

EPS センサに基づくハンズオン／オフ検知技術

Hands On/Off Detection Based on EPS Sensors

マキシム・モレヨン M. MOREILLON 田村 勉 T. TAMURA
酒井悠太 Y. SAKAI ロバート・フックス R. FUCHS

The state of the hands on the steering wheel is currently the most reliable indicator for evaluating the ability of the driver to control his/her vehicle. It has been confirmed by the last release of the UNECE regulation 79, which requires a vehicle equipped with lane keeping assist to automatically deactivate the function if the driver is not holding the steering wheel for a period of time longer than one minute. This paper presents a detection method which, instead of relying on dedicated sensors, uses sensors already available in most mass-produced EPS systems. They are used to compute a model-based approximation of the driver torque, which is subsequently processed using a threshold and a transition time window to determine whether the driver is holding the steering wheel or not.

Key Words: Human machine interaction, Driver sensing, driver monitoring, Hands detection, Steering wheel, Automated driving, ADAS, LKA

1. はじめに

先進運転支援システム（ADAS）は、運転プロセスにおいて運転者を補助するシステムである。適切なヒューマンマシンインターフェースを用いて ADAS 機能を設計することで、車両の安全性は向上する。自動化レベルが上がり完全自動運転になると、運転者は最も重要なタスクである運転から解放される。車両の自動化のレベルは、米国の自動車技術者協会（SAE）により、運転者がすべての機能を完全に制御するレベルゼロから、車両が完全に自動化されているレベル5まで分類されている（図1）。以上の分類に基づく、自動化レベルが最も高くなる場合に車両では運転者による操作が不要になる。

しかしながら、現行の法規では、運転者が搭乗しない状態での車両の走行は認められていない。たとえば、道路交通に関するウィーン条約(1968年)²⁾は、「運転者は、常に自身の車両を制御できるものとする」旨が記載されている。本条項は、2016年3月に改正され^{3,4)}、運転者が自動化システムを停止またはオーバーライドできることを前提条件として、当該自動化システムによって車両を運転することを認めている。UNECE 規則第79号の操舵装置に関する第5.1節はさらに厳しい規定であ

り、操舵機能に関する自動化を認めている速度はわずかに10km/hまでである⁵⁾。2017年11月に発行された新しい改訂版では、その10km/h以下の車両速度規定の範囲が拡大され、運転者が選択したレーン内に車両を維持することを支援する機能も含まれることとなった⁶⁾。自動化レベル2以上の車両については、これらの制限は引き続き適用される。

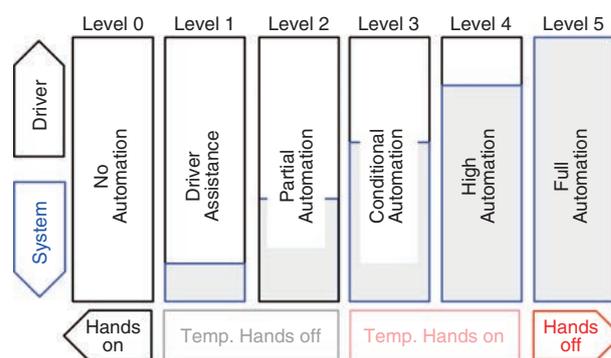


図1 SAEが定義する車両自動化レベル¹⁾
Vehicle automation levels proposed by SAE

運転者が介在する自動化レベル2～4においては、運転者とシステム間で車両制御の権限の受け渡しが必要となる。ステアリングホイール把持状態は、少なくとも車両の横方向の動きについて運転者が車両を制御する能力を示す最も信頼できる指標である。したがって、前述のウィーン条約に基づく規則に対応するために、ハンズオン／オフ検知（HOD）は実質的には機能要求事項の一つとなっている。

本報では、従来の電動パワーステアリング（EPS）に使用されているセンサのみを活用し、あわせて後述する要求仕様に対応可能な HOD 機能を紹介する。

本報の構成は次のとおりである。第2章では、HOD 機能の適用例を述べる。第3章では、HOD の目的を紹介し、要求項目を定める。第4章では、ハンズオン／オフを検知するための手法を紹介、比較し、それらの中から、本報で採用した手法についての詳細を記述する。得られた結果を第5章に示し、第6章にてまとめる。

