

平成 28 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630079

研究課題名(和文) 運転責任の移譲を考慮した車両の自動運転システムアーキテクチャの構築

研究課題名(英文) Architecture of Automated Driving Systems in Consideration of Delegation of Driving Authority

研究代表者

西村 秀和 (NISHIMURA, Hidekazu)

慶應義塾大学・システムデザイン・マネジメント研究科・教授

研究者番号：70228229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：自動運転システムを搭載した車両でのドライバーと自動運転システム間の運転権限の移譲をどのような条件で行うことで安全が確保されるのかを明確にするため、システムモデルの記述言語であるSysML (Systems Modeling Language) を用い、自動運転システムとドライバーの関係性を外部システムとの関係とともに明らかにした。事故発生に基づくユースケースを設定し、アクティビティ図と状態機械図を用いた振る舞いの明確化を行った。システムモデルに基づき、仮想ドライバーモデルを用いたシミュレーションを実施し、ドライバーによる不適切な操縦による影響を分析し、その対処方法をシミュレーションにより検討した。

研究成果の概要(英文)：In order to maintain the system safety in delegation of driving authority between a driver and the automated driving system, by using a description language of the system model, SysML (Systems Modeling Language), we revealed relationship among the automated driving system, the driver and external systems. By setting the use cases based on the occurrence of the accident, we defined the behavior with activity diagrams and state machine diagrams. We conducted a simulation using the virtual driver model, based on the system model and analyzed the impact of improper handling by the driver to system safety to lead a solution avoiding traffic accidents.

研究分野：工学

キーワード：自動運転システム システムアーキテクチャ システムモデル 車両運動制御 制御システム設計

1. 研究開始当初の背景

交通事故を減らすことを目的として、自動運転システムの導入には大きな期待が寄せられており、注目されている。自動車メーカーやサプライヤー各社は技術的な観点から、2020年代にレベル3の自動運転を実現するための研究開発を加速させている。しかしながら、自動運転システムを搭載した車両による安全性の提供を確保するためには、ドライバーと自動運転システム間の運転権限の移譲をどのような条件で行うと良いかを十分に検討しておく必要がある。特に、システム論的なアプローチでこのような問題を捉えた研究はなく、いわゆるシステム安全の確保に対するその実現方法は明らかになっていない。

一方、欧州では、HAVEit プロジェクトが数年間に渡って続けられ、自動運転システムのアーキテクチャ案が示されているが、この考え方に則って自動運転システムを構築することで十分であるかどうかの議論は不足している。特に、ドライバーの状態に依存して、リスク最小状態へ持っていくための方策が提案されている点は特筆すべきことであるが、ドライバーの運転権限をどこまで認めるのが明確になっているとは言えない。自動運転システムとドライバーの運転権限の移譲を明確に検討することは自動運転の安全性確保には欠かせない。

また、事故が起きるような危険な状況に至ることを避けることが自動運転システムには求められるが、事故が起きる環境でどのようなアシストをすることで事故を防げるかは明確になっていない。さらに、ドライバーがどのような操作をした結果として、交差点で事故が発生しているのかについても、明確になっていない。自動運転システムを検討するためには、事故多発環境である交差点でのドライバーの振る舞いを明確にし、ドライバーがどのような操作を行っているかを明確にする必要がある。

2. 研究の目的

本研究「運転責任の移譲を考慮した車両の自動運転システムアーキテクチャの構築」では、上述の問題を解決に導くため、モデルに基づくシステムズエンジニアリングの方法論を取り入れ、自動運転システムとドライバー間の運転権限の移譲について検討することを目的としている。特に、交通事故が発生してしまうケースでの運転権限の移譲に着目し、オーバーライドを行うことを許容する範囲を明確にする。

このため、自動運転システムに求められる機能を明確に定義した上で、自動運転システムとドライバーの状態遷移の関係性をシステムモデルにより明らかにする。その際に、事故多発環境を特定し、そこでのドライバーの振る舞いを検討した上で、自動運転システムがどのようなアシストをすると良いかを

