

車両安全制御とドライバ状態推定の機能を
兼備した双対制御論的運転支援の有効性検証

齊藤 裕一

システム情報工学研究科
筑波大学

2015 年 3 月

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究目的	12
1.3 本論文の構成	13
第2章 双対制御論的運転支援システムの設計	15
2.1 はじめに	15
2.2 双対制御論的運転支援システム	16
2.3 車線逸脱の判定	20
2.4 操舵トルク制御系の構築	21
2.4.1 車両・タイヤモデル	21
2.4.2 操舵系モデル	26
2.4.3 システムの状態方程式	28
2.4.4 最適レギュレータを適用した制御系	30
2.4.5 閉ループ系の時間応答	31
2.4.6 最適レギュレータを適用した制御のもとでの車両の動特性	32
2.4.7 数値例	34
2.5 1段と2段目の操舵トルク制御	39
2.5.1 フィードバックゲインを切り替える最適制御則	40
2.5.2 システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす制御	41
2.6 ドライバの操舵行動の検出	50
2.6.1 システムの操作量の低減	51
2.6.2 ドライバの操舵行動の有無の判定	52
2.7 横方向制御の主体(システムから人へ)の円滑な移行	58
2.7.1 ドライビングシミュレータへのシステムの実装	58
2.7.2 車両安全確保の検証	59
2.8 むすび	62

第 3 章	双対制御論的運転支援システムの有効性評価	63
3.1	はじめに	63
3.2	認知工学的実験	65
3.2.1	実験装置	66
3.2.2	実験参加者と顔表情評定者	66
3.2.3	実験タスク	67
3.2.4	手順	67
3.2.5	評価指標	68
3.2.6	作業仮説	69
3.3	覚醒度低下時におけるドライバの運転行動の分析	70
3.4	システム作動時におけるドライバの運転行動の分析	78
3.4.1	1 段と 2 段目の制御の作動回数	78
3.4.2	1 段目の制御が実行される事態に陥った要因	80
3.4.3	1 段目の制御開始後におけるドライバの行動	82
3.4.4	1 段と 2 段目の制御の作動例	84
3.4.5	操舵制御に対するドライバの反射的な操舵	88
3.4.6	1 段目の制御開始後におけるドライバの意図しない操舵	90
3.5	ドライバ状態推定手法の構築と評価	91
3.5.1	ドライバ状態の同定	91
3.5.2	一個抜き交差検証を用いたドライバ状態推定の有効性評価	93
3.6	双対制御論的運転支援システムにおける多層的支援	104
3.6.1	多層的支援の必要性	104
3.6.2	オーバーライドの可否	106
3.7	むすび	107
第 4 章	結論	109
4.1	本論文の結果と意義	109
4.2	今後の課題	111

謝辞	113
参考文献	115
付 録 A 実験説明書	125
付 録 B 最適レギュレータにおける評価関数の最小化	129

目 次

1.1	Driver's perceptual cycle [1]	1
1.2	ASV technology development guidelines [10]	3
1.3	Technologies for driver state identification	6
1.4	Alert control and fatigue detection [51, 52, 53]	8
1.5	Sleep related vehicle accident on Hokuriku Expressway	9
1.6	Advanced emergency braking system	11
2.1	Control of the first stage in the dual control theoretic driver assistance	16
2.2	Driver's steering action to lead the vehicle to the center of the lane	17
2.3	Control of the second stage in the dual control theoretic driver assistance	17
2.4	Block diagram for steering angle control [82]	19
2.5	Block diagram for steering torque control [82]	19
2.6	Criterion for lane departure	20
2.7	Variables related to the wheel [91]	22
2.8	Motion of the vehicle [91]	23
2.9	Motion of the two-wheel vehicle [91]	24
2.10	Steering system [91]	26
2.11	Steering model [82]	27
2.12	Pole positions	32
2.13	Pole positions as a function of q_y ranging from 10^{-3} to 10^4	33
2.14	Simulation model	34
2.15	Vehicle trajectory under steering torque control	36
2.16	Dynamic characteristics of the vehicle under control of the first stage	38
2.17	Block diagram for the system with a gain switching mechanism	40
2.18	Weight coefficients and control performances when the initial yaw angle was set at one degree	43

2.19	Weight coefficients and control performances when the initial yaw angle was set at two degrees	44
2.20	Control performances when the initial yaw angle was set at one degree	46
2.21	Control performances when the initial yaw angle was set at two degrees	47
2.22	Vehicle trajectory under controls of the first and the second stages . . .	49
2.23	Yaw angle and the sigmoid function (1)	52
2.24	Yaw angle and the sigmoid function (2)	54
2.25	Simulation with the driver model	55
2.26	Vehicle trajectory under the steering action by the driver model	56
2.27	A fixed-based driving simulator	58
2.28	System architecture	59
2.29	Coupling of controls by the system and the driver	60
2.30	Driving simulator based measurement data and the Matlab/Simulink based numerical data	61
3.1	Example case in which the system implements control of the second stage repeatedly	64
3.2	Lane centering followed by deceleration	65
3.3	A fixed-based driving simulator equipped with the dual control theoretic driver assistance system	66
3.4	Distribution of sleepiness levels	70
3.5	Facial expression based sleepiness level and the standard deviation of the vehicle's lateral position	71
3.6	Standard deviation of the lateral position for each participant	72
3.7	Facial expression based sleepiness level and the steering angle	73
3.8	Standard deviation of the steering angle for each participant	75
3.9	Facial expression based sleepiness level and the number of blinks	76
3.10	Number of blinks for each participant	77

3.11	Number of controls of the first and the second stages implemented by the system	79
3.12	Facial expression based sleepiness level and the number of controls of the first and the second stages implemented by the system	79
3.13	Probable causes for the control of the first stage	80
3.14	Vehicle’s yaw angle at the time point when the system anticipated that lane departure may occur within one second	81
3.15	Facial expression based sleepiness level and the driver’s steering actions	83
3.16	Time elapsed before the driver took the proper steering action after the system implemented the control of the first stage	83
3.17	Time-series data of 900 seconds for the interval [0, 900] during trial 1 of participant E	85
3.18	Time-series data of 900 seconds for the interval [900, 1800] during trial 1 of participant E	86
3.19	Time-series data of 900 seconds for the interval [0, 900] during trial 2 of participant E	87
3.20	Reflex reaction of the driver that was caused by the system’s control of the second stage	89
3.21	Time interval between the two consecutive controls of the first stage . .	95
3.22	Time interval between the two consecutive controls of the second stage	95
3.23	Cumulative distribution for the time interval between the two consecutive controls of the second stage	96
3.24	Vehicle’s yaw angle at the time point when the system’s control of the second stage was completed	97
3.25	Facial expression based sleepiness level of the driver and the number of controls of the first stage implemented by the system	98
3.26	Facial expression based sleepiness level of the driver and the number of controls of the second stage implemented by the system	98

3.27	Time-series data of 1800 seconds for the interval [0, 1800] during trial 1 of participant A	100
3.28	Percentage of system’s judgments made correctly that “the driver is at level 5 of sleepiness”	102
3.29	Facial expression based sleepiness level at the time point when the system judged that “the driver is at level 5 of sleepiness”	102
3.30	Time elapsed before the system judged that “the driver is at level 5 of sleepiness” after the facial expression based sleepiness level became at level 5 for the first time	103
3.31	Time-series data of 900 seconds for the interval [900, 1800] during trial 2 of participant N	105
3.32	Time-series data of 1800 seconds for the interval [0, 1800] during trial 2 of participant A	106

表 目 次

2.1	Weight coefficients and feedback gains	35
2.2	Vehicle parameters	35
2.3	Weight coefficients when the initial yaw angle was set at one degree . .	46
2.4	Weight coefficients when the initial yaw angle was set at two degrees .	47
3.1	Procedure	68
3.2	Facial expression based sleepiness level [61]	68
3.3	Tukey’s HSD test for the standard deviation of the vehicle’s lateral position	71
3.4	Tukey’s HSD test for the steering angle	74
3.5	Tukey’s HSD test for the number of blinks	76
3.6	True state of the driver and judgment of the system	92
3.7	Time length t_l that the cumulative distribution for the time interval between the two consecutive controls of the second stage become 70% .	101
3.8	Difference between the time elapsed before the system judged that “the driver is at level 5 of sleepiness” after the facial expression based sleepi- ness level became at level 5 in the cases 2 and 3	104

第1章 序論

1.1 研究の背景

ドライバの能力を補う運転支援

近年の自動車は、「運転の主体はドライバである」ことを前提としたうえで、事故回避や運転負荷軽減を目的とする運転支援機能を備えつつある。Figure 1.1 に示すように、ドライバの運転行動は、知覚、状況理解、行為選択、行為実行の繰り返しで表現することが一般であるが、

1. 見えないもの、または、見えにくいものを可視化する「知覚機能拡大」
2. 運転に危険をもたらす可能性のある存在を明示的に示す「注意喚起」
3. 危険回避に必要な特定の行動の実行を指示する「警報提示」
4. 特定の行動の実行を行う「制御介入」

といったドライバの運転行動の各過程に適合した運転支援 [1] が実用化されている [2, 3, 4, 5, 6, 7] .

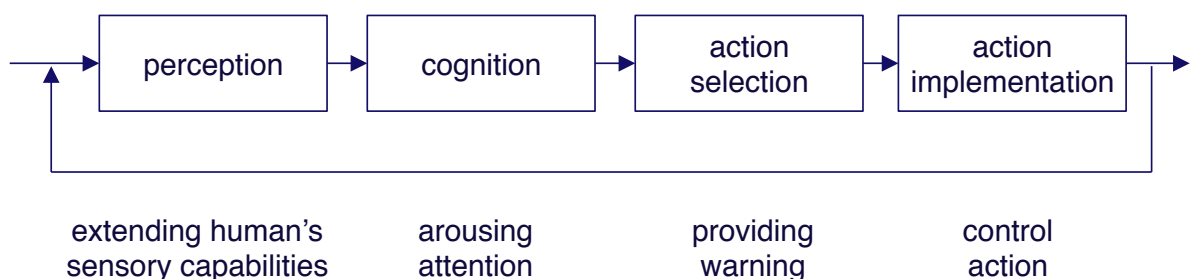


Figure 1.1 Driver's perceptual cycle [1]

運転支援システムは、周囲環境に関する情報獲得、情報解析、行為選択、行為実行を行う能力をもち、技術の進歩に伴い、高い知能と自律性を有しつつある。ドライバの特性に適した運転支援を行う背景には、自動化システムの「高度な知能・自律性・高信頼性」といった誇るべき特質がもたらす負の側面がある。稲垣 [1] は、人間・機械系に生じている代表的な問題として、(1) 多機能インタフェースによるエラーの誘発、(2) 人と機械の意図の対立、(3) 自動化システムへの不信と過信の交錯、(4) 自動化システムによる異常の隠蔽、(5) オートメーション・サプライズ [8]、を挙げている。

早くから自動化システムが多用されてきた航空分野では、高度自動化の進んだ人間・機械系に生じている問題を解消するために「人間中心の自動化」が提唱されてきた。航空分野における人間中心の自動化は、「人は航空システムの安全に対して最終責任を負っている。したがって、人に指揮権（最終決定権）を与えよう」との考えを原則に、自動化が人の特性に合い、人との調和をとれるように基本理念として纏められている [1, 9]。「人が制御の主体である」ことは、日本の国土交通省が推進する先進安全自動車 (ASV) のプロジェクト [10] においても、安全な運転をすべき主体は「ドライバ」であり、システムはそれを支援するに過ぎないという「ドライバー支援の原則」として明確に示されている。しかしながら、ドライバが、安全確保の責任を果たそうと懸命に努力したとしても、常に、状況を正しく認識しているとは限らない。それは、知覚・状況理解の対象は多岐にわたり、また、人が長時間にわたって適正な状況認識を保ち続けることは容易ではないためである。また、緊急時に人が知覚から行為実行までの過程に使用できる時間は限られる。自動車分野における人間中心の自動化を考える場合、稲垣 [11] は、「あるときは人が指揮権を持ち、またあるときは機械が指揮権を持つことによって人の能力の弱点を補完する」といった、状況に応じた柔軟なシステム設計が必要であることを主張している。

先進安全自動車 (ASV)

国土交通省が推進する先進安全自動車 (Advanced Safety Vehicle; ASV) のプロジェクト [10] では、人と自動車の調和による安全安心な交通社会を目指し、先進技術を利用してドライバの安全運転を支援する技術の開発・実用化・普及を、平成 3 年度から 20 年以上にわたって推進している。ASV 推進計画では、つぎのように先進安全自動車の基本理念を定めている [10]。

ドライバー支援の原則：

安全な運転をすべき主体はドライバーであり，ASV 技術はドライバーを側面から支援する．

ドライバー受容性の確保：

ASV 技術はドライバーが使いやすく，安心して使えるような配慮をする．

社会受容性の確保：

ASV 技術を搭載した自動車は，他の自動車や歩行者などと一緒に走行することから，社会から正しく理解され，受け入れられるような配慮をする．

また，先進安全自動車 (ASV) のプロジェクト [10] では，先進安全自動車の基本理念を「運転支援の考え方」として具体化し [12]，それに沿った ASV 技術の実用化を推進している (Figure 1.2) ．



Figure 1.2 ASV technology development guidelines [10]

Figure 1.2 に示す「運転支援の考え方」では，つぎの点を挙げている．(1) システムとドライバーとの間で意思の疎通が図られ，(2) システムによる安全かつ安定的な支援が

なされるべきであり、システムは、いついかなるときも完全な作動を約束することはできないことから、(3) ドライバはシステムの作動内容を監視する必要がある、(4) ドライバの過度の信頼や依存を招かないようにするべきである [12]。また、ドライバは必要なときにシステムに介入することができ、(6) システムの支援範囲を超えたときには、ドライバに運転操作の主体を円滑に移行させる必要がある [12]。このような考え方のもと、多くの ASV 技術が実用化されている [13]。たとえば、アダプティブクルーズコントロール (Adaptive Cruise Control; ACC) は、運転負荷軽減を目的とし、自車速を自動的に一定に保つ、あるいは先行車が存在するときは、その先行車と車間距離を一定に保つように先行車の車速に合わせて自車速を自動的に調整する。また、前方障害物衝突警報システムは、事故回避を目的とし、衝突可能性が高まったときに、ドライバへ適切な行動を実行することを指示する警報を与える。さらに、前方障害物衝突回避ブレーキシステムは、警報を与えた後、なおもドライバに適切な行動がみられないならば、システムが人に代わってブレーキを代行することで衝突回避を行う。今後、ASV 技術の開発・実用化・普及が促進されることによって、交通事故のさらなる削減が期待されている。

居眠り運転による自動車事故

居眠り運転は、古くからの自動車安全における懸案事項である。平成 25 年度の道路交通による死亡事故を法令違反別にみると、漫然運転 (17.6 %) が最も多く、続いて脇見運転 (14.0 %)、運転操作不適 (11.7 %) の順になっている [14]。漫然運転を引き起こす要因の一つには、居眠り運転につながるドライバの覚醒度低下がある。また、事故類型別に死亡事故率をみると、車両の車線逸脱の事故類型が最も高い (12.16 %)。(公財) 交通事故総合分析センターによる車線逸脱を引き起こす要因分析 [15] をみると、主要因としては「居眠り」が最も多く、続いて「速度超過」「飲酒」の順になっている。

McCartt et al. [16] は、居眠り運転に関する聞き取り調査を 1000 人に対して実施した。その結果、54.6% の人が「眠気を感じるなかで運転をしたことがある」と回答しており、運転しているなかでドライバが眠気を生じることは稀なことではない。また、眠気が生じる状況を調査対象者に聞いた結果、長距離運転が 29.5%、夜の運転が 27.7%、睡眠不足が 26.6% であった。

Abe et al. [17] は、前日の睡眠時間の不足や長時間の連続運転など、眠気が生じやすいと想定される状況において追突や単独事故が多くなることを明らかにしている。ま

た, Horne et al. [18] は, 居眠り運転による交通事故が, 事業用貨物自動車などを運転する職業ドライバに多いことを報告している. シフトワーク(昼勤と夜勤の繰り返しなど生活リズムが一定しない勤務形態)と人の作業ミスとの関係は, 古くから研究がなされている [19, 20, 21, 22]. Richardson et al. [22] は, 交代勤務労働者は, 日中に働く労働者と比較して眠気の増加や睡眠不足の症状が多くみられ, 眠気が原因による自動車事故のインシデントやニアミスが増えたことを明らかにしている.

(公財) 交通事故総合分析センターと(公財) 全日本トラック協会による「事業用貨物自動車の交通事故の傾向」に関する調査結果 [23, 24] によると, 死亡事故率の高い時間帯は, 午前 0 時の深夜から午前 6 時の早朝までの時間であることが報告されている. また, このデータに対して走行速度別にみると, 80 km/h 以上が 50% を占めており, 高速度域での事故が死亡事故に至っていることが多い. 居眠り運転による交通事故の発生時刻に関する研究は, 1980-1990 年代に, 米国 [25, 26, 27], 英国 [28, 29], フランス [30], イタリア [31], フィンランド [32] などで盛んに行われている. いずれの調査結果においても, 居眠り運転による交通事故発生率のピーク値は, 午前 0 時の深夜から午前 6 時の早朝までの時間と午後 14 時から午後 16 時までの時間にあることが報告されている. このような時間帯に人が眠気を生じやすいことは, 約 24 時間の周期を持つ生体リズム(サーカディアンリズム)などが関与していると考えられている [33, 34].

居眠り運転は, 路外逸脱による工作物への衝突や他車両への追突など重大事故につながりやすいことから, ドライバ状態を推定する技術や車両の安全を確保する技術を確立しなければならない.

ドライバ状態推定技術の現状

既存のドライバ状態推定技術は, (1) 心拍や脳波などの生体情報を用いるもの [35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48], (2) 運転席の着座接触圧を用いるもの [49, 50], (3) 操舵の乱れや車両のふらつきなどの車両情報を用いるもの [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59], (4) 顔表情評定に基づくもの [60, 61, 62, 63] に分類することができる (Figure 1.3).

生体情報としては, 人間の生理的な変化を電氣的に捉え, 心拍数, 脳波, 手掌皮膚抵抗値, 皮膚電位水準, 眼球運動, 瞬きなどが, 覚醒度の低下や疲労に伴って変化することがよく知られている [35]. 心拍数は, 一般に, 拍動と拍動の間の時間長 (R-R 間

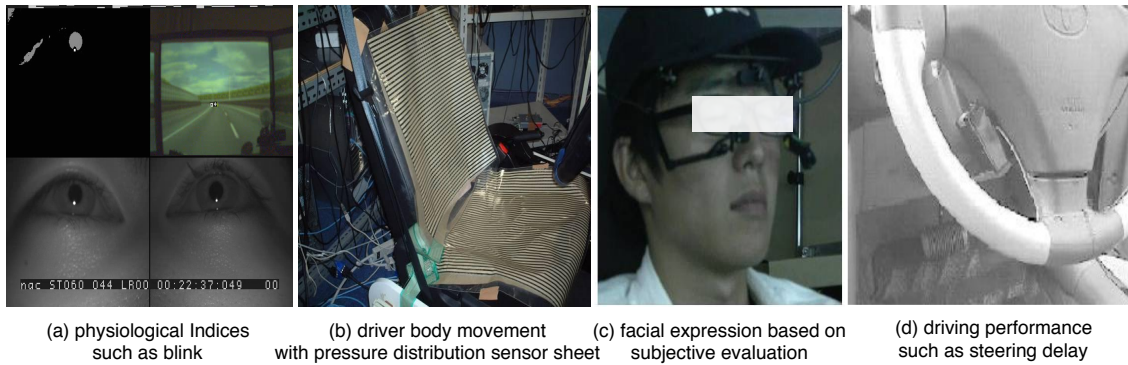


Figure 1.3 Technologies for driver state identification

隔)を計測することによって求められる。心拍は姿勢や気温、精神状態などによって変わるが [40]、運転時は、姿勢や周囲温度が変化することが少ないことから、眠気などの精神状態が心拍を変える主な要因となり得る [41]。一般に、精神的な緊張により心拍数は増加し、長時間の単調環境走行時、また、情動刺激が少ない状態で心拍数が低下する [35]。脳波は、 α 波、 β 波、 θ 波などに分類され、ドライバが覚醒状態から低覚醒状態に移るとき、 α 波、 β 波、 θ 波の特定周波数帯の脳波が特徴的なパターンを有しつつ変動していくことがわかっている [42]。小山らは [42]、 β 波優位の覚醒状態、 α 波が出現する準覚醒状態、 θ 波が出現する低覚醒状態に分類している。手掌皮膚抵抗値は、手のひら、あるいは指のはらの皮膚面の 2 箇所に電極を貼り、両電極間の抵抗値を計測するものである [35]。皮膚の発汗現象の変化に伴い皮膚の抵抗値が一時的に低下する変化を検出するものであり、人の精神的緊張などを測るときに用いられる [35]。皮膚電位水準は、人間の皮膚表皮の最外層（角質層）と、その下の層（淡明層）の電位差を測定する方法であり、覚醒度低下時には、電位差が小さくなることが報告されている [35]。また、覚醒度が低下すると顔面皮膚温度が上昇し、覚醒度が回復すると顔面皮膚温度が下降する傾向も報告されている [43]。しかしながら、心拍数、脳波、手掌皮膚抵抗値、皮膚電位水準などを用いる方式は、生理特性に個人差があり、万人に共通な判断基準を設定することが難しいという欠点がある。また、心拍数、脳波などは、古くから研究がなされているが、非侵襲・無拘束での計測が困難であることが実用化の障壁となっている。

これに対して、眼球運動、瞬き、瞼の開度などは、非侵襲・無拘束での計測が可能であることから、ドライバの視行動計測からドライバの覚醒度低下を検出しようとする研究が活発になされている。本間ら [44] は、光点検出タスクを用いて、覚醒度低下時に

おけるドライバの視覚的注意の範囲を評価している．その結果，単独走行などの単調な条件のもとで視覚的注意の範囲が狭窄されることを明らかにしている．しかし，本間ら [44] の研究は，視覚的注意の範囲を評価することに留まっており，実車両において視覚的注意の範囲をどのような方式で計測するかについては言及されていない．Åkerstedt et al. [46, 47] や Sandberg [48] は，覚醒度の低下に伴って，瞬きにおいて瞼を閉じている時間長 (blink duration) が長くなる傾向がみられることを明らかにしている．しかしながら，瞼を閉じている時間長は，個人差があることも示されている [46, 47] ．

また，疲労の蓄積や眠気を感じたりしたときに，ドライバが眠気に抗うために座り直しをしたりすることから，着座接触圧からこうした体の動き（体動）を計測することによって覚醒度低下を検出する試みがなされている [49, 50] ．伊藤ら [50] は，運転席の着座接触圧分布のセンサデータから，覚醒度の低下を検出可能であることを定量的に明らかにした．また，運転行動には影響が現れるほどではないが覚醒度の低下が疑われる状態を早い段階で検出し得る結果も示している．運転席の着座接触圧を用いる手法は，覚醒度低下をより高い精度で推定できるアルゴリズムの構築が課題となっている．

操舵の乱れや車両のふらつきなどの車両情報を用いる手法は，ドライバ状態のモニタリングのための特別な装置の設置を要求されないことから，既に実用化され，一部の車両に搭載されている [51, 52, 53, 54] ．覚醒度の低下に伴ってドライバの操舵が乱れ，車両の挙動がふらついてくることは，一般に知られている [55, 56, 57, 58, 59] ．しかし，横風などの外乱の影響を排除することに難点があり，また，道路形状などの影響も受けやすい．

顔表情評定は，9つの段階で主観評定するカロリンスカ眠気尺度 (Karolinska Sleepiness Scale; KSS [60]) や 5段階で主観評定する眠気尺度 [61] が，覚醒度の外的基準としてよく使われる．また，Ohsuga et al. [37] は，眠気との葛藤を考慮に入れ，7段階の眠気尺度を提案している．しかしながら，顔表情評定は，主観評定に基づくことから，評定があいまいであることが欠点である．なお，顔表情評定は，自動化の試みも進められており [62]，非侵襲・無拘束での検出が可能であるが，マスクやサングラスなどを着用したドライバの評定が困難である点に限界がある．

以上を整理すると，既存のドライバ状態推定技術は，十分な推定精度を確保できるに至っていない現状にある．

覚醒度低下に対するドライバ支援

ドライバは眠気を感じたときにどのような対応を行っているだろうか．Stutts et al. [64] は、1000 人を対象に、「眠気を感じたときにどのような対策をとっているか」を複数回答させた．その結果、69.2% の人が窓を開ける、エアコンを調整する、44.6% の人がオーディオを聴く、17.3% の人がカフェインを摂るを回答し、休憩のために停車するは 12.2%、ストレッチのために停車するは 10.6% の回答に留まった．なぜ、ドライバは早期に休憩をとろうとはしないのだろうか．

交通事故を防ぐために、眠気を感じたドライバがとるべき効果的な対策は、「早期に車両を停車させ、休憩をとる」ことである．20 分程度の仮眠が、眠気対策として効果的なことは広く知られている [34]．ドライバが居眠り運転の危険性を認識しており、休憩する気持ちがあれば、コンビニエンスストアの駐車場やサービスエリアなどで休憩をとるであろう．しかし、深夜に仕事を終え、早く帰宅したいドライバであれば、多少の眠気を我慢してでも運転をすることはあるだろう．また、観光バスや事業用貨物自動車を運転する職業ドライバは、たとえば、目的地への到着時刻を守らなければならないなど、眠気を感じたからといって早期に休憩をとるなどの対策をとりづらい．

覚醒度の低下を検出したときに採られる既存の運転支援 [51, 52, 53, 54, 65, 66, 67] は、注意喚起、または警報の支援である．ドライバモニタリングに基づいた注意喚起、または警報の支援は有効であろうか．実用化している運転支援システム [51, 52, 53, 54] は、車両のふらつきやドライバの操舵行動のモニタリングに基づいて、「ドライバは眠気（または疲れ）を感じている可能性がある」と判断したときに、「休憩してください」というメッセージを通知する (Figure 1.4) ．

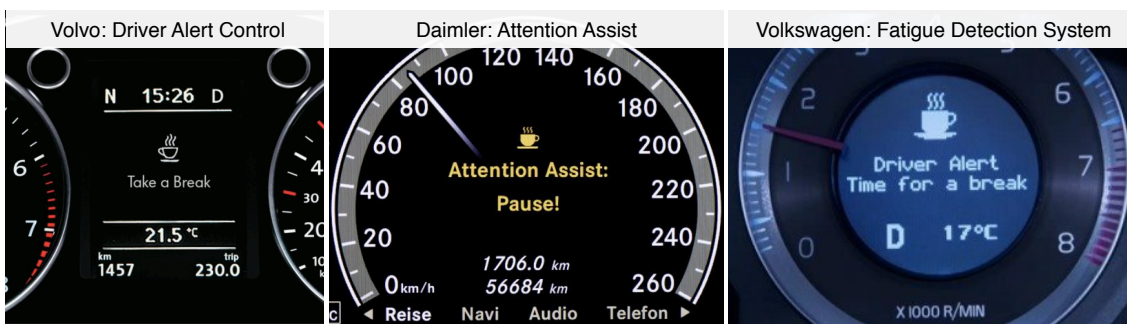


Figure 1.4 Alert control and fatigue detection [51, 52, 53]

車両のふらつきやドライバの操舵行動に覚醒度低下の兆候がみられる場合には、ドライバは既に眠気を自覚していると考えられる。ドライバが眠気の自覚があるにもかかわらず、そのようなメッセージをシステムから受け取ったとしても、自覚のうえで休憩をとっていないことから、ドライバは早期に休憩をとらないかもしれない。また、ドライバが眠気を自覚していない段階において、システムが、注意喚起、または警報を提示したとしても、ドライバはすぐには納得しない可能性もある [1]。注意喚起や警報の支援では、ドライバが覚醒することを保証できず、ドライバ状態の判定が下されないことによって何も支援が実行されないこともあり得る。

2014年3月3日、富山県小矢部市の北陸自動車道上り線小矢部川サービスエリアにおいて、夜行バスが駐車中の大型トラックに衝突するという事故が起きている [69]。Figure 1.5 は、事故に至る状況を示す。夜行バスは、高速道路の左側のガードレールに接触し、また、サービスエリアへの流入口の右側のガードレールにも接触し、その後、ブレーキが踏まれることなく停車中の大型トラックに衝突した。このとき、異常に気付いた乗客がドライバに「起きろ」と叫んでいたことがわかっており、ドライブレコーダーには、ドライバが左に頭を傾けたまま身動きしないなど意識を失った状態の映像が残されていた。

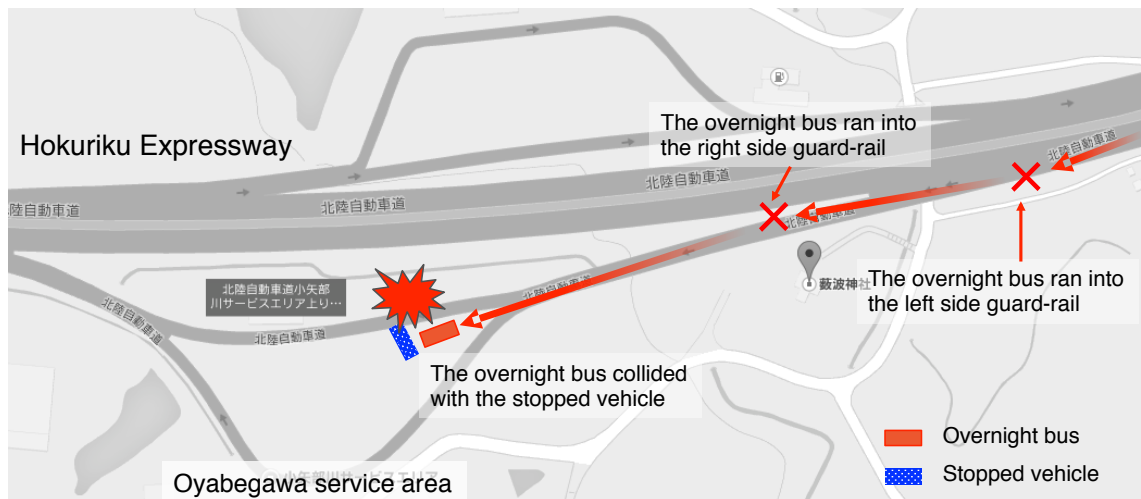


Figure 1.5 Sleep related vehicle accident on Hokuriku Expressway

ドライバが居眠りに陥った、あるいはドライバの心身機能が喪失したときの安全をどのように確保すればよいただろうか。既存のドライバ状態推定技術は、ドライバが居眠りをするよりまえの段階で、覚醒度低下の兆候を検出することが可能であるが、ド

ライバが居眠りに陥った、あるいはドライバの心身機能が喪失したことを検出し、車両の安全をどのように確保するかについては十分な議論がなされていない。北陸自動車道の事故の例は、夜行バスが停車していた大型トラックに衝突するまえに、ドライバが居眠りに陥った、あるいはドライバの心身機能が喪失したと判断できる特徴的な傾向がある。それは、車両が2度にわたってガードレールに接触しているにもかかわらず、ドライバが何も対応行動を行っていないことである。ドライバは状況認識を喪失しているがゆえに、適切な行為を選択し、実行することができないためである。車両がガードレールにぶつかり、それでもなおドライバが何も対応行動を行わないような「通常からの逸脱」が検出されたならば、制御の権限をシステムが持ち、人に代わってシステムが車両の安全確保を図ることが重要である。

システムが人を知るヒューマンマシンインタラクション

人が何を行い、システムが何を行うのかを決定する「人とシステムの間での役割分担（機能配分）」は、ヒューマンマシンシステムの設計における重要な課題の一つであり、これまで、多くの研究者が取り組んできた [70, 71, 72]。機能配分は、人が担当する役割とシステムが担当する役割が固定される静的機能配分 [71] と、人が担当する役割とシステムが担当する役割を変更できる動的機能配分 [71] に分類できる。さらに、人の心的状態やシステムの周囲環境に応じて、人が担当する役割とシステムが担当する役割を動的に変更できる適応的機能配分が提案されてきた [71, 72]。

ここで、人が行っていたタスクをある時点でシステムに譲り渡す、あるいはシステムが行っていたタスクをある時点で人が引き継ぐことを、権限の委譲と呼ぶ [1]。北陸自動車道上り線小矢部川サービスエリアにおける衝突事故のように、ドライバの心身状態が万全ではない場合、人に車両の安全確保を求めることは難しい。運転の主体は、あくまでドライバであるが、ドライバが居眠りに陥った、あるいはドライバの心身機能が喪失したならば、システムは、「ドライバは運転継続に適した状態にない」と早期に判断し、制御の権限をシステムが持ち（権限の委譲）、人に代わって車両の安全確保を図ることが重要である。そのためには、システムはドライバの状態を知る必要がある。どのようにして、ドライバが運転継続に適した状態にないことを判断すればよいだろうか。

システムが、ドライバが居眠りに陥ったこと、あるいはドライバの心身機能が喪失したことを検出するうえで、システムが最低限の車両の安全確保を図りながら、ドラ

イバに車両の安全確保に関わる対応行動を求めることは、ドライバの状態を知るうえで有用な手段である。ドライバに車両の安全確保に関わる対応行動を求める例として、既に実用化している前方障害物衝突回避ブレーキ [7, 73] を述べる。

Figure 1.6 に示す前方障害物衝突回避ブレーキは、前方障害物との衝突可能性が高まったときに、ドライバへ適切な行動を実行することを指示する警報を与える。また、警報を与えた後、ドライバに適切な行動がみられないならば、システムが人に代わって「弱いブレーキ」を実行する。この弱いブレーキの目的は、ドライバへ適切な行動を実行することを指示するだけではない。運転の主体はあくまでドライバであることから、システムは「弱いブレーキ」を実行することによって前方障害物との衝突余裕時間 (Time to collision; TTC) を延長し、人が主体的に車両の安全確保に関与できるようにしている。弱いブレーキを実行した後、なおもドライバに適切な行動がみられないならば、システムが人に代わって「強いブレーキ」を実行し、衝突を回避する。このように、システムがドライバに働きかけを行い、ドライバの対応行動を確認するなど、人とシステムの間でのやり取りは、ヒューマンマシンインタラクションであり [1]、システムがドライバの状態を知るうえで有用である。

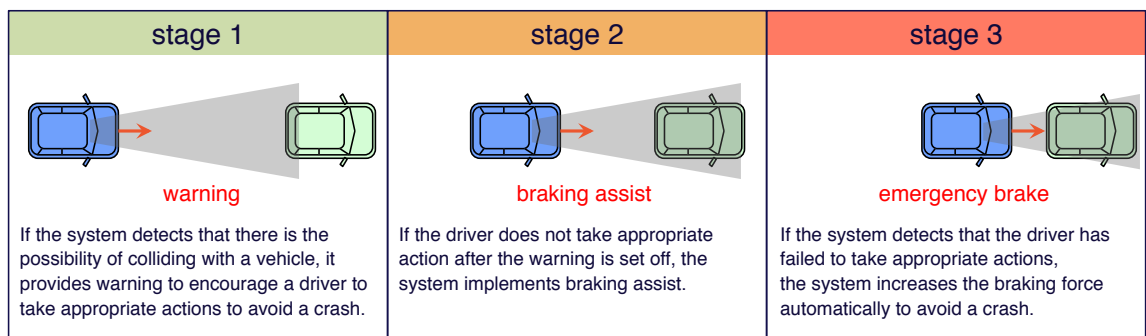


Figure 1.6 Advanced emergency braking system

ドライバが居眠りに陥った、またはドライバの心身機能が喪失したことが疑われたときに、システムが最低限の車両の安全確保を図りつつ、システムがドライバに働きかけを行い、ドライバの対応行動を確認することによってドライバ状態を知ることも可能であると考えられる。そのような状態にあるドライバは、適正な状況認識を確保することが困難であることから、適切な行為を選択し、実行することができないからである。システムが最低限の車両の安全確保を図りつつ、システムがドライバに働きかけ

を何度も行っているにもかかわらず、ドライバが何も対応行動を行わない状態が続くならば、ドライバは運転継続に適した状態にないと判断するのである。車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備したシステムの開発が求められている。

1.2 研究目的

既存のドライバ状態推定技術は、ドライバが居眠りをするよりまえの段階で、覚醒度低下の兆候を検出することが可能であるが、ドライバが居眠りに陥った、あるいはドライバの心身機能が喪失したことを検出し、車両の安全をどのように確保するかについては十分な議論がなされていない。また、既存のドライバ状態推定技術は、(1) 脈波や心拍などの生体情報を用いるもの、(2) 座圧などの圧力分布を用いるもの、(3) 操舵の乱れや車両のふらつきなどの車両情報を用いるもの、(4) 顔表情評価に基づくものに分類できるが、それらには、生理特性に個人差があることや主観評価にあいまいさがあることなどの欠点があることから、十分な推定精度を確保するに至っていない。

本論文では、車両挙動という客観情報のみを用いて、(i) 車両の安全確保と、(ii) ドライバが状況認識不全状態（低覚醒状態や心身機能喪失状態）に陥っているか否かの判定、という二つの目的を一つの制御で達成する運転支援システムを構築し、その運転支援が現実にも有用であることを認知工学的実験から明らかにする。

(1) 車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した運転支援システムの構築

1.1 節で述べたように、覚醒度の低下に伴ってドライバの操舵が乱れ、車両の挙動がふらついてくることは、一般に知られており [55, 56, 57, 58, 59]、車線逸脱を引き起こす要因は、居眠りが最も多い [15]。ドライバが居眠りに陥った、またはドライバの心身機能が喪失したときには、ドライバが適正な状況認識を確保することは困難であることから、人に車両の安全確保を求めることは難しい。このことから、システムが人に代わって車両の安全確保を図る方式を確立する必要がある。また、ドライバが居眠りに陥った、またはドライバの心身機能が喪失したときには、システムは「ドライバは運転継続に適した状態にない」と早期に判断し、停車に導くことが重要であることから、ドライバの状態を推定する方式を確立する必要がある。本論文における運転支援では、システムが最低限の安全確保を図りながら、システムがドライバに働きかけを行い、ドライバの対応行動を確認することからドライバ状態の同定を試みる。これ

は、ドライバ状態の判定が下されないことによって何も支援が実行されないこともあり得る既存の運転支援とは異なり、ドライバ状態の判定にかかわらずに車両の安全確保を図ることができる。車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した運転支援システムを構築する。

(2) 運転支援システムの有効性検証

車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した運転支援システムをドライビングシミュレータに搭載し、この運転支援が車両の安全確保とドライバの状態推定を行ううえで有効であることを認知工学的実験から確かめ、ドライバが居眠りに陥った、またはドライバの心身機能が喪失したことを検出したときの運転支援の新たな形態を確立する。本論文における運転支援では、ドライバの生体情報、運転行動などの計測のための特別な装置の設置を要求しないことから、高速バスなどの事業用自動車だけでなく、多くの一般の自動車に搭載できることが期待できる。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を示す。

第2章では、車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した運転支援システムを提案し、このシステムを設計する。まず、運転支援システムの作動の方式を述べる。つぎに、制御対象(車両・操舵系)の数理モデル、ならびに最適制御理論に基づいた車両横方向制御系(操舵トルク制御)のコントローラを構築し、本システムをドライビングシミュレータに搭載する。また、運転支援システムが車両の安全確保を図ることができることを、ドライビングシミュレータを用いて確認する。

第3章では、車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した運転支援システムを搭載したドライビングシミュレータを用いて、この運転支援が車両の安全確保とドライバの状態推定を行ううえで有効であることを認知工学的実験から確かめる。まず、運転支援システムの作動時におけるドライバの運転行動を分析する。つぎに、分析結果に基づいてドライバ状態推定の手法を構築し、その手法が、ドライバ状態を推定するうえで有効であることを評価する。認知工学的実験から得られた知見に基づき、ドライバが居眠りに陥った、またはドライバの心身機能が喪失したことを検出したときの運転支援の新たな形態を確立する。

第 4 章では，本研究で得られた結果と意義を整理し，今後の課題について述べる．

第2章 双対制御論的運転支援システムの設計

2.1 はじめに

すでに 1.1 節で述べたように、既存のドライバ状態推定技術は、(1) 心拍や脳波などの生体情報を用いるもの、(2) 運転席の着座接触圧を用いるもの、(3) 操舵の乱れや車両のふらつきなどの車両情報を用いるもの、(4) 顔表情評定に基づくものに分類できる。しかしながら、(1) は生理特性に、(2) はドライバの体動（座り直し）に個人差があり、万人に共通な判断基準を設定することが難しい。さらに、(1) は非侵襲・無拘束での計測が困難であることも実用化の障壁となっている。また、(3) は横風などの外乱の影響を排除することに難点がある。(4) の顔表情評定は、自動化の試みも進められており [62]、非侵襲・無拘束での検出が可能であるが、マスクなどを着用したドライバの評定が困難である点に限界がある。このように、既存のドライバ状態推定技術は、十分な推定精度を確保できるに至っていない現状にある。

以上のことを鑑み、本章では、車両挙動という客観情報のみを用いて、(i) 車両の安全確保と、(ii) ドライバが状況認識不全状態（低覚醒状態や心身機能喪失状態）に陥っているか否かの判定、という二つの目的を一つの制御で達成する双対制御論的運転支援システムを提案する。

双対制御

制御対象への入力信号（操作量）は、「制御量を目標値に近づけること」と「制御対象の状態や特性の同定を行うこと」の 2 つの役割をもつ。双対制御は、制御対象の状態や特性を同定するための入力信号を、その対象の制御にも有効なものにしようとする考え方である [74, 75]。しかしながら、制御と同定を同時に行うことは簡単ではない。制御の立場としては、システムにおける入力信号の変動を抑制したいが、同定の立場

としては、制御対象の動特性を詳しく調べるために、入力信号をできるだけ大きく変動させたい [76]。芳谷 [75] は、双対制御の考え方を、「よくわからない対象を扱うときに、慎重に恐る恐る扱うとともに、少し揺さぶったり探りを入れて対象の状態や特性を明らかにする」と表現している。これは、人がよくわからない物体や初対面の人を相手にしたときにとる典型的な行動であり、合理的な方策といえる [75]。双対制御では、一般に、探りのための入力信号をどの程度の大きさにするかが問題となる。探りの入力信号が小さすぎれば制御対象の同定は進まず、逆に大きすぎれば制御対象の破壊、あるいは初対面の相手に対する第一印象の悪化などにつながる [75]。

これに対して、本論文でいう双対制御論的運転支援システムは、制御対象（車両）への入力信号によって、ドライバ状態（状況認識の不全に陥っているか否か）を同定しようとするものである。これゆえに、本提案は、双対制御そのものではないが、双対制御のアイデアを活かしたものである。

第 2 章では、車両安全制御とドライバ状態推定を兼備した双対制御論的運転支援システムを設計する。2.2 節では、双対制御論的運転支援システムの作動の方式について述べる。2.3 節では、車線逸脱を予測する方式について述べる。2.4 節では、制御対象（車両・操舵系）の数理モデルを述べるとともに、操舵トルクを入力とする操舵トルク制御系を構築する。2.5 節では、システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす操舵トルク制御系を構築する。2.6 節では、ドライバの操舵行動の有無を判定する方式について述べる。2.7 節では、双対制御論的運転支援システムをドライビングシミュレータに構築し、システムが車両の安全を確保できることを確認する。

2.2 双対制御論的運転支援システム

双対制御論的運転支援システムの作動の方式を具体的に述べる。

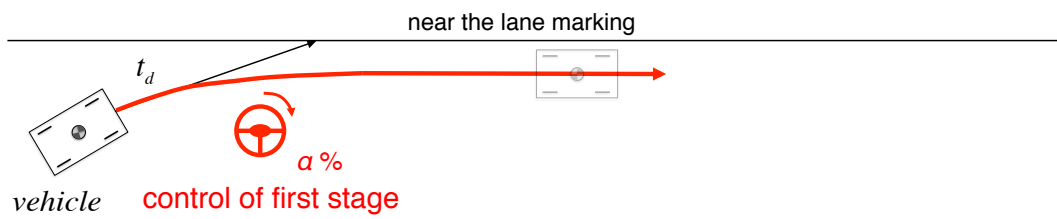


Figure 2.1 Control of the first stage in the dual control theoretic driver assistance

システムは、走行中の車両位置のモニタを続けるなかで、いま、 t_d 秒後に車両が車線逸脱すると予測したとする (Figure 2.1)。このときシステムは、車両を車線中央に戻すために必要な操舵制御の一部 (α %) を 1 段目の制御として実行する。これは、車両が車線区分線と平行となるような操舵制御である。すなわち、操舵制御の $(100 - \alpha)$ % を未実行のまま残す。通常のドライバであれば、車両が車線区分線付近を走行することは不快に感じることから、車両を車線中央に戻す操舵を実行するものと考えられる。1 段目の制御の開始後に、車両を車線中央に戻すためのドライバの操舵があらかじめ定められた t_i 秒の間に確認されれば、システムは「何らかの理由により車両が車線逸脱をしそうになったものの、ドライバは適正な状況認識が可能な程度に覚醒している」と判断する (Figure 2.2)。