2. HOD 適用例

本章では、HOD 機能の要求項目を定めるために、自動運転における二つのシナリオを紹介する。

2.1 シナリオ 1：ハンズオフ検知

自動化レベル2に相当するレーンキーピングアシスタンス（LKA）機能が搭載された車両ではすでに手放し検知機能が備わっている。手放し検知の目的は、運転者が常に車両を制御している状態にあることを確認することである。実際のところ、LKA 機能のミスユースが原因で事故に至ったケースが確認されている¹⁰⁾。

2.2 シナリオ 2：ハンズオン検知

ハンズオフ状態での走行が可能となる自動運転レベル3以上の車両でも、自動運転システムが運転者への引き継ぎを必要と判断した場合、運転者にテイクオーバーリクエスト（TOR）を行う。

TOR が実行された後の自動運転モードから手動運転モードへの移行は、システムが運転者による操作を確認してから開始されるべきであり、ステアリングホイールへの把持検知は操作を確認する上で重要な情報となる。ただし、緊急時には操作の有無を確認せずに自動運転モードを手動運転モードに切り換えなければならない場合がある。

3. HOD 機能の要求項目

技術的には、HOD 機能は運転者がステアリングホイールを把持しているか否かを示すフラグを出力する。検知性能には、車両、乗員、さらには交通状況から定まる安全マージンの制約範囲内で、システムが判断を下すために十分な時間が確保されるような速さが求められる。さらに、想定される全システム入力の範囲および周波数帯域においてパラメータ変動に対するロバスト性が求められる。

3.1 感度

運転者が安全に車両を制御するためには、手とステアリングホイールとの境界面において十分な摩擦力が発生するようステアリングホイールをしっかりと把持する必要がある。HOD 機能は、このような把持状態をハンズオン状態として識別する必要がある。

3.2 ロバスト性

HOD には、以下に示す二つのタイプの誤検知の可能性がある。

- ・ False positive：システムが誤ってハンズオンを出力する。
- ・ False negative：システムが誤ってハンズオフを出力する。

運転者によるステアリングホイールの把持は、自動運転から手動運転への移行（シナリオ2）を有効にする上で必要な条件である。しかし、運転者がステアリングホイールを把持する前に False positive が発生すると、運転者、システムのいずれも車両を制御していない状態となる。そのため False positive は、安全性に重大な影響を及ぼすことから許容されない。一方、運転者がステアリングホイールを把持している時に、False negative が発生した場合、運転者は、実際には車両を制御している状態である。False negative は、安全性に重大な影響を及ぼさないが、車両の制御システムに対する運転者の信頼性に影響を及ぼす可能性がある。そのため、False negative も可能な限り回避すべきである。

3.3 応答時間

レベル1、2相当の車両において LKA 機能を適切に作動させるための時間シーケンスは、UNECE 規則第79号に記述されている⁶⁾。15秒以上運転者がステアリ

ングホイールを把持していない場合、光学警告信号を発生することが必要であることが記載されている。さらに、30秒が経過しても運転者がステアリングホイールを把持していない場合、光学に加えて音響による警告信号を発生する必要がある。最終的には、音響警告信号が立ち上がったから遅くとも30秒後には、LKA機能を自動的に停止させなければならない。このような法的枠組みに対応するためには、15秒以内でハンズオフの判定を行う必要がある。

レベル3以上の車両において自動運転から計画的に手動運転に移行する際に想定する時間シーケンスを図2に示す。このような計画的な移行状況の場合、運転者が運転していない状態は最大で15秒が許容されている。この時間は、運転者が運転に対応可能な状態（例：運転席に着座する、シートベルトを締める、ステアリングホイールに手を置く）を回復するために設定されている。この時間を超える場合や運転者の操作が検知された場合には、4秒以内に手動運転に移行する。許容時間内（15秒+4秒）に運転者の操作が検知されない場合には、リスクを最小化するための制御(Minimal Risk Maneuver)を起動して車両を路肩など安全な場所に停車させる。このような状況を想定すると、ハンズオン検知の応答時間は、移行時間の4秒に対して十分に短い必要がある。