システムモデルを記述することにより検討する。さらに、これらのシステムモデルによる記述をもとに、シミュレーションモデルを構築し、交通事故が発生し得るケースでの自動運転システムの機能による事故回避が達成できるか否かを、構築したシミュレーションモデルで検証する。

3. 研究の方法

SysML (Systems Modeling Language) を用いたシステムモデルの記述を行い、自動運転システムとドライバーの関係性を他の外部システムとの関係とともに明らかにし、特に、事故発生に基づくユースケースを設定し、振る舞いの明確化を行う。ここでは、事故発生のしやすい交差点での右折に絞り、ドライバーの振る舞いを検討した上で、自動運転システムとドライバーの運転権限の移譲に関する検討を行う。

自動運転システムに求められる機能を明確にすることが必要となるため、まず外部システムとの関係性を明確にする。また、自動運転システムとドライバーそれぞれがとる状態遷移を導き、オーバーライドに関する検討を行う。その上で、ドライバーによるオーバーライドの許容範囲を変更し、その影響をシミュレーションによって検討している。シミュレーションモデルの構築では、自動運転システムとドライバーとの振る舞いの関係性を明確にするために記述したシステムモデルをもとにしている。

シミュレーションモデルの構築には、Simulink に基づき定義されたブロックを用いるが、自動運転システムとドライバー間のオーバーライドが、システムモデルで検討したとおりに切り替えられるようにすることが必要となり、そのためには、ドライバーの外部環境の認識が必要となる。このため、外部環境のセンシング機能を設定できる PreScan を用いている。

4. 研究成果

(1) システムモデルによる検討結果

最初に、図1に、自動運転システムとドライバーの介入によるオーバーライドがある場合の、両者の状態遷移を示す。ドライバーは、正常(Normal)、注意力散漫(Distracted)、居眠り(Drowsy)の状態をとり、自動運転システムは、自動運転(Automated Driving)、最少リスク、手動(Manual)の状態をとることを考慮している。ドライバーの運転状態で、正常から注意力散漫へ状態が遷移するのは、ドライバーが運転以外への操作(スマートフォン、同乗者との会話)などにより、自動運転システムの監視、交通環境や運転状態の特定が行われていない場合である。この場合、自動運転システムは、危険な状況になる前に、自動運転システムがドライバーの正常状態への回復を促し、正常な状態になったら、注意力散漫から正常へ状態遷移が起こる。

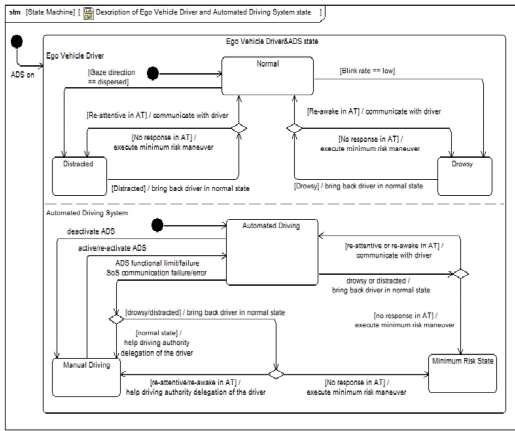


図 1 ドライバーと自動運転システムの状態遷移

しかし、ドライバーが正常状態に戻らない場合、注意力散漫または居眠り状態のまま自動運転システムは最小リスク操作を実行する。

自動運転システムの自動運転状態からドライバーによる手動へ切り替えるには、ドライバーの操作による切り替えが必要である。また、自動運転システムのハードウェア・ソフトウェアの失陥、自動運転機能の限界、構成システムとのコミュニケーション失敗により、自動運転システムはドライバーへオーバーライドを要求する。ドライバーが正常状態になっている場合、自動運転システムは、ドライバーへの運転権限の移譲の支援を実行し、自動運転から手動への状態遷移が起こる。さらに、自動運転システムからドライバーへのオーバーライド要求に対して、ドライバーが注意力散漫や居眠りの状態になっている場合、自動運転システムは、危険な状況になる前に、ドライバーへ正常状態への回復を促す。もし、ドライバーが正常状態に戻った場合は、ドライバーへの運転権限の移譲を支援し、自動運転から手動へ状態遷移する。

