

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560288

研究課題名(和文)ディペンダブル自律自動運転自動車システムの開発

研究課題名(英文)Development of dependable autonomous vehicle system

研究代表者

菅沼 直樹 (Suganuma, Naoki)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：50361978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、市街地を含む交通環境における自動車の自律的自動運転を目的とし、(1)複雑な車両周辺環境を車載センサによりロバストかつリアルタイムに認識するアルゴリズムを開発した。(2)また、上記認識結果に基づき現在地から目的地まで自律的に走行可能な信頼性の高い走行軌道生成・誘導アルゴリズムについて検討を行った。そして、各種デモンストレーションや公道走行実験を通して開発したアルゴリズムの有効性について検証した。

研究成果の概要(英文)：In this research, to achieve autonomous driving under general traffic condition including urban area, (1) robust and real time perception algorithm using onboard sensors is developed. Additionally, (2) high dependable path planning algorithm using perception result is developed. These algorithms are evaluated through some demonstrations and public urban road examination, and effectiveness of developed algorithm is confirmed.

研究分野：自動運転自動車

キーワード：自動運転自動車 周辺環境認識 パスプランニング 移動物体検出

1. 研究開始当初の背景

自動車の自動運転に関する研究は、運転負荷軽減、快適・安全性向上、交通容量増大等が見込まれ、主に高速道路や幹線道路を対象として産学官を含め古くから様々な研究開発が行われてきた。

一方市街地における自動運転についても、高齢・過疎地域における次世代のモビリティを実現する手段として期待されている。また近年では放射能汚染など、人の立ち入りが困難な地域の広域的調査機器としても大きな注目を集めている。しかし、市街地の複雑な環境をロボストに理解し、ディペンダビリティの高い自律型自動運転を行うことの難しさから、技術的課題が多く空白の問題として取り残されていた。

2. 研究の目的

本研究では、市街地を含む交通環境下における自動車の自律的自動運転を目的とし、

- (1) 複雑な車両周辺環境を車載センサによりロボストかつリアルタイムに認識し、
- (2) センサの精度・不確かさを考慮し、上記認識結果に基づき現在地から目的地まで自律的に走行可能な信頼性の高い走行軌道生成・誘導アルゴリズム

について研究を行うことで、安全安心かつ交通ルールに則って自律的に走行可能なディペンダビリティの高い次世代型自律自動運転システムの開発を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

前記目的を達成するため、複数のセンサ、自動運転用アクチュエータを搭載した図1に示す実験車両を用いて以下の検討を行った。

- (1) 車載センサによる車両周辺環境認識

図1に示す試験車両には、マルチレイヤ型のLIDARを搭載している。このLIDARからは雨天を含む環境下において最大約150m程度までのLIDAR観測点(ポイントクラウド)を取得可能である。一方、自動運転のためのパスプランニングには、LIDAR観測点を基に走行可能領域やセンサから観測できないオクルージョン領域を明確化する必要がある。また、ある一瞬の障害物の誤検出や未検出に影響されない安定した周辺空間認識能力が要求される。そこで本研究では時系列的なセンサ観測情報を基に2次元空間内の物体の存在・非存在性を事後確率として推定するOccupancy Grid Maps (OGM)を用いて周辺空間を認識することとした。以下に具体的な手法を述べる。

OGMは周辺空間を2次元のグリッド状に分割し、周辺に存在する物体が静止物体であると仮定した上で各グリッドにおける物体の事後占有確率を求める手法である。いま、時刻 t における車両の位置姿勢を \mathbf{x}_t 、LIDAR観測点群を \mathbf{z}_t とする。このとき、時刻 $1 \sim t$ 間の観測点群系列 $\mathbf{z}_{1:t}$ および車両の位置姿勢系列 $\mathbf{x}_{1:t}$ が得られた上で推定される、各グリ

ッド $m_{x,y}$ の障害物による事後占有確率 $p(m_{x,y}|\mathbf{z}_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t})$ は、Binary Bayes Filterを用いて再帰的に計算できる。ただし、Binary Bayes Filterでは計算の安定化のため、事後確率 $p(m_{x,y}|\mathbf{z}_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t})$ の代わりに次式に示すlog-odds $L_{x,y}$ を算出する。

$$L_{x,y} = \log \left[\frac{p(m_{x,y} | \mathbf{z}_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t})}{1 - p(m_{x,y} | \mathbf{z}_{1:t}, \mathbf{x}_{1:t})} \right] \quad (1)$$