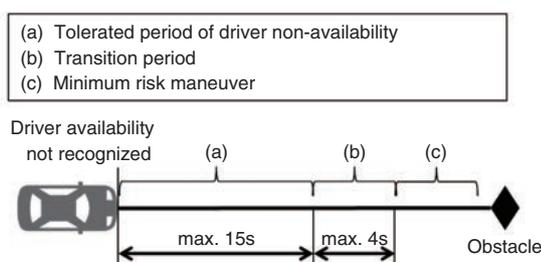


図2 自動運転から手動運転への計画移行の時間シーケンス

Time sequence for planned transition from ADAS or AD to manual driving

4. 提案手法

4.1 ベンチマーク

運転者によるステアリングホイール把持状態の検知は、従来EPSの既存のセンサを用いる方法と、専用のセンサを追加する方法に大別される。専用センサとしては静電容量型^{7~9)}のものが主流である。静電容量型タッチセンサは不均質な表面に対して感度にばらつきがあ

る。また、接触感度の調整は難しく、感度設定が低い場合には、手の接触面積が小さい場合には把持状態でもハンズオフと判定される。一方で、感度設定が高い場合には、手がステアリングホイールに接触しない場合でもハンズオンと判定される。さらに、センサの実装により、製品のハードウェア、ソフトウェア双方が複雑化し、コストも増大する。一方、従来EPSのセンサを用いる方法(EPSベース)では、既存センサのみでHOD機能を構成できるので、ハードウェアの複雑化とコストの増大を抑えることができるというメリットがある。タッチセンサベースの検知では、手の接触がハンズオン状態に対応するといった直観的情報をもたらす一方で、EPSベースの検知では、運転者による操舵動作により発生するトルクとハンズオン状態を関連付けるので、車両を制御している運転者の操舵意図がより正確に反映される。

EPSベースのHODの一例として提案されている方法^{11, 12)}は、侵入型アプローチであり励起トルクをアシストモータでステアリングホイールに付加し、システムの応答がハンズオンまたはハンズオフのパターンに近いかなかを判別するというものである。しかし、励起状態には操舵感が低下する可能性があるため適切な方法ではない。したがって非侵入型アプローチが好ましい。

本報で提案する手法は、運転者がステアリングホイールを操舵することにより発生するトルク(運転者トルク)の計測に基づいている。また、運転者にとって、計測可能なトルクを一定時間加えることなくハンズオンの状態を維持することは、実質的に不可能であることを前提としている。

4.2 運転者トルクに基づくハンズオン検知

本項では、運転者トルクを計測、処理してハンズオン/オフを検知する方法について述べる。

4.2.1 HODにおけるトーションバートの課題

トーションバーは、運転者トルクを測定するためのEPSに既存のトルクセンサである。トーションバーによるトルクセンサの分解能は十分に高いため、停車状態でハンズオン状態とハンズオフ状態を識別することができる。

図3は、運転者が、トルクを加えずにステアリングホイールを把持できないという前提を実証している。さらに、ハンズオフ状態におけるトルクセンサのノイズよりもしきい値を高く設定した場合、このしきい値を超えた時にステアリングホイールを把持していると判別できる。

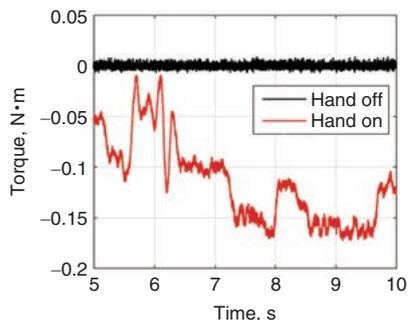
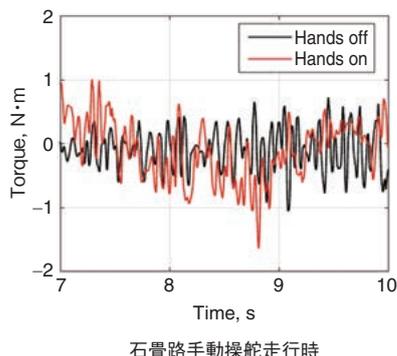
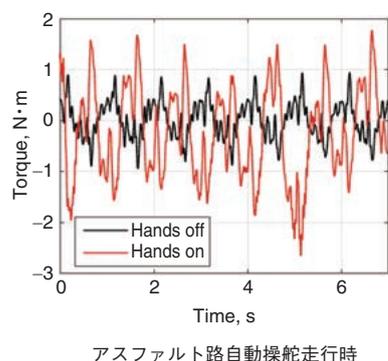


