Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

自動/手動運転の切り替わり時におけるオプティックフローに影響されるドライバの操舵特性の解析

岡藤, 勇希

(Citation)
神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要,9:40-43

(Issue Date)
2017

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81010015

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要　第 9 号　40〜43 頁　2017 年
doi:10.5047/gseku.j.2017.005

【研究紹介】

自動/手動運転の切り替わり時における オプティックフローに影響されるドライバの操舵特性の解析

岡藤　勇希 [1]

[1] 工学研究科機械工学専攻

（受付:December 12, 2017　受理:December 13, 2017　公開:December 22, 2017）

キーワード: 自動/手動運転，オプティックフロー，操舵特性，ドライビングシミュレータ

1. 緒　言

近年，人工知能技術の劇的な進展を背景に，Google Car を代表とするような自動運転自動車の実用化が現実味を帯びてきた．近い将来，実用化されると考えられる米国自動車協会の自動運転レベル 2 から 4 の自動運転の定義では，システムが機能限界に陥った場合などに，人間が自動運転車に代わって運転操作を引き継ぐ必要がある．この自動/手動運転の切り替わりのことは TRANSITION と呼ばれ，近年，TRANSITION に関する様々な研究が盛んに行われている [1–5]．これらの研究として一番多い内容は，TRANSITION 時にドライバが安全に操作を引き継ぐための時間に関するものである [1,2]．これは，自動運転技術を搭載するためには喫緊に必要な事柄であるため，様々な国や組織の政策においても一番重要視されている観点である．各研究において，車両速度・道路状況などのシミュレーション状況，自動/手動運転中のタスクの違いにより，大まかには 5 - 15 秒程度必要であるとされる．次に多い研究として，ドライバの操舵・加減速の特性を調べるものである [3–5]．これらは，TRANSITION におけるドライバ特性を知ることで，より良い Human Machine Interface を構築するという目的がある．Beukel らによる研究ではドライバの状況認識と回避能力の関係性 [3]，Russell らによる研究では運転技術の学習過程の特性を調査している [4]．Wada らによる研究では，Shared Control において，どのように運転者に運転権限を引き渡すべきかを検討している [5]．このように TRANSITION に関する研究が盛んに行われているが，本研究ではその中でもドライバの操舵特性に着目した解析を行う．

従来からの研究では，手動運転時においてドライバは有効な追従制御を可能とするために，複数の視覚情報を複合的に用いて操舵制御をしていることが示されてきた [6]．特に操舵制御に必要な情報として，オプティックフローと道路縁 (白線や縁石等の情報) が挙げられる．オプティックフローとは，網膜上に発生する環境下の速度ベクトル場のことであり，ドライバはオプティックフローから速度や自己運動の方向を知覚しているとされている [7] (Fig. 1)．また近年，遠点においてオプティックフロー，近点において道路縁を用いることで，ドライバが上手く車両を制御していることが示されており [8,9]，これらの行動が熟練・一般ドライバ間の運転の上手さにも現れると考えられている．特に本研究では，このオプティックフローに影響されるドライバの操舵特性の解析に主眼を置き，実験・解析を行ったため，その実験結果を報告する．

本稿は，工学研究科プレミアム・プログラムによる，2016 年 9 月-2017 年 2 月の間の英国 Leeds 大学の研究留学での成果となる．また研究成果の一部は，HFES Europe Annual Meeting 2017 で発表したものである．

Fig. 1: Optic Flow

2. 実験条件

2.1 実験装置

本実験では，Fig. 2 に示すドライビングシミュレータを用いた．シミュレータ環境は，Intel i7 3770 (3.4 GHz) のコンピュータと WorldViz Vizard 3.0 を用いて構築した．60Hz のプロジェクタを用いて 1.98 × 1.43 [m] のスクリーン上に映像を映している．被験者はスクリーンから 1 [m] 離れた位置に座っており，目の高さは約 1.2 [m] となっている (視野角：89.42 - 71.31 [deg])．被験者は力覚フィードバックが与えられたステア (Logitech G27) を操作する．ステアリングアングルの入力によって，最小分解能 0.36 [deg/s] を通して線形補間でシミュレータ上にマッピングされる．

