

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22246046

研究課題名（和文）シャノン限界を目指した超長距離・大容量コヒーレント光伝送システムの研究

研究課題名（英文）Study on Ultra-long Large-capacity Coherent Optical Transmission Systems Aiming at Realization of the Shannon Limit

研究代表者

菊池 和朗 (KIKUCHI KAZURO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：50134458

研究成果の概要（和文）：

ナイキスト波長分割多重技術は、帯域がシンボルレートに等しい矩形状光信号スペクトルを、隙間なく波長軸上に配置する方式である。これによって 1symbol/s/Hz の周波数利用効率が実現できる。本課題では、ナイキスト波長分割多重・偏波多重 QAM 光信号の発生、伝送、復調に関する研究を行った。シンボルレート 10Gsymbol/s において 10GHz 帯域の矩形状光スペクトルを有する 4QAM, 16QAM, 64QAM 偏波・波長多重光信号を発生させ、これらの信号を復調する技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

The Nyquist wavelength-division multiplexing (WDM) technique can increase the spectral efficiency up to 1 symbol/s/Hz, generating rectangular-shaped optical spectra whose bandwidths are equal to the symbol rate and aligning them in the optical frequency domain without any frequency gap. In this project, we study generation, transmission, and demodulation of polarization-division multiplexed (PDM) high-order QAM optical signals under the Nyquist-WDM condition. We successfully establish the method for generating 4QAM, 16QAM, and 64QAM Nyquist-WDM PDM signals at 10 Gsymbol/s and demodulating these signals after transmission.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	16,100,000	4,830,000	20,930,000
2011 年度	13,900,000	4,170,000	18,070,000
2012 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：情報通信工学，フォトニックネットワーク

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、2005年3月に、コヒーレント検波と高速のデジタル信号処理とを組み合わせた“デジタル・コヒーレント光受信器”と

いう新しいコンセプトを提案した。この方式によれば、市販レベルの分布帰還型(DFB)半導体レーザを光源として、信号光複素振幅を完全に検出できるため近年、各国でその研究・開発が

活発化している。

デジタル・コヒーレント光受信器を用いれば、どのような多値光変調フォーマットにも対応できるため、周波数多重化技術と合わせて、周波数利用効率をシャノン限界にまで近づけることができる。また、信号光の位相情報を用いて光ファイバの群速度分散や偏波分散、ファイバの非線形性の適応等化など、高度なデジタル信号処理(DSP)が可能となる。これらの特長は、将来の光ファイバ通信システムを革新する可能性を秘めており、研究代表者のこれまでの研究をさらに発展させるべく、本研究が実施された。

2. 研究の目的

本研究では、申請者が先鞭をつけ、世界的に急速に研究・開発が進展しつつあるデジタル・コヒーレント光受信器を駆使して、シャノン限界に迫る周波数利用効率の実現を目指す。

まず、直交振幅変調(QAM)に代表される新しい多値光変調技術を確立する。さらに、受信端で信号を等化、多重分離、復調するためのデジタル信号処理アルゴリズムを確立し、デジタル・コヒーレント光受信器に実装する。これらの技術を結集して、1,000km光伝送システム上でその有効性を実証する。デジタル・コヒーレント光受信器によりはじめて可能となる、超高密度周波数多重技術、多値変復調技術、偏波多重技術、信号等化技術を駆使して、極限的な光周波数利用効率を実現する。

3. 研究の方法

(1) 多値変調技術の確立

16QAM, 64QAM などの新しい多値光変調技術を確立する。LiNbO₃ 光 IQ 変調器(IQM)を用いて 10Gsymbol/s で動作する変調器を設計・試作・評価する。矩形状の形状を持つナイキスト限界のスペクトルを実現することを目指す。

(2) 信号等化、復調アルゴリズムの実装

偏波分散、波長分散など光ファイバに起因する信号劣化に対する等化アルゴリズムを検討し、受信器に実装する。偏波変動などの時変的な信号劣化に対しては、適応等化アルゴリズムを導入する。このような信号等化以外にも、クロック抽出、偏波アラインメント、