図3 停車状態におけるトーシヨンバートルク
Torsion bar torque in stationary condition



石畳路手動操舵走行時



アスファルト路自動操舵走行時

図4 トーシヨンバートルク

Torsion bar torque during manual driving on a cobblestone road (top) and automated driving on an asphalt road (bottom)

EPSのトルクセンサは、トーシヨンバー両端の相対角変位に基づいているため、計測したトルクは、運転者トルクだけではなく、コラムに加えられる負荷にも左右される。この負荷は、タイヤと路面間の接触点から伝達されるトルクと、アシストモータから伝達されるトルクで構成される。図4は、石畳路を手動操舵で直進走行したときと、平坦なアスファルト路を自動操舵（角度正弦波：20deg, 1Hz）で走行したときのトーシヨンバートルクの実測値を示す。なお、車速は20km/h一定とした。これらの状況では、ハンズオフ状態でのトルク値はゼロから大きく外れた値となっているため、ハンズオンの識

別が困難であることが分かる。

ハンズオフ状態での外乱トルクについて、運動方程式を用いて考察する。ステアリングホイール慣性についての運動方程式を以下に示す。

$$J_{sw} \ddot{\theta}_{sw} = T_d - T_{tb} \tag{1}$$

ここで J_{sw} および θ_{sw} はそれぞれ、ステアリングホイール慣性および角変位を示し、 T_d は運転者トルク、 T_{tb} はトーシヨンバートルクを表す。

トーシヨンバートルク T_{tb} は、ステアリングホイールと、トーシヨンバーの下端の角変位 θ_{tbl} を測定することにより計算される。トーシヨンバーの剛性 k_{tb} は考慮するが、減衰および摩擦の影響は無視する。

$$T_{tb} = k_{tb} (\theta_{sw} - \theta_{tbl}) \tag{2}$$

定常状態におけるステアリングホイールの運動方程式(1)を考慮すると、ステアリングホイールの角加速度はゼロとあるので、トーシヨンバートルクは運転者トルクと等しくなる。

$$T_{tb} = T_d \tag{3}$$

しかし、過渡状態におけるトーシヨンバートルクは、運転者トルクとステアリングホイール慣性トルクの関数となる。

$$T_{tb} = T_d - J_{sw} \ddot{\theta}_{sw} \tag{4}$$

したがって、ステアリングホイール慣性による影響の補償は、運転者トルクの確実な推定にとって必須条件である。

4.2.2 運転者トルク推定

本報で採用する運転者トルク推定器 (DTE) は、すでにステアリングシステムに適用されている技術である拡張状態オブザーバ¹³⁾ に基づくものである。

DTE は、EPS に使用されているセンサであるトルクセンサおよび角度エンコーダを使用し、HODの基本信号として用いられる。

オブザーバに用いたモデルを図5に示す。このモデルは、ステアリングホイール慣性と、トーシヨンバー剛性によって構成される。システムの入力はトーシヨンバーの下端角度（既知）と運転者トルク（未知）であり、システムの出力はトーシヨンバートルクである。

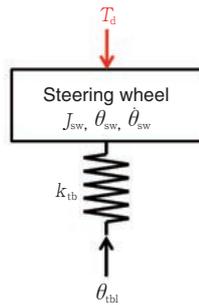


図5 運転者トルク推定用オブザーバモデル
Observer model for driver torque estimation

ステアリングホイール慣性についての運動方程式(1)に トーションバートルク(2)を代入することで以下の状態空間モデルが得られる。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1u_1 + B_2u_2 \\ y = Cx + Du_1 \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 x は状態ベクトル、 u_1 は既知入力ベクトル、 u_2 は未知入力ベクトル (運転者トルク)、 y は出力 (トーションバートルク) である。

$$x = \begin{bmatrix} \theta_{sw} \\ \dot{\theta}_{sw} \end{bmatrix}, u_1 = \theta_{tbi}, u_2 = T_d, y = T_{tb} \quad (6)$$