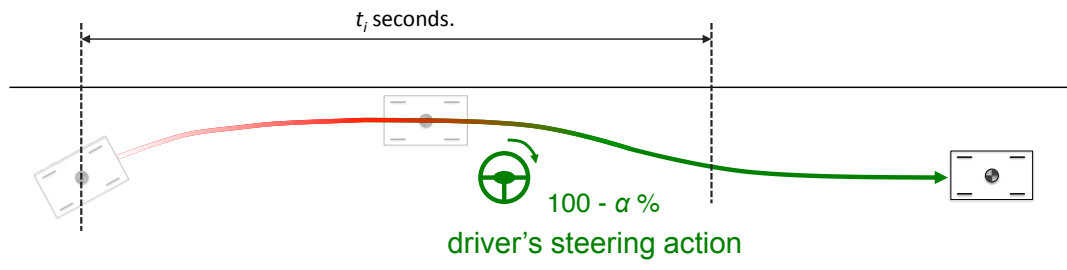


Figure 2.2 Driver's steering action to lead the vehicle to the center of the lane

一方、 t_i 秒の間にドライバの対応行動が確認されなければ、システムは「ドライバは状況認識の不全に陥っていることが疑われる」と判断し、車両を車線中央に戻すための操舵制御の未実行分を 2 段目の制御として実行する (Figure 2.3)。

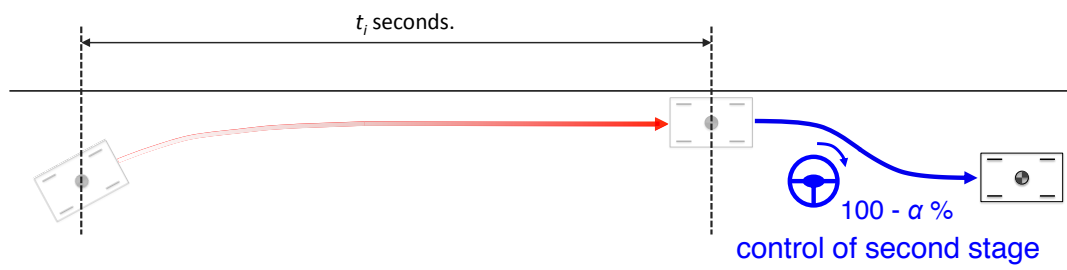


Figure 2.3 Control of the second stage in the dual control theoretic driver assistance

これらのことからわかるように，1 段目の制御は，車両が車線から逸脱していくことを阻止することと，今まさに車線逸脱が起ころうとしていたことにドライバが気づいたか否かを知ることの 2 つの目的を持つ．

ドライバの操舵介入を許容する操舵トルク制御

車両の横方向制御に関する多くの研究では，最適制御理論に基づいた制御系設計がなされている [77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87]．たとえば，毛利ら [77, 82] は，状態フィードバックに基づいて構成される LQ 制御 (Linear Quadratic Control) を用いて車線追従制御を設計している．また，毛利ら [83] は， H_2 制御 (H_2 -Optimal Control) をベースとするサーボ系を構成し，道路の横断勾配や定常的な横風外乱などが生じた場合における自車の走行位置とシステムの目標位置の定常偏差をゼロにする制御系を設計している．西羅ら [85, 86, 87] は，モデル予測制御 (Model Predictive Control) を用いて車線変更支援や障害物回避支援を設計している．制御の基本は，対象を目標とする状態に移す，または目標とする状態を保つことであるが，制御系設計の際には，目標とする状態に至るまでの過渡応答が望ましいこと，あるいは使用する操作量をできるだけ小さくする，などの設計仕様が与えられる場合が多い．このような設計仕様の達成度を評価関数で表現し，その評価関数を最小にする制御系を設計する問題は，最適制御問題と呼ばれる [88]．

制御では，通常，人が介入することを外乱とみなされかねない．しかし，双対制御論的運転支援システムにおいては，1 段目の制御の開始後においてドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行う場合など，ドライバの入力を優先させる必要があることから，ドライバの操舵介入を許容する制御系の設計が要求される．

車線維持支援装置などの車両横方向制御系では，(1) 操舵角度を制御入力とする方式 [78, 79] (操舵角制御) と，(2) 操舵トルクを制御入力とする方式 [80, 81, 82] (操舵トルク制御) に大別される．操舵角制御では，操舵角指令値 θ^* と実際の操舵角 θ の間に操舵角サーボ系 (目標値の任意の変化に追従するように構成された制御系) が存在する (Figure 2.4)．このため，ドライバが操舵を行ったとしても，システムは操舵角サーボにより外乱相殺を行うことから，ドライバの操舵介入は困難であるとされる [81, 82]．これに対して，操舵トルク制御では，操舵角サーボ系を必要とせず (Figure 2.5)，直接操舵トルク入力で車両を制御することから，必要に応じたドライバの操舵介入を許容できることが知られている [82]．双対制御論的運転支援システムでは，ドライバが車

両を車線中央に戻す操舵を行ったときにはドライバの入力を優先させる必要があることから、ドライバの操舵介入を許容する操舵トルク制御方式を採用。

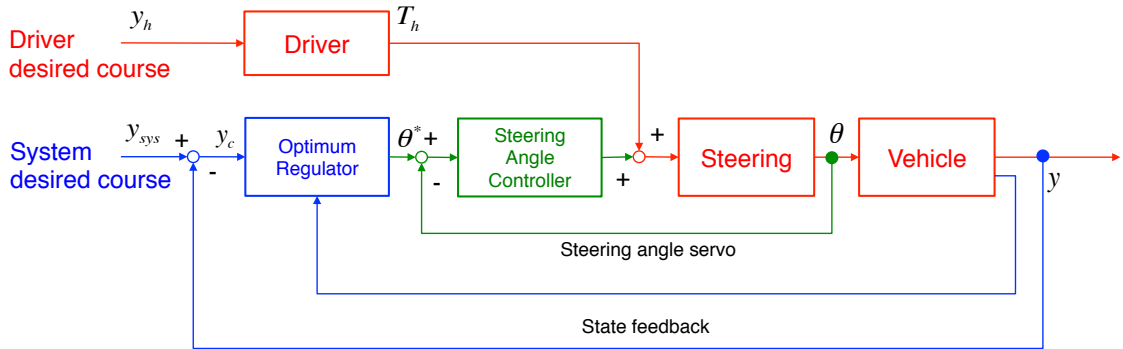


Figure 2.4 Block diagram for steering angle control [82]

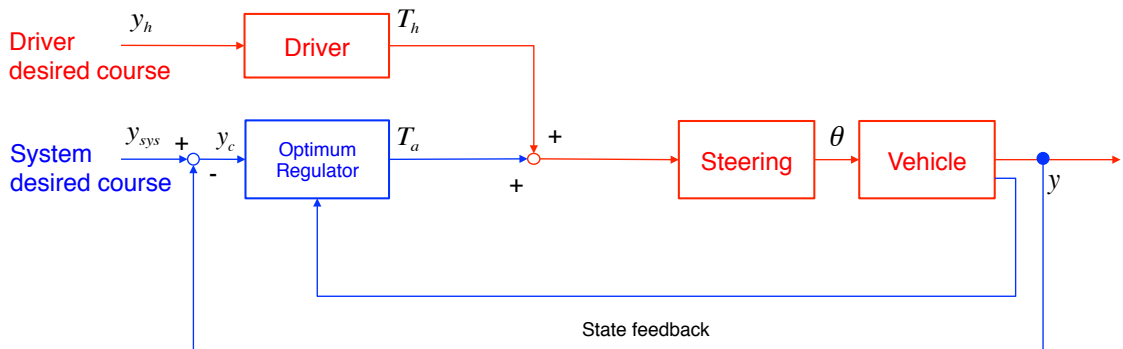


Figure 2.5 Block diagram for steering torque control [82]

2.3 車線逸脱の判定

現時刻を t とし, 速度 $v(t)$ [m/s] で走行中の車両が, 車線区分線と角 $\psi(t)$ [rad] をなしながら車線中央から逸れていく状況を考えよう (Figure 2.6). 車両の横位置 $y(t)$ は, 車両の重心位置とする. また, 左右の車線区分線の $d_{th} = 0.5$ [m] 内側に車線逸脱判定ラインを設け, 車両の横位置 $y(t)$ が車線逸脱判定ラインを越えたときに, 車線逸脱が起こったと定義する. いま, 車両の横位置 $y(t)$ と車線逸脱判定ラインとの距離を $d(t)$, 車両が車線逸脱判定ラインに達するまでの時間の予測値を $t_d(t)$ とすると, $t_d(t)$ は,

$$t_d(t) = d(t) / \{v(t) \cdot \sin\psi(t)\} \quad (2.1)$$

で与えられる. ここで, 設計者があらかじめ設定する値 t_{th} に $t_d(t)$ がはじめて一致する, あるいは下回る時刻 t^* においてシステムは1段目の制御を開始するものとする, 時刻 t^* は次式で表すことができる.

$$t^* = \inf\{t : t_d(t) \leq t_{th}\} \quad (2.2)$$

なお, t_{th} は現実的にとり得る 1 秒 [89] に設定する. また, 車線区分線の認識に基づく車両位置の推定などは, すでに実用化されている車線逸脱警報システムの技術 [90] と同様であることから, 本論文においては議論しない.

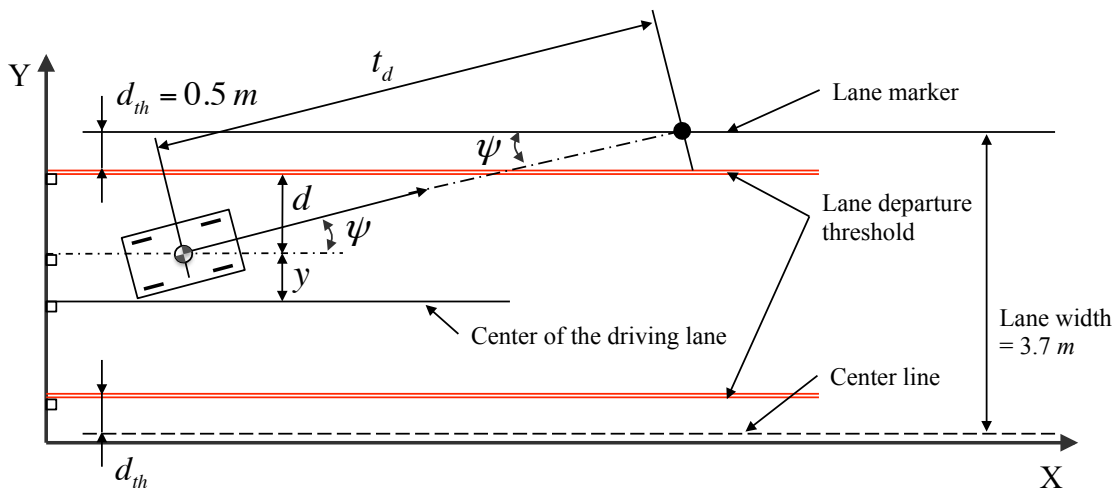


Figure 2.6 Criterion for lane departure

2.4 操舵トルク制御系の構築

本節では、制御対象（車両・操舵系）の数理モデルを述べるとともに、操舵トルクを入力とする操舵トルク制御系を構築する。

2.4.1 車両・タイヤモデル

制御対象のモデリングでは、複雑なモデルを構築することは目的ではない。現実のシステムにおける動特性（時間応答の過渡特性）には、数式では表せない特性や正確に計ることのできない物理量を含んでいる。複雑なモデルであれば、モデルにおけるパラメータの同定と妥当性の検証が容易ではないことから、制御対象の主要なダイナミクスをできるだけ簡単なモデルで表現できることが重要となる。操舵によって生じる車両の運動については、これまで多くの研究がなされ、すでに基本となる車両運動の理論は確立されている [91]。本節において、制御系を設計する際に扱う車両には、一般的な等価二輪モデルを用いる。

車輪と横すべりの関係

等価二輪モデルを述べるまえに、車輪と横すべりの関係を説明する。車両が直進走行しているときには、車輪の向いている方向と車輪の進行方向は一致している。しかし、車両が横方向の運動やヨーイング運動（鉛直軸回りの回転運動）を伴っている場合には、車輪の向いている方向と車輪の進行方向は一致しているとは限らない [91]。Figure 2.7 は、車輪を上から見た図である。(a) は車輪の向いている方向と車輪の進行方向が一致する場合を示し、(b) は一致しない場合を示す [91]。(b) の状態を、横すべりを伴う車輪と呼び、車輪の進行方向と回転面のなす角を横すべり角 (Slip angle) と呼ぶ [91]。また、車両が駆動していれば駆動力が働き、制動していれば制動力が働く。さらに、ころがり抵抗力（進行方向と逆向きに生じる抵抗力）が常に働く [91]。もし、(b) のように車輪に横すべりが伴うときには、車輪の回転面に垂直な力が発生する。この力は、車輪が横すべりを生じている場合、これを生じさせまいとして働く抗力とみることもできる [91]。一般に、この力は、横力 (lateral force) と呼ばれる。さらに、この力の車輪進行方向に垂直な成分をコーナリングフォース (cornering force) と呼ぶ。横すべり

角が小さければ，この二つの力は同じものとみなせる [91] .

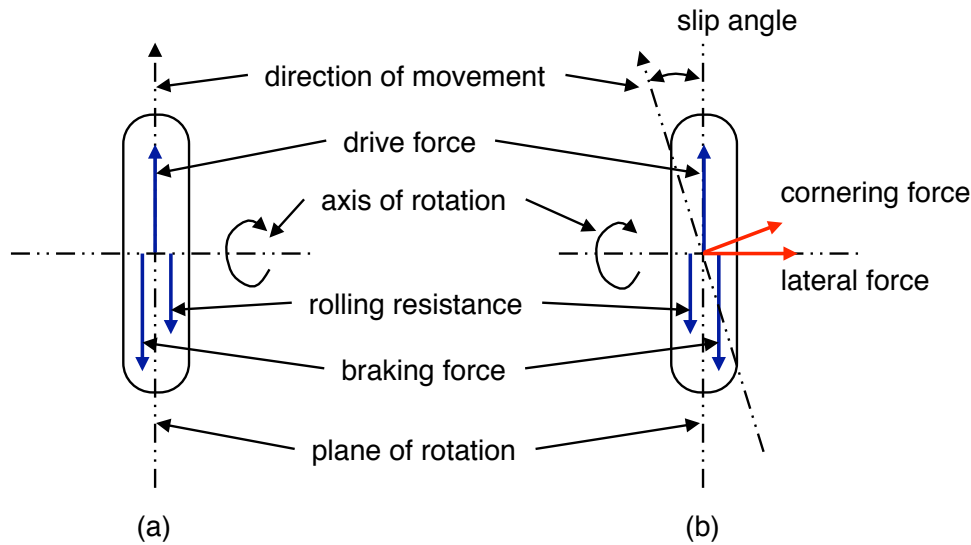


Figure 2.7 Variables related to the wheel [91]

車両の運動方程式

等価二輪モデルについて述べる．車両の運動の自由度は，車両の横方向，ヨーイング，ローリングの 3 つである．ここで，車両が急激に加減速をする場合の過渡的な現象は扱わない，さらに，急激なステアリング操作をする場合も想定しないとするならば，車両の走行速度は一定とみなすことができ，車両のローリング運動は無視することができる [91] . すなわち，車両の鉛直方向の高さを無視し，地面に投影された剛体としての車両の横方向の並進運動と，ヨーイング運動を考えればよいことになる [91] .

水平面を運動する車両が，横方向に速度成分をもち，その重心点における横すべり角を生じるとともに，重心点を通る鉛直軸回りの角速度を持つならば，車輪にも横すべり角が生じ，この横すべり角に応じて車輪にコーナリングフォースが発生することになる [91] . このコーナリングフォースが車両の運動を規定する力となる [91] . Figure 2.8 のように，直線路の方向を X 軸，それに垂直な方向を Y 軸とする地上に固定した $X - Y$ 座標系を考える．ここで，車両重心点と X 軸の横偏差を y ，車両のヨー角を ψ ， X 軸と車両が進んでいる方向のなす角を γ ，車両重心点と前（後）車軸間の距離を $l_f(l_r)$ ，前（後）車軸間の距離を l ，前後左右輪に働くコーナリングフォース（車輪進

行方向に対して垂直な方向へ働く力)を $Y_{f1}, Y_{f2}, Y_{r1}, Y_{r2}$, 前輪実舵角 (左右前輪の回転面と車両前後方向のなす角)を δ とする . 通常 , 直線路を走行するときの車両運動を考える場合には , $|\gamma| \ll 1$, $|\psi| \ll 1$ とみなしてよい [91] . また , 前輪実舵角 $\delta \ll 1$ とすれば , 前後一輪あたりのタイヤに働くコーナリングフォース $Y_{f1}, Y_{f2}, Y_{r1}, Y_{r2}$ の方向は , ほぼ Y 方向に一致するとみなしてさしつかえないことから , 車両重心点における横方向の運動は ,

$$m\ddot{y} = Y_{f1} + Y_{f2} + Y_{r1} + Y_{r2} \quad (2.3)$$

となり , 重心点を通る鉛直軸回りのヨーイング運動は ,

$$I\ddot{\psi} = l_f(Y_{f1} + Y_{f2}) - l_r(Y_{r1} + Y_{r2}) \quad (2.4)$$

となる [91] . ここで , m は慣性質量 , I は車両のヨーイング慣性モーメント (車両重心点を通る , 鉛直軸まわりの車両全体の慣性モーメント) である .

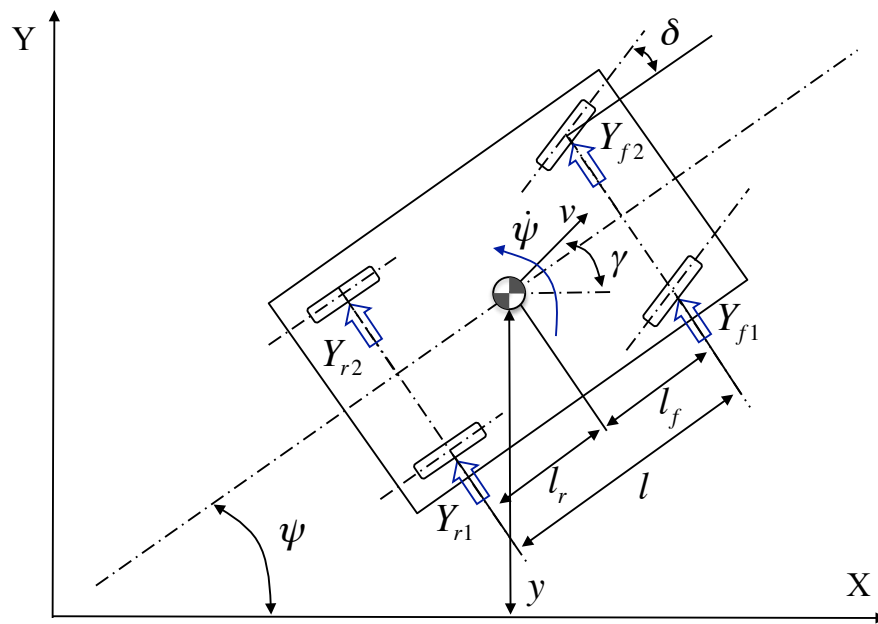


Figure 2.8 Motion of the vehicle [91]

また , 等価二輪モデルでは , 左右輪の横すべり角が等しく , かつその値が小さく , 前輪実舵角も小さいとみなし , 4 輪の車両を等価的な前後 2 輪の車両に置き換える [91] . このようにして , 左右のタイヤ自体の特性に差がないとすれば , 左右のタイヤに働くコーナリングフォースにも差がないことから , $Y_f(Y_r)$ を前 (後) 輪に働くコーナリン

グフォースとすると,

$$2Y_f = Y_{f1} + Y_{f2} \quad (2.5)$$

$$2Y_r = Y_{r1} + Y_{r2} \quad (2.6)$$

と書くことができ, (2.3), (2.4) 式は,

$$m\ddot{y} = 2Y_f + 2Y_r \quad (2.7)$$

$$I\ddot{\psi} = 2l_f Y_f - 2l_r Y_r \quad (2.8)$$

となる [91].

また, $|\gamma|$ が小さければ, 車両は, その重心点で X 方向に $v \cdot \cos\gamma \approx v$, Y 方向に $v \cdot \sin\gamma \approx v\gamma = \dot{y}$ の速度成分をもち並進運動をするとともに, 重心点回りに $\dot{\psi}$ の角速度で回転運動を行うとみることができる [91]. Figure 2.9 のように, 前後輪は, 車両の回転運動によって, Y 方向にさらに $l_f \cdot \dot{\theta}$, $l_r \cdot \dot{\theta}$ の成分が付加されることから, 前後輪の進行方向と X 軸がなす角 γ_f, γ_r は,

$$\gamma_f \approx \frac{v\gamma + l_f \dot{\psi}}{v} = \frac{\dot{y}}{v} + \frac{l_f \dot{\psi}}{v} \quad (2.9)$$

$$\gamma_r \approx \frac{v\gamma - l_r \dot{\psi}}{v} = \frac{\dot{y}}{v} - \frac{l_r \dot{\psi}}{v} \quad (2.10)$$

となる [91].

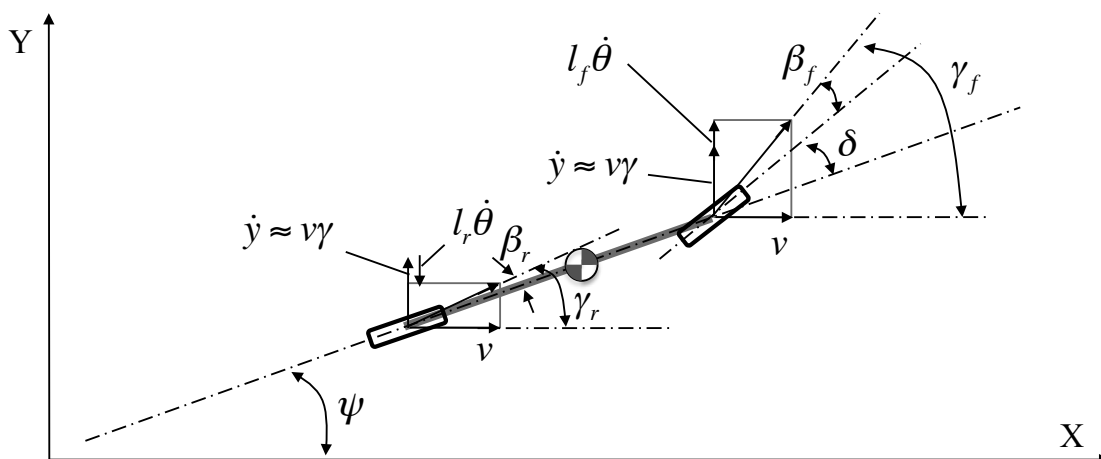


Figure 2.9 Motion of the two-wheel vehicle [91]

さらに，前後輪の向いている方向と X 軸のなす角 ψ_f, ψ_r は， $\psi_f = \psi + \delta, \psi_r = \psi$ であることから，前後輪の横すべり角 β_f, β_r は，

$$\beta_f = \gamma_f - \psi_f = \frac{\dot{y}}{v} + \frac{l_f \dot{\psi}}{v} - \psi - \delta \quad (2.11)$$

$$\beta_r = \gamma_r - \psi_r = \frac{\dot{y}}{v} - \frac{l_r \dot{\psi}}{v} - \psi \quad (2.12)$$

となる [91] .

ここで，横すべり角とコーナリングフォースの関係を述べる．横すべり角が小さいときには，コーナリングフォースと横すべり角の関係は直線的であるが，横すべり角がある閾値を超えると，少しずつコーナリングフォースの増加はにぶり，次第に飽和する [91] . 通常，車両の横方向の運動は，タイヤの横すべり角とコーナリングフォースの関係が直線的な範囲で行われることが多い [91] . この直線部における傾きが，前後輪タイヤのコーナリングパワー（単位横すべり角あたりの車輪に発生するコーナリングフォースの値）である．前（後）輪のタイヤモデルでは，横すべり角 $\beta_f(\beta_r)$ が微小と仮定し，コーナリングフォースが横すべり角に比例するものとする．前（後）輪のコーナリングパワーをそれぞれ K_f, K_r とすると，前後輪に働くコーナリングフォースは，

$$Y_f = -k_f \beta_f = k_f \left(\delta + \psi - \frac{\dot{y}_c}{v} - \frac{l_f \dot{\psi}}{v} \right) \quad (2.13)$$

$$Y_r = -k_r \beta_r = k_r \left(\psi - \frac{\dot{y}_c}{v} - \frac{l_r \dot{\psi}}{v} \right) \quad (2.14)$$

となる [91] .

(2.13), (2.14) 式を，(2.7), (2.8) 式に代入し，整理すると，

$$m\ddot{y} + \frac{2(K_f + K_r)}{v}\dot{y} + \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{v}\dot{\psi} - 2(K_f + K_r)\psi = 2K_f \delta \quad (2.15)$$

$$I\ddot{\psi} + \frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{v}\dot{y} + \frac{2(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r)}{v}\dot{\psi} - 2(l_f K_f - l_r K_r)\psi = 2l_f K_f \delta \quad (2.16)$$

を得る [91] . (2.15), (2.16) 式の左辺は，車両の運動を示すものである．すなわち，右辺の任意の前輪実舵角 δ を入力することによって，車両は，横方向とヨーイング方向の運動をすることになる．このように，等価二輪モデルにおける横方向とヨーイング方向の運動方程式は，比較的簡単な形で記述することができる．

2.4.2 操舵系モデル

通常，車両の操舵系は，Figure 2.10 に示すような構成となる．ステアリングの回転は，ステアリングシャフト，ならびにギヤボックスを介してタイロッドに伝わり，さらにナックルアームを通してキングピン回りの前輪の回転として現れる [91]．

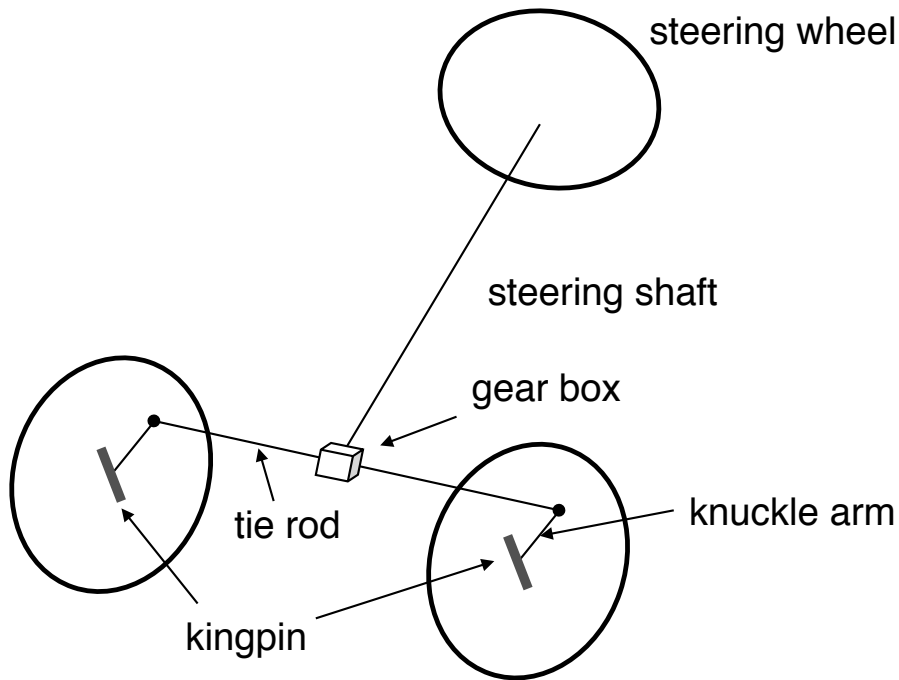


Figure 2.10 Steering system [91]

ここで，操舵系には，毛利ら [82] により定式化されたモデルを用いる (Figure 2.11)．Figure 2.11 に示すモデルは，複雑なパワーステアリング機構や操舵系のねじれ剛性は考慮しない [82]．ステアリングに相当する慣性モーメント I_s を持つ回転体が，ステアリングシャフト，ギヤボックスの取り付けなどを考慮した操舵系のキングピン回りの等価弾性係数 K_s を持つ回転軸を介して前輪に結合されているとする．このとき，ステアリングシャフトなどに等価粘性摩擦が存在すると考え，粘性摩擦係数を C_s とする．また，ドライバが走行中にステアリングを操舵するとき，ステアリングが元に復元するようなトルクが働く．これは，車両の前輪に働くコーナリングフォースがキングピン回りのモーメントとして働くためである (セルフアライニングトルク) [91]．毛利ら [82] のモデルでは，前輪に働くセルフアライニングトルクがステアリングギヤ (減速比 N) を介して，そのままステアリングホイールに伝わるものとする [82]．

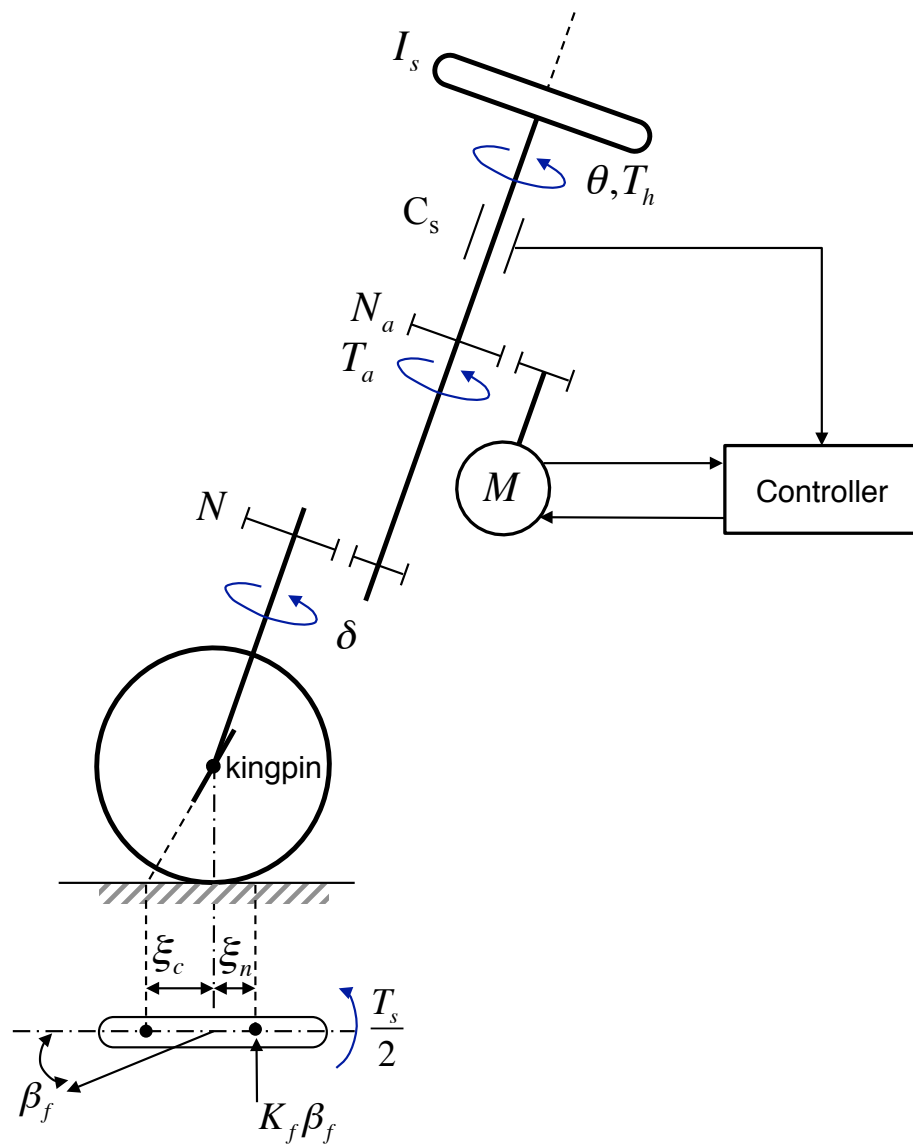


Figure 2.11 Steering model [82]

ここで、操舵系の運動方程式は、

$$I_s \ddot{\theta} = -C_s \dot{\theta} - \frac{T_s}{N} + T_a + T_h \quad (2.17)$$

で与えられる [82] . T_s はセルフアライニングトルクによる操舵反力 , T_a はシステムによる操舵支援トルク , T_h はドライバの操舵による操舵トルクを示す . 車両の前輪に働くコーナリングフォースがキングピン回りのモーメントとして働くセルフアライニ

ングトルク T_s は,

$$T_s = -2\xi k_f \beta_f = 2\xi k_f \left(\frac{\theta}{N} + \psi - \frac{l_f \dot{\psi}}{v} - \frac{\dot{y}}{v} \right) \quad (2.18)$$

で与えられる [91]. ただし, ξ は

$$\xi = \xi_n + \xi_c \quad (2.19)$$

である [91]. ξ_n はニューマチックトレール (タイヤのコーナリングフォースの着力点とタイヤの接地中心との距離), ξ_c はキャストトレール (キングピン軸の延長線が路面と交わる点とタイヤ接地中心との距離) と呼ばれ, ξ をトレール長と呼ぶ.

2.4.3 システムの状態方程式

等価二輪モデル, ならびに操舵系モデルを整理すると, つぎの状態方程式, ならびに出力方程式を記述できる [82].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dw(t) \quad (2.20)$$

$$y = Cx(t) \quad (2.21)$$

ここで, 状態ベクトル x は, ヨーレート $\dot{\psi}$, ヨー角 ψ , 車両横速度 y_c , システムの目標横位置と車両重心点の偏差 y_c , 操舵角速度 $\dot{\theta}$, 操舵角度 θ である. なお, 状態ベクトル x は観測できるものとする. スカラー操作量 u は, システムの操舵支援トルクである. さらに, 外乱 w はドライバの操舵トルク T_h に相当する. また, 本節においては, その他の外乱は考慮しないものとする.

$$x = \left[\dot{\psi} \quad \psi \quad y_c \quad y_c \quad \dot{\theta} \quad \theta \right]^T \quad (2.22)$$

$$u = T_a \quad (2.23)$$

$$w = T_h \quad (2.24)$$

係数行列 A, B, C, D は, つぎのように表される [82].

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & a_{16} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & a_{36} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & 0 & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & b_{51} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.26)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{51} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.28)$$

また,

$$a_{11} = -2 \left(\frac{l_f^2 k_f + l_r^2 k_r}{vI} \right), a_{12} = 2 \left(\frac{l_f k_f - l_r k_r}{I} \right), a_{13} = -2 \left(\frac{l_f k_f - l_r k_r}{vI} \right),$$

$$a_{16} = 2 \left(\frac{2l_f k_f}{IN} \right), a_{31} = -2 \left(\frac{l_f k_f - l_r k_r}{mv} \right), a_{32} = 2 \left(\frac{k_f + k_r}{m} \right),$$

$$a_{33} = -2 \left(\frac{k_f + k_r}{mv} \right), a_{36} = 2 \left(\frac{2k_f}{mN} \right), a_{51} = \frac{2\xi k_f k_r}{I_s N v}, a_{52} = -\frac{2\xi k_f}{I_s N},$$

$$a_{53} = \frac{2\xi k_f}{I_s N v}, a_{55} = -\frac{C_s}{I_s}, a_{56} = -\frac{2\xi k_f}{I_s N^2}, b_{51} = \frac{1}{I_s}, d_{51} = \frac{1}{I_s}$$

となる [82] .

2.4.4 最適レギュレータを適用した制御系

システムによる 1 段目の制御は、車両が車線区分線に対して平行となるような操舵制御である。すなわち、システムが車線逸脱を予測した時刻 t^* において、システムは、車両横位置の目標を車線逸脱が予測された側の車線逸脱判定ラインに設定し、1 段目の操舵トルク制御を実行する。また、ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を実行しないまま t_i 秒間が経過したならば、時刻 $t^* + t_i$ において、システムは、車両横位置の目標を車線中央に設定し、2 段目の操舵トルク制御を実行することで車両を車線中央に戻す。なお、2 段目の制御の開始から 5 秒経過した時刻に、2 段目の制御を終了する。ここで、操舵トルクを入力とする操舵トルク制御系には、状態フィードバック制御則

$$T_a(t) = -Fx(t) \quad (2.29)$$

を用いる。状態フィードバックゲインは、

$$F = \begin{bmatrix} f_{\dot{\psi}} & f_{\psi} & f_{\dot{y}} & f_y & f_{\dot{\theta}} & f_{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

を与える。さらに、ここでは、評価関数

$$J = \int_0^{\infty} \{q_y y_c^2(t) + r T_a^2(t)\} dt \quad (2.31)$$

を与え、 J を最小化する状態フィードバック制御則とした。このような制御は、 LQ 制御（最適レギュレータ）と呼ばれる。システムの目標横位置と車両重心点の偏差 $y_c(t)$ と、操舵支援トルク $T_a(t)$ を評価対象とし、 q_y ならびに r は、設計者が定める重み係数である。 $q_y (\geq 0)$ を大きくすれば、車両をシステムが目標とする横位置に移す速さを重視することになり、 $r (> 0)$ を大きくすれば、操舵支援トルク $T_a(t)$ の大きさを抑えることを重視することになる。

ここで、(2.31) 式の評価関数 J を最小にするフィードバックゲインは、

$$F = r^{-1} B^T P \quad (2.32)$$

で与えられる。ただし、 P はつぎのリカッチ代数方程式

$$PA + A^T P - P B r^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (2.33)$$

を満たす正定行列 $P = P^T$ であり、(2.33) 式の Q は、

$$Q = \text{diag} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & q_y & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

となる準正定行列 $Q = Q^T$ である。

2.4.5 閉ループ系の時間応答

最適レギュレータは、任意の初期状態 $x(0)$ に対し、状態ベクトル $x(t)$ を $x(t) \rightarrow 0$ に制御する。最適レギュレータを適用した閉ループ系の時間応答を求める。簡単のため、ドライバの操舵トルク T_h が 0 であるとする、(2.20) 式の状態方程式は、

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.35)$$

となる。ここで、(2.35) 式と (2.29) 式で構成される併合システムの状態方程式は、

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B(-Fx(t)) = (A - Br^{-1}B^T P)x(t) = A_c x(t) \quad (2.36)$$

となる。

(2.36) 式に対してラプラス変換を利用して時間応答 $x(t)$ を求める。(2.36) 式は、

$$X(s) = (sI - A_c)^{-1}x(0) \quad (2.37)$$

となり、(2.37) 式の両辺を逆ラプラス変換すると、

$$x(t) = e^{A_c t} x(0) \quad (2.38)$$

を得る。ここで、 $e^{A_c t}$ は状態遷移行列（または行列指数関数）と呼ばれる。(2.38) 式から、最適レギュレータを適用した閉ループ系の時間応答 $x(t)$ は、システムの初期状態 $x(0)$ と、状態遷移行列 $e^{A_c t}$ の値に応じて変化することがわかる。また、状態遷移行列 $e^{A_c t}$ の要素となる指数関数のべき指数 λ は、状態方程式 (2.36) 式における係数行列 A_c の固有値（システムの極）であることから、係数行列 A_c の固有値が重要な役割を果たす。

最適レギュレータの設計においては、設計者は、(2.31) 式の評価関数の重み係数 q_y ならびに r の値を定めることによってフィードバックゲイン F を決定する。また、(2.36)、(2.37)、(2.38) 式に示すとおり、フィードバックゲイン F の値に応じて、閉ループ系の時間応答は変わる。

2.4.6 最適レギュレータを適用した制御のもとでの車両の動特性

最適レギュレータを適用した制御のもとでの車両の動特性（時間応答の過渡特性）を調べる．設計者は，評価関数 J における重み係数 q_y ならびに r の値を変更することによってフィードバックゲイン F を決定する．また， F の値に応じてシステムの極の配置は変わる．本節では，重み係数 q_y ならびに r の値を変更したときに，システムの極の配置がどのように変化するかを調べる．

ここで，システムの極は，特性方程式

$$|sI - A_c| = 0 \quad (2.39)$$

の根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ を求めればよい．Figure 2.12 は， $q_y = 1, r = 1$ の条件におけるシステムの極の配置を示す．

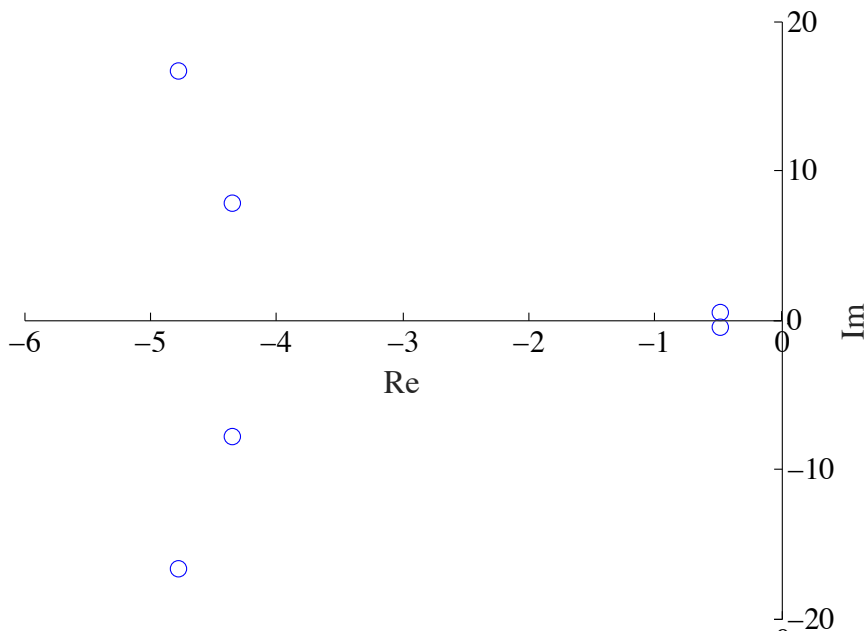


Figure 2.12 Pole positions

(2.20) 式のシステムは，6 次の状態方程式であることから，6 つの極をもつ．Figure. 2.12 に示すように，システムの極は共役複素数 ($\lambda = \alpha \pm i\beta$) である．この場合，極の実部が負側に大きいほど状態ベクトル $x(t)$ が速やかに零に収束し，極の虚部の絶対値が大きいほど状態ベクトル $x(t)$ の応答が振動的になる（振動周期が短い）．また，虚軸に最も近い極は，状態ベクトル $x(t)$ の時間応答の振る舞いを支配することから，この

ような極は代表極（あるいは支配極）と呼ばれる [95] . $q_y = 1, r = 1$ の条件では代表極が原点付近に位置することから，制御の開始後において，車両は緩やかにシステムが目標とする横位置に移り，かつ状態ベクトル $x(t)$ の振動周期が長いことをわかる．

ここで，評価関数 J における重み係数 r を 1 に固定したうえで，重み係数 q_y を 10^{-3} から 10^4 に 0.01 刻みで変化させたときのシステムの極の配置を調べた (Figure 2.13) . 重み係数が $q_y \geq r$ となる場合のシステムの極の位置は青色の印で示し， $q_y < r$ となる場合のシステムの極の位置は赤色の * 印で示す . 矢印の向きは，重み係数 q_y の値を 0.01 刻みで大きくするにしたがってシステムの極の位置が変わる方向を示す .

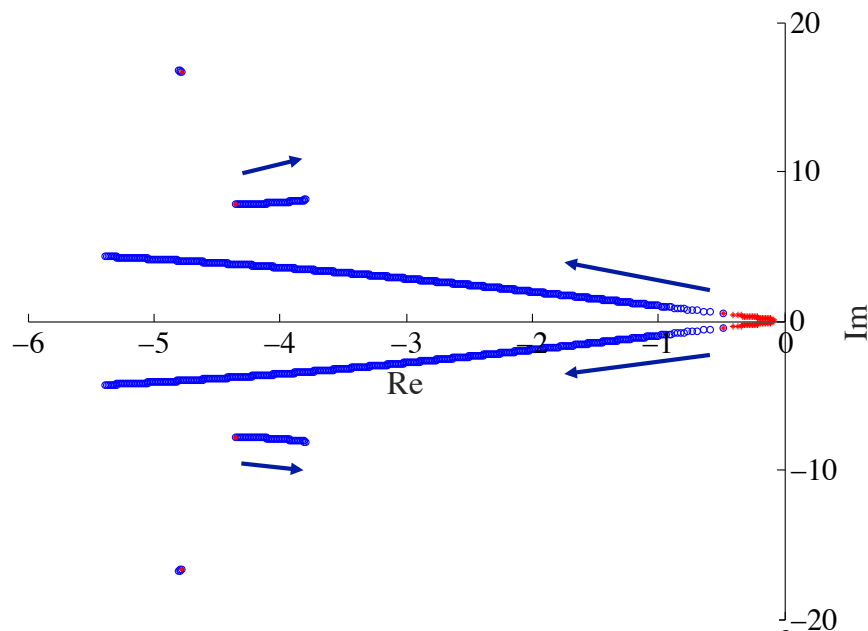


Figure 2.13 Pole positions as a function of q_y ranging from 10^{-3} to 10^4

評価関数 J の重み係数 q_y を 10^{-3} から 10^4 に 0.01 刻みで変化させたときの極の配置をみると，極の位置が虚軸に最も近い代表極の位置の変化が大きいことを確認することができる . このことは，重み係数 q_y の値に応じて，車両がシステムの目標横位置に移る速さ（速応性）など，システムの動特性が大きく変わることを示す . 重み係数が $q_y < r$ となる場合，代表極は原点付近に位置することから，このシステムは，速応性が低くかつ状態ベクトル $x(t)$ の振動周期が長い応答特性を持つ . これに対して，重み係数が $q_y \geq r$ となる場合， q_y の値を大きくするにしたがって，システムは，速応性が高く，状態ベクトル $x(t)$ の振動周期が短い応答特性を持つことになる .

