

令和元年8月30日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04364

研究課題名(和文) 高速二眼カメラと可視光IDによる車輻前方の高速認識と通信を融合したシステム

研究課題名(英文) Integrated system of visible light communication and fast vehicle ahead recognition by high-speed stereo camera and visible light ID

研究代表者

山里 敬也 (Yamazato, Takaya)

名古屋大学・教養教育院・教授

研究者番号：20252265

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、可視光通信によるインフラ協調型安全運転支援システムの実現を目的に、車輻周辺環境の高速認識・通信統合システムについて検討した。具体的には、申請者がこれまで行ってきたイメージセンサを用いたITS可視光通信を発展させ、まず、カメラを2台に増やしたステレオ構成とし、時空間画像と時空間断面画像の解析を行った。結果として、最大比合成受信が有効であること、また、サブピクセル単位での推定を行うことで、高精度な測距が実現できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、可視光通信によるインフラ協調型安全運転支援システムに適用できる。とりわけ、本研究で明らかにしたサブピクセル単位での距離推定手法では、60mの距離で数10cm以下の測距特性を実現でき、有効性が高い。また、それに必要な演算処理も少なく、実用的である。なお、イメージセンサ可視光通信を対象に検討してきたが、LED信号機が点滅していることを考えると、測距については、十分適応可能であり、今後、その評価を行いたい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to realize an integrated visible light communication (VLC) system that not only perform communication but also achieve range estimation. The system adopts two high-speed cameras and analyzes a spatial-temporal image and a spatial-temporal cross image. Based on the analysis, we enable diversity reception for image-sensor based VLC. As a result, maximal ratio combining is also valid for image-sensor based VLC, and the system achieves a precious range estimation using sub-pixel estimation.

研究分野：通信・ネットワーク

キーワード：可視光通信 高速認識 高速二眼カメラ 高速認識・通信統合システム

## 1. 研究開始当初の背景

LED を高速点滅させることで情報伝送を行う通信を可視光通信と呼ぶ。可視光通信は図1に示すように、近年、発表論文数が増加しており、また、通信分野で最も権威のある米国電気電子学会 (IEEE) 主催の Optical Communication Workshop (OWC) が盛況、かつ連続して開催され、世界的にブレイクする兆しがある。既に、IEEE 802.15.7 や JEITA CP-1222 などの標準化も制定されており、可視光通信は初期の研究段階から実用化への進みつつある。しかしながら、現在検討されている可視光通信システムは、そのほとんどが屋内・静止環境での利用を想定したもので、屋外・移動体向けの可視光通信の研究は少ない。

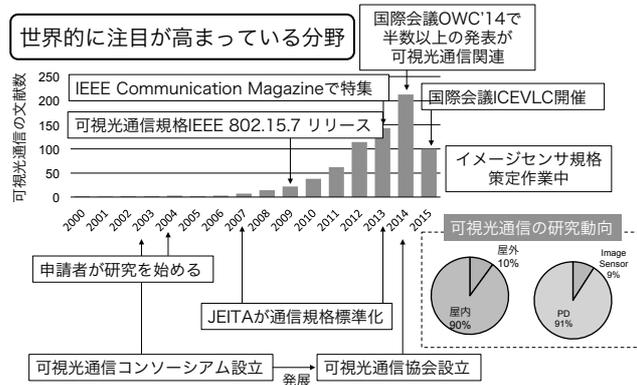


図1 可視光通信の研究動向

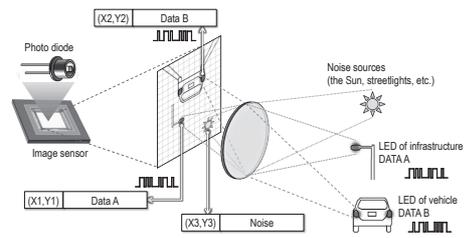


図2 ITS 可視光通信におけるイメージセンサの利点

申請者は可視光通信の ITS への応用 (屋外・移動体向けの可視光通信) について検討を重ねてきている。とりわけ、路車間および車車間可視光通信について検討しており、優れた成果を挙げている。