自動運転状態から最小リスク状態への状態遷移は、自動運転システムからドライバーへのオーバーライドの要求に対して、ドライバーが注意力散漫や居眠りになっていて、自動運転システムがドライバーの正常状態への回復を実行しても、正常状態に戻れない場合、自動運転システムは、最小リスク操作を実行し、状態遷移が起こる。また、自動運転システムからドライバーへのオーバーライドの要求がない場合に、自動運転中、ドライバーが注意力散漫や居眠りになっていて、自動運転システムがドライバーの正常状態への回復を実行しても、正常状態に戻れない場合、自動運転システムは、最小リスク操作を実行し、自動運転から最小リスク状態への状態遷移が起こる。

自動運転システムの運転状態には、自動運転状態から自動運転状態に戻る状態遷移がある。自動運転中、ドライバーが注意力散漫や居眠り状態の場合、自動運転システムはド

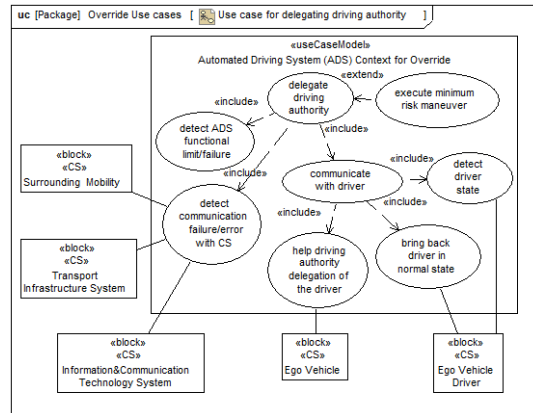


図 2 自動運転システムとドライバー間のオーバーライドに関するユースケース図

ライバーに正常状態への回復を促し、正常状態に復帰後、ドライバーとのコミュニケーションを実施し、自動運転状態を維持する。

図 2 には、自動運転システムとドライバーの介入によるオーバーライドが生じる場合のユースケース図を示している。ユースケース「運転権限を移譲する」は、3つのユースケース「自動運転システムのハードウェア・ソフトウェアの失陥と機能の限界を検知する (detect ADS functional limit/failure)」, 「構成システムとのコミュニケーション失敗とエラーを検知する (detect communication failure/error with CS)」, 「ドライバーとコミュニケーションする (communicate with driver)」を含み、「最小リスク操作を行う (execute minimum risk maneuver)」によって拡張されている。また、ユースケース「ドライバーとコミュニケーションする」は、3つのユースケース「ドライバーの状態を検出する (detect driver state)」, 「ドライバーを正常状態に回復させる (bring back driver in normal state)」, 「運転権限の移譲を支援する (help driving authority delegation of the driver)」を含んでいる。

