trj}, y_{Trj}, z_{Trj})$  を設定し、このうちの一点を注視点として選択すると

$$P_{pw}(x_{pw}, y_{pw}, z_{pw}) \in P_{Trj}(x_{Trj}, y_{Trj}, z_{Trj}) \quad (3.6)$$

またシミュレーションで必要となる車両の横すべり角は、車両の等価2輪モデルの線形運動方程式から導かれる以下の式を連立させて導出する。

$$\delta = (1 + K_{sf}v^2) \frac{l}{v} \gamma \quad (3.7)$$

$$\beta = \frac{1 - \frac{m}{2l} \frac{l_f}{l_r} K_r v^2}{1 + K_{sf}v^2} \frac{l_r}{l} \delta \quad (3.8)$$

ここで  $v$  は車速度、 $\gamma$  はヨーレート、 $\beta$  は横すべり角、 $\delta$  は前輪舵角、 $K_f$ 、 $K_r$  はそれぞれ前後輪のコナリングパワー、 $m$  は車両質量、 $l$  はホイールベース、 $l_f$ 、 $l_r$  は重心点から前後輪までの距離である。また、 $K_{sf}$  はスタビリティファクタであり以下である。各パラメータを Table3.1 に示す。

$$K_{sf} = -\frac{m}{2l^2} \frac{l_f K_f - l_r K_r}{K_f K_r} \quad (3.9)$$

Table 2. 1:Simulation Parameter

Symbol	Value
$m$	1670 [kg]
$K_f$	110 [kN/rad]
$K_r$	120 [kN/rad]
$l$	2.8 [m]
$l_f$	1.38 [m]
$l_r$	1.47 [m]

ヨーレートは先に設定した走行経路  $P_{Tj}(x_{Tj}, y_{Tj}, z_{Tj})$  から算出した旋回半径  $R$  と、車速  $v$  より求められる。このとき以下の車両の運動学を考慮し任意の時刻  $t_0$  における車両位置  $P_v(x_v, y_v)$ 、および回転角  $\theta_v$  を算出する。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ \theta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_v & 0 \\ \sin\theta_v & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \gamma + \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$t_0$  における車両固定座標での注視点位置  $P_p(x_p, y_p)$  は

$$P_p = R_\theta (P_{pw} - P_v) \quad (3.11)$$

と表せる。  $R_\theta$  は回転行列であり以下である。

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta_v & \sin\theta_v \\ -\sin\theta_v & \cos\theta_v \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

(3.11) 式の  $P_p(x_p, y_p)$  から眼球運動のフローは以下となる。

$$\dot{\theta}_p = \frac{x_p \dot{y}_p - \dot{x}_p y_p}{x_p^2 + y_p^2} \quad (3.13)$$

(3.13) 式を (3.3) 式に代入すると

$$\dot{\theta}_{vp} = (\gamma + \dot{\beta}) + \frac{x_p \dot{y}_p - \dot{x}_p y_p}{x_p^2 + y_p^2} \quad (3.14)$$

として求められ、これを (3.4) ~ (3.5) 式に代入することで FOE 候補点群をシミュレートすることが出来る。

### 3.3.2 クロソイド曲線走行時のフロー・シミュレーション

先行研究ではオプティカル・フローの基本的な特徴を把握するため、定常円旋回に焦点を当てて分析を進めてきた。実際の道路においては道路構造令に従って緩和曲線が設定されているため、実走行を想定した場合、曲率が変化する過渡状態でのオプティカル・フローの挙動が重要となる。本節では緩和曲線のうちクロソイド曲線を取り上げ、曲率が増加する場合、減少する場合において検討を行う。Fig.3.4 にシミュレーションの概略を示す。

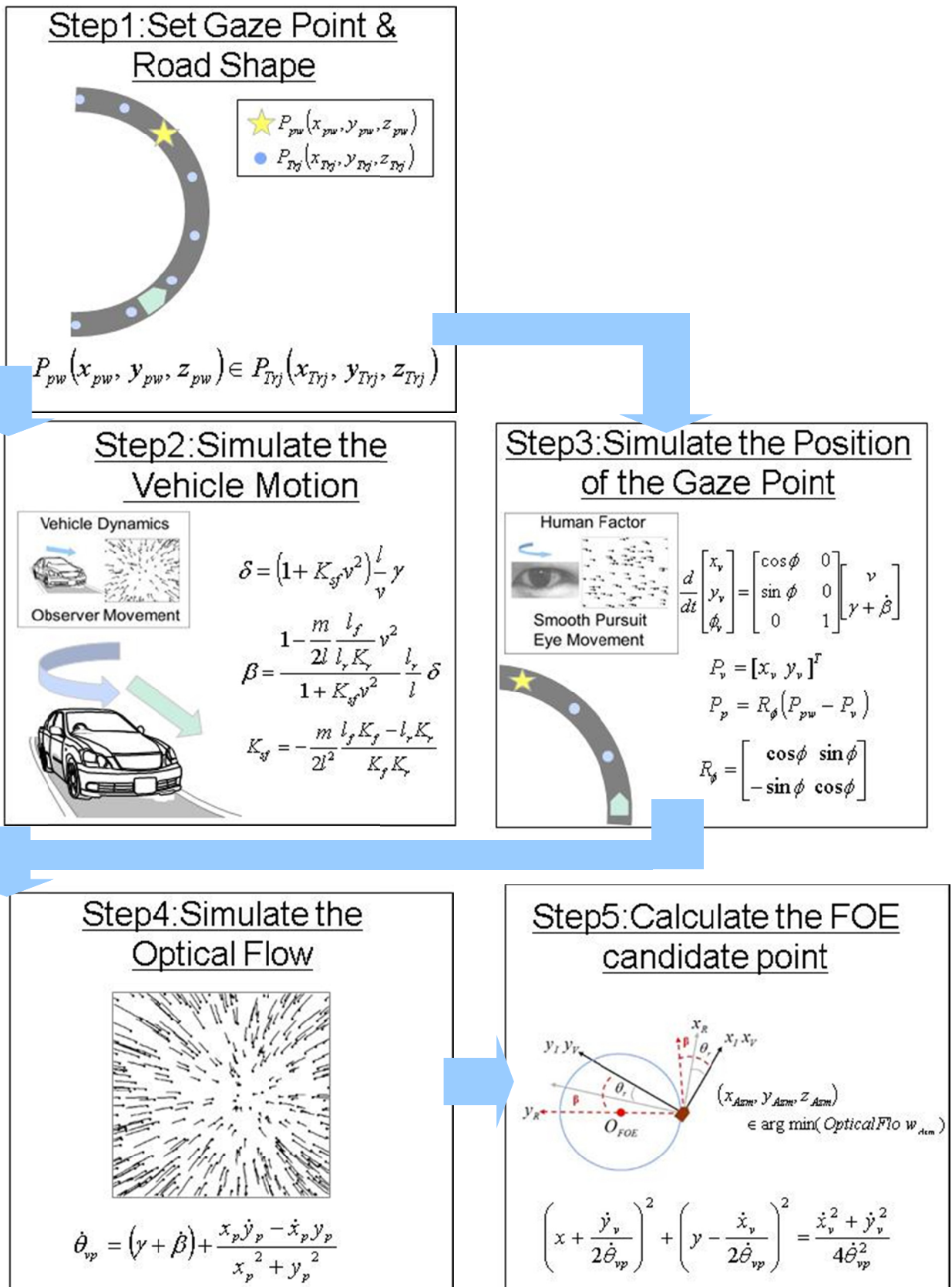


Fig.3.4: Calculation Flow of Numerical Simulation

### 3.3.2 走行シミュレーション条件

クロソイド曲線は以下の式で表される.

$$RL = A \quad (3.15)$$

ここで  $R$  は曲率半径,  $L$  は走行距離,  $A$  はクロソイドパラメータである. 本シミュレーションではクロソイド曲線のパラメータ  $A = 3000$  として走行軌道  $P_{Trj}$  を生成し, 曲率が増加していくコーナー入口と, 曲率が減少していくコーナー出口についてシミュレーションした. このとき走行速度は 60 km/h 一定とし, 注視点位置については, 30 m 先の点としている. シミュレーションするコースの概要を Fig. 3.5 に, 曲率を Fig. 3.6 に示す.

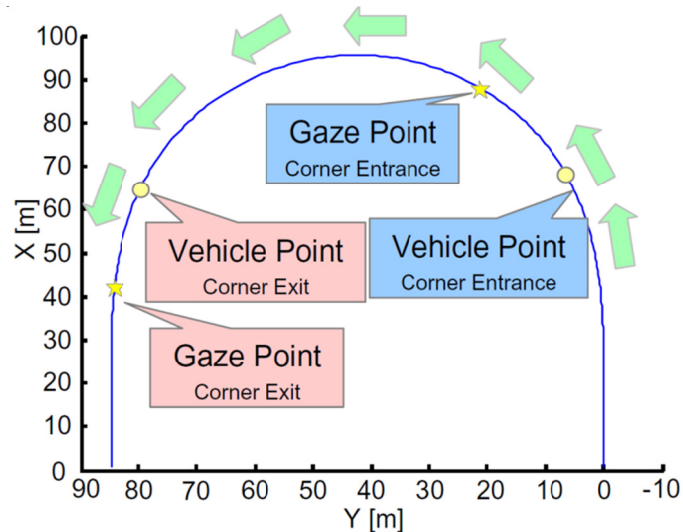


Fig.3.5: Overview of Simulation Course

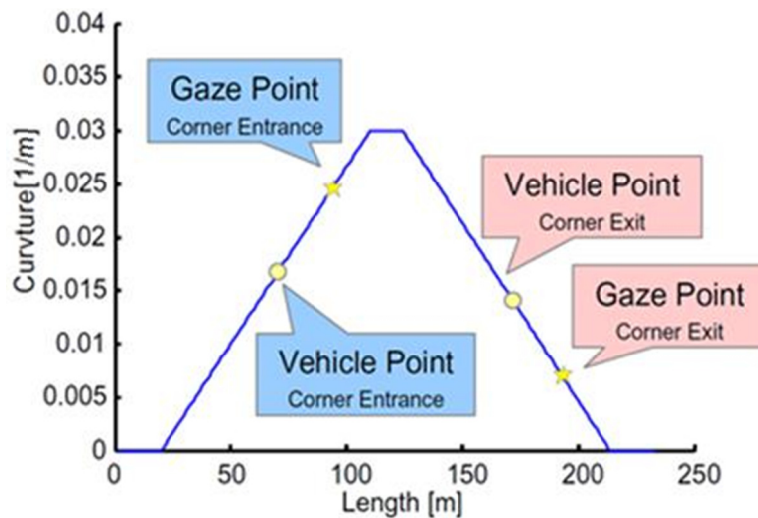


Fig.3.6: Overview of Curvature

### 3.3.3 走行シミュレーション結果

Fig. 3.7 にコーナー入口, Fig. 3.8 にコーナー出口での絶対座標系  $\Sigma_{inertia}$  での走行経路, 現在の運動状態を保持した場合の車両の将来軌道, および, FOE 候補点群のシミュレーション結果を示す. コーナー入口においては走行経路を基準に y 軸のマイナス(-)方向に車両の将来軌道/FOE 候補点群が配置されている (Fig. 3.7). またコーナー出口においては, 走行経路を基準に y 軸のプラス(+ )方向に車両の将来軌道/FOE 候補点群が配置されている (Fig. 3.8). 走行経路を基準とした場合 FOE 候補点群と車両の将来軌道と同じ領域に配置されるという結果は, 物理的な車両の将来挙動に準ずる情報を FOE 候補点群により知覚できることを示している. これによりドライバは曲率の連続的な変化に合わせて, 道路の幾何学的な形状と車両挙動を物理的にマッチングさせるように運転操作することが出来る.