申請者の研究の特徴は、受信機に高速度カメラ (高速イメージセンサ) を用いている点にある。図2に ITS 可視光通信におけるイメージセンサの利点を示す。イメージセンサはフォトダイオード (PD) が格子状に並んだ構成をとる。ここで一つの PD からなる画素 (ピクセル) は、レンズを通して来る光を空間的に分離することができる。このため、強い外乱となる太陽光がある場合でも、所望信号が異なる画素にあれば、分離して復調できる。これは多数の複数光源からの情報も同時に受信できることを意味する。

さて、通常のカメラのフレームレートはたかだか 30 fps であり、通信用途には適さない。そこで、1,000 fps 以上の高速度カメラ (高速イメージセンサ) を受信機に利用している。高速度カメラは、マシンビジョン、ロボット制御、車両の自動運転制御にも応用されようとしており、注目されている。たとえば、1,000 fps で撮影する場合、1 ms 毎に画像が取得できる。このため 36km/h で走行する自動車はたかだか 1cm しか動かない。これは、イメージセンサ上において可視光通信源がほとんど動かないことになる。実際、申請者等が明らかにしたように、たかだか 0.1 ピクセル程度しか移動しない。さらに、時空間画像 (動画像を時間方向に重ねた画像の 3 次元空間) と時空間断面画像 (時空間画像をある面で切り出した画像) から明らかのように、高速点滅する可視光送信源を識別することは容易である。このことは、可視光通信源の高速追尾だけでなく、高速認識も可能であり、既に 2ms での高速認識を実証実験で確認済みである。

## 2. 研究の目的

ここまで述べてきたように、申請者は可視光通信について多面的に検討を重ねてきたが、これらの成果は全て単眼高速度カメラによるものである。そこで、本研究では、カメラを 2 台用いた構成を考え、これまでの可視光通信に関する研究成果を発展させることで、車輛周辺環境の高速認識・通信統合システムについて検討する。具体的には、以下に掲げる項目について検討を行っていく。

- 高速二眼カメラによる時空間画像と時空間断面画像の解析
- 高速二眼カメラと可視光 ID による車輻周辺環境の高速認識・通信統合システムの構築

### 3. 研究の方法

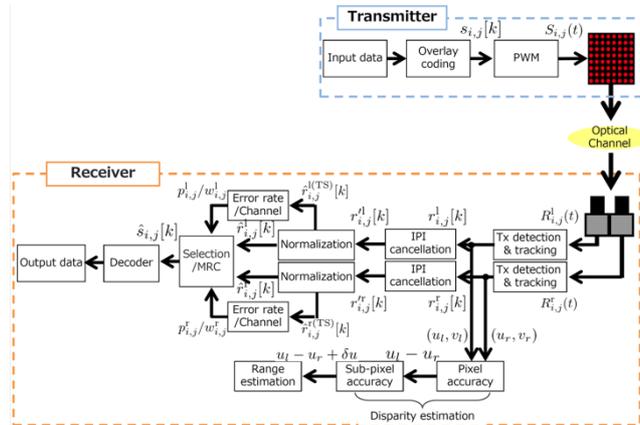


図3 高速二眼カメラによる車輻周辺環境の高速認識・通信統合システム

図3にシステムモデル図を示す。可視光通信送信機には、従来と同様にLEDアレイを用いる。可視光通信受信機には、高速二眼カメラを用いる。高速二眼カメラを用いることで、いわゆる電波におけるダイバーシチ受信も期待できる。本研究では、代表的な手法である選択合成受信と最大比合成受信について、新たにイメージセンサ可視光通信に適用する手法を開発し、その有効性を誤り率の観点で評価した。