キャリア位相推定などを実装する必要がある。これらの信号処理の最適な順序や構成法など、デジタル信号処理回路全体の設計・試作を行う。

(3) 1,000km 光伝送システムを用いた総合伝送実験

全長 1,000km の単一モード光ファイバ(SMF) 伝送路を整備する。超高密度周波数多重および偏波多重された多値光変調信号の 1,000km 伝送実験を、各種等化技術を実装したデジタル・コヒーレント光受信器を用いて実施し、周波数利用効率の限界を明らかにする。

4. 研究成果

(1) ナイキスト WDM 偏波多重 QAM 信号の発生

QAM 光信号 3 チャンネルのナイキスト WDM 信号を発生するための実験系を、図 1 に示す。中心チャンネルとなる CW 光は外部共振器型レーザ(ECL)から発生させ、波長は 1551nm である。それに隣接する 2 チャンネルは分布帰還型半導体レーザ(DFBLD)から発生させた。中心チャンネルと隣接チャンネルは、2 台の LiNbO₃ 光 IQ 変調器を用いて独立に光変調した。

変調器を駆動する電気信号は、任意波形電気信号発生装置の DSP 回路とデジタル・アナログ変換器(DAC)を用いて発生させた。信号処理のブロック図を図 2(a)に示す。2⁹-1 段擬似ランダムビットパターンから QAM 符号へマッピングした後に、サンプリング速度を 2sample/symbol へ変更した。その QAM 信号を離散フーリエ変換(DFT)してナイキストフィルタリングした。フィルタのロールオフ比はゼロである。この信号を逆 DFT して時間信号に戻し、DAC を介して 10Gsymbol/s 電気信号を得た。ここでは、10Gsample/s DAC 2 台から構成される 20Gsample/s 時間インターリーブ DAC を用いている。得られた電気信号を 2 分岐し、片方に 32 サンプル分の時間遅延を与えた。

このような処理によって得られた電気信号で光 IQ 変調器を駆動し、10GHz 帯域の矩形状光スペクトルを有する QAM 光信号を得た。3 波長チャンネルを合波することにより、WDM QAM 信号を生成し、さらに偏波多重器を用いて、WDM 偏波多重 QAM 光信号を得た。

(2) デジタル・コヒーレント光受信器

デジタル・コヒーレント受信器を用いて信号光を受信する。受信器からの電気信号は4チャンネルデジタルオシロスコープを用いて 2×10^6 サンプルのデータとして保存した。オシロスコープのアナログ帯域 16GHz である。また、サンプリング速度は 50Gsymbol/s であり、受信信号データのサンプリング・符号速度比は 5sample/symbol である。

蓄積されたデータはオフラインで信号処理され、符号誤り率が計算される。受信器における信号処理のブロック図を図 2(b)に示す。信号データのサンプリング速度を 2sample/symbol に変換した後、周波数領域でロールオフ比ゼロのナイキストフィルタに通し、波長多重分離を行った。その後、遅延が半符号間隔のバタフライ型有限インパルス応答(FIR)フィルタを用いて、偏波分離と同時に信号等化も行った。適応等化アルゴリズムには、トレーニング信号を用いた判定指向型 LMS アルゴリズムを適用した。復号を行った後、ビット誤り率を計算した。

(3) 符号誤り率特性

完全ナイキスト条件でのクロストークの影響を評価するために、矩形光スペクトルを有する偏波多重 QAM 信号 3 チャンネルを周波数間隔 10GHz で波長多重し、完全ナイキスト条件のもとでの中央チャンネルのビット誤り率を測定した。

図 3 に測定結果を示す。前置増幅入力パワー P_{in} は、3 チャンネル WDM 信号のパワーの合計である。4QAM および 16QAM では、黒丸の結果は、白丸を 5dB 程度、横軸方向にシフトさせた結果とほぼ等しく、完全ナイキスト条件で波長多重してもペナルティが全くないことが示されている。64QAM では、ビット誤り率 10^{-4} 程度においてエラーフロアが観測された。この信号劣化は、隣接チャンネル信号の 10GHz 帯域外スペクトル成分からのクロストークによって生じる。