Binary Bayes FilterではこのLog oddsを次式に基づいて再帰的に算出することで、効率的な事後確率の演算を可能とする。

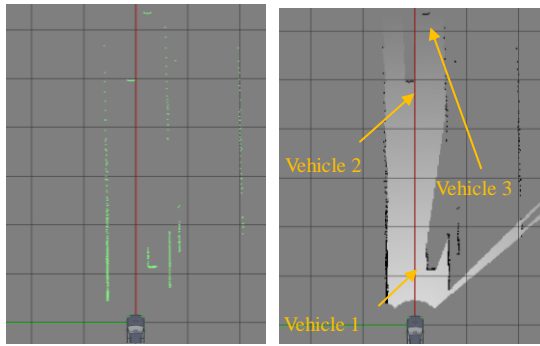
$$L_{x,y}^t = \log \left[\frac{p(m_{x,y} | \mathbf{z}_t, \mathbf{x}_t)}{1 - p(m_{x,y} | \mathbf{z}_t, \mathbf{x}_t)} \right] + L_{x,y}^{t-1} \quad (2)$$

ここで右辺第1項は、ある一瞬の時刻 t における各グリッド $m_{x,y}$ の障害物による占有確率 $p(m_{x,y}|\mathbf{z}_t, \mathbf{x}_t)$ を、その時刻におけるレーザ観測点群 \mathbf{z}_t 、車両位置姿勢 \mathbf{x}_t から算出し、log-oddsの形式としたものであり、例えば図2のシーンでは、物体の占有・非占有性ととも、不明性を考慮することで図2(b)に示すようなマップを生成することを意味する。OGMではこのように生成したマップを車両の移動に応じて座標変換し、式(1)に基づき累積していくことで各グリッドの事後占有確率算出することが可能となる。

図3に図2の状況において生成したOGMを示す。図3から分かるように、図2(b)では車両1の影となり観測されていなかった領域にも事後占有確率として推定したOGMではそのような領域についても低い占有確率を見積もっていることがわかる。一方図3から、3台の車両のような移動物体については、その航跡がOGM上に現れ悪影響を及ぼしていることがわかる。そこで本研究では、以下

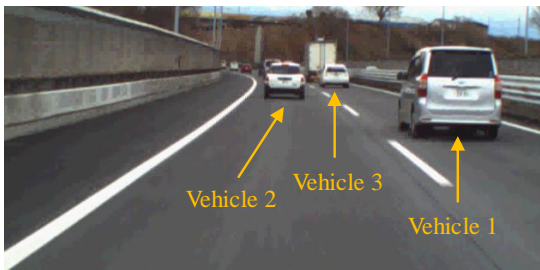


図1 自動運転自動車の外観



(a) LIDAR 観測点

(b) 占有確率



(c) オンボードカメラ画像

図 2 占有確率マップの例

に述べる方法に基づき移動物体を検出し、これらの移動物体を OGM 上から除外することとした。

OGM では、周辺環境が静止物体で構成されているという仮定の基で成り立つ手法である。したがって、移動物体が OGM 上に現れた場合、OGM 上では占有確率が低い領域に現れることが多い。このため、時刻 t における観測値が属するグリッド $m_{x,y}$ の 1 時刻前の占有確率 $p(m_{x,y}|\mathbf{z}_{1:t-1}, \mathbf{x}_{1:t-1})$ が閾値よりも低い場合、その観測値は移動物体から得られた可能性のある観測値と考えることができる。そこで本研究では、得られた観測点をクラスタリングし、クラスタ内に含まれる観測点の割合からクラスタが移動物体であるか静止物体か評価することとした。また、移動物体であると判定されたクラスタに関して、向きを考慮した 3 次元的な BOX のあてはめを行い、Interacting Multiple Model 法を用いて時系列的に追跡し、その運動を推定することとした。また連続して追跡できた物体を最終的な移動物体として検出し、検出されたクラスタに含まれる観測値の属するグリッド $m_{x,y}$ の占有確率 $p(m_{x,y}|\mathbf{z}_t, \mathbf{x}_t)$ を 0.5 に変更して OGM を更新することで、OGM に対する移動物体の影響を抑えることとした。