また、対応する状態行列 A 、既知入力行列 B_1 、未知入力行列 B_2 、出力行列 C および直達行列 D は、それぞれ以下に示すとおりである。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_{tb}}{J_{sw}} & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{tb}}{J_{sw}} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_{sw}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

状態オブザーバにより未知入力の推定を行うため、未知入力ベクトル u_2 を状態ベクトル x と結合して拡張状態ベクトル x_e を生成する。

$$x_e = \begin{bmatrix} x \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{sw} \\ \dot{\theta}_{sw} \\ T_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

よって、拡張された状態空間モデルは下記のように表される。

$$\begin{cases} \dot{x}_e = A_e x_e + B_e u_1 \\ y = C_e x_e + Du_1 \end{cases} \quad (9)$$

ここで、拡張された行列をゼロで埋めると下記のようになる。

$$A_e = \begin{bmatrix} A & B_2 \\ 0_{1 \times 2} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_{tb}}{J_{sw}} & 0 & \frac{1}{J_{sw}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_e = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_{tb}}{J_{sw}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_e = [C \ 0] = [k_{tb} \ 0 \ 0]$$

上記の拡張は、未知入力の変動が十分に遅いという仮定に基づいている。後述する DTE の検証結果は、この仮定が成立することを証明している。

また、DTE は ESS (Extended-state-space) モデルの状態量の観察結果に基づいている。このため、ESS モデル式(9)および式(10)の可観測性条件である式(11)を満たさなければならない。

$$\text{rank}(O) = \text{rank} \begin{pmatrix} C_e \\ C_e A_e \\ C_e A_e^2 \end{pmatrix} = 3 \quad (11)$$

可観測行列 O のランクは、状態ベクトルの階数と等しいため、オブザーバを設計することができる。この手法を ESS モデルに適用することにより、元のシステム状態および未知入力を推定することができる。オブザーバの補正項 L を含めると拡張状態モデルは下記のように表される。

$$\begin{cases} \dot{x}_e = A_e \hat{x}_e + B_e u_1 + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C_e \hat{x}_e + Du_1 \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 L 行列は、システムの安定性および収束性を確保するために $A_e - LC_e$ の極を複素平面の左半分に配置されるように計算する。極を所望のカットオフ周波数に設定することでオブザーバの帯域幅を調整することができる。DTE の場合では、運転者トルク入力の帯域幅を考慮して設計する。

この手法では、オブザーバで記述されるモデルが実際のプラント挙動に近づくため、結果としてステアリングホイール慣性の影響が補償された運転者トルクが抽出されることになる。

図6は トーションバートルクと DTE の性能を比較した結果である。上図から路面からの外乱がない停車状態において DTE は、トーションバートルクとほぼ同等の感度を備えていることが分かる。トーションバートルクと DTE の間には遅れが確認できる。これは、オブザーバの推定遅れによるものである。下図は、手動操舵で直進

走行（車速 20km/h）したときのトルク実測値である。図より DTE はハンズオフ状態においてトーショナルバートルク値で観測される慣性トルクの影響が遥かに小さいことが分かる。

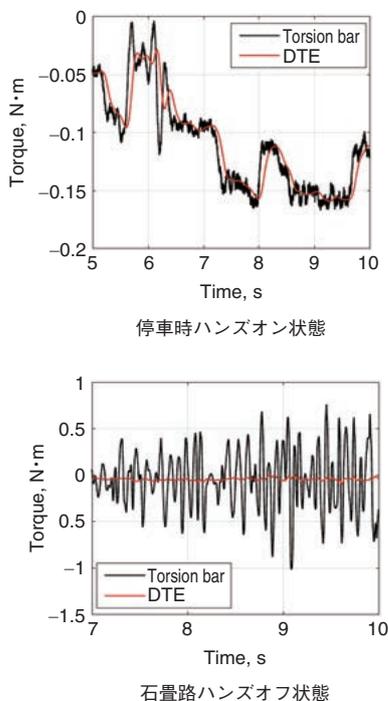


図6 トーショナルバートルクとDTEの比較

Comparison between the torsion bar torque and the DTE for a hands-on situation in stationary condition (top) and a hands-off situation on a cobble stone road (bottom)