また、ダイバーシチ受信の鍵を握るのは、それぞれのカメラで受信した画像から推定される通信路特性である。これは、単に受信LEDの輝度値として表されるのではなく、輝度値に加えて、画像上のどのピクセルに存在するのか、という位置も情報として持つ。左右2つの画像位置に関する情報を利用することで、送信LEDアレイまでの距離も推定できる。この測距は、図3に示すように、通信路推定・トラッキングで得られる情報を利用することで実現できる。本研究では、この測距特性についても評価した。

### 4. 研究成果

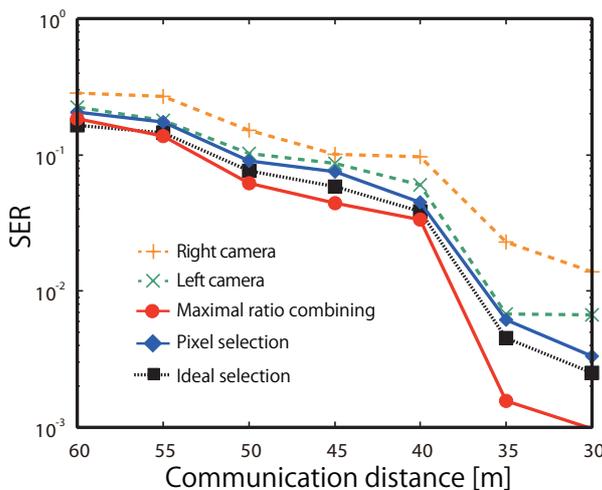


図4 高速二眼カメラによるダイバーシチ受信特性

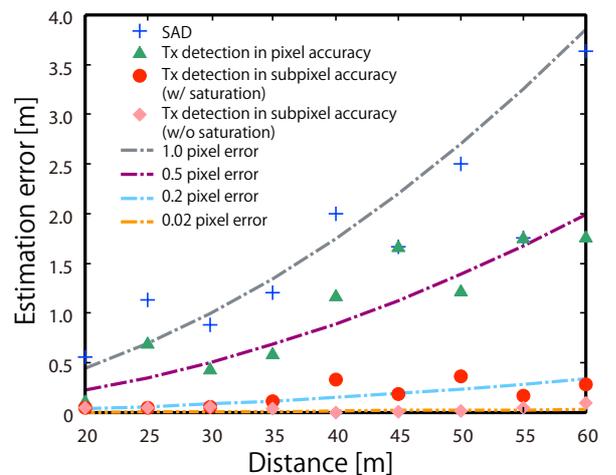


図5 距離推定特性

図4に高速二眼カメラによるダイバーシチ受信特性を示す。ここで、縦軸はシンボル誤り率であり、横軸は送信機と受信機間の距離である。また、単眼カメラの誤り率特性（それぞれ Right camera, Left camera と表記）、選択ダイ

バーシチ受信特性 (Pixel selection), 最適な選択ダイバーシチ受信特性 (Ideal selection), 最大比合成受信特性 (Maximal ratio combining) を示している。最適な選択ダイバーシチ受信特性とは、通信路推定 (pixel selection) が理想的に行われている場合であり、よって、選択ダイバーシチ受信特性が達成できる下限となる。

図4より、最大比合成受信が最適であることが分かる。一方で、電波における最大比合成受信のようなダイバーシチ利得は得られていない。これは、更なる特性改善を示唆するものであり、今後も検討していきたい。

図5に高速二眼カメラを用いた測距特性を示す。縦軸は平均距離推定誤差[m]であり、横軸は送信機と受信機間の距離である。ここで、SAD (Sum of Absolute Difference) とは各画素の差であり、一般的なステレオ測距で用いられる手法である。これに対し、本研究で提案する手法、すなわち、可視光通信受信機における通信路推定の情報を用いた測距では、平均距離推定誤差を改善できることが分かる。具体的には、通常の SAD と同じようにピクセル単位での推定 (Tx detection in pixel accuracy) でも、改善が見込めるが、さらにサブピクセル単位での推定 (Tx detection in subpixel accuracy) を行うことで大幅な改善ができる。たとえば、輝度の飽和領域を除いた推定手法 (Tx detection in subpixel accuracy w/o saturation) では、平均距離推定誤差を数 10 cm 以下に押さえ込むことに成功している。この値は 0.02 pixel の精度で推定できることと等価であり、非常に優れた距離推定を実現できている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