2.2 自動運転/手動運転

本実験では，各試行の最初の 10 - 12 秒間を自動運転，その後 20 秒までの区間を手動運転として設定した．自動運転の区間中は，コースに合わせてステアが自動で回転し，操舵特性の解析を明確にするために，道路中心から 1.25 [m] 外側に車両が位置するように設定した．手動運転に切り替わる際に，二度ビープ音を鳴らして，切り替わりのタイミングをドライバに知らせる．二度目のビープ音の後，ドライバは道路中心に正確に位置するように走行することを目標とする．本研究では操舵特性の解析を目的としたため，車両速度は 30 [mph] (約 48 [km/h]) の一定として，ドライバはステア操作のみを行うこととした．

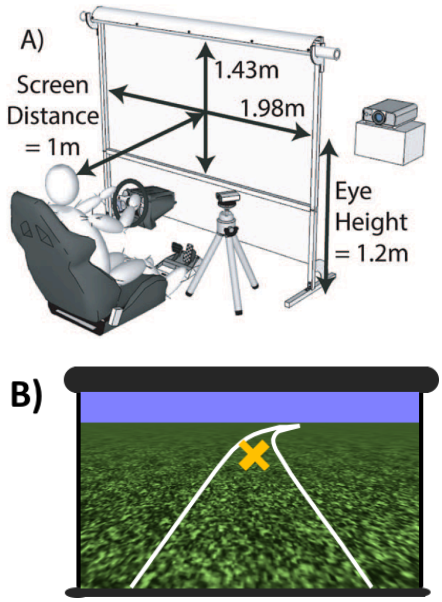

Fig. 2: A) Schematic of Driving Simulator Layout. B) Screenshot of right-hand bend stimuli, with fixation cross.

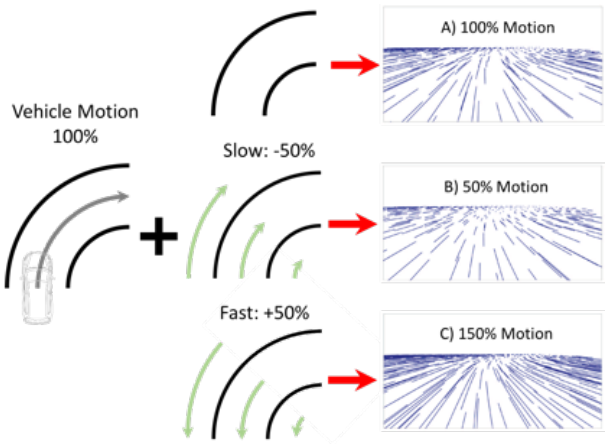

Fig. 3: Manipulating Optic Flow

2.3　擬似オプティックフロー

本研究では，オプティックフローに影響されるドライバの操舵特性の解析を目的とするため，疑似オプティックフローを用いた実験を行った．これは，ドライビングシミュレータ内の地面のテクスチャを人工的に動かすことにより，ドライバが車両挙動によって発生するものとは異なるオプティックフローを知覚させることで，オプティックフローによる影響を調べるという手法である [9,10]．本実験では，定常円旋回の軌跡に対して地面を回転させることにより，本来の速度 (30 [mph]: $Flow_{No}$) よりも 150%と 50% (15 [mph]: $Flow_{Slow}$, 45 [mph]: $Flow_{Fast}$) の速度感覚を知覚させる手法を用いた (Fig. 3)．道路縁の情報は車両運動のみによって誘発される速度で動いて知覚されるため，擬似オプティックフローによって操舵特性が変化すれば，ドライバの操舵がオプティックフローによって影響されたかどうかを検討することが可能となる．