2.4.7 数値例

本節では、操舵トルク制御を用いる双対制御論的運転支援システムが、車両の安全を確保できることを車両軌跡の数値例から確認する。

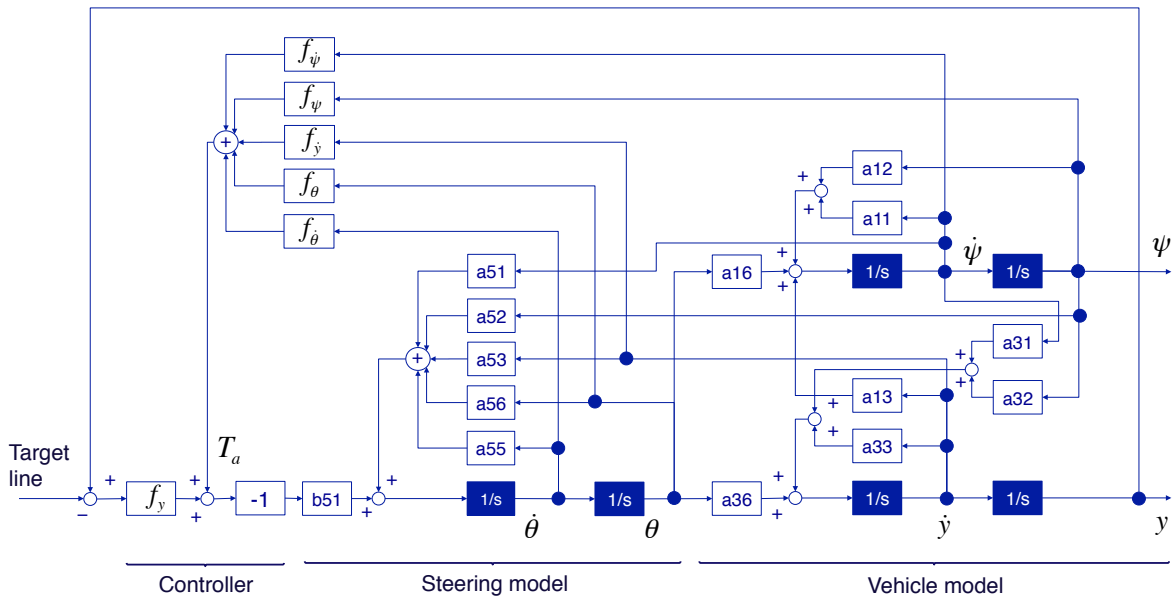


Figure 2.14 Simulation model

高速道路で発生する車線逸脱の典型的なケースとして、 $v = 100$ [km/h], $\psi = 1$ [degree] で車両が車線中央から逸れていく状況 [96] を例にとり、システムによる 1 段と 2 段目の操舵トルク制御の実行と車両軌跡を数値例で確認する。本節では、Matlab/simlink 環境に作成したシミュレーションモデル (Figure 2.14) を用いる。このシミュレーションモデルは、2.4.1, 2.4.2 節で述べた車両・操舵系の数理モデルと、2.4.4 節で述べた状態フィードバックで構成される最適レギュレータをブロック線図で表現したものである。なお、図内の英数字は、(2.25) 式の係数行列 A 、(2.26) 式の係数行列 B 、また、(2.30) 式の状態フィードバックゲイン F を示している。

ここで、1 段目の制御の開始時刻から 2 段目の制御が開始されるまでの時間長 t_i は 5 秒とする。5 秒間の余裕時間があれば、ドライバーは 1 段目の制御の実行を認識し、自ら車両を車線中央に戻す操舵を実行するに十分であると考えられる。重み係数は、

- case 1: 重み係数 r の値を大きくし、操舵支援トルク T_a の大きさを抑えることを重視したもの

case 2: 重み係数 r と q_y の値を同じ大きさにしたもの

case 3: 重み係数 q_y の値を大きくし、状態ベクトル $x(t)$ の 0 への収束の速さを重視したもの

case 4: ケース 3 以上に状態ベクトル $x(t)$ の 0 への収束の速さを重視したもの

の 4 条件を与えた (Table 2.1) . Table 2.1 に、各重み係数を与えたときのフィードバックゲイン F の値を示す . 数値例に用いる車両諸元を Table 2.2 に示す . 本節における数値例では、つぎの状態ベクトル $x(t)$ の初期状態

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0.0175 & 0.485 & 0.8652 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.40)$$

を与え、1 段と 2 段目の制御のもとでの車両軌跡のシミュレーションを実行した .

Table 2.1 Weight coefficients and feedback gains

	Weight coefficients		feedback gains					
	q_y	r	$f_{\psi'}$	f_{ψ}	$f_{y'}$	f_y	$f_{\theta'}$	f_{θ}
case 1	0.1	1	1.8942	0.5662	1.1547	0.3162	0.01652	0.1146
case 2	1	1	3.3909	1.7934	2.0619	1.0000	0.0294	0.2103
case 3	10	1	6.1029	5.6945	3.6951	3.1623	0.0523	0.3943
case 4	100	1	11.077	18.163	6.6701	10.000	0.0932	0.7663

Table 2.2 Vehicle parameters

m	vehicle mass (kg)	1100
I	Moment of inertia of yaw (kgm^2)	2940
l_f, l_r	Length between C.G. and axle (m)	1.0, 1.635
k_f, k_r	Cornering powers (N/rad)	25500, 71000
N	Steering gear ratio	17
I_s	Equivalent moment of inertia of steering wheel (kgm^2)	0.03
C_s	Equivalent viscous friction coefficient of steering wheel (Nm s/rad)	0.2
ζ	Trail length (m)	0.052

システムの状態 [1 : 1 段目の制御の実行, 2 : 2 段目の制御の実行] , 車両横変位 y [m] , 横加速度 \ddot{y}_c [G] , ヨーレート $\dot{\psi}$ [rad/sec] , 操舵角度 θ [degree] , 操舵支援トルク T_a [Nm] の応答を Figure 2.15 に示す . ここで , 車両の横位置は , 車線中央を 0 , 左右の車線区分線の位置を各々 1.85 と -1.85 で表している . また , 各々の横軸は , シミュレーションの開始時刻を $t = 0$ とし , 経過時間を表す .

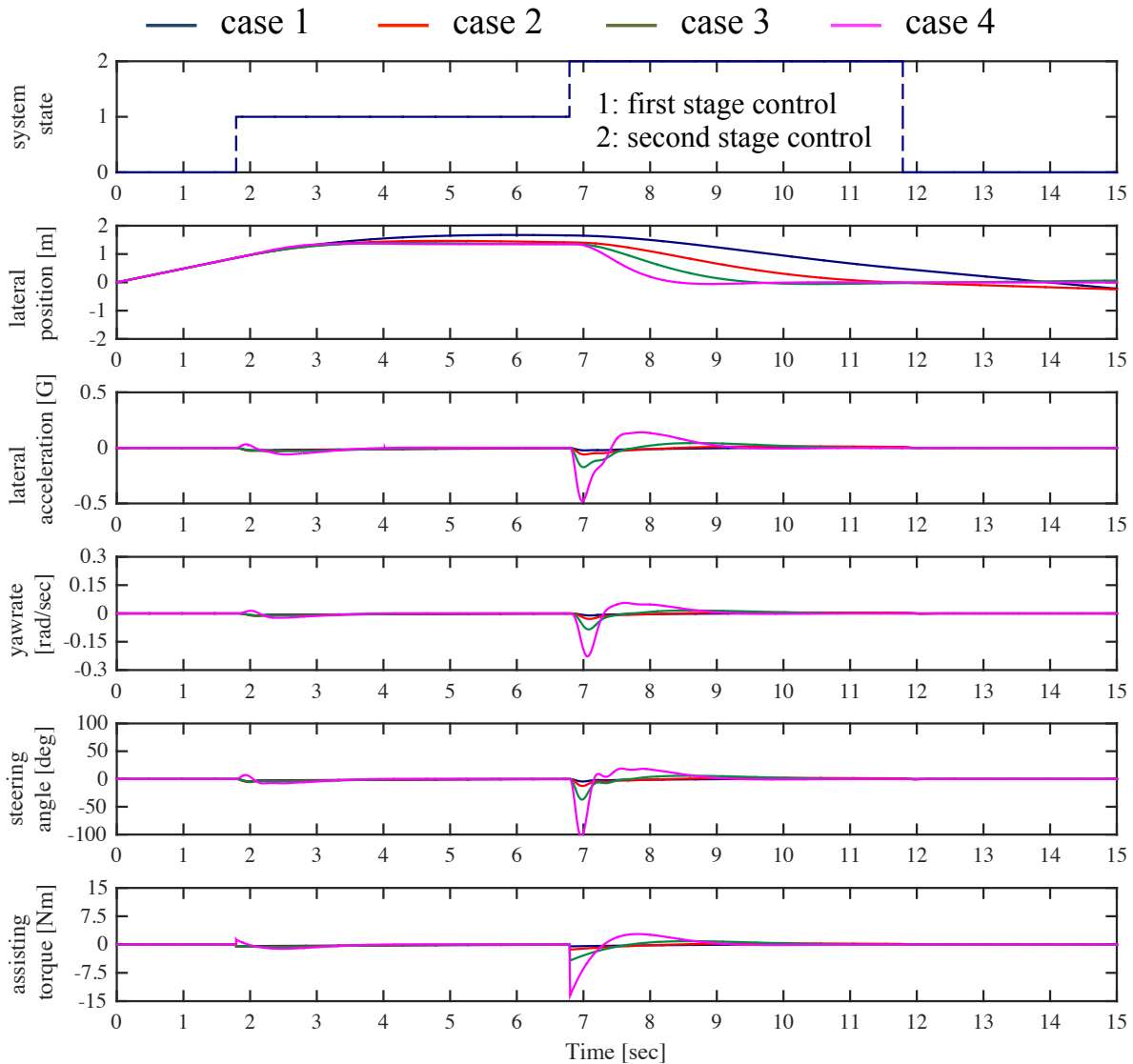


Figure 2.15 Vehicle trajectory under steering torque control

Figure 2.15 のシステムの状態をみると , $t^* = 1.79$ 秒において , システムは「 $t_d(t^*) = 1$ 秒後に車両が車線逸脱する 」と予測し , 1 段目の操舵トルク制御を開始したことがわかる . また , 車両の横位置をみると , いずれのケースにおいても 1 段目の操舵トルク制

御によって車両が路外へ逸脱していくことを阻止できている ($maxy(t) < 1.85$) ことがわかる．さらに，1 段目の操舵トルク制御が開始されてから $t_i = 5$ 秒経過後に，システムは 2 段目の操舵トルク制御を実行し，いずれのケースにおいても車両が車線中央に戻る事がわかる．

また，1 段目の制御の開始時刻における状態ベクトル $x(1.79)$ の値は，

$$x(1.79) = \begin{bmatrix} 0 & 0.018 & 0.485 & 0.865 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (\text{all cases}) \quad (2.41)$$

であり，また，2 段目の制御の開始時刻における状態ベクトル $x(6.79)$ の値は，

$$x(6.79) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.010 & 1.683 & 0.003 & -0.004 \end{bmatrix}^T \quad (\text{case 1}) \quad (2.42)$$

$$x(6.79) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.025 & 1.448 & 0.002 & -0.002 \end{bmatrix}^T \quad (\text{case 2}) \quad (2.43)$$

$$x(6.79) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.017 & 1.359 & 0.002 & 0.002 \end{bmatrix}^T \quad (\text{case 3}) \quad (2.44)$$

$$x(6.79) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.004 & 1.346 & -0.003 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (\text{case 4}) \quad (2.45)$$

であった．(2.41) ~ (2.45) 式の 1 段と 2 段目の制御の開始時刻における状態ベクトル $x(t)$ において，特に，システムの目標横位置と車両重心点の偏差 $y_c(t)$ ，また車両横速度 $\dot{y}_c(t)$ の値が大きく異なる事がわかる．このことから，1 段目の操舵トルク制御と 2 段目の操舵トルク制御のもとでの車両の動特性は，大きく異なるものになる．

1 段目の制御における車両横変位 y [m]，横加速度 \ddot{y}_c [G]，ヨーレート $\dot{\psi}$ [rad/sec]，操舵角度 θ [degree]，操舵支援トルク T_a [Nm] の応答を拡大した図を，Figure. 2.16 に示す．評価関数 J における q_y の重み係数を最も大きくしたケース 4 では，システムの制御性能（速応性，追従性）を重視するがゆえに，1 段目の操舵トルク制御の開始時刻において，操舵支援トルクが車線逸脱方向へ入力され，その後に操舵支援トルクが車線中央方向へ入力されている．このことに起因して，車両の横加速度 \ddot{y}_c [G]，ヨーレート $\dot{\psi}$ [rad/sec]，操舵角度 θ [degree] は，振動的な振る舞いをする．これに対して，

評価関数 J における r の重み係数を最も大きくしたケース 1 では、システムの制御性能（速応性、追従性）が悪い一方で、そのための操舵支援トルクは最大でも 0.416 Nm という小さな値をとる。このように、評価関数 J における重み係数 (q_y, r) の値によって、車両の動特性が大きく異なることがわかる。

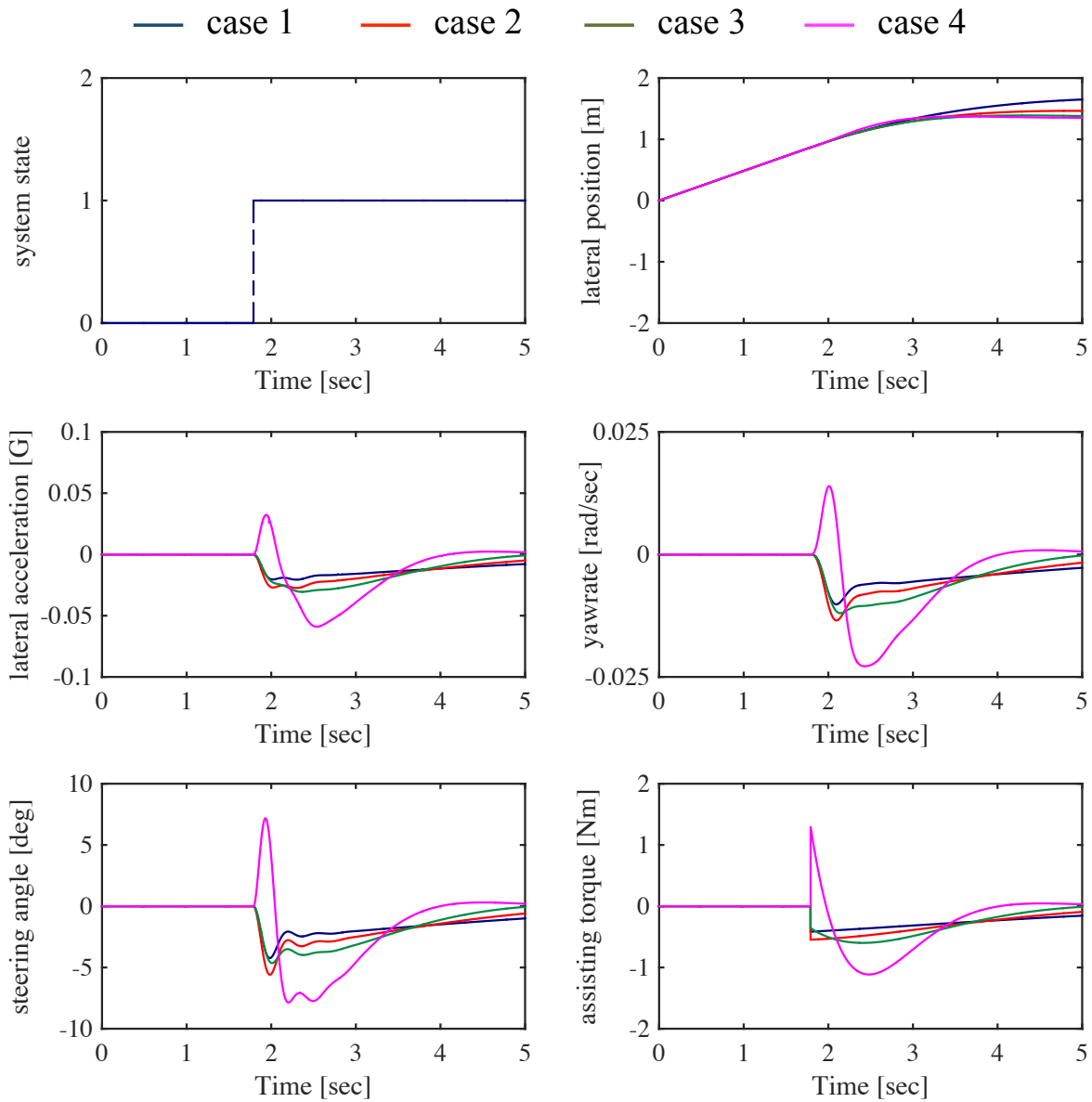


Figure 2.16 Dynamic characteristics of the vehicle under control of the first stage

2.5 1 段と 2 段目の操舵トルク制御

双対制御論的運転支援システムでは、システムがドライバ状態を正しく同定するために、1 段目の制御による操舵角 θ と操舵支援トルク T_a の大きさを適切に選択する必要がある。たとえば、1 段目の制御における操舵角、あるいは操舵支援トルクを大きくした場合を考えてみる。ドライバの覚醒度が低く、状況認識を十分に確保できない状態に陥っている場合に、システムが 1 段目の制御を実行したとする。このような場合、ステアリングが大きく動いたことにドライバが驚き、反射的に操舵を行う、または無意識的に操舵を行うことなどが考えられる [97, 98]。鈴木ら [97] は、車線逸脱警報の提示後におけるドライバの操舵行動を調査している。その結果、実験参加者に「車線逸脱が予測されたときに警報を提示すること」を教示しなかった、かつ 2 [Nm] の大きさのパルス状のトルクをステアリングに提示した条件において、半数の実験参加者が反射的に車線逸脱方向へ操舵を行ったことを報告している。双対制御論的運転支援システムは、ドライバが状況認識の不全に陥っていることが疑われるときに作動することから、1 段と 2 段目の操舵制御に驚き、反射的に操舵を行う、または無意識的に操舵を行うことが考えられる。このとき、ドライバの対応行動が確認されたことによって、システムは、「ドライバは適正な状況認識が可能な程度に覚醒している」と判断し、2 段目の制御を実行しないことになる。この場合、ドライバの覚醒度は、一時的に回復することもあり得るが、再度低下することが多い [37] ことから、結局はドライバ状態を適切に判定できていないことになる。そのため、システムがドライバ状態を正しく同定するために、1 段目の制御における操舵角 θ と操舵支援トルク T_a の大きさを適切に選択する必要がある。

また、最適レギュレータを用いた操舵トルク制御のもとで、設計者は、評価関数の重み係数の値を定めることで望ましい車両の動特性を実現させることが可能である。しかし、現実のシステムではシステムの状態ベクトルと操作量に制約があることから、制約を考慮して車両の動特性改善を図る必要がある。

本節では、システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす 1 段と 2 段目の制御に適したフィードバックゲインを決定する。

2.5.1 フィードバックゲインを切り替える最適制御則

2.4.7 節の Figure 2.15 において，1 段目の制御と 2 段目の制御では，制御開始時における状態ベクトル $x(t)$ の初期状態が異なることから，操舵支援トルクや横加速度などの車両の動特性が大きく異なることを確認した．本節では，システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす 1 段と 2 段目の制御に適したフィードバックゲインを決定するために，1 段と 2 段目の制御間でゲインを切り替える制御系を設計する．1 段と 2 段目の制御で異なるフィードバックゲインを定めることによって，各々の制御において，個別に車両の動特性改善を図ることができ，制御系設計の自由度を拡げることが可能である．1 段と 2 段目の制御間で異なるフィードバックゲインを用いる操舵トルク制御系のブロック線図は，Figure 2.17 となる．

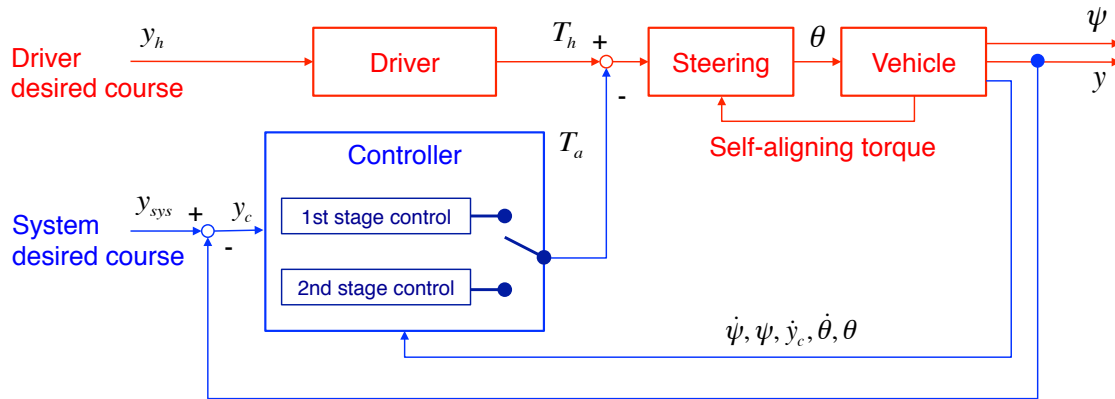


Figure 2.17 Block diagram for the system with a gain switching mechanism

1 段と 2 段目の制御のための状態フィードバックゲインは，

$$F_j = \begin{bmatrix} f_{\dot{\psi}_j} & f_{\psi_j} & f_{\dot{y}_j} & f_{y_j} & f_{\dot{\theta}_j} & f_{\theta_j} \end{bmatrix}, j \in \{1, 2\} \quad (2.46)$$

の二組を与える．ここで， $j = 1$ は 1 段目の制御を意味し， $j = 2$ は 2 段目の制御を意味する．この (2.46) 式のフィードバックゲインを用いる状態フィードバック制御則は，

$$T_a(t) = \begin{cases} -F_1 x(t), t \in [t^*, t^* + t_i) \\ -F_2 x(t), t \in [t^* + t_i, t^* + t_i + 5] \end{cases} \quad (2.47)$$

となる．フィードバックゲインは，区分的に一定であり，システムは，2 段目の制御の

開始時刻にフィードバックゲインを変更する．なお，2 段目の制御の開始から 5 秒経過した時刻に，システムは，2 段目の制御を終了するものとする．

また，評価関数

$$J_j = \int_0^{\infty} \{q_{y_j} y_c^2(t) + r_j i^2\} dt \quad (2.48)$$

を与え， J_j を最小化する状態フィードバック制御則とした．システムの目標横位置と車両重心点の偏差 $y_c(t)$ と，操舵支援トルク $T_a(t)$ を評価対象とし， q_{y_j} ならびに r_j は設計者が定める重み係数である．このように，1 段と 2 段目の制御においては，評価関数 J_j と重み係数 (q_{y_j}, r_j) は，個別に与える．ここで，(2.48) 式の評価関数 J_j を最小化する状態フィードバックゲインは，

$$F_j = r_j^{-1} B^T P_j \quad (2.49)$$

で与えられる．ただし， P_j はつぎのリカッチ代数方程式

$$P_j A + A^T P_j - P_j B r_j^{-1} B^T P_j + Q_j = 0 \quad (2.50)$$

を満たす正定行列 $P_j = P_j^T$ であり，(2.50) 式の Q_j は，

$$Q_j = \text{diag} \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad q_{y_j} \quad 0 \quad 0 \right] \quad (2.51)$$

となる準正定行列 $Q_j = Q_j^T$ である．

2.5.2 システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす制御

システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす 1 段目の制御のためのフィードバックゲインを決定する．ここで，1 段目の制御の実行によって，車両は車線区分線付近を走行することから，隣接車線を走行する車両との接触が懸念される．そのため，1 段目の制御において，車両の重心点位置 $y(t)$ が，システムが目標とする横位置 y^* (車線逸脱判定ライン) の +5% を越えないようにする．すなわち，制約条件

$$|y(t)| \leq 1.05 \cdot |y^*(t)| = 1.417 \text{ m} \quad (2.52)$$

を定める．また，1 段目の制御の実行によって，車両に急な横加速度 $\ddot{y}_c(t)$ [G] が生じないようにする．すなわち，制約条件

$$|\ddot{y}_c(t)| \leq 0.5 \text{ G} \quad (2.53)$$

を定める．さらに，システムの操舵支援トルクの大きさ $T_a(t)$ は，現実により得る 10 Nm 以下を満たすようにする．すなわち，制約条件

$$|T_a(t)| \leq 10 \text{ Nm} \quad (2.54)$$

を定める．本節では，(2.52), (2.53), (2.54) 式の制約条件を与え，制約を満たす 1 段目の制御における重み係数 (q_{y_1}, r_1) を調べる．高速道路で発生する車線逸脱の典型的なケースとして， $v = 100$ [km/h], $\psi = 1$ [degree] または $\psi = 2$ [degree] で車両が車線中央から逸れていく状況 [96] を例にとる．2.4.7 節で示した，車両走行軌跡を計算するシミュレーションモデル (Figure 2.14) を用いて，重み係数 r_1 を 1 に固定したうえで，重み係数 q_{y_1} を 10^{-2} から 10^3 に 0.01 刻みで変えたときのシステムの状態ベクトルと操作量の時間応答を計算する．ここで，指標

$$I_1 = \int_{t^*}^{t^*+t_i} y_c^2(t) dt \quad (2.55)$$

$$I_2 = \int_{t^*}^{t^*+t_i} \ddot{y}_c^2(t) dt \quad (2.56)$$

$$I_3 = \int_{t^*}^{t^*+t_i} T_a^2(t) dt \quad (2.57)$$

$$I_4 = \max y_c \quad (2.58)$$

$$I_5 = \max \ddot{y}_c \quad (2.59)$$

$$I_6 = \max T_a \quad (2.60)$$

を設定する．なお，1 段目の制御を開始してから 2 段目の制御を開始するまでの時間長 t_i は 5 秒とする．(2.55), (2.56), (2.57) 式では，システムの目標横位置と車両重心点の偏差 $y_c(t)$ ，車両の横加速度 $\ddot{y}_c(t)$ ，操舵支援トルク T_a の 2 乗値を積分し，車両がシステムの目標横位置に移る速さ，横加速度の大きさ，操舵支援トルクの大きさといった制御性能を評価する．また，(2.58), (2.59), (2.60) 式では，システムの目標横位置と車両重心点の偏差 $y_c(t)$ ，車両の横加速度 $\ddot{y}_c(t)$ ，操舵支援トルク T_a の最大値を算出し，(2.52), (2.53), (2.54) 式の制約条件を満たす重み係数 (q_{y_1}, r_1) を調べる．

重み係数 r_1 を 1 に固定したうえで，重み係数 q_{y_1} を 10^{-2} から 10^3 に 0.01 刻みで変えたときの指標 $I_1 \sim I_6$ の結果を Figures 2.18, 2.19 に示す．Figure 2.18 は $v = 100$ [km/h], $\psi = 1$ [degree] の条件であり，Figure 2.19 は $v = 100$ [km/h], $\psi = 2$ [degree] の条件である．ここで，制約条件 (2.52), (2.53), (2.54) 式を満たさなくなる限界の位置に，赤の破線を記している．

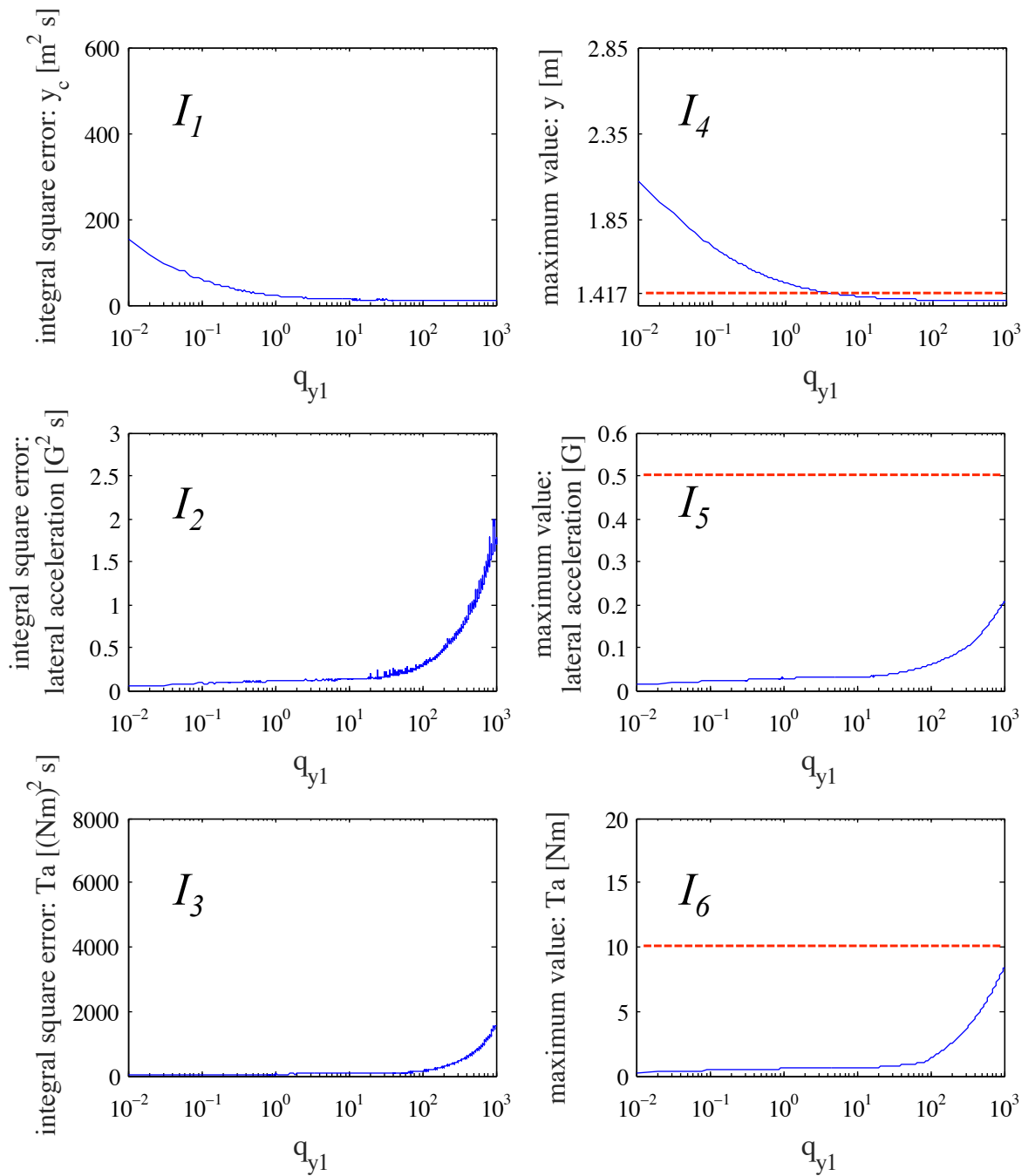


Figure 2.18 Weight coefficients and control performances when the initial yaw angle was set at one degree

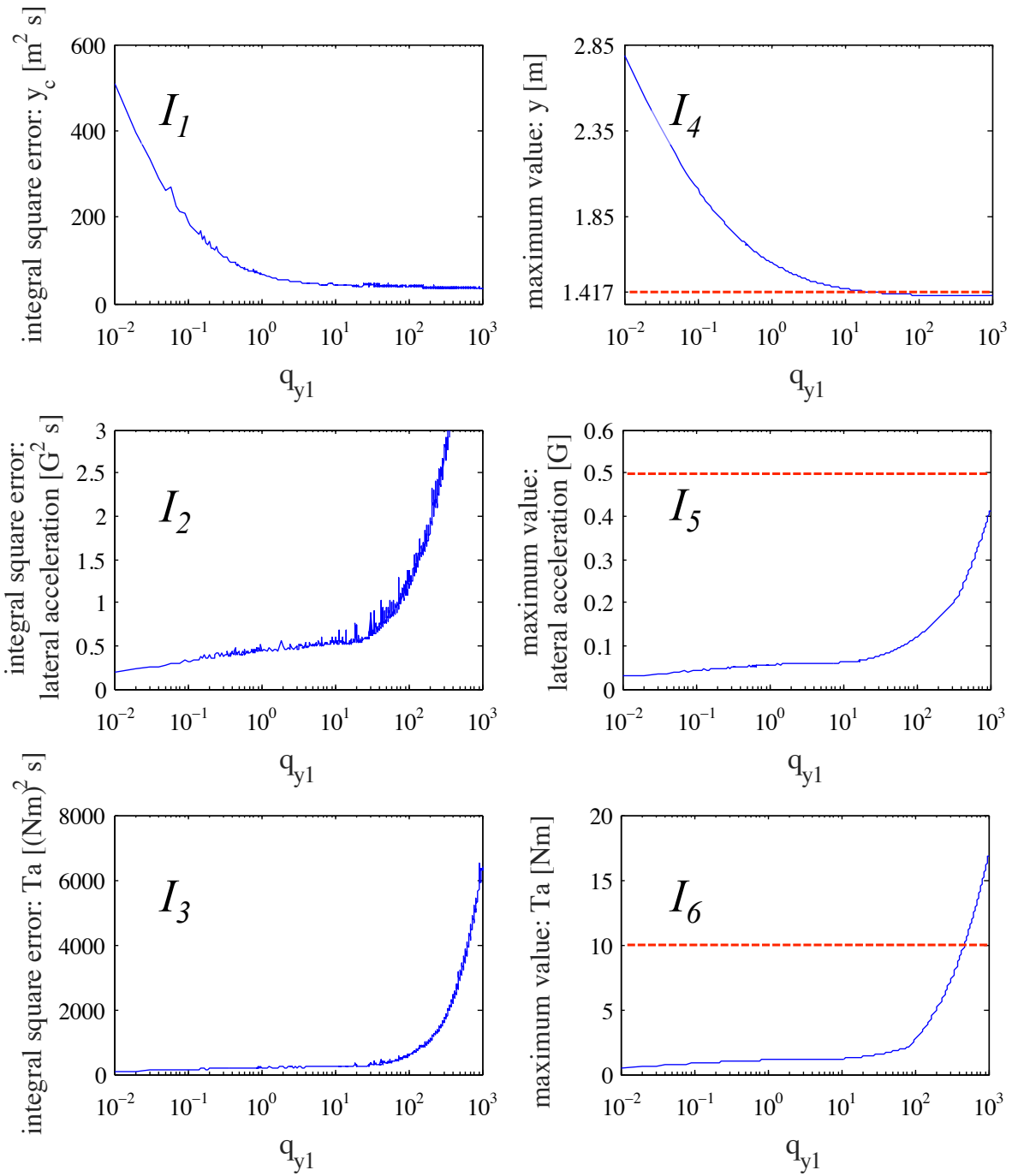


Figure 2.19 Weight coefficients and control performances when the initial yaw angle was set at two degrees

Figure 2.18 の指標 I_1, I_3 をみると, q_{y_1} の重みを 10^0 から 10^2 へ 0.01 刻みで変えていったときに, システムの目標横位置と車両重心点の偏差 $y_c(t)$, 操舵支援トルク $T_a(t)$ を 2 乗した積分値に大きな変化がみられないことがわかる. また, 1 段目の制御における車両横位置の最大値を示す (2.58) 式の指標 I_4 から, 制約条件 (2.52) 式を満たすために, 重み係数は,

$$q_{y_1} > 4.41, r_1 = 1 \quad (2.61)$$

である必要がある. さらに, 車両横加速度 $\ddot{y}_c(t)$ の最大値を示す (2.59) 式の指標 I_5 とシステム of 操舵支援トルク $T_a(t)$ の最大値を示す (2.60) 式の指標 I_6 をみると, いずれの重み係数においても, 車両横加速度の最大値とシステムの操舵支援トルクの最大値は, 制約条件 (2.53), (2.54) 式を満たすことがわかる.

Figure 2.19 をみると, 車両ヨー角が 1 度である場合と同様に, q_{y_1} の重みを 10^0 から 10^2 へ 0.01 刻みで変えたときに, 1 段目の制御におけるシステム of 目標横位置と車両重心点の偏差 $y_c(t)$, 操舵支援トルク $T_a(t)$ を 2 乗した積分値に大きな変化がみられないことがわかる. ただし, 1 段目の制御における車両横位置の最大値を示す (2.58) 式の指標 I_4 から, 制約条件 (2.52) 式を満たすために, 重み係数は,

$$q_{y_1} > 21.81, r_1 = 1 \quad (2.62)$$

である必要がある. また, システム of 操舵支援トルク T_a の最大値を示す (2.59) 式の指標 I_6 から, 制約条件 (2.54) 式を満たすために,

$$q_{y_1} < 473.71, r_1 = 1 \quad (2.63)$$

である必要がある.

ここで, 制約条件を満たすための重み係数の条件, (2.61), (2.62), (2.63) 式を参考に, システムが車線逸脱を予測した時刻における車両ヨー角が 1 度である場合と 2 度である場合における車両の動特性を数値例で確認する. システムが車線逸脱を予測した時刻における車両ヨー角が 1 度である場合においては, Tabel 2.3 に示す重み係数 (q_{y_1}, r_1) を設定し, 2 度である場合には, Tabel 2.4 に示す重み係数 (q_{y_1}, r_1) を設定した. 数値例を Figures 2.20, 2.21 に示す. Figures 2.20, 2.21 は, システムの状態, 車両横位置 [m], 操舵角度 [degree], 操舵支援トルク [Nm] の応答を示す.

Table 2.3 Weight coefficients when the initial yaw angle was set at one degree

	Weight coefficients		feedback gains					
	q_{y_l}	r_l	$f_{\psi_l'}$	f_{ψ_l}	$f_{y_l'}$	f_{y_l}	$f_{\theta_l'}$	f_{θ_l}
case 1	4.41	1	4.9481	3.7745	3.0011	2.1000	0.0426	0.3143
case 2	24.8	1	7.7118	8.9930	4.6591	4.9800	0.0657	0.5099
case 3	100	1	11.077	18.163	6.6701	10.000	0.0932	0.7663

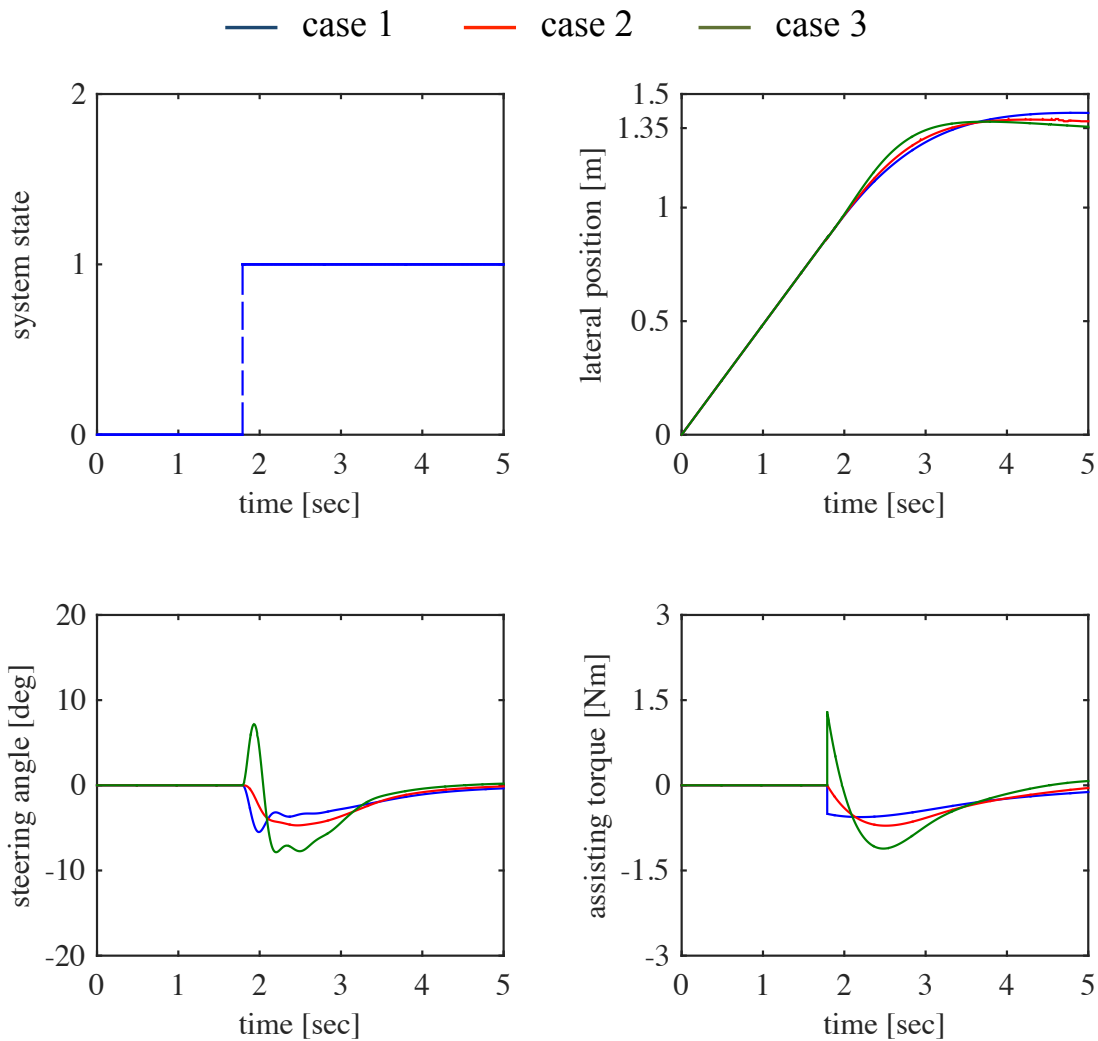


Figure 2.20 Control performances when the initial yaw angle was set at one degree

Table 2.4 Weight coefficients when the initial yaw angle was set at two degrees

	Weight coefficients		feedback gains					
	q_{yI}	r_I	$f_{\psi I'}$	$f_{\psi I}$	$f_{yI'}$	f_{yI}	$f_{\theta I'}$	$f_{\theta I}$
case 1	21.81	1	7.4601	8.4297	4.5085	4.6701	0.0636	0.4915
case 2	24.8	1	7.7118	8.9930	4.6591	4.9800	0.0657	0.5099
case 3	100	1	11.077	18.163	6.6701	10.000	0.0932	0.7663

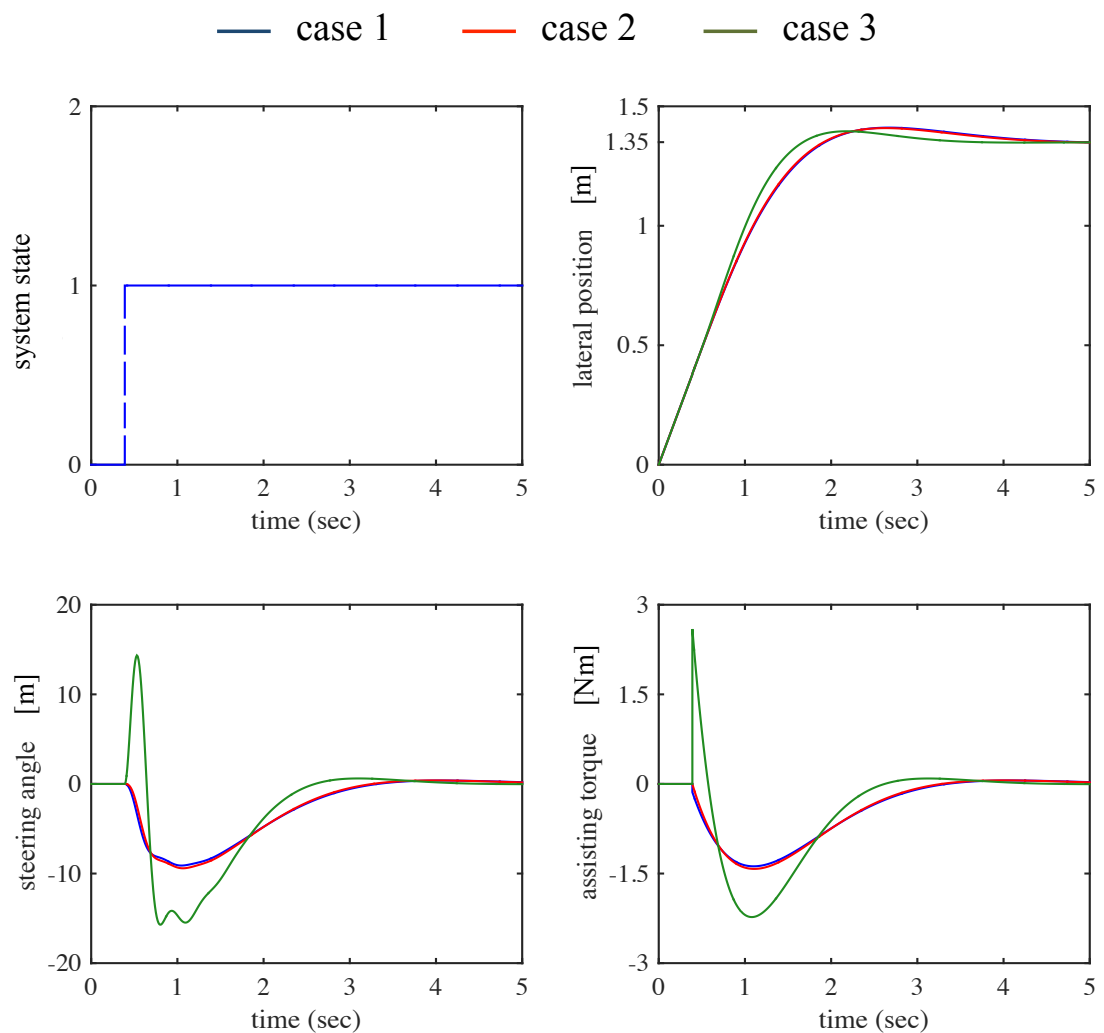


Figure 2.21 Control performances when the initial yaw angle was set at two degrees