4.2.3 トルクしきい値

トーショナルバーの下端から生じる外乱には実質的に影響を受けないDTEに基づき、手の二つの状態（ハンズオン/オフ）を識別するためにしきい値を設定する。False positiveは安全上許容されないため、DTEの推定誤差よりもしきい値を高く設定する必要がある。このような誤差は、内部摩擦によるセンサオフセットなどのハードウェア特性に起因する。したがって、しきい値は、False positiveが生じない値に設定する必要がある。

4.2.4 遷移判定時間

運転者が、しきい値よりも低いトルクを一定時間加えながらステアリングホイールを把持することはほぼ不可能であるが、一時的にしきい値以下の運転者トルクとなる場合がある。たとえば、スラローム走行時にはトルクの符号が変化するため運転者トルクがしきい値以下とな

り、HODは一時的にハンズオフを出力する。このようなFalse negativeの発生を防止するため、DTE出力のしきい値との比較のみならず、しきい値を下回った経過時間をハンズオフ判定の遷移条件とする。

ハンズオフの判定時間は、False negativeが極力発生せず、かつ15秒と比べて十分に短い時間で検知できるように設定する必要がある。ここで注意すべき点は、ハンズオフからハンズオンへの遷移条件には、判定時間は不要であるということである。これは、ハンズオフ状態においてDTEがしきい値を超えないよう設定されているためである。

4.3 HODの構成

HOD構成を図7に示す。HODの主な構成要素は、DTE、トルクしきい値、遷移判定時間の三つである。DTEの時定数はハンズオンの応答性、トルクしきい値はハンズオン状態とハンズオフ状態の境界となるためHOD機能自体の感度に影響する。また、遷移判定時間によってハンズオフ検知の応答性が決まる。

本報で用いたトルクしきい値および遷移判定時間については、実車走行時のデータを基に決定している。



図7 HOD機能の構造
Structure of HOD function

5. 実車評価結果

HODの性能を評価するため、把持・手放しを繰り返してHODの出力と比較する。評価時における把持状態とは運転者が安全に車両を制御できるような状態とした。走行条件としては、石畳路を手動運転で直進走行した場合（図8）と、平坦なアスファルト路を自動操舵（角度正弦波：20deg, 1Hz）で走行した場合（図9）である。両条件ともに車速は20km/h一定とした。上図にトーショナルバーおよびDTEの出力を、下図にHODの出力と、実際の把持状態を示している。

図より両条件においてDTEは外乱の影響を受けないため、ハンズオフ状態においてしきい値以下となる。したがって、HODは、False positiveを発生することはない。また、ハンズオン状態において実際の運転者トルクを正確に推定しているためFalse negativeも発生し

ていない。さらに、システムの応答時間は、ハンズオン検知の場合は 0.1 秒、ハンズオフ検知の場合は 2 秒以下であり、前述した要求項目に対応可能であると考えられる。

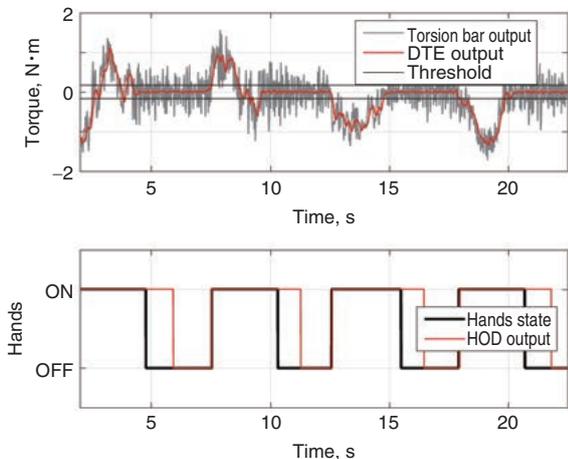


図8 石畳路手動運転時のトルクおよび HOD 出力
Torque and HOD output during manual driving on a cobblestone road