2.4　固定注視点

ドライバの注視地点によって，ドライバが取得する情報が異なってくることから，操舵特性が変わることが知られている [9]．そこで，ドライバの注視する点を一点に集中させる固定注視点を用いた実験により，注視点-操舵特性を一意に解析可能とする (Fig. 2 B))．固定注視点は常に道路中心かつ，車両から一定距離に設定されているものとする．固定注視点の種類として，自動運転と手動運転時に，遠点-遠点 ($F-F$)，近点-近点 ($N-N$)，近点-遠点 ($N-F$) の 3 種類を用いた．遠点は車両から 16 [m]，近点は 3 [m] 先の点とした．

2.5　試行回数

実験は，オプティックフロー ($Flow_{No}$, $Flow_{Slow}$, $Flow_{Fast}$) × 実施区間 (自動運転のみ (*Auto*)，手動運転のみ (*Man*)，自動/手動運転の両方 (*Both*)) × 固定注視点 ($F-F$，$N-N$，$N-F$) の 21 条件を用いた ($Flow_{No}$ の条件時は，実施区間の条件が 1 つになる)．一例として，$Flow_{Slow}$, *Auto*, $N-F$ の条件では，自動運転区間：50%速度，近点注視，手動運転区間：100%速度，遠点注視となる．また，各試行を 6 回ずつ行うことにより (左カーブ 3 回，右カーブ 3 回，また自動運転の区間，10 秒 2 回，11 秒 2 回，12 秒 2 回)，被験者は全 126 回の試行を行った．これらは全てランダムに行われた．

2.6　走行路

本実験は全て半径 60 [m] の定常円の走行路を用いた．また道路幅は 3 [m] であり，車両は質点運動を仮定されているため，最大左右 1.5 [m] の余裕がある．

2.7　解析手法

オプティックフローに影響される操舵特性を解析するために，本研究では二種類の解析手法を用いた．

Steering Bias (SB):

道路中心を基準として，毎フレームごとの車両位置と道路中心の差分による位置偏差の指標．また，道路形状に対して車両が内側にある場合は正の値，逆の場合は負の値とした．

$$SB = \frac{1}{n}\Sigma(RoadCentre - VehiclePosition)$$

Flow-Induced Steering Bias (FISB):

オプティックフローの影響度の指標．150%と 50%の疑似オプティックフローによって SB の結果が変化した時，それらの差分をとることで，オプティックフローの影響度を図る．オプティックフローの影響が大きいほど，大きな値となる．

$$FISB = \frac{(SB_{Fast} - SB_{Slow})}{2}$$

SB は各試行において計算し，全部のデータの平均・分散を取ることで各条件の評価を行う．これらの平均 SB データを用いて $FISB$ を計算し，各条件間のオプティックフローの影響の大きさを評価する．

3.　実　験

3.1　倫理委員会

本実験は，英国 Leeds 大学研究倫理委員会に承認された研究である (参照番号：16-0381，承認日：2017 年 1 月 17 日)．

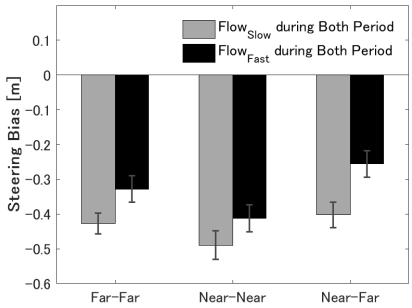

Fig. 4: SB Results for $Flow_{Slow}$ and $Flow_{Fast}$

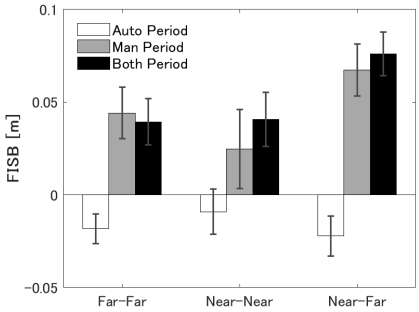

Fig. 5: FISB Results for Fixation and Period Conditions

3.2　被験者

20 名 (男 10 人，女 10 人，18-35 歳，平均 24.75 歳) の学生と大学スタッフを被験者として採用した．被験者を選ぶ際に，大学全体のメーリングリストに流して被験者を募集した．全ての被験者は矯正を含め，正常な視力を持っており，最低 1 年以上，ドライビングライセンスを取得している (どの国のライセンスかは問わない).