なお、物体の時系列的な追跡には、各時刻において得られる複数の観測値と追跡物体の間で対応付け(Data Association)を行う必要がある。本研究では、複雑な交通環境下においてロバストな対応付けを実現するため、Global Nearest Neighbor 法を用いた。図 4 に本手法を用いて周辺環境を認識した例を

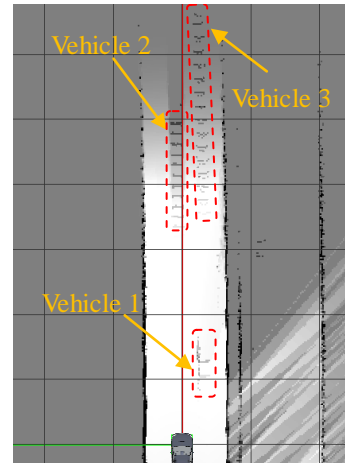


図 3 移動物体を考慮しない占有格子地図

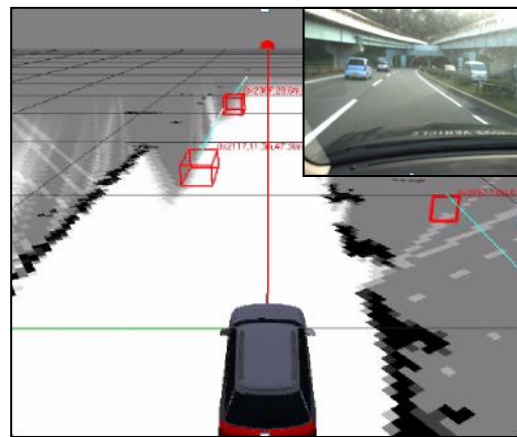


図 4 周辺環境認識例

を示す。図 4 では、検出した移動物体を赤色の矩形枠で示し、推定した運動から予測される移動物体の将来軌道を水色で表示している。この結果から概ね移動物体を正しく検知できていることが分かる。

(2) 走行軌道生成・誘導アルゴリズムの開発

自動車のスロットル、ブレーキ、ステアリング、シフトレバー等全てのアクチュエータをコンピュータ制御し、障害物を回避しつつ目的地まで自律的に自動誘導するためには、複雑かつ膨大な機能を実装する必要がある。このため、図 5 に示すように必要な機能ごとにモジュール化し、汎用の TCP/UDP IP ネットワークプロトコルを用いてモジュール間で必要な情報をやり取りする分散型システムを構築した。

このうち、本研究で構築したパスプランナモジュール群では、図 6 に示すようにハイレベル、ミドルレベル、ローレベルの 3 つのモジュールから構成されるように設計した。ハイレベルパスプランナではカーナビのようにデジタル地図から最適な経路を探索する機能が実装されている。またミドルレベルプランナではデジタル地図に基づき交通ルールに則った運転行動の候補を提案する機能

