

## 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 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：23901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360189

研究課題名（和文） 広帯域量子通信路における符号化・復号化，変調及び多重化方式に関する研究

研究課題名（英文） Coding-decoding, Modulation, and Multiplexing for Broadband Quantum Channel

研究代表者

臼田 毅 (USUDA TSUYOSHI)

愛知県立大学・情報科学部・准教授

研究者番号：80273308

研究成果の概要（和文）：ブロードバンドという言葉が一般用語となって久しい。しかし、現在の光通信を高度に発展させた量子通信における“広帯域”量子通信路容量とは、単に帯域が広いという意味ではなく、光という情報媒体を用いた場合の究極の伝送限界を示す。本研究では、近年示されたこの限界をいかに達成するかを明らかにすることを目標に、現実的な多重化方式、変調方式及び符号化・復号化を量子通信に適用した場合の特性を調べ、様々な条件下で広帯域量子通信路容量の達成可能性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In quantum communication theory, the broadband channel capacity, which was derived recently, is not just a capacity of a channel with a broad bandwidth but the ultimate information carrying limit. In this research, in order to clarify how to achieve the ultimate limit, we show performance of quantum communication systems when we apply various coding-decoding, modulation, and multiplexing. As a result, it is clarified that there is the case that the capacity is almost achieved by using the optical region only.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	8,600,000	2,580,000	11,180,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：情報通信工学，量子情報理論，量子通信，量子ガウス通信路，通信路容量，多重化

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 国内外の動向

本研究課題の背景として、MIT のグループによる 2004 年のブレイクスルーをまず述べるべきであろう。それは、量子情報理論分野

において、1960 年代に始まる 40 年来の未解決問題の中で「本丸」というべきものが解決したという極めて大きな進展であった。2009 年の研究開始時、すでに 5 年が経過していたが、2004 年の発表は、ここ 10 年でも最も重

要な成果の一つと言える。その内容は、量子ガウス通信路の通信路容量の中で、最も基本的な減衰通信路の容量が、明らかにされたというものである (Classical capacity of the lossy bosonic channel: the exact solution, V. Giovannetti, S. Guha, S. Lloyd, L. Maccone, J. H. Shapiro, and H. P. Yuen, Physical Review Letters, vol.92, 027902, 2004)。量子性をもつ代表的な情報媒体は光であり、量子通信は、現在の光通信技術を高度に発展させた形で実現されることが、予想されている。この光通信において、減衰通信路は、光ファイバ通信におけるファイバの伝送損失や光空間伝送におけるビーム広がりによる損失をモデル化した、もっとも重要かつ基本的な通信路モデルである。したがって、エネルギー制約条件下での、通信の究極の限界が示されたといえる。MIT の成果は、そのような限界が、周波数の連続的利用、連続的変調 (アナログ変調ととらえることができる) および符号長無限大の符号化により、原理的に達成されることを証明したものであるといえる。これを量子通信の実現化につなげていくためには、どのような変調を用い、どのような符号化および復号化を行えばよいのかを考察すること、すなわち、適切なデジタル変調と符号化・復号化を明らかにすることが必要と考えられ、さらに広帯域化のため多重化した際の特性を明らかにする必要がある。

しかしながら、世界の量子情報理論研究は、変調や符号化の研究に進むのではなく、あくまでも究極の限界の研究が進められ、現在、より複雑な雑音が加わった場合、ブロードキャストした場合等の通信路容量の研究が行われている。一方、我が国では、NICTにおいて世界で初めて符号化の量子利得を実証する原理実験がデモされた (Exceeding classical capacity limit in quantum optical channel, M. Fujiwara, M. Takeoka, J. Mizuno, and M. Sasaki, Physical Review Letters, vol.90, 167906, 2003) ことなどから、理論研究よりはむしろ基礎実験の研究が進められ、量子最適受信機や量子一括復号等で利用される、非ガウス制御などの技術が精力的に研究されている。