次に、ナイキスト WDM 偏波多重 64QAM 信号の伝送性能を評価するために、単一波長およびナイキスト WDM 条件における偏波多重 64QAM 光信号の 50km 伝送実験を行った。伝送後のビット誤り率測定の結果を図 4 にま

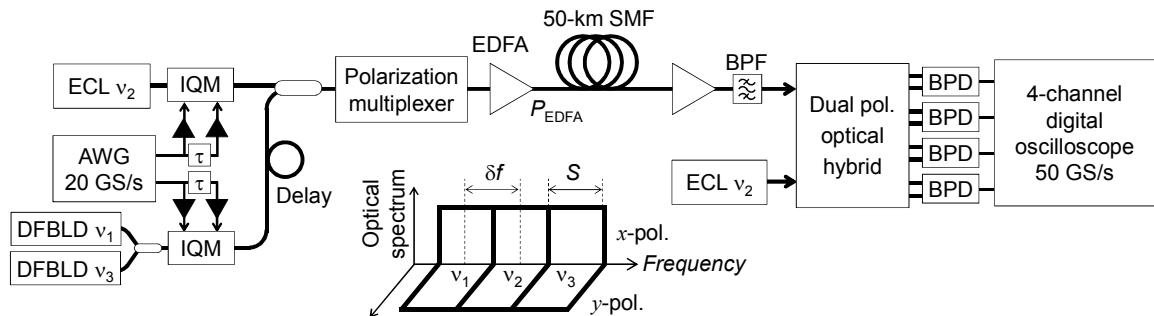


図 1 偏波多重 QAM 光信号のナイキスト波長多重伝送の実験系

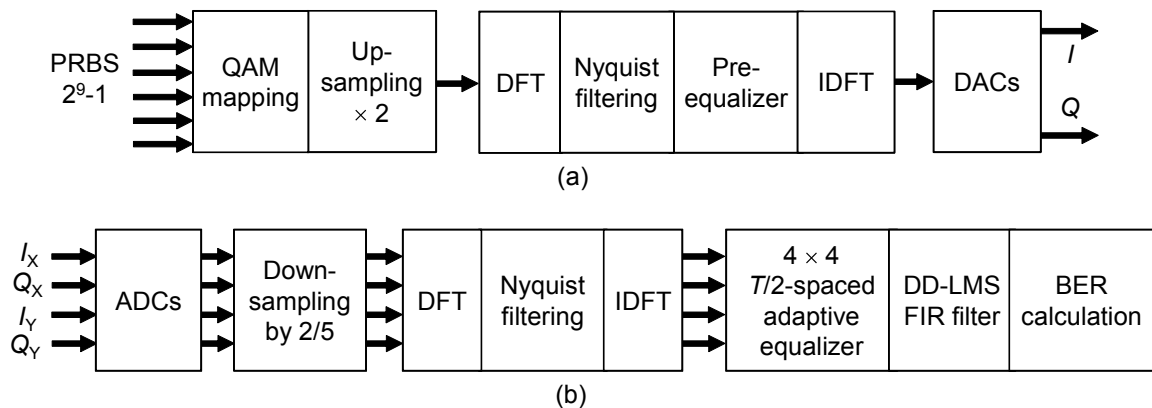


図 2 (a) 送信器側および(b)受信器側の信号処理のブロック図。

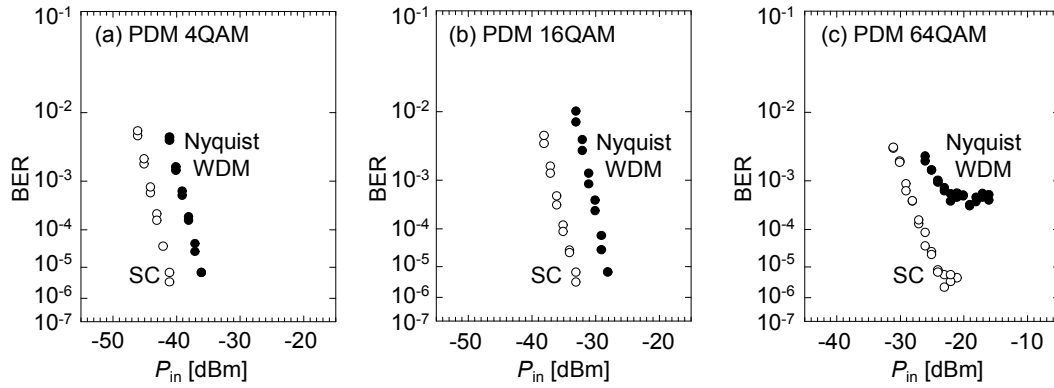


図3 ナイキスト WDM 偏波多重 (a) 4QAM, (b) 16QAM, (c) 64QAM 信号のビット誤り率測定結果。単一波長での結果を白丸で示す。

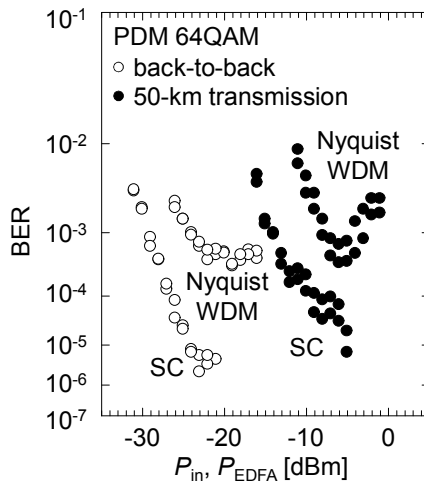


図4 50km 伝送前後での、ナイキスト WDM 偏波多重 64QAM 光信号のビット誤り率測定結果。伝送前が白丸、伝送後が黒丸。比較のために単一波長 (SC) での結果も併記してある。

とめる。 P_{EDFA} は伝送路入力平均パワーを示す。参考のために、back-to-back 構成での結果も示した。単一波長伝送でのペナルティは 20dB 程度であり、これは総伝送路損失と良く一致する。その一方で、ナイキスト WDM 伝送においては、 $P_{EDFA} \geq -6\text{dBm}$ の高パワー領域で著しい信号品質劣化が示されている。単一波長での実験では高パワー領域での劣化は見られないことから、クロストーク雑音が非線形効果によって増強されたためであると結論付けられる。

(4) まとめ

10GHz 帯域の矩形状光スペクトルを有す

る 10Gsymbol/s 偏波多重多値 QAM 光信号を、周波数間隔 10GHz で周波数多重することにより、完全ナイキスト条件を満たす WDM 偏波多重 QAM 信号を発生した。符号誤り率の測定により、品質の評価を行った。