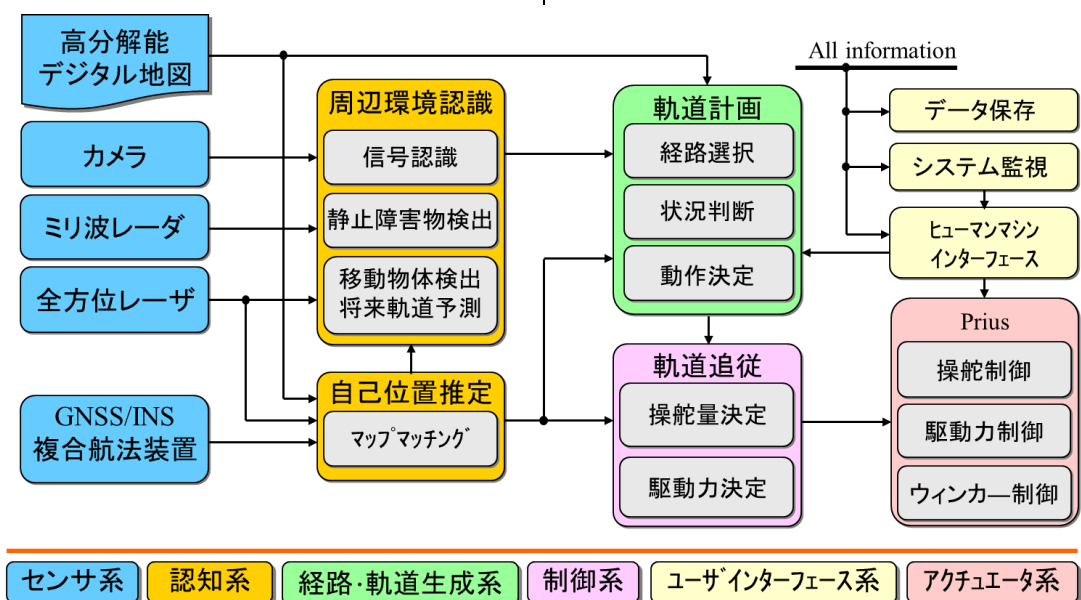


図5 開発した自動運転システムの概要

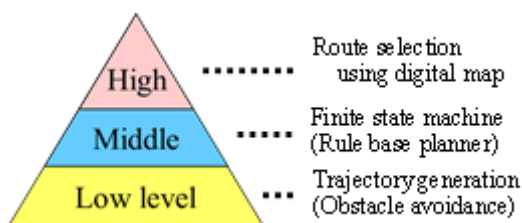


図6 階層構造型のパスプランナ

が実装されている。前進、車線変更、停止といった運転行動が有限状態機械 (Finite state machine) で管理されており、状況に応じた適切な運転行動をとるように設計されている。ローレベルパスプランナは上位プランナが提案した運転行動の決定を行うと同時に自動運転自動車が最終的に追従する軌道を生成するモジュールである。自動運転車両が最終的に追従する軌道は、障害物に衝突しない軌道候補のうち、ラテラルおよびロンジチュージナルジャークが少なく、適切な運転行動(車線逸脱度が低く、目標速度に近い等)を取るものとして決定する。

また、最終的に選択された軌道は軌道追従モジュールに送信され、自動車の操舵角度、制駆動力、ウィンカー、ハザード等の制御コマンドが演算される。

4. 研究成果

前章で述べた自動運転システムのうち、車両周辺環境認識に関する検討は、公道における試験もしくは公道において取得したセンサデータを基にオフラインでの検証が可能である。一方、走行軌道生成・誘導アルゴリズムに関しては、実際の自動運転を伴うため基礎検討段階で公道におけるテストを行うことは危険を伴うため避けるべきである。しかし、駐車場などの広い空間において各種自

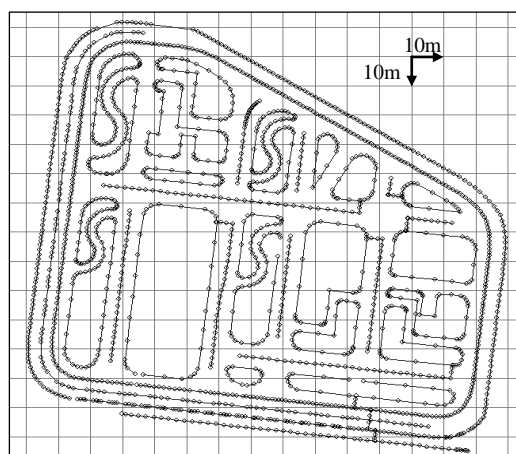


図7 テストコース概要

動運転実験を行う場合、通常交通環境とは異なるため、自動運転システムの検証には限界がある。このため、大学所在地近辺の東部自動車興業株式会社(東部自動車学校)殿の全面的なご協力のもと模擬市街路テストコースにおける長期フィールド試験を行った。フィールド試験に先立ち、図7に示すようにテストコース全域の精密な地図を RTK-GPS を用いて測量し、走行コースの地図の作成を行った。また、作成した地図を用いて前章で述べた走行軌道生成・誘導アルゴリズムの検証を行い、基本的な動作に問題ないことを確認した上で各所においてデモ走行を行った。

2013年10月東京ビッグサイトにおいて開催された ITS 世界会議 2013 では、片側1車線の道路を往復するコースを自律走行させ、コース内に存在している低速移動車両を検知し追越しを行うデモンストレーションを行った。ITS 世界会議 2013 会期中は、自動運転関係の学会関係者、企業関係者をはじめと



