

特集：ITS 世界会議

24

ドライバの筋活動に基づく車線維持操舵支援制御の研究

A Study of Lane Keeping Assistance by Steering Control Based on Muscular Activity

高橋 英輝*1
Hideki Takahashi

菅野 崇*2
Takashi Sugano

岡崎 俊実*3
Toshimi Okazaki

要約

前方認識カメラによって得られる車線情報を利用して、ドライバのステアリング操作を支援する車線維持支援システム（LKAS：Lane Keeping Assistance System）を対象として、走行シーンに最適な操舵支援の実現を目指している。操舵支援の良し悪しを評価するにあたり、LKAS が働いている際の操舵フィーリングを、上肢の筋活動に着目して分析した。その結果、専門家の主観評価が高い LKAS は、左右対称関係にある筋の同期的活動や操舵を止める方向に作用する筋（拮抗筋）の活動が増加することなく、操舵方向に作用する筋（主動筋）の活動が減少していることが分かった。この現象を解釈することによって得られた仮説を基に、道路曲率に応じて操舵軸周りの粘性特性を制御する操舵支援制御手法を考案した。この支援制御により、直進走行時や定常旋回時のような一定の操舵角を保持するシーンでは、操舵の楽さと安定性を、コーナ切り込み／切り戻し時のような操舵を行うシーンでは、操舵の滑らかさを向上させることができた。

Summary

Lane Keeping Assistance System (LKAS) controls an electric power steering that assists driver's steering operations to the lanes observed by an on-board camera. LKAS performance was evaluated in terms of steering stability including the ease of steering, and electromyogram (EMG) of the drivers' arms was analyzed. The result showed that stable steering control prevents synchronous contractions of symmetrical muscles of arms, and reduced the action of the agonists without increasing the use of the antagonists. Based on the result, a new steering control logic was setup, which modifies yaw motions and steering viscosity, improving steering smoothness and stability by less force.

1. はじめに

近年では、自動車の周辺環境を認識する技術が発達し、それを利用した運転支援システムが数多く開発されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。その中の一つとして、車線維持支援システム（LKAS）が商品化されている。LKAS は、車載カメラで前方の車線を認識し、電動パワーステアリングのアシストトルクを制御することによって、ドライバのステアリング操作を支援する機能をもつ。従来の LKAS の評価は、主に長時間運転におけるドライバの肉体的負担や精神的負担の軽減という観点で行われてきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。しかし LKAS は、通常の走行中にも

常に操舵反力に影響を与えるシステムであるため、ドライバのハンドル操作との干渉が発生し⁽⁵⁾、操舵フィーリングの悪化のために機能を活用しないケースも生じる。そのため、LKAS の機能を活用する／しないを含め、本当に有効な支援とするためには負担軽減の観点のみでなく、操舵フィーリングの観点でも良好な支援としなければならない。これまでも操舵フィーリングのような感覚量を物理量で定量化する取り組み^{(8),(9)}は行われてきたが、評価指標として利用できるレベルにまで至っていない。また、操舵支援制御設計に活用するためには、評価指標の論理的解釈も必要となる。

本稿では、LKAS の操舵支援が働いている際の操舵

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

フィーリングの良し悪しを評価するために、ハンドルと腕の動き、そのときの筋活動を照らし合わせて分析を行った。更に、ドライバーの筋活動による特性変化に基づく操舵支援制御手法を考案し、その効果検証を行った。

なお、本研究で行った全ての被験者実験は、試験開始前にインフォームドコンセントを得て行った。

2. 操舵フィーリングに関する主観評価

LKAS の操舵支援による操舵フィーリングの変化を把握するために、走行評価によるフリーコメントを収集した。被験者は、運転支援システムの開発に従事している 20 代から 50 代の男性社員 13 名とした。評価は、LKAS が装着されている市販車 A 車と B 車の 2 台を用い、それぞれ LKAS OFF と ON の順で乗り比べた。A 車の LKAS の支援の特徴は、常時車線中央へ誘導するものであり、B 車の LKAS の支援の特徴は、車線と車両進行方向のなす角度をゼロにするように誘導するものである。試験路は、直線及び左旋回コーナ、その間を緩和曲線で結んだテストコースである。走行後に収集したフリーコメントを、ビジュアルテキストマイニング⁽¹⁰⁾を利用して、3 シーン（直進走行時、定常旋回時およびコーナ切り込み/切り戻し時）に分けて分析した。その結果、LKAS の支援によって操舵フィーリングに変化が生じたのは、下記の点であった。