4QAM や 16QAM ではほとんどペナルティなくナイキスト WDM が可能であるものの、64QAM では多少のペナルティが生じる。このペナルティは、隣接チャネルからのクロストークに起因する。また、完全ナイキスト WDM 条件において、偏波多重 64QAM 光信号の 50 km SMF 伝送を行った。この時、クロストーク雑音ファイバ非線形効果によって増強され、高パワー領域では著しい信号劣化が生じることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- [1] Md. S. Faruk and K. Kikuchi, "Compensation for in-phase/quadrature imbalance in coherent-receiver front end for optical quadrature amplitude modulation," IEEE Photonics J., 査読有, vol.5, no.2, 7800110, April, 2013, DOI:10.1109/JPHOT.2013.2251872
- [2] 菊池 和朗, "デジタルコヒーレント光受信器における適応等化技術," 電子情報通信学会論文誌 (B), 査読有, vol.J96-B, no.3, pp.212-219 (2013 年 3 月).
- [3] Y. Mori, C. Zhang, and K. Kikuchi, "Novel configuration of finite-impulse-response filters tolerant to carrier-phase fluctuations

in digital coherent optical receivers for higher-order quadrature amplitude modulation signals,” *Optics Express*, 査読有, vol.20, no.24, pp.26236-26251, Nov. 2012