図8 公道走行実証実験の様子

し、国会議員の諸先生、メディア関係者、一般の方々など多種多様な方々約250名にご試乗いただいた。試乗の感想としては概ね好評で、大きな否定的意見は見受けられなかった。

その他、東京ビッグサイトにおいて2013年11月末に開催された東京モーターショー2013や2013年12月に金沢市で開催されたADVANTY2013シンポジウムにおけるデモンストレーション等を実施し、多くの方に同乗いただくと同時に多数のメディアに取り上げてられた。

更に、図8に示すように、2015年2月24日からは国内の大学としては初となる公道での走行実験を開始し、開発したアルゴリズムの実フィールドでの検証を開始した。また、これらの実証実験についても多数のメディアに取り上げられ、大きな成果を収めることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

- (1) 菅沼直樹, 金沢大学における自律型自動運転自動車の開発実例, 情報処理学会研究報告, 2014-CVIM-192(3), pp.1-4, 2014, 大阪, 査読無
- (2) Naoki Suganuma and Takahiro Uozumi, Development of an autonomous vehicle, Proc. of SICE Annual Conference, pp.215-218, 2012, Akita, Japan, 査読有
- (3) Naoki Suganuma, Yutaro Hayashi, Development of Autonomous Vehicle – Overview of Autonomous Driving Demonstration in ITS World Congress 2013-, 11th international Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO2014), pp.545-549, 2014, Vienna, 査読有

〔学会発表〕(計 6件)

- (1) 菅沼直樹, 松井俊樹, 自律型自動運転自動車のフィールド試験に向けた環境構築, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, pp.2A1-Q5, 2013, つくば
- (2) 菅沼直樹, 千野貴嗣, 松井俊樹, 自律型

自動運転自動車のフィールド試験に向けた環境構築～第2報 周辺走行車両モニタリングシステムの構築～, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.3N3-01, 2013, 東京

- (3) 菅沼直樹, 林悠太郎, ITS 世界会議 2013 における金沢大学の自律型自動運転デモ概要, ADVANTY2013 シンポジウム講演予稿集, 金沢市, 2013
- (4) 菅沼直樹, ITS 世界会議東京における金沢大学 自律型自動運転自動車のデモ概要, 自動車技術会春季大会 2014 フォーラムテキスト, no.14 FORUM-10, pp.38-43, 横浜
- (5) 菅沼直樹, 自動運転自動車の交差点走行の為のパスプランニングとその実験による検証, 計測自動制御学会 システム・制御情報部門学術講演会 (SSI2014), pp.3107, 2014, 岡山
- (6) 菅沼直樹, 林悠太郎, 永田大樹, 自動運転自動車の交差点走行のためのパスプランニングと検証, 日本機械学会交通物流部門大会 (TRANSLOG2014), pp.293-296, 2014, 東京

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 4件)

名称: 移動物体認識方法, 移動物体認識装置, および物体認識装置

発明者: 菅沼直樹, 高橋謙太

権利者: 菅沼直樹, 高橋謙太

種類: 特許

番号: 2015-023775

出願年月日: 2015年2月10日

国内外の別: 国内

名称: 移動物体追跡方法および移動物体追跡装置

発明者: 菅沼直樹, 高橋謙太

権利者: 菅沼直樹, 高橋謙太

種類: 特許

番号: 2015-023777

出願年月日: 2015年2月10日

国内外の別: 国内

名称: 車両走行制御装置

発明者: 菅沼直樹, 林悠太郎

権利者: 菅沼直樹, 林悠太郎

種類: 特許

番号: 2015-059556

出願年月日: 2015年3月23日

国内外の別: 国内

名称: 車両走行制御装置

発明者: 菅沼直樹, 林悠太郎

権利者: 菅沼直樹, 林悠太郎

種類: 特許

番号: 2015-059557

出願年月日: 2015年3月23日

国内外の別： 国内

[メディア報道] (計 40件)