## (2) 研究代表者の状況

これに対し、研究代表者らは、これまで量子通信における符号化・復号化の研究を行い、平成 18 年度から (20 年度まで) の科研費プロジェクトとして、減衰通信路の容量に近づくための量子符号化変調の研究を実施し、デジタル変調を適用した場合の量子通信路容量や量子符号化・復号化に関する成果を得ていた。また、本研究課題提案の前に、量子情報分野で顕著な貢献をしている研究者の

集まる会議に参加し、それまでの成果を発表した結果、量子通信理論のバイオニアから、重要な研究であるとの高い評価を得るとともに、我々がそれまでに実施してきた符号化・変調の研究は、狭帯域 (あるいは単一モード) 量子通信路に関するものであり、今後さらに、広帯域量子通信路へと発展させるべきであることを悟った。さらに、そこでの議論から、究極の限界を示す理論予測を実験研究へとつなげる、本研究を進めるために不可欠な様々なノウハウを、世界の量子情報の研究者が使いこなせていないという意外な事実を知り、広帯域量子通信路に対する符号化、変調、多重化を明らかにする本研究は、正に、我々が実施すべき課題であることを確信した。

## 2. 研究の目的

本研究の究極的目標は、量子通信ネットワークの実現であり、情報媒体の潜在能力の全てを使い切る、超高速、超高信頼、超高安全な通信として期待される量子通信が、小規模ネットワーク、グローバルネットワーク、コスモネットワークなど、あらゆる場面で適切に実用化されることにある。この目標のため、基礎実験等の研究だけでなく、

- (1) 量子通信路の究極的能力を明らかにし、
- (2) それを達成する具体的な通信方式を示し、
- (3) 通信方式を実現する量子回路の構成法を確立するといった理論研究が必要である。

本研究は、主に (2) を扱う。したがって、本研究の目的は、近年示された量子情報理論の示す通信の究極的限界である、“広帯域”量子通信路容量をいかに達成するかについて、光を媒体とする量子通信に対して、明らかにすることであり、より具体的には、現実的な多重化方式、変調方式及び符号化・復号化を量子通信に適用した場合の特性を調べ、様々な条件下で最適な方式を明らかにすることが、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

本研究では、広帯域量子通信路容量をいかに達成するかについて明らかにするため、現実的な多重化方式、変調方式及び符号化・復号化を量子通信に適用した場合の特性を調べ、様々な条件下で最適な方式を明らかにする。このため、具体的には以下のように研究を進める。

- (1) 波長分割多重による離散化通信路容量による広帯域量子通信路容量の達成可能性の検討

まず、理想的な広帯域量子通信路容量である、フラットな周波数特性をもつ減衰通信路

の容量に、波長分割多重とデジタル変調によって、符号長無限の極限でどこまで近づけるかを、離散化通信路容量を導出することで明らかにする。次に、現実の通信路に近い周波数に依存した減衰特性をもつ量子通信路の容量を導出する。この容量を達成目標とし、波長分割多重とデジタル変調による達成度を明らかにする。具体的には、トータルエネルギー制約条件の下、減衰通信路を通して伝送された受信平均光子数（超長距離伝送によって大きく減衰した後の光子数）が、各波長 0 から 20 個程度までの特性を調べる。

#### (2) 量子一括復号による通信路行列公式の開発

誤り率を小さくしつつ、有限の符号長でどこまで広帯域量子通信路容量に近づくことが期待できるかを考察するための道具として、量子一括復号による通信路行列公式の開発を進める。既存の数値計算ソフトに組み込まれたアルゴリズムでは、量子一括復号による通信路行列の計算には時間がかかり、かつ、規模が少し大きくなるとメモリがパンクして計算できない。例えば、数 GB のメモリを持つ PC では、8 元信号、情報記号数 7 の符号も扱えない。従来の通信路行列公式は素数元符号により符号化された量子信号にしか適用できなかったため、まず、元数が素数べき ( $p^n$ ) の場合の拡張を検討し、さらに任意元への一般化を目指す。