Table 2.3, 2.4 に示すとおり，車両ヨー角が 1 度である場合と 2 度である場合において，ケース 2, 3 では同じ重み係数 (q_{y_1}, r_1) を設定している．Figures 2.20, 2.21 におけるケース 2, 3 をみると，1 段目の制御における操舵角度と操舵支援トルクの大きさは異なるが，その波形はほぼ同じであることがわかる．また，Figure 2.20 をみると，ケース 2 では，1 段目の制御の開始時刻において操舵支援トルクが滑らかにステアリングに入力されている．これに対して，ケース 1 では，1.78 秒の時刻に 0 Nm であった操舵支援トルクの大きさが，その 1 サンプル時間 (0.01 秒) 後の 1 段目の制御開始時刻 1.79 秒において，システムは，1.3 Nm の操舵支援トルクを入力している．また，ケース 3 では，1.78 秒の時刻に 0 Nm であった操舵支援トルクの大きさが，その 1 サンプル時間 (0.01 秒) 後の 1 段目の制御開始時刻 1.79 秒において，システムは，-0.505 Nm の操舵支援トルクを入力している．このように，制御開始時刻において，ある大きさをもつ操舵支援トルクが瞬時にステアリングに入力されていることがわかる．ステアリングが大きく動いたり，大きなトルクを感じたことにドライバが驚いて反射的に操舵を行う，または無意識的に操舵を行うことを懸念することから，1 段目の制御による操舵支援トルクが滑らかにステアリングに入力されるケース 2 が望ましい．

以上のことから，1 段目の制御のための重み係数 (q_{y_1}, r_1) を，

$$q_{y_1} = 24.8, r_1 = 1 \quad (2.64)$$

とする．すなわち，フィードバックゲインは，

$$f_{\dot{\psi}_1} = 7.46, f_{\psi_1} = 8.43, f_{\dot{y}_1} = 4.50, f_{y_1} = 4.67, f_{\dot{\theta}_1} = 0.06, f_{\theta_1} = 0.49 \quad (2.65)$$

となる．

また，2 段目の制御の役割は，車両を車線中央に戻すことである．システムは，2 段目の制御の開始時刻において，システムの目標横位置を車線逸脱判定ライン (± 1.35 m) から車線中央位置 (0 m) へ切り替える．このことによって，2 段目の制御では，制御開始時刻の 1 サンプル時間前にほぼ 0 m であったシステムの目標横位置と車両重心位置の偏差が，制御開始時刻において 1.35 m となることから，操舵支援トルクが急に変化することになる．このことは，Figure 2.15 における 2 段目の制御による操舵支援トルクの波形から確認することができ，その操舵トルクの波形は，Figures 2.20, 2.21 におけるケース 2, 3 でみられるような波形である．ここで，ステアリングが大きく動いたことにドライバが驚き，反射的に操舵を行うことなどが懸念される．本論文にお

ける双対制御論的運転支援システムでは，2 段目の制御のための重み係数 (q_{y_2}, r_2) は，1 段目の制御による操舵支援トルクの大きさと同程度となるようなものとし，2 段目の制御のための重み係数 (q_{y_2}, r_2) は，

$$q_{y_2} = 1, r_2 = 1 \quad (2.66)$$

とする．すなわち，フィードバックゲインは，

$$f_{\psi_2} = 3.39, f_{\dot{\psi}_2} = 1.79, f_{y_2} = 2.06, f_{\dot{y}_2} = 1.00, f_{\theta_2} = 0.03, f_{\dot{\theta}_2} = 0.21 \quad (2.67)$$

となる．

$v = 100$ [km/h], $\psi = 1$ [degree] で車両が車線中央から逸れていく状況 [96] を例にとり，(2.65), (2.67) 式のフィードバックゲインを与えたときの車両走行軌跡の数値例を，Figure 2.22 に示す．

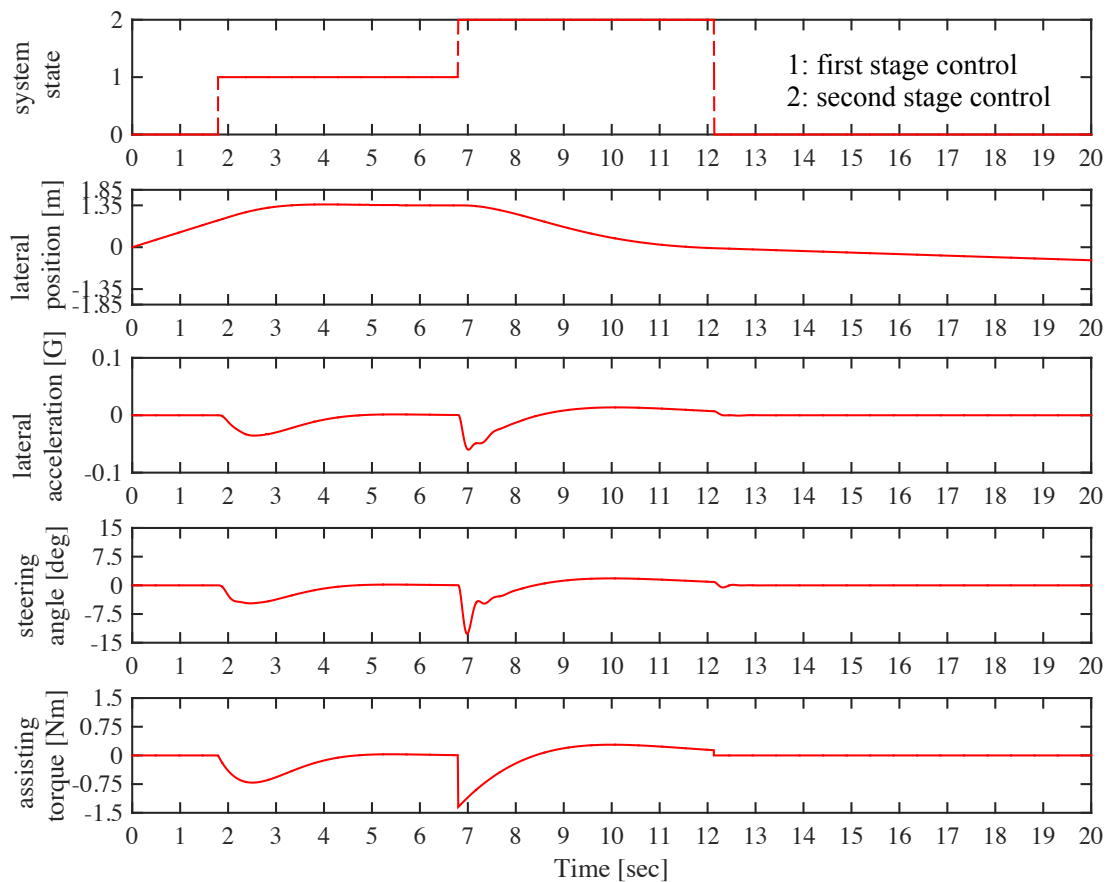


Figure 2.22 Vehicle trajectory under controls of the first and the second stages

Figure 2.22 のシステムの状態をみると、 $t^* = 1.79$ 秒において、システムは「 $t_d(t^*) = 1$ 秒後に車両が車線逸脱する」と予測し、1 段目の操舵トルク制御を開始したことがわかる。また、車両の横位置をみると、1 段目の操舵トルク制御によって車両の車線逸脱を阻止できていることがわかる。1 段目の制御の開始直後における操舵支援トルクをみると、滑らかに操舵支援トルクがステアリングに入力されていることがわかる。さらに、1 段目の操舵トルク制御が開始されてから $t_i = 5$ 秒経過後に、システムは 2 段目の操舵トルク制御を実行し、車両が車線中央に戻ることがわかる。このとき、車両横位置、横加速度、操舵支援トルクの大きさは、いずれも (2.52), (2.53), (2.54) 式の制約を満たしている。これらのことから、システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす操舵トルク制御を実現しつつ、操舵トルクを滑らかにステアリングに入力する 1 段目の制御が実現できる制御系を設計できたといえる。

2.6 ドライバの操舵行動の検出

2.5 節では、システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす操舵トルク制御を実現しつつ、操舵トルクを滑らかにステアリングに入力する 1 段目の制御が実現できる制御系を設計した。本節では、1 段目の制御開始後におけるドライバの操舵行動の検出について述べる。システムが車線逸脱を予測した時刻 t^* において、システムは、車両横位置の目標を、車線逸脱を予測している側の車線逸脱判定ラインに設定し、車両を車線逸脱判定ラインに移す 1 段目の制御を実行する。このとき、システムは、時間区間 $[t^*, t^* + t_i]$ にわたって「ドライバが車両を車線中央に戻すための操舵を行ったか否か」をモニタリングすることになる。

システムが 1 段目の制御を実行している時間区間 $[t^*, t^* + t_i]$ にドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったとしよう。このとき、ドライバが目標とする車両横位置（車線中央）とシステムが目標とする車両横位置（車線逸脱判定ライン）が異なることから、そのままでは、システムにとってドライバの操舵は外乱に相当し、システムが目標とする車両横位置に戻す操舵反力が生じることになる。このことから、ドライバとシステムの互いが対立する操舵にならないように、ドライバの操舵に応じてシステムの操作量を低減させる機構の構築が不可欠となる。

2.6.1 システムの操作量の低減

システムの操作量を低減させることにおいては、一般に、0 から 1 までのゲイン (K) を制御系に適用する方式が採られる [82, 92, 93]。操舵支援トルクを $T_a(t)$ 、操作量を $u(t)$ とすると、操作量 $u(t)$ は、

$$u(t) = T_a(t) \cdot K(t) \quad (2.68)$$

で表す。このように、 K に応じて実際にステアリングホイールに加えるトルクを下げるができる。

西村ら [93] は、車線維持支援のもとで、車線維持から車線変更へ円滑に移行させるために、車両の横加速度に基づいて K を変更するシグモイド関数を提案し、ドライバとシステムの意図の干渉を低減させる方式を構築している。本節では、西村ら [93] の方式を参考に、車両ヨー角 $\psi(t)$ に基づいて K を変更するシグモイド関数を作成し、ドライバの操舵介入に応じてシステムが実際に加えるトルクを低減させる機構を構築する。

ここで、車両が走行車線左側へ逸脱しつつあるときの車両ヨー角の符号を正と定義する。いま、システムが車両位置のモニタを続けるなかで走行車線左側への逸脱を予測し、1 段目の制御を実行したとしよう。1 段目の制御の実行によって、車両ヨー角 $\psi(t)$ は次第に 0 度に近づき、車両が車線区分線と平行となる時刻で車両ヨー角 $\psi(t)$ は 0 度になる。また、ドライバが車両を車線中央へ戻す操舵を行ったときには、車両ヨー角 $\psi(t)$ は継続的に 0 度を下回ることになる。ここでは、車両ヨー角 $\psi(t)$ の情報を利用する。すなわち、システムの操舵支援トルクに $\psi(t)$ に応じて変化するゲイン $K(\psi(t))$ を乗じることによって実際にステアリングに加えるトルクを低減させる。これにより、ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときに生じる操舵反力を低減させることができる。操作量 $u(t)$ は、

$$u(t) = T_a(t) \cdot K(\psi(t)) \quad (2.69)$$

で表し、 $K(\psi(t))$ は、シグモイド関数

$$K(\psi(t)) = \begin{cases} 1/\{1 + \beta \cdot \exp(-\alpha \cdot \frac{\psi(t) \cdot 180}{\pi})\} & (\text{if } \psi(t) > 0) & (2.70a) \\ 1/\{1 + \beta \cdot \exp(\alpha \cdot \frac{\psi(t) \cdot 180}{\pi})\} & (\text{if } \psi(t) < 0) & (2.70b) \end{cases}$$

で表現する。

シグモイド関数で表現する $K(\psi(t))$ と車両ヨー角 $\psi(t)$ の関係を，Figure 2.23 に示す．ここで， α を 15 に， β を 0.001 に設定した例を示す．システムが走行車線左側への逸脱を予測し ($\psi(t^*) > 0$)，1 段目の制御を実行した場合には，車両ヨー角 $\psi(t)$ の値が負側へ大きくなるにしたがって $K(\psi(t))$ は小さな値をとる．ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行うならば，車両ヨー角 $\psi(t)$ が継続的に 0 度を下回ることになるため， $K(\psi(t))$ はシグモイド曲線を描きながら次第に 0 に近づく．このことによって，(2.69) 式に示すシステムの操作量 $u(t)$ は，次第に 0 に近づくことになる．システムが走行車線右側への逸脱を予測した場合も，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行うならば，システムの操作量 $u(t)$ は，次第に 0 に近づくことになる．

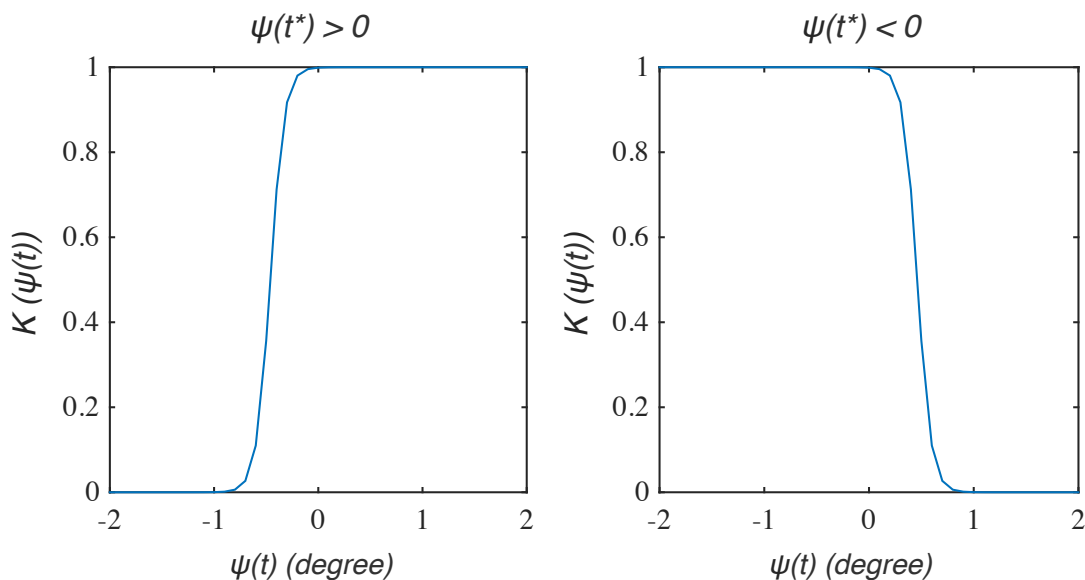


Figure 2.23 Yaw angle and the sigmoid function (1)

2.6.2 ドライバの操舵行動の有無の判定

ドライバの操舵行動の有無の判定においては，ドライバがステアリングに入力したトルクを推定し，その推定値があらかじめ設定された閾値を超えたか否かからドライバの操舵を判断するシステムが考えられる [94]．しかし，操舵系に設置されるトルクセンサが計測できる値は，ドライバがステアリングに加える操舵トルク，路面からの外乱トルク，セルフアライニングトルク（タイヤの横すべり角を減少させる，タイヤの

接地中心回りに生じるモーメント [91]) などの総和であることから、ドライバの操舵トルクの推定値には誤差が含まれ得る。双対制御論的運転支援システムでは、観測可能な車両ヨー角 $\psi(t)$ に応じて変化するゲイン $K(\psi(t))$ の値から「ドライバの操舵行動の有無」を判定するものとする。ここで、システムは、

$$K(\psi(t)) < 0.5 \quad (2.71)$$

となる状態が 0.5 秒以上継続した時刻に、「車両を車線中央に戻す制御の不足分を補うドライバの操舵が行われた」と判断し、1 段目の制御を終了することとする。

また、もしドライバが反射的に車線逸脱方向へ操舵を行った場合には、(2.69) 式の $K(\psi(t))$ はほぼ 1 のままであることから、システムの目標横位置（車線逸脱判定ライン）に戻す操舵反力が生じることによって車両が路外へ逸脱していくことを防ぐ。さらに、システムは、ドライバの操舵行動の有無を「車両ヨー角」に基づいて判断することから、ドライバの反射的な操舵に伴う操舵角の入力によって「ドライバの操舵行動が行われた」とシステムが誤って判断し、1 段目の制御を終了することがない。

ゲイン $K(\psi(t))$ のパラメータの調整

双対制御論的運転支援システムでは、(2.70a), (2.70b) 式のゲイン $K(\psi(t))$ を用い、操作量を (2.69) 式とすることによって、システムの操作量を低減することになる。また、 $K(\psi(t))$ の情報を用いて、「ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったか否か」を判断する。ここで、設計者が定める (2.70a), (2.70b) 式におけるパラメータ (α, β) の値に応じて、「ドライバが 1 段目の制御をオーバーライドする行い易さ」は決まることになる。本節では、 $K(\psi(t))$ のパラメータ (α, β) を決定する。

Figure 2.24 は、 α の値を 15 に固定したうえで、case 1; $\beta=1$, case 2; $\beta=0.1$, case 3; $\beta=0.01$, case 4; $\beta=0.001$, case 5; $\beta=0.0001$, case 6; $\beta=0.00001$ としたときにおけるゲイン $K(\psi(t))$ と車両ヨー角 $\psi(t)$ の関係を示す。ここでは、システムが走行車線左側への逸脱を予測し ($\psi(t^*) > 0$)、1 段目の制御を実行した場合を考える。 $\beta=1$, $\beta=0.1$, $\beta=0.01$ のケースでは、1 段目の制御の開始後において、車両が車線区分線と変更となる ($\psi(t)=0$) より以前から、システムの操作量が低減していく ($K(\psi(t)) < 1$) ことがわかる。一方、その他のケースでは、車両ヨー角 $\psi(t) < 0$ となった（ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行った）後に、システムの操作量が低減していく ($K(\psi(t)) < 1$) ことがわかる。また、Figure 2.24 は、車両が車線中央方向へ傾くほどにシステムの

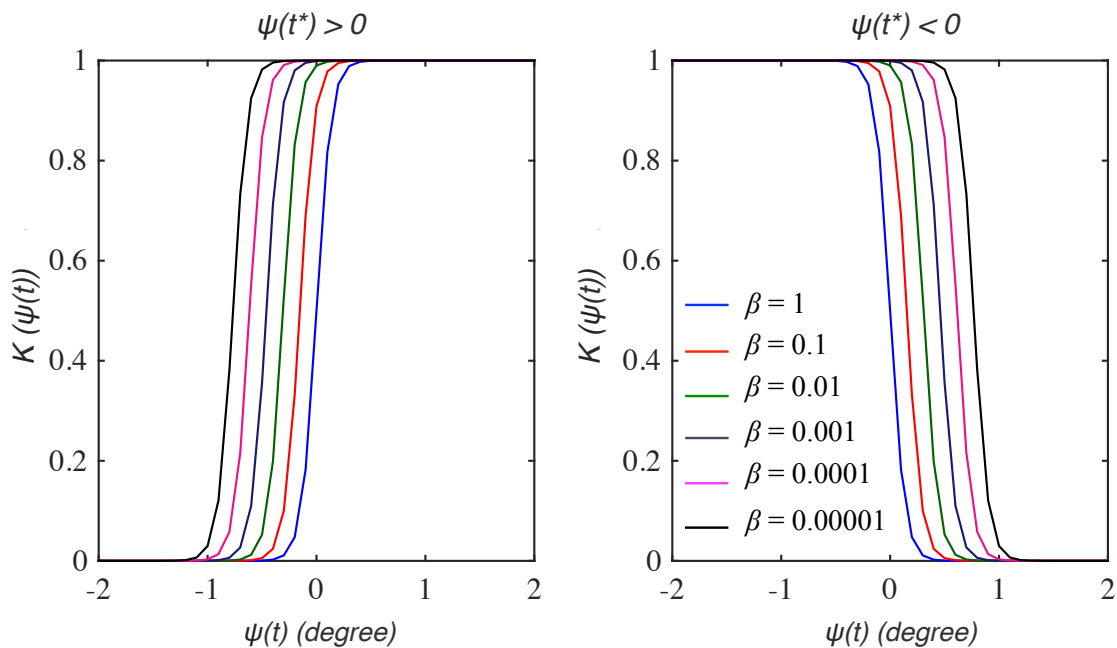


Figure 2.24 Yaw angle and the sigmoid function (2)

操作量が低減することを示すことから， β の値を小さくするほどに，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときに生じる操舵反力の大きさが大きくなることを意味している．

ここで，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときに生じる操舵反力は適切な大きさである必要がある．ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときに生じる操舵反力が小さい場合を考える．いま，システムが車両位置のモニタを続けるなかで車線逸脱を予測し，1 段目の制御を実行したとしよう．このとき，居眠りに陥っているドライバがステアリングを握っている腕の自重などによって意図せずにステアリングを操舵した場合，システムが「車両を車線中央に戻す制御の不足分を補う操舵が行われた」と判断することはあり得る．これに対して，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときに生じる操舵反力が大きい場合を考える．1 段目の制御の開始後において，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行おうとしたときに，操舵反力が大きいゆえに，ドライバが適切に操舵を行うことができないこともあり得る．このような場合，システムは，ドライバ状態を正しく同定できないことになる．これらのことから，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときに生じる操舵反力は適切な大きさである必要がある．

ドライバモデルを含む閉ループ系を用いた検証

本節では，2.4.7 節の Figure 2.14 に示したシミュレーションモデルにドライバの操舵を模擬するドライバモデルを組み込み (Figure 2.25)，ドライバモデルが車両を車線中央に戻す操舵を実行したときにおける車両軌跡とそのときに生じる操舵反力の強さを数値例で確認する．

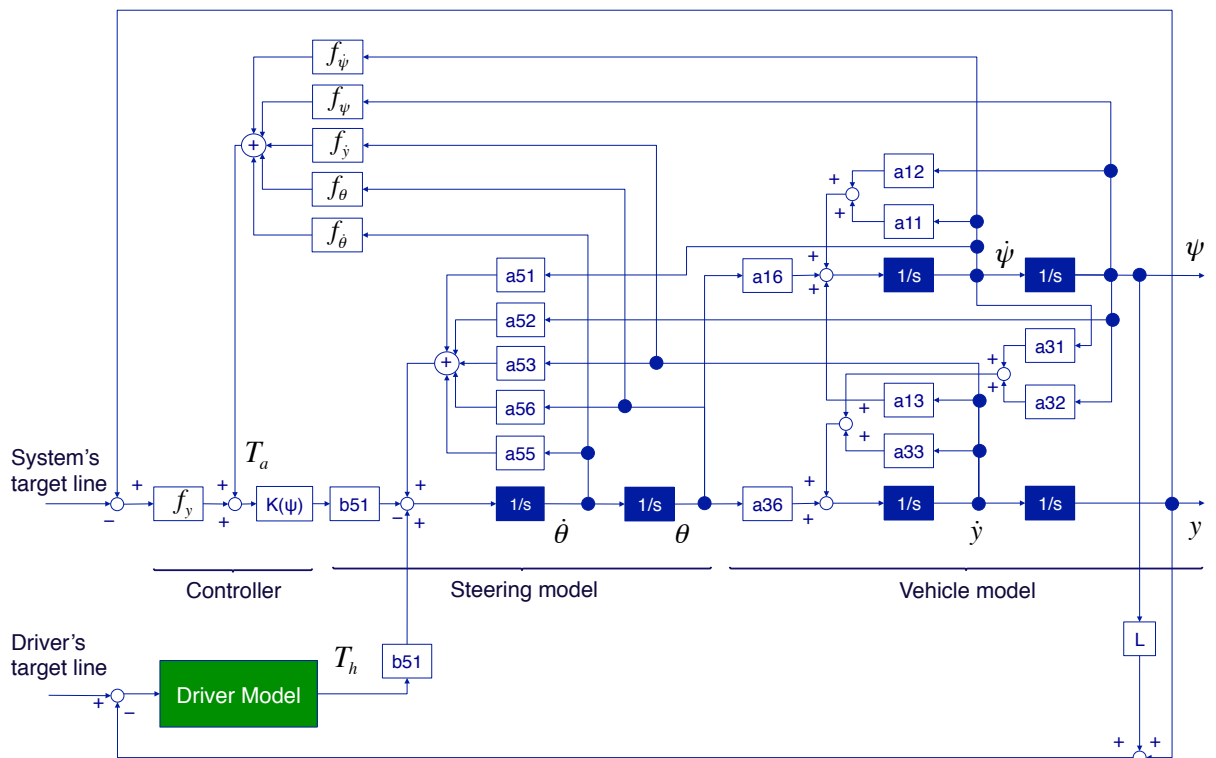


Figure 2.25 Simulation with the driver model

ドライバの操舵を模擬するドライバモデルには，一般的な前方注視点モデル [91] を用いる．前方注視点モデルとは，ドライバは前方に目を向け，車両が現在の姿勢 (車両ヨー角 $\psi(t)$) を維持しながら L m 進むとしたときの将来位置を予測しながら操舵を行うと仮定したモデルである．この前方注視点モデルは，前方注視点 L m において予測された自車横位置 $(y(t) + L\psi(t))$ と目標とする横位置 y^* との偏差

$$\varepsilon(t) = y(t) + L\psi(t) - y^* \quad (2.72)$$

に応じて操舵を実行する．このとき，前方注視点モデルの操舵トルクを T_h とすると，

T_h は,

$$T_h(t) = \frac{G_h}{1 + T_L s} \varepsilon(t)^{-T_D s} \quad (2.73)$$

となる．ここで， G_h は比例ゲイン， T_L はドライバのむだ時間， T_D はドライバの反応遅れ時間である．本節においては，前方注視距離 L は，28.7 m， G_h は 2 Nm/m， T_L は 0.15 sec， T_D は 0.2 sec に設定した．

高速道路で発生する車線逸脱の典型的なケースとして， $v = 100$ [km/h]， $\psi = 1$ [degree] で車両が車線中央から逸れていく状況 [96] を例にとる．また，前方注視点モデルは，脇見などにより一時的に状況認識を喪失したものとし，1 段目の制御の開始時刻の 2 秒後に，車両を車線中央に戻す操舵を実行するものとした．また，1 段目の制御におけるフィードバックゲインは，(2.65) 式を与えた．

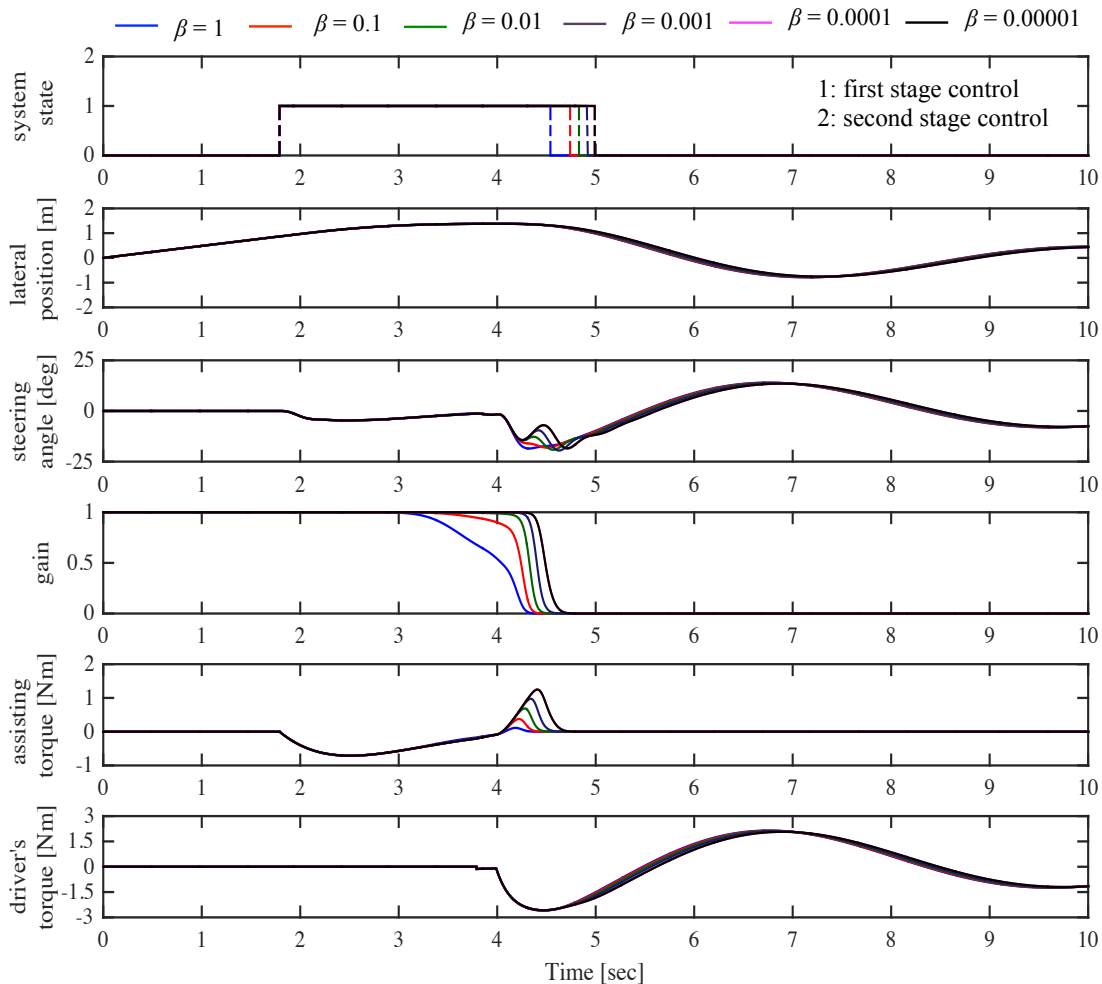


Figure 2.26 Vehicle trajectory under the steering action by the driver model

Figure 2.26 に、システムの状態 [1: 1 段目の制御の実行, 2: 2 段目の制御の実行], 車両横変位 y [m], 横加速度 \ddot{y}_c [G], 操舵角度 θ [degree], ゲイン $K(\psi)$ [-], 操舵支援トルク T_a [Nm], 前方注視点モデルの操舵トルク T_h [Nm] の数値例を示す. 本節における数値例では, α の値を 15 に固定したうえで, case 1; $\beta=1$, case 2; $\beta=0.1$, case 3; $\beta=0.01$, case 4; $\beta=0.001$, case 5; $\beta=0.0001$, case 6; $\beta=0.00001$ とした 6 条件で比較している.

Figure 2.26 におけるシステムの状態をみると, $t^* = 1.79$ 秒において, システムは「 $t_d(t^*) = 1$ 秒後に車両が車線逸脱する」と予測し, 1 段目の制御を開始したことがわかる. また, 前方注視点モデルによる操舵トルクの入力をみると, 1 段目の制御の開始時刻の 2 秒後 (3.79 秒の時刻) 以降に操舵を開始していることが読み取れる. ここで, 4.5 秒の時刻付近におけるシステムの操舵支援トルクをみると, 前方注視点モデルが入力する操舵トルクとは逆の方向へ操舵支援トルクが入力されていることがわかる. これは, システムが目標とする車両横位置 (車線逸脱判定ライン) に戻そうとする操舵反力が生じていることを意味する. β が最も大きいケース 1 では, 前方注視点モデルが車両を車線中央に戻す操舵トルクを入力したときに, 操舵反力が最大で 0.11 Nm の大きさを生じている. 一方, ケース 4 では, 前方注視点モデルが車両を車線中央に戻す操舵トルクを入力したときに, 操舵反力が最大で 0.97 Nm の大きさを生じ, また, β が最も小さいケース 6 では, 前方注視点モデルが車両を車線中央に戻す操舵トルクを入力したときに, 操舵反力が最大で 1.55 Nm の大きさを生じている. このように, β の値に応じて, ドライバが車両を車線中央に戻すときに生じることになる操舵反力の大きさは変わることになる.

双対制御論的運転支援システムでは, 居眠りに陥っているドライバーがステアリングを握っている腕の自重などによって意図せずにステアリングを操舵することを懸念する. このため, 1 段目の制御の開始後に, ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行うときには, 操舵反力が約 1 Nm 生じるようにした. すなわち, 本論文における双対制御論的運転支援システムでは, 設計者が定める (2.70a), (2.70b) 式におけるパラメータ (α, β) の値を,

$$\alpha = 15, \beta = 0.001 \quad (2.74)$$

とした. このことによって, ドライバがステアリングを握っている腕の自重などによって意図せずにステアリングを操舵し, システムが「ドライバーが車両を車線中央に戻す操舵を行った」と誤って判断することを防ぐことが期待できる.

2.7 横方向制御の主体（システムから人へ）の円滑な移行

2.5 節では，システムの状態ベクトルと操作量の制約を満たす操舵トルク制御を実現しつつ，操舵トルクを滑らかにステアリングに入力する 1 段目の制御が実現できる制御系を設計した．また，2.6 節では，1 段目の制御開始後におけるドライバの操舵行動を検出する機構を構築した．双対制御論的運転支援システムでは，1 段目の制御の開始後に，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときには，車両横方向制御の主体を，システムからドライバへ円滑に移行させる必要がある．本節では，2.5 節で設計した制御系をドライビングシミュレータ上に構築し，車両横方向制御の主体を，システムからドライバへ円滑に移行できることを確認する．

2.7.1 ドライビングシミュレータへのシステムの実装

本研究におけるドライビングシミュレータは，Moog 社製ステアリング反力呈示装置 CL-R-E/HD/12Nm MultiTurn，速度メータを表示する 12.1 inch のモニター，走行映像を映す 80 inch のスクリーン 3 面，Thrustmaster 社製アクセル・ブレーキペダルで構成される．シミュレータにおける車両運動の計算，走行映像や音響の出力などは，三菱プレジジョン社製のソフトウェアにより実現される．ドライビングシミュレータの外観を Figure 2.27 に示す．

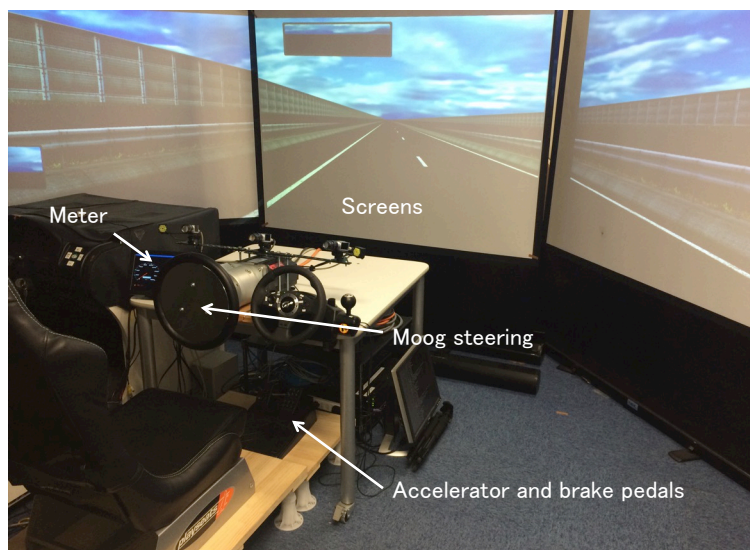


Figure 2.27 A fixed-based driving simulator

2.5 節で設計した制御系を Figure 2.27 に示すドライビングシミュレータ上に構築した。構築したシステムブロック図を， Figure 2.28 に示す。双対制御論的運転支援システムは，車両のヨーレート $\dot{\psi}$ [rad/sec]，ヨー角 ψ [rad]，車両横速度 y_c [m/sec]，システムの目標横位置と車両横位置の偏差 y_c [m]，操舵角速度 $\dot{\theta}$ [rad/sec]，操舵角度 θ [rad] をモニタする。

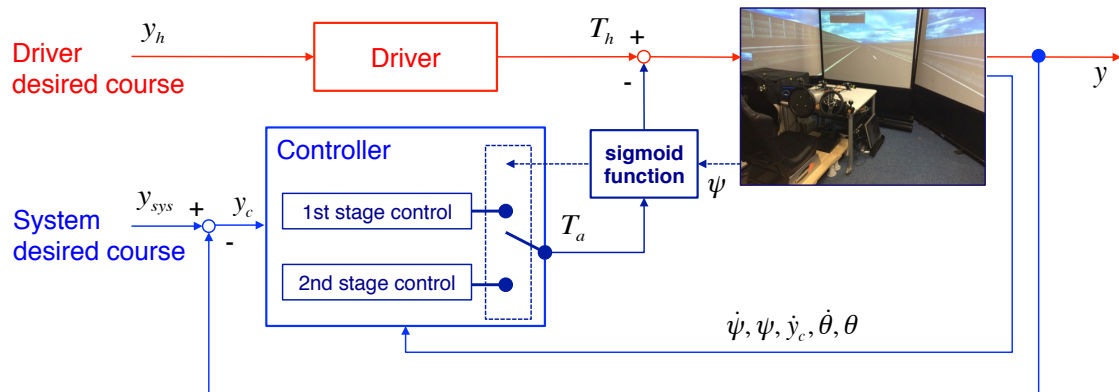


Figure 2.28 System architecture

2.7.2 車両安全確保の検証

システムを搭載したドライビングシミュレータを用いて，1 段目の制御の開始後に，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときには，車両横方向制御の主体を，システムからドライバへ円滑に移行させることができ，また，ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行わなかったときには，システムが 2 段目の制御を実行することによって車両が車線中央に戻ることを確認する。

ドライバには，「直線路のみで構成される片側 2 車線の高速道路を運転すること」を課した。また，運転中は常に自車速を 100 [km/h] に一定に保つアダプティブクルーズコントロール (ACC) が作動する。したがって，ドライバはアクセルペダルやブレーキペダルを操作する必要はない。また，ドライバには，「1 段目の制御の実行を認識したときには，ドライバ自らが車両を車線中央に戻す操舵を行うこと」を教示した。

Figure 2.29 は， $v = 100$ [km/h]， $\psi \approx 1$ [degree] で車両が車線中央から逸れていったときの例である。計測データは，車両が車線中央に位置 ($y(t)=0$ ， $\psi(t) \approx 1$) した時刻を計測開始の時刻 $t = 0$ とし，システムの状態 [1: 1 段目の制御の実行，2: 2 段目の

制御の実行] , 車両横変位 y [m] , 横加速度 \ddot{y}_c [G] , 操舵角度 θ [degree] , ゲイン $K(\psi)$ [-] , 操舵支援トルク T_a [Nm] を示す .