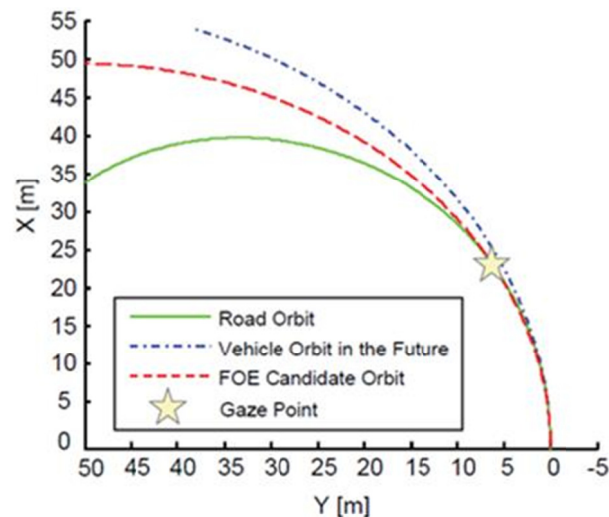


Fig.3.7:Result of Curve Running Simulation (Entrance)

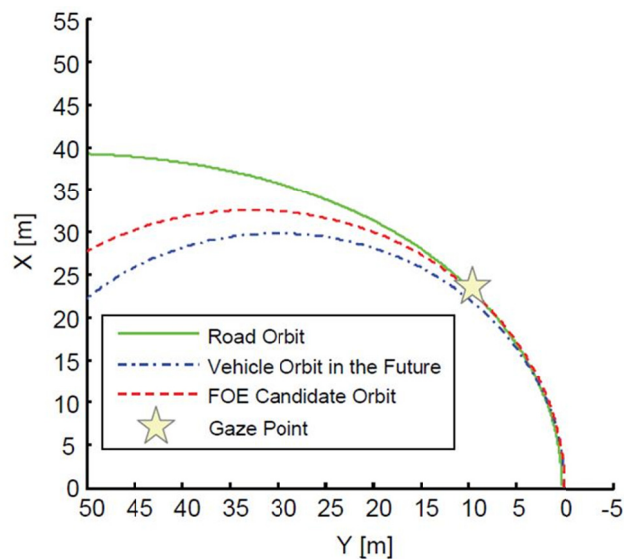


Fig.3.8:Result of Curve Running Simulation (Exit)

### 3.3.4 実環境における運転操作

車両旋回特性を支配するスタビリティファクタ（以下 SF）は接地面の摩擦係数と接地荷重の影響を受けるため、路面状態が急に変わった場合のみならず、日常の運転シーンにおける加減速や旋回時、車両の前後荷重バランスが変わる場合などでも変動する。このように実環境では車両のアンダーステア（以下 US）、オーバーステア（以下 OS）、ニュートラルステア（以下 NS）傾向が動的に変わるため、舵角が一定であったとしてもヨーや横 G といった車両横運動に影響する。本節では一定速度で定常円旋回している車両が、何某かの理由で旋回特性が変化した時の FOE 候補点群の挙動について数値シミュレーションを行い分析する。

### 3.3.5 スタビリティファクタ変動シミュレーション

旋回半径  $R=50$  m, 走行速度 60 km/h の定常円旋回を想定し、注視点位置については、前節と同様に 30 m 先の点とした。手順としては、まず、シミュレーション開始 10 sec 後のタイミングで(9)式における  $K_{sf}$  を 0.002~-0.002 の間で変動させ US/NS/OS 状態を作り出す。次に SF の旋回特性に合致した車両横運動を演算し、そのときの FOE 候補点群の挙動についてシミュレーションを行った。コース概要を Fig.3.9 に、SF の変動を Fig.3.10 に示す。

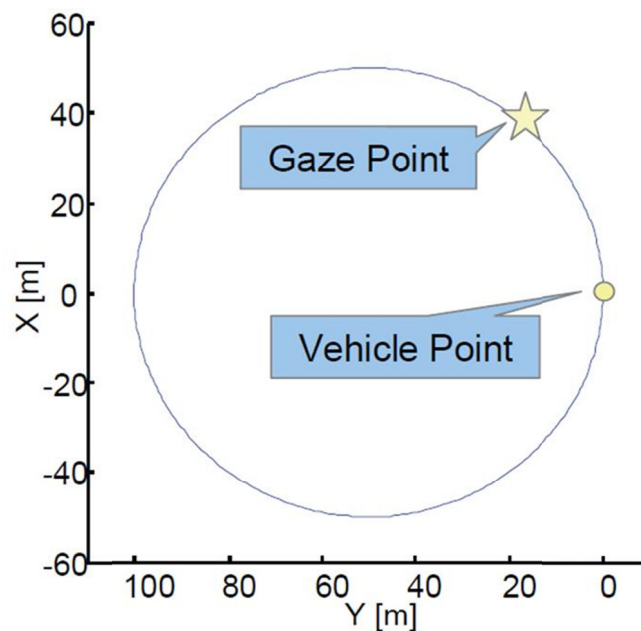


Fig.3.9: Overview of Simulation Course

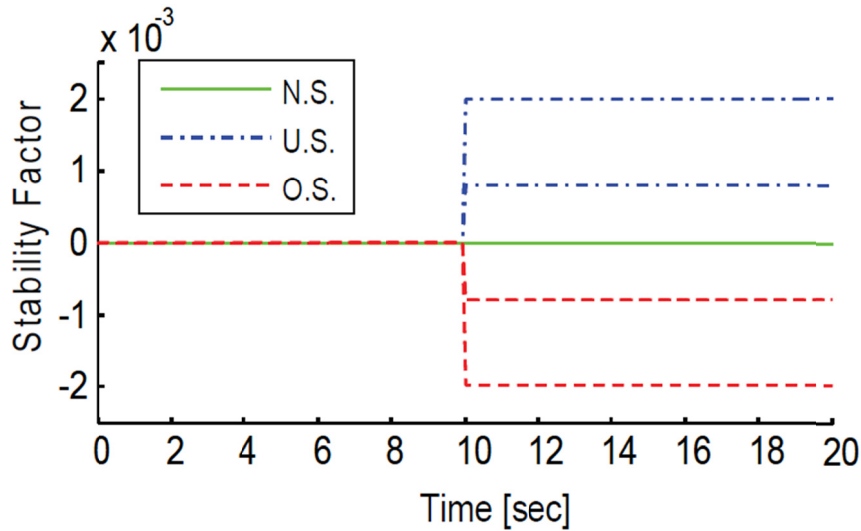


Fig.3.10:Behavior of Stability Factor

### 3.3.6 スタビリティファクタ変動シミュレーション結果

Fig. 3. 11, Fig. 3. 12 に US/OS/NS でのシミュレーションにおけるヨーレート, 横すべり角の結果を示す. Fig. 3. 13 に絶対座標系  $\Sigma_{inertia}$  での US/OS/NS 条件での FOE 候補点群の振る舞いについて示す. FOE 候補点群は, SF が変化しない場合 (NS $\Rightarrow$ NS) 走行コースと一致するが, OS 傾向を示す場合には走行経路を基準に y 軸の+方向に, US 傾向を示す場合には走行経路を基準に y 軸の-方向に配置される. 物理的な車両挙動は OS 傾向を示す場合はイン側に, US 傾向を示す場合はアウト側に軌跡を変化させることがよく知られているが, これは OS/US 傾向のときの FOE 候補点群の配置と合致する. この結果は FOE 候補点群により, イン側に入り込んでいく OS 傾向, およびはアウト側に飛び出していく US 傾向といった SF の変化を知覚できることを示す. このように FOE 候補点群を利用することで, 日常の運転で刻々と変動する車両旋回特性を知覚できるため, ドライバは路面状態が急に変わった場合などでも適応的に安定した運転操作を行うことが可能となる.

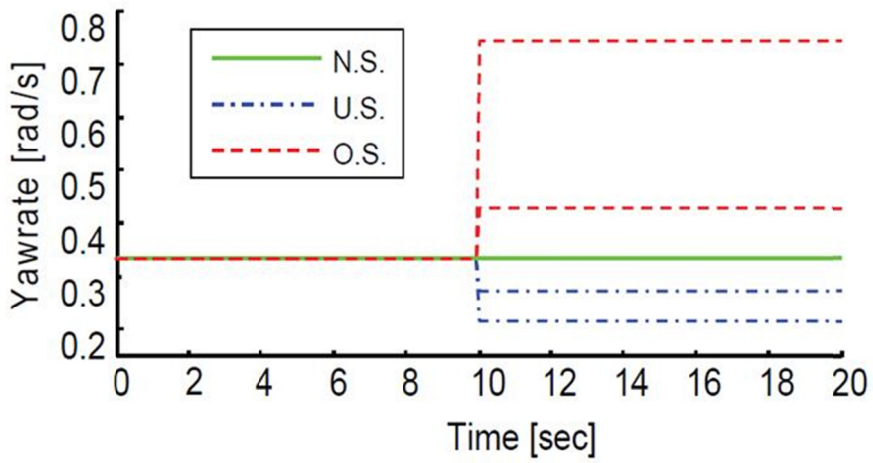


Fig.3.11:Simulation Result of Yaw Rate

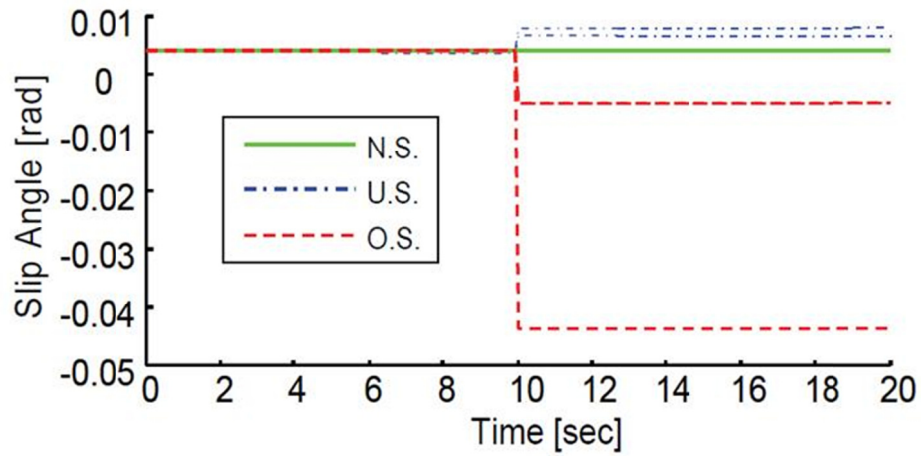


Fig.3.12:Simulation Result of Slip Angle

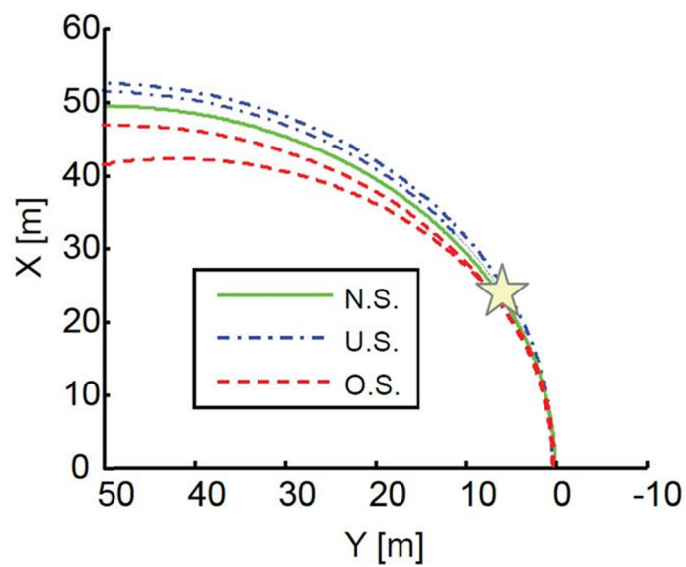


Fig.3.13:Simulation Result of FOE Candidate Point

### 3.3.7 FOE 候補点群と操舵操作についての考察

運動知覚-操舵操作を直感的に理解するため、シミュレーション結果を網膜座標系に投影し、ドライバの“見え”に近い状況で分析する。走行経路、FOE 候補点群、将来の車両軌道の位置関係に着目し、条件①：走行経路基準で FOE 候補点群/将来軌道が y 軸のプラス(+)方向に配置される（コーナー入口および US）場合、条件②：走行経路基準で FOE 候補点群/将来軌道が y 軸のマイナス(-)方向に配置される場合（コーナー出口および OS）を対象とする。条件①の結果を Fig. 3.14 に、条件②の結果を Fig. 3.15 に示す。また、追視行動と車両運動を反映したオプティカル・フローの方位角成分についても同時に表示した。Fig. 3.14, Fig. 3.15 ではオプティカル・フローの方位角成分の強度分布は、FOE 候補点群を基準に、離れる程強度が大きくなり、より遠方へ強く流れていく。これは条件①では走行経路は y 軸のプラス(+)方向に強く流れ、車両はアウト側へ飛び出していく挙動となることを示す。また、条件②では y 軸のマイナス(-)方向に強く流れ、イン側に突っ込んでいく挙動となることを示している。アウト側に飛び出す/イン側に突っ込む動きを抑制し、走行経路をトレースするよう車両を操作するためには、走行経路上のフローをゼロにする、つまり、走行経路と FOE 候補点群を一致させるよう操作すればよい。

具体的には条件①では走行経路が y 軸のプラス(+)方向へ流れるのを防ぐようにステアリングを切り増していき、条件②では y 軸のマイナス(-)方向へ流れるのを防ぐように切り戻していけばよい。走行経路の変化といった目標の追従、および、車両特性の変化といった外乱に対する適応は、異なる複数の方略で対応するのではなく、本結果に示すように「FOE 候補点群と走行経路の位置関係の制御」といったシンプルな方略で対応できることが分かる。

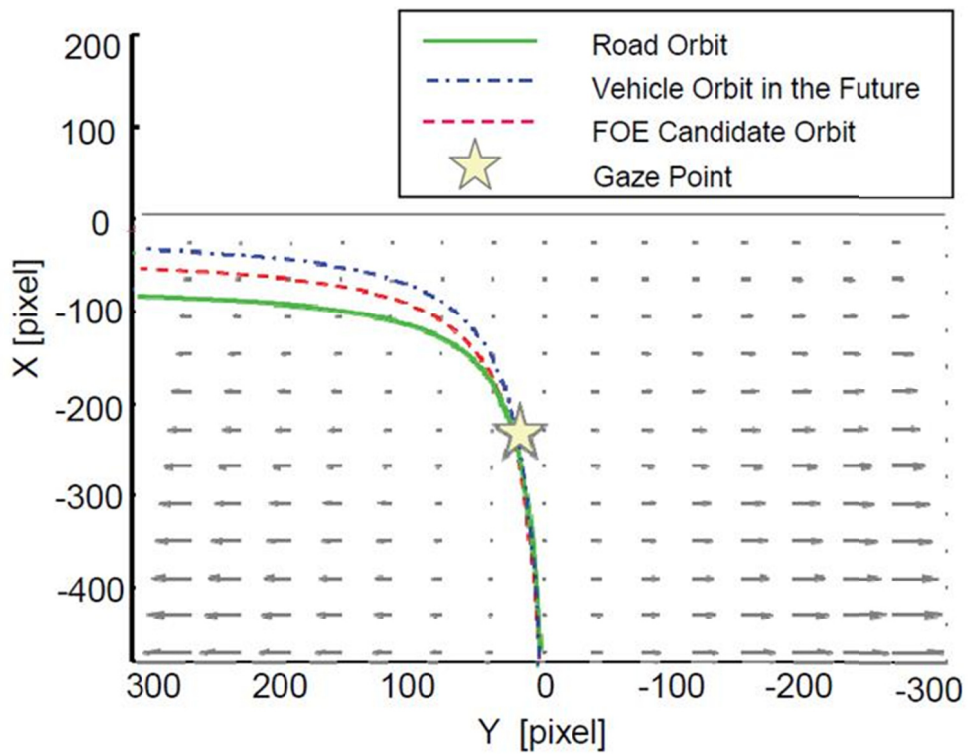


Fig.3.14:Result of Curve Running Simulation (Condition1)