#### (3) 具体的な符号化・復号化の詳細な特性

現実的な符号化を適用した場合の相互情報量の特性を調べる。具体的には、例えば PSK 信号に対して拡大体上あるいは整数（剰余）環上の線形符号あるいは擬巡回符号を適用し、復号過程として多くの量子信号系に対して誤り率を最小とする量子一括復号となる SRM (Square-root Measurement) を適用した場合について、トータルの相互情報量を算出する。また、通信路容量との比較を行う。ここでの結果と (1) の結果を対比することにより、波長分割多重、デジタル変調、具体的な符号化・復号化による、広帯域量子通信路容量の達成度が明らかとなる。

#### 4. 研究成果

以下、主な項目ごとに研究成果を示す。なお、導出した公式や証明、通信路容量や相互情報量、誤り率の特性など、グラフ等を含む詳細な結果については、発表論文等に示している。

##### (1) 広帯域量子通信路容量と波長分割多重による離散化通信路容量の比較

##### ①フラットな周波数特性をもつ減衰通信路について

フラットな周波数特性をもつ減衰通信路について、MIT のグループの導出した広帯域量子通信路容量に、波長分割多重によって、符号長無限の極限でどこまで近づけるかを、離散化通信路容量を導出することで検討した。これは、無限の周波数の連続的な利用に基づく広帯域量子通信路容量を、有限の周波数を離散的に利用した波長分割に基づく通信路容量と比較したものである。その際、まず、光領域のみの波長分割多重として、周波数の下限を熱雑音の影響が少なくなる遠赤外領域、上限を遠紫外領域とすることで、周波数帯域を無限ではなく 1000THz オーダーの有限のものとして特性を調べた。結果として、受信エネルギーが小さい場合は、光領域のみの波長分割多重で、広帯域量子通信路容量が達成されることを明らかにした。MIT のグループによる広帯域量子通信路容量は、絶対零度の下で無限の周波数帯域（周波数ゼロから無限大の帯域であるため、もちろん極低周波や X 線、ガンマ線なども含む）を用いた場合で、現実のものとは言えない（そもそも有限で達成できないなら未来永劫達成されない）。このため、本研究で示した波長分割多重による通信路容量は、より現実的な“広帯域”量子通信路容量であるともとらえることができる。

1000THz でも現状の技術の延長線上にあるとは言いきれない超広帯域であるため、次に、徐々に帯域幅を狭めて特性を調べたところ、受信エネルギーが小さいところと大きいところでは、帯域を制限する影響として、低周波側をカットする影響と高周波側をカットする影響に違いがあることが明らかとなった。詳細は、以下の論文等に示している。

Y. Takamura, S. Usami, and T. S. Usuda, On attainment of the capacity of broadband quantum channel by wavelength division multiplexing, Proceedings of ISITA2010, pp. 1045-1049, 2010 年  
DOI: 10.1109/ISITA.2010.5649485

##### ②周波数依存の減衰特性をもつ通信路について

周波数依存の減衰特性をもつ通信路として自由空間通信路について、量子通信路容量と波長分割多重による離散化通信路容量の比較を行った。結果として、自由空間通信路においては、波長分割多重によりトータルの周波数帯域幅を狭めると、入力パワーによらず、通信路容量が急激に減少することがわかった。これはフラットな周波数特性をもつ減衰通信路とは定性的に異なる特性といえる。詳細は、以下の論文のほか、投稿中の論文等に示している。

大橋一葉, 太田征輝, 宇佐見庄五, 臼田毅, 量子減衰通信路における広帯域及び WDM による通信路容量の比較, 第 34 回情報理論とその応用シンポジウム, pp. 483-487, 2011 年

(2) 最適な量子一括復号による通信路行列公式の導出

①群共変的信号に対する通信路行列公式の完成

本研究で目指す, 現実的な (有限の符号長) 符号化・復号化による量子通信の特性を詳細に調べることに對し, 通信路行列の計算が計算量的に困難であることは, 大きな問題であった. 特に, いわゆる SRM (Square-root Measurement) を最適とする群共変的信号に対する通信路行列を効率的に計算することが重要である. このため, 我々は先行研究において通信路行列公式の開発を進めてきたが, これまでの成果ではレター状態が素数元でなければならないという制約があった. 本研究においては, 10 年来の課題であった, 任意の群共変的信号 (ただし, 狭義の定義に基づく) に対する通信路行列公式を完成させることに成功した. 今後, 広義の群共変に関する考察や公式の適用研究など, 新たなステップに進むことができる. 詳細は, 以下の論文等に示している.