3.3　実験手順

最初に，全ての被験者にインフォームド・コンセントを行い，いかなる時でも要望があった際は，全てのデータの公表を控えることを承認頂いた上で実験に参加頂いた．被験者は，固定注視点を注視しつつ，可能な限り道路中心を走行し，可能な限り正確かつ滑らかな操舵を心がけるように指導された．道路中心の走行を指示することで，個々人特有の軌道の影響を考慮する必要がなく，純粋なオプティックフローの影響のみを走行経路から調査することが出来る．被験者は本実験の前に，システムに慣れてもらうために練習を行った．練習では，擬似オプティックフローの条件は用いずに，固定注視点の状況のみを変化させたもの ($F-F$，$N-N$，$N-F$) を各 2 回ずつ (左カーブ 1 回，右カーブ 1 回) 行った．しかし被験者からの要望があれば，この練習をもう一度行った．練習後に，本実験の試行を 63 回ずつに分け，途中に 10 分ほど休憩を入れながら行った．

3.4　実験結果

3.4.1　Steering Bias

まず始めに，疑似オプティックフロー $Flow_{Slow}$, $Flow_{Fast}$ の影響を調べるために，*Both* 区間の両方に適用された時の結果を調べる．つまり，自動/手動運転の区間は関係なく，一貫して $Flow_{Slow}$, $Flow_{Fast}$ の状況下での結果となる．従来研究の結果を参考にすると [9]，$Flow_{Slow}$ でより外側に，$Flow_{Fast}$ でより内側に車両位置がずれることが考えられる．Fig. 4 の結果より，$Flow_{Slow}$，$Flow_{Fast}$ の結果共に，注視パターンとは独立した従来研究と同様の結果が得られた．つまり，オプティックフローによってドライバの操舵特性が変化することが確認出来る．

3.4.2　Flow-induced Steering Bias

次に，各固定注視点の条件下において ($F-F, N-N, N-F$)，区間条件ごと (*Auto*, *Man*, *Both*) の $FISB$ を求める．*Auto* と *Both* の差異が手動運転時のオプティックフローの影響度，*Man* と *Both* の差異が自動運転時のフローの影響度を意味する．結果を Fig. 5 に示す．またこれらのデータに対して，多次元検定

Table 1: ANOVA Results for FISB

Variable	*FISB*			
	F	df	p	η_p^2
Period	19.54	$1.49, 28.25$ ($\epsilon = .74^{\dagger}$)	$< .001^{*}$	.51
Fixation	4.97	$2, 38$ ($\epsilon = .97$)	$.012^{*}$	.21
Period × Fixation	2.21	$2.90, 55.00$ ($\epsilon = .72^{\dagger}$)	.099	.10

* : $p < .05$; † : $\epsilon < .75$ (Greenhouse-Geisser corrections are applied)

ANOVA を用いて差異を検証する．全体の結果を Table 1 に示す．各区間の差異は，(*Auto* vs *Both*: $p < .001^{*}$, *Man* vs *Both*: $p = 1.0$) となった．*Auto* vs *Both* に有意差があることから，手動運転時にはドライバの操舵にオプティックフローが大きく影響していたことが分かる．しかし *Man* vs *Both* の結果より，いくらドライバが自動運転中に集中して運転環境を注視していても，ドライバの操舵は自動運転中のオプティックフローに影響されないことが確認された．また各注視点の個別の結果は，($F-F$ vs $N-N$: $p = 1.0$, $F-F$ vs $N-F$: $p = .045^{*}$, $N-N$ vs $N-F$: $p = .043^{*}$) となり，$N-F$ の時に他の注視パターンとの差異が確認された．一般的に理想環境下では，近点のオプティックフローは遠点より大きな値を持つという特徴がある．そのため，自動運転中にドライバはオプティックフローのキャリブレーションを行っているが，近点から遠点に注視点が移ると，予期していないオプティックフロー入力が入るため，オプティックフローの影響が大きくなることが考えられる．最後に，注視点と区間の間には相互作用が確認されなかった．

