

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686038

研究課題名(和文) 運動制御レベルでの車両 インフラ協調による自動車の自動運転制御に関する研究

研究課題名(英文) Automatic Vehicle Guidance Control based on Vehicle-Infrastructure Cooperation at Motion Control Level

研究代表者

大前 学 (OMAE, Manabu)

慶應義塾大学・政策・メディア研究科・教授

研究者番号：10327679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,000,000円

研究成果の概要(和文)：現在の自動車の多くは、電気信号で操舵、駆動、制動を実現することが可能である。インフラ側が認識・制御機能を担えば、自動車側には通信器のみを搭載することで安価に局所的な自動運転が可能である。本研究では、インフラと自動車の運動制御レベルでの協調の可能性を明らかにすべく、車両認識・制御アルゴリズムの構築と評価、信頼性の向上、実証実験による評価を行った。本研究の結果、カメラ、LiDARにより、時速15km以下でインフラから安定に車両を認識・制御できることを確認した。また、実証実験とアンケート評価により、本研究で提案する車両付加コストの低い自動運転が利用者の受容性に合致しており、有用であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This project developed an automatic driving system in a local area whereby the vehicle motion is controlled by the site infrastructure. In the proposed control system, the vehicles have to be equipped with just communication devices for automatic driving, because the sensing and motion control is performed by the infrastructure. This feature reduces the vehicle cost of automatic driving, thus enhancing the social acceptance of automatic driving vehicles. In the research, development of algorithms for vehicle recognition by infrastructure, enhancement of reliability and evaluation by demonstration experiments had been carried out. The research results clarified the possibility of stable vehicle guidance by infrastructure at a speed of less than 15km/h using a camera or LiDAR sensors. The result of questionnaires by those who experienced the demonstration experiments clarified the usefulness of the proposed system and showed that it suits the sense of cost for automatic driving.

研究分野：自動車工学

キーワード：高度道路交通システム 自動車の自動運転システム 路車協調 運動制御

1. 研究開始当初の背景

近年の自動車の車体は、パワーステアリングシステムにおいて電動モーターが油圧システムに取って変わるようになり、また省燃費や運動性能の向上のニーズにより、駆動系、制動系の電動化、電子制御化が進んできている。すなわち、車両の操舵、駆動、制動が電気信号で容易に制御できるようになっている。言い換えれば、自動車に十分なセンシング機能と制御機能があれば、車体としては、自動運転が可能な構成となっている。しかし、これらの機能は、運動性能の向上や燃費の向上、運転支援等には利用されていても、自動運転に利用されるには至っていない。近年は、自動運転の実用化に向けた動きが加速しているが、自動運転を行うために十分な信頼性を有するセンシング機器、情報処理機器を多数搭載すれば車両が高価になり、その普及は限定的になる可能性がある。

一方で、自動運転が必要な局面を考えた場合、迎車と回送が自動化されるだけでも、自動車の利便性が大きく向上する。たとえば、駅へ行く場合、回送と迎車が自動化されれば、一人で駅まで行って、車を降りれば良い。また、回送先の駐車場は、距離が長くても問題ない。すなわち、局所的な自動運転により、自動車利用における両端（利用前と利用後）のプロセスが自動化されるだけでも、送迎に伴う人的負荷や往復トリップによる無駄なエネルギー消費を低減する効果がある。以上により、

- 局所的な領域においてインフラ側にセンシング機能を集約し、インフラからの通信で、操舵角・駆動力・制動力等の指令値を与え、車両運動を制御すれば、車両は通信器さえ有していれば自動運転が可能
- インフラから車両が制御される局所的な自動運転であっても、十分な利便性を実現し、低コストで社会的受容性が高く、近年の高齢化社会におけるモビリティの確保やエネルギー問題に寄与する可能性がある

と考える。また、このような局所的な自動運転は、私有地内で運用することも可能であり、無人回送等、現在の法制度では公道走行が難しい運用を実現できる可能性がある。インフラ誘導型の自動運転システムは、駅のパークアンドライドシステム、ショッピングセンター、電気自動車の充電のための誘導、防災時の車両誘導等、自動車だけに留まらず、都市開発や防災のための開発にも新たな方向を提示するものである。