- (a) 直進走行時および (b) 定常旋回時
 - ・ 保舵の楽さ (Effortlessness)
 - ・ 保舵の安定性 (Stability)
- (c) コーナ切り込み/切り戻し時
 - ・ 操舵の滑らかさ (Smoothness)

上記の観点で、主観評価結果を“Good / Fair / Poor”の 3 段階でまとめた結果を Table 1 に示す。LKAS の支援によって、主観評価が向上した場合は Good, 低下した場合は Poor, 変化を感じなかった場合は Fair とした。主観評価結果の t 検定を行い、5%水準の優位差があることを確認した。

次に客観データとして、操舵角と操舵トルクを確認した。計測には脱着式の操舵角力計を用い、被験者は主観評価を行った 13 名のうちの 2 名とした。計測結果の一例を Fig. 1 に示す。直進走行時（図中 (a) 部）、LKAS の支援によって、A 車は操舵角と操舵トルクの変動が大きくなり、B 車はその変動がわずかに小さくなる。この結果は、保舵の楽さと安定性の主観評価結果と相関がとれる。定常旋回時（図中 (b) 部）では、LKAS の支援によって、A 車は保舵に必要な操舵トルクが大きく減少するのに対し、B 車の減少量はわずかであり、保舵の楽さの主観評価結果と一致する。しかし、保舵の安定性を操舵トルクの変動で比較すると、

A 車、B 車ともに、LKAS OFF と ON で大きく変化しないにもかかわらず、A 車と B 車で主観評価結果が異なる。コーナ切り込み/切り戻し時（図中 (c) 部）では、A 車は LKAS の支援によって、操舵角に対する操舵トルクの立ち上がり方の変動が大きくなり、これが操舵の滑らかさの主観評価を悪化させている要因の 1 つと考える。一方で B 車は、LKAS OFF と ON で大きな変化はないが、操舵の滑らかさの主観評価は良好な結果となっている。以上のように、操舵角と操舵トルクにより主観評価を説明できる部分もあるが、これだけでは主観評価を説明できない項目もある。そこで次章では、ハンドル操作時のドライバーの腕の動作に着目した分析を行う。

Table 1 Subjective Evaluation Results on Vehicle A and B

Scenes	Evaluation axes	Vehicle A	Vehicle B
(a) Straight driving	Effortlessness	Poor	Good
	Stability	Poor	Good
(b) Steady turning	Effortlessness	Good	Fair
	Stability	Poor	Good
(c) Turning or reversing a wheel	Smoothness	Poor	Good

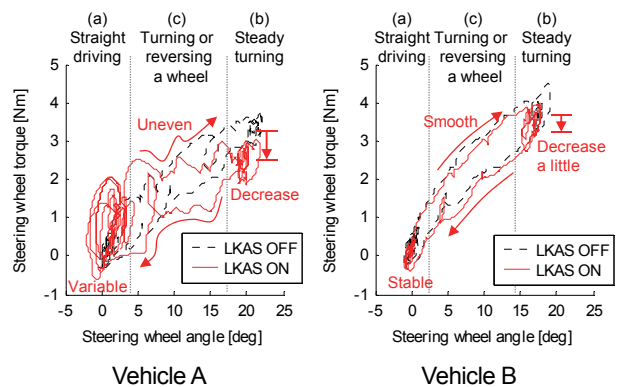


Fig. 1 Change in Steering Characteristics by LKAS

3. 筋活動による評価⁽¹¹⁾

3.1 実験方法

LKAS の操舵支援によるドライバーの腕の動作の変化を把握するために、上肢の筋電位を計測した。計測したポイントは Fig. 2 に示す 11 か所の皮膚表面筋電位である。計測器は NEC 製サイナアクト MT11 を使用した。計測した筋電位は、整流後、事前に計測した最大随意収縮 (MVC : Maximum Voluntary Contraction) で正規化した後、ローパスフィルタによって平滑化した。試験車両と試験路は、2 章と同様である。被験者は、2 章で操舵角と操舵トルクを計測した 2 名とした。慣熟走行後、自動速度制御装置の設定速度を

