

# 特集 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の開発\*

## Development of Steering Control System Based on Optical Flow Model

伊能 寛  
Hiroshi INOU

深尾隆則  
Takanori FUKAO

戸塚誠司  
Seiji TOTSUKA

岡藤勇希  
Yuki OKAFUJI

An expert driver can track the line precisely and gives better feeling of confidence. In our previous works, it was indicated that an expert driver uses optical flow information while driving, and we constructed a driver model focused on optical flow. Applying this optical flow model to automatic steering systems, a human-oriented system might be able to be developed. In this paper, we propose a nonlinear controller to apply the optical flow model to a vehicle control system. We implement the nonlinear controller to a vehicle control system, and in-vehicle researches are performed. Then, the experimental results are also presented to confirm the proposed controller works well.

Key words : safety, intelligent vehicle, driving support driver model, optical flow (C1)

### 1. まえがき

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<sup>1)</sup>。人間-自動車系の課題に対し筆者らは、Gibson<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>。

このような研究から、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。

本研究では、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。

### 2. FOE候補点群制御則の導出

#### 2.1 方針

先行研究<sup>3)</sup>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、所望の軌道の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。このとき、一般的には下記2つの実現形態がある。

- 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

\* (社)自動車技術会の了解を得て、「自動車技術論文集」Vol.46 No.2, p.443-448 (2015)より一部加筆して転載

Image-Based Controlでは、人間の「見え」に近い情報を利用するため、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技術課題も存在する。Position-Based Controlではオプティカル・フローを位置情報や運動情報に落としこまなければならない一方、制御則の物理的な解釈や理解が可能となる。本稿ではオプティカル・フローを画像から直接求めることはしないが、Position-Based Controlの考え方に従い制御則を導出する。これにより、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。

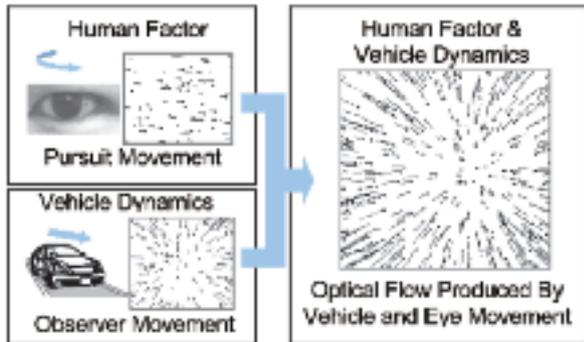


Fig. 1 Working Hypothesis

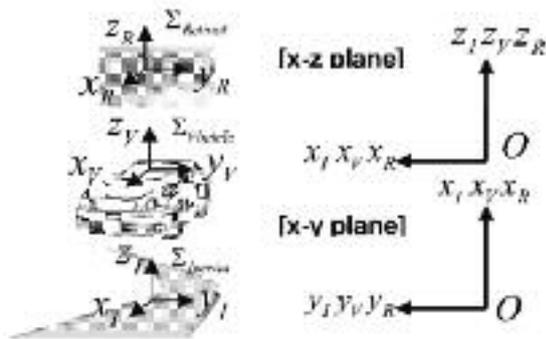


Fig. 2 Definition of Coordination

2.2 制御則の導出

先行研究<sup>3)</sup>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 (Fig. 1)。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  $O-X_I Y_I$ 、車両固定座標系  $O-X_V Y_V$ 、網膜座標系  $O-X_R Y_R$  の3つとした (Fig. 2)。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。

$$u = \frac{x\dot{y} - \dot{x}y}{x^2 + y^2} \tag{1}$$

$\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ 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 (2) 式に従う。

$$\begin{cases} \dot{x} = -v \cos \beta - \dot{\theta}_{vp} y \\ \dot{y} = -v \sin \beta - \dot{\theta}_{vp} x \end{cases} \tag{2}$$

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。

$$\dot{\theta}_{vp} = \dot{\theta}_v + \dot{\theta}_p \tag{3}$$

このとき  $\theta_v$  はヨーレート  $\dot{\gamma}$  とすると (4) 式となる。

$$\dot{\theta}_v = \dot{\gamma} + \dot{\beta} \tag{4}$$

先行研究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。

$$\theta_p = -\frac{\dot{\theta}_v}{2} \tag{5}$$

(1)式~(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。

$$u = -\frac{(\dot{\gamma} + \dot{\beta})}{2} + \frac{v}{x^2 + y^2} (-x \sin \beta + y \cos \beta) \tag{6}$$

オプティカル・フローの方位角成分の時間微分をとると

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\ddot{\gamma} + \ddot{\beta}}{2} + g_1 \dot{\gamma} - \frac{1}{2} g_2 v (\dot{\gamma} + \dot{\beta}) + 2g_1 g_2 v^2 \tag{7}$$