2. 研究の目的

研究の目的は、インフラ（路側の構造物に

設置されたセンサや制御装置）と自動車が運動制御レベルでの協調が実現できることを、インフラからの車両誘導制御として実証し、その有用性と技術的妥当性を明らかにすることである。この目的の実現ために、本研究では、図1に示すようなインフラからの車両誘導システムの要素技術およびシステムを構築・評価していくことで、第一段階：認識手法、通信手法の構築と評価、第二段階：認識手法の高信頼化、複合化による信頼性向上、第三段階：実証実験の手順で研究を推進し、各段階において以下のことを明らかにする。

第一段階では、インフラからの車両認識手法を複数提案し、構築、評価することで、車両認識手法と車両認識の応答性、精度（横偏差、速度、ヨー角の精度等）の関係、インフラ-車両間の通信手法と可能となる情報取得周期・制御周期の関係を明らかにする。次に、認識系からフィードバック情報の誤差、通信の制約による入出力の周期、遅延の影響下において、目的の車両運動と系の安定化を実現する車両誘導制御系を構築し、認識手法、通信手法の条件別の車両誘導性能（車線追従精度、許容最大速度等）の関係を明らかにする。

第二段階では、各認識手法の高信頼化に加え、複数の車両認識手法を併用することで信頼性の向上を行なう。認識系を時変システムとして扱い車両誘導制御系を再構築することで、冗長化された通信系・認識系のもとで、見通し良く車両誘導制御を実現する手法を提案し、冗長化された認識系に対応した車両用誘導制御系の妥当性と信頼性向上効果を明らかにする。

第三段階では、運用実験システムを構築し、運用実験を実施することで、インフラ側からの車両誘導を実現するために必要なインフラ側センサ・通信機器数と誘導可能面積、誘導可能距離、同時誘導可能台数の関係やインフラ誘導型自動運転システムの社会受容性（必要性、許容コスト、利用頻度など）を明らかにする。

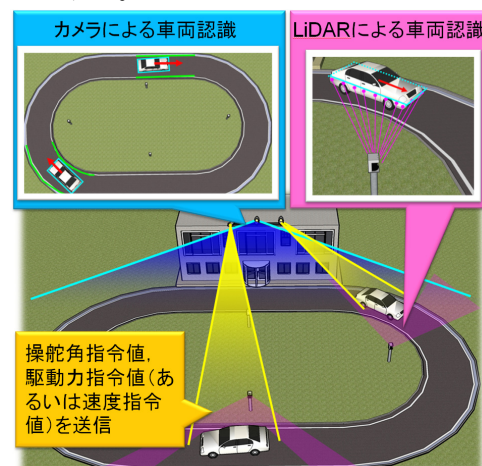


図1 インフラからの車両誘導システム

3. 研究の方法

(1) 第一段階の研究（認識手法・通信手法の構築と評価）

第一段階の研究においては、建物の屋上に設置した俯瞰カメラと、地上に設置したLiDARにより、車両の位置、向き、速度を取得するアルゴリズムを構築、評価した。図2に地上に設置されたLiDARを示す。図3に建物の屋上に設置されたカメラとカメラによる撮影画像を示す。建物の屋上に設置したカメラにより取得した俯瞰映像から、背景差分法とカルマンフィルタを用いたアルゴリズムにより、車載のRTK-GPSや車両運動センサを用いた計測に匹敵する精度で、車両の位置、速度、向きの情報が獲得できることを明らかにした。また、地上に設置したLiDARによる車両の検出では、ICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムを用いた車両追跡を行うことで、車載のRTK-GPSや車両運動センサを用いた計測に匹敵する精度で、車両の位置、速度、向きの情報が獲得できることを明らかにした。図5にカメラにより獲得した車両位置と車載RTK-GPSにより取得した車両位置を示す。

また、小型電気自動車を用いたインフラ車両系のプロトタイプを構築し、車両の制御系を構築、評価した。図4に小型電気自動車を用いた実験車を示す。この系において、無線モデムや、無線LAN等の複数の無線通信手段による制御性能を評価した。誘導制御を行った結果、カメラ、LiDARによる車両認識により、時速15km以下で安定に誘導制御が実現できることを確認した。図6に制御シーケンス、図7に、カメラからの車両認識により、誘導制御を行った際の車両軌跡を示す。また図8、に図7の目標軌道追従において、時速6kmを目標速度した場合の車両速度を示す。インフラからの車両認識による駆動力指令で、速度が制御できることに加え、速度が車載センサに匹敵する精度で検出できることが分かる。