100km/h に設定し, LKAS OFF, ON の順で計測を行った。計測に際しての条件は, 両手でハンドルを持ち, 計測の間は手をハンドルから離すことを禁止する制約を設けたが, それ以外は通常通りの車線維持走行を行うように指示した。

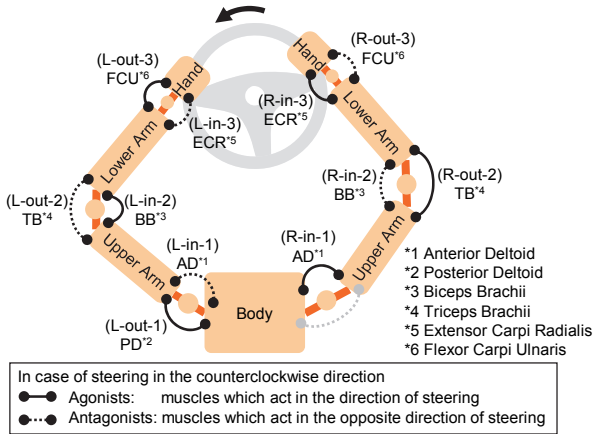


Fig. 2 Measurement Parts of Muscles

3.2 実験結果と考察

計測結果の一例を Fig. 3 に示す。グラフはそれぞれ, 操舵角 (SWA), 操舵トルク (SWT) と, Fig. 2 に示した計測箇所の筋電位 (L-in-1) AD ~ (R-out-3) FCU の時系列データである。ドライバがハンドルを左回りに操舵する場合, ドライバは右肩を押し, 右肘を伸ばし, 右手首を曲げるといった腕の動作が必要である。図示した筋の中で, これらの動作をもたらす

筋は, 右三角筋前部 (R-in-1), 右上腕三頭筋 (R-out-2) および右機側手根伸筋 (R-in-3) が該当する。逆に, 左上腕三頭筋 (L-out-2) などは左回りの操舵を止める働きをする。本稿では, 操舵方向に作用する筋を主動筋, 操舵方向とは逆方向に作用する筋を拮抗筋と定義した。なお, 操舵軸回りの 1 自由度に対して筋は冗長であるため, 同じ左回りの操舵に対しても, 筋活動は一意に決まらないが, 走行シーンごとのハンドルと腕の動き, そのときの筋活動を事実としてとらえ, 最も無理がないと考える解釈をした。また, 操舵角の変化によって腕の姿勢も変化するため, 同じ操舵トルクをハンドルに伝えても活動する筋は変化するが, 本実験では最大でも操舵角は 20deg であるため, 腕の姿勢変化は無視して評価した。

(a) 直進走行時の筋活動

A 車は LKAS の支援によって, 主動筋と拮抗筋の関係にある左右の上腕三頭筋 (L-out-2) (R-out-2) が同じタイミングで活動する現象が発生する。これを同期的活動と呼ぶ。左右対称筋の同期的活動によって, 発生する力は相殺されるものの, 腕を含めた操舵系の剛性は高まることになる⁽¹²⁾。A 車の場合, 車線中央から少しでも外れると, それを修正しようと LKAS の支援が働くため, それをドライバはハンドルのふらつきと感じ, 左右上腕三頭筋の同期的活動によって, そのふらつきを抑制する行動をとったと考える。一方で B 車は, LKAS OFF と ON で大きな変化はない。