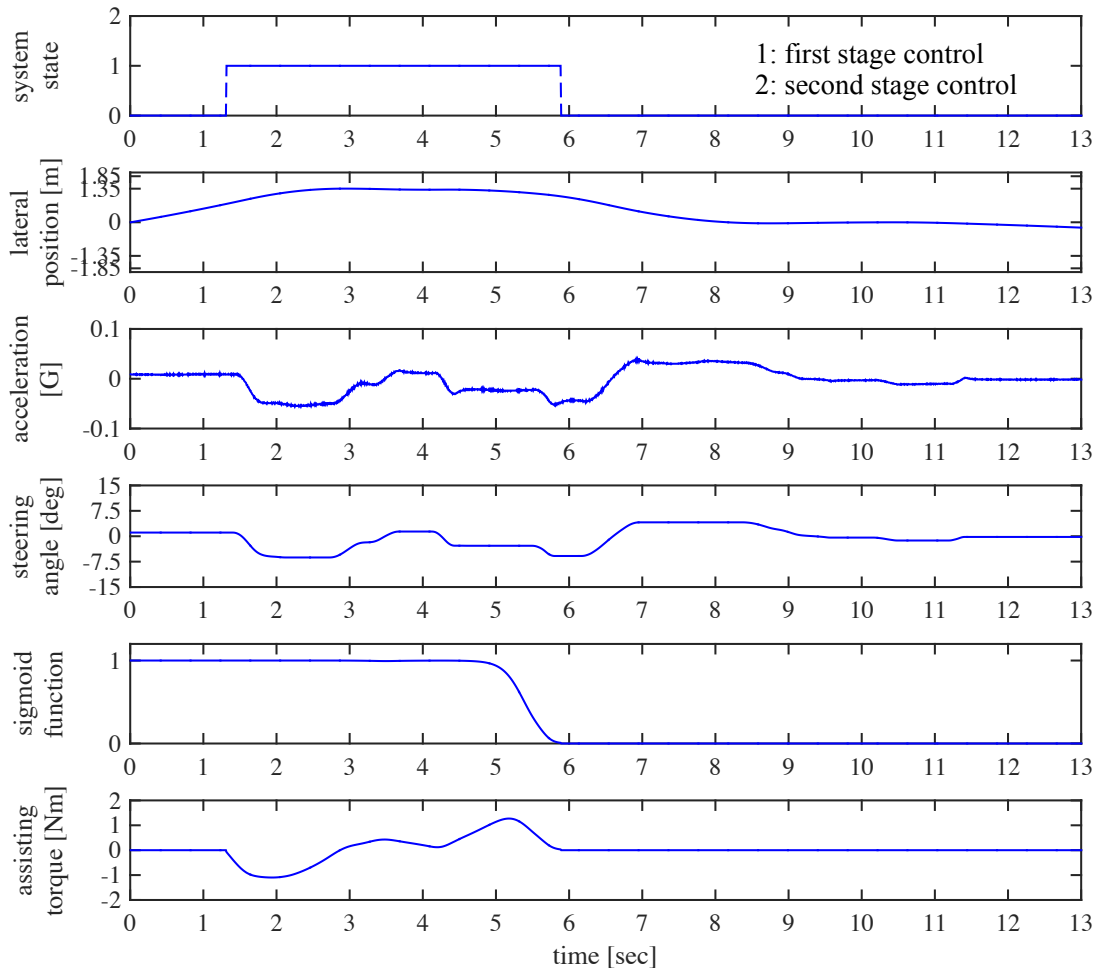


Figure 2.29 Coupling of controls by the system and the driver

Figure 2.29 において , 約 1.5 秒から 3.5 秒までの時刻における操舵角度は , システムの 1 段目の制御によるものであるが , その後の約 4 秒から 7 秒までの時刻における操舵角度は , ドライバが入力したものが含まれている . ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を実行することによって , 車両をシステムの目標横位置 (車線逸脱判定ライン) に戻す操舵反力が , 最大で約 1 Nm 生じていることを確認できる . また , 5.88 秒の時刻において , システムは 「 ドライバは車両を車線中央に戻す操舵を行った 」 と判断し , 1 段目の制御を終了した . ゲイン $K(\psi(t))$ の値をみると , シグモイド曲線を描きながら 0 に近づいていく様子を確認することができ , 車両ヨー角 $\psi(t)$ が車線中央の

方向へ傾くにつれて操舵支援トルク（または操舵反力）が低減されたことがわかる。このように、1 段目の制御の開始後に、ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行ったときには、車両横方向制御の主体を、システムからドライバへ円滑に移行させることができるといえる。

これに対して、Figure 2.30 は、ドライバが状況認識の不全に陥っている状態を想定し、ドライバに、「1 段目の制御の開始後に、車両を車線中央に戻す操舵は行わないこと」を教示した例である。

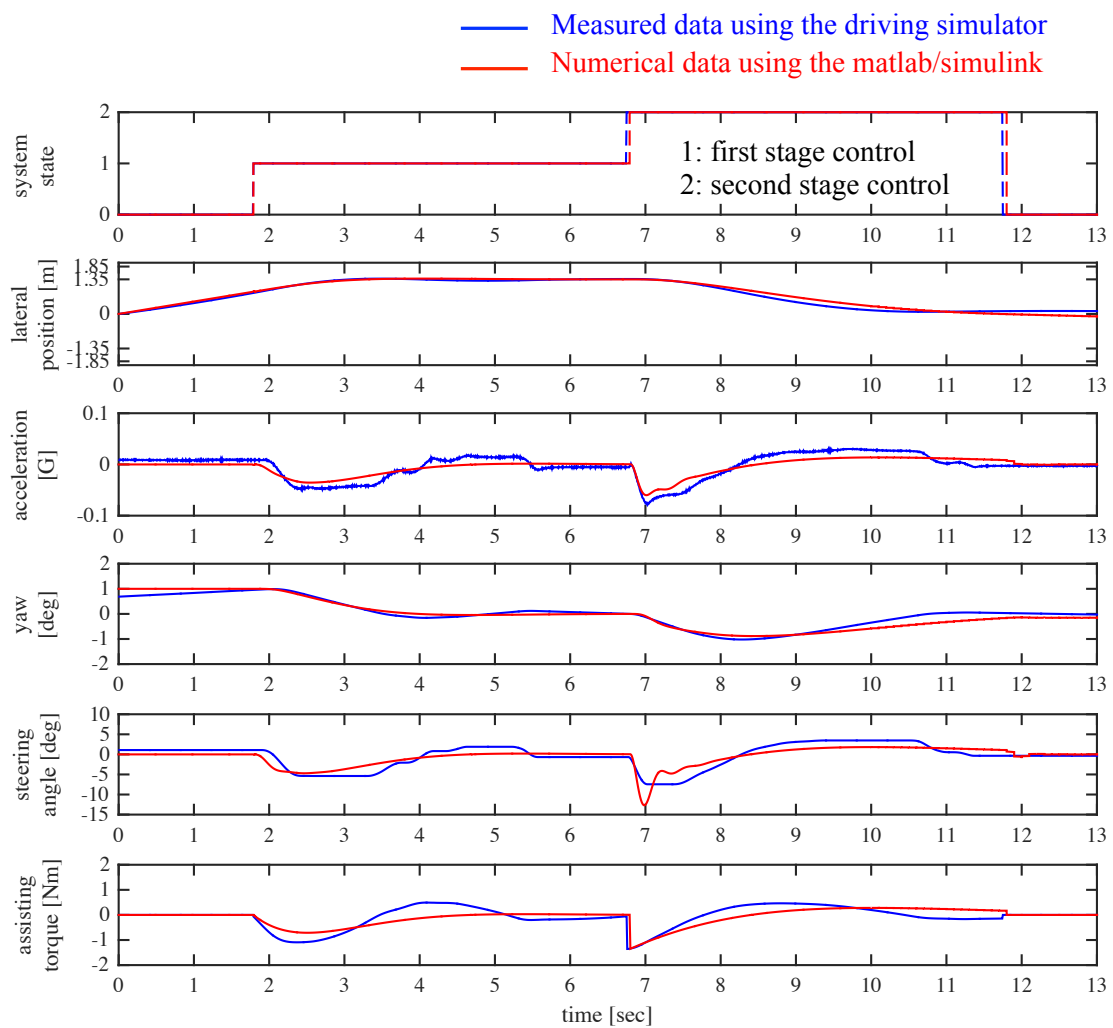


Figure 2.30 Driving simulator based measurement data and the Matlab/Simulink based numerical data

Figure 2.30 では、「2.5 節の数値例で用いた車両・操舵系モデル」と「ドライビング

シミュレータにおける車両・操舵系モデル」が異なるものであることから，2.5 節における Figure 2.22 の数値例と，ドライビングシミュレータにおける計測データを比較している．Figure 2.30 から，両者の結果は，若干のずれはあるものの，概ね，近い応答を示していることがわかる．また，システムによる 1 段目の制御の実行によって車両の車線逸脱を阻止できることと，2 段目の制御の実行によって車両が車線中央に戻ることを，ドライビングシミュレータにおける計測データからも確認できた．

2.8 むすび

本章では，車両挙動という客観情報のみを用いて，(i) 車両の安全確保と，(ii) ドライバが状況認識不全状態（低覚醒状態や心身機能喪失状態）に陥っているか否かの判定，という二つの目的を一つの制御で達成する双対制御論的運転支援システムを構築した．制御対象（車両・操舵系）の数理モデル，ならびに最適制御理論に基づいた車両横方向制御系（操舵トルク制御）のコントローラを構築し，双対制御論的運転支援システムをドライビングシミュレータに搭載した．また，1 段目の制御の開始後に，車両を車線中央に戻す制御の不足分を補うドライバの操舵が行われたときには，車両横方向制御の主体をシステムからドライバへ円滑に移行させることができ，また，車両を車線中央に戻す制御の不足分を補うドライバの操舵が行われなかったときには，システムが 2 段目の制御を実行することによって車両を車線中央に戻すことが可能であることをドライビングシミュレータを用いて確認した．

ドライバが居眠りに陥った，またはドライバの心身機能が喪失したときには，ドライバが適正な状況認識を確保することは困難であることから，人に車両の安全確保を求めることは難しい．このことから，システムが人に代わって車両の安全確保を図ることが重要である．双対制御論的運転支援では，システムが最低限の安全確保を図りながら，システムがドライバに働きかけを行い，ドライバの対応行動を確認することからドライバ状態の同定を試みる．これは，ドライバ状態の判定が下されないことによって何も支援が実行されないこともあり得る既存の運転支援とは異なり，ドライバ状態の判定にかかわらずに車両の安全確保を図ることができるといえる．

第3章 双対制御論的運転支援システムの有効性評価

3.1 はじめに

第2章では、制御対象（車両・操舵系）の数理モデル、ならびに最適制御理論に基づいた車両横方向制御（操舵トルク制御）のコントローラを設計し、双対制御論的運転支援システムをドライビングシミュレータに構築した。また、双対制御論的運転支援システムが、車両の安全確保を図ることができることをドライビングシミュレータを用いて確認した。本章では、ドライビングシミュレータを用いて、車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した双対制御論的運転支援の有効性を検証する。

ドライバが状況認識の不全に陥る過程

覚醒度が低下したときに、ドライバの操舵が乱れ、また車両がふらついてくることは広く知られている [56, 57, 58, 59]。ドライバは、現時刻の車両情報から将来の車両位置を予測し、目標位置との偏差に応じて操舵を行っている [100]。曲線路だけでなく、直線路を走行しているときでさえ、ドライバは直進状態を維持するために常に微小な修正操舵を繰り返している。覚醒度が低下したときにおける車両のふらつきは、ドライバの修正操舵の遅れによるものであることが明らかにされている [57]。実用化されているドライバ状態推定技術は、いずれも車線中央と車両横位置の偏差の大きさと修正操舵の遅れをモニタリングすることによって覚醒度低下の兆候を検出している [51, 52, 53, 54]。

ドライバが居眠りをしたとき、またはドライバの心身機能が喪失したときには、ドライバが車両を車線中央に維持させるための修正操舵を繰り返すことは困難であると考えられる。1.1 節に示した、北陸自動車道上り線小矢部川サービスエリアで起きた衝突事故は、その典型例である。車両が2度にわたってガードレールに接触しているにもかかわらず、ドライバは何も対応行動を行うことができていない。ドライバは状況

認識を喪失しているがゆえに、適切な行動を選択し、実行することはできないためである。ドライバが居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには、ドライバは適正な状況認識を確保することができず（状況認識不全状態）、車両を車線中央に維持させることもできなくなると考える。

ドライバ状況認識不全状態の検出

双対制御論的運転支援では、車両の車線逸脱を予測したときに、車線区分線と平行となるような1段目の制御を実行することになる。このとき、ドライバが、車両を車線中央に戻すための操舵を1段目の制御を開始してからの t_i 秒の間に実行するならば、システムは、「何らかの理由により車両が車線逸脱をしそうになったものの、ドライバは適正な状況認識が可能な程度に覚醒している」と判断する。また、車両を車線中央に戻すドライバの操舵が行われないうちに t_i 秒間が経過したならば、システムは、「ドライバが状況認識の不全に陥っていることが疑われる」と判断し、2段目の制御を実行する。

双対制御論的運転支援では、システムは、2段目の制御を実行した後にしばらく様子を見て、車両が何度も車線逸脱を起こしそうになり、そのたびにシステムが2段目の制御を実行しなければならない事態に陥ったときに、システムは、はじめて「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断する (Figure 3.1)。2段目の制御が1度実行される状況や、2段目の制御の実行に至らずとも、1段目の制御が何度も実行される状況は、ドライバが状況認識の不全状態に陥ることの「兆候」と見なす。

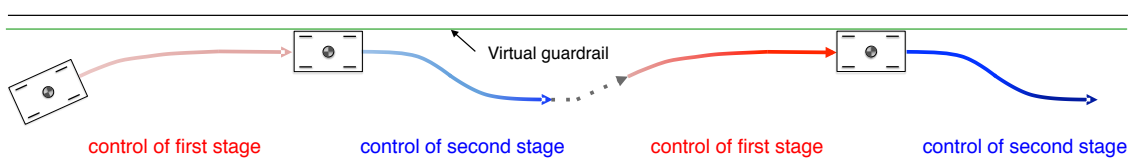


Figure 3.1 Example case in which the system implements control of the second stage repeatedly

ドライバが居眠りをした、またはドライバの心身機能が喪失したならば、ドライバが車両を車線中央に維持させることは困難であることから、2段目の制御の終了時刻における車両姿勢（ヨー角）に応じて、再び、システムは1段、または2段目の制御

を実行しなくてはならなくなると考える．双対制御論的運転支援では，1 段目の制御における車両横位置の目標（車線逸脱判定ライン）を仮想的なガードレールと見なすこともできる (Figure 3.1)．車両が仮想的なガードレールに何度も接触しているにもかかわらず，ドライバーは何も対応行動を行わないのであれば，システムは「ドライバーは状況認識不全状態にある」と判定する．また，システムが「ドライバーは状況認識不全状態にある」と判断した後は，システムは車両を緩やかに停車に導く減速制御を実行する (Figure 3.2)．

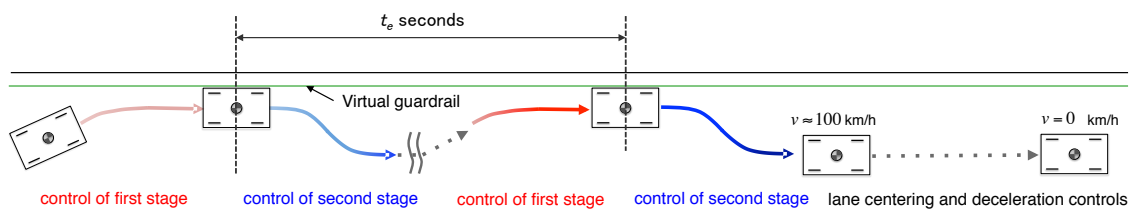


Figure 3.2 Lane centering followed by deceleration

ここで，どの程度の時間長 t_e 秒の間に何回の 2 段目の制御が実行されたときに (Figure 3.2)，システムは「ドライバーは状況認識不全状態にある」と判断すればよいだろうか．本章では，双対制御論的運転支援システムの作動時におけるドライバーの運転行動を計測・分析し，システムが「ドライバーは状況認識不全状態にある」と判定する手法を構築する．また，その手法が有効であることを明らかにする．

3.2 節では，ドライビングシミュレータを用いた認知工学的実験を説明する．3.3 節では，覚醒度低下時におけるドライバーの運転行動を分析する．3.4 節では，双対制御論的運転支援システムの作動時におけるドライバーの運転行動を分析する．3.5 節では，3.4 節の分析結果に基づいたドライバー状態推定の手法を構築し，その手法の有効性を評価する．3.6 節では，双対制御論的運転支援システムにおける多層的支援，ならびに制御のオーバーライドの可否について述べる．

3.2 認知工学的実験

車両安全確保とドライバー状態推定の機能を兼備した双対制御論的運転支援の有効性を認知工学的実験から検証する．本実験は，平成 25 年度システム情報系研究倫理審査委員会からの承認（承認番号 2013R41）を得て実施した．

3.2.1 実験装置

Moog 社製ステアリング反力呈示装置 CL-R-E/HD/12Nm MultiTurn, 速度メータを表示する 12.1 inch のモニター, 走行映像を映す 80 inch のスクリーン 3 面, Thrustmaster 社製アクセル・ブレーキペダルで構成されるドライビングシミュレータを用いた。また, 実験参加者の顔表情や瞼の開度などの視行動を計測する Smart eye 社製の視線計測装置を運転席前方に設置した。

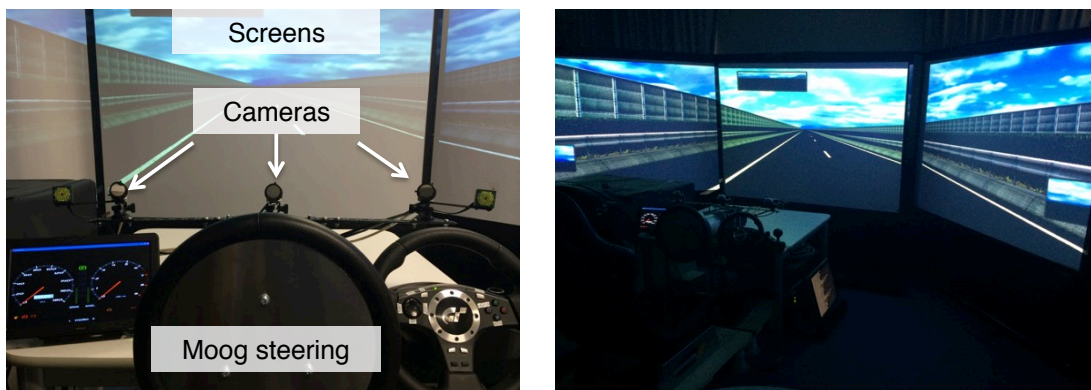


Figure 3.3 A fixed-based driving simulator equipped with the dual control theoretic driver assistance system

3.2.2 実験参加者と顔表情評定者

実験参加者

実験参加者は, (1) 普通自動車免許を有する, (2) 日常的に運転を行う, (3) メガネを着用しない, の条件を満たす学生 20 名 (実験参加者 A - T, mean = 21.75, SD = 1.58) である。実験参加者は, 学内の掲示板を通じて募集した。また, 実験参加者には, 実験時間に応じて 1 時間 820 円の謝礼を支払った。なお, すべての実験参加者からインフォームドコンセントを得ている。

顔表情評定者

実験では, 実験参加者の眠気レベルを 5 段階で主観評定する顔表情評定 [61] を実施した。顔表情評定者は, 実験担当者 (著者) を含む 3 名が担当した。実験担当者以外

の 2 名の顔表情評定者は、研究室の学生にお願いした。なお、この顔表情評定は、時間的な効率性を考慮し、実験においてリアルタイムで実施した。また、実験担当者以外の評定者 2 名には、実験時間に応じて 1 時間 820 円の謝礼を支払った。

3.2.3 実験タスク

実験参加者に課すタスクは、「直線路のみで構成される片側 2 車線の高速道路を 30 分間運転すること」である。運転中は常に自車速を 100 km/h に一定に保つアダプティブクルーズコントロール (ACC) が作動することから、実験参加者はアクセルペダルやブレーキペダルの操作を行う必要がない。実験参加者には、「通常は、ステアリングホイールの 10 時 10 分の位置を両手で把持しながらステアリング操作のみを行えばよい」ことを教示した。また、車両の車線逸脱が予測されたときには、システムは 1 段目の制御を実行することになるが、実験参加者には、「1 段目の制御の実行を認識した場合には、実験参加者自らが車両を車線中央に戻す操舵を行うこと」を課した。なお、実験参加者には、「実験の前日には十分な睡眠をとること」と、「実験当日のお昼休憩には食事をとること」をお願いした。

3.2.4 手順

実験は、つぎの手順、時間帯に実施した (Table 3.1)。時刻 11:20 からの 20 分間で実験の説明を行い、その後の 20 分間で練習走行を行った。練習走行では、ドライビングシミュレータにおける運転に慣れることを目的とする走行と、双対制御論的運転支援システムの作動に慣れることを目的とする走行を実施した。午前 12 時から、1 時間のお昼休憩をとり、午後 13 時から実験走行を開始した。なお、実験走行は、計 3 試行である。実験走行の試行と試行の間には、30 分間の休憩を入れ、実験参加者の身体面・精神面の負担を軽減できるようにした。

また、日中の眠気は日常的にみられる現象である [101, 102]。一般に「昼食をとった後に眠気が起こりやすい」とされることを踏まえて、ドライバが眠気を覚えるような実験環境を実現したいことと、双対制御論的運転支援システムが作動するデータをできるだけ多く採取したいことから、Table 3.1 に示す時間帯に実験走行を実施した。

Table 3.1 Procedure

Time	Item
11:20 – 12:00	introduction
12:00 – 13:00	lunch break
13:00 – 13:30	trial 1
13:30 – 14:00	break
14:00 – 14:30	trial 2
14:30 – 15:00	break
15:00 – 15:30	trial 3

3.2.5 評価指標

実験では，車両の情報，ドライバの情報，システムの情報に計測した．車両情報としては，(1) 車両横位置 [m]，(2) 車両横加速度 [G]，(3) 車両ヨーレート [rad/sec]，(4) 車両ヨー角 [rad]，(5) 操舵角度 [degree]，(6) 操舵トルク [Nm] である．システムの情報としては，(7) 1 段と 2 段目の制御の作動・終了時刻，(8) システムの操舵支援トルク [Nm]，(9) ゲイン $K(\psi(t))$ である．また，ドライバの情報としては，(10) 顔表情評定値，(11) 瞼の開き [mm]，(12) 瞬きである．なお，顔表情評定値を除いた 11 項目の計測データは，120 Hz で取得した．顔表情評定は，20 秒毎の平均値を算出し，小数点以下は四捨五入した．評定値は，実験参加者の覚醒度の外的基準として扱う．北島ら [61] が提案した 5 段階の眠気レベル基準を Tabel 3.2 に示す．

Table 3.2 Facial expression based sleepiness level [61]

Sleepiness level	Features of behavior
1	Not Drowsy: Eye movement is rapid, the time between blinks remains stable.
2	Slightly Drowsy: Eye movement is slow.
3	Moderately Drowsy: Blinks are slowly, the mouth moves, or the driver touches his/her face.
4	Significantly Drowsy: The number of blinks increases noticeably, motions unnecessary for driving are seen, yawns are frequent, deep breathing is detected.
5	Extremely Drowsy: The eyelids are almost closed, or the driver's head inclines to the front or rear.

評価指標は、

1. 20 秒間毎における車両重心位置と車線中央位置の横偏差の標準偏差
2. 20 秒間毎における操舵角度の標準偏差
3. 20 秒間毎における実験参加者の瞬きの回数
4. 1 段と 2 段目の制御の作動回数
5. 1 段目の制御の開始時刻において実験参加者の瞼が閉じていた、または閉じようとしていた回数
6. システムが 1 段目の制御を開始してから、システムが「実験参加者は車両を車線中央に戻す操舵を行った」と判定するまでの時間長
7. 1 段目の制御が開始されてからつぎの 1 段目の制御が開始されるまでの時間長
8. 2 段目の制御が開始されてからつぎの 2 段目の制御が開始されるまでの時間長

である。

3.2.6 作業仮説

ドライバが居眠りをするほどに覚醒度が低下したならば、ドライバは適正な状況認識を確保することができず、車両を車線中央に維持させる修正操舵を行うことは困難である。作業仮説をつぎのように立てた。

作業仮説： 実験参加者が居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには、1 段目の制御の開始後に、実験参加者が車両を車線中央に戻す操舵を行うことは難しく、また、2 段目の制御の開始後も車両を車線中央に維持させることは困難である。このことによって、システムが 1 段と 2 段目の制御を何度も引き続いて実行しなければならない事態に陥る。

3.3 覚醒度低下時におけるドライバの運転行動の分析

覚醒度低下時における実験参加者の運転行動を分析する。本節では、実験参加者の顔表情評定値別に、(1) 車両重心位置と車線中央位置の横偏差の標準偏差、(2) 操舵角度の標準偏差、(3) 実験参加者の瞬きの回数を評価する。なお、本実験の顔表情評定で得られた各実験参加者の評定値（眠気レベル）の内訳を Figure 3.4 に示す。

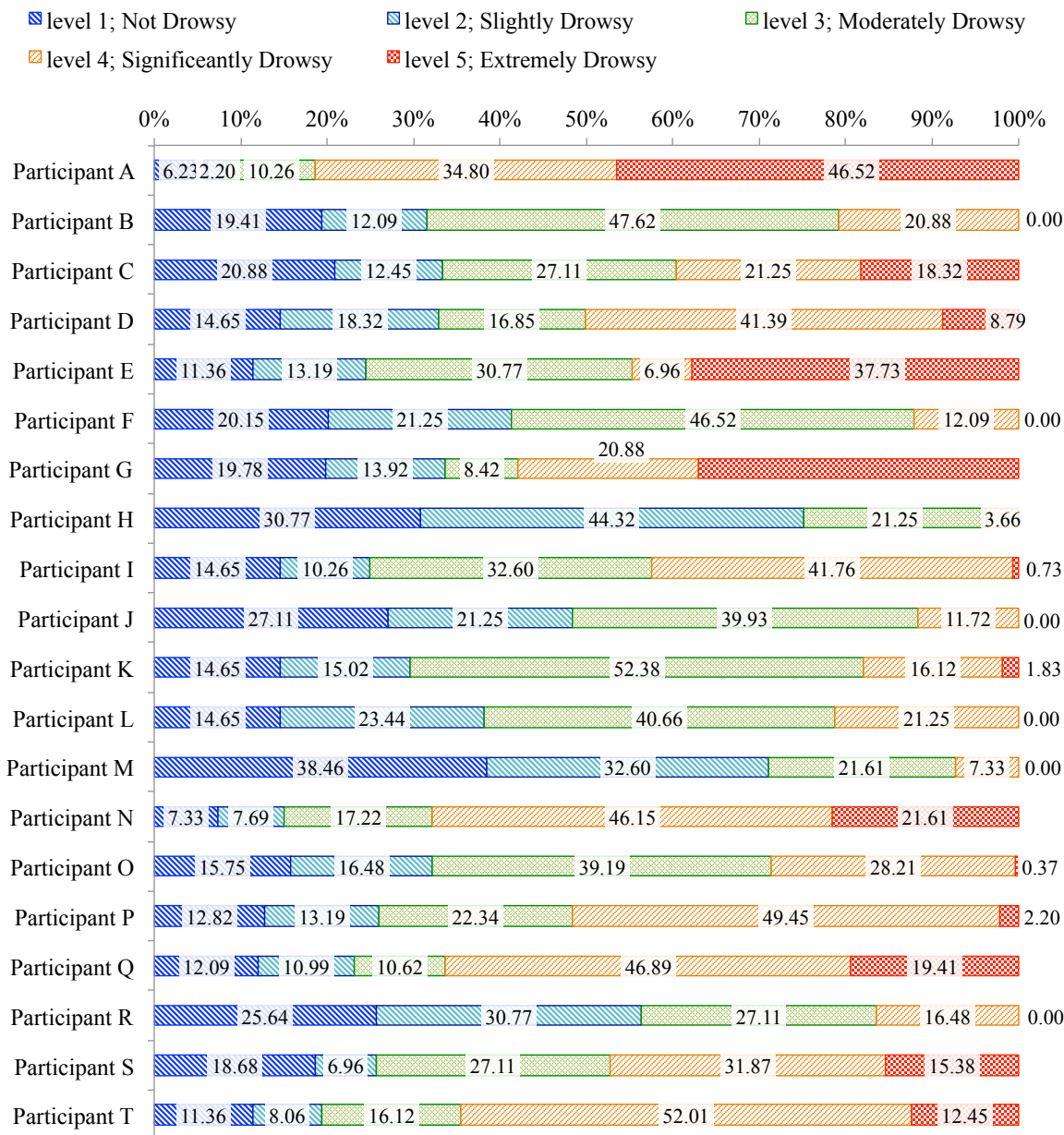


Figure 3.4 Distribution of sleepiness levels

Figure 3.4 は、縦軸を各実験参加者 (A - T)、横軸をそれぞれの評定値の内訳を示し

ている．実験参加者によって各評定値の内訳にはばらつきがある．実験参加者 *B, F, J, H, L, M, R* では，評定値が“ 5 ”(瞼を閉じる状態) まで上がらなかった．その他の実験参加者では，評定値“ 1 ”～“ 5 ”までひと通り確認できた．

「顔表情評定値」と「車両重心位置と車線中央位置の横偏差の標準偏差」の関係を，Figure 3.5 に示す．Figure 3.5 は，20 名の実験参加者の全走行データを評価した．縦軸は車両横偏差の標準偏差の平均値と 95% 信頼区間を，横軸は各評定値を示す．

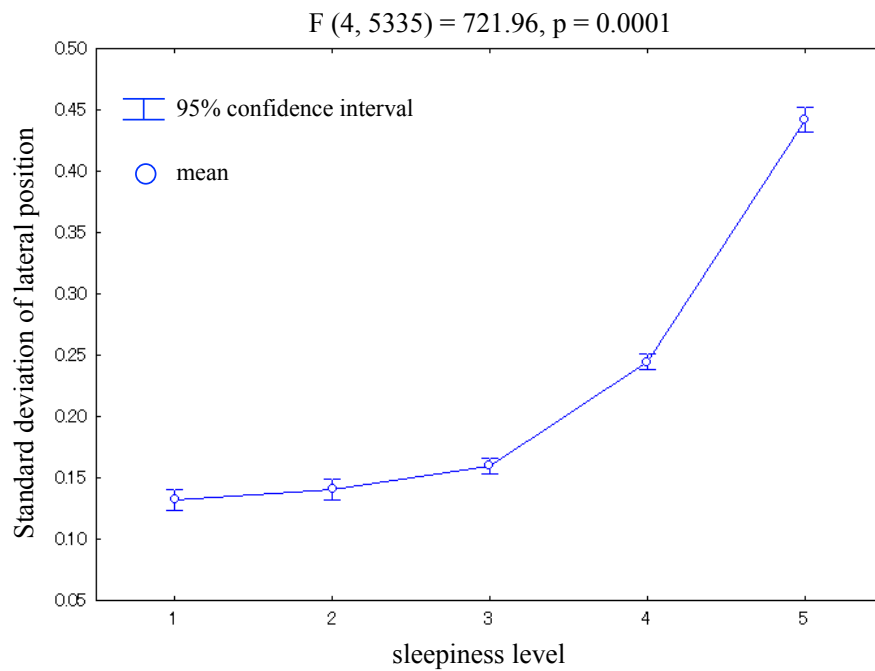


Figure 3.5 Facial expression based sleepiness level and the standard deviation of the vehicle’s lateral position

Table 3.3 Tukey’s HSD test for the standard deviation of the vehicle’s lateral position

Sleepiness level	1	2	3	4	5
1		0.591906	0.000019	0.000017	0.000017
2	0.591906		0.004254	0.000017	0.000017
3	0.000019	0.004254		0.000017	0.000017
4	0.000017	0.000017	0.000017		0.000017
5	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017	

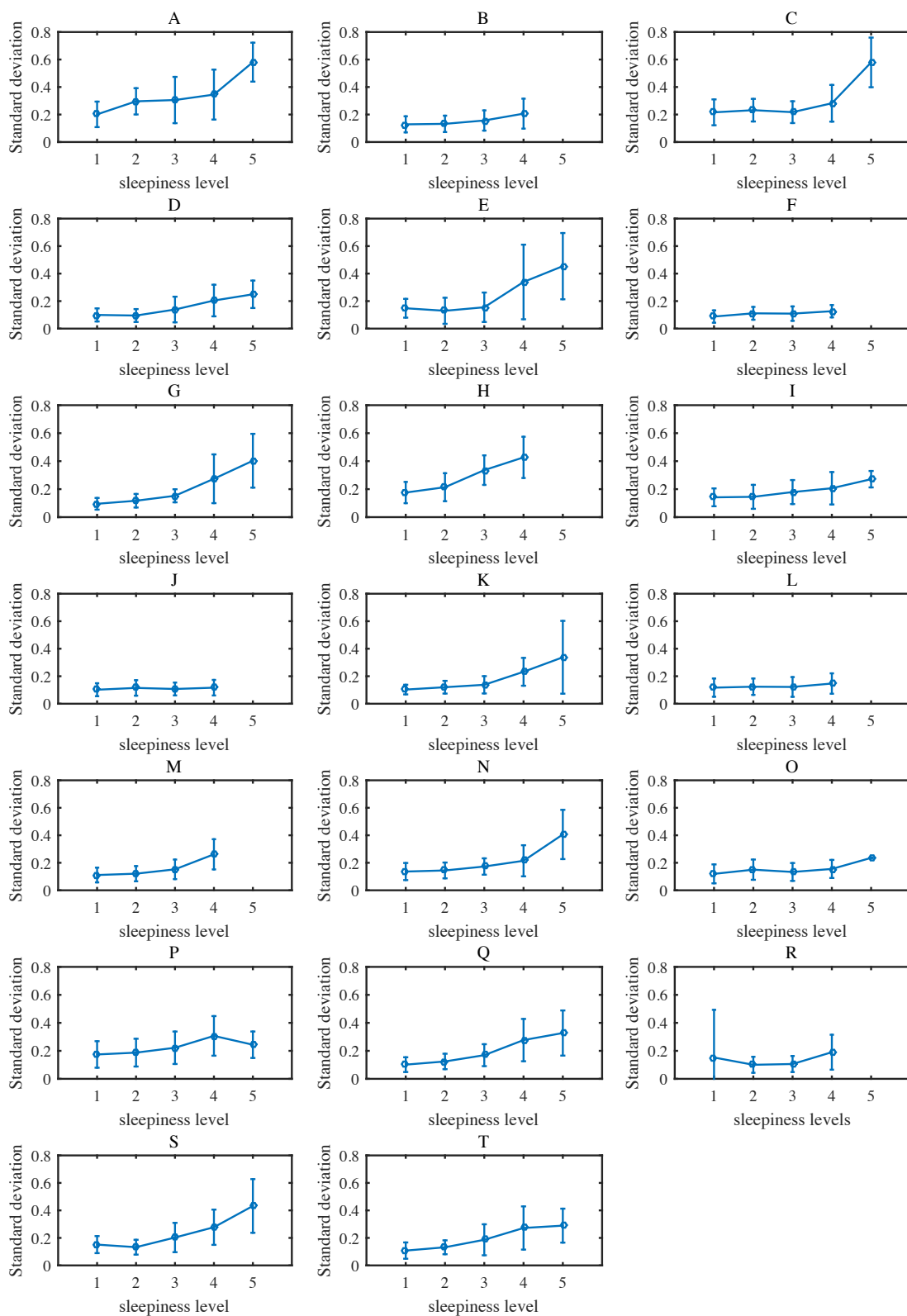


Figure 3.6 Standard deviation of the lateral position for each participant

顔表情評定値を要因として、20 秒毎の車両横偏差の標準偏差に対して一要因分散分析を行ったところ、主効果が有意であった ($F(4, 5335) = 721.96, p = 0.0001$)。テューキーの HSD 検定によると、評定値 “ 1 ” と “ 2 ” の間を除いて有意差が確認された (Table 3.3)。このことから、顔表情評定値が “ 2 ” から “ 5 ” へ上がるにしたがって、20 秒毎の車両横偏差の標準偏差が大きくなっているといえる。この結果は、既往研究の結果 [56, 57, 58, 59] と整合するものである。

Figure 3.6 は、実験参加者別に、「車両重心位置と車線中央位置の横偏差の標準偏差」の平均と標準偏差を評価した。実験参加者 *F, J, L* などでは、顔表情評定値が上がることによって車両重心位置と車線中央位置の横偏差の標準偏差が大きくなるような傾向はみられなかった。このような実験参加者は、顔表情評定値が “ 5 ” まで上がらなかったケースが多い (Figure 3.4)。これは、実験参加者が眠気と葛藤しながら、負けじと車線中央を走行することを頑張った結果であると推測する。

「顔表情評定値」と「操舵角度の標準偏差」の関係を、Figure 3.7 に示す。Figure 3.7 は、20 名の実験参加者の全走行データを評価した。縦軸は操舵角度の標準偏差の平均値と 95% 信頼区間を、横軸は各評定値を示す。

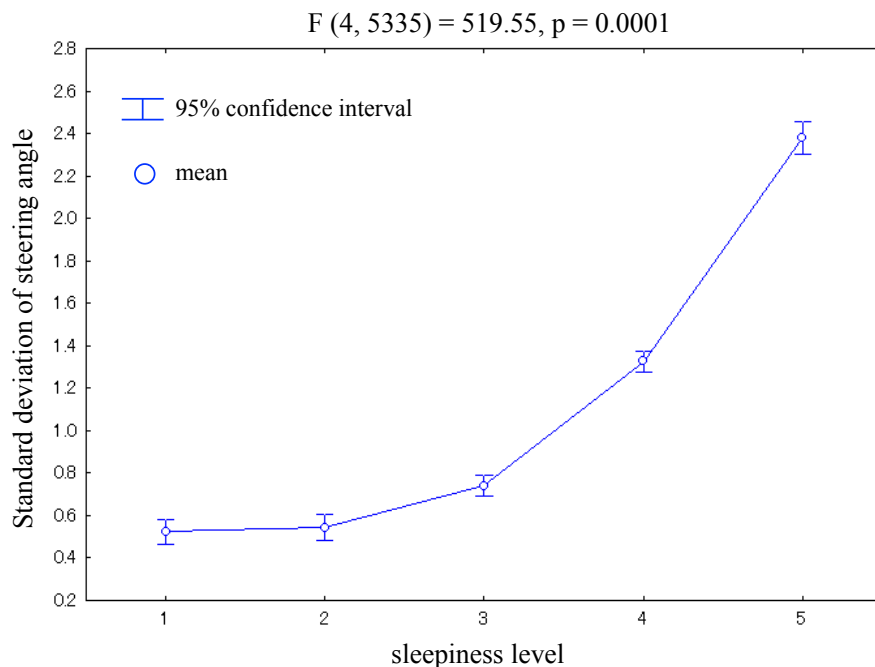


Figure 3.7 Facial expression based sleepiness level and the steering angle

Table 3.4 Tukey's HSD test for the steering angle

Sleepiness level	1	2	3	4	5
1		0.992955	0.000017	0.000017	0.000017
2	0.992955		0.000022	0.000017	0.000017
3	0.000017	0.000022		0.000017	0.000017
4	0.000017	0.000017	0.000017		0.000017
5	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017	

顔表情評定値を要因として、20 秒毎の操舵角度の標準偏差に対して一要因分散分析を行ったところ、主効果が有意であった ($F(4, 5335) = 519.55, p = 0.0001$)。テューキーの HSD 検定によると、評定値“1”と“2”の間を除いて有意差が確認された (Table 3.4)。このことから、顔表情評定値が“2”から“5”へ上がるにしたがって、20 秒毎の操舵角度の標準偏差が大きくなっているといえる。この結果もまた、既往研究の結果 [58, 59] と整合するものである。ドライバの修正操舵の開始が遅れることによって、車両を車線中央に維持させるために必要な修正操舵角が大きくなる [57]。その結果として、車両がふらつくことになると解釈する。

Figure 3.8 は、実験参加者別に、「操舵角度の標準偏差」の平均と標準偏差を評価した。結果は、「車両重心位置と車線中央位置の横偏差の標準偏差」の分析と同様の傾向であった (Figure 3.6)。実験参加者 *J, L, R* などでは、顔表情評定値が上がるにしたがって操舵角度の標準偏差が大きくなるような傾向はみられなかった。

このように、「車両重心位置と車線中央位置の横偏差の標準偏差」や「操舵角度の標準偏差」は、ドライバの状態に応じてその傾向は様々であり、万人に共通な判断基準を設定することが難しいことがわかる。

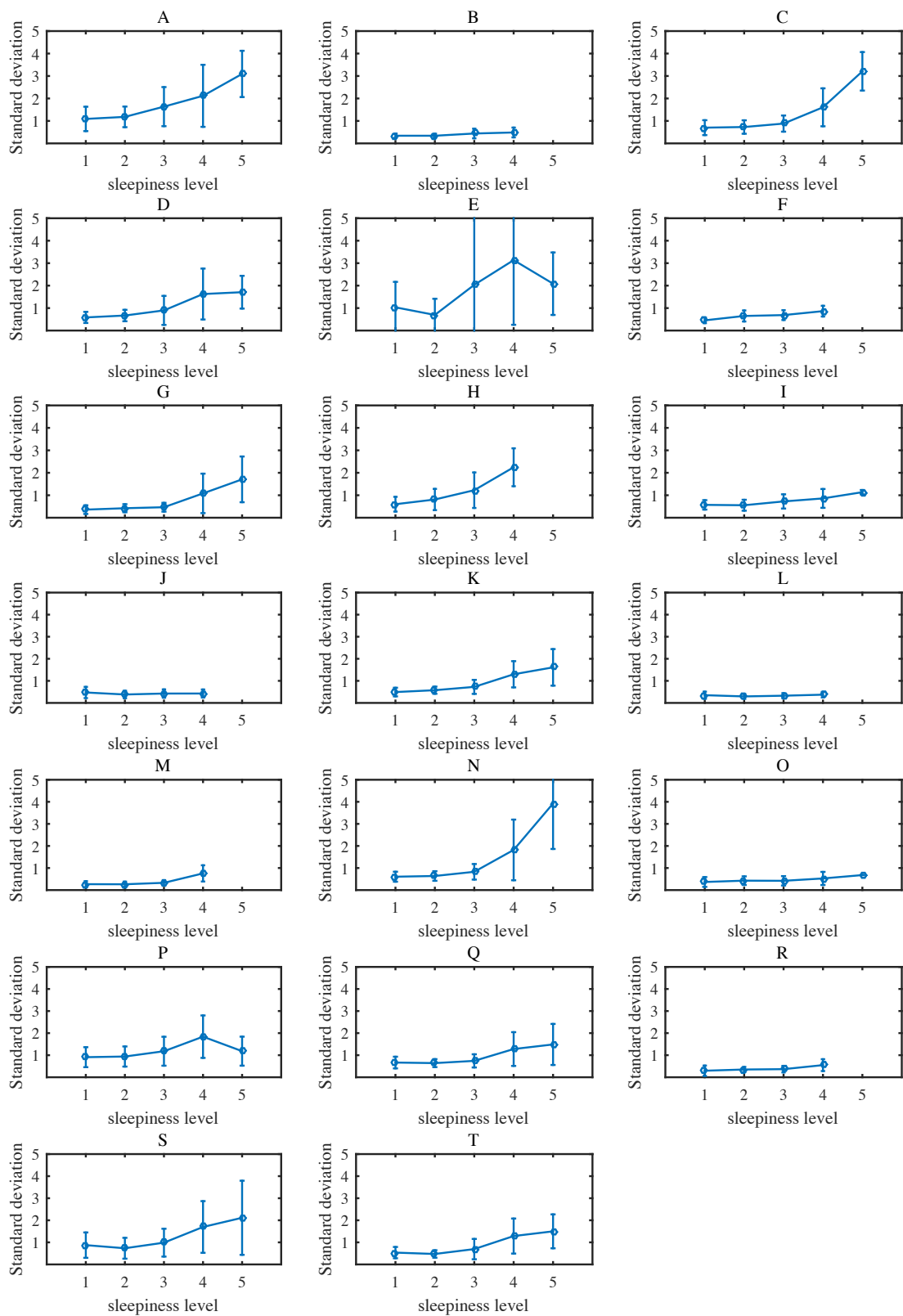


Figure 3.8 Standard deviation of the steering angle for each participant

「顔表情評定値」と「瞬きの回数」の関係を，Figure 3.9 に示す．Figure 3.9 は，20 名の実験参加者の全走行データを評価した．縦軸は瞬きの回数の平均値と 95% 信頼区間を，横軸は各評定値を示す．なお，実験参加者 F のデータは，視線計測装置による視行動データの計測が失敗していたことから，分析データから除外している．

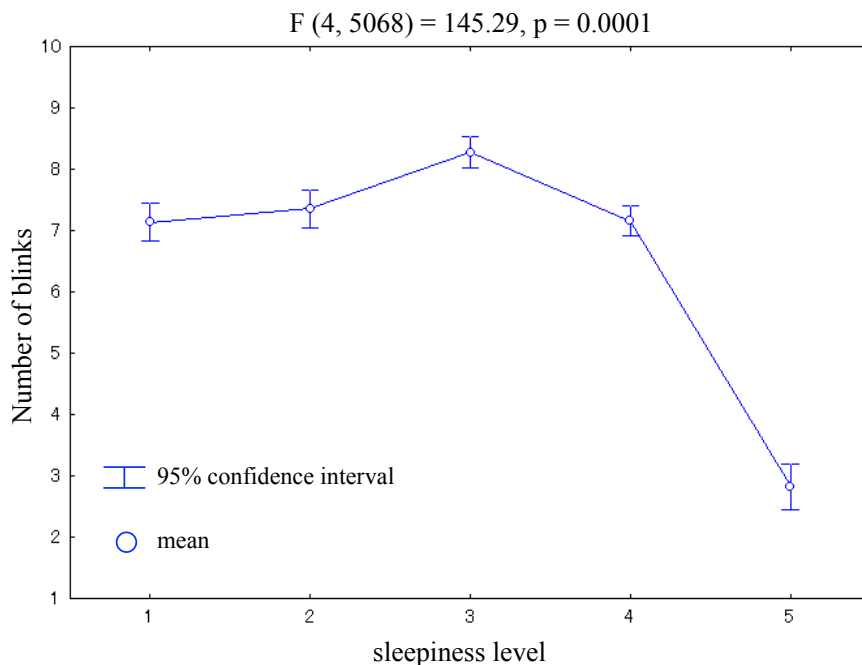


Figure 3.9 Facial expression based sleepiness level and the number of blinks

Table 3.5 Tukey’s HSD test for the number of blinks

Sleepiness level	1	2	3	4	5
1		0.868291	0.000017	0.999984	0.000017
2	0.868291		0.000098	0.868186	0.000017
3	0.000017	0.000098		0.000017	0.000017
4	0.999984	0.868186	0.000017		0.000017
5	0.000017	0.000017	0.000017	0.000017	

顔表情評定値を要因として，20 秒毎の瞬きの回数に対して一要因分散分析を行ったところ，主効果が有意であった ($F(4, 5068) = 145.29, p = 0.0001$)．テューキーの HSD 検定によると，評定値 “ 1 ” と “ 2 ” の間，評定値 “ 1 ” と “ 4 ” の間，評定値 “ 2 ” と “ 4 ” の間を除いて有意差が確認された (Table 3.5)．顔表情評定値 “ 5 ” は瞼が閉

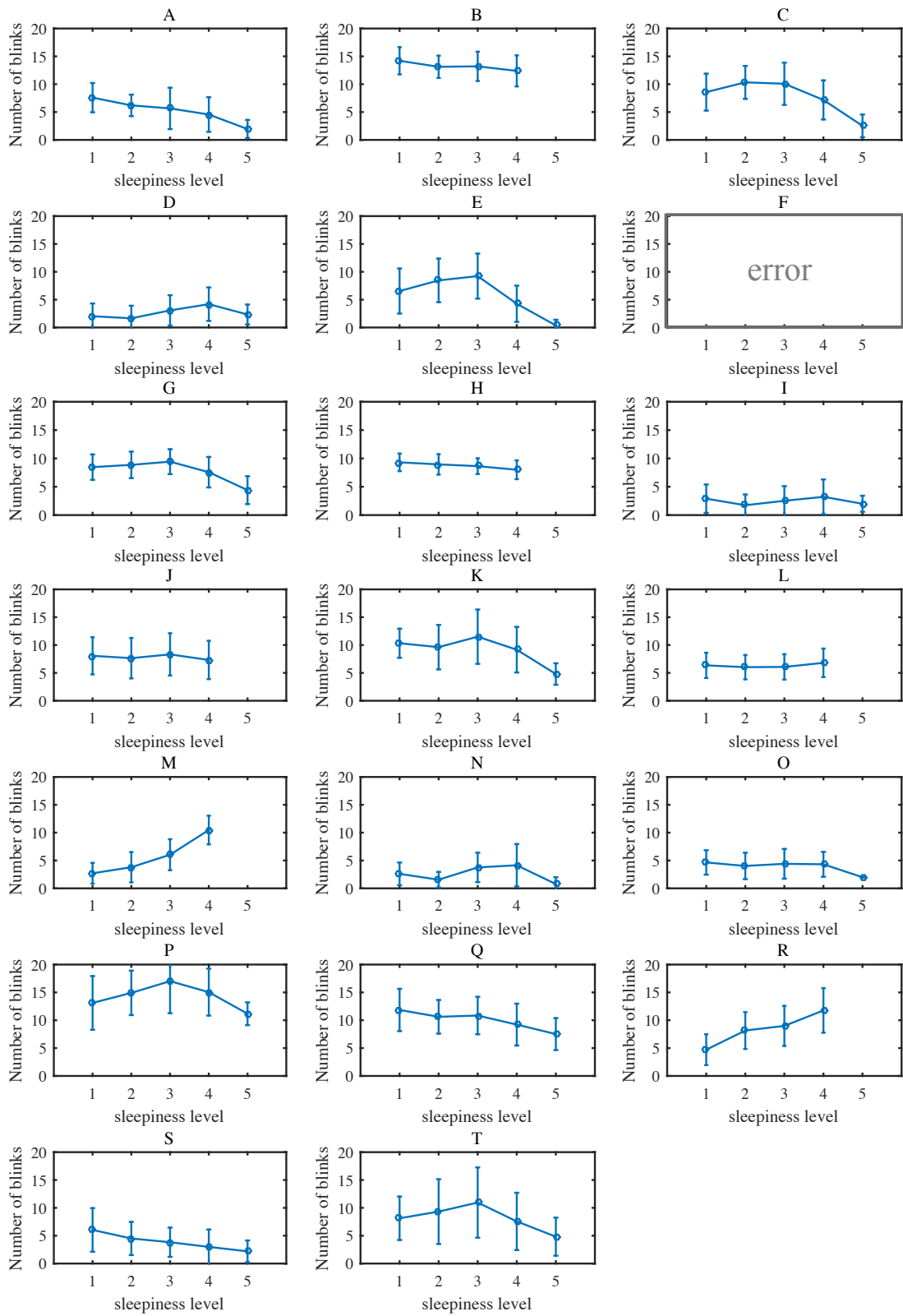


Figure 3.10 Number of blinks for each participant

じる状態に相当することから，評定値が“ 5 ” のときには，瞬きの回数が大きく減ることと解釈する．これは，石川ら [103] の結果と整合するものである．

Figure 3.10 は，実験参加者別に「瞬きの回数」の平均と標準偏差を評価した．Figure 3.10 から，実験参加者 M, R では，顔表情評定値が上がっていくにしたがって瞬きの回数が増えていることがわかる．この実験参加者 M, R は，顔表情評定値が“ 5 ” まで上がらなかったケースである (Figure 3.4)．このことも，実験参加者が眠気と葛藤しながら，負けじと車線中央を走行することを頑張った結果であると推測する．瞬きなどの生体情報に個人差があることは，既往研究 [46, 47, 48] が示すとおりである．