ここで、 $g_1$ ,  $g_2$  は以下である。

$$\begin{cases} g_1 = \frac{-x \sin \beta + y \cos \beta}{x^2 + y^2} \\ g_2 = \frac{x \cos \beta + y \sin \beta}{x^2 + y^2} \end{cases} \tag{8}$$

評価・解析

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、(6)式~(8)式は以下のように近似できる。

$$u = -\frac{\gamma}{2} + g_x v \quad (9)$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\dot{\gamma}}{2} + g_x \dot{v} - \frac{1}{2} g_x v \dot{\gamma} + 2g_x g_y v^2 \quad (10)$$

$$\begin{cases} g_x = \frac{x}{x^2 + y^2} \\ g_y = \frac{y}{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (11)$$

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。

$$V = \frac{1}{2} u^2 \quad (12)$$

$K$  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(13)式となるよう制御入力決定する。

$$\frac{dV}{dt} = -K_V u^2 < 0 \quad (K > 0) \quad (13)$$

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、(9)式のフロー、(10)式のフロー変化率に加え、(14)式の等価2輪モデルを連立させ(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。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \quad (14)$$

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。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{Iv} (K_f l_f^2 + K_r l_r^2) & -\frac{2}{I} (K_f l_f - K_r l_r) \\ -\frac{2}{Mv^2} (K_f l_f - K_r l_r) - 1 & -\frac{2}{Mv} (K_f + K_r) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{I} K_f l_f \\ \frac{2K_f}{Mv} \end{bmatrix} \quad (16)$$

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(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。

$$\delta = \frac{2K}{b_1} \left( g_x v - \frac{\gamma}{2} \right) + f(\gamma, \dot{v}, v, g_x, g_y) \quad (17)$$

### 3. 目標軌道に対する収束性

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(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. 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。

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (18)$$

$$\begin{cases} x = L \cos \theta \\ y = L \sin \theta \end{cases} \quad (19)$$

(11)式、(18)式、(19)式より  $g_y$  は、

$$g_y = \frac{\sin \theta}{L} \quad (20)$$

旋回半径が一定でない過渡状態において、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。

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

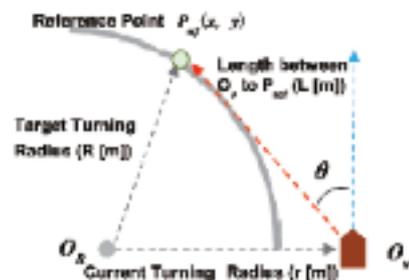


Fig. 3 Definition of Arrangement

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

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

(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(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(22)式は

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{\sin \theta}{L} \left( r \frac{d\phi}{dt} \right) = 0 \quad (23)$$

幾何学的な拘束条件は余弦定理により

$$R^2 = L^2 + r^2 - 2Lr \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (24)$$

変形して整理すると

$$R^2 - r^2 = L^2 - 2Lr \sin \theta \quad (25)$$

と表される. 横すべり角  $\beta$  は十分に小さいとすると(26)式が成立し,

$$\frac{d\phi}{dt} = \gamma \quad (26)$$

(23)式に(26)式を代入して整理すると(27)式が得られる.

$$L^2 - 2Lr \sin \theta = 0 \quad (27)$$

ここで(25)式に条件式(27)式を代入すると

$$R^2 - r^2 = 0 \quad (28)$$

$u \rightarrow 0$ 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(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, (22)式を変形し(29)式が求まる.

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{\sin \theta}{L} \left( r \frac{d\phi}{dt} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 / \left(r \frac{d\phi}{dt}\right)^2} = 0 \quad (29)$$

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(30)式を得る.

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{r\gamma \sin \theta}{L} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{r}}{r\gamma}\right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{\dot{r}}{r\gamma}\right)^4 \dots \right] = 0 \quad (30)$$

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

$$L^2 - 2Lr \sin \theta \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{r}}{r\gamma}\right)^2 \right\} = 0 \quad (31)$$

ここで(19)式を考慮し整理すると以下が求まる

$$L^2 - 2Lr \sin \theta = \frac{\gamma}{r} \left(\frac{\dot{r}}{\gamma}\right)^2 \quad (32)$$

(25)式に(32)式を代入すると

$$R^2 - r^2 = \frac{\gamma}{r} \left(\frac{\dot{r}}{\gamma}\right)^2 \quad (33)$$

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(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  $\gamma$  が十分小さくなるように目標点  $P_{ref}$  を選ばばよい.

#### 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(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(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.