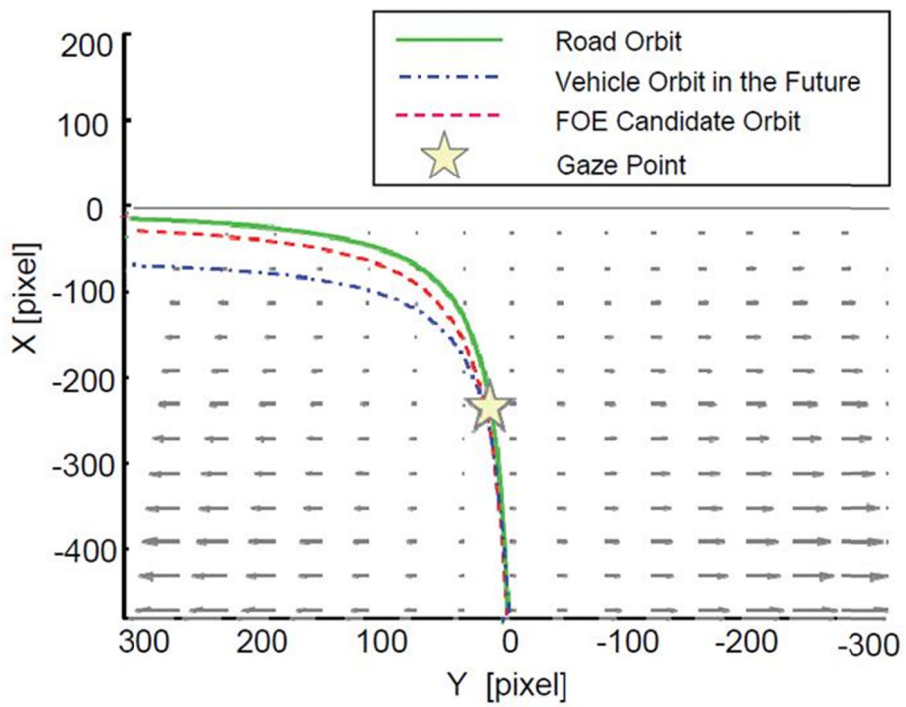


Fig.3.15:Result of Curve Running Simulation (Condition2)

## 3.4 過去に提案された自動車-人間系モデルとの比較検討

### 3.4.1 オプティカル・フロー・モデルの特徴

前節までの分析により，FOE 候補点群を制御することで走行ラインのトレースを実現できる可能性が示された．この FOE 候補点群には以下のような特徴がある．

- (1) FOE 候補点群と走行経路を一致させることで走行経路をトレースすることができる．
- (2) 横すべり角などの車両ダイナミクスを反映するため，路面状態の変化などにも適用が容易である．
- (3) 現在の視覚情報のみを利用し，予測や推測といったドライバの内部モデルを仮定しない．

過去に様々な分野で人間-自動車系のモデルが提案されているが，代表的なモデルとして，心理学分野ではタンジェント・ポイント，工学分野では1次予測/2次予測前方注視点モデルがある．これらは既に多くの先行研究で車両制御への適用検討がなされており，実用上の観点からも有効性が示されている．本節では過去に提案された主要な人間-自動車系のモデルの解釈を通して，オプティカル・フロー・モデルの車両運動の制御指令値への適用可能性について検討する．

### 3.4.2 タンジェント・ポイント

Land らは自動車運転時の眼球運動分析により，ドライバの視線がカーブ内側のタンジェント・ポイントとなる点に向くことを示した．同時に視線の向きと操舵制御についての相関についても言及し，その後，視線方位角に比例した操舵制御が数多く提案されている．しかし視線向きは，ダイナミクスを含まない角度情報であり自車と道路との静的な位置関係についての説明変数に留まるため，実環境での外乱や曲率変化に対応することが難しい．本節では，タンジェント・ポイントを注視する理由について，従来のように視線向きに加え，車両ダイナミクスを反映しているオプティカル・フローで解釈できないか検討した．

具体的には旋回半径 50 m の走行経路を設定，タンジェント・ポイントを注視して

いるとしてオプティカル・フローの方位角成分について数値シミュレーションを行った。フローの様子を理解しやすくするため、道路左右に直立な壁を設定した。

Fig. 3.16 に結果を示す。本条件は道路脇の構造物による遮蔽により、将来の走行経路が十分見通せない場合と等価である。この結果から、タンジェント・ポイントを注視することは、遮蔽物が存在する状況下で、最も遠位に配置された走行経路上の点を追視していると考えられる。走行経路上の点を追視するため、眼球運動と車両運動を反映した FOE 候補点群が Fig. 3.16 のように生成され、これを制御することで目標とする走行経路を追従することが可能となる。これらから、タンジェント・ポイントは、遮蔽物が多数存在する実環境でオプティカル・フローによる軌道制御を行うための注視点選択方略であると解釈することができる。

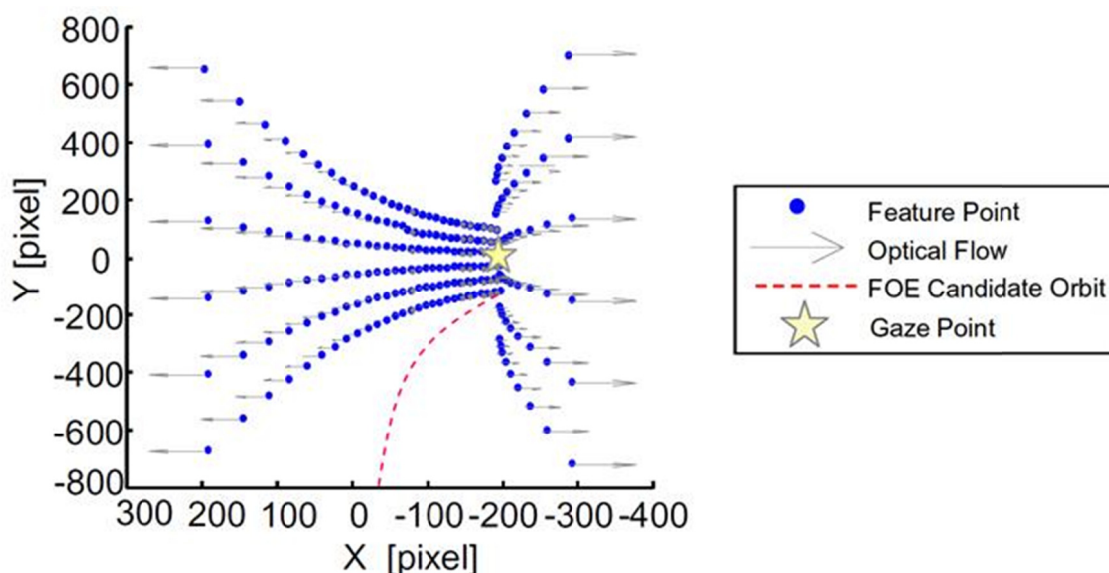


Fig.3.16:Result of Curve Running Simulation

### 3.4.3 1次予測/2次予測 前方注視点モデル

工学分野で広く利用されているモデルとして1次予測/2次予測の前方注視点モデルが挙げられる。これは車両の将来位置  $Y(t+\Delta t)$  を(3.16)式により予測し, Fig. 3.17 に示すように将来位置と目標軌道の偏差を0にするように制御するものである。

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + \dot{Y}(t)\Delta t + \frac{1}{2} \ddot{Y}(t)\Delta t^2 \quad (3.16)$$

同モデルは実際のドライバ操作による車両運動に近い挙動を示す一方、ドライバが将来軌道を予測する背景にある知覚情報について明確に言及されているとは言い難かった。

このような特徴を有する2次予測の前方注視点モデルに対し、オプティカル・フロー・モデルでの解釈を試みる。定常円旋回で走行中ドライバが(3.17)式を満たすような追視行動を行う場合、

$$\dot{\theta}_{vp} = \frac{\dot{\theta}_v}{2} \quad (3.17)$$

(3.4)式、(3.5)式で表現されるFOE候補点群は

$$O_{FOE} = \left( -\frac{v \sin(\beta - \theta_r)}{\dot{\theta}_v}, \frac{v \cos(\beta - \theta_r)}{\dot{\theta}_v} \right) \quad (3.18)$$

$$R_{FOE} = \left| \frac{v}{\dot{\theta}_v} \right| \quad (3.19)$$

となり将来の車両軌道と一致する。

(3.17)式～(3.19)式は、従来予測していると考えられてきた車両の将来軌道をFOE候補点群により直接知覚している可能性を示唆し、この場合、FOE候補点群は2次予測モデルによる軌道予測と等価となる。また、同時にFOE候補点群をうまく制御するような車両運動制御の指令値を生成できれば、2次予測の前方注視点モデルと同様に所望の走行軌道への追従が可能となる。

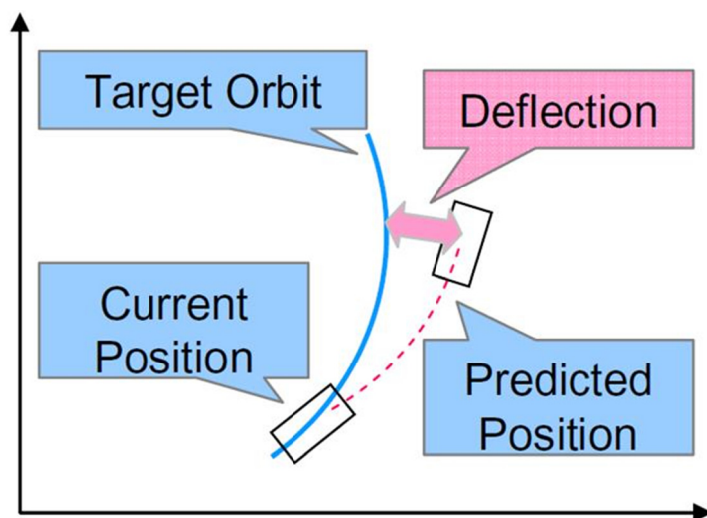


Fig.3.17: Overview of Preview-Driver Model

### 3.5 おわりに

本章では実環境における走行シーンを想定し、実際の道路構造で採用されている緩和曲線といった走行路の曲率変化や、雨や雪といった路面状態の影響で車両挙動が変動する場合などについて FOE 候補点群がどのように振る舞うかについて数値シミュレーションにより検討を行った。走行路の曲率変化においては、数値空間に構築したクロソイド曲線上を等価二輪モデルで記述された車両モデルが走行するシチュエーションを想定しシミュレーション環境を構築、FOE 候補点群を演算した。

また、路面状態が動的に変化する場合の影響については、車両運動視点からはスタビリティファクタが動的に変化することと捉えることができる。そこで定常円を走行中の車両のスタビリティファクタを急峻に変化させ、アンダーステア傾向/オーバーステア傾向を作り出し、その状況における FOE 候補点群を演算した。シミュレーションの結果、走行路の曲率が変化する場合 / 路面状態が変化する場合双方とも「FOE 候補点群と走行経路の位置関係の制御」というシンプルな方略で対処できることが分かった。

最後に、前方注視点モデルやタンジェント・ポイントといった従来の人間-自動車系のモデルについてもオプティカル・フロー、および FOE 候補点群の観点から説明することが出来、従来モデルでは説明が難しかった視覚情報と自動車の運転のメカニズムについて提案したモデルで解釈することが可能となった。

# 第4章 オプティカル・フロー・モデル を利用した操舵制御システム

## 4.1 はじめに

人間-自動車系の課題に対し前章までは、Gibson らによって与えられた視覚による自己運動知覚の理論的検討を背景に、オプティカル・フローを数式化し、ドライバの運転方略の解明を進めてきた。自己運動知覚に有効であるフローの拡大中心 (Focus Of Expansion: 以下 FOE) をモデリングした結果、通過したい任意の点が FOE 候補点群となるよう操作することで、そこに到達することが解析的に示された。また数値シミュレーションから、ドライバは安定した目標経路の追従と外乱の変動に適切に対処しながら、ラインをトレースするために、FOE 候補点群をうまく利用し制御している可能性が示された。

これらの結果から、FOE 候補点群の視覚的な制御は、日常運転の中で、走行曲率の変化や、雨や雪といった環境外乱による路面  $\mu$  の変化に直感的に、かつ、実時間で対応しながら、所望のラインをトレースする方略の一つであると言える。

本章では、まず、FOE 候補点群を制御するために非線形制御手法により制御則を導出し、その後、所望の旋回半径への収束性について分析する。次に複合コーナー走行時の車両運動データを基に、非線形制御則から舵角指令値を算出、ドライバ操舵と比較する。最後に自動操舵システムに適用する際の目標経路への追従性能について考察する。

## 4.2 FOE 候補点群制御則の導出

### 4.2.1 方針

第2章、第3章よりドライバは任意の目標点を FOE 候補点群となるよう制御することで、所望のラインをトレースしている可能性が示唆されている。これらの知見を操舵制御システムに適用し軌道追従させるには、所望の軌道上に目標点を設定し、その点のフローがゼロとなるような制御則を考えればよい。本研究では、人間の「見え」に近い情報を利用する Image-Based Control を採用する。Image-Based Control では