1. 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, 高速二眼カメラによる画素選択/最大比合成受信を適用した可視光通信性能の評価実験, 電子情報通信学会論文誌, vol. J102-B, no. 2, pp. 90-97, 2019年2月 (査読有)
2. T. Nguyen, A. Islam, T. Yamazato, Y. M. Jang, Technical Issues on IEEE 802. 15. 7m Image Sensor Communication Standardization, IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 2, pp. 213-218, 2018年2月 (査読有)
3. M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, Simplified Vehicle Vibration Modeling for Image Sensor Communication, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E101-A, no. 1, pp. 176-184, 2018年1月 (査読有)
4. 山里敬也, 岡田啓, 可視光通信実用化技術, 電子情報通信学会誌, vol. 101, no. 1, pp. 59-65, 2018年1月 (査読有)
5. Takaya Yamazato, [Invited Paper] V2X communications with an image sensor, Journal of Communications and Information Networks, vol. 2, no. 4, pp. 65-74, 2017年12月 (査読有)
6. T. Yamazato, N. Kawagita, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo, S. Arai, K. Kamakura, The Uplink Visible Light Communication Beacon System for Universal Traffic Management, IEEE Access, vol. 5, pp. 22282-22290, 2017年10月 (査読有)
7. Y. Goto, I. Takai, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Kawahito, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, A New Automotive VLC System Using Optical Communication Image Sensor, IEEE Photonics Journal, vol. 8, no. 3, 2016年6月 (査読有)

[学会発表] (計40件)

1. M. Hori, M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, K. Kamakura, T. Yendo, S. Arai, An LED Transmitter Detection using Linear SVM and CNN for ITS Image Sensor Communication, 3rd International Conference and Exhibition on Visible Light Communications (ICELVC), Seoul, Korea, 2019年3月 (査読有)
2. M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, A Comparison of Reception Methods for Visible Light Communication Using High-speed Stereo Cameras, IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, UAE, 2018年12月 (査読有)
3. S. Kamegawa, M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, K. Kamakura, T. Yendo, S. Arai, Performance Evaluation of Precoded Pulse Width Modulation for Image Sensor Communication, IEEE GLOBECOM Workshop on Optical Wireless Communications, Abu Dhabi, UAE, 2018年12月 (査読有)
4. 有末知矢, 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, DMD プロジェクタを用いた ITS 可視光通信の送信パターン基礎検討, 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2018-70, pp. 237-241, 宮古島, 2018年12月
5. 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, [奨励講演] ITS イメージセンサ通信における画像上の送信機位置に影響を与える車両振動のモデル化, 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2018-26, pp. 47-52, 広島, 2018年10月
6. T. Yamazato, [Invited Talk] Image Sensor Communications for Automotive, Progress, In Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Toyama International Conference Center, Toyama, Japan, 2018年8月 (査読有)