4.　結　言

本稿では，自動/手動運転の切り替わり時におけるドライバの操舵特性の解析結果を紹介した．特に，オプティックフローという視覚情報に関連した操舵特性の結果を示した．今回の研究結果だけでは，TRANSITION 時のドライバの操舵特性を結論付けることは容易ではないが，本研究により推測される二点

の特性を示す.

1. ドライバは自動運転中の知覚情報に直接的には依存せず，手動運転中の情報のみを用いて操舵を行う.
2. ドライバの注視点が TRANSITION 中に大きく変化することにより，ドライバが自動運転中に保持していた情報を用いることが出来ないため，操舵が不安定になる.

特に今回用いた条件の一つ，注視点が近点-遠点と移ることは，携帯電話の操作等から運転操作に移ることを想定しており，緊急時の突然の引継ぎ操作では操舵が安定せず，危険な運転になり得るということが確認された．つまり，自動運転から手動運転へと切り替わる際は，どれだけの時間の余裕が持てるかが重要であり，注視点の誘導などの Human Machine Interface によって，より安心安全な自動運転車が開発されることを期待する.

5. 謝　辞

本稿の研究結果は工学研究科プレミアム・プログラムの支援を受けて，英国 Leeds 大学で行ってきた研究内容の一部である．このような研究機会をいただけたことを，本稿にて関係者の皆様に感謝申し上げます.

References

1) N. Merat A. H. Jamson, F. C. H. Lai, M. Daly, & O. M. J. Carsten, “Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 27, pp. 274-282, 2014

2) B. Mok, M. Johns, K. J. Miller, D. Sirkin, P. Ive, & W. Ju, “Emergency, Automation Off: Unstructured Transition Timing for Distracted Drivers of Automated Vehicles”, *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 2458-2464, 2015

3) A. P. Beukel, & M. C. Voort, “The Influence of Time-criticality on Situation Awareness when Retrieving Human Control after Automated Driving”, *IEEE 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2013

4) H. E. B. Russell, L. K. Harbott, I. Nisky, S. Pan, A. M. Okamura, & J. C. Gerdes, “Motor learning affects car-to-driver handover in automated vehicles”, *Machine-Human Interactions*, vol. 1, no. 1, 2016

5) T. Wada, K. Sonoda, T. Okasaka, & T. Saito, “Authority Transfer Method from Automated to Manual Driving via Haptic Shared Control”, *IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics*, 2016

6) R. Wilkie, & J. P. Wann, “Controlling steering and judging heading: Retinal flow, visual direction, and extraretinal information”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 29, no. 2, pp. 363-378, 2003

7) J. J. Gibson, *The Perception of the Visual World*, Houghton Mifflin, Boston, 1950

8) D. D. Salvucci, & R. Gray, “A two-point visual control model of steering”, *Perception*, vol. 33, no. 10, pp. 1233-1248, 2004

9) C. D. Mole, G. K. Kountouriotis, J. Billington, & R. M. Wilkie, “Optic flow speed modulates guidance level control: new insights into two- level steering”, *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, vol. 42, no. 11, pp. 1818-1838, 2016

10) G. K. Kountouriotis, C. D. Mole, N. Merat, & R. M. Wilkie, “The need for speed: global optic flow speed influences steering”, *Royal Society open sience*, vol. 3, no. 5, 2016