- [4] K. Kikuchi, “Characterization of semiconductor-laser phase noise and estimation of bit-error rate performance with low-speed offline digital coherent receivers,” 査読有, *Optics Express*, vol.20, no.5, pp.5291-5302, Feb. 2012
- [5] K. Kikuchi and M. Osaki, “Highly-sensitive coherent optical detection of M -ary frequency-shift keying signal,” *Optics Express*, 査読有, vol.19, no.16, pp.B32-B39, Dec. 2011
- [6] K. Kikuchi, “Digital coherent optical communication systems: Fundamentals and future prospects,” *IEICE Electronics Express*, 査読有, vol.8, no.20, pp.1642-1662, Oct. 2011
- [7] K. Kikuchi, “Analyses of wavelength- and polarization-division multiplexed transmission characteristics of optical quadrature-amplitude-modulation signals,” *Optics Express*, 査読有, vol.19, no.19, pp.17985-17995, Sept. 2011
- [8] Md. S. Faruk and K. Kikuchi, “Adaptive frequency-domain equalization in digital coherent receivers,” *Optics Express*, 査読有, vol.19, no.13, pp.12789-12798, June 2011
- [9] K. Kikuchi, “Performance analyses of polarization demultiplexing based on constant-modulus algorithm in digital coherent optical receivers,” *Optics Express*, 査読有, vol.19, no.10, pp. 9868–9880, May 2011
- [10] K. Kikuchi, “Clock recovering characteristics of adaptive finite-impulse-response filters in digital coherent optical receivers,” *Optics Express*, 査読有, vol.19, no.6, pp.5611–5619, March 2011
- [11] Md. S. Faruk, Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, and K. Kikuchi, “Multi-impairment monitoring from adaptive finite-impulse-response filters in a digital coherent receiver,” *Optics Express*, 査読有, vol.18, no.26, pp.26929–26936, Dec. 2010

[学会発表] (計 21 件)

- [1] K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Frequency stabilization of multiple semiconductor lasers for Nyquist-WDM transmission systems,” *Optical Fiber*

Communications Conference (OFC 2013), 査読有, OTu2I.6, Anaheim, CA, USA (17-21 March 2013)

- [2] Y. Mori and K. Kikuchi, “Dual-stage decision-directed phase estimator enabling perfect frequency-offset elimination in digital coherent optical receivers,” *Optical Fiber Communications Conference (OFC 2013)*, 査読有, OTu3I.7, Anaheim, CA, USA (17-21 March 2013)
- [3] C. Han, K. Igarashi, and K. Kikuchi, “Influence of channel misalignment of time-interleaved DAC on sensitivity degradation in coherent optical receivers,” *Optical Fiber Communications Conference (OFC 2013)*, 査読有, OTh1F.2, Anaheim, CA, USA (17-21 March 2013)
- [4] K. Kikuchi, “Principle of adaptive-filter-based signal processing in digital coherent receivers,” *European Conference on Optical Communication (ECOC2012)*, 査読無, We.1.A.3, Amsterdam, Netherland (16-20 Sept. 2012)
- [5] K. Kikuchi, “Digital coherent transmission,” *Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2012)*, 査読無, 5B2-3, Busan, Korea (2-6 July 2012)
- [6] Y. Mori, C. Zhang, and K. Kikuchi, “Kerr-effect compensation with parallel single split-steps in digital coherent receivers,” *Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2012)*, 査読有, 5B1-2, Busan, Korea (2-6 July 2012)
- [7] Md. S. Faruk and K. Kikuchi, “Front-end IQ-error compensation in coherent optical receivers,” *Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2012)*, 査読有, 4B2-5, Busan, Korea (2-6 July 2012)
- [8] Y. Mori, C. Zhang, and K. Kikuchi, “Novel FIR-filter configuration tolerant to fast phase fluctuations in digital coherent receivers for higher-order QAM signals,” *Optical Fiber Communications Conference (OFC 2012)*, 査読有, OTh4C.4, Los Angeles, CA, USA (4-8 March 2012)
- [9] K. Kikuchi and M. Osaki, “Highly-sensitive coherent optical detection of M -ary frequency-shift keying signal,” *European Conference on Optical Communication (ECOC 2011)*, 査読有, Tu.5.A1, Geneva, Switzerland (18-22 Sept. 2011)
- [10] Md. S. Faruk and K. Kikuchi, “Monitoring of optical signal-to-noise ratio using statistical moments of adaptive-equalizer