- (1) Ruptly TV, 2015年3月31日
- (2) 読売テレビ「ウェークアップ! ふらす」, 2015年3月28日
- (3) NHK NEWS WEB, 2015年3月1日
- (4) TBS テレビ【はやチャン!】, 2015年3月2日
- (5) TBS NEWS-i, 自動運転車の一般道走行実験スタート, 2015年3月1日
- (6) 石川テレビ, 珠洲で日本初の公道利用の自動運転実証実験, 2015年3月2日
- (7) 北陸朝日放送, 珠洲市で乗用車の自動運転実験, 2015年3月1日
- (8) 朝日新聞 DIGITAL, 自動運転車、公道で走行実験 石川県珠洲市と金沢大, 2015年3月1日,
- (9) 産経フォト, 雨の中でもす〜いすい 自動走行車、公道で実験, 2015年3月1日
- (10) 北國新聞, 「人間の運転と変わらない」金沢大が珠洲で自動走行実験, 2015年3月2日
- (11) 福島民報, 自動走行車、雨の日もす〜いすい 金沢大が公道で実験, 2015年3月1日
- (12) 上毛新聞, 自動走行車、雨の日もす〜いすい 金沢大が公道で実験, 2015年3月1日
- (13) 毎日新聞, 金沢大:市街地で自動で走る車の実証実験へ, 2015年2月21日
- (14) 西日本新聞, 金沢大、市街地で自動運転実験へ 3月から石川県珠洲市で, 2015年2月21日
- (15) 中日新聞, 珠洲に自動運転車 金大が路上実験へ 高齢者ら期待高く, 2015年2月22日
- (16) 北國新聞, 珠洲市内で自動運転実験 金大、市街地で車走行, 2015年2月21日
- (17) 東奥日報, 金沢大、市街地で自動運転実験へ 3月から石川県珠洲市で, 2015年2月21日
- (18) 静岡新聞, 金沢大、市街地で自動運転実験へ 3月から石川県珠洲市で, 2015年2月21日
- (19) 信濃毎日新聞, 金沢大、市街地で自動運転実験へ 3月から石川県珠洲市で, 2015年2月21日
- (20) 四國新聞, 金沢大、市街地で自動運転実験へ 3月から石川県珠洲市で, 2015年2月21日
- (21) 愛媛新聞, 自動運転、公道で実験へ, 2015年2月21日
- (22) 宮崎日日新聞, 金沢大、市街地で自動運転実験へ 3月から石川県珠洲市で, 2015年2月21日
- (23) 佐賀新聞, 金沢大、市街地で自動運転実験へ 3月から石川県珠洲市で, 2015年2月21日
- (24) 読売新聞, 【ジャパンテクノロジー】「自動運転もうすぐ「仮免」」, 2014年8月26日
- (25) NHK BS, Great gear, 2014年7月7日
- (26) 北國新聞, 2014年6月24日
- (27) 雑誌 サーチ・イサラ 4月号, ネットと科学が叶える未来年表, 2014年3月31日
- (28) MRO テレビ, レオスタ, 2014年1月14日
- (29) NHK, あさいち, 2013年1月6日
- (30) 雑誌 ロボコンマガジン 1月号, 進む自動車のロボット化〜ここまで来ている無人走行技術, 2014年1月1日
- (31) 雑誌 モーターファン別冊, 特集 自動運転, 2013年12月29日
- (32) NHK E テレ, Rの法則, 2013年12月2日
- (33) 日本経済新聞, 金沢大学, ロボット工学応用した自動運転システム, 2013年11月27日
- (34) フジテレビ, めざましテレビ, 2013年11月21日
- (35) 朝日新聞, (探究人) 金沢大学講師・菅沼直樹さん 自動運転車、公道走行目指す, 2013年10月31日
- (36) NHK, ニュースウォッチ9, 2013年10月24日
- (37) Response, 【ITS世界会議13】金沢大学 Autonomous Vehicle による追い越しのデモを実施, 2013年10月21日
- (38) 朝日新聞, 車が運転手 現実に, 2013年10月21日
- (39) 日刊工業新聞, 自動運転, 2013年10月9日
- (40) フジテレビ, これが正解!アカデミー, 2013年3月24日

[その他]

ホームページ: <http://its.w3.kanazawa-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅沼 直樹 (SUGANUMA NAOKI)
金沢大学・理工研究域・准教授
研究者番号: 50361978

(2) 連携研究者

松井 俊樹 (MATSUI TOSHIKI)
岡山県立大学・情報工学部・助教
研究者番号: 50453204