T. S. Usuda and K. Shiromoto, Analytical expression of  $s$ -th power of Gram matrix for group covariant signals and its application, AIP Conference Proceedings Vol.1363, T. Ralph and P.K. Lam (Eds.), American Institute of Physics, New York, pp. 97-100, 2011 年  
DOI: 10.1063/1.3630156

②整数環上の任意の線形符号による量子信号系の通信路行列公式

①で開発した公式について, 整数 (剰余) 環上の線形符号の構造を考慮し, より具体的な公式を明らかにした. これにより, 通信路行列公式を整数環上の任意の線形符号による量子信号系に直ちに適用可能となった. 詳細は, 以下の論文等に示している.

太田征輝, 城本啓介, 臼田毅, 整数環上の任意の線形符号による量子信号系の通信路行列の解析解, 電子情報通信学会論文誌 (B), vol. J95-B, no. 2, pp.110-118, 2012 年

③最適な量子一括復号による通信路行列公式のさらなる一般化に向けた検討

本研究で開発した通信路行列公式適用に際し, PSK 変調と拡大体上の線形符号の相性が悪いことが判明した. したがって, プロジェクト終了後の展開も見越して, より広義の群共変的信号として  $(G, \chi)$ -共変的量子信号

を定義し, その必要十分条件を明らかにした. 詳細は, 以下の論文のほか, 投稿中の論文等に示している.

石川喜啓, 太田征輝, 城本啓介, 臼田毅,  $(G, \chi)$ -共変的量子信号とその必要十分条件 第 34 回情報理論とその応用シンポジウム, pp. 216-221, 2011 年

(3) 線形符号による相互情報量の詳細特性

①拡大体上と整数環上の符号により符号化された量子信号の相互情報量特性の比較

(2)で示した公式を適用するためには, 符号化された量子信号が群共変的であることが必要である. 実際的な 2 のべき乗元の符号として, 拡大体上の符号が現在広く使用されているが, この拡大体上の符号は, 符号化前の量子信号が群共変的な PSK 信号であっても, 群共変でない場合があることがわかった. また, 拡大体上と整数環上の符号により符号化された量子信号の相互情報量の特性を比較し, 整数環上の符号が量子通信においては優れている例を示した. 詳細は, 以下の論文等に示している.

M. Ota, H. Kumazawa, K. Shiromoto, and T. S. Usuda, Formula of channel matrix for coded quantum signals by classical linear codes over  $Z_m$ , Proceedings of ISITA2010, pp. 1035-1040, 2010 年  
DOI: 10.1109/ISITA.2010.5649495

②整数環上の符号による相互情報量の詳細特性

現在広く使用されている拡大体上の符号にはない, 整数環上の線形符号の特徴は, 線形符号が非自由加群となっているときに表れることが期待される. このため, 非自由加群を含む整数環上の線形符号と PSK 変調の組み合わせによる相互情報量の特性を詳細に調査した. 結果として, 特に平均光子数が小さいとき, 非自由加群が優位である場合があることが明らかとなった. また, 2 元線形符号による相互情報量が, 符号語のハミング重みによって決まっていたのに対し, 整数環上の線形符号の場合は, リー重みが同じでも符号を構成する符号語のタイプが異なれば, 相互情報量特性が異なることを例示した. 詳細は, 以下の論文等に示している.

M. Ota, K. Shiromoto, and T. S. Usuda, Application of formula of channel matrix for quantum signals coded by linear codes over the ring of integers, Proceedings of AQIS2011, pp. 155-156, 2011 年

太田征輝, 城本啓介, 臼田毅, 整数環上の様々な線形符号による相互情報量の特性, 第 34 回情報理論とその応用シンポジウム, pp. 160-165, 2011 年