ドライバと親和性の高い制御を構築できる可能性があるが、フロー・ベクトル演算を高精度かつ実時間で解くことに加え、環境外乱への頑健性への対処といった実装上の技術課題も存在する。そこで今回は Image-Based Control で制御則を導出した後、安定したセンシングが可能な位置情報や運動情報を用いて制御則を変換する手法を採用する。これにより制御則の物理的な解釈や理解が可能となると共に、将来的には GNSS や LIDAR といった位置計測可能な他の環境認識センサでも実現できるなどの利点がある。

#### 4.2.2 制御則の導出

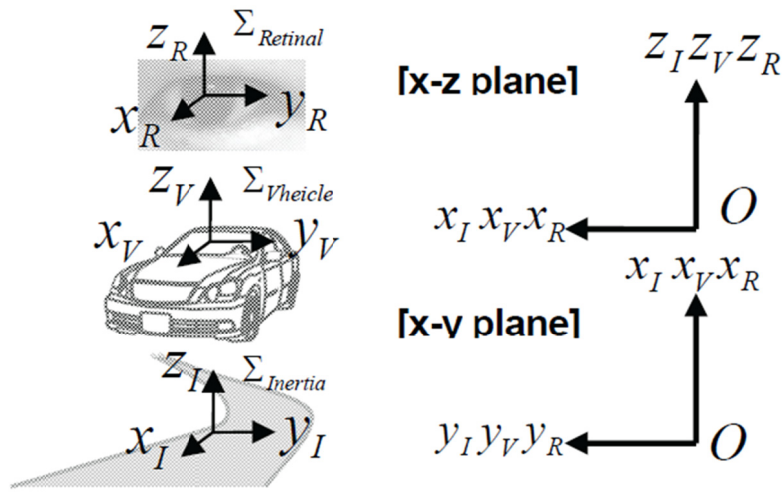


Fig.4.1: Definition of Coordination

第2章で提案したオプティカル・フロー・モデルはドライバの追視運動と、車両運動の影響を反映する。ドライバが能動的に行う追視運動を考慮してフローを演算する必要があるため、独立して設定すべき座標系は絶対座標系  $0-x_I y_I$  , 車両固定座標系  $0-x_V y_V$  , 網膜座標系  $0-x_R y_R$  の3つとした (Fig. 4.1) . 回転運動の記述をし易くするため、絶対座標系と車両固定座標系、網膜座標系は同じ向きに設定する。

フローの表現については、過去心理学分野で多くモデリングされているように網膜上の角度変化率として数式化する。同手法は画像処理分野でモデリングされているオプティカル・フローとの相互変換が可能である。網膜座標系において制御したい目標点を  $P_{ref}(x, y)$  とすると、目標点のオプティカル・フローの方位角方向成分は以下となる。

$$u = \frac{x\dot{y} - \dot{x}y}{x^2 + y^2} \quad (4.1)$$

$\dot{x}, \dot{y}$  は絶対座標系に配置されている点を網膜座標系から見たときの速度となる。車両速度を  $v$ 、車体の横すべり角を  $\beta$  とすると  $\dot{x}, \dot{y}$  は(4.2)式に従う。

$$\begin{cases} \dot{x} = -v \cos \beta + \dot{\theta}_{vp} y \\ \dot{y} = -v \sin \beta - \dot{\theta}_{vp} x \end{cases} \quad (4.2)$$

ここで  $\theta_{vp}$  は車両運動による方位角フロー  $\theta_v$  とドライバの追視運動によるフロー  $\theta_p$  の和であり以下となる。

$$\dot{\theta}_{vp} = \dot{\theta}_v + \dot{\theta}_p \quad (4.3)$$

このとき  $\theta_v$  はヨーレートを  $\gamma$  とすると(4.4)式となる。

$$\dot{\theta}_v = \gamma + \dot{\beta} \quad (4.4)$$

前章よりドライバは適切な位置に視点を設定することで将来軌道を知覚している可能性が示唆されている。このとき  $\theta_p$  が以下の拘束条件を満たすことで、FOE 候補点群は車両の物理軌道と一致する。

$$\dot{\theta}_p = -\frac{\dot{\theta}_v}{2} \quad (4.5)$$

(4.1)式～(4.5)式より目標点のオプティカル・フローの方位角成分は以下となる。

$$u = -\frac{(\gamma + \dot{\beta})}{2} + \frac{v}{x^2 + y^2} (-x \sin \beta + y \cos \beta) \quad (4.6)$$

オプティカル・フローの方位角成分の時間微分をとると

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\dot{\gamma} + \ddot{\beta}}{2} + g_1 \dot{v} - \frac{1}{2} g_2 v (\gamma + \dot{\beta}) + 2g_1 g_2 v^2 \quad (4.7)$$

ここで、 $g_1, g_2$  は以下である。

$$\begin{cases} g_1 = \frac{-x \sin \beta + y \cos \beta}{x^2 + y^2} \\ g_2 = \frac{x \cos \beta + y \sin \beta}{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (4.8)$$

通常の車両運動において横すべり角 $\beta$ は十分に小さいので、(4.6)式～(4.8)式は以下のように近似できる。

$$u = -\frac{\gamma}{2} + g_y v \quad (4.9)$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\dot{\gamma}}{2} + g_y \dot{v} - \frac{1}{2} g_x v \gamma + 2g_x g_y v^2 \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} g_x = \frac{x}{x^2 + y^2} \\ g_y = \frac{y}{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (4.11)$$

ここで任意の目標点のオプティカル・フローを制御してFOE候補点群とするための目標状態は $u \rightarrow 0$ である。目標状態を達成する制御入力をリアプノフの安定定理に基づいて決定するが、その関数の候補として次式を与える。

$$V = \frac{1}{2} u^2 \quad (4.12)$$

$K$ をフィードバックゲインとし、リアプノフ関数候補の時間微分が(4.13)式となるよう制御入力を決定する。

$$\frac{dV}{dt} = -Ku^2 \leq 0 \quad (K > 0) \quad (4.13)$$

このとき $d^2V/dt^2$ が有界であるので $dV/dt$ は一様連続となり、Barbalatの補題より $t \rightarrow \infty$ で $dV/dt \rightarrow 0$ 、つまり $u \rightarrow 0$ を達成できる。このとき車両のダイナミクスを考慮した制御設計を行うため、(4.9)式のフロー、(4.10)式のフロー変化率に加え、(4.14)式の等価2輪モデルを連立させ(4.13)式を満たす制御入力を算出する。ここで $\delta$ は前輪舵角とする。等価2輪モデルをFig. 4.2に示す。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \quad (4.14)$$

ここで各パラメータは以下である。 $K_f, K_r$ はそれぞれ前後輪のコーナリングパワー、 $M$ は車両質量、 $I$ は慣性モーメント、 $l_f, l_r$ は重心点から前後輪までの距離である。

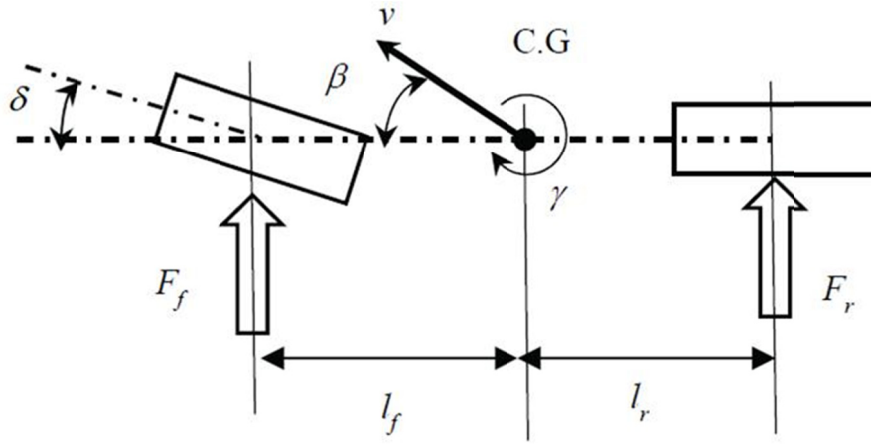


Fig.4.2: Single-Track Model

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{Iv}(K_f l_f^2 + K_r l_r^2) & -\frac{2}{I}(K_f l_f - K_r l_r) \\ -\frac{2}{Mv^2}(K_f l_f - K_r l_r) - 1 & -\frac{2}{Mv}(K_f + K_r) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{I} K_f l_f \\ \frac{2K_f}{Mv} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

以上より、任意の目標点を FOE 候補点群となるよう制御するための制御則は(4.17)式として定式化できる。ここで  $f$  は時変パラメータ  $\gamma, \dot{v}, v, g_x, g_y$  に関する関数である。

$$\delta = \frac{2K}{b_1} \left( g_y v - \frac{\gamma}{2} \right) + f(\gamma, \dot{v}, v, g_x, g_y) \quad (4.17)$$

### 4.3 目標軌道に対する収束性

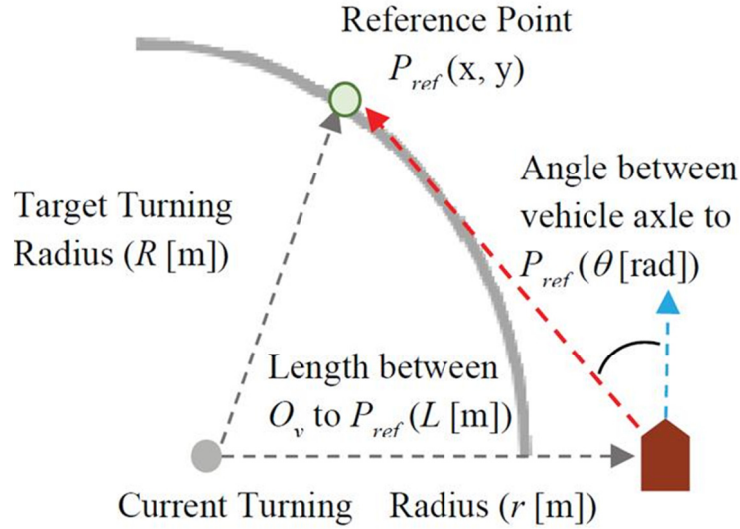


Fig.4.3: Definition of Arrangement

車両運動制御の指令値として採用するためには、所望の軌道に追従するのか物理的な観点からの分析が必要である。本節では(4.17)式の制御則を元に、目標軌道から外れている場合における収束性について幾何学的な検討を加える。

現在の走行軌道と目標軌道が乖離している状況を考える (Fig. 4.3). 絶対座標系において目標軌道上に制御したい目標点  $P_{ref}(x, y)$  を設定し、自車位置  $O_v$  から  $P_{ref}$  までの距離を  $L$ ,  $x$  軸とのなす角度を  $\theta$  とする。目標位置  $P_{ref}$  と現在の車両の旋回中心  $O_R$  との目標旋回半径を  $R$ , 自車位置  $O_v$  と現在の車両の旋回中心  $O_R$  との旋回半径  $r$  とする。このとき  $L$  および  $P_{ref}(x, y)$  は以下である。

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} x = L \cos \theta \\ y = L \sin \theta \end{cases} \quad (4.19)$$

(4.11)式, (4.18)式, (4.19)式より  $g_y$  は,

$$g_y = \frac{\sin \theta}{L} \quad (4.20)$$

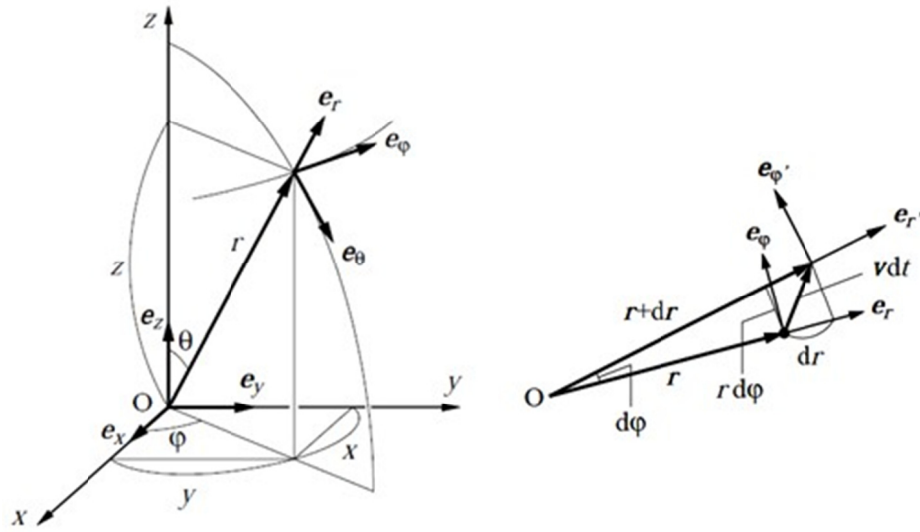


Fig.4.4:Definition of Polar Coordination

旋回半径が一定でない過渡状態において， Fig. 4. 4 に示すように車両速度は  $(e_r, e_\phi)$  を単位ベクトルとした極座標で以下のように表現できる．

$$\vec{v} = \frac{dr}{dt} e_r + r \frac{d\phi}{dt} e_\phi \quad (4. 21)$$

(4. 9) 式， (4. 20) 式， (4. 21) 式より  $u \rightarrow 0$  の状態を達成できた場合の条件式は (4. 22) 式のように求まる．

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{\sin \theta}{L} \sqrt{\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \left(r \frac{d\phi}{dt}\right)^2} = 0 \quad (4. 22)$$

(4. 22) 式がどのように振舞うか検討することで  $u \rightarrow 0$  における幾何学的な収束性について評価できる．ただし (4. 22) 式は半径方向速度によって結果が変わるため，以下の 2 条件について収束性を検討する．

<条件 1 :  $dr/dt \approx 0$  が成立する場合>

旋回半径が十分に大きい場合,  $dr/dt \approx 0$  が成立すると考えることができるため  
(4.22)式は

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{\sin \theta}{L} \left( r \frac{d\varphi}{dt} \right) = 0 \quad (4.23)$$

幾何学的な拘束条件は余弦定理により

$$R^2 = L^2 + r^2 - 2Lr \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (4.24)$$

変形して整理すると

$$R^2 - r^2 = L^2 - 2Lr \sin \theta \quad (4.25)$$

と表される. 横すべり角 $\beta$ は十分に小さいとすると(4.26)式が成立し,

$$\frac{d\varphi}{dt} = \gamma \quad (4.26)$$

(4.23)式に(4.26)式を代入して整理すると(4.27)式が得られる.

$$L^2 - 2Lr \sin \theta = 0 \quad (4.27)$$

ここで (4.25)式に条件式(4.27)式を代入すると

$$R^2 - r^2 = 0 \quad (4.28)$$

$u \rightarrow 0$  の状態を達成できた場合, 現在の旋回半径  $r$  は目標旋回半径  $R$  に収束し,  
結果として目標軌道に収束することが(4.28)式より理解できる.