通信の評価においては、2.4GHz帯の無線LANに加え、1.2GHz帯の無線モデムの通信器（データ通信速度9600bps）を用いた制御実験を行った。制御実験の結果、データ通信速度が低速な無線モデムにおいても問題なく制御できることを確認した。



図2 地上設置したLiDAR

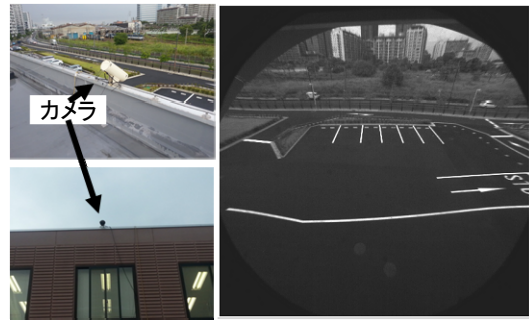


図3 建物屋上に設置したカメラと映像



図4 小型電気自動車を用いた実験車両

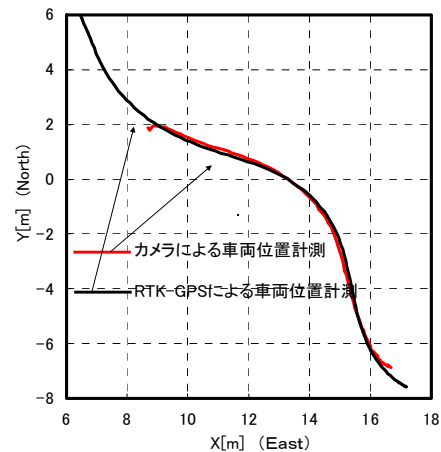


図5 カメラによる車両認識結果

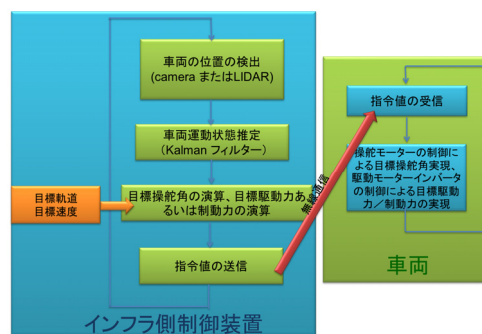


図6 制御シーケンス

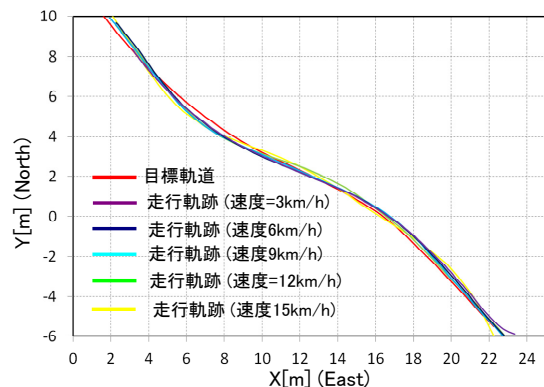


図7 カメラによる車両認識・制御結果(軌跡)

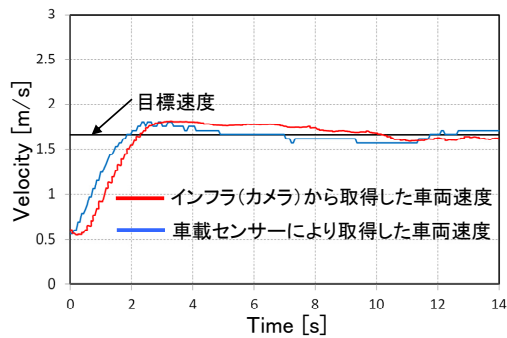


図8 カメラによる車両認識・制御結果(速度)

(2)第二段階の研究 (信頼性の向上)

第二段階の研究においては、個別の車両認識性能の向上による信頼性の向上と、手法の複合化による信頼性の向上を行った。

個別の車両認識性能の向上として、LiDARによる車両認識では、水平方向に加え、鉛直方向にも計測範囲を有する全方位二次元LiDAR (Velodyne社製HDL-32e)と走路の三次元地図を用いた車両検出手法を構築し、従来の一次元LiDARで地上構造物と車両の分離が難しかった箇所等においても、安定に車両を検出できることを確認した。図9、図10に、車両の走路の3次元地図と、LiDARによる車両認識、車両抽出の様子を示す。図10の黄色の部分抽出された車両である。また、カメラによる車両検出の信頼性の向上のため、車両のルーフ部に「T」字のマーキングを行い、マークの認識、追跡による車両の検出の信頼性の向上も行った。