7. T. Yamazato, [Invited Talk] Overview of image-sensor communication, Visible Light Communications Workshop, Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR), Hong Kong Convention and Exhibition Centre, Hong Kong, 2018年7月 (査読有)
8. 堀将大, 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 鎌倉浩嗣, 圓道知博, 荒井伸太郎, 時間勾配を特徴量とした機械学習による可視光通信送信機検出, 電子情報通信学会技術研究報告, ASN2018-30, pp.85-90, 函館, 2018年7月
9. 亀川智史, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, イメージセンサ可視光通信へのブリコーディングの導入と静止環境における性能評価, 電子情報通信学会技術研究報告, ASN2018-16, pp.1-6, 函館, 2018年7月
10. T. Yamazato, [Invited Talk] Image Sensor Communications for future ITS, 2018 Advanced Photonics Conference, スイス・チューリッヒ工科大学, 2018年7月 (査読有)
11. 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, 高速二眼カメラを用いた ITS 可視光通信のための最大比合成による通信性能改善手法, 電子情報通信学会 総合大会, A-9-8, p.95, 東京, 2018年3月
12. 山里敬也, ITSのためのイメージセンサ通信, 電子情報通信学会 総合大会, CI-2-5, pp.SS-17 - SS-18, 東京, 2018年3月
13. M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, Performance Enhancement for Image Sensor Communication in an Intelligent Transport System Using a High-speed Stereo Camera, International Conference and Exhibition on Visible Light Communications (ICEVLC), Yokohama, Japan, 2018年3月 (査読有)
14. T. Yamazato, [Invited Talk] High-speed image processing of VLC signals for automotive applications, International Conference on Optical Wireless Communications, Beijing, China, 2018年3月 (査読有)
15. 堀将大, 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 鎌倉浩嗣, 圓道知博, 荒井伸太郎, ITS イメージセンサ可視光通信のための SVM を用いた LED アレイ 検出手法, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2017-56, pp.251-256, 沖縄, 2017年12月
16. T. Yamazato, [Invited Talk] Overview of visible light communications with emphasis on image sensor communications, Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), Perth, WA, Australia, 2017年12月 (査読有)
17. S. Kibe, K. Kamakura, T. Yamazato, N-Stream Superimposed System with m-Point DFT for Image-Sensor-Based Visible Light Communication, IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 1-6, Singapore, Singapore, 2017年12月 (査読有)
18. 木部修斗, 鎌倉浩嗣, 山里敬也, m 点 DFT を用いた N 情報系列重畳イメージセンサ型可視光通信システム, 電子情報通信学会技術研究報告, CS2017-58, pp.21-2, 阿蘇, 2017年11月
19. K. Kamakura, T. Yamazato, [Invited Talk] Modulation and coding for image sensor communication, IEEE Photonics Conference (IPC), pp.235-236, Orlando, FL, USA, 2017年10月 (査読有)
20. 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, ITS イメージセンサ通信における高速二眼カメラを用いた通信性能改善手法, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-9-7, p.92, 東京, 2017年9月
21. 亀川智史, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, ITS イメージセンサ可視光通信の高速化に適する伝送方式の比較, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2017-69, pp.115-120, 石垣商工会館, 2017年6月 (査読有)
22. M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, Modeling and Parameter Estimation of Vehicle Vibration Inducing Transmitter Displacement in ITS Image Sensor Communication, IEEE International Conference on Communications Workshop on Optical Wireless Communications, pp.144-149, Paris, France, 2017年5月 (査読有)
23. 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, 車輻振動測定に基づく ITS イメージセンサ通信における 通信路変動のパラメータ推定, 電子情報通信学会 総合大会, A-9-14, p.123, 名古屋, 2017年3月
24. 新井雄大, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, ITS イメージセンサ通信における互いに非同期な 複数光源からの情報同時受信手法に関する実験系の構築, 電子情報通信学会 総合大会, A-9-15, p.124, 名古屋, 2017年3月
25. 亀川智史, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, イメージセンサ可視光通信の高速化のための伝送方式の初期検討, 電子情報通信学会 総合大会, A-9-13, p.122, 名古屋, 2017年3月
26. 木原渉, 圓道知博, 荒井伸太郎, 山里敬也, 岡田啓, 鎌倉浩嗣, 汎用カメラを用いた可視光通信のための位相推定法, 電子情報通信学会 総合大会, A-9-10, p.119, 名古屋, 2017年3月
27. 増田圭亮, 鎌倉浩嗣, 山里敬也, イメージセンサ型可視光通信における階層的時空間符号化への位置変調の適用, 電子情報通信学会 総合大会, B-10-57, p.310, 名古屋, 2017年3月
28. N. Kawagita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, Vehicle to Infrastructure Visible Light Communication using DCO-OFDM, RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP), pp.129-132, Guam, 2017年3月 (査読有)
29. W. Kihara, T. Yendo, S. Arai, T. Yamazato, H. Okada, K. Kamakura, A Modulation Method to Detect Phase Shift from Asynchronous Camera Image for Visible Light Communication, RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP), pp.133-136, Guan, USA, 2017年3月