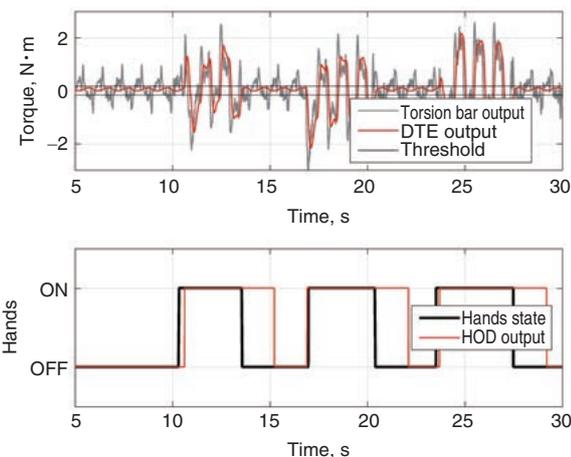


図9 アスファルト路自動運転時のトルクおよび HOD 出力
Torque and HOD output during automated driving on an asphalt road

6. おわりに

本報では、運転者のステアリングホイールの把持・手放し状態を検知するための HOD 機能を従来の EPS に使用されているセンサのみを用いて実現した。

提案手法は、路面状態などの不確定な条件に影響されず、演算負荷の低いオブザーバによって構成される。

また、HOD の応答性は、オブザーバのカットオフ周波数、トルクしきい値、遷移判定時間を設定することで調整できる。

実車試験の結果から、提案する HOD は実際の把持・手放しの状態を高感度かつ高応答で検知できることを確認した。

参考文献

- 1) Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicle, NHTSA, <http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/U.S.+Department+of+Transportation+Releases+Policy+on+Automated+Vehicle+Development>, last retrieved on 1st March 2016.
- 2) Convention on Road Traffic. Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, E/CONF.56/16/Rev.1/Amend.1, Vienna, Austria, 8 November 1968.
- 3) Report of the sixty-eight session of the Working Party on Road Traffic Safety, Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, ECE/trans/WP.1/145, Geneva, Switzerland, 24-26 March 2014.
- 4) UNECE paves the way for automated driving by update UN international convention, UNECE, <http://www.unece.org/info/media/presscurrentpress-h/transport/2016/unece-paves-the-way-for-automated-driving-by-updating-un-international-convention/doc.html>, last retrieved 30 August 2018.
- 5) Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment, Economic Commission for Europe, E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505, Rev.1/Add.78/Rev.2, Geneva, Switzerland, 16 October 1995.
- 6) UNECE, Addendum 78: UN Regulation No. 79, Revision 3, E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.78/Rev.3, Geneva, Switzerland, 30 November 2017.
- 7) CurveSYS, <https://curvesys.de/>, last retrieved on 30 August 2018.
- 8) IEE, <http://www.iee.lu/products/transportation:hands-off-detection>, last retrieved on 30 August 2018.
- 9) J. Lisseman, S. Essers, H. Ruck, The Steering Wheel: Active Safety Evolution, chassis.tech, ATZ live, Munich, Germany, June 2013.
- 10) T. Bella Dinh-Zarr, Automated Driving in USA Update 2, 5th NCAP & Car Safety Forum, Tokyo, Japan August 2018.
- 11) J.A. Urhahne. Hands-on steering wheel detection for motor vehicle, November 28 2013. US Patent App. 13/892,688.

- 12) J. Lee, Y.H. Lee, and B.B. Litkouhi. Driver hands on/off detection during automated lane centering/ changing maneuver, September 9 2010. US Patent App. 12/399,290.
- 13) J.T. Illan, V. Ciarla, and C. Canudas De Wit. Oscillation annealing and driver/tire load torque estimation in electric power steering systems. In Control Applications (CCA), 2011 IEEE International Conference on, pages 1100-1105, Sept 2011.

筆 者



マキシム・モレヨン*
M. MOREILLON



田村 勉*
T. TAMURA



酒井悠太*
Y. SAKAI



ロバート・フックス*
R. FUCHS

* 研究開発本部 システム創生研究部