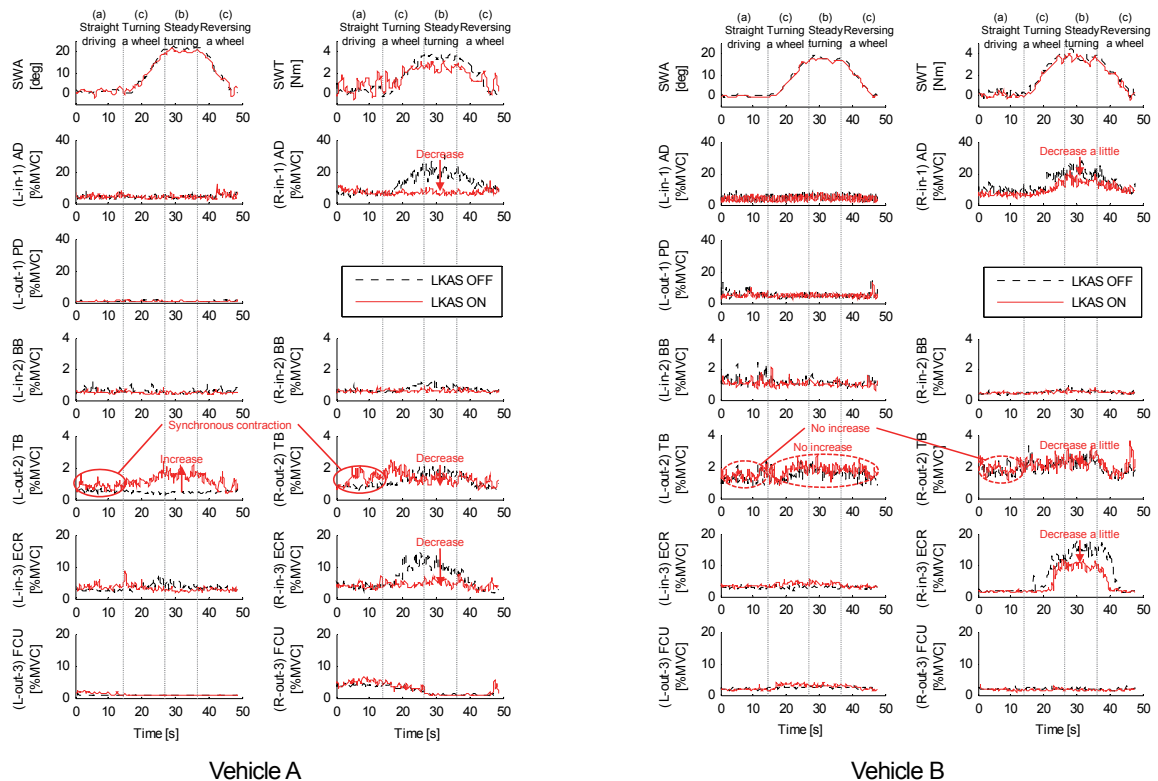


Fig. 3 Muscular Activities When Driving Vehicle A and B

(b) 定常旋回時の筋活動

A 車, B 車ともに, LKAS の支援によって, 主動筋である右三角筋前部 (R-in-1), 右上腕三頭筋 (R-out-2) および右機側手根伸筋 (R-in-3) の活動が減少する。特に A 車の減少量が大きく, 保舵の楽さという観点で良好に見えるが, 拮抗筋である左上腕三頭筋 (L-out-2) の活動が増加している。筋の特性から活動が大きいほど, 腕の剛性は大きくなる⁽¹³⁾。この事実から考察すると, A 車のように LKAS の支援によって主動筋の活動が大幅に減少すると腕の剛性が小さくなるが, それに合わせて車両の特性に変化がないと, 腕を含めた車両の安定性が低下する。この車両の安定性低下を補うために, ドライバが主動筋と拮抗筋を同時に活動させることによって, 腕の剛性を高める行動をとったと考える。

(c) コーナ切り込み/切り戻し時の筋活動

上述の (b) 定常旋回時と同様に, A 車, B 車とも LKAS の支援によって, 主動筋の活動は減少するが, A 車の場合のみ, 拮抗筋の活動が増加する。一般的に, 主動筋はある動作をする時に作動させる筋であり, 拮抗筋はその動作の調節に作動させる筋である。このことから, A 車は LKAS の支援によって滑らかな操舵ができなくなり, 拮抗筋の活動による調節作業を LKAS OFF の時以上に行わなければならないため, 拮抗筋の活動が増加したと考える。