本節では，覚醒度の低下に伴い，ドライバの操舵が乱れることによって車両がふらついてくること，また，瞼を閉じるほどに覚醒度が低下したときには，ドライバの瞬きの回数が減ることを確認した．本実験で得られた計測データは，既往研究の結果 [46, 47, 48, 56, 57, 58, 59, 103] と整合するものであるといえる．

3.4 システム作動時におけるドライバの運転行動の分析

本節では，システム作動時における実験参加者の運転行動データを分析する．実験参加者が居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには，1 段目の制御の開始後に，実験参加者が車両を車線中央に戻す操舵を行うことは難しく，また，2 段目の制御の開始後に，車両を車線中央に維持させることは困難であることを確認する．

3.4.1 1 段と 2 段目の制御の作動回数

1 段と 2 段目の制御の作動回数を，実験参加者別に Figure 3.11 に示す．Figure 3.11 における作動回数は，実験走行 3 試行の合計値を示す．すなわち，計 90 分間の走行における 1 段と 2 段目の制御の作動回数を意味している．Figure 3.11 から，1 段と 2 段目の制御の作動回数は，実験参加者ごとに大きくことなることがわかる．実験参加者 A の走行では，システムは，1 段目の制御を計 218 回実行し，2 段目の制御を計 88 回実行している．これに対して，実験参加者 F, J, L, M, O, R では，システムは，1 段と 2 段目の制御を 1 度も実行していない．ここで，実験参加者 A は，全走行のうちの 46.52% を顔表情評定値“ 5 ” を占めていた (Figure 3.4)．一方で，実験参加者 F, J, L, M, R は，顔表情評定値が“ 5 ” まで上がらなかったケースである (Figure 3.4)．

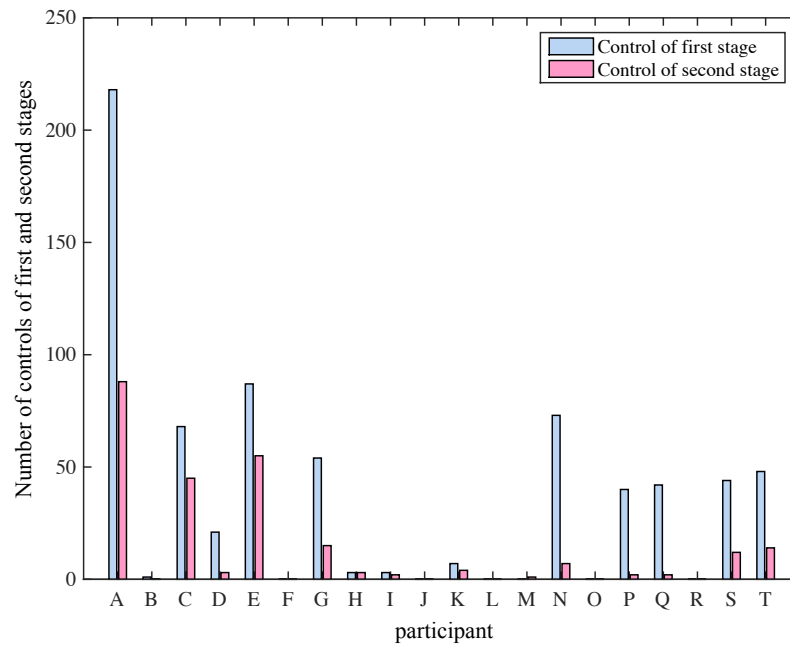


Figure 3.11 Number of controls of the first and the second stages implemented by the system

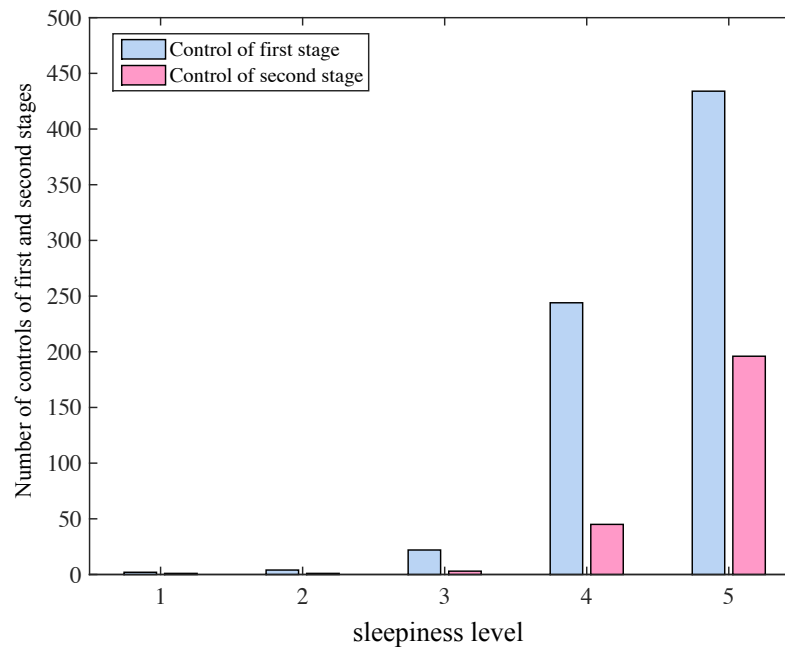


Figure 3.12 Facial expression based sleepiness level and the number of controls of the first and the second stages implemented by the system

1 段 と 2 段目の制御の作動回数を，顔表情評定値別に Figure 3.12 に示す．1 段目の制御を実行した時刻における顔表情評定値の 95.6% は，“ 4 ” または “ 5 ” であった．また，2 段目の制御を実行した時刻における顔表情評定値の 98.4% は，“ 4 ” または “ 5 ” であった．多くの場合において，実験参加者の顔表情評定値が “ 4 ” または “ 5 ” であったときに，双対制御論的運転支援システムは 1 段と 2 段目の制御を実行していたことがわかる．

3.4.2 1 段目の制御が実行される事態に陥った要因

システムが 1 段目の制御を実行しなくてはならなくなった要因を分析する．1 段目の制御が実行される主な要因としては，実験参加者が瞼を閉じようとしていた，または瞼を閉じたが挙げられる．その他にも，実験参加者の脇見や，車両が車線区分線付近を走行していたことが挙げられる．車両が車線区分線付近を走行している場合，1 段目の制御による操舵支援トルクの大きさはわずかであることから，気づかぬうちに 1 段目の制御が実行されることがある．システムが 1 段目の制御を実行しなくてはならなくなった要因の割合を，Figure 3.13 に示す．

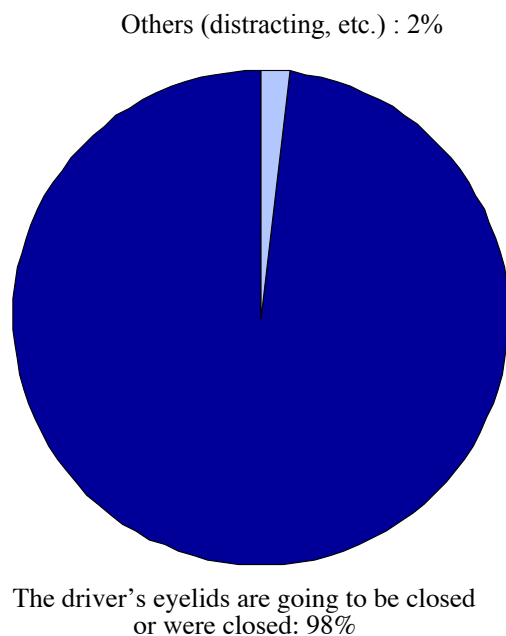


Figure 3.13 Probable causes for the control of the first stage

1 段目の制御が実行されたうちの 98% (695 件) は、実験参加者の脇が閉じようとしていた、または、閉じたことが要因であった。その他の 2% (14 件) は、実験参加者が脇見をしていたことや、車両が車線区分線付近を走行していたことが要因であった。また、システムが「車両が 1 秒後に車線逸脱を起こす」と予測した時刻における車両ヨー角のヒストグラムを Figure 3.14 に示す。車両ヨー角の平均値は、0.91 度 (標準偏差 0.371) であり、非常に浅い角度で車両が車線から逸脱しつつあったことがわかる。なお、車両ヨー角の最大値は、2.4 度であった。

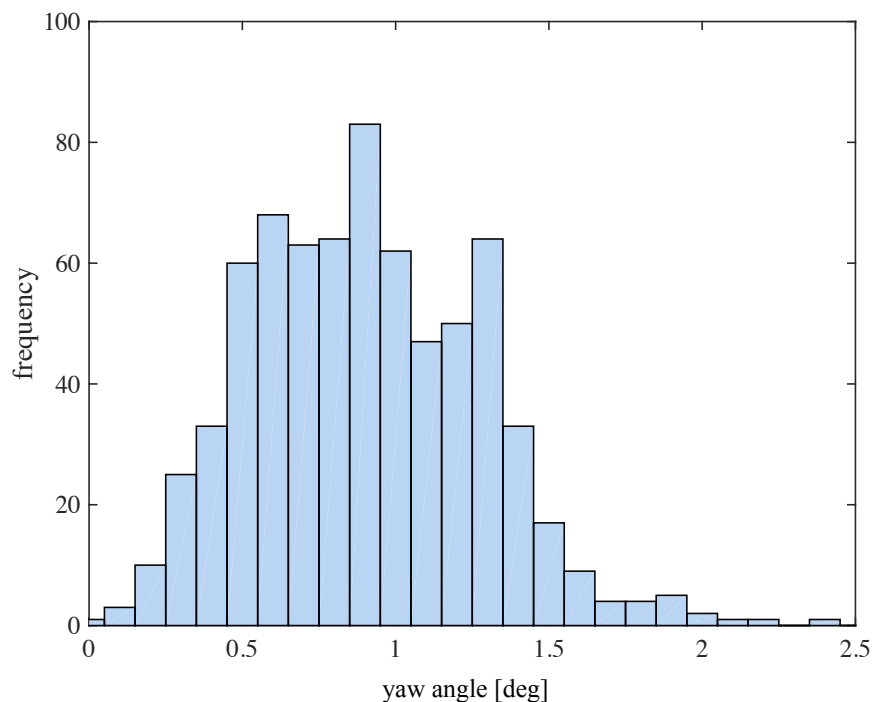


Figure 3.14 Vehicle's yaw angle at the time point when the system anticipated that lane departure may occur within one second

3.4.1 節において、多くの場合、実験参加者の顔表情評定値が“4”または“5”であったときに、双対制御論的運転支援システムが1段と2段目の制御を実行していたことを確認した。3.4.2 節においては、システムが車線逸脱を予測し、1段目の制御を実行した回数は、全走行で計709回であったが、その98%は、実験参加者の脇が閉じようとしていた、または、閉じたことが要因であったことがわかった。本実験においては、双対制御論的運転支援システムを搭載することによって車両が車線から逸脱していったことは1度もなかった。このように、双対制御論的運転支援システムでは、

ドライバ状態の判定が下されないことによって支援が実行されないこともあり得る既存の運転支援システム [51, 52, 53, 54] と異なり，ドライバ状態の判定にかかわらずに車両の安全確保を図ることができるといえる．

3.4.3 1 段目の制御開始後におけるドライバの行動

1 段目の制御を開始後において実験参加者が行った行動を分析する．システムが 1 段目の制御を実行したとき，車両は，車線区分線付近を 5 秒間走行することになる．このとき，実験参加者が行った行動は，つぎの三つに大別できた．

1. 1 段目の制御の開始後に，実験参加者は瞼を開き，車両を車線中央に戻す操舵を行った．
2. 1 段目の制御の開始後に，実験参加者は瞼を開いたが，車両を車線中央に戻す操舵を行うことができなかった．
3. 1 段目の制御の開始後も実験参加者の瞼は閉じたままであり，操舵を行うこともできなかった．

実験参加者によっては，視線計測装置による瞼の開度の計測が精度よく行えていないことがあることから，本節における瞼の動きに関する分析は録画映像を用いた．顔表情評定値別に，上記の三つの対応行動の件数を Figure 3.15 に示す．

Figure 3.15 から，「非常に眠そう (瞼を閉じる)」を示す評定値 “ 5 ” の場合でも，実験参加者は「1 段目の制御の開始後に，車両を車線中央に戻す操舵を行えている」ことを確認できる一方で，「1 段目の制御の開始後も，実験参加者の瞼は閉じたままであり，車両を車線中央に戻す操舵を行うこともできなかった」ことが，評定値 “ 4 ” のときと比較して大きく増えていることがわかる．「瞼を閉じるほど覚醒度が低下した」とときには，ドライバはシステムの操舵制御を認識できなくなることが多くなると解釈できる．

「1 段目の制御の開始後に，実験参加者は瞼を開き，車両を車線中央に戻す操舵を行った」ケースの計 460 件のデータを用いて，システムが 1 段目の制御を実行してから，システムが「実験参加者は車両を車線中央に戻す操舵を行った」と判定するまでの時間長を分析した．その結果を，Figure 3.16 に示す．

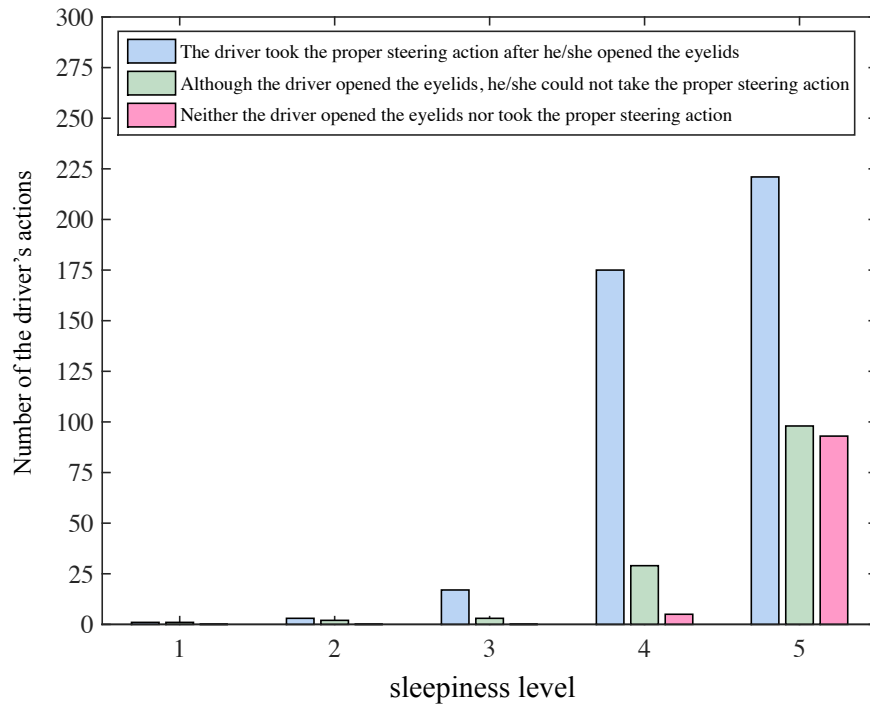


Figure 3.15 Facial expression based sleepiness level and the driver's steering actions

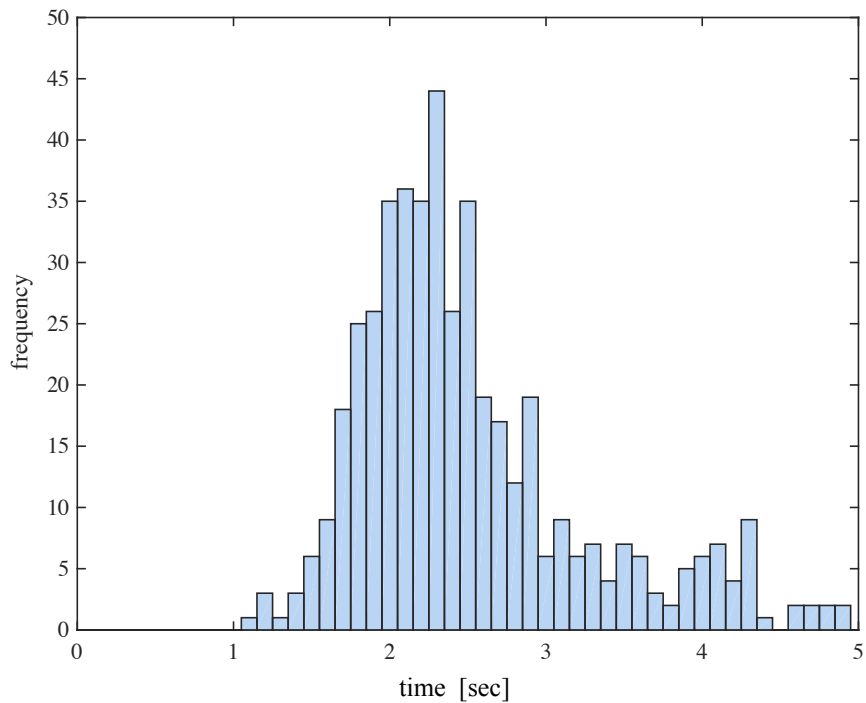


Figure 3.16 Time elapsed before the driver took the proper steering action after the system implemented the control of the first stage

本実験では、システムが、1 段目の制御を開始してから 2 段目の制御を開始するまでの時間長を 5 秒間に設定していることから、Figure 3.16 に示す時間長は最大で 5 秒である。Figure 3.16 をみると、時間長の最頻値は、2.3 秒であったことがわかる。このことから、本実験で設定した 1 段目の制御を開始してから 2 段目の制御を開始するまでの時間長 5 秒間は決して短い時間ではなく、5 秒間の余裕時間があれば、ドライバは車両を車線中央に戻す操舵を実行できるといえる。

3.4.4 1 段と 2 段目の制御の作動例

3.4.3 節において、実験参加者の顔表情評定値が“ 5 ”であった場合において、「1 段目の制御の開始後も、実験参加者の瞼は閉じたままであり、車両を車線中央に戻す操舵を行うこともできなかった」ことが、評定値“ 4 ”のときと比較して大きく増えていることを確認した。この結果から、居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには、1 段目の制御の開始後に、ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行うことは困難であると解釈できる。ドライバが適正な状況認識を確保できない場合には、2 段目の制御の開始後も車両を車線中央に維持させることは困難であることから、システムが 1 段と 2 段目の制御を何度も引き続いて実行する事態に陥ると考えられる。

本節では、システム作動時におけるドライバの運転行動の時系列データの例を示し、システムが何度も引き続いて 1 段、ならびに 2 段目の制御を実行する状況を確認する。

実験参加者 E の第 1 走行目の 0 - 900 秒間の時系列データを Figure 3.17 に示し、また、900 - 1800 秒間の時系列データを Figure 3.18 に示す。さらに、第 2 走行目の 0 - 900 秒間を Figure 3.19 に示す。計測データは、(1) システムの状態 [1: 1 段目の制御の実行, 2: 2 段目の制御の実行], (2) 車両横位置 [m], (3) 操舵角度 [degree], (4) システムの操舵支援トルク [Nm], (5) 瞼の開度 [mm], (6) 顔表情評定値 [1: 全く眠くなさそう, 2: やや眠そう, 3: 眠そう, 4: かなり眠そう, 5: 非常に眠そう] である。なお、車両横位置は、車線中央を 0 で示し、また、車線区分線の位置を 1.85 と -1.85 で示す。瞼の開度のデータのほとんどは、約 5 mm を下回ることがない。これは、視線計測装置の計測精度によるものである。瞼の開度約 5 mm という値は、実験参加者の瞼が閉じた状態に相当する。

Figure 3.17 における瞼の開度をみると、300 秒の時刻付近で、実験参加者の瞼が下

がってきていることを読み取ることができる．300 秒から 340 秒の時刻の間の顔表情
 評定値をみると，評定値が “ 2 ” から “ 5 ” (瞼が閉じた状態) へ上がっていることが
 わかる．また，システムの作動状態をみると，344 秒と 410 秒の時刻において，シス
 テムは 2 段目の制御を実行している．その後の時刻においては，実験参加者の瞼の開
 度が，約 5 mm の開度の付近を示しながら，システムが 1 段 または 2 段目の制御を
 引き続いて何度も実行していることがわかる．

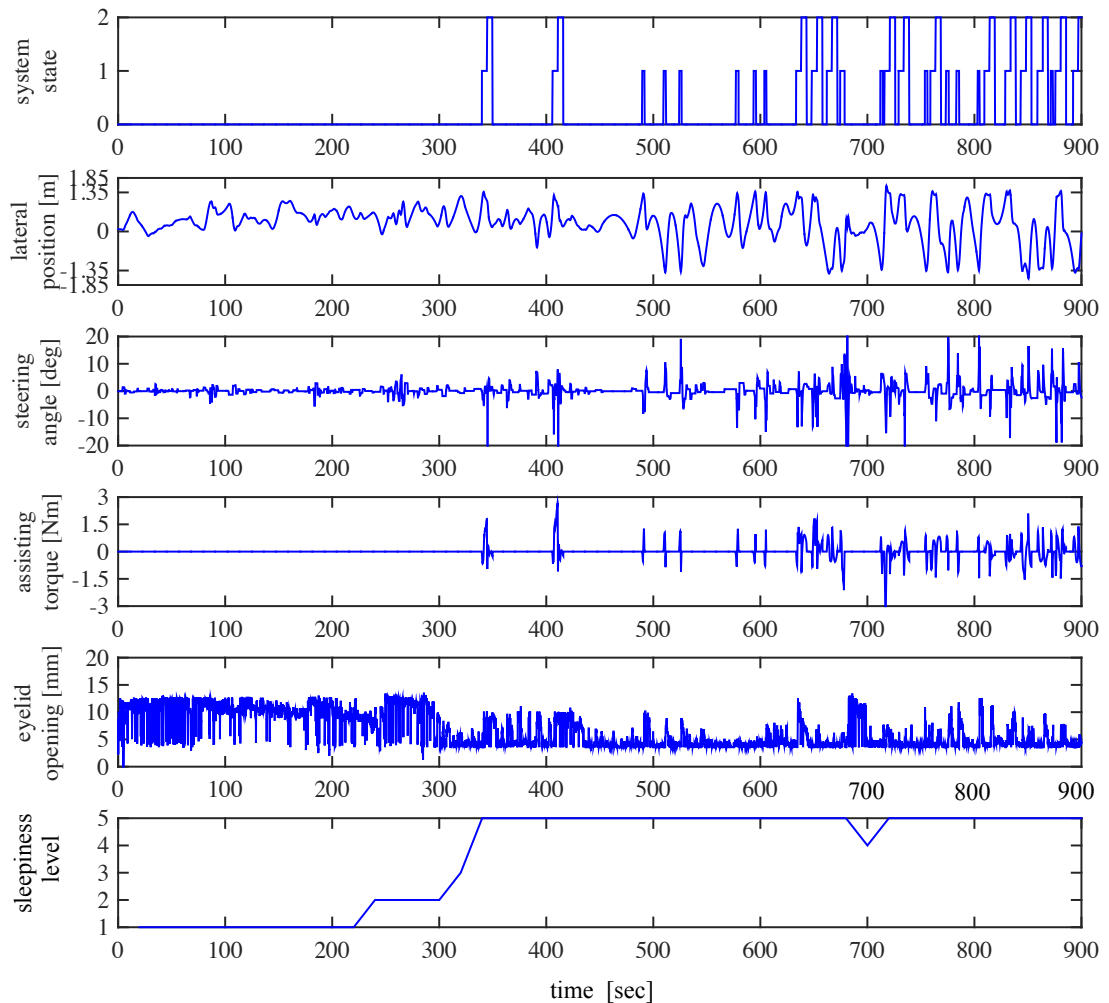


Figure 3.17 Time-series data of 900 seconds for the interval [0, 900] during trial 1 of participant E

Figure 3.18 は，Figure 3.17 のその後の 900 秒間の計測データである．約 930 秒の
 時刻における瞼の開度をみると，実験参加者 E の瞼の開度は，約 5 mm から約 13 mm
 に上がっている．また，920 秒から 960 秒の時刻の間の顔表情評定値をみると，“ 5 ”
 から “ 3 ” へ下がっている．これらのことから，930 秒の時刻付近において，実験参

加者 E の覚醒度が上がったものと解釈できる．約 960 秒から約 1100 秒の時刻における操舵角度をみると，操舵角度が約 -20 度から 約 20 度の間で頻繁に変化していることがわかる．これは，実験参加者 E が意図的にステアリングを左右に操舵したことによるものである．この行動は，実験参加者 E が眠気と葛藤している行動であると解釈できる．しかし，約 1100 秒の時刻を境に，操舵角度はほぼ 0 の角度をとる．その後の約 150 秒間は，ほぼ無操舵の状態で車両が走行していることがわかる．約 1110 秒の時刻における瞼の開度をみると，瞼の開度は約 13 mm から 約 5 mm へ下がっている．1100 秒から 1140 秒の時刻における顔表情評定値をみると，評定値は，“ 3 ” から “ 5 ” へ上がっていることがわかる．これらのことから，1100 秒の時刻付近において，実験参加者の覚醒度が，瞼を閉じるほどに低下したものと推測する．

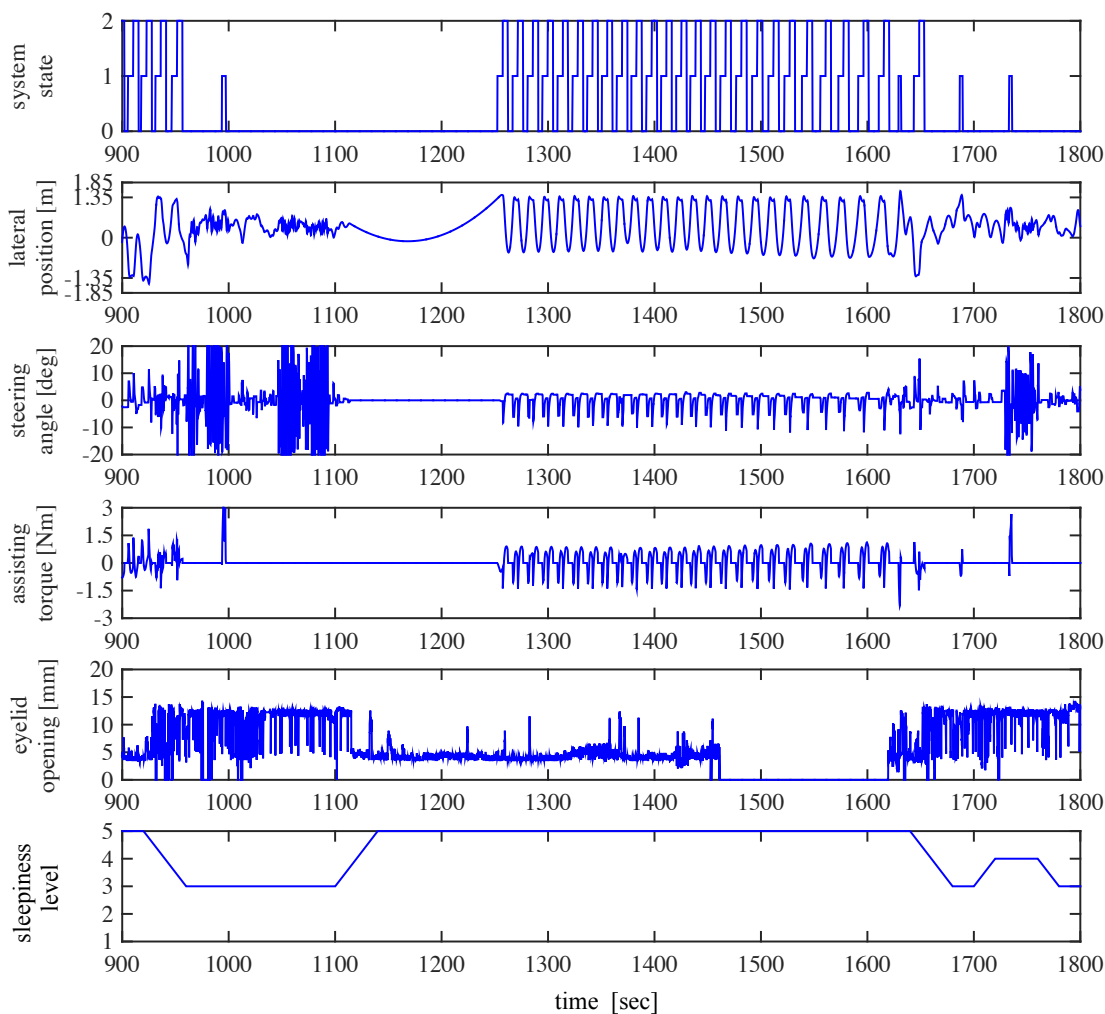


Figure 3.18 Time-series data of 900 seconds for the interval [900, 1800] during trial 1 of participant E

システムの作動状態をみると、システムは、1257 秒の時刻に 2 段目の制御を実行し、その後は、引き続いて、2 段目の制御を何度も実行している状況を確認できる。2 段目の制御を実行した 1257 秒の時刻からの 391 秒の間に、システムは、2 段目の制御を計 28 回実行している。1 段目の制御の作動時間が 5 秒間、また、2 段目の制御の作動時間が 5 秒間であることから、391 秒間のうち 280 秒間 (72%) はシステムが作動していたことになる。1450 秒の時刻付近における瞼の開度をみると、瞼の開度が 0 mm になっていることがわかる。これは、実験参加者 E の顔の向きが下がり、視線計測装置による視行動のデータ計測が出来なくなったためである。

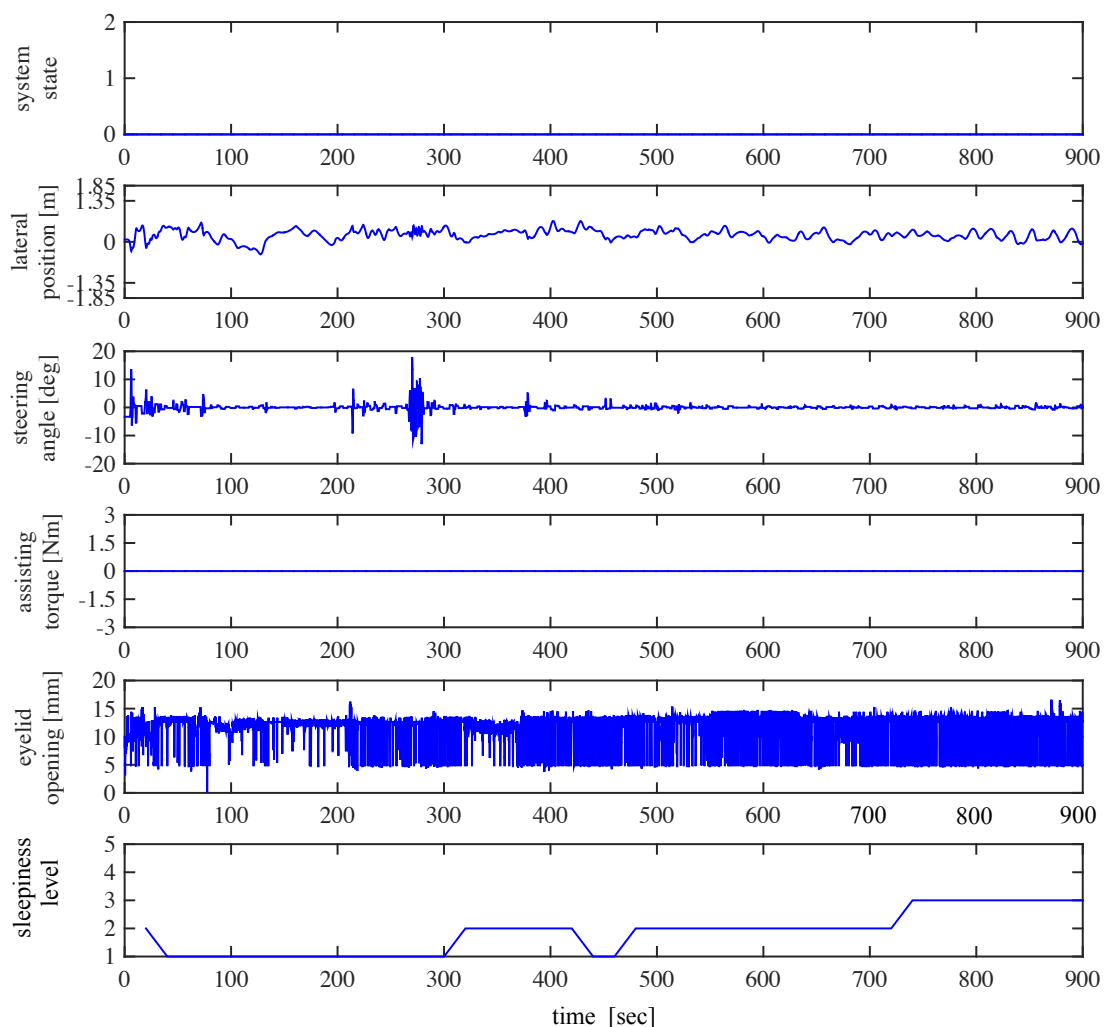


Figure 3.19 Time-series data of 900 seconds for the interval [0, 900] during trial 2 of participant E

Figure 3.19 は、実験参加者 E の第 2 走行目の 0 - 900 秒間の計測データである。シ

システムの作動状態をみると、システムは、一度も 1 段と 2 段目の制御を実行していないことがわかる。瞼の開度をみると、瞬きを除いて、900 秒間にわたって約 13 mm の付近を示している。また、顔表情評定値をみると、評定値は“ 1 ”から“ 3 ”を示している。第 2 走行目の 0 - 900 秒間において、実験参加者 E は、瞼が閉じるほどに覚醒度が低下しなかったものと推測する。

実験参加者 E の走行における 1 段と 2 段目の制御の作動例から、システムが、1 段と 2 段目の制御を一度実行する場合、その後も、引き続いて、1 段と 2 段目の制御を何度も実行していることが確認できた。

3.4.5 操舵制御に対するドライバの反射的な操舵

本実験において、システムは、1 段目の制御を計 709 回実行し、また、2 段目の制御を計 253 回実行している。本節では、1 段と 2 段目の制御の開始後において、実験参加者が反射的な操舵を行ったケースの有無、ならびに実験参加者が操舵制御に驚いたケースの有無を分析する。ただし、実験参加者が操舵制御に驚いたか否かは、運転行動データの計測値からは判断できない。本節では、実験参加者の録画映像から、操舵制御に驚いたか否かを判断した。

1 段目の制御の開始後において、実験参加者が反射的に車線逸脱方向へステアリングを操舵した、または、1 段目の制御に驚いたケースは、0 件であった。これは、車線区分線付近におけるドライバの反射的な操舵を懸念し、1 段目の制御が滑らかな操舵制御となるように重み係数を定めた結果である。これに対して、2 段目の制御の開始後において、実験参加者が反射的に車線逸脱方向へステアリングを操舵した、または 2 段目の制御に驚いたケースは、11 件 (4.3%) であった。その一例として、実験参加者 N 第 3 走行目の 1065 秒から 1081 秒の時刻における (1) システムの状態、(2) 車両横位置 [m]、(3) 操舵角度 [degree]、(4) システムの操舵支援トルク [Nm] の計測データを、Figure 3.20 に示す。

システムの作動状態をみると、システムは、1074.5 秒の時刻において 2 段目の制御を実行している。操舵角度をみると、1074.5 秒の時刻において車両を車線中央に戻す操舵角度が生じていることがわかる。しかし、1074.5 秒の時刻のすぐ後には、車線逸脱方向への操舵角度が生じていることもわかる。この車線逸脱方向への操舵は、実験参加者が操舵したものである。運転走行の録画映像を確認したところ、実験参加者が

反射的に操舵をおこなったものであると解釈ができるものであった．操舵支援トルクをみると，1074.5 秒の 1 サンプル時間 (0.0083 秒) 前の時刻において 1.34 Nm であった操舵支援トルクが，1074.5 秒の時刻には -1.11 Nm に変化している．2 段目の制御の開始時刻において，システムは，目標とする車両横位置を車線逸脱判定ラインから車線中央位置へ切り替えることから，システムの目標横位置と車両重心位置の偏差が急に生じることになる．このことから，2 段目の制御においては，操舵支援トルクが大きさが急に変化することになる．操舵支援トルクの大さの急な変化が生じたことによってドライバが反射的に車線逸脱方向へ操舵を行ったものと解釈する．

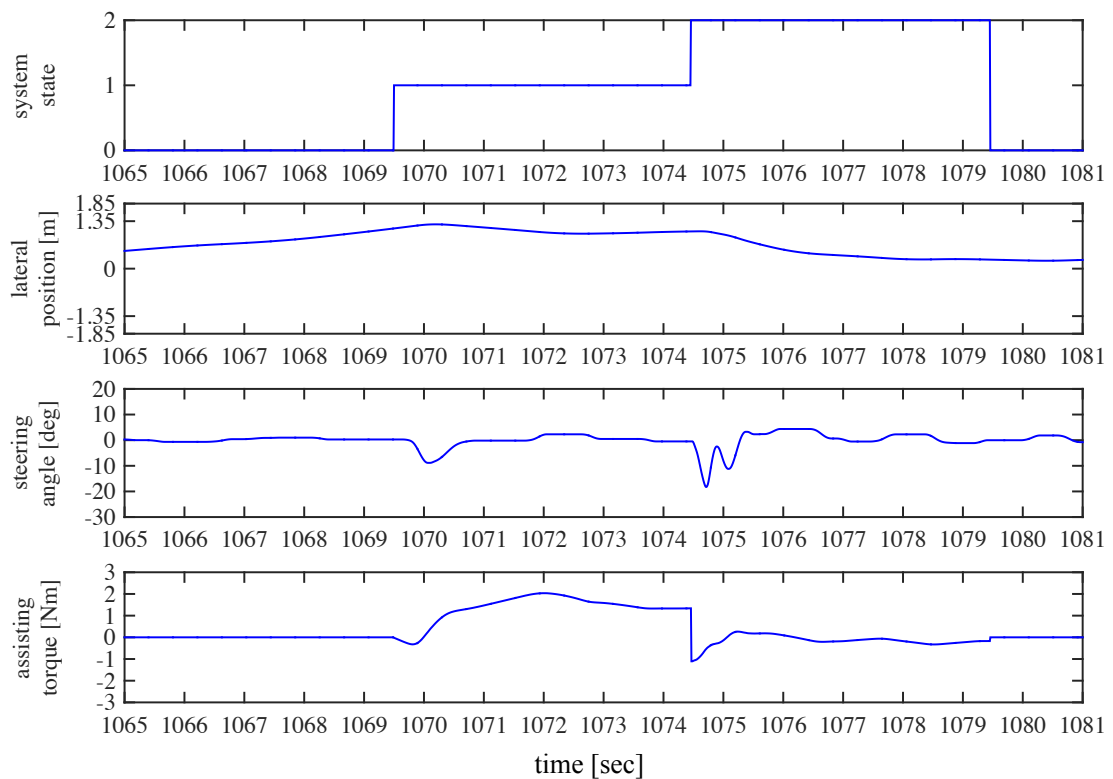


Figure 3.20 Reflex reaction of the driver that was caused by the system’s control of the second stage

操舵制御にドライバが驚き，反射的に操舵を行うことがあることは，既往研究でも確認されている [97, 98]．Figure 3.20 に示すとおり，実験参加者が反射的に操舵を行った場合には，操舵が左右に乱れることになる．しかしながら，本実験で計測されたデータにおいては，車両が左右にふらつくことによって危険な状態になることはなかった．2 段目の制御の開始後において，ドライバが反射的に操舵を行った場合においても，システムは車両を車線中央に戻す操舵トルク制御を実行していることから，車両の安全

確保を図ることができるといえる。

3.4.6 1 段目の制御開始後におけるドライバの意図しない操舵

本節では、1 段目の制御開始後におけるドライバの意図しない操舵の有無を分析する。顔表情評定値が“4”または“5”であった実験参加者が、1 段目の制御の開始後において、ステアリングを握っている腕の自重などによって意図せずにステアリングを操舵した場合、システムが「ドライバは車両を車線中央に戻す操舵を行った」と判断することはあり得る。このような場合、システムは正しくドライバ状態を同定できないことになる。

本実験においては、実験参加者がステアリングを握っている腕の自重などによって意図せずにステアリングを操舵したことによって、システムが「ドライバは車両を車線中央に戻す操舵を行った」と判断したケースは、1 段目の制御が実行された計 709 件のうち 0 件であった。本論文における双対制御論的運転支援システムでは、操舵支援トルクに (2.70a), (2.70b) 式のゲイン $K(\psi(t))$ を乗じている。設計者は、 $K(\psi(t))$ のパラメータを調整することによって 1 段目の制御のオーバーライドの行い易さを決定できる。双対制御論的運転支援システムでは、2.7.2 節の Figure 2.29 に示すように、1 段目の制御の開始後に、ドライバが車両を車線中央に戻すためには、約 1 Nm の操舵反力をオーバーライドする必要がある。これは、1 段目の制御の開始後に、ステアリングを握っている腕の自重などによって、ドライバが意図していないにもかかわらずステアリングを操舵し、システムが「ドライバは車両を車線中央に戻す操舵を行った」と判断することを懸念したためである。その結果として、本実験においては、1 段目の制御開始後におけるドライバの意図しない操舵が確認されなかったものと解釈する。

これに対して、1 段目の制御の開始後に、実験参加者が操舵を行って車両を車線中央に戻そうとしたにもかかわらず、約 1 Nm の操舵反力をオーバーライドすることができずに、システムが 2 段目の制御を実行したケースは、1 段目の制御が実行された計 709 件のうち 11 件 (1.6%) 確認された。これは、実験参加者が、適切に制御をオーバーライドすることができなかったことを意味する。ゲイン $K(\psi(t))$ のパラメータの調整については、改善の余地があるといえる。

3.4 節では、システム作動時における実験参加者の運転行動データを分析した。多くの場合において、実験参加者の顔表情評定値が“4”または“5”のときに、双対制

御論的運転支援システムが 1 段と 2 段目の制御を実行していたことを確認した。また、実験参加者の顔表情評定値が“ 5 ”であった場合において、「1 段目の制御の開始後も、実験参加者の瞼は閉じたままであり、車両を車線中央に戻す操舵を行うこともできなかった」ことが、評定値“ 4 ”のときと比較して大きく増えていたことを確認した。この結果から、居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには、1 段目の制御の開始後に、ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行うことは困難であると解釈できる。さらに、実験参加者 E の走行における 1 段と 2 段目の制御の作動例から、システムが、1 段や 2 段目の制御を一度実行する場合、その後も、引き続いて、1 段や 2 段目の制御を何度も実行していることを確認した。ドライバが居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには、ドライバは適正な状況認識を確保することができないことから、2 段目の制御の開始後に、車両を車線中央に維持させることは困難であるといえる。これらの結果から、3.2.6 節の作業仮説は支持されたといえる。

3.5 ドライバ状態推定手法の構築と評価

ドライバが居眠りをするほどに覚醒度が低下したならば、ドライバは適正な状況認識を確保することができないことから、2 段目の制御の終了後において車両を車線中央に維持させる修正操舵を行うことは困難である。その結果、システムは 2 段目の制御を何度も引き続いて実行することになる。ここでの課題は、「どの程度の時間長 t_e 秒の間に何回の 2 段目の制御が実行されたときに、システムは、ドライバは状況認識不全状態にあると判断すればよいか」である。本節では、ドライバ状態の同定に要する時間とドライバ状態を正しく同定できる精度の間のトレードオフの関係を述べるとともに、2 段目の制御の作動間隔に基づいたドライバ状態推定の手法を構築し、その有効性を評価する。

3.5.1 ドライバ状態の同定

ドライバ状態の同定に要する時間とドライバ状態を正しく同定できる精度の間のトレードオフの関係について述べる。ここで、システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と同定したときの結果は、Table 3.6 に示す 4 つに分類できる。

Table 3.6 True state of the driver and judgment of the system

		System's judgment	
		normal	off-normal
True state of the driver	normal	Correct rejection	False alarm
	off-normal	Missed detection	Hit

Missed detection：ドライバが状況認識不全状態にあるときに，システムは「ドライバは通常の状態にある」と判断する．

False alarm：ドライバが通常の状態にあるときに，システムは「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断する．

双対制御論的運転支援システムにおいて，システムの判断が“ Missed detection ”となる場合は，つぎの状況である．ドライバが状況認識の不全に陥っている状況を考えよう．ドライバは適正な状況認識を確保することができず，車両を車線中央に維持させる修正操舵を行うことは困難であることから，システムは1段目の制御を何度も引き続いて実行することになる．システムが1段目の制御を何度も実行するたびに，ドライバが意図せずに車両を車線中央に戻す操舵を行ったならば，システムは「ドライバは適正な状況認識が可能な程度に覚醒している」と判断することになる．このような場合，システムの判断は，“ Missed detection ”となる．

しかし，3.4.6 節に示したように，1段目の制御の開始後において，ドライバは，車両を車線中央に戻すために約 1 Nm の操舵反力をオーバーライドする必要がある．このことから，本実験においては，実験参加者が意図せずにステアリングを操舵し，システムが「ドライバは車両を車線中央に戻す操舵を行った」と判断したケースは確認されなかった．この結果から，本論文における双対制御論的運転支援システムにおいて，システムの判断が“ Missed detection ”となるケースは少ないと考える．

これに対して，システムの判断が“ False alarm ”となる場合は，つぎの状況である．ドライバはまだ運転を継続できる状態にある状況を考えよう．ドライバの一時的な覚醒度の低下によって，システムが1段目の制御を実行したとする．このとき，車両を