##### 4.1 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.

##### 4.2 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。

### 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)。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。

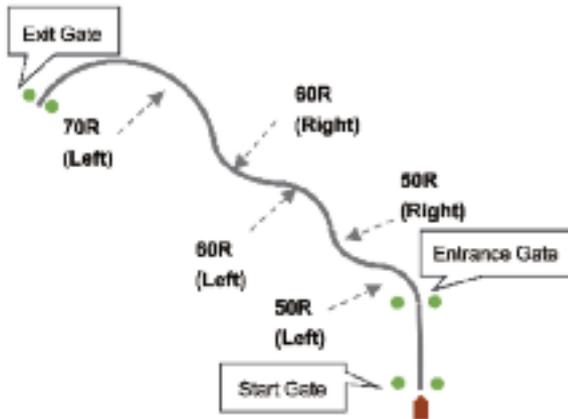


Fig. 4 Overview of Experimental Course

### 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. 5)、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±2.5 [cm]、角度精度は±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. 5 Overview of VRS GNSS System

### 4.5 各制御則による舵角指令生成

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<sup>5)</sup>。操舵指令  $\delta$  は (34) 式の前注視点偏角  $\varepsilon_T$  により (35) 式として表せる。(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。

$$\varepsilon_T(t) = \frac{Y(t) + TY'(t) + \frac{T^2}{2} \ddot{Y}(t) - Y_T(t)}{Tv} \quad (34)$$

$$\delta = -\frac{K_d}{(1 + T_d s)} \varepsilon_T(s) \quad (35)$$

一方、FOE候補点群の制御則は (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、および前方注視点時間  $T$  から選択する。本検討において前方注視点時間は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。ゲインの設定については人間-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 1、Table 2 に示す。また制御パラメータについて Table 3 に示す。

Table 1 Control Gain of  $K_d / K$  (Ordinary)

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

Table 2 Control Gain of  $K_d / K$  (Expert)

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

Table 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]                 |

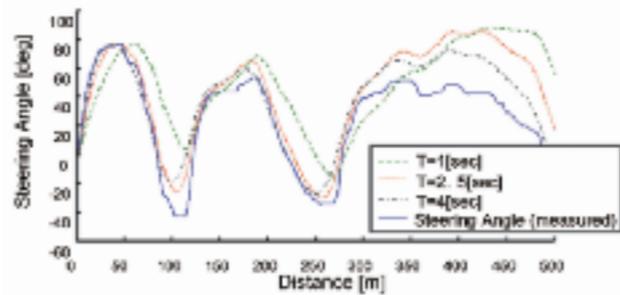


Fig. 6 Experimental Result of Preview Model Control (Ordinary)

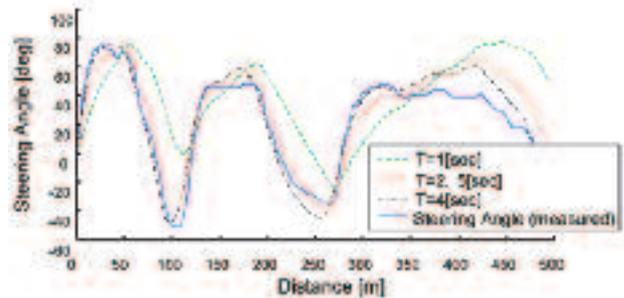


Fig. 8 Experimental Result of Preview Model Control (Expert)

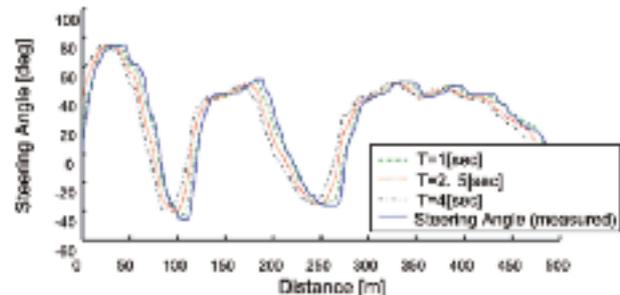


Fig. 7 Experimental Result of FOE Candidate Points Control (Ordinary)

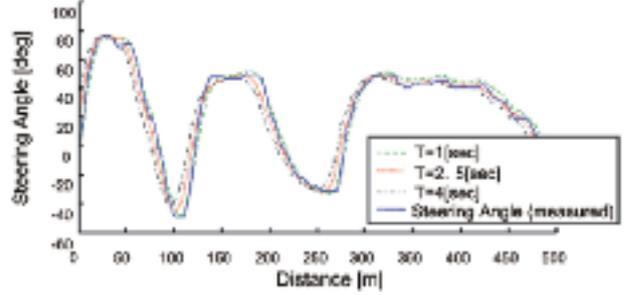


Fig. 9 Experimental Result of FOE Candidate Points Control (Expert)