<条件 2 :  $dr/dt \neq 0$  の場合>

旋回半径が小さいなど  $dr/dt$  が無視できない場合, (4.22)式を変形し(4.29)式が求まる.

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{\sin \theta}{L} \left( r \frac{d\varphi}{dt} \right) \sqrt{1 + \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 / \left( r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2} = 0 \quad (4.29)$$

ここで横すべり角  $\beta$  は十分に小さいとする. また  $\beta$  が小さい場合,  $\dot{r} \ll r\gamma$  であることから Taylor 展開して(4.30)式を得る.

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{r\gamma \sin \theta}{L} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{r}}{r\gamma} \right)^2 - \frac{1}{8} \left( \frac{\dot{r}}{r\gamma} \right)^4 \dots \right\} = 0 \quad (4.30)$$

Taylor 級数を近似的に第 2 項まで考え, 両辺に  $2L^2/\gamma$  を掛けると

$$L^2 - 2Lr \sin \theta \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\dot{r}}{r\gamma} \right)^2 \right\} = 0 \quad (4.31)$$

ここで(4.19)式を考慮し整理すると以下が求まる

$$L^2 - 2Lr \sin \theta = \frac{y}{r} \left( \frac{\dot{r}}{\gamma} \right)^2 \quad (4.32)$$

(4.25)式に(4.32)式を代入すると

$$R^2 - r^2 = \frac{y}{r} \left( \frac{\dot{r}}{\gamma} \right)^2 \quad (4.33)$$

となる. 以上より,  $dr/dt$  が無視できなくなった場合に目標軌道に収束させるためには, ①(4.33)式の左辺の項を補正するような項を制御入力に加える, ② $y$  が十分小さくなるように目標点  $P_{ref}$  を選ばばよい.

## 4.4 ドライバ操作との比較

ドライバ操作との比較を通して(4.17)式の制御則の有効性について検討する. 具体的にはドライバが所定のコースを運転し, そのときの計測データを用いて(4.17)式から操舵角指令を算出し, 実操舵と比較する. このとき, FOE 候補点群の制御則の特徴を明確化するために, 過去多くの先行研究がなされている前方注視点2次予測モデルについても同様の方法で比較する. なお, 本実験は, 株式会社デンソーの研究倫理審査委員会における承認を得た上で実施した.

### 4.4.1 実験の目的

エキスパート・ドライバと一般ドライバといった技量の違う2群のデータを分析, 運転技量と各制御則との比較を通し, 制御則の特徴を明確化することを目的とし, 実験を行う.

### 4.4.2 実験参加者

文書によるインフォームド・コンセントを得た20代~40代の健常成人12名を対象とした. うち6名は, 特別な運転訓練を受け, 製品評価に従事しているエキスパート・ドライバであり, 残り6名は普通運転免許を所有しているが, 運転暦は様々である一般ドライバとした.

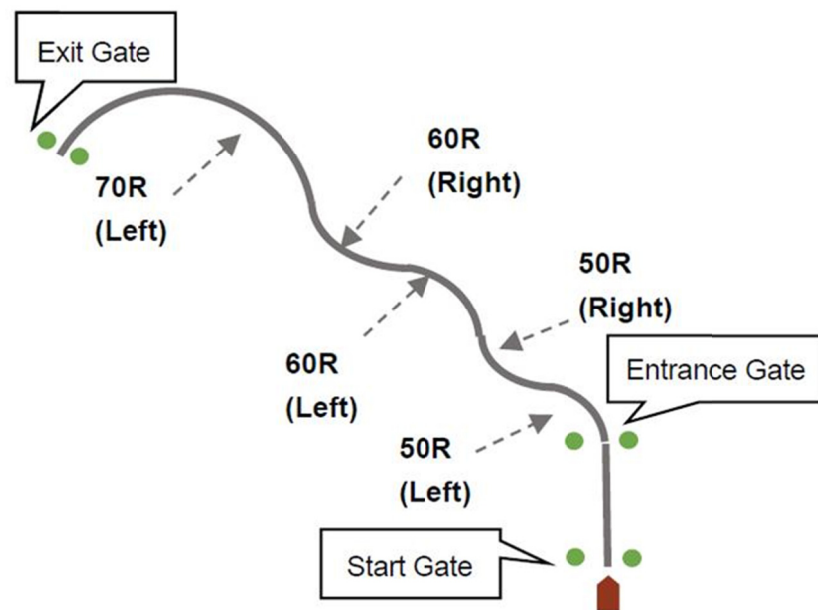


Fig.4.5:Experimental Course

### 4.4.3 実験課題

実験はデンソーが所有するテストコース内に複合コーナーを設置して実施した (Fig. 4.5). 複合コーナーは 50R~70R のコーナーより構成され, 緩和曲線は設定していない. 複合コーナーに入る前に, 加速区間として直線路を設置している. 実験参加者には, 特に走行ラインは意識させず通常の運転をするよう教示した. また, 速度を意識し過ぎ, メータを注視してしまうことを避けるため 50km/h 程度を目標速度域として教示した. 順応を避けるためテスト走行については必要最小限とした.

### 4.4.4 車両挙動解析システム

VRS-GNSS を車軸上に前後 2 つ取り付け (Fig. 4.6), 車両の走行軌道 (位置と角度) の計測を行った. VRS-GNSS はオープンスカイで衛星配置が良好な場合, 位置精度は  $\pm 2.5$  cm, 角度精度は  $\pm 0.1$  deg 程度で計測することが可能である. また, 車載センサによりヨーレート, 前後/横加速度, 車両速度を計測している.



Fig.4.6: Vehicle Motion Measurement System

### 4.4.5 各制御則による操舵指令生成

前方注視点 2 次予測モデルは様々な改良が加えられているが本稿では理論式を簡潔に表現できる 2 次予測舵角速度制御の前方注視点モデルを対象とする. 操舵指令  $\delta$  は (4.34) 式の前注視点偏角  $\varepsilon_T$  により (4.35) 式として表せる. (4.34) 式の分子は 2 次予測軌道と目標軌道の偏差であり,  $T$  は前方注視点時間である.

$$\varepsilon_T(t) = - \frac{Y(t) + T\dot{Y}(t) + \frac{T^2}{2}\ddot{Y}(t) - Y_T(t)}{Tv} \quad (4.34)$$

$$\delta = -\frac{K_d}{(1 + T_d s)} \varepsilon_T(s) \quad (4.35)$$

一方, FOE 候補点群の制御則は(4.17)式として求められ, 目標点  $P_{ref}(x, y)$ , 車両速度  $v$ , ヨーレート  $\gamma$  を入力として, 前輪舵角指令値  $\delta$  を生成する. FOE 候補点群制御および, 前方注視点 2 次予測モデル双方とも目標点  $P_{ref}$  については, GNSS で計測した自車の走行軌跡, 現在位置, および前方注視時間  $T$  から選択する. 本検討において前方注視時間は 1[sec], 2.5[sec], 4[sec] とした. ゲインの設定については先行研究より  $T_d=0.3$  とした.  $K_d, K$  の選定については人間-自動車系の閉ループ安定性は考慮せず, ドライバの第 1 操舵における操舵角最大値と一致するよう調整した. 実験参加者のデータにおいて選択した  $K_d, K$  について Table 4.1, Table 4.2 に示す. また制御パラメータについて Table 4.3 に示す.

Table 4.1: Control Gain of  $K_d / K$  (Ordinary)

	$T=1$	$T=2.5$	$T=4$
$K_d$	2.054	1.087	0.595
$K$	0.636	0.984	1.151

Table 4.2: Control Gain of  $K_d / K$  (Expert)

	$T=1$	$T=2.5$	$T=4$
$K_d$	1.986	0.910	0.397
$K$	1.007	1.292	1.422

Table 4.3: Control Parameter

Symbol	Value
$M$	1670 [kg]
$I$	2800 [kgm <sup>2</sup> ]
$K_f$	110 [kN/rad]
$K_r$	120 [kN/rad]
$l_f$	1.38[m]
$l_r$	1.47[m]

#### 4.4.6 結果

2次予測操角速度制御の結果を Fig. 4.7, Fig. 4.9 に, FOE 候補点群制御の結果を Fig. 4.8, Fig. 4.10 に示す. 2次予測舵角制御で  $T = 1[\text{sec}]$  の場合, 実操舵に比べて切り遅れが生じ,  $T = 2.5 \sim 4[\text{sec}]$  となるに従いタイミングや操作量がドライバ操作に近づいていく. また, FOE 候補点群の場合では  $T$  を変動させた場合, タイミングに差異はあるものの, 指令値プロファイルはドライバ操舵にかなり近い傾向を示す.

運転技量と各制御則の関係についてより明確にするため,  $T$  を変動させた場合の各制御則の指令とドライバ操舵の平均2乗誤差(RMSE: Root Mean Square Error)を算出し Mann-Whitney 検定を行った.  $T = 1[\text{sec}]$ ,  $4[\text{sec}]$  のときの結果を Fig. 4.11~4.14 に示す. なお, 各結果ともステアリングホイール角度で評価している. (前輪操舵角はステアリングギアレシオ 17.5 を加味して算出される.)

これらの結果より, 2次予測角度制御は  $T$  の増大に従い RMSE が減少しドライバ操舵に近づく (Fig. 4.11, 4.13) が, 運転技量の差異については有意に表現できない (有意確率:  $p = 0.22, 0.31$ ). 一方, FOE 候補点群制御は RMSE が全体的に低く抑えられており, 特に  $T$  が小さいほどその傾向は顕著である (Fig. 4.12, 4.14). 加えて運転技量についても有意差が示されている (有意確率:  $p < 0.05$ ).

本検討により複合コーナーやS字コーナーにおいては, 横偏差を制御する前方注視モデルより, 旋回半径の偏差を制御する FOE 候補点制御の方がドライバ操作により近い指令を生成することが分った. 横偏差ではなく旋回半径を制御するため, S字コーナーの切り返しの箇所においても安定して指令値を生成するといった特徴がある.

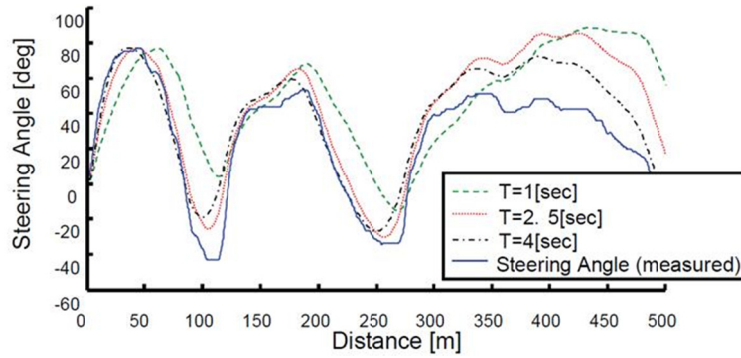


Fig.4.7:Experimental Result of Preview Model Control (Ordinary)

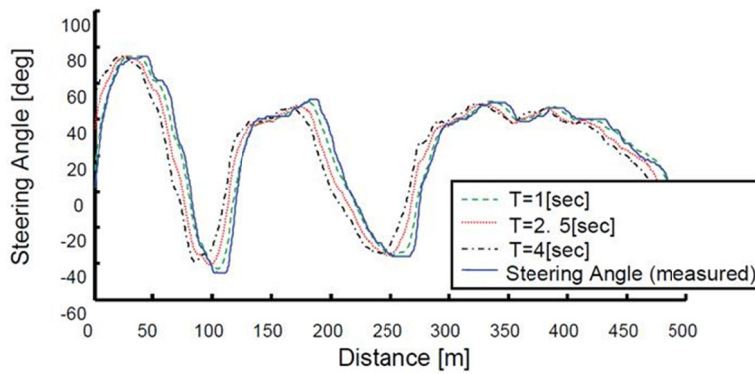


Fig.4.8:Experimental Result of FOE Candidate Points Control (Ordinary)

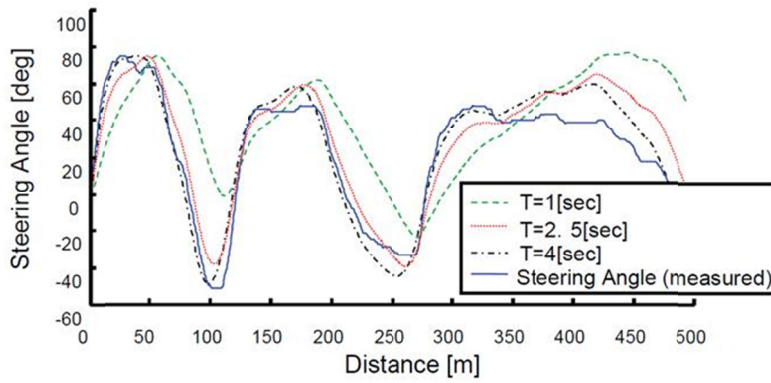


Fig.4.9:Experimental Result of Preview Model Control (Expert)