図 3 は自動運転車を取り巻く全体の振る舞いを示すアクティビティ図である。自動運転

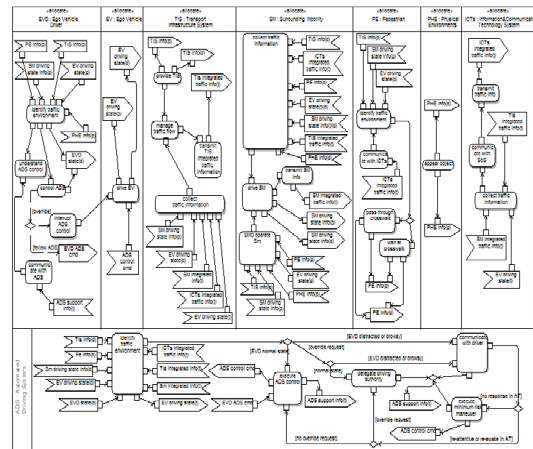


図 3 自動運転システムとドライバーおよび外部システムの機能フロー

システムは、機能「交通環境の特定」、「自動運転システムの制御実行」、「他の外部システムとの通信」、「運転権限の移譲」、「最小リスク操作の実行」を持ち、これらの機能が外部システムの機能と連携して、自動運転を実現している。

図4に自動運転車を取り巻く外部システムを含めた相互接続図を示す。これにより各構

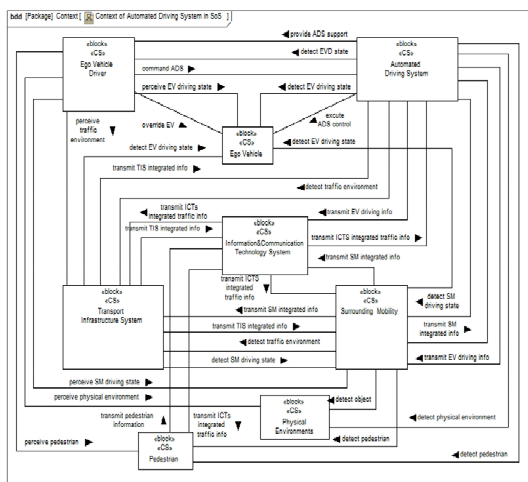


図4 自動運転車を取り巻く System of System の構成システムの相互接続図

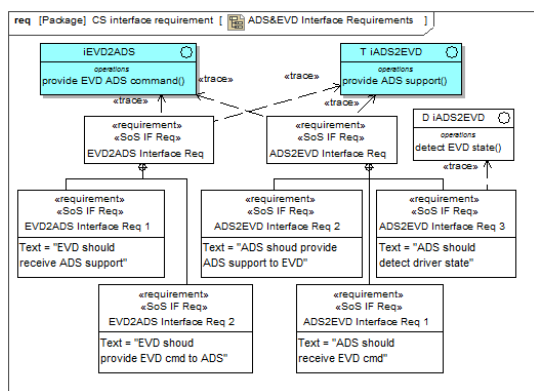


図5 自動運転システムとドライバー間のインタフェース

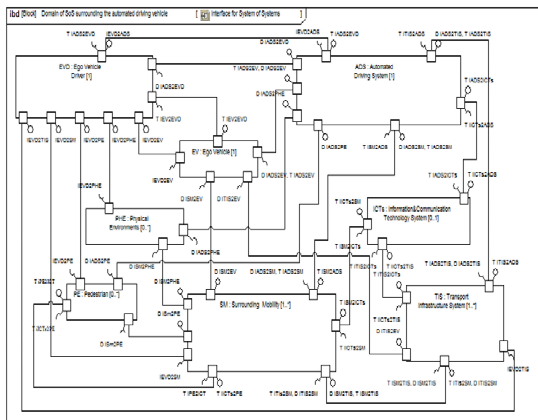


図6 自動運転システムとドライバーおよび外部システム間の相互接続図

成システム間のインタフェースを定義することができた。図5には、自動運転システムとドライバー間のインタフェースとインタフェース要求を示す。自動運転システムとドライバーとの相互作用では、ドライバーが自動運転システムへ自動運転に関する命令を出し、自動運転システムがドライバーへ自動運転に関する情報（現在の運転状況、次の自動運転、交通環境情報など）を提供する。これらの相互作用を用いて、ドライバーから自動運転システムへのインタフェース（interface EVD to ADS, 以下 iEVD2ADS と略す）と自動運転システムからドライバーへのインタフェース（Transmission interface ADS to EVD, 以下 T iADS2EVD と略す）を定義する。また、ドライバーの運転状態を自動運転システムが検出し自動運転に用いるため、自動運転システムからドライバーへのインタフェース（Detection interface ADS to EVD, 以下 D iADS2EVD と略す）を定義する。これらのインタフェースに基づき、ドライバーから自動運転システムへのインタフェース要求（EVD to ADS Interface Requirement, 以下 EVD2ADS Interface Req と略す）と自動運転システムからドライバーへのインタフェース要求（ADS to EVD Interface Requirement, 以下 ADS2EVD Interface Req と略す）がそれぞれ導出される。