#### 4.6 結果

2次予測操角速度制御の結果をFig. 6, Fig. 8に、FOE候補点群制御の結果をFig. 7, Fig. 9に示す。2次予測舵角制御で  $T = 1$  [sec] の場合、実操舵に比べて切り遅れが生じ、 $T = 2.5 \sim 4$  [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。 $T = 1$  [sec], 4[sec] のときの結果をFig. 10, Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13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. 10, Fig. 12) 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. 11, Fig. 13)。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う特徴がある (Fig. 14)。

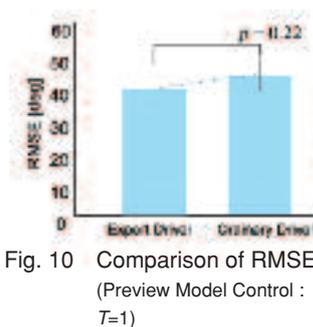


Fig. 10 Comparison of RMSE (Preview Model Control :  $T = 1$ )

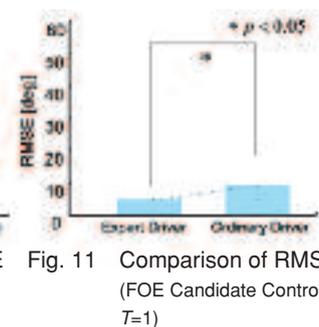


Fig. 11 Comparison of RMSE (FOE Candidate Control :  $T = 1$ )

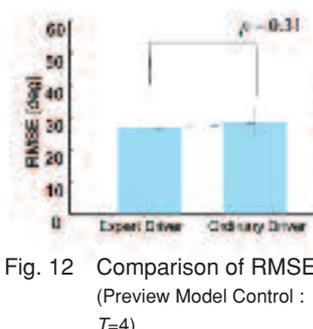


Fig. 12 Comparison of RMSE (Preview Model Control :  $T = 4$ )

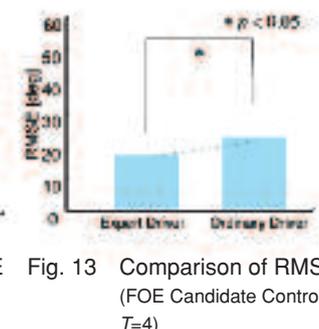


Fig. 13 Comparison of RMSE (FOE Candidate Control :  $T = 4$ )

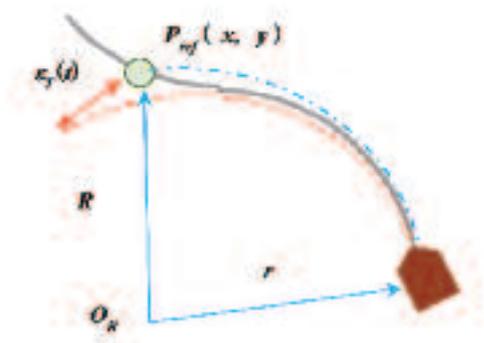


Fig. 14 Feature of FOE Candidate Point and Preview Model

#### 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、(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くいため、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。 $T$  を小さくすればトラッキング性能は向上する一方、(17)式の第一項  $g_{\gamma} - \gamma/2$  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0.2~0.9 [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  $P_{\text{ref}}(x, y)$  を  $1[\text{sec}]/4[\text{sec}]$  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。

#### 5. おわりに

本研究ではFOE候補点群を利用した操舵制御について提案した。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かった。

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

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。

先行研究の数値シミュレーション<sup>4)</sup>より、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。そのため、今後、より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プ/リバンプが頻発するアップダウンや、路面  $\mu$  が異なるコースなど）での走行試験を通じて、本手法の有効性について検討を進めていく予定である。

#### <参考文献>

- 1) 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, 第45巻, 第12号, p.993-998 (2006)
- 2) Gibson, J. J.: The perception of the visual world, Houghton Mifflin (1950)
- 3) 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, p.381-386 (2014)
- 4) 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), 自動車技術会論文集, Vol.45, No.4, p.711-716 (2014)
- 5) 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, 自動車技術会春季大会前刷集, No.11-07, p.9-12 (2007)

<著者>



伊能 寛  
(いのう ひろし)  
研究開発1部 博士(工学)  
高度運転支援/自動運転  
システム開発に従事



深尾 隆則  
(ふかお たかのり)  
立命館大学理工学部 電気電子  
工学科教授 博士(情報学)  
人工知能, コンピュータビジョン,  
制御, 及び, これらを応用した  
知的ピークルシステムの研究に  
従事



戸塚 誠司  
(とつか せいじ)  
技術開発センター 特殊加工課  
車両システムの開発に従事



岡藤 勇希  
(おかふじ ゆうき)  
神戸大学 工学研究科  
機械工学専攻  
知的ピークルシステム  
の研究に従事