以上の評価から, (a) 直進走行時の保舵の楽さと安定性は, 左右対称筋の同期的活動量と相関が高く, また, (b) 定常旋回時の保舵の安定性や (c) コーナ切り込み/切り戻し時の操舵の滑らかさは, 主動筋や拮抗筋の活動量と相関が高いことが分かった。

4. 制御ロジック開発⁽¹¹⁾

4.1 操舵フィーリング向上のための操舵支援制御

3 章の考察から, LKAS の操舵支援によって保舵の楽さや安定性, 操舵の滑らかさの性能を向上させるためには, 下記の仕組みが必要であると考えられる。

- ・ 左右対称筋の同期的活動の原因となる操舵系のふらつきを発生させない, または抑える。
- ・ 車線形状に応じた支援によって主動筋の筋活動を低下させる場合, その筋活動の低下によって生じる腕の剛性低下を補償する。

上記の実現案として, 操舵軸まわりの粘性特性を, シーンに応じて制御することが有効であると考えた。具体的には, 車線が直線と判断された場合は, ハンドルのふらつきを抑制するために操舵軸まわりの粘性特性を高め, コーナリング中は, 旋回するために必要な操舵トルクを減少させるよう操舵方向へのトルク支援を行うのと同時に, その減少させた操舵トルクに応じ

た粘性補償を行うことによって, 保舵の楽さと安定性および操舵の滑らかさを向上させることとした。

4.2 制御ロジック概要

制御ロジックは, 前方認識カメラと車載センサから得られた情報に基づき操舵の支援量 (アシストトルク) を決定する構成であり, 概要を Fig. 4 に示す。4.1 節に示した制御手法を実現するために, 図中 Calculation of target damping torque と示した部分の処理を設けた。この処理は, 式 (1) にて粘性補償トルクを算出する。

$$T_{target_damping} = -C(\gamma_{target}) \cdot \delta' \dots\dots\dots(1)$$

ここで γ_{target} は, 車両が車線を走行する際に目標とするヨーレートであり, 曲率 R , クロソイドパラメータ A を用いて算出されるものである。この目標ヨーレートに応じた粘性ゲイン C を変化させることによって, 車線形状に応じた操舵軸回りの粘性特性が変化することになる。この粘性補償トルクをアシストトルクに加えることにより, LKAS 全体の出力とする。

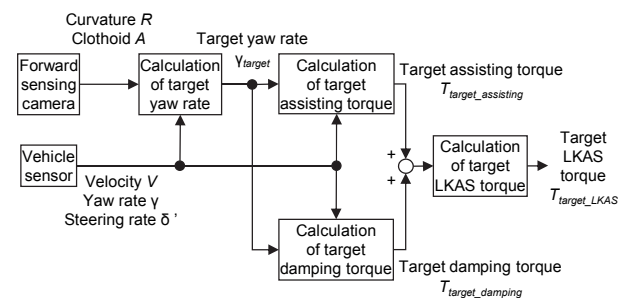


Fig. 4 Configuration of Control Logic

4.3 制御性能比較

4.2 節の制御ロジックを実装した試作車両を用いて, 2 章, 3 章と同様に主観評価と筋活動評価を行った。主観評価結果を Table 2 に示す。主観評価では, LKAS の支援によって全ての評価軸で向上したことが確認できた。

Table 2 Subjective Evaluation Results on Test Vehicle

Scenes	Evaluation axes	Test vehicle
(a) Straight driving	Effortlessness	Good
	Stability	Good
(b) Steady turning	Effortlessness	Good
	Stability	Good
(c) Turning or reversing a wheel	Smoothness	Good