車線中央に戻す操舵が遅れた（間に合わなかった）など、ドライバが適切な操舵を行えなかった場合、システムは「ドライバは状況認識の不全に陥っていることが疑われる」と判断し、2 段目の制御を実行することになる。もし、このような状況が続き、システムが 2 段目の制御を何度も実行したときには、システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断することはあり得る。このとき、ドライバはまだ運転を継続できると主張したい場合には、システムの判断は、“ False alarm ” となる。

3.4.3 節における Figure 3.16 に示すように、システムが 1 段目の制御を実行してから、システムが「ドライバは車両を車線中央に戻す操舵を行った」と判定するまでの時間長の最頻値は、2.3 秒であったことから、ドライバが通常の状態であれば、車両を車線中央に戻す操舵が間に合わなかったということは少ないと考えられる。しかし、Figure 3.15 に示すように、1 段目の制御が実行された計 709 件のうち、133 件 (18.76%) は、「1 段目の制御の開始後に、実験参加者は瞼を開いたが、車両を車線中央に戻す適切な操舵を行うことができなかった」というケースである。このことから、システムの判断が、“ False alarm ” となるケースはあり得る。

ここで、ドライバ状態の同定に要する時間とドライバ状態を正しく同定できる精度の間には、トレードオフの関係がある。ドライバの状態推定に要する時間を短く設定するならば、早期にドライバ状態を同定できる。しかしながら、システムの判断が“ False alarm ” となるケースもあり得る。これに対して、ドライバの状態推定に要する時間を長く設定するならば、早期にドライバ状態を同定することができない一方で、システムの判断が“ False alarm ” となるケースを少なくすることができる。

3.5.2 一個抜き交差検証を用いたドライバ状態推定の有効性評価

ドライバが居眠りをするほどに覚醒度が低下したならば、ドライバは適正な状況認識を確保することができないことから、2 段目の制御の開始後において車両を車線中央に維持させる修正操舵を行うことは困難である。その結果、システムは、2 段目の制御を何度も引き続いて実行することになる。ここで、3.4 節のシステム作動時におけるドライバの運転行動の分析結果から、ドライバが通常の状態にあるときと、状況認識不全状態にあるときとでは、1 段と 2 段目の制御の作動間隔に差異があると考えられる。

1 段目の制御の作動間隔：1 段目の制御が開始されてからつぎの 1 段目の制御が開始されるまでの時間長

2 段目の制御の作動間隔：2 段目の制御が開始されてからつぎの 2 段目の制御が開始されるまでの時間長

本節では、1 段と 2 段目の制御の作動間隔を定量的に分析し、2 段目の制御の作動間隔に基づいたドライバ状態推定の手法を構築する。また、本実験で得られた、実験参加者が瞼を閉じ、居眠りするほどに覚醒度が低下したデータは限られることから、一個抜き交差検証 (leave-one-out cross-validation: LOOCV) を用いて、構築したドライバ状態推定の手法の有効性を評価することとする。

一個抜き交差検証では、標本群から 1 つの事例だけを抜き出して検証事例とし、残りを学習事例とする。これを全事例が一回ずつ検証事例となるように検証を繰り返す。本実験では、2 段目の制御が実行された実験参加者は 14 名 (実験参加者 *A, C, D, E, G, H, I, K, M, N, P, Q, S, T*) であった。このことより、本節における一個抜き交差検証では、14 名の実験参加者のうち 1 名の計測データを検証事例とし、残りの計測データを学習事例とする。また、14 名の計測データが一回ずつ検証事例となるように検証を繰り返すことになる。本節では、実験参加者 *A* を検証事例としたケースの一例を示し、実験参加者 *A* を除いた計測データを用いたドライバ状態推定手法の構築について述べる。また、14 名の計測データが一回ずつ検証事例となるように検証を繰り返し、ドライバ状態の同定に要する時間とドライバ状態を正しく同定できる精度の間のトレードオフの観点から、構築したドライバ状態推定の手法の有効性を評価する。

実験参加者 *A* を検証事例としたケース

実験参加者 *A* の計測データを検証事例とし、残りの計測データを学習事例としたケースの一例を示し、2 段目の制御の作動間隔に基づいたドライバ状態推定手法の構築について述べる。

本節では、ドライバが通常の状態にあるときと、状況認識不全状態にあるときでは、1 段と 2 段目の制御の作動間隔に差異があるものと考え、顔表情評定値が “4” ならびに “5” であるときにおける 1 段目の制御の作動間隔と、2 段目の制御の作動間隔を算出した。1 段目の制御の作動間隔のヒストグラムを Figure 3.21 に示し、2 段目の制御の作動間隔のヒストグラムを Figure 3.22 に示す。

Figure 3.21 における顔表情評定値が “4” と “5” のときの 1 段目の制御の作動間隔を比較すると、顔表情評定値が “5” のときには、システムが 1 段目の制御を開

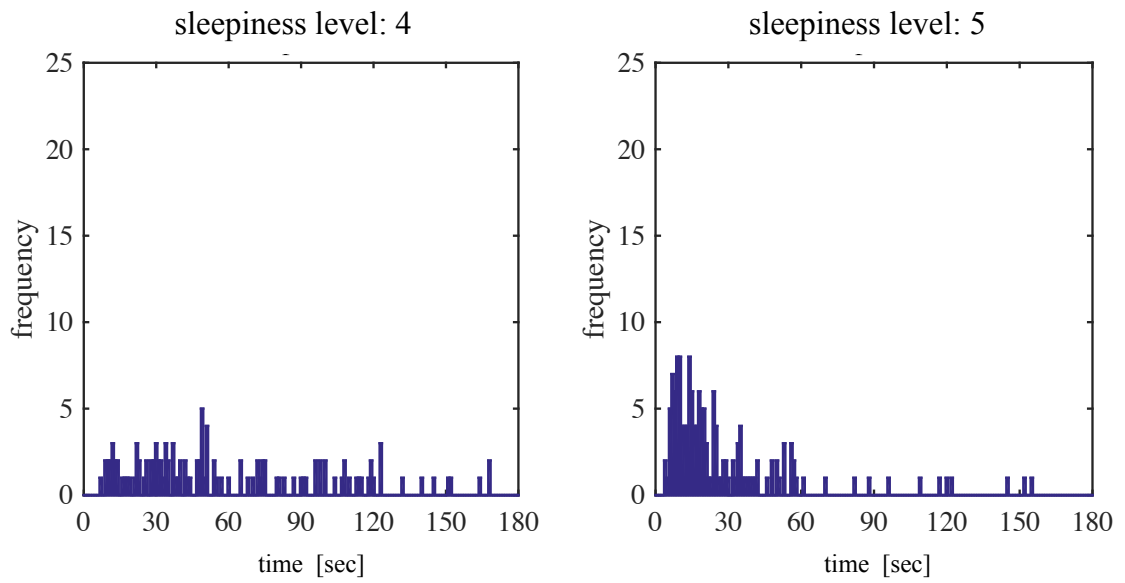


Figure 3.21 Time interval between the two consecutive controls of the first stage

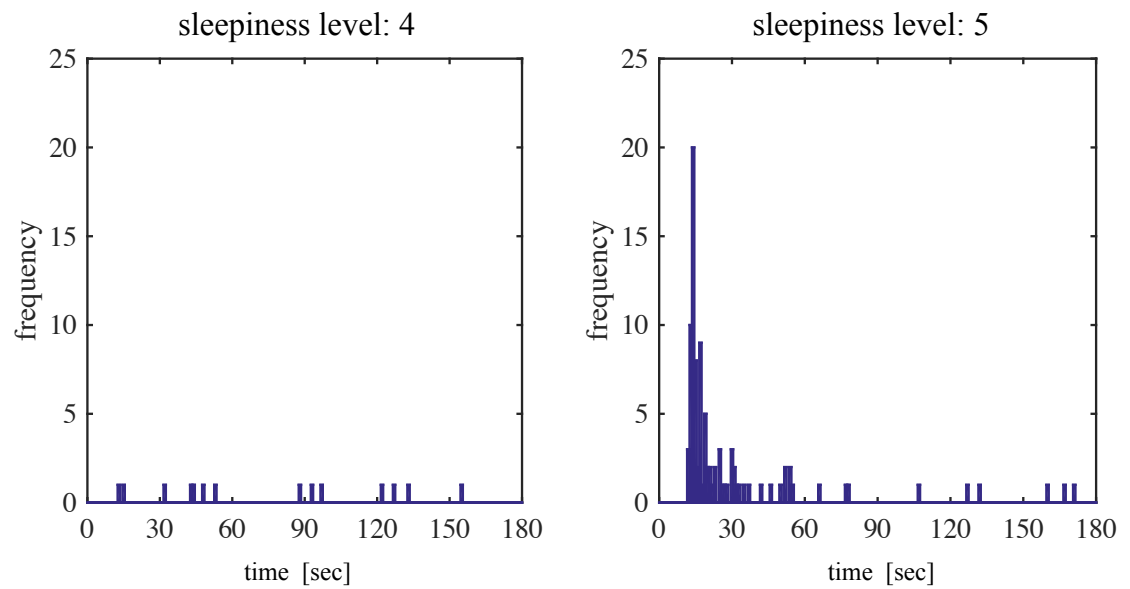


Figure 3.22 Time interval between the two consecutive controls of the second stage

始した後の 30 秒間において、再び、システムが 1 段目の制御を実行していることが多いことを読み取ることができる。Figure 3.22 の 2 段目の制御の作動間隔をみると、その傾向は Figure 3.21 と同様であるが、1 段目の制御の作動間隔と比較すると、その傾向はより顕著である。

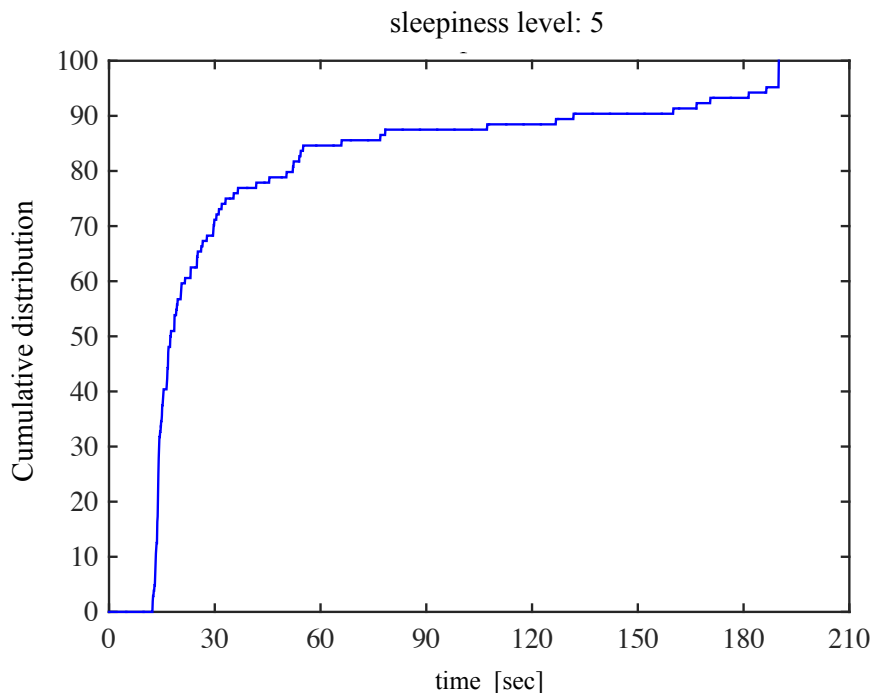


Figure 3.23 Cumulative distribution for the time interval between the two consecutive controls of the second stage

顔表情評定値が“ 5 ”のときにおける 2 段目の制御の作動間隔に対する累積度数を Figure 3.23 に示す。Figure 3.23 から、システムが 2 段目の制御を 1 度実行した場合、そのうちの 7 割は、2 段目の制御の開始時刻から 29.2 秒のうちに再び 2 段目の制御を実行しなくてはならない事態に陥っていることがわかる。ここで、システムが 2 段目の制御を終了した時刻における車両ヨー角の絶対値を Figure 3.24 に示す。Figure 3.24 から、2 段目の制御の終了時刻において、車両が 0 度より大きいヨー角をもっていることが多いことがわかる。もしドライバが車両ヨー角を 0 にするような修正操舵を行わないならば、再び、システムが 1 段目の制御を実行しなければならなくなると思われる。ドライバが状況認識不全状態にあるときには、ドライバが車両を車線中央に維持させる修正操舵を行うことは困難であることから、システムが頻繁に作動しなければならない事態に陥る。ただし、これらの分析結果は、本実験では 2 段目の制御

を 5 秒間で終了することにしたこと，また，実験参加者にはステアリングの 10 時 10 分を握ることを指示したことが影響を与えている．

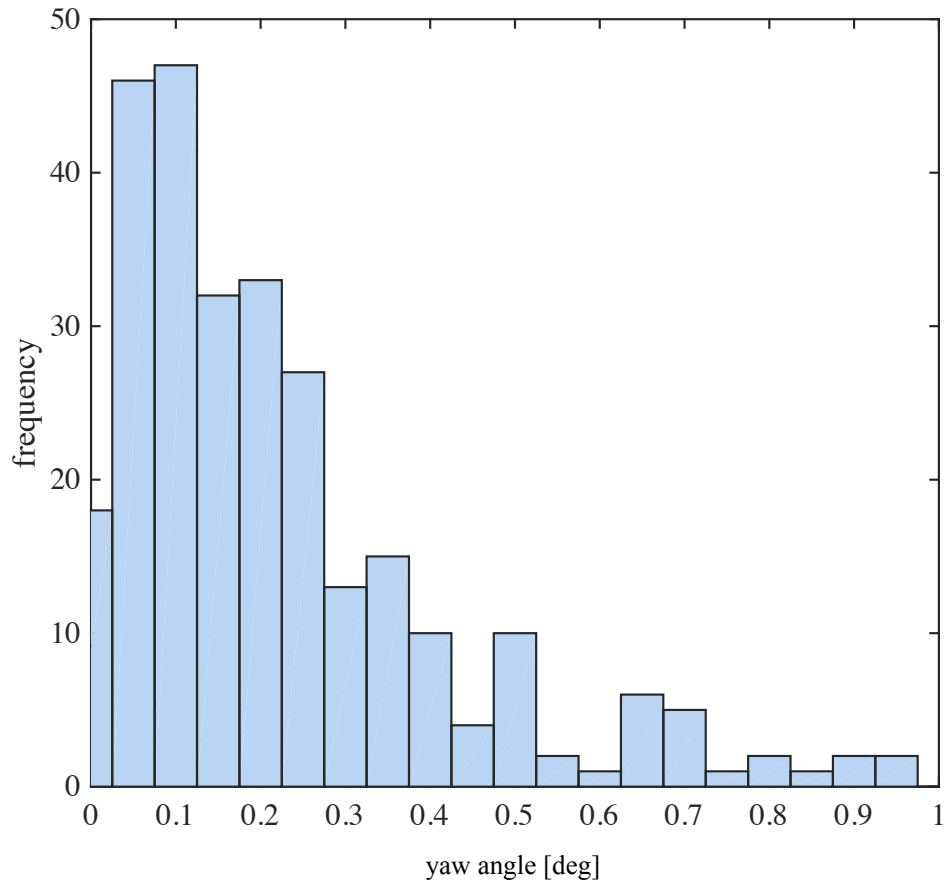


Figure 3.24 Vehicle's yaw angle at the time point when the system's control of the second stage was completed

また，システムが「はじめて」1 段ならびに 2 段目の制御を実行した時刻における実験参加者の顔表情評定値，システムが「2 度目」の 1 段ならびに 2 段目の制御を実行した時刻における実験参加者の顔表情評定値，システムが「3 度目」の 1 段ならびに 2 段目の制御を実行した時刻における実験参加者の顔表情評定値を分析する．1 段と 2 段目の制御別に，顔表情評定値の割合を Figures 3.25, 3.26 に示す．Figure 3.25 から，1 段目の制御の作動を重ねるほどに，実験参加者の覚醒度が低下するような傾向を読み取れる．また，Figure 3.26 から，2 段目の制御の作動を重ねるほどに，実験参加者の顔表情評定値が“5”であった割合が増加している．

1 段ならびに 2 段目の制御の作動間隔を分析した結果，システムは，1 段ならびに 2

段目の制御を何度も引き続いて実行していることを定量的に確認した。ドライバが瞼を閉じるほどに覚醒度が低下したときには、システムが何度も 2 段目の制御を実行しなければならない事態に陥るといえる。また、2 段目の制御の作動を重ねるほどに、実験参加者の顔表情評定値が “ 5 ” であった割合が増加しており、ドライバの覚醒度が低下している傾向にあるといえる。

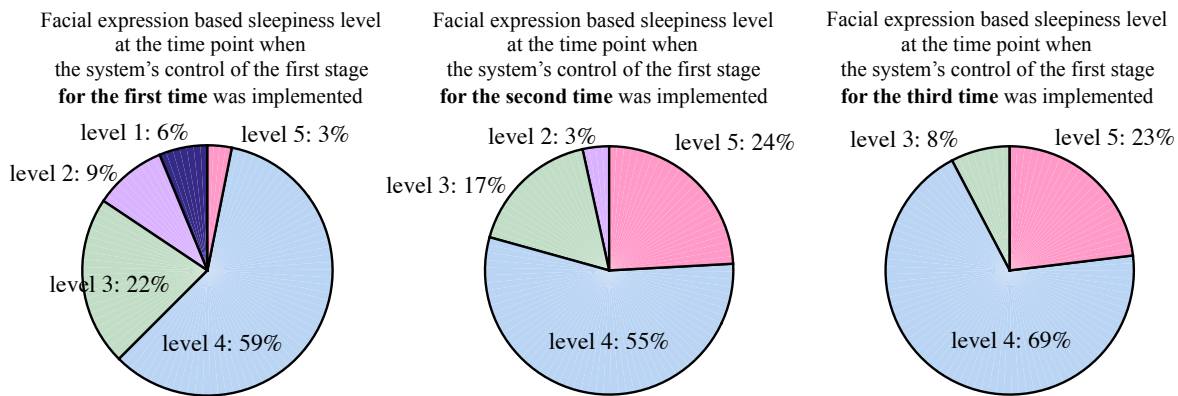


Figure 3.25 Facial expression based sleepiness level of the driver and the number of controls of the first stage implemented by the system

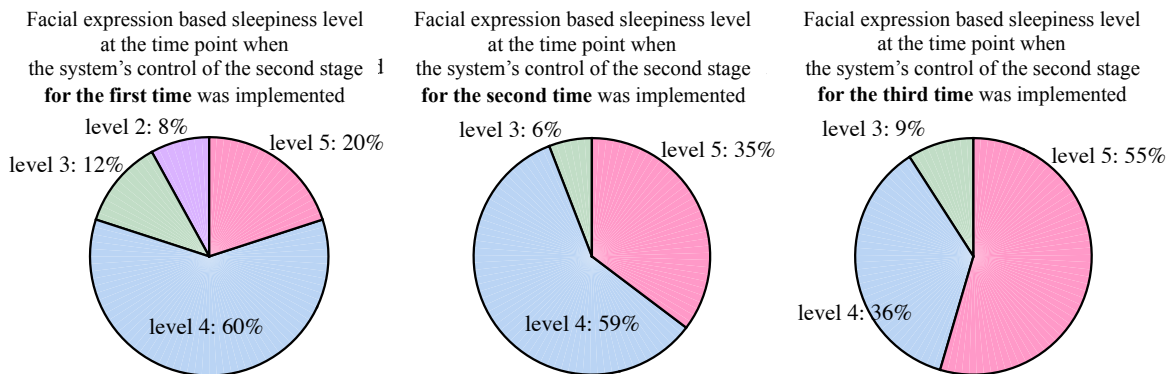


Figure 3.26 Facial expression based sleepiness level of the driver and the number of controls of the second stage implemented by the system

システムが、ドライバ状態推定に要するある特定の時間長のなかで n 回の 2 段目の制御を実行したならば、システムは「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定する手法を構築する。本節では、2 段目の制御の作動間隔の累積度数が 70% に達する時

間長 t_l を，システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断するうえでの基準にする．実験参加者 A を検証事例とし，残りを学習事例とした場合，2 段目の制御の作動間隔の累積度数が 70% に達する時間長 t_l は 29.2 秒であった．たとえば，29.2 秒間の間に，システムが 2 段目の制御を 2 度実行したならば，システムは「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断するのである．ここでは，つぎの判断基準を検討する．

case 1: 2 段目の制御を 1 度実行する

case 2: t_l 秒間のなかで，2 段目の制御を 2 度実行する

case 3: ($t_l \times 2$) 秒間のなかで，2 段目の制御を 3 度実行する

双対制御論的運転支援システムでは，2 段目の制御を 1 度実行したときに，システムは「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断を下さないが，ドライバ状態の同定に要する時間とドライバ状態を正しく同定できる精度の間のトレードオフの関係を数値的に確認するために，ケース 1 を検討する．また，ケース 2 と比較して，システムはドライバ状態の同定に長い時間を要する一方で，ドライバ状態を正しく同定できる精度が高いと考えられる ケース 3 を検討する．

実験参加者 A の検証事例に，ケース 1 から 3 のドライバ状態推定手法を適用した結果を Figure 3.27 に示す．Figure 3.27 は，実験参加者 A の第 1 走行目の 1800 秒間の計測データである．ここで，システムの状態 [1: 1 段目の制御の実行，2: 2 段目の制御の実行]，車両横位置 [m]，顔表情評定値 [1: 全く眠くなさそう，2: やや眠そう，3: 眠そう，4: かなり眠そう，5: 非常に眠そう]，ドライバ状態推定の結果 [0: 通常状態，1: 状況認識不全状態] を示す．ドライバ状態推定の結果をみると，ケース 1 では，104 秒の時刻において，システムは「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定している．しかしながら，その判定した時刻における顔表情評定値は“ 1 ”(全く眠くなさそう)であったことがわかる．これに対して，ケース 2 では，615 秒の時刻において，システムは「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定し，また，ケース 3 では，633 秒の時刻において，システムは「ドライバは状況認識不全状態である」と判定している．615 秒と 633 秒の時刻における顔表情評定値は“ 5 ”(非常に眠そう)であった．このように，ケース 2 や 3 では，ケース 1 と比較して，システムはドライバ状態の同定に長い時間を要している一方で，ドライバ状態を正しく同定できる精度が高いといえる．

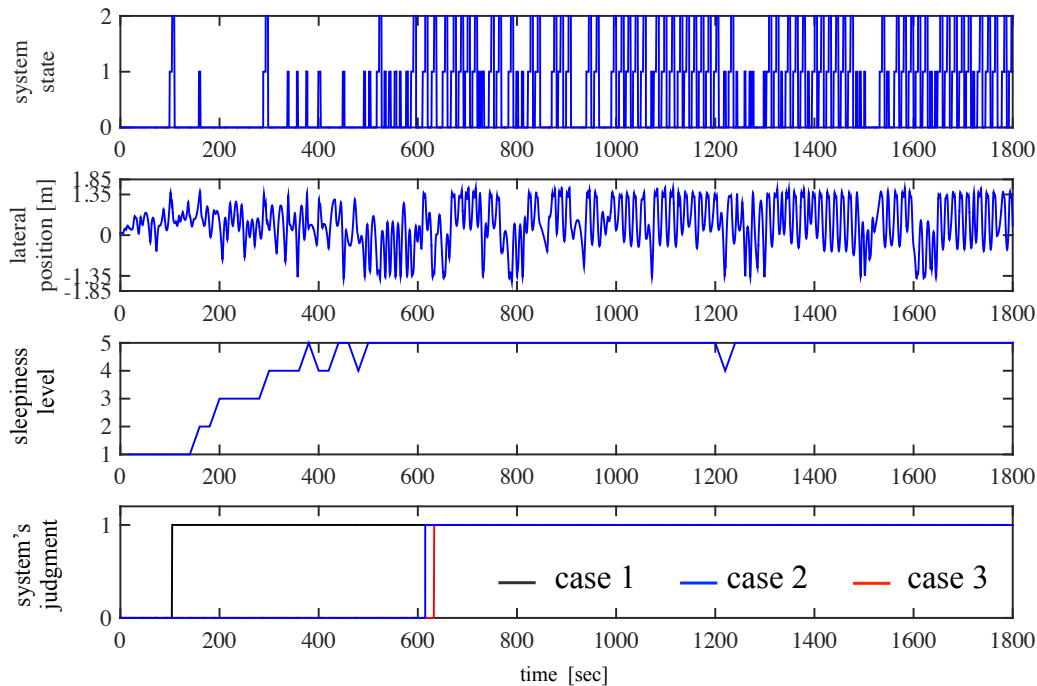


Figure 3.27 Time-series data of 1800 seconds for the interval [0, 1800] during trial 1 of participant A

ドライバ状態推定の有効性

前節では、実験参加者 A の計測データを検証事例とし、残りの計測データを学習事例としたケースの一例を示し、2 段目の制御の作動間隔に基づいたドライバ状態推定手法の構築について述べた。本節では、2 段目の制御が実行された 14 名の計測データが一回づつ検証事例となるように検証を繰り返し、ドライバ状態の同定に要する時間とドライバ状態を正しく同定できる精度の間のトレードオフの観点から、ドライバ状態推定の有効性を定量的に評価する。

本節における検証は、つぎの手順で行う。1 名の事例を検証用にし、残りの事例を用いて 2 段目の制御の作動間隔の累積度数が 70% に達する時間長 t_l を算出する。つぎに、この時間長 t_l を用いて、3.5.2 節で述べたドライバ状態推定の手法のケース 1, 2, 3 とする。1 名の実験参加者の検証事例に、この 3 つのケースを適用した場合におけるドライバ状態推定の有効性を評価する。これを、14 名の実験参加者の計測データが 1 回づつ検証用データとなるように繰り返す。評価指標は、つぎの 2 項目を設定する。

1. システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定した時刻における顔表

情評定値

2. はじめて顔表情評定値が“ 5 ”になった時刻から，システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定を下すまでに要した時間

(1) 2 段目の制御の作動間隔の累積度数が 70% に達する時間長

14 名の計測データが一回ずつ検証事例となるように，2 段目の制御の作動間隔の累積度数が 70% に達する時間長 t_l を算出した結果を Table 3.7 に示す．実験参加者 D, H, I, K, M, P, Q, S のデータを検証用にした場合では，残りの事例を用いて算出した時間長 t_l が同一であるが，これは，これらの実験参加者において 2 段目の制御の作動回数が非常に少なかったためである．

Table 3.7 Time length t_l that the cumulative distribution for the time interval between the two consecutive controls of the second stage become 70%

The verification data	t_l [sec]	The verification data	t_l [sec]
participant A	29.2	participant K	25.7
participant C	29.4	participant M	25.7
participant D	25.7	participant N	25.3
participant E	27.8	participant P	25.7
participant G	25.0	participant Q	25.7
participant H	25.7	participant S	25.7
participant I	25.7	participant T	25.2

(2) システムがドライバ状態の判定を下した時刻における顔表情評定値

システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定した時刻において，顔表情評定値が“ 5 ”であった割合を Figure 3.28 に示す．ケース 1 では 27.3%，ケース 2 では 87.5%，ケース 3 では 100.0% であった．顔表情評定値の内訳を Figure 3.29 に示す．これらの結果から，ドライバ状態を正しく同定できる精度の観点からは，ケース 2 や 3 の方式を採用の必要がある．

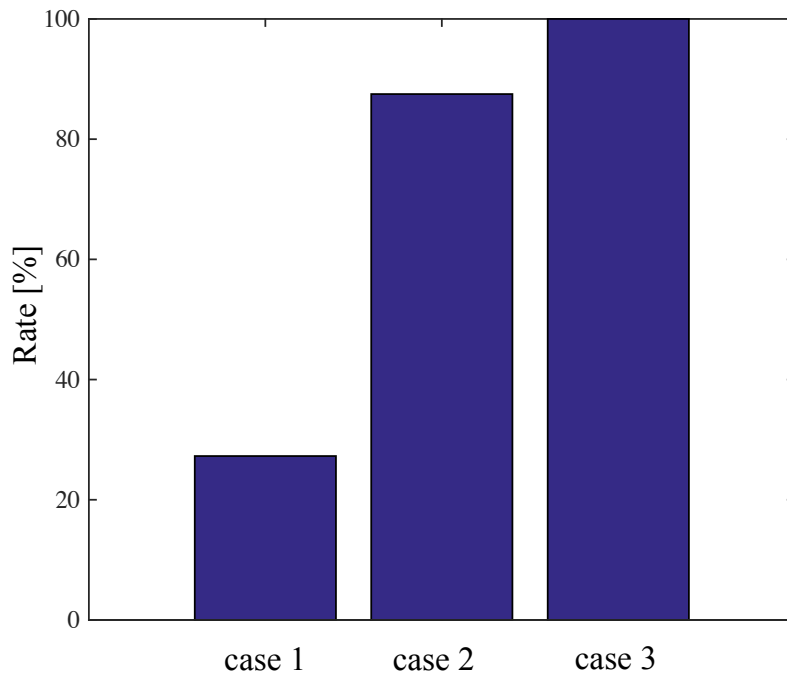


Figure 3.28 Percentage of system’s judgments made correctly that “the driver is at level 5 of sleepiness”

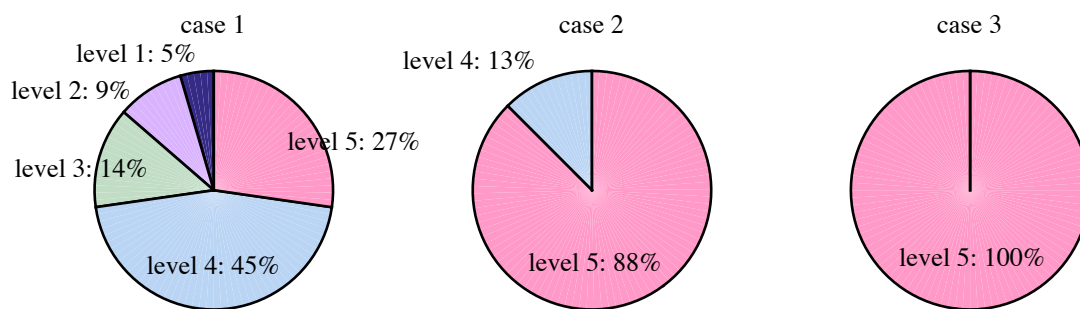


Figure 3.29 Facial expression based sleepiness level at the time point when the system judged that “the driver is at level 5 of sleepiness”

(3) システムがドライバ状態の同定に要した時間

はじめて実験参加者の顔表情評定値が“5”になった時刻から，システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定を下すまでに要した時間を Figure 3.30 に示す．

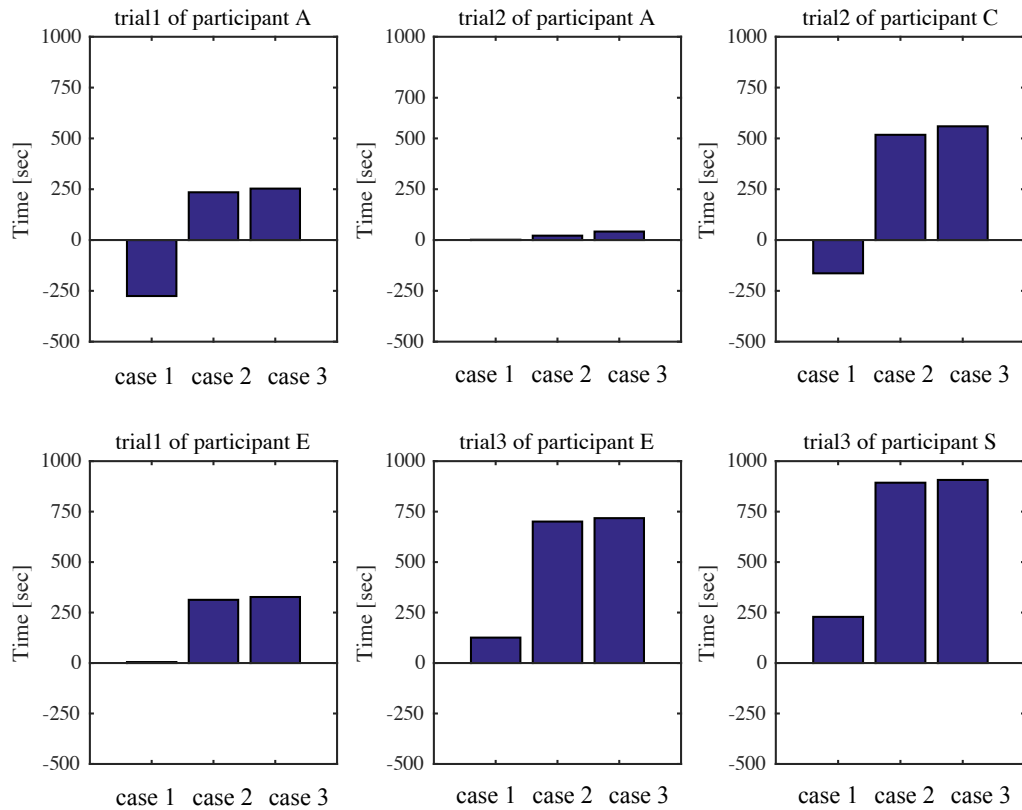


Figure 3.30 Time elapsed before the system judged that “the driver is at level 5 of sleepiness” after the facial expression based sleepiness level became at level 5 for the first time

ここでは，実験参加者が瞼を閉じ，居眠りをしたデータは，6 事例に留まることから，実験参加者 *A*, *C*, *E*, *S* の結果を示す．判定を下すまでに要した時間が負の値をとる場合があるが，これは，顔表情評定値が“5”になる時刻より以前に，システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定を下したことを意味する． Figure 3.30 から，ケース 2 と 3 の場合では，ドライバ状態の判定を下すまでに要した時間がほぼ変わらないことを読み取れる． ケース 2 と 3 の場合において，システムがドライバ状態の判定を下した時刻にどの程度の時間差があったのかを算出した．その結果を Table 3.8 に示す．実験参加者 *C* の第 2 走行目の事例の場合において，ドライバ状態の判定

を下した時刻の時間差は、最も長く 41.8 秒であったが、その他の事例においては 10 数秒であった。

Table 3.8 Difference between the time elapsed before the system judged that “the driver is at level 5 of sleepiness” after the facial expression based sleepiness level became at level 5 in the cases 2 and 3

	[sec]
trial 1 of participant A	18.13
trial 2 of participant A	20.21
trial 2 of participant C	41.80
trial 1 of participant E	14.00
trial 3 of participant E	16.93
trial 3 of participant S	13.70

本節では、一個抜き交差検証を用いて、ドライバ状態の同定に要する時間とドライバ状態を正しく同定できる精度の間のトレードオフの観点から、ドライバ状態推定の有効性を定量的に評価した。本論文における双対制御論的運転支援システムでは、ドライバ状態を正しく同定できる精度を重視し、($t_l \times 2$) 秒間のなかで、システムが 2 段目の制御を 3 度実行したときに、システムは、「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定を下す方式を採用することとする。なお、Table 3.7 の結果から、時間長 t_l は、30 秒とする。

3.6 双対制御論的運転支援システムにおける多層的支援

3.6.1 多層的支援の必要性

3.5 節では、2 段目の制御の作動に基づいて、システムが「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定を下す方式の有効性を評価したが、システムが、1 段目の制御を何度も実行する状況も好ましくはない。たとえば、Figure 3.31 に示す状況である。これは、実験参加者 N の第 2 試行目における 900 から 1800 秒間の計測データである。1250 秒の時刻付近から、顔表情評定値が“4”と“5”を行き来し、瞼の開度の上下動が激しくなっていることがわかる。また、1327 秒の時刻に、システムは 1 段目の制

御を実行し、その後、システムが 2 段目の制御を実行するまでに、計 13 回もの 1 段目の制御を実行している。このような状態は、ドライバが状況認識の不全状態に陥る「兆候状態」と見なせるが、このような状態での運転は継続すべきではないと考える。

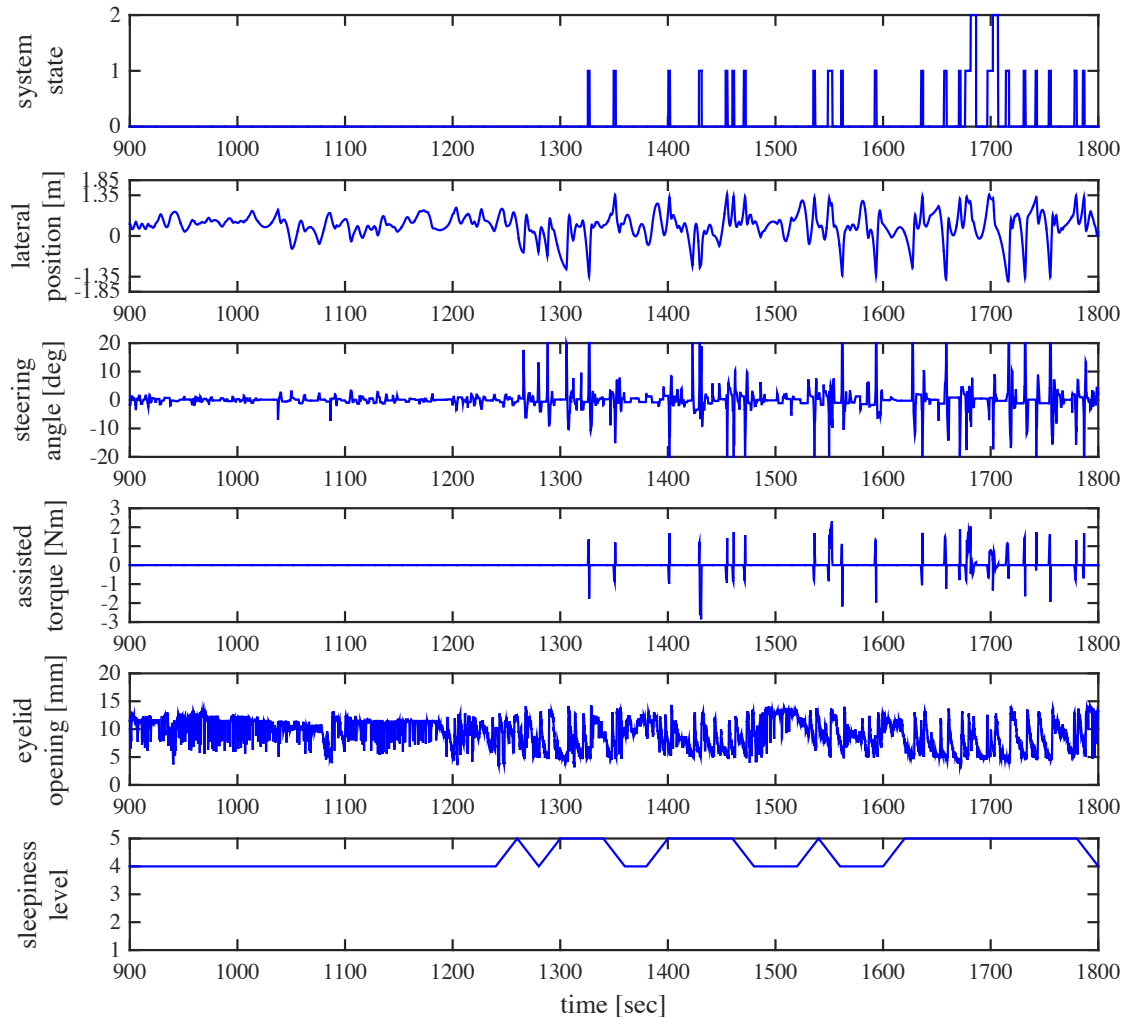


Figure 3.31 Time-series data of 900 seconds for the interval [900, 1800] during trial 2 of participant N

本論文では、「運転の主体はドライバである」ことを前提としたうえで、つぎのような時間的多層構造を有する支援（多層的支援）を提案する。

システムが 1 段目の制御を複数回実行したとき：

1 段目の制御が複数回にわたり実行されたことをドライバに通知し、運転の休憩をとることを促す。

システムが 2 段目の制御を 1 分間の間に 3 回実行したとき：

システムは「ドライバは状況認識不全状態にある（運転継続に適した状態にない）」と判断し、緩やかに停車のための減速制御を開始する．

3.6.2 オーバーライドの可否

双対制御論的運転支援では，システムが 2 段目の制御を 1 分間の間に 3 回実行したとき，システムは「ドライバは状況認識不全状態にある（運転継続に適した状態にない）」と判断し，緩やかに停車のための減速制御を開始する．ただし，システムが減速制御を実行しているなかで，たとえば，ドライバがアクセルペダルを踏み込むなど，ドライバがまだ運転を継続することが可能であると主張するときには，ドライバがその減速制御をオーバーライドできる余地を残すこととする．Figure 3.32 に，実験参加者 A の第 2 試行目の 0 から 1800 秒間におけるシステムの状態，車両横位置 [m]，顔表情評定値 [1: 全く眠くなさそう，2: やや眠そう，3: 眠そう，4: かなり眠そう，5: 非常に眠そう]，ドライバ状態推定の結果 [0: 通常状態，1: 状況認識不全状態] を示す．

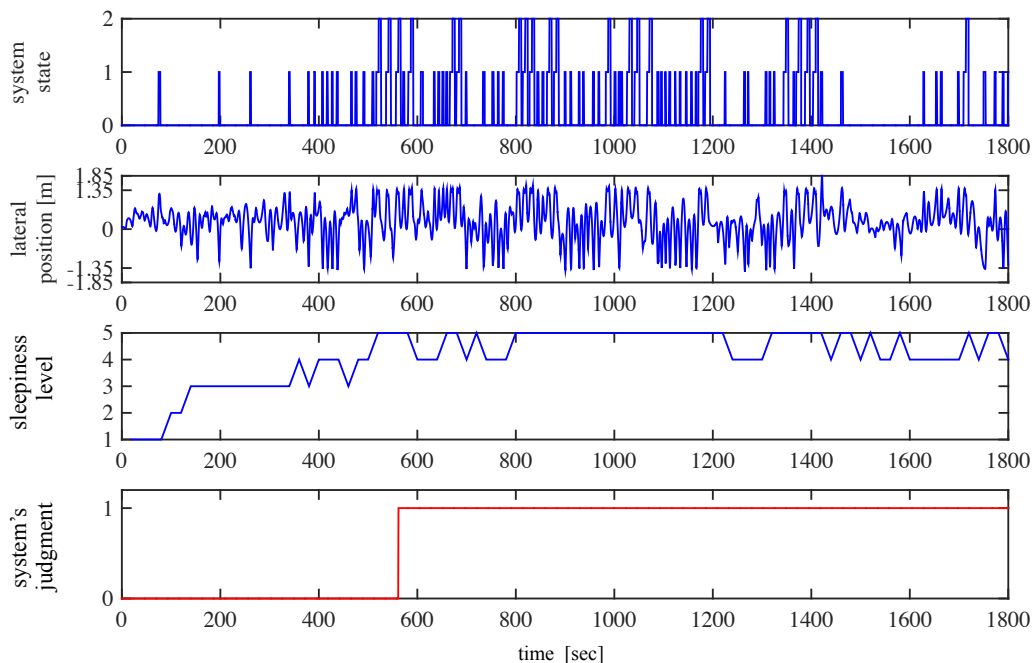


Figure 3.32 Time-series data of 1800 seconds for the interval [0, 1800] during trial 2 of participant A

Figure 3.32 では、561 秒の時刻において、システムは、「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断を下し、車両を停車に導く減速制御を開始したとする。しかしながら、561 秒の時刻以降の顔表情評定値は“4”と“5”を行き来しており、実験参加者は、まだ運転が継続可能であると読み取ることもできる。システムの判断が常に正しいとは限らないことから、双対制御論的運転支援システムでは、システムの決定・実行に基づく減速制御をオーバーライドできる手段をドライバに与える。具体的には、ドライバがアクセルを踏み込んだ時刻に、システムは減速制御をキャンセルする。もしドライバが車両が減速していることに気づかずにアクセルを踏み込むといった対応行動を行わないのであれば、システムは、ドライバ状態の判定が確かなものであったと判断する。このようにして、システムの判定の誤りに対する安全策（セーフティネット）を設ける。

3.7 むすび

本章では、ドライビングシミュレータを用いて、車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した双対制御論的運転支援の有効性を検証した。

認知工学的実験を行った結果、ドライバが居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには、ドライバは適正な状況認識を確保することができないことから、1 段目の制御の開始後に、ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行うことは難しく、また、2 段目の制御の開始後に、車両を車線中央に維持させることは困難であることを確認した。このことによって、システムが 1 段と 2 段目の制御を何度も引き続いて実行しなければならぬ事態に陥ることも確認した。

本章では、実験データに基づいたドライバ状態推定の手法を構築し、その手法が、ドライバ状態を推定するうえで有効であることを一個抜き交差検証から評価した。その結果、双対制御論的運転支援では、1 分間のなかで、2 段目の制御が 3 度実行されるときに、システムは「ドライバは状況認識不全状態にある」と判定する方式を採用することとした。また、双対制御論的運転支援システムが最低限の安全確保を図りながら、システムがドライバに働きかけを行い、ドライバの対応行動を確認する手法からドライバ状態の同定が可能であることを実験によって確認した点に本研究の意義がある。

第4章 結論

4.1 本論文の結果と意義

本論文では、車両挙動という客観情報のみを用いて、(i) 車両の安全確保と、(ii) ドライバが状況認識不全状態（低覚醒状態や心身機能喪失状態）に陥っているか否かの判定、という二つの目的を一つの制御で達成する双対制御論的運転支援システムを構築し、双対制御論的運転支援が現実にも有用であることを認知工学的実験から明らかにした。