#### (4) その他の成果

##### ① スクイズド光の利用によるデジタル変調・符号化の効率化

量子減衰通信路の通信路容量は、MIT の成果に示されるとおり減衰率によらずコヒーレント状態で達成される。したがって、減衰が非常に少ない場合や究極的には無雑音通信路であっても、コヒーレント状態によって通信路容量が達成されることがわかっていた。しかし、それは連続変調、符号長無限大の極限で達成されるものであるともいえる。このため、無雑音通信路の場合について、スクイズド状態とコヒーレント状態による通信路容量を比較した。その結果、スクイズド状態による通信路容量がコヒーレント状態による通信路容量よりも大きく、スクイズド状態はより少ない信号数で連続変調に近いパフォーマンスを示すこと、また、平均光子数によってはスクイズド状態とホモダイン受信機（古典最適受信機と位置づけられる）の組み合わせの方がコヒーレント状態と量子最適受信機（一括復号）の組み合わせよりもパフォーマンスが高くなる場合があることがわかった。このように、条件によっては、スクイズド状態の使用によって、信号数や符号長を節約できることがわかった。詳細は、以下の論文等に示している。

浅見侑太, 服部友輔, 佐原僚介, 臼田毅,  
3ASK 信号に対するスクイズド状態とコヒーレント状態の通信路容量の比較,  
電気学会論文誌 (C), vol.130, no.1,  
pp.154-155, 2010 年

##### ② 混合量子状態の量子最適検出

本研究の大部分では純粋状態を扱ってきた。コヒーレント状態は減衰しても純粋状態のままであるので、純粋状態だけでかなりのことがわかるが、①に示したように、非古典的状态の方がコヒーレント状態よりも有効な場合もある。例えば、符号長が非常に長い符号語状態の量子一括復号の実現よりも、スクイズド光の生成の方が現実的な場合もあるかもしれない。さらに、本研究で扱った減衰通信路は、かなり理想的な状況に対応し、さまざまな揺らぎ等に基づく付加雑音が加わった場合がより現実的であるとも言える。その場合、通信路入力がたとえコヒーレント状態でも、受信量子状態は混合状態となり得る。したがって、混合量子状態の量子最適検出についても研究を進めた。主な成果として、自己対称な混合状態の最適検出の導出が挙げられる。詳細は、以下の論文等に示している。

K. Nakahira and T. S. Usuda, Minimum-error discrimination between self-symmetric

mixed quantum state signals, IEEE Transactions on Information Theory, vol.58, no.2, pp.1215-1222, 2012 年  
DOI: 10.1109/TIT.2011.2170954

以上、主な研究成果を研究項目ごとにまとめて記してきた。本研究は、これまでの研究代表者らの取り組みを継続し、将来の量子通信実用化へのステップとして、必要な工学的考察を行ったものであるが、世界で類似の研究はまだまだ少ないようである。情報通信の研究者の多くは依然として量子力学の敷居を高いと考えているようであり、量子情報技術の研究者は理学者がほとんどであることは、なかなか変わらないようである。以前よりは情報通信の研究者も増えたが、量子テレポーテーションのような“量子情報”を取り扱う研究を扱う研究者が多く、本研究で取り扱っているような、“古典情報”を量子状態によって伝送するタイプの量子情報理論を取り扱う研究者は比較的少ないなど、取り組まれている問題には偏りがあるように思われる。我々は、その両方を扱っているが、研究が少ないことと、近未来の技術基盤を確立するためには、むしろ“古典情報”タイプが重要と考えられることから、本研究で取り扱った内容をメインテーマとしている。このような状況から、我々に課せられた役割が大きいと考え、量子情報理論が、超高信頼度通信の実現という形で、技術化されるため、符号化、変調、多重化といった問題に今後も正面から取り組んでいくこととしたい。

#### 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 16 件)

- ① K. Nakahira and T. S. Usuda、Minimum-error discrimination between self-symmetric mixed quantum state signals、IEEE Transactions on Information Theory、vol.58, no.2、pp.1215-1222、2012 年、査読有。  
DOI: 10.1109/TIT.2011.2170954
- ② 太田征輝, 城本啓介, 臼田毅、整数環上の任意の線形符号による量子信号系の通信路行列の解析解、電子情報通信学会論文誌 (B)、vol. J95-B, no.2, pp.110-118、2012 年、査読有。
- ③ T. S. Usuda and K. Shiromoto、Analytical expression of s-th power of Gram matrix for group covariant signals and its application、Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC)、AIP Conference Proceedings Vol.1363、T.