また, 操舵角 (SWA), 操舵トルク (SWT), 筋電位 (L-in-1) ~ (R-out-3) の時系列データの一例を

Fig. 5 に示す。(a) 直進走行時では、左右上腕三頭筋 (L-out-2) (R-out-2) の同期的活動が減少することが確認できた。また、(b) 定常旋回時や (c) コーナ切り込み/切り戻し時では、拮抗筋である左上腕三頭筋 (L-out-2) の活動を増加させることなく、主動筋である右三角筋前部 (R-in-1)、右上腕三頭筋 (R-out-2) および右橈側手根伸筋 (R-in-3) の活動を減少させている。これらは全て意図した通りの結果であり、粘性補償が狙い通りに働いていることを確認できた。また、この結果は 3 章で示した考察が適切であったことを裏付ける。

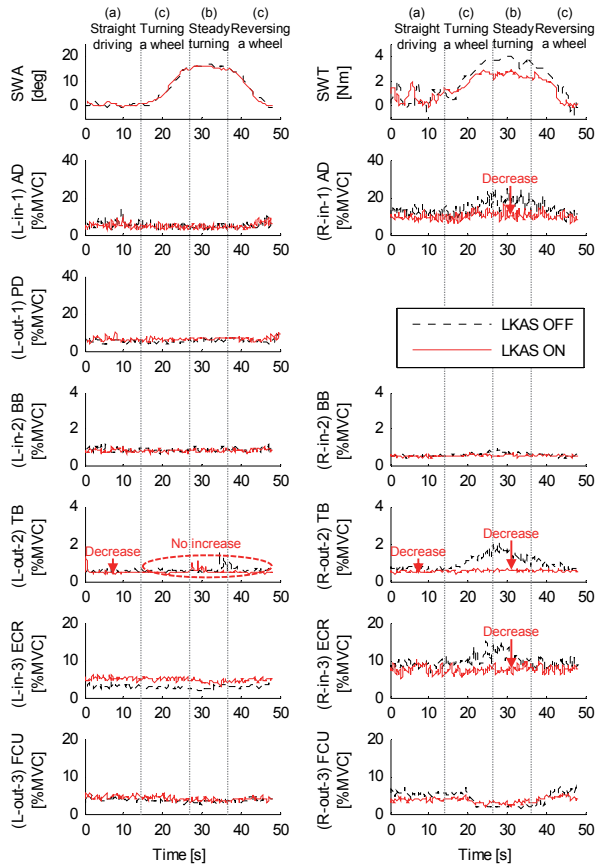


Fig. 5 Muscular Activities When Driving Test Vehicle

上述の筋活動と操舵角、操舵トルクの特徴量を Fig. 6 に示し、Table 1, 2 の主観評価との対応関係の評価する。Fig. 6 の各項目は、各車両の LKAS OFF に対する LKAS ON の減少率であり、試験回数 3 回、被験者 2 名分の平均値である。(a) 直進走行時、左右上腕三頭筋 (L-out-2) (R-out-2) の同期的活動は、A 車が増加、B 車と試作車両は減少し、保舵の楽さと安定性の主観評価結果と一致する。(b) 定常旋回時では、主動筋に相当する右三角筋前部 (R-in-1)、右上腕三頭筋 (R-out-2) および右橈側手根伸筋 (R-in-3) の活動の減少率が、B 車、A 車、試作車両の順で大きく、保舵の楽さの主観評価と一致する。また、拮抗筋に相当

する左上腕三頭筋 (L-out-2) の活動は、A 車が増加、B 車と試作車両は減少し、保舵の安定性の主観評価と一致する。(c) コーナ切り込み/切り戻し時では、拮抗筋に相当する左上腕三頭筋 (L-out-2) の活動は、A 車が増加、B 車と試作車両は減少し、操舵の滑らかさの主観評価結果と一致する。

以上より、操舵支援には粘性特性をシーンに応じて調整することが重要であり、提案した制御ロジックは (a) 直進走行時の保舵の安定性と楽さ、(b) 定常旋回時の保舵の安定性と楽さ、(c) コーナ切り込み/切り戻し時の操舵の滑らかさにおいて、効果的に作用することを確認できた。