自動運転車を取り巻く全体のコンテキストから、他の各構成システム間のインタフェースとインタフェース要求を定義し、これらの各構成システム間のインタフェースを相互接続図として表すと図6のとおりとなる。この図から、自動運転システムを機能させるために、ドライバーを含めた外部システムが自動運転システムにどのように接続されていなければならないかを明確に示すことができた。

さらに、公道走行実験の結果を踏まえ、交差点右折時に関するドライバーモデルを検討した。図7に、交差点での右折時についてドライバーの振る舞いを記述したアクティビティ図を示す。ここでは、最初にドライバーは、右折をする交差点の停止線で信号を待っている場面を想定している。まず、交差点

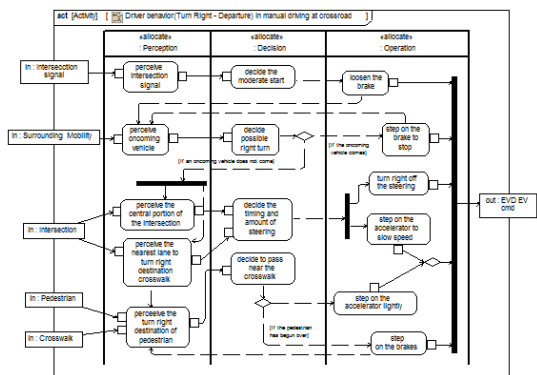


図7 交差点右折時の手動でのドライバーの振る舞い

信号が青になったことを認知し (perceive intersection signal), 速やかに発進を行うと判断し (decide the moderate start), ブレーキを外す (loosen the brake). さらに, 右折をするに際して, 対向車の有無を認知して (perceive oncoming vehicle), 右折が可能かを判断する (decide possible right turn). 対向車がある場合, ブレーキをかけて停止する (step on the brake). 対向車がない場合は, 交差点の中央部 (perceive the central portion of the intersection) と右折側の横断歩道に近いレーンを (perceive the nearest lane to turn right destination crosswalk) 認知してから, 右折する際のタイミングと操舵量を判断して (decide the timing and amount of steering) から, 操舵を切りつつ (turn right off the steering), アクセルを踏む (step on the accelerator to slow speed). ドライバーは, 右折側の横断歩道周辺で, 歩行者 (自転車などを含む) の有無を認知 (perceive the turn right destination of pedestrian) し, 歩行者がいる場合は渡るかどうかを判断する (decide to pass near the crosswalk). 歩行者が渡り始める場合はブレーキをかけて停止する. ドライバーは歩行者がいないことを認知し, 横断歩道を徐行して渡る (step on the accelerator lightly).

(2) シミュレーションによる検討結果

自動運転での右折に対して, 自動運転システムとドライバーの振る舞いや相互作用を解析するため, PreScan を利用する. PreScan は, 車両, 道路, 環境, センサーのモデルを用いて, 走行シナリオを Simulink 上で組み込むことができる汎用シミュレーションツールである. この研究では, 車両挙動とドライバーの振る舞いと相互作用を解析するために用いる. 図8に示すように, 交通環境として道路, 信号なしの交差点と横断歩道, 停止線を構成し, 自動運転システムを搭載する自車, 自車のドライバー, 歩行者が相互作用するものとした.