- output in coherent optical receivers,” Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2011), 査読有, 6B4-3, Kaohsiung, Taiwan (4-8 July 2011)
- [11] Y. Mori and K. Kikuchi, “Carrier-phase-insensitive operation of FIR filters adapted by the decision-directed LMS algorithm in digital coherent optical receivers,” Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2011), 査読有, 7B2-4, Kaohsiung, Taiwan (4-8 July 2011)
- [12] K. Kikuchi, “Analyses of polarization-multiplexed WDM transmission characteristics of high-order optical QAM signals,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2011), 査読有, CThH2, Baltimore, MA, USA (1-6 May 2011)
- [13] Md. S. Faruk and K. Kikuchi, “Frequency-domain adaptive equalization in digital coherent receivers,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2011), 査読有, CThH7, Baltimore, MA, USA (1-6 May 2011)
- [14] K. Igarashi, Y. Mori, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Bit-error rate performance of Nyquist wavelength-division multiplexed quadrature phase-shift keying optical signals,” Optical Fiber Communications Conference (OFC 2011), 査読有, OMR6, Los Angeles, CA, USA (6-10 March 2011)
- [15] K. Kikuchi and K. Igarashi, “Characterization of semiconductor-laser phase noise with digital coherent receivers,” Optical Fiber Communications Conference (OFC 2011), 査読有, OML3, Los Angeles, CA, USA (6-10 March 2011)
- [16] Md. S. Faruk, Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, and K. Kikuchi, “Second-order PMD monitoring from adaptive FIR-filter tap coefficients in a digital coherent receiver,” Optical Fiber Communications Conference (OFC 2011), 査読有, OWN3, Los Angeles, CA, USA (6-10 March 2011)
- [17] K. Kikuchi, “High-speed digital coherent receiver having time-division demultiplexing function,” Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP2010), 査読無, ThA1, Shanghai, China (9-12 Dec. 2010)
- [18] C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Ultrafast digital coherent receiver based on parallel processing of decomposed frequency subbands,” European Conference on Optical Commu-

ication (ECOC 2010), 査読有, Th.10.A.5, Torino, Italy (19-23 Sept. 2010)

- [19] Md. Faruk, Y. Mori, C. Zhang, and K. Kikuchi, “Multi-impairments monitoring from the equalizer in a digital coherent receiver,” European Conference on Optical Communication (ECOC 2010), 査読有, Th.10.A.1, Torino, Italy (19-23 Sept. 2010)
- [20] K. Kikuchi, “Coherent optical transmission systems,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2010), 査読無, 7B1-1, Sapporo, Japan (5-9 July 2010)
- [21] K. Kikuchi, “Coherent optical modulation and demodulation,” International Conference on Optical Internet (COIN 2010), 査読無, MoC1-1, The Shilla Jeju, Korea (11-14 July 2010)

[図書] (計 1 件)

- [1] K. Kikuchi, “Coherent optical communications: Historical perspectives and future directions,” Chapter 2 in High Spectral Density Optical Communication Technologies, edited by M. Nakazawa, K. Kikuchi, and T. Miyazaki, Springer, 2010

[その他]

ホームページ等

<http://www.ginjo.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 和朗 (KIKUCHI KAZURO)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：50134458

(2) 研究分担者

()
 研究者番号：

(3) 連携研究者

加藤 一弘 (KATOH KAZUHIRO)
 東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教
 研究者番号：00292897

五十嵐 浩司 (IGARASHI KOJI)
 東京大学・大学院工学系研究科・講師
 研究者番号：80436534