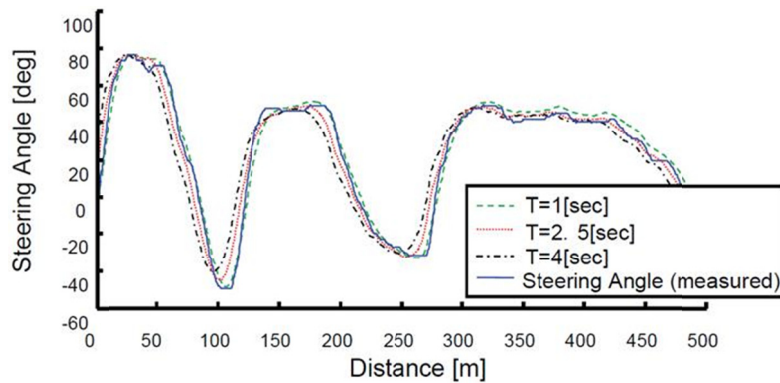


Fig.4.10: Experimental Result of FOE Candidate Points Control (Expert)

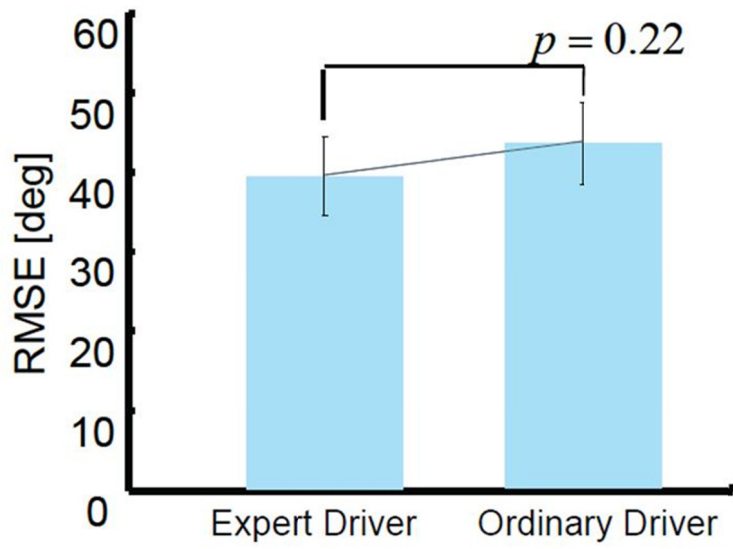


Fig.4.11: Comparison of RMSE(Preview Model Control: T=1)

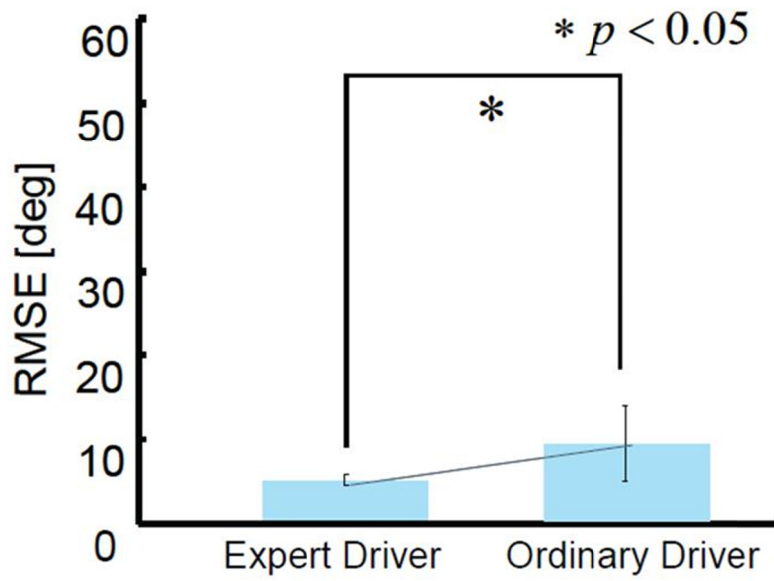


Fig.4.12: Comparison of RMSE(FOE Candidate Control: T=1)

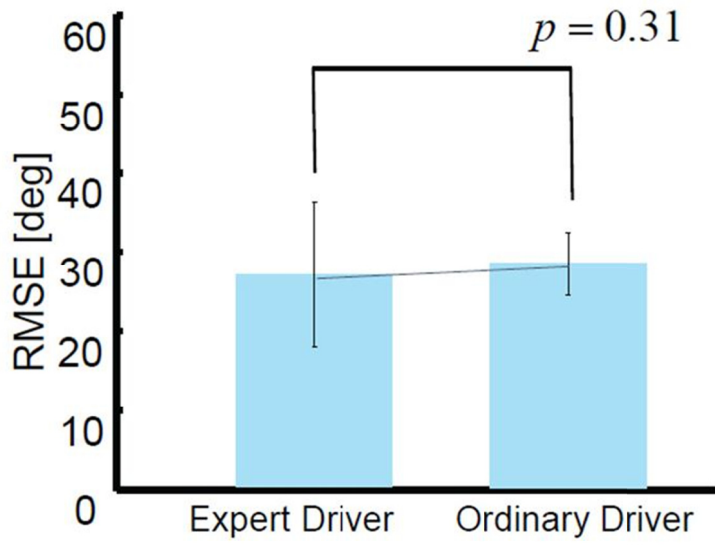


Fig.4.13: Comparison of RMSE (Preview Model Control: T=4)

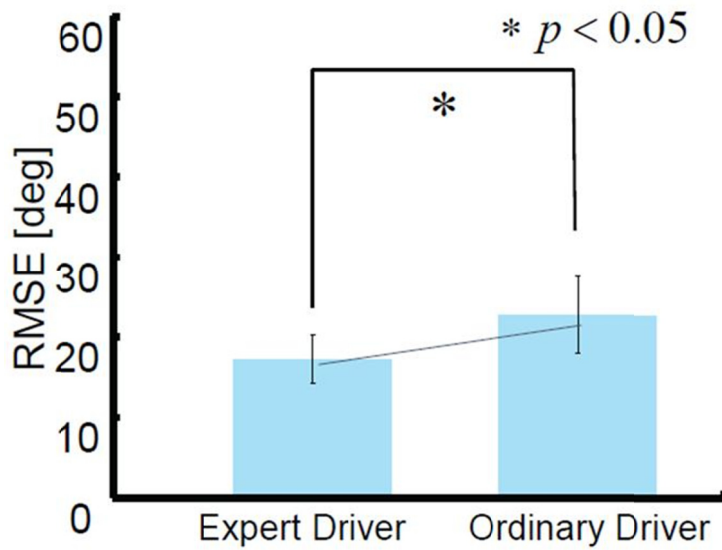


Fig.4.14: Comparison of RMSE(FOE Candidate Control: T=4)

#### 4.4.7 実システムへの適用に向けた考察

FOE 候補点群の制御で  $T$  が小さいということは、(4.33)式の  $y$  が小さいことと等価である。つまり、現在の車両の旋回半径  $r$  が近位の点の目標旋回半径  $R$  に十分収束するよう操舵指令が生成される。そのため実際の走行軌道を基準とした今回のような解析では  $T$  が小さいほど実操舵との適合度合いが高くなる。また、 $T$  が大きいほど遠位の点を目標点として旋回半径を合わせにいくため、実際の走行軌道との乖離が大きくなることにより RMSE が増加する。これは目標点の選択が軌道のトラッキング性能に影響を及ぼすことを示している。 $T$  を小さくとればトラッキング性能は向上する一方、(4.17)式の第一項  $g_y v - \gamma/2$  は大きな値となるため、結果としてハイゲインになったような挙動を示すことが予想される。これは近い点を見るとオプティカル・フローが大きくなることに対応する。乗り心地とトラッキング性能のバランスをうまく取るための目標点を選択することが重要となる。

FOE 候補点群の制御則におけるエキスパート・ドライバの RMSE は  $T=1[\text{sec}]/4[\text{sec}]$  のときでも低く抑えられており、前輪操舵角相当に換算すると約  $0.2\sim 0.9[\text{deg}]$  程度の誤差に抑えられている。これは局面に応じて、目標地点を変動させることで、トラッキング性能と乗り心地をうまくバランスさせながら走行できる可能性を示唆する。

これは例えば、目標点  $P_{ref}(x, y)$  を  $1[\text{sec}]$  と  $4[\text{sec}]$  で交互に、かつ離散的に移動させたとしても制御ゲインさえ事前にスケジューリングしておけば安定した操舵制御を行える。目標点の選択幅があることは、採用しているセンサの測距範囲に合わせて調整が可能であることを示すものであり、実システムへの適用時には非常に有効である。

## 4.5 自動操舵システムへの適用

本節では前節までに算出した FOE 候補点群の非線形制御則を実車両の自動操舵システムに適用し、提案制御の妥当性について検討する。まず初めにシステム構成について述べ、次に実際の車両に適用した場合の結果について考察する。提案制御は第3章のシミュレーション結果で示したように路面摩擦係数 $\mu$ によるスタビリティファクタの変化にも適応できる可能性がある。そのため、実車試験はドライ路面 (Fig. 4.15), および圧雪路面 (Fig. 4.16) といった $\mu$ の異なる走行路で実施することとした。



Fig.4.15 : Dry Pavement



Fig.4.16: Snow Covered Pavement

### 4.5.1 システム構成

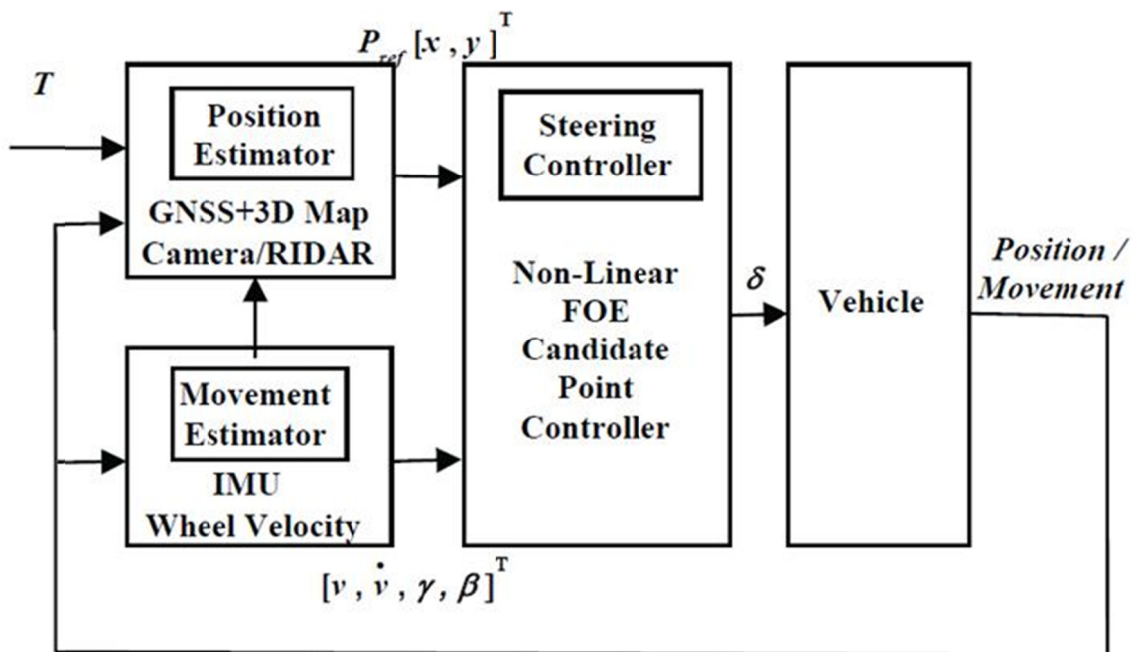


Fig.4.17: System Configuration

自動操舵システム構成を Fig. 4.17 に示す. システムは位置を推定する Position Estimator, 運動を推定する Movement Estimator および非線形制御則を実装している Steering Controller から構成される. VRS-GNSS および高精度ジャイロシステムが位置を推定するために利用され, 絶対座標系での位置および角度を高精度に計測する. 本研究において目標軌道は3次元地図として事前にシステムが保有しており, 目標通過点  $P_{ref}$  は前方注視距離  $D$  [m] によって一意に定められることとした (Fig. 4.18). このとき,  $D$  は下記のように前方注視時間  $T$  [sec] によって下記のように表すことができる.

$$D = vT \quad (4.36)$$

3次元地図とVRS-GNSSの測位情報を利用して数値的にマップマッチングした後, 目標通過点  $P_{ref}$  は(4.36)式によって与えられる. Position Estimatorによる目標通過点の出力結果  $P_{ref}[x, y]T$  およびMovement Estimatorによる現在の車両運動状態  $[v, \dot{v}, \gamma]T$  を利用して非線形制御コントローラが舵角指令値を生成する.