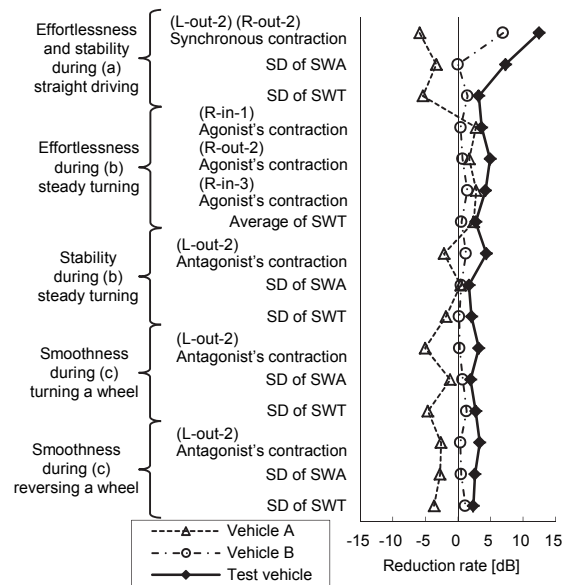


Fig. 6 Comparison of Control Performance

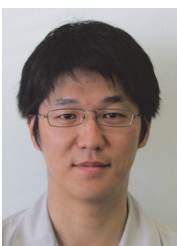
5. おわりに

『車は人間が運転するものである』という考えの下、より良い支援を行うためには、安全性・利便性のみならず、操舵フィーリングを損ねないことが重要であると考え、車線維持走行時における操舵支援制御方法の検討をドライバーの上肢の筋活動に着目して行った。その結果、左右対称筋の同期的活動や拮抗筋活動を増加させることなく、主動筋の活動を減少させることが、操舵フィーリングの良い LKAS を実現するためのポイントであることを見出した。この知見を基に、道路曲率に応じたアシストによって主動筋活動を低下させるとともに、粘性制御を合わせて行うことによって拮抗筋活動を抑える操舵支援制御手法を考案した。これにより、直進走行時や定常旋回時のような一定の操舵角を保持するシーンでは、保舵の楽さと安定性を、コーナ切り込み/切り戻し時のような操舵を行うシーンでは、操舵の滑らかさを向上させることができた。

参考文献

- (1) 細田浩司ほか：低速域衝突被害軽減システムの概要，マツダ技報，No. 30，pp.156-160 (2012)
- (2) 尾崎昂ほか：SBS/MRCC の機能/性能向上について，マツダ技報，No. 30，pp.161-165 (2012)
- (3) 内海将司ほか：フォワード・センシング・カメラの開発，マツダ技報，No. 30，pp.166-169 (2012)
- (4) 信時宣和ほか：後側方障害物警報システムの開発，マツダ技報，No. 26，pp.124-130 (2008)
- (5) 石田真之助：インテリジェントドライバサポートシステムの開発，自動車技術，Vol.60，No.12，pp.39-44 (2006)
- (6) 増田奨ほか：レーントレースアシストによる運転負荷軽減効果の検討，自動車技術，Vol.57，No.12，pp. 91-95 (2003)
- (7) 定野温ほか：レーンキープサポートシステム，自動車技術，Vol.55，No.11，pp.36-41 (2001)
- (8) 水野尊広ほか：運転者の操舵動作と筋活動との関係の研究，JTEKT ENGINEERING JOURNAL，No. 1010，pp.13-18 (2012)
- (9) 竹村和紘ほか：人間の主観的な力知覚モデルの提案とステアリング操作系への応用，日本機械学会論文集（C 編），Vol.78，No.795，pp.64-73 (2012)
- (10) 渡部勇：ビジュアルテキストマイニング技術－特許検索・分析支援への適用－，FUJITSU，Vol.56，No. 4，pp.371-377 (2005)
- (11) Hideki Takahashi et al. : A Study of Lane Keeping Assistance by Steering Control Based on Muscular Activity，Proceedings of 20th ITS World Congress，in press (2013)
- (12) 倉森章ほか：ドライバの筋活動に着目した運転しやすさ評価の検討，自動車技術，Vol.61，No.6，pp. 116-121 (2007)
- (13) 田中良幸ほか：ステアリング操作における人間の手先インピーダンスの解析，計測自動制御学会論文集，Vol.42，No.12，pp.1353-1359 (2006)

■著者■



高橋 英輝



菅野 崇



岡崎 俊実