第2章では、制御対象（車両・操舵系）の数理モデル、ならびに最適制御理論に基づいた車両横方向制御系（操舵トルク制御）のコントローラを構築し、双対制御論的運転システムをドライビングシミュレータに搭載した。また、システムが車両の安全確保を図ることができることをドライビングシミュレータを用いて確認した。

第2章の主要な結果は、以下の通りである。

1. 1 段目の制御の開始後に、車両を車線中央に戻す制御の不足分を補うドライバの操舵が行われたときには、車両横方向制御の主体をシステムからドライバへ円滑に移行させることができ、また、車両を車線中央に戻す制御の不足分を補うドライバの操舵が行われなかったときには、システムが2 段目の制御を実行することによって車両を車線中央に戻すことが可能であることを確認した。
2. 双対制御論的運転支援では、車両の車線逸脱を予測したときに、車両を車線中央に戻す制御の一部を1 段目の制御として実行し、車両を車線中央に戻す制御の不足分を補うドライバの操舵が行われたか否かを確認する。1 段目の制御を開始してから t_i 秒の間に車両を車線中央に戻すドライバの操舵が確認されなければ、システムは「ドライバは状況認識の不全に陥っていることが疑われる」と判断し、車両を車線中央に戻すための操舵制御の未実行分を2 段目の制御として実行する。このことから、ドライバ状態の判定が下されないことによって何も支援が実行されないこともあり得る既存の運転支援とは異なり、双対制御論的運転支援システムは、ドライバ状態の判定にかかわらずに車両の安全確保を図ることができ

るといえる。

第 3 章では、ドライビングシミュレータを用いて、車両安全制御とドライバ状態推定の機能を兼備した双対制御論的運転支援の有効性を検証した。ドライバが居眠りに陥った、またはドライバの心身機能が喪失したならば、ドライバが車両を車線中央に維持させることは困難である。双対制御論的運転支援では、システムは、2 段目の制御を実行した後にしばらく様子を見て、車両が何度も車線逸脱を起こしそうになり、そのたびにシステムが 2 段目の制御を実行しなければならない事態に陥ったときに、システムは、「ドライバは状況認識不全状態にある」と判断する。本章では、双対制御論的運転支援システムの作動時におけるドライバの運転行動を計測・分析し、ドライバ状態推定の手法を構築した。また、その手法が、ドライバ状態を推定するうえで有効であることを明らかにした。

第 3 章の主要な結果は、以下の通りである。

1. ドライバが居眠りをするほどに覚醒度が低下したときには、ドライバは適正な状況認識を確保することができないことから、1 段目の制御の開始後に、ドライバが車両を車線中央に戻す操舵を行うことは難しく、また、2 段目の制御の開始後に、車両を車線中央に維持させることは困難である。このことによって、システムが 1 段と 2 段目の制御を何度も引き続いて実行しなければならない事態に陥ることを確認した。すなわち、双対制御論的運転支援システムが、最低限の車両の安全確保を図りながらドライバに働きかけを行い、ドライバの対応行動を確認する手法は、ドライバの状態を知るうえで有効であるといえる。
2. 双対制御論的運転支援では、つぎの時間的多層構造を有する支援を行う。1 段目の制御が複数回実行されたとき、1 段目の制御が複数回にわたり実行されたことをドライバに通知し、運転の休憩を促す。また、1 分間の間にシステムが 2 段目の制御を 3 回実行したとき、システムは「ドライバは状況認識不全状態にある（運転継続に適した状態にない）」と判断し、緩やかに停車のための減速制御を開始する。

第 2 章と第 3 章で得られた結果の意義はつぎの点にある。双対制御は、制御対象の状態や特性を同定するための入力信号を、その対象の制御にも有効なものにしようとする考え方であるが、制御対象「車両」と状態を同定する対象「人」が異なる双対制御は未だない。双対制御の考え方を活かした双対制御論的運転支援システムが、最低

限の車両の安全確保を図りながらドライバに働きかけを行い，ドライバの対応行動を確認する手法からドライバ状態の同定が可能であることを実験によって確認した点に意義がある．また，双対制御論的運転支援では，車両挙動という客観情報のみを用いることから，既存のドライバ状態推定技術がもつ生理特性の個人差や主観評価のあいまいさなどが無い．ドライバの生体情報，運転行動などの計測のための特別な装置の設置を要求しないことから，高速バスなどの事業用自動車だけでなく，多くの一般の自動車に搭載できることが期待できる．

4.2 今後の課題

今後の課題を記す．

1. 本論文では，制御対象（車両・操舵系）の状態ベクトル $x(t)$ が観測できるものとし，最適レギュレータを用いて車両安全制御を実現した．しかしながら，現実には，状態ベクトル $x(t)$ のうち，いくつかの状態変数が観測できないことも想定される．このとき，現実の車両に本システムを実装する場合には，観測できない状態変数を推定するオブザーバを用いる必要がある．
2. 本論文では，最適レギュレータにおけるフィードバックゲインをオフラインで決定しており，制御対象の状態ベクトル $x(t)$ や操作量 $u(t)$ の制約を満たすフィードバックゲインもまたオフラインにおける検討に留まる．ここで，モデル予測制御とは，制御対象の将来挙動を予測したうえで，与えられた評価関数の評価が最も良くなる所定時間先までの操作量時系列を算出し，現時刻に対応する操作量を入力として加え，制御時刻に応じて操作量時系列を更新する制御方式である [85]．最適レギュレータが，基本的には無限時間を対象とした評価関数を用いてフィードバックゲインをオフラインで決定することを前提としていることに対して，モデル予測制御は，有限時間を対象とした評価関数を用いて，制御対象の状態ベクトル $x(t)$ などの制約を満たすようにオンラインで操作量 $u(t)$ を決定することが可能である．現実の交通環境では様々な外乱が発生しうることから，制御対象の将来挙動を予測し，制御対象の状態ベクトル $x(t)$ などの制約を考慮したモデル予測制御を双対制御論的運転支援システムに適用することによって，制御性能の向上が期待できる．

3. 本論文における双対制御論的運転支援では、1 分間の間にシステムが 2 段目の制御を 3 回実行したときに、システムは「ドライバは状況認識不全状態にある（運転継続に適した状態にない）」と判断し、緩やかに停車のための減速制御を開始することとしたが、ドライバが居眠りに陥った、あるいはドライバの心身機能が喪失したことをより短い時間で確実に判定できるようにする工夫などについて、さらなる検討が必要である。
4. 本論文における双対制御論的運転支援では、1 段目の制御が複数回実行されたとき、1 段目の制御が複数回にわたり実行されたことをドライバに通知し、運転の休憩を促す。ここで、どのようにドライバに通知し、休憩を促すかについては、ヒューマンマシンインタフェースを工夫する必要がある。現在、ドライバの自発的な安全運転を促す運転支援システムの研究が活発になされている [106, 107]。既往研究の知見を活用し、ドライバが自発的に休憩をとることを促す仕掛けを検討することも重要である。

謝辞

本論文は、筑波大学大学院 システム情報工学研究科 博士後期課程 リスク工学専攻 在学中に、筑波大学 システム情報系 稲垣 敏之 教授の御指導のもとに纏めたものです。

本研究の遂行、ならびに論文の作成にあたり、稲垣 敏之 教授に深謝申し上げます。著者は、他大学で博士前期課程を終えて企業に就職しておりましたが、研究者を目指したいとの当初からの思いが強くなるなかで、稲垣 敏之 教授の論文、解説記事の文章から伝わる「研究の香り」に惹かれ、本学大学院博士後期課程に入学いたしました。稲垣 敏之 教授のご指導を賜ったこの3年間は、学術用語を含めた「ことば」を大切にす姿勢、常に自分に批判的になる姿勢、深い思索と俯瞰を繰り返す姿勢、学術的には世界と競争し、研究成果の社会還元のためには世界と協調する姿勢など、研究に対する取り組み姿勢を学ぶ大変貴重な機会となりました。また、個別のセミナーにおける稲垣 敏之 教授の厳格かつ的確な御指導によって、自分の甘さ、中途半端な理解・考察等を気づかされつづけた3年間でもあり、厳格かつ的確な御指導は、努力の糧になるものでありました。本研究の遂行にあたり、多大なご支援、ご指導を賜りました稲垣 敏之 教授に深く感謝いたします。

筑波大学 システム情報系 伊藤 誠 教授には、個別のセミナー以外にも、論文の添削等、大変丁寧な御指導を賜るとともに、細やかな御配慮をいただきました。国内外における研究発表の機会を御紹介、または御提供していただきましたこと、国際会議における公式でないワークショップ参加の機会をいただきましたこと、数多くの国内外の研究者を御紹介していただきましたこと等、数多くの御支援を賜りましたことに心より感謝申し上げます。伊藤 誠 教授の御指導を通じて、直面する課題との距離を適切に保つこと、すなわち、客観的である姿勢を学びました。また、伊藤 誠 教授には、何度も励ましの言葉をいただきました。

筑波大学 システム情報系 亀山 啓輔 教授、同 河辺 徹 教授、同 安信 誠二 教授には、博士論文審査委員として多くの有益な御助言と御示唆を賜りましたことに感謝いたします。亀山 啓輔 教授には、博士論文審査委員だけでなく、リスク工学専攻の達成度評

価委員としても、数多くの有益な御意見をいただきました。河辺 徹 教授には、本研究の遂行にあたり、制御理論に関するご助言をいただきました。また、安信 誠二 教授には、国内学会において有益なご意見をいただいただけでなく、本研究の学術的意義、社会的意義に関する御助言をいただきました。

筑波大学大学院 システム情報工学研究科 認知システムデザイン研究室の皆様には、本研究を遂行するにあたり、有意義な議論を何度もさせていただきましたことに謝意を表します。周 慧萍氏、石川 諒氏、松原 史浩氏には、数多くのグループゼミを通じて、有益な御意見をいただきました。宮脇 剛史氏には、双対制御論的運転支援システムをドライビングシミュレータに実装するにあたり、多くの貴重な御助言をいただきました。Carlos, Andres, Ramirez 氏、Ahmad, Khushairy 氏、Hussam, Muslim, Hantoosh, Al-zamili 氏には、国際会議論文の発表準備等において、貴重な御助言をいただきました。桑名 潤平氏、小関 大紀氏、高田 亮治氏には、研究室の学生との懇親を深める多くの機会をいただきました。また、梶 順子氏には、本研究を遂行するにあたり、様々な事務手続きに関して御助力をいただきました。研究生活において、楽しく過ごせるように御配慮をいただきましたことに感謝いたします。

最後に、今日に至るまで温かく見守りながら、生活面、精神面など、さまざまな形で支えてくださった、父 庸治、母 定子、ならびに親族に深く感謝いたします。

本当に有難うございました。

2015年3月 齊藤 裕一

参考文献

- [1] 稲垣敏之: 人と機械の共生のデザイン -人間中心の自動化を探る-, 森北出版 (2012)
- [2] 金岡晃廣, 高野照久, 菅原大輔, 大谷荘太郎, 鈴木政康, 知野見聡, 大泉謙: アラウンドビューモニタの開発, 日産技報, No. 63, pp. 37-41 (2008)
- [3] 萩里安雄, 岩田洋一, 豊福邦彦, 後藤佳彦, 姉尾秀樹, 熊坂剛: 近赤外線投射型夜間前方情報提供装置ナイトビュー, TOYOTA Technical Review, Vol. 52, No.2, pp. 48-53 (2002)
- [4] 赤津洋介: インテリジェントペダルシステムの開発, 自動車技術, Vol. 62, No. 7, pp. 116-117 (2008)
- [5] 大石真嗣: スタビリティコントロールシステム, 自動車技術, Vol. 63, No. 12, pp. 47-51 (2009)
- [6] 峯田憲一, 鶴浦清純, 池田哲夫: レーンキープアシストシステムにおける白線認識システムの開発, Vol. 12, No.1, pp. 101-108 (2000)
- [7] 真壁俊介: 先進運転支援システム アイサイト (ver.2) の紹介, 自動車技術, Vol. 66, No. 3, pp. 88-93 (2012)
- [8] N. B. Sarter, D. D. Woods and C. E. Billings: Automation Surprises, G. Salvendy (Ed.), Handbook of Human Factors and Ergonomics (2nd ed), pp. 1926-1943 Wiley (1997)
- [9] C. E. Billings: Aviation Automation: The Search for a Human-centered Approach, Lawrence Erlbaum Associates (1997)
- [10] 国土交通省, 人とクルマの調和による安全安心な交通社会を目指して, 第5期 ASV 推進計画パンフレット, <http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/resource/data/asv5pamphlet.pdf>

- [11] 稲垣敏之: リスク環境における人と智能機械の協調をデザインする, 電子情報通信学会誌, Vol. 89, No. 12, pp. 1026-1031 (2006)
- [12] 国土交通省, 運転支援の考え方について, 第3回 ASV 検討会資料「運転支援の考え方」からの抜粋, <http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/09/090623/03.pdf>
- [13] 国土交通省, 乗用車メーカーによる実用化 ASV 技術の一覧, http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/resource/data/2013_09_ASVgijutsu.pdf
- [14] 警視庁: 平成 25 年度中の交通事故の発生状況 (2014)
- [15] 公益社団法人 交通事故総合分析センター: 自動車における車線逸脱の要因分析, 研究報告書 H22-04 (2011)
- [16] A. T. McCartt, S. A. Ribner, A. I. Pack, M. C. Hammer: The Scope and Nature of the Drowsy Driving Problem in New York State, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 28, No. 4, pp. 511-517 (1996)
- [17] T. Abe, Y. Komada, Y. Nishida, K. Hayashida and Y. Inoue: Short Sleep Duration and Long Spells of Driving Are Associated with the Occurrence of Japanese Drivers' Rear-end Collisions and Single-car Accidents, *Journal of Sleep Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 310-316 (2010)
- [18] J. Horne and L. Reyner: Vehicular Accidents Related to sleep: A Review, *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 56, No. 5, pp. 289-294 (1999)
- [19] B. Bjerner, Å. Holm and Å. Swensson: Diurnal Variation in Mental Performance, *British Journal of Industrial Medicine*, Vol. 12, No. 2, pp. 103-110 (1955)
- [20] S. Folkarc and T. H. Monk: Shiftwork and Performance, *Human Factors*, Vol. 21, No. 4, pp. 483-492 (1979)
- [21] T. H. Monk, S. Folkarc and A. I. Wedderburn: Maintaining Safety and High Performance on Shiftwork, *Applied Ergonomics*, Vol. 27, No. 1, pp. 17-23 (1996)
- [22] G. S. Richardson, J. D. Miner and C. A. Czeisler: Impaired Driving Performance in Shiftworkers: The Role of the Circadian System in a Multifactorial Model, *Alcohol, Drugs & Driving*, Vol. 5, No. 4, pp. 265-273 (1989)

- [23] 公益社団法人 交通事故総合分析センター: 事業用自動車の交通事故の傾向 (平成25年度), 研究報告書 H25-07 (2014)
- [24] 公益社団法人 全日本トラック協会: 交通事故の傾向と事件事例 (2014)
- [25] A. I. Pack, A. M. Pack, E. Rodgman, A. Cucchiara and D. F. Dinges: Characteristics of Crashes Attributed to the Driver having Fallen Asleep, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 6, pp. 769-775 (1995)
- [26] P. H. Langlois, M. H. Smolensky, B.P. Hsi and F. W. Weir: Temporal Patterns of Reported Single-vehicle Car and Truck Accidents in Texas, U.S.A. during 1980-1983, *Chronobiology International*, Vol. 2, No. 2, pp. 131-140 (1985)
- [27] M. M. Mitler and J.C. Miller: Methods of Testing for Sleepiness, *Journal of Behavioral Medicine*, Vol. 21, No. 4, pp. 171-183 (1996)
- [28] J. A. Horne and L. A. Reyner: Sleep Related Vehicle Accidents, *British Medical Journal*, Vol. 6979, pp. 565-567 (1995)
- [29] G. Maycock: Sleepiness and Driving: The Experience of U.K. Car Drivers, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 29, No. 4, pp. 453-462 (1997)
- [30] P. Philip, I. Ghorayeb, R. Stoohs, J. C. Menny, P. Dabadie, B. Bioulac and C. Guilleminault: Determinants of Sleepiness in Automobile Drivers, *Journal of Psychosomatic Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 279-288 (1996)
- [31] S. Barbarino, L. Nobili, M. Beelke, F. D. C. Phy and F. Ferrillo: The Contributing Role of Sleepiness in Highway Vehicle Accidents, *Sleep*, Vol. 24, pp. 203-206 (2001)
- [32] H. Summala and T. Mikkola: Fatal Accidents Among Car and Truck Drivers: Effects of Fatigue, Age, and Alcohol consumption, *Human Factors*, Vol. 36, No. 2, pp. 315-226 (1994)
- [33] 浅岡章一, 駒田陽子, 大川匡子, 井上雄一: 睡眠障害と交通安全, 国際交通安全学会, Vol. 35, No. 1, pp. 8-13 (2010)
- [34] 林光緒: 居眠り運転発生の生理的メカニズム, 国際交通安全学会, Vol. 38, No. 1, pp. 49-56 (2013)

- [35] 世古泰俊: ドライバの居眠り状態を検出する技術の現状, 自動車技術, Vol. 38, No. 5, pp. 547-554 (1984)
- [36] 黒木康之, 石田敏朗: 運転中の脳波について, 自動車技術, Vol. 28, No. 4, pp. 258-266 (1974)
- [37] M. Ohsuga, Y. Kamakura, Y. Inoue, Y. Noguchi, K. Shimada and M. Mishiro: Estimation of Driver's Arousal State Using Multi-dimensional Physiological Indices, Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6781, pp. 176-185 (2011)
- [38] T. Ranny, E. Mazzae, R. Garrott and M. J. Goodman: NHTSA Driver Distraction Research: Past, Present, and Future. USDOT, National Highway Traffic Safety Administration (2000)
- [39] E. Fujita, Y. Ogura and N. Ochiai: Experiment Study on Prediction of Sleep during Wakefulness, Proc. The First International Symposium on Advanced Technology of Vibration and Sound, pp. 282-287 (2005)
- [40] 宮田洋: 新生理学, 北大路書房, p. 328 (1998)
- [41] 柳平雅俊, 安土光男: 運転状態推定技術の開発 (第 3 報), 自動車技術会学術講演会前刷集 No. 51-04, pp. 11-16 (2004)
- [42] 小山哉, 荒川俊也: ふらつき運転によるドライバ覚醒レベル推定警報システムの開発と脳波によるドライバ状態評価, 自動車技術, Vol. 58, No.12, pp. 89-94 (2004)
- [43] 浅野裕俊, 坂本直樹, 野澤昭雄, 井出英人: 顔面熱画像によるドライバーの一過性覚醒度の推定, 電気学会論文誌 C, 電子・情報・システム部門誌, Vol. 130, No. 3, pp. 428-432 (2010)
- [44] 本間亮平, 安部原也, 菊池一範, 岩城亮, 藤井健, 福島正夫: 低覚醒時におけるドライバの視認行動特性, 自動車技術会論文集, Vol. 42, No.5, pp. 1217-1222 (2011)
- [45] P. P. Caffier, U. Erdmann and P. Ullsperger: Experimental Evaluation of Eye-blink Parameters as a Drowsiness Measure, European Journal of Applied Physiology, Vol. 89, No. 3, pp. 319-325 (2003)

- [46] T. Åkerstedt, M. Ingre, G. Kecklund, A. Anund, D. Sandberg, M. Wahde, P. Philip and P. Kronberg: Reaction of Sleepiness Indicators to Partial Sleep Deprivation, Time of Day and Time on Task in a Driving Simulator-the DROWSI Project, Journal of Sleep Research-, Vol.19, No. 2, pp. 298-309 (2010)
- [47] M. Ingre, T. Åkerstedt, B. Peters, A. Anund, G. Kecklund: Subjective Sleepiness, Simulated Driving Performance and Blink Duration: Examining Individual Differences, Journal of Sleep Research, Vol. 15, No. 1, pp. 47-63 (2006)
- [48] D. Sandberg: The Performance of Driver Sleepiness Indicators as a Function of Interval Length, Proc. 14th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 1735-1740 (2011)
- [49] S. Furugori, N. Yoshizawa, C. Iname and Y. Miura: Estimation of Driver Fatigue by Pressure Distribution on Seat in Long Term Driving, Review of Automotive Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 53-58 (2005)
- [50] 伊藤誠, 飯塚啓司, 稲垣敏之: 覚醒度低下が着座接触圧分布の重心位置変化にもたらす影響, 日本交通科学協議会誌, Vol. 10, No. 1, pp. 3-9 (2011)
- [51] Volvo Car Corporation: Volvo Driver Alert Control, http://www.volvocars.com/uk/top/my_volvo/videos/Pages/Volvo-DriverAlertControl.aspx
- [52] Daimler AG: Attention Assist, <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210218-1-1210332-1-0-0-1210228-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0.html>
- [53] Volkswagen: Fatigue Detection System, http://www.volkswagen.com.au/en/technology_and_service/technical-glossary/fatigue-detection.html
- [54] Ford Motor Company: Driver Alert, <http://technology.fordmedia.eu/documents/newsletter/FordTechnologyNewsletter082010.pdf>
- [55] W. A. McDonald, E. R. Hoffman: Review of Relationships Between Steering Wheel Reversal Rate and Driving Task Demand, Human Factors, Vol. 22, No. 6, pp. 733-739 (1980)
- [56] 福田準一, 阿久津英作, 青木啓二: 修正操舵認識による意識低下推定法の検討, 自動車技術会論文集, Vol. 26, No. 2, pp. 67-71 (1995)

- [57] 福井勝彦: 連続運転時における操舵機能低下の評価方法, トヨタ中央研究所 R & D レビュー, Vol. 30, No. 3, pp. 57-65 (1995)
- [58] J. Krajewski, D. Sommer, U. Trutschel, D. Edwards and M. Golz: Steering Wheel Behavior Based Estimation of Fatigue, Proc. 5th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment and Design, pp. 118-124 (2009)
- [59] 近森順, 大谷崇, 清水裕: ドライバの覚醒度低下による操舵特性の変化, 自動車技術会論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 107-112 (2001)
- [60] T. Åkerstedt and M. Gilberg: Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual, International Journal of Neuroscience, Vol. 52, No. 1, pp. 29-37 (1990)
- [61] 北島洋樹, 沼田仲穂, 山本恵一, 五井美博: 自動車運転時の眠気の予測手法についての研究(第1報, 眠気表情の評定法と眠気変動の予測に有効な指標について), 機械学会誌 C 篇, Vol. 63, No. 613, pp. 3059-3066 (1997)
- [62] K. Ishida, A. Ichimura and M. Kamiyo: A Study of Facial Muscular Activities in Drowsy Expression, International Journal of Kansei Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 57-66 (2010)
- [63] S. Hachisuka, K. Ishida, E. Takeshi and K. Masayoshi: Facial Expression Measurement for Detecting Driver Drowsiness, Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6781, pp. 135-144, 2011
- [64] J. C. Stutts, J. W. Wilkins and B.V. Vaughn: Why Do People Have Drowsy Driving Crashes? Input from Drivers Who Just Did. AAA Foundation for Traffic Safety, Washington, DC, pp. 1-81 (1999)
- [65] 大門伸雄: 居眠り運転警報装置, 自動車技術, Vol. 50, No. 11, pp. 70-74 (1996)
- [66] M. Rimini-Doering and T. Altmueller: Effects of Lane Departure Warning on Drowsy Driver's Performance and State a Simulator, Proc. Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, pp. 88-95 (2005)

- [67] M. Flores, J. Armingol and A. Escalera: Real-Time Warning System for Driver Drowsiness Detection Using Visual Information, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 59, No. 2, pp. 103-125 (2010)
- [68] National Highway Traffic Safety Administration, Assessment of a Drowsy Driver Warning System for Heavy-Vehicle Drivers, DOT HS 811 117 (2009)
- [69] 毎日新聞: 北陸道 SA バス衝突事故, 2014年03月04日
- [70] J. Sharit: Allocation of functions, G. Salvendy (Ed.), Chapter 11 of the Handbook of Human Factors and Ergonomics, pp. 301-339, Wiley (1997)
- [71] T. Inagaki: Adaptive Automation: Sharing and Trading of Control, Erik Hollnagel (Ed.), Chapter 8 of the Handbook of Cognitive Task Design, pp. 147-169, LEA (2003)
- [72] MW. Scerbo: Theoretical Perspectives on Adaptive Automation, R. Parasuraman, M. Mouloua (Eds), *Automation and Human Performance*, pp. 37-63, LEA (1996)
- [73] 富士重工業株式会社: アイサイト (ver. 2), http://www.sti.jp/product/foresterts2014/eyesight_p2.html
- [74] N. Filatov, H. Unbehauen: Adaptive Dual Control: Theory and Applications, Springer (2004)
- [75] 芳谷直治: 二元予測制御 (同定と制御の同時最適化) の周辺, *電気学会論文誌 C*, Vol. 123, No. 6, pp. 1045-1048 (2003)
- [76] 足立修一: Matlab による制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局 (2011)
- [77] 毛利宏, 古性裕之: 自動車追従走行の比較, *自動車技術会論文集*, Vol. 30, No. 1, pp. 121-126 (1999)
- [78] H. Furusho and H. Mouri: Research on Automated Lane Tracking using Linear Quadratic Control: Control Procedure for a Curved Path, *JSAE Review*, Vol. 20, No. 3, pp. 325-329 (1999)

- [79] H. Peng, W. Zhang, M. Tomizuka and A. Arai: Magnetic-Maker-Based Lane Keeping: A Robustness Experimental Study, SAE Transaction, Vol. 102, No. 6, pp. 750-755 (1993)
- [80] M. Shimakage, S. Satoh, K. Uenuma and H. Mouri: Design of Lane-Keeping Control with Steering Torque Input, JSAE Review, Vol. 23, No. 3, pp. 317-323 (2002)
- [81] 永井正夫, 下光喜代崇, 吉田秀久, 毛利宏: 操舵トルク支援制御と人間との操舵協調性 -運転シミュレータによる横風応答の検討-, 自動車技術会論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 157-162 (2003)
- [82] 毛利宏, 永井正夫: 操舵トルクを制御入力とする車線追従制御の検討 (第1報, 操舵角制御と操舵トルク制御の比較), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, No. 664, pp. 160-167 (2001)
- [83] 毛利宏, 佐藤茂樹, 永井正夫: 操舵トルクを制御入力とする車線追従制御の検討 (第2報, 操舵トルク制御の設計とロバスト性の確認), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 681, pp. 93-100 (2003)
- [84] ポンサトーンラクシンチャランサク, 小竹元基, 永井正夫: 超小型電気自動車の車輪独立駆動トルク制御による車線追従制御システム, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 715, pp. 795-801 (2006)
- [85] 西羅光, 川邊武俊: 自動車の最適経路生成, 計測と制御, Vol. 45, No. 3, pp. 209-215 (2006)
- [86] 西羅光, 瀬戸陽治, 山村吉典, 川邊武俊: モデル予測制御を利用した車線変更支援装置の開発と評価, 自動制御連合講演会講演論文集, Vol. 48, 4 pages (2005)
- [87] 向井正和, 川邊武俊, 西羅光, 高木良貴, 出口欣高: モデル予測制御による自動車の障害物回避へのアプローチ, 自動制御連合講演会講演論文集, Vol. 49, 4 pages (2006)
- [88] 吉川恒夫, 井村順一: 現代制御論, 昭昇堂 (1994)
- [89] 鈴木桂輔, 相馬仁, 平松金雄: 車線逸脱警報発生基準設定のための逸脱予想時間の解析, 自動車技術会論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 101-106 (2001)

- [90] 碓井茂夫: 前方認識センサによる運転支援技術, 自動車技術, Vol. 63, No. 12, pp. 30-33 (2009)
- [91] 安部正人: 自動車の運動と制御 -車両運動力学の理論形成と応用-, 東京電機大学出版局 (2008)
- [92] 岩野孝, ポンサトーンラクシンチャラーンサク, 永井正夫: 障害物回避時におけるアクティブ操舵制御とドライバの操舵協調性の検討, 自動車技術会学術講演会, 学術講演会前刷集, No. 5-14, pp. 13-16 (2014)
- [93] R. Nishimura, T. Wada and S. Sugiyama: A Haptic Lane-keeping Assist System Based on Cooperative Status between Driver and System, Proc. SICE Annual Conference 2013, pp. 1443-1445 (2013)
- [94] 中野史郎, 西崎勝利, 西原修, 熊本博光: 自動と手動運転が混在する自動車用操縦装置の研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 639, pp. 4401-4408 (1999)
- [95] 川田昌克: MATLAB/Simulink による現代制御入門, 森北出版 (2011)
- [96] 齊藤裕一, 伊藤誠, 稲垣敏之: 車線逸脱時におけるドライバの覚醒度と操舵行動の解析, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013, pp. 971-976 (2013)
- [97] K. Suzuki and H. Jansson: An Analysis of Driver 's Steering Behavior during Auditory or Haptic Warnings for the Designing of Lane Departure Warning System, JSAE Review, Vol. 24, No. 1, pp. 65-70 (2003)
- [98] A. Kullack, I. Ehrenpfordt, K. Lemmer and F. Eggert: ReflektAS: Lane Departure Prevention System based on Behavioral Control, IET Intelligent Transport Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 285-293 (2008)
- [99] T. Inagaki and T. B. Sheridan: Authority and Responsibility in Human-Machine Systems: Probability Theoretic Validation of Machine-Initiated Trading of Authority, Cogn Tech Work, Vol. 14, No. 1, pp. 29-37 (2012)
- [100] 近藤政市: 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, pp. 40-43 (1958)
- [101] 林光緒, 堀忠雄: 午後の眠気対策としての短時間仮眠, 生理心理学と精神生理学, Vol. 25, No.1, pp. 45- 59 (2007)

- [102] 岩本邦弘: 睡眠から健康を考える -そのメカニズムと運転を含めた社会問題への影響-, 自動車開発における人間工学の理論と実践セミナー資料, pp. 14 - 37 (2014)
- [103] 石川諒, 伊藤誠, 稲垣敏之: ドライバの覚醒度低下に伴う生体指標・運転行動・主観評価の変化と相互関係, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 112, No. 52, pp. 7-12 (2012)
- [104] T. Åkerstedt, B. Peters, A. Anund and G. Kecklund: Impaired Alertness and Performance Driving Home from the Night Shift: A Driving Simulator Study, Journal of Sleep Research, Vol. 14, No. 1, pp. 17-20 (2005)
- [105] S. Otmani, T. Pebayle, J. Roge and A. Muzet: Effect of Driving Duration and Partial Sleep Deprivation on Subsequent Alertness and Performance of Car Drivers, Physiology & Behavior, Vol. 84, No. 5, pp. 715-724 (2005)
- [106] S. Takada, T. Hiraoka and H. Kawakami: Effectiveness of Forward Obstacles Collision Warning System based on Deceleration for Collision Avoidance, IET Intelligent Transport Systems, Vol. 8, No. 6, pp. 570-579 (2014)
- [107] 高田翔太, 平岡敏洋, 野崎敬太, 川上浩司: 自発的な行動変容を促す安全運転評価システム (第3報) -システムに対する能動的な理解が利用動機づけに与える影響-, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 2, pp. 411-417 (2014)

付録A 実験説明書

概要

実験実施期間：2014年8月 - 9月

場所：筑波大学総合研究棟 B棟 8階 0827室

条件：普通自動車免許を有し、日常的に運転を行い、メガネを着用しないこと

内容：ドライビングシミュレータによる運転走行実験

時給：820円

拘束時間：11:20 - 15:30

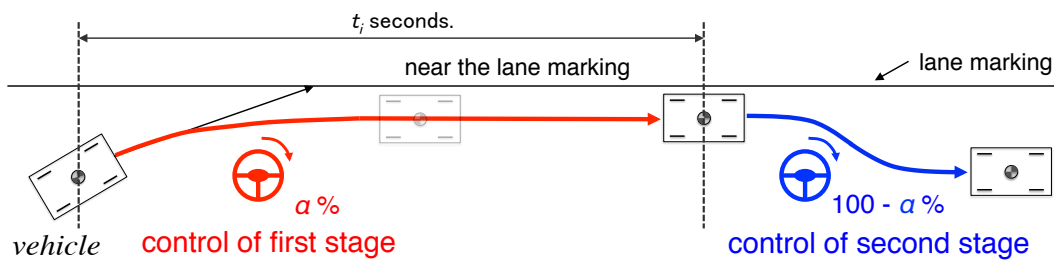
実験の目的

居眠り運転は、道路交通における古くからの懸案事項です。たとえば、夜行バスを運転するドライバーが居眠り運転をし、交通事故を起こしたニュースを目にすることがあります。本研究では、ドライバーが居眠り運転をした、あるいは心身機能を喪失したときに、「ドライバーが運転継続に適した状態にないこと」を判断することができ、また、車両の安全確保を図ることができる運転支援システムを提案しています。本実験では、その運転支援システムを搭載したドライビングシミュレータを運転していただき、覚醒度低下時におけるドライバーの運転行動とシステムの作動状況に関するデータを計測し、提案する運転支援システムが有する機能の有効性を評価します。

提案する運転支援システム

本研究で提案している運転支援システムを説明いたします。いま、運転支援システムは、車両の周囲環境のモニタリングを常に行っています。ここで、車両が走行車線から逸れていく状況を考えましょう。まず、システムは、車両が車線逸脱を起こすと判

断したときに、車両が車線区分線と平行になる操舵制御を実行し、車両の車線逸脱の阻止を図ります。このとき、ドライバがシステムの操舵制御に気づくことによって自ら車両を車線中央に戻す操舵を行うのであれば、システムは「ドライバは状況認識が可能な程度に覚醒している」と判定します。このとき、もしドライバの対応行動が行われないまま特定時間が経過したならば、システムは「ドライバは状況認識の不全に陥っている」と判定し、「車両を車線中央に戻す」ための残りの操舵制御を実行します。整理しますと、システムによる操舵制御の開始後に、システムは、ドライバの対応行動が行われたか否かによってドライバ状態を判断いたします。詳細は、この後、練習走行を行いながら説明したいと思います。



実験のスケジュール

実験説明，練習走行：11: 20 - 12: 00

お昼休憩：12: 00 - 13: 00

実験走行 1：13: 00 - 13: 30

休憩：13: 30 - 14: 00

実験走行 2：14: 00 - 14: 30

休憩：14: 30 - 15: 00

実験走行 3：15: 00 - 15: 30

人権の保護について

提案する運転支援システムにおいて述べた技術を実現するためには、多くの実験データが必要になります。検証実験には、客観的なデータの取得が必要であり、多くの人

に実験参加者として協力してもらうことが不可欠です。参加者に課すタスクは、

- 直線路のみで構成される片側 2 車線の高速道路を 30 分間運転すること

です。運転中は常に 走行速度を 100 [km/h] に一定に保つ速度制御が作動しており、実験参加者はステアリングホイールの 10 時 10 分の位置を両手で把持しながらステアリング操作を担当します。そのため、実験参加者は、アクセル・ブレーキ操作などの速度コントロールを行う必要はありません。速度制御の使用は、実験参加者に課すタスクを可能なかぎり単調なものとするために設けております。また、車両の車線逸脱が予測されたとき、システムは車線逸脱を阻止する操舵制御を実行することになりますが、

- 実験参加者が、システムによる操舵制御の実行に気づいたときには、参加者自らが車両を車線中央に戻す操舵を行うこと

を課します。ドライビングシミュレータでの運転時間は、実験の目的によって様々ですが、眠気などに伴う覚醒度低下時におけるドライバの特性を明らかにしようとする実験では、1 試行あたりの運転時間が数十分に及ぶのがふつうです。このような時間長の設定は、運転開始時の緊張状態から開放され、単調な運転を続けているあいだに徐々に眠気を感じるようになるという知見に基づいています。詳細については実験前に十分説明いたしますが、現時点で何か質問があれば、口頭で説明いたします。

個人情報保護

[実験協力に関わる危険性と安全の確保]

実験参加者が行う 1 試行あたりの運転時間は、30 分です。また、ドライバ（実験参加者）が覚醒状態（または低覚醒状態）にあったか否かは、実験参加者の運転の様子をビデオで撮影し、データ計測時刻における実験参加者のビデオ映像と照合することで判断します。そのため、走行中は参加者の顔映像を撮影しています。これらの映像撮影によって、実験中、実験参加者に精神的・身体的 疲労を与えてしまう可能性があります。実験参加者 1 人あたりの実質的な拘束時間は、昼休憩などを除くと約 3 時間以内とし、走行実験の合間に適宜休憩をとる（走行実験の合間の休憩は 30 分間とする）など、疲労と健康面には十分に配慮しますが、実験中に不快さを感じた場合は、申し出により直ちに実験を休止、または中止いたします。また、実験中にシミュレータ酔いを引き起こす場合があります。実験中、継続的に気分が悪くないか確認し

ますが、それ以外のときでも、体調が悪くなった場合には言っていただければすぐに実験を中止いたします。

[個人情報の保護]

本実験で得られたデータは、研究目的にのみ使用いたします。データは、個人に関する情報とは別にした上で、実験室内の保管庫（総合研究棟 B826）に入れて厳重に管理します。個人情報の保護には十分配慮し、データを学会発表や論文等で公表する際は実験参加者本人を特定することができないように取り扱いいたします。実験データは5年間保存され、破棄される場合には、紙類はシュレッダーにかけ、デジタルデータが入った HDD については物理的破壊を行います。

[協力しない自由, 協力の撤回の自由]

実験に協力しないことにより不利益が生じることは一切ありません。また、実験協力の意思を実験前、実験中いつでも撤回する権利を持ちます。その権利を行使することにより不利益が生じることは一切ありません。

[ビデオ撮影]

本実験では、実験中における実験参加者の運転の様子をビデオで撮影します。得られた画像は、基本的に前項の実験データと同様に取り扱いますが、利用範囲については撮影後に提出して頂くビデオ画像利用承諾書（別紙）への記載に従うものとします。

付録B 最適レギュレータにおける評価関数の最小化

1. 最適レギュレータ

制御対象として,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{B.1})$$

のシステムを考える。システムが可制御であれば, 状態フィードバック制御則

$$u(t) = -Fx(t) \quad (\text{B.2})$$

を適用でき, 状態フィードバック制御則を適用した閉ループ系は,

$$\dot{x}(t) = (A - BF)x(t) \quad (\text{B.3})$$

となる。ここで, この閉ループ系に対して, つぎの二次形式評価関数を設ける。

$$J = \int_0^{\infty} \{x(t)^T Qx(t) + u(t)^T ru(t)\} dt \quad (\text{B.4})$$

この評価関数を最小化するフィードバックゲイン F を与える状態フィードバック制御を最適レギュレータと呼ぶ。(B.4) 式を最小化するフィードバックゲイン F は,

$$F = r^{-1}B^T P = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & \dots & f_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

で与えられ, 状態フィードバックは,

$$u(t) = -Fx(t) = -r^{-1}B^T Px(t) \quad (\text{B.6})$$

となる。ただし, P はつぎのリカッチ代数方程式

$$PA + A^T P - PBr^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (\text{B.7})$$

を満たす正定行列 ($P = P^T$) であり, (B.7) 式の Q は,

$$Q = \text{diag} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & q_{yc} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

となる準正定行列 ($Q = Q^T$) である. このとき, 評価関数 (B.4) 式の最小値を J^* とすると, J^* は,

$$J^* = x^T(0)Px(0) \quad (\text{B.9})$$

となる.

2. 評価関数の最小化

評価関数 (B.4) 式を最小にする最適制御則が (B.6) 式で与えられることはつぎのように示される. 評価関数 (B.4) 式の被積分関数は, リカッチ代数方程式 (B.7) 式を用いると, つぎのように変形できる.

$$\begin{aligned} x(t)^T Qx(t) + u(t)^T ru(t) &= x(t)^T (-A^T P - PA + PBr^{-1}B^T P)x(t) + u(t)^T ru(t) \\ &= -\{Ax(t)\}^T Px(t) - x(t)^T P\{Ax(t)\} \\ &\quad + x(t)^T PBr^{-1}B^T Px(t) + u(t)^T ru(t) \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

ここで, (B.1) 式を $Ax(t) = \dot{x}(t) - Bu(t)$ に変形し, (B.10) 式に代入すると,

$$\begin{aligned} x(t)^T Qx(t) + u(t)^T ru(t) &= (Bu(t) - \dot{x}(t))^T Px(t) + x(t)^T P(Bu(t) - \dot{x}(t)) \\ &\quad + x(t)^T PBr^{-1}B^T Px(t) + u(t)^T ru(t) \\ &= u(t)^T B^T Px(t) - \dot{x}(t)^T Px(t) - x(t)^T P\dot{x}(t) \\ &\quad + x(t)^T PBu(t) + x(t)^T PBr^{-1}B^T Px(t) \\ &\quad + u(t)^T ru(t) \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

となる. ここで,

$$\frac{d}{dt}(x(t)^T Px(t)) = \dot{x}(t)^T Px(t) + x(t)^T P\dot{x}(t) \quad (\text{B.12})$$

を (B.11) 式に代入すると,

$$\begin{aligned} x(t)^T Qx(t) + u(t)^T ru(t) &= -\frac{d}{dt}(x(t)^T Px(t)) + u(t)^T B^T Px(t) \\ &\quad + x(t)^T PBu(t) + x(t)^T PBr^{-1}B^T Px(t) \\ &\quad + u(t)^T ru(t) \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

を得る．さらに，

$$\begin{aligned} (u(t) + r^{-1}B^T Px(t))^T r(u(t) + r^{-1}B^T Px(t)) &= u(t)^T ru(t) + u(t)^T B^T Px(t) \\ &\quad + x(t)^T PBu(t) + x(t)^T PB r^{-1} B^T Px(t) \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

であることから，

$$\begin{aligned} x(t)^T Qx(t) + u(t)^T ru(t) &= -\frac{d}{dt}(x(t)^T Px(t)) \\ &\quad + (u(t) + r^{-1}B^T Px(t))^T r(u(t) + r^{-1}B^T Px(t)) \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

となる．このことより，評価関数は，

$$\begin{aligned} J &= \int_0^\infty \{x(t)^T Qx(t) + u(t)^T ru(t)\} dt \\ &= -[x(t)^T Px(t)]_0^\infty + \int_0^\infty (u(t) + r^{-1}B^T Px(t))^T r(u(t) + r^{-1}B^T Px(t)) dt \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

となる．ここで， $(u(t) + r^{-1}B^T Px(t))^T r(u(t) + r^{-1}B^T Px(t))$ は完全平方と呼ばれる．
評価関数 J を最小にするには，完全平方の箇所を 0 にすればよく，したがって，

$$u(t) = -Fx(t) = -r^{-1}B^T Px(t) \quad (\text{B.17})$$

となる．また，評価関数 (B.16) 式は，

$$J = x(0)^T Px(0) - x(\infty)^T Px(\infty) \quad (\text{B.18})$$

となる．ここで，リカッチ代数方程式の解 P が正定なため，閉ループ系は漸近安定である．すなわち， $x(\infty) \rightarrow 0$ となり，(B.18) 式は，

$$J = x(0)^T Px(0) \quad (\text{B.19})$$

となる．以上から，評価関数 (B.4) 式を最小にする制御則は，(B.6) 式で与えられ，評価関数の最小値が，(B.19) 式となることがわかる．

論文リスト

主要論文（査読あり）

- [1] 齊藤裕一，伊藤誠，稲垣敏之，
双対制御論的運転支援システム -車両安全確保とドライバ状態推定の機能と特性-，
計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 6, 2014, pp. 461-470 2014 年 6 月.
- [2] Yuichi Saito, Makoto Itoh, Toshiyuki Inagaki,
Dual Control Theoretic Driver Assistance: Dynamic Characteristics of Steering
Torque Control based on Linear Quadratic Regulator,
Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics,
San Diego, October, pp. 1753-1758, 2014.10.

学術報告（査読なし）

- [1] 齊藤裕一，伊藤誠，稲垣敏之，
双対制御論的運転支援：車両安全確保とドライバ状態推定の有効性検証，
計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014，GS10-3, 6 pages,
岡山大学, 2014 年 11 月
- [2] 齊藤裕一，伊藤誠，稲垣敏之，
双対制御論的運転支援システム：操舵トルク制御による車両安全確保，
計測自動制御学会第 41 回知能システムシンポジウム，B21-1，6 pages,
筑波大学, 2014 年 3 月
- [3] 齊藤裕一，伊藤誠，稲垣敏之，
車線逸脱時におけるドライバの覚醒度と操舵行動の解析，

計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013, SS10-5, pp. 971-976,
ピアザ淡海, 2013 年 11 月

- [4] 齊藤裕一, 伊藤誠, 稲垣敏之,
双対制御論的運転支援システムの数理モデルの構築と検証,
自動車技術会 2013 年度秋季大会学術講演会, 2013 年度秋季大会学術講演会前刷
集, No. 128-13, pp. 7-10,
名古屋国際会議場, 2013 年 10 月
- [5] 齊藤裕一, 伊藤誠, 稲垣敏之,
双対制御論的運転支援システム -車両安全確保とドライバ状態推定の機能とその
特性-,
電子情報通信学会安全性研究会, 電子情報通信学会技術研究報告 IEICE technical
report Vol. 113, No. 226, SSS2013-18, pp. 15-18,
機械振興会館, 2013 年 9 月