手法の複合化による信頼性の向上として、LiDARとカメラ情報の併用によって、一方の処理の失陥時に、他方の処理により制御を継続し、運用の信頼性を向上できることを明らかにした。

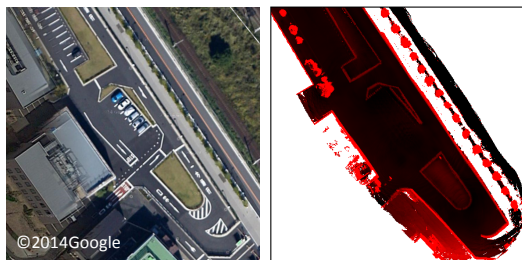


図9 LiDARの車両認識に用いた三次元地図

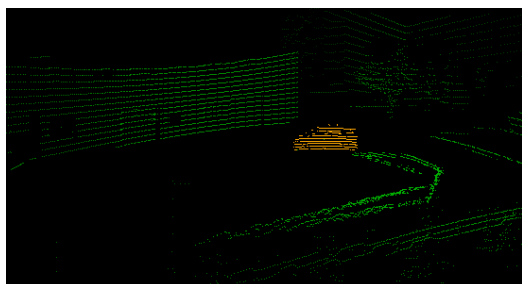


図10 三次元地図を用いた車両抽出

(3)第三段階の研究 (実証実験)

第三段階の研究においては、市販乗用車を用いた運用実験の準備と実証実験を行った。被制御車両には、市販の普通自動車を用いた。市販の普通自動車を用いることは、本研究の前提である、『現在の自動車は電気信号で駆動、制動、操舵を実現することが可能であり、自動運転のためのアクチュエータを備えている』ことを実証する意義もある。実証実験のための被制御車両の構築としては、操舵トルクセンサやペダルストロークセンサ等のドライバーの操作を検出するセンサに介入し、車両機器に疑似ドライバー入力への対応動作をさせることで、インフラから指令値に基づく操舵、駆動、制動を実現する信号介入装置を構築し、組み込んだ。図11に信号介入装置の概要図を示す。第一、第二段階の研究で構築してきた車両検出・制御システムの車両検出アルゴリズム、車両制御アルゴリズムのパラメータを修正、調整することで、インフラ側の車両検出、制御システムを再構築した。図12、図13にLiDARによる車両認識・制御の様子と制御結果(車両軌跡)を示す。

実証実験では、キャンパス内走路において、サービス開始、経路走行、障害物回避、サービス終了までの一連の動きを同乗走行により体験し、その後、インフラ側の制御を見学して頂いた後、アンケート調査を行った。アンケートの質問項目は、本研究で構築したシステムの有用性、高速道路自動運転機能の受容コスト、局所低速自動運転機能の受容コスト、局所低速自動運転において求められる利用可能性(誘導設備の導入率)である。

36名のアンケート回答の結果、本研究で構築したシステムの有用性においては、平均4.1点(5点満点)の回答が得られ、有用性が高いと評価されていることを確認した。また、駐車場等の局所的な自動運転機能をオプションとした場合に受容できる価格は平均約15万円との結果が得られ、高速道路の自動運転機能(約30万円との回答)比べ、受容できるコストが低いことが明らかとなった。車両側の付加コストを小さく抑え、局所的な自動運転を実現する本研究の考え方は、被験者の受容性の感覚に合致したものであると言える。また、局所自動運転の整備環境においては、18名(回答者の半数)がよく利用する大型施設、大型駐車場等のうち、50%以上の場所で使えることを求めていることが確認された。一方で、11名の回答者は会社、最寄駅等、特定の場所に誘導設備があれば良いと回答しており、広範囲での利用可能性よりも、特定の場所での利用を重視する人が少なからず(回答者の1/3程度)存在することが確認された。