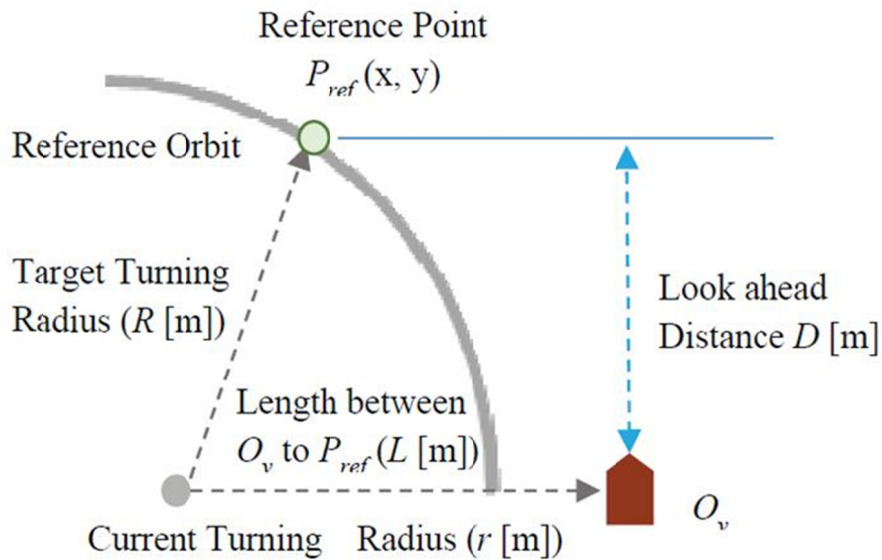


Fig.4. 18: Definition of Arrangement

## 4.5.2 実車試験条件

提案制御による軌道追従性能を検証するため、株式会社デンソーの網走テストセンターの山岳路で実車試験を実施した。Fig. 4.19 に山岳路の曲率を示す。Fig. 4.19 に示されるように、対象コースは複数の曲率の異なる複合コーナーで構成されており、各コーナーの旋回半径は  $50R \sim 100R$  を中心に  $500R$  程度まで存在する。

同試験は提案制御手法が車両パラメータの変化にどの程度対応可能か明確化するため、ドライ路面（路面摩擦係数  $\mu=1$ ）と圧雪路面（路面摩擦係数  $\mu=0.2$ ）で行った。但し、圧雪路面については路面摩擦係数が十分統制されているわけではなく、凍結している箇所やぬかるみ、轍などが存在する。

このときの制御パラメータを Table 4.4 に示す。ドライ路面および圧雪路面であっても同パラメータは同一のものを採用した。

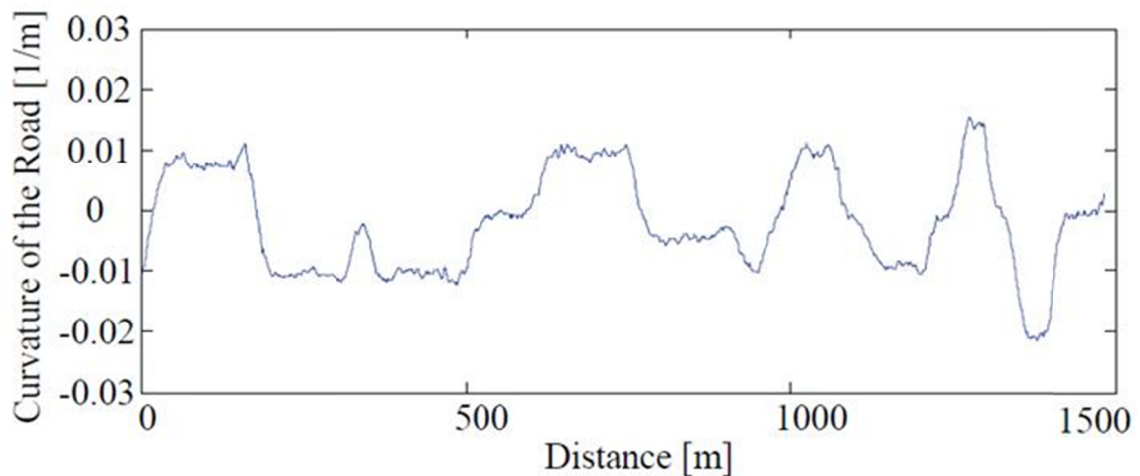


Fig.4.19: Overview of Curvature of the Road

Table 4.4: Control Parameter

Symbol	Value
$M$	1670 [kg]
$I$	2800 [ $\text{kgm}^2$ ]
$K_f$	110 [kN/rad]
$K_r$	120 [kN/rad]
$l_f$	1.38[m]
$l_r$	1.47[m]
$T$	1.5 [sec]
$K$	0.984

### 4.5.3 実車試験結果

Fig. 4. 20, Fig. 4. 21 にドライ路面での提案制御で目標軌道に追従させた結果を示す. Fig. 4. 20 は目標通過点 *Pref*におけるオプティカル・フローの方位角成分を表しており, フローが0付近に収束するよう制御則が機能していることが分かる. 一方, Fig. 4. 21 は目標軌道からの横偏差を示しており, 複合コーナーであっても $\pm 0.25$  m程度のトラッキング性能を実現できている.

Fig. 4. 22, Fig. 4. 23に圧雪路面での目標軌道への追従結果を示す. Fig. 4. 22 は目標通過点 *Pref*におけるオプティカル・フローの方位角成分を, Fig. 4. 23 は目標軌道からの横偏差を示している. Fig. 4. 23 から, 圧雪路走行における目標軌道からの横偏差は $-0.3$  mから $0.55$  mとなっている. このとき, 特に注目すべき点は開始地点から $600$  mの地点で横偏差が急峻に大きくなっている点である.  $600$  [m]地点においては路面が凍結しており車両がスリップし瞬間的に大きな横偏差が発生したタイミングと一致する.

凍結による路面摩擦係数の低下に対し, 十分にタイヤがグリップしないため車両に滑りが発生したタイミングで, ドライバの視覚情報としての周囲環境/景色の流れがより急峻になり, 目標通過点 *Pref*のオプティカル・フローも増加する. このとき非線形制御コントローラはオプティカル・フローを収束させるよう瞬間的に動作するため, Fig. 4. 22 よりフローが増加した直後, 速やかに収束させるよう制御されることが示された. 一方, Fig. 4. 23 から目標軌道からの横偏差はフローの収束より少し遅れて次第にゼロへ収束していくことが分かる.

これら実車試験結果より提案した制御則は, 目標通過点 *Pref* のオプティカル・フローを迅速に収束させる一方, 横偏差はそれより時間を掛けて徐々に収束させることが示された. これがオプティカル・フローを直接制御する場合の大きな特徴であると考えられる. 前節における収束性の物理的意味解釈を踏まえると, オプティカル・フローを制御することは現在の車両の旋回半径を目標通過点における旋回半径と一致させることと等価となる. すなわち, オプティカル・フローを制御することは現在の位置における横偏差についてはある程度寛容であるが, 目標通過点を通過するよう旋回半径が時々刻々制御される特徴を有することを意味する. 横偏差に鋭敏過ぎないという特徴は, 本試験のように路面摩擦係数が変化した場合でも動的な安定性を有したまま, 軌道追従制御を実現できることを示す.

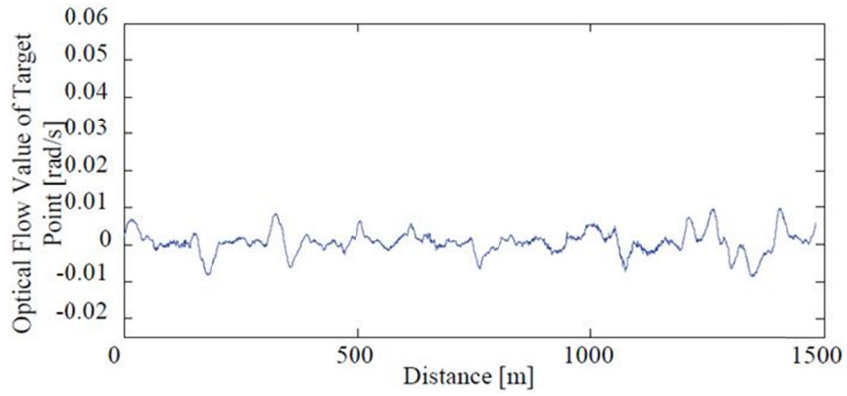


Fig.4.20: Result of Optical Flow Generated at Target Point (Dry)

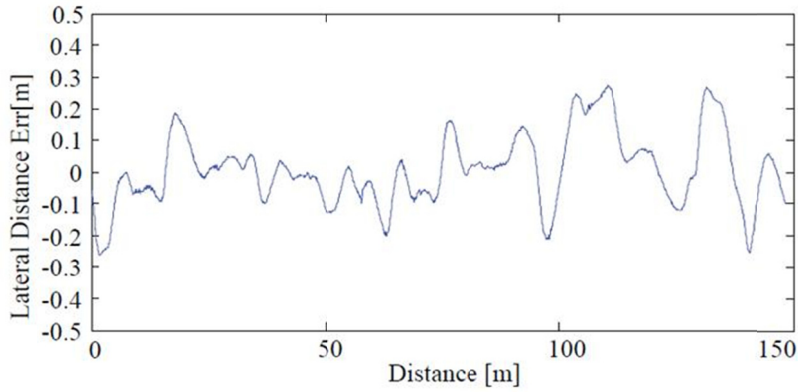


Fig.4.21: Result of Lateral Error (Dry)

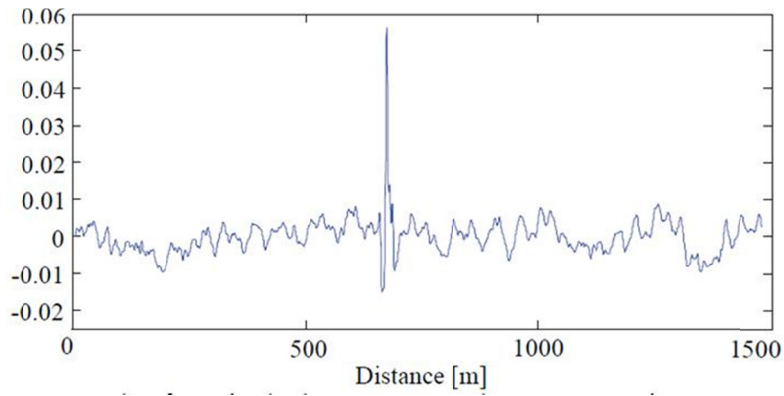


Fig.4.22: Result of Optical Flow Generated at Target Point (Snowy)

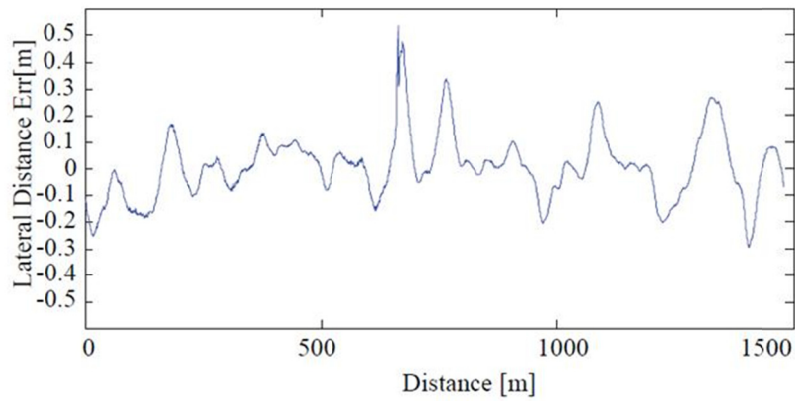


Fig.4.23: Result of Lateral Error (Snowy)

## 4.6 おわりに

本研究では FOE 候補点群を制御するための制御則を提案した。オプティカル・フローおよび FOE 候補点群は非線形方程式で記述されるため、リアプノフの安定化定理を利用した非線形制御則を導出した。また、FOE 候補点群の制御といったドライバの視覚情報を直接制御することの物理的意味を解釈するため、導出した制御則の収束性について解析的に分析を加えた。分析の結果、FOE 候補点群の視覚的な制御は現在の旋回半径を目標地点の旋回半径に収束させるような特徴を示すことが分かった。

次に提案した制御則の有効性を示すためにドライバ操作および過去に提案された前方注視点 2 次予測モデルとの比較を行った。比較検討の結果、提案制御は技量の違いについて表現することが出来るとともに、よりドライバ操作に近い振る舞いをする事が分かった。

これら分析や検討を背景に、提案制御則を自動操舵システムに適用し実車試験にて有効性の検討を行った。第 3 章での数値シミュレーションを通して、路面摩擦係数の異なる状況でも追従性能が確保できる可能性があったことから、ドライ路面と圧雪といった路面  $\mu$  の異なる条件で軌道追従制御を実施し、有効性について定量的に検証した。

## 第5章 結言

本研究では、エキスパート・ドライバの高度な運転方略に着目し、運転に利用している情報の特定・モデリングを通じた目的変数の明確化、および車両の運動特性を考慮した制御則の提案、最後に実際の車両制御システムへ適用し評価を行うことで、人間と親和性の高い運動制御システムの具現化を行った。第2章では、実車試験を通して、エキスパート・ドライバの高度運転方略の分析及びオプティカル・フローのFOE候補点群についてモデリングを行った。第3章ではFOE候補点群の特徴を把握するため実際の走行シチュエーションに近い状況を想定し数値シミュレーションを行った。第4章ではFOE候補点群を制御するための非線形制御則を提案し、オプティカル・フローを制御することの物理的意味解釈、ドライバ操作との比較を行い、最後に実車両の自動操舵システムに適用し有効性を確認した。

第2章で提案したオプティカル・フロー・モデルで生成されるFOE候補点群は、従来、予測や予見として捉えられていた車両の将来軌道と一致する。この結果は、通過したい任意の目標点をFOE候補点となるよう操作することで、そこに到達することを意味する。オプティカル・フローによるライントレース方略を運転技量と合わせて考察すると、エキスパート・ドライバは遠位の目標点（CP/コーナー出口）に注視点を定位させ、その領域のフローを最小化することで高精度のライントレースを実現していると考えられる。一方、一般ドライバはかなり接近してから注視点を目標点に定位させるため、近位の領域を意識して軌道を制御している可能性が高い。提案したオプティカル・フロー・モデルを、乗員の乗り心地の評価や、運転支援システムの制御指標として適用していくことで、ヒトの感覚と親和性の高い運転支援が可能となると考えられる。