(査読有)

30. T. Yamazato, Range Estimation Scheme for Integrated I2V-VLC using a High-Speed Image Sensor, Presentation at Professor Jean Armstrong's Laboratory, Monash University, Monash University, Australia., 2017年3月
31. 川北直明, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, 車路間可視光通信への時空間ブロック符号化DCO-OFDM適用の一検討, 情報理論とその応用シンポジウム, pp.555-560, 高山, 2016年12月
32. T. Asai, T. Yendo, S. Arai, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, K. Kamakura, Position estimation of LED matrix in image sensor communication, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), pp.1 - 5, 2016年12月 (査読有)
33. M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, Vehicle Vibration Model that Induces Channel Fluctuation in ITS Image Sensor Communication, Cambodia-Japan Joint Workshop on Ambient Intelligence and Sensor Networks, シュムリアップ, 2016年12月 (査読有)
34. 佐藤翔, 岡田啓, 山里敬也, 和田忠浩, 小林健太郎, 片山正昭, [ポスター講演] デジタル映像コンテンツへの情報埋め込みを用いたイメージセンサ可視光通信における映像品質と通信品質の評価, 可視光通信ワークショップVLCWS2016, 東京, 2016年11月
35. M. Kinoshita, T. Yamazato, H. Okada, T. Fujii, S. Arai, T. Yendo, K. Kamakura, Channel Measurement of Infrastructure-to-Vehicle Image Sensor Communication, 23rd World Congress on Intelligent Transport Systems, Melbourne, Australia, 2016年10月 (査読有)
36. S. Sato, H. Okada, K. Kobayashi, T. Yamazato, M. Katayama, Visible Light Communication Systems Using Blue Color Difference Modulation for Digital Signage, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC), pp.1242-1247, Valencia, Spain, 2016年9月 (査読有)
37. K. Masuda, K. Kamakura, T. Yamazato, Spatial Modulation in Layered Space-Time Coding for Image-Sensor-Based Visible Light Communication, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC), pp.1254-1259, Valencia, Spain, 2016年9月 (査読有)
38. 木下雅之, 山里敬也, 岡田啓, 藤井俊彰, 荒井伸太郎, 圓道知博, 鎌倉浩嗣, [ポスター講演] ITS イメージセンサ通信における車輪振動及び路面凹凸が与える通信路パラメータフィッティング, 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2016-112, pp.99-103, 名古屋, 2016年7月
39. 山里敬也, 高速イメージセンサ通信の車路間・車車間通信への応用, JIEP 主催 2016 最先端実装技術シンポジウム, 東京ビッグサイト, 2016年6月
40. T. Yamazato, A. Ohmura, H. Okada, T. Fujii, T. Yendo; S. Arai, K. Kamakura, Range estimation scheme for integrated I2V-VLC using a high-speed image sensor, IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), pp.326-330, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016年5月 (査読有)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

以下のホームページで研究成果の概要を公開予定している。

<http://yamazato.ilas.nagoya-u.ac.jp/ja/image-sensor-communications/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし。

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：木下雅之

ローマ字氏名：Masayuki Kinoshita

なお、研究協力者である木下雅之くん(名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程を平成30年度修了)は、本研究で得られた成果に対し、以下を受賞した。

- IEEE 名古屋支部 2019年国際会議研究発表賞 (2019/03/25),
- 電子情報通信学会 2017年度WBS小特集号学生奨励賞 (2018/07/04),
- 電子情報通信学会 学術奨励賞 (2018/03/22)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。