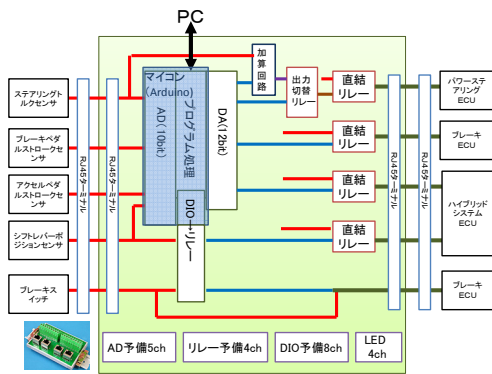


図11 信号介入装置



図12 LiDARによる車両認識・制御の様子

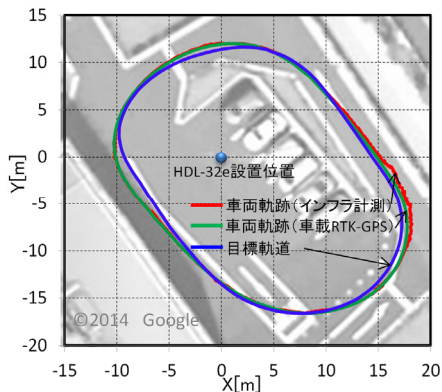


図13 LiDARによる車両認識・制御の結果

4. 研究成果

(1) 本研究の成果

本研究の成果は、以下のようにまとめられる。

第一段階の研究では、屋上に設置されたカメラ、地上に設置されたLiDARにより、車両の位置、速度、向きを、車載センサに匹敵する精度で獲得する手法を構築した。また、時速15km以下でインフラからの車両認識・制御安定に小型電気自動車の誘導制御が行えることを明らかにした。

第二段階の研究では、個別の認識手法の高性能化に加え、方式の異なる認識手法（カメラとLiDAR）の冗長化により、インフラからの車両誘導の信頼性が向上できることを明らかにした。

第三段階の研究では、市販自動車を被制御化したことにより、『現在の自動車は電気信

号で駆動、制動、操舵を実現することが可能であり、自動運転のためのアクチュエータを備えているため、車両には通信器だけあれば自動運転が可能』という主張を実証した。さらに、実証実験とアンケートにより、本研究で構築したシステムの有用性が高く評価されたことを明らかにした。また、局所低速自動運転機能の搭載に対して利用者が支払っても良いと考えるコストが、高速道路の自動運転機能に比べて小さく、車両側の付加コストを小さく抑える本研究の局所低速自動運転の考え方は、利用者の受容性に合致していることを確認した。

(2) 本研究の成果の位置づけ

自動車の自動運転は、自動車交通の安全化、効率化のための究極の技術である。従来、自動車の自動運転は、センシング、情報処理の信頼性等の技術的な課題に加え、法制度の問題があり、実用化が難しい技術とされてきた。本研究は、自動運転について、上記のような考え方が支配的であった時期に着想し開始した研究である。しかし、2013年に発表された政府の成長戦略に自動車の自動走行技術の開発が挙げられたこと、オリンピックまでに「世界一安全な道路交通社会」を実現するという目標等により、状況が大きく変わってきた。法制度の問題では、危険時にドライバーが介入して安全を維持し、その責任を負う自動運転は、ドライバーの安全運転義務を定める道路交通法第70条に違反するものではないと解釈され、現行法の枠内で、自動運転車の公道試験走行が可能となった。現在、政府が示している自動走行技術のロードマップに従うならば、2020年代前半には、高速道路上の自動運転を行うシステムが実用化されることになる。また、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の課題の一つに「自動走行システム」が入り、2014年5月に研究開発計画が策定され、様々な技術課題の研究開発が始まった。現在、官民により、実用化に向けた研究開発が進められている自動運転の特徴は、先に述べたドライバーが安全責任を持つ以外に、安全を主目的とした自律型自動運転となっていることである。

本研究は、運動制御レベルでの車両-インフラの協調を目指したものであり、上記の自律型自動運転とは、相反する方向性となっている。また、車両側の付加コストを抑え、社会受容性の高いシステムとすることを考慮している点も、現在の自動運転技術開発の流れの中では、考慮されていない。