車両モデルは, アクセル, ブレーキ, 操舵を入力とし, 車両の速度, 加速度などを出力



図8 PreScan で構築した交差点右折環境

としており, 自動運転システムにより制御されている. 自動運転システムはセンサーを用いて, 交差点の進入前の停止線を検出し, その停止線の前で停止し, 左右/対向から出てくる車両を検出する. 左右/対向に車両がない場合, 交差点の中央部と右折側の横断歩道に近いレーンを検出し, 右折する際のタイミングと操舵量を判断する. そして, 操舵とアクセルを制御しながら右折を行う. また, 自動運転車の目標経路とその経路での速度, 加速度が設定されている. さらに, 自動運転に用いるセンサーが車両に搭載されている.

ドライバモデルは, 2 次予測モデルで設定されている経路にしたがって操舵を行い, 認知機能はセンサーで実現する. 自動運転中, ドライバーは運転を行わないが, 自動運転の途中でドライバーの介入によるオーバーライドを行うことを可能とした. ただし, ドライバーの操作は, 設定されている経路にしたがって, 操舵やアクセルの操作を行うこととしている. また, 歩行者も設定された経路と速度に従い, 横断歩道を渡ることとしている.

構築した Simulink モデルは, 車両モデルと車両モデルに搭載されているセンサーモデル, 自動運転システムモデル, ドライバモデルとドライバーに付けているセンサーモデルから構成されている. このモデルを用いて, シミュレーションを行う.

右折場面で, 自動運転車と歩行者との衝突が起こる可能性が高い2つのシナリオを想定した. まず, シナリオ1では, 自動運転システムが横断歩道付近で歩行者を検出し, ドライバーに衝突の警告を知らせる. 衝突可能性が高い場合は, 歩行者との衝突を防ぐため, 自動運転システムが緊急停止を行う. シナリオ2では, 自動運転システムによる右折後, 直線道路に入る前, ドライバーは自動運転システムから衝突の警告を受ける. しかしながら, ドライバーは歩行者が横断する前に, 自車が通過できると判断し, ドライバーの介入によるオーバーライドで, 運転権限をとって自車を加速するものとした.

図9に, 自動運転での右折時, 自動運転システムによる緊急停止とドライバーの介入

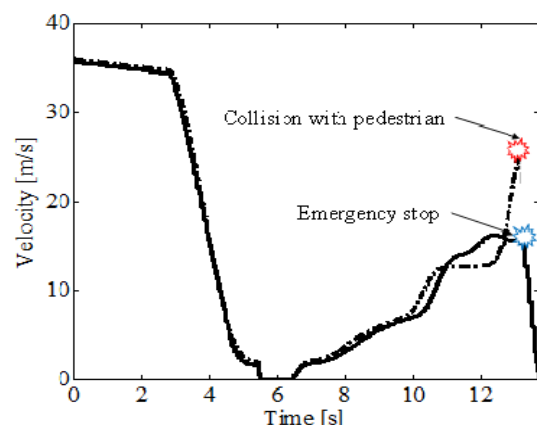


図9 自動運転での右折時の車両速度 (実線: シナリオ1, 一点鎖線: シナリオ2)

によるオーバーライドを行ったシナリオでのシミュレーション結果として、車両速度を示す。シナリオ1の場合を実線で、シナリオ2の場合を一点鎖線で示す。シナリオ1では、自動運転システムは、約12.6sの時、右折した直後に、何らかの障害物を検知し、12.92sにはドライバーに前方側での危険を警告する。歩行者を完全に特定した後、歩行者との相対距離と相対速度を算出し、衝突を回避するように緊急停止を13.04sに行う。一方、シナリオ2では、自動運転システムは、約12.56sに右折した直後に、何らかの障害物を検知し、ドライバーに前方側での危険を警告する。しかし、ドライバーは、前方にいる歩行者を確認して、自車が歩行者よりも、先に横断歩道を通過できると判断し、約13sで、ドライバーが介入によるオーバーライドを行い、アクセルペダルを踏む。その結果、13.4s付近で、車両の速度は急に増加し、最終的に歩行者と衝突してしまう。