第3章では、車両がアンダー/オーバー傾向を示している場合や、走行軌道の曲率が連続的に変化していく場合などについて数値シミュレーションを通し分析を行った。また、従来の人間-自動車系のモデルについて、ドライバの視覚情報であるオプティカル・フローの観点から理解・解釈を加えた。

数値シミュレーション結果より、FOE候補点群をうまく制御してやることで、ドライバは安定した目標経路の追従と外乱の変動に適切に対処しながら、ラインをトレースしている可能性が示された。FOE候補点群の視覚的な制御は、日常運転の中で、走行曲率の変化や、雨や雪といった環境外乱による路面 $\mu$ の変化に直感的に、かつ、実時間で対応するための方略の一つである。特に、車両のヨーレートや速度のみならず、横すべり角も含めたダイナミクスの情報で軌道を制御するため、より精度の高い走行ラインのトレースが期待できる。

また、車両制御への適用実績が十分である2次予測の前方注視点モデルといった人

間-自動車系のモデルは、オプティカル・フローの観点からの理解・解釈ができるため、これら知見をうまく統合していくことでドライバと親和性の高い車両運動システムを構築することが可能となることも示唆された。

第4章では解析的な分析、実車試験による検討を通して、FOE 候補点群の制御には以下の特徴があることが分った。

- ① FOE 候補点群の制御は、旋回半径を制御すること。
- ② FOE 候補点群の制御は目標点の選択幅に自由度があること。

目標地点での旋回半径を実現するように制御することは、旋回曲率を制御することと等価である。旋回曲率は横加速度の発生に対して支配的なため、旋回中の乗り心地に影響する。FOE 候補点群の過渡応答をより細かく制御することができれば、乗り心地に関わる要因を直接制御できる可能性がある。また、目標点の選択に自由度があることは工学的な応用を考える上で非常に有効であり、対象センサが得意とする認識距離で比較的自由にシステムを組める。

また、数値シミュレーション結果を背景に、FOE 候補点群は車両特性の変化に対しても適応的に目標軌道に追従できる可能性があるため、実環境に近い状況を想定し、コーナリングパワーが動的に変動する環境下（前後荷重移動やサスペンションのバンブ/リバンブが頻発するアップダウンのある山岳路において、路面 $\mu$ が異なる条件）での走行試験を実施した。結果、動的な安定性を有したまま、軌道追従制御を実現できることが実車環境下で示された。これは人間が有している環境への適応性の一部についてある程度説明することができる。

以上のように本研究ではエキスパート・ドライバの高度な運転方略の深い分析・理解を元に、ドライバが利用している可能性のある視覚情報であるオプティカル・フロー、およびFOE 候補点群を利用した自動操舵制御システムを構築した。FOE 候補点群を厳密に制御することが出来れば、乗り心地と路面 $\mu$ の変化への対応といった環境適応性の両立が期待できる。一方で、本研究でモデリングし車両運動制御に適用することが出来たのはエキスパート・ドライバが行っている運転方略の一部でしかない。実際にドライバは多くの感覚情報を利用してより高度な運転を実現している。具体的には、体性感覚で捉えることが出来ると言われているG感やシャシの姿勢、ステアリングを通して感じる路面の情報などがそれである。今後、視覚感覚のみならず体性感覚を含めた感覚量の解析的なモデリングを通して、ドライバや乗員が一体何を感じているのか、運転支援サービスに必要な機能は何か、を明確にしていく必要がある。そうすることで真に人間と親和性の高いシステムをシステムティックに開発することができるようになるのではないか。これら取り組みを通して人間-機械系のあるべき姿を模索し、研究からエンジニアリングに落とししていくことが重要であると考えられる。

# 謝辞

本研究に際し、多くの方々に多大なるご援助を頂きましたことをここに記し、感謝の意を表します。

まず最初に本論文選考の副査である、横小路泰義教授に深く感謝申し上げます。横小路教授には、日々の研究会での熱心な議論をはじめ、本研究を行う上で終始適切な御指導、御助言を賜わり、研究者としての姿勢を学ぶことができました。同じく本論文選考の副査をお引き受けいただき、本論文の作成にあたり適切かつ懇切な御指摘、御指導を賜りました、小澤誠一教授に感謝申し上げます。

次に、本研究を行う機会を与えていただき、あらゆる面で懇切なる御指導ならびに終始かわらぬ温かい御援助をいただきました、深尾隆則准教授に心より感謝申し上げます。深尾准教授の、幅広い知識を背景とした深い洞察、独創性を大切にした研究の進め方について、研究者として非常に大きな影響を受けました。また、本研究は深尾准教授なくしては成し得ないものでした。ここに、心から感謝申し上げます。

研究の遂行にあたり、常にご指導、ご協力頂いた(株)デンソーの松本平樹氏、片岡資章氏、宮本紘政氏、赤塚久哉氏、三宅哲平氏、戸塚誠司氏に厚く御礼申し上げます。松本平樹氏には車両の運動と制御について、日々の業務の中で有益な議論をして頂きました。片岡資章氏には開発車両の初期プロトタイプングにおいて、現場で議論しながら開発を進めさせて頂きました。宮本紘政氏と赤塚久哉氏には車両開発と電子システム設計に、三宅哲平氏にはセンシング環境の立ち上げにそれぞれ協力頂きました。また、戸塚誠司氏とは共に現場で開発を進め、評価ドライバの視点から運転技量や運動知覚について熱心な議論や貴重なご意見を頂きました。

長期に渡る実車試験において共に実験に励んだ有尾拓誠さん、吉本達也さん、米田真美さん、岡藤勇希さん、英峻成さんをはじめとする複雑系機械工学研究室のメンバーに心から感謝申し上げます。彼らのお蔭で困難な研究も楽しく進めることが出来ました。

最後に、常に精神的な支えとなり、温かく見守ってくれた家族に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] 自動車工業会 ”世界各国の四輪車保有台数”  
[http://www.jama.or.jp/world/world/world\\_2t1.html](http://www.jama.or.jp/world/world/world_2t1.html)
- [2] AUTOSAR Publications ”Specification Release4.1”  
<http://www.autosar.org/>
- [3] 財団法人自動車検査登録情報協会 ”自動車保有台数統計データ”  
<http://www.airia.or.jp/number/index.html>
- [4] NHTSA ”Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles”
- [5] 松井俊浩, 金出武雄: デジタルヒューマン技術による人間システムのモデル化, 計測と制御, Vol. 45, No. 12(2006), pp. 993-998
- [6] 近藤政一: 自動車の操舵と運動間に存在する基礎的關係について, 自動車技術会論文集, No. 5(1958)
- [7] 吉本堅一: 予測を含む操舵モデルによる人間自動車系のシミュレーション, 日本機械学会誌, Vol. 71, No. 596(1968), pp. 1181-1186
- [8] 吉本堅一: 人間-自動車系のシミュレーション, 自動車技術, Vol. 25, No. 10(1971)
- [9] Land, M. F. and Lee, D. N. : Where we look when we steer, Nature, Vol. 369 (1994), pp. 742-744
- [10] 小島幸夫: 初心運転者と熟練運転者の運転特性, 自動車技術会論文集, Vol. 28, No. 2(1997)
- [11] 藤岡健彦: 前方注視ドライバ・平面二輪自動車系の安定性に関する理論的研究, 自動車技術会学術講演会前刷集 (2012)
- [12] 堀井泰聡, 土居俊一, 和田隆広, 森川慶祐: 可変配光前照灯(AFS)の有効性評価に関する研究: 自動車技術会論文集, Vol. 40, No. 6 (2009), pp. 1593-1598

- [13] Gibson, J. J. : The perception of the visual world, Houghton Mifflin (1950)
- [14] Erkelens, C. J. : Coordination of smooth pursuit and saccades, Vision Research 46 (2006) pp.163-170
- [15] 平山高嗣, 間瀬健二, 武田一哉: 注意散漫状態下の運転者の周辺車状況変化に対する注視反応タイミングの分析, The 26th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence(2012)
- [16] Royden, C. S. : Analysis of Misperceived Observer Motion During Simulated Eye Rotations, Vision Research, Vol. 34 No. 23(1994), pp. 3215-3222
- [17] Warren, W.H. and Hannon, D. J. : Direction of self-motion is perceived from optical flow, Nature, Vol. 336(1988)
- [18] Banks, M. S. , Ehrlich, S. M. , Backus, B. T. and Crowell, J. A. : Estimating heading during real and simulated eye movements, Vision Research, Vol. 36(1996), pp. 431-443
- [19] Royden, C. S. , Crowell, J. A. and Backus, B. T. : Estimating Heading During Eye Movements, Vision Research Vol. 34 No. 23(1994), pp. 3197-3214
- [20] Warren, W.H. and Hannon, D. J. : Eye movements and optical flow, Journal of the Optical Society of America, A7 (1990), pp.160-169
- [21] Van Den Berg, A. V. : Robustness of Perception of Heading from Optic Flow, Vision Research, Vol. 32, No. 7(1992), pp. 1285-1296
- [22] 近江政雄 : 自己運動の方向の知覚, VISION Vol. 6(1994), pp. 101-106
- [23] 松岡清利 : 運動知覚と滑動性眼球運動, 人間工学 Vol. 17, No-6(1981)
- [24] 安部正人 : 自動車の運動と制御, 山海堂(1992)
- [25] Salvucci, D. D. and Gray, R : A two-point visual control model of steering,

Perception, Vol. 33(2004), pp. 1233-1248

- [26] Land, F.M. and Tatler, B.W : Steering with the head / The visual strategy of a racing driver, *Current Biology*, Vol. 11, No. 15(2001), pp. 1215-1220
- [27] Rashbass, C.C. : The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements, *Journal of Physiology*, 159(1961), pp. 326-338
- [28] Royden, C.S., Banks, M.S. and Crowell, J.A. : The perception of heading during eye movements, *Nature*, Vol. 360(1992), pp. 583-585
- [29] Banks, M.S., EHRLICH, S.M. and Backus, B.T. and Crowell, J.A. : Estimating heading during real and simulated eye movements, *Vision Research* Vol. 36 No. 3(1996), pp. 431-443
- [30] Lisberger, S.G., Morris, E.J. and Tychsen, L. : Visual motion processing and sensory-motor integration for smooth pursuit eye movements, *Neuroscience*, 10(1987), pp. 97-129
- [31] Warren, W.H. and Hannon, D.J. : Eye movements and optical flow, *Optical Society of America*, Vol. 7, No. 1(1990)
- [32] Salvucci, D.D. : Modeling driver behavior in a cognitive architecture, *human factors*, Vol. 48, No. 2(2006)
- [33] Fajen, B.R. and Warren, W.H. : Behavioral dynamics of steering / obstacle avoidance and route selection, *experimental psychology*, Vol. 29, No. 2(2003), pp. 343-362
- [34] Gray, R. and Regen, D. : Risky driving behavior—a consequence of motion adaptation for visually guided motor action, *Experimental Psychology*, Vol. 26, No. 6(2000), pp. 1721-1732
- [35] Lee, D.N. : A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision, *Perception*, Vol. 5(1976), pp. 437-459

- [36] Gray, R. : Accuracy of estimating time to collision using binocular and monocular information, *Vision Research* Vol.38, No.4(1998), pp.499-512
- [37] Regan, D. : Visual processing of looming and time to contact throughout the visual field, *Vision Research* Vol.35, No.13(1995), pp.1845-1857
- [38] Regan, D. and Gray, R. : *Catching, hitting, and collision avoidance*, Cambridge University Press (1998)



# 研究成果

本論文における研究成果は以下の通りである。

## 2章

### 学術論文

1. 伊能 寛, 深尾 隆則: オプティカル・フローに着目したドライバ操舵モデル, 自動車技術会論文集 Vol. 45 No. 2 (2014), pp. 381-386

### 国内会議

1. 伊能 寛, 深尾 隆則: オプティカル・フローに着目したドライバ操舵モデル, 自動車技術会秋季大会, 2013

### 国際会議

1. Hiroshi Inou, Mamoru Sawada and Hiroyuki Mishima : Gaze coordination between car drivers and passengers -An observation-, 15<sup>th</sup> International Conference on Perception-Action, 2014

## 3章

### 学術論文

1. 伊能 寛, 深尾 隆則: オプティカル・フローに着目したドライバ操舵モデル (第2報) -自動車運転時のオプティカル・フロー・シミュレーション-, 自動車技術会論文集 Vol. 45 No. 4 (2014), pp. 711-716

### 国内会議

1. 伊能 寛, 深尾 隆則: 自動車運転時のオプティカル・フロー・シミュレーション, 第14回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 2013

## 4章

### 学術論文

1. 伊能 寛, 深尾 隆則, 戸塚 誠司, 岡藤 勇希: オプティカル・フロー・モデルを利用した自動操舵システムの開発, 自動車技術会論文集 (採録決定)

### 国内会議

1. 伊能 寛, 深尾 隆則, 戸塚 誠司, 岡藤 勇希 : オプティカル・フロー・モデルを利用した自動操舵システムの開発, 自動車技術会春季大会, 2014

### 国際会議

2. Hiroshi Inou, Takanori Fukao, Seiji Totsuka and Yuki Okafuji : Development of Automatic Steering Control System Based on Optical Flow Model, 12<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2014

神戸大学博士論文

「オプティカル・フローを利用した自動車の自動操舵制御システムに関する研究」全79頁

提出日 2015年1月21日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリKernelにて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

◎ 伊 能 寛

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。