本研究は、局所的な自動運転であっても、十分な利便性を実現し、低コストで社会的受容性が高く、近年の高齢化社会におけるモビリティの確保やエネルギー問題に寄与する

可能性を考慮している点、局所的な自動運転は、私有地内で運用することも可能であり、無人回送等、現在の法制度では公道走行が難しい運用を実現できる可能性点などを想定している。また、本研究の成果は、駅のパークアンドライドシステム、ショッピングセンター、電気自動車の充電のための誘導、防災時の車両誘導等、自動車だけに留まらず、都市開発や防災のための開発にも新たな方向を提示するものであり、社会システムとしての自動運転システムのあり方を提示するものである。本研究の成果は、現在活発な研究開発が進められている自動走行システムと同じ、「自動運転」に関連する技術開発の成果であるが、その内容や目指すものは、現行の安全性向上を目的とした自動運転技術とは全く異なり、社会システムとしての自動運転を対象とした先駆的な研究成果を提示するものであると考えている。

(3) 今後の展望

本研究の成果や考え方をより広く伝え、利用者の受容性を評価していくためには、社会実験を積極的に実施していくことが有効であると考えている。第三段階の研究により、自動車側は信号介入装置の組み込みにより安価に自動運転が実現できることを明らかにした。一方で、インフラ側は、一つのLiDARやカメラで、車両を検出できる範囲が約30メートル×30メートル程度であり、局所自動運転の利便性を十分に発揮できるよう広い範囲に誘導設備を設置する場合、インフラ側のセンサ設置コストが大きくなる。よって、安価なインフラ側センサで、広範囲に信頼性の高い車両認識を可能とする技術を開発する必要があると考える。すなわち、インフラ側のセンサとして、安価で耐環境性が高く、かつ無線通信等で効率的に複数のセンサの連携が可能なセンサを開発した上、安価なインフラシステムによる車両誘導システムを構築し、社会実験に繋げていくことが有効であると考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- [1] 小木津 武樹, 奥山 美緒, 大前 学, 清水 浩, レーザーレンジファインダを用いたインフラからの車両の状態推定と誘導制御に関する研究, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 5 (2013), pp. 1307-1313.

[学会発表] (計8件)

- [1] Takeki Ogitsu, Manabu Omae, State Observation and Communication for Cloud Vehicle Control, 2015 IEEE 81st

Vehicular Technology Conference, 2015年5月13日, グラスゴー (イギリス).

- [2] 大前 学, 岡田 成弘, 佐藤 周也, 久松 堯史, 松下 寛治, 市販乗用車を用いたインフラ誘導型自動運転システムの開発, 第12回 ITS シンポジウム, 2014年12月5日, 東北大学 (宮城県・仙台市).
- [3] 大前 学, 路車協調型自動運転システムの研究, 日本機械学会 第23回 交通・物流部門大会, 2014年12月3日, 東京大学 (東京都・目黒区)
- [4] Manabu Omae, Takeki Ogitsu, Noriyasu Hasejima, Atsushi Harada, Akira Takeno and Mio Okuyama, Automatic Vehicle Guidance Control by Infrastructure Using Information Obtained by Sensors on Infrastructure, The 20th World Congress on Intelligent Transport Systems, 2013年10月23日, 東京ビッグサイト (東京都江東区)
- [5] 小木津 武樹, 奥山 美緒, 大前 学, 清水 浩, レーザーレンジファインダを用いたインフラからの車両の状態推定と誘導制御に関する研究, 自動車技術会春季大会, 2013年5月24日, パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
- [6] 大前 学, 長谷島 範安, 竹野 陽, 原田 篤, 奥山 美緒, 清水 浩, インフラからの車両誘導制御のための車両認識に関する研究, 第11回 ITS シンポジウム, 2012年12月14日, 愛知県立大学 (愛知県長久手市)
- [7] 長谷島 範安, 原田 篤, 竹野 陽, 大前 学, 清水 浩, インフラ側カメラからの車両認識による車両誘導制御に関する研究, アドバンティ2012シンポジウム, 2012年11月10日, 日本大学 (千葉県習志野市)
- [8] 小木津 武樹, 奥山 美緒, 大前 学, 清水 浩, レーザーレンジファインダを用いたインフラからの車両誘導制御に関する研究, アドバンティ 2012 シンポジウム, 2012年11月10日, 日本大学 (千葉県習志野市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大前 学 (OMAE, Manabu)

慶應義塾大学・大学院政策・メディア研究科・教授

研究者番号: 10327679

(2) 連携研究者

小木津 武樹 (OGITSU, Takeki)

東京理科大学・理工学部機械工学科・助教

研究者番号: 00621202