自動運転システムの緊急停止により歩行者との衝突を回避できるシナリオ1では、ドライバーは介入を行わずに、自動運転システムとのコミュニケーションをとり、前方の状況を認知・判断し、自動運転システムが緊急停止を行う。一方、シナリオ2では、自動運転システムとドライバーの判断が相反しており、ドライバーが自動運転システムとのコミュニケーションを無視して、オーバーライドによりドライバー自身が運転を行う。ドライバーの経験や認知による判断は必ずしも、安全であると言えない。すなわち、ドライバーと自動運転システムとのコミュニケーションで、ドライバーは、自動運転システムからの支援または、自身の認知によって、正しく運転環境を特定する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

西村秀和：自動車の安全と自動運転，安全工学，査読無，Vol.54, No.3，pp. 153-157，2015

尹善吉，西村秀和，村上晋太郎：超小型4輪インホイールモータ車両に対する前輪操舵角制御と駆動/制動トルク制御を統合した車両運動制御システム設計，自動車技術会論文集，査読有，Vol.46，No2，pp. 399-406，2015

〔学会発表〕(計8件)

Sunkil Yun, Satoko Kinoshita, Noriyasu Kitamura, and Hidekazu Nishimura, Design of an Automated Driving System to Ensure Delegation of Driving Authority with Ego Vehicle Driver, 9th Asia-Pacific Conference on Systems Engineering, 13-15, Oct. 2015, Soul, Korea

Satoko Kinoshita, Sunkil Yun, Noriyasu Kitamura, and Hidekazu Nishimura, Driver Functions Definition for System of Systems for Automated Vehicles, 9th Asia-Pacific

Conference on Systems Engineering, 13-15, Oct. 2015, Soul, Korea

Sunkil YUN, Hidekazu NISHIMURA, Integrated Vehicle Dynamics Control of Rear Steering Angle and Driving/Braking Torque to Improve Vehicle Handling and Stability of a Small Four In-Wheel-Motors Vehicle, The 34th Chinese Control Conference & SICE Annual Conference, 28-30, Jul. 2015, Hangzhou, China

Sunkil YUN, Hidekazu NISHIMURA, Vehicle Dynamics Control System Design of a Small Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors for Improving Vehicle Handling and Stability, The 4th Korea-Japan Joint Symposium on Dynamics & Control, 21-22, May, 2015, Busan, Korea

Hidekazu Nishimura, Systems Modeling for Additional Development in Automotive E/E Architecture, 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference ASP-DAC 2015 (招待講演)，2015年01月21日，幕張メッセ(千葉県幕張市)

尹善吉，西村秀和，超小型4輪インホイールモータ電気自動車に対するヨー安定化制御システム設計，第57回自動制御連合講演会，2014年11月10日，ホテル天坊(群馬県渋川市)

尹善吉，西村秀和，超小型4輪インホイールモータ電気自動車に対するヨーとロールオーバー安定性を考慮した操縦安定化制御システム設計，日本機械学会 機械力学・計測制御部門，2014年08月29日，上智大学四谷キャンパス(東京都千代田区)

Sunkil YUN, Hidekazu NISHIMURA and Shintaroh MURAKAMI, Vehicle Stability Control System Design for a Micro Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors Considering Energy Consumption Efficiency, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control, 2014年08月04日，札幌コンベンションセンタ(北海道札幌市)

〔図書〕(計1件)

西村秀和(総監修)，モデルに基づくシステムズエンジニアリング，日経BP社，2015年6月15日，199ページ

〔その他〕

ホームページ

<http://lab.sdm.keio.ac.jp/nismlab/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

西村 秀和(NISHIMURA, Hidekazu)

慶應義塾大学・システムデザイン・マネジメント研究科・教授

研究者番号：70228229