Ralph and P.K. Lam (Eds.), American Institute of Physics, New York, pp. 97-100, 2011年、査読有.

- DOI: 10.1063/1.3630156
- ④ M. Ota, K. Shiromoto, and T.S. Usuda, Application of formula of channel matrix for quantum signals coded by linear codes over the ring of integers, 11th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2011), Busan, Korea, Proceedings of AQIS2011, pp.155-156, 2011年、査読有.
  - ⑤ M. Ota, H. Kumazawa, K. Shiromoto, and T.S. Usuda, Formula of channel matrix for coded quantum signals by classical linear codes over  $Z_m$ , 2010 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA2010), Taichung, Taiwan, Proceedings of ISITA2010, pp.1035-1040, 2010年、査読有.  
DOI: 10.1109/ISITA.2010.5649495
  - ⑥ Y. Takamura, S. Usami, and T.S. Usuda, On attainment of the capacity of broadband quantum channel by wavelength division multiplexing, 2010 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA2010), Taichung, Taiwan, Proceedings of ISITA2010, pp.1045-1049, 2010年、査読有.  
DOI: 10.1109/ISITA.2010.5649485
  - ⑦ 浅見侑太, 服部友輔, 佐原僚介, 臼田毅, 3ASK信号に対するスクイーズド状態とコヒーレント状態の通信路容量の比較、電気学会論文誌(C)、vol.130, no.1、pp.154-155、2010年、査読有.

[学会発表] (計 38 件)

- ① 大橋一葉, 太田征輝, 宇佐見庄五, 臼田毅, 量子減衰通信路における広帯域及びWDMによる通信路容量の比較、第34回情報理論とその応用シンポジウム、岩手鷺宿、pp.483-487、2011年12月2日.
- ② 太田征輝, 城本啓介, 臼田毅, 整数環上の様々な線形符号による相互情報量の特徴、第34回情報理論とその応用シンポジウム、岩手鷺宿、pp.160-165、2011年12月2日.
- ③ 石川喜啓, 太田征輝, 城本啓介, 臼田毅,  $(G, \chi)$ -共変的量子信号とその必要十分条件、第34回情報理論とその応用シンポジウム、岩手鷺宿、pp.216-221、2011年11月30日.
- ④ 中平健治, 臼田毅, 加藤研太郎, 幾何学的に一樣な信号系における Inconclusive 量子最適測定に関する検討、第34回情報

理論とその応用シンポジウム、岩手鷺宿、pp.222-227、2011年11月30日.

- ⑤ 石川喜啓, 太田征輝, 臼田毅, 拡大体上の符号による量子信号系の群共変性について、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会、講演論文集、B3-3、2011年9月27日.
- ⑥ 大橋一葉, 高村祥夫, 太田征輝, 宇佐見庄五, 臼田毅, 広帯域通信路容量と波長分割多重による通信路容量とのギャップ、平成23年度電気関係学会東海支部連合大会、講演論文集、B3-4、2011年9月27日.
- ⑦ 田征輝, 城本啓介, 臼田毅, 整数環上の任意の線形符号による量子信号系の通信路行列公式、第33回情報理論とその応用シンポジウム、信州松代、pp.512-517、2010年12月2日.
- ⑧ 太田征輝, 熊澤秀幸, 臼田毅,  $Z_m$  と  $F_m$  上の線形符号で構成される量子信号系の相互情報量比較、平成22年度電気関係学会東海支部連合大会、講演論文集、L1-5、2010年8月30日.
- ⑨ T.S. Usuda and K. Shiromoto, Analytical expression of  $s$ -th power of Gram matrix for group covariant signals and its application, The Tenth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computation (QCMC2010), Abstracts of Papers of QCMC2010, pp.256, P3-27, 2010年7月22日.
- ⑩ 高村祥夫, 佐原僚介, 宇佐見庄五, 臼田毅, 波長分割多重による広帯域量子通信路容量の達成可能性の検討、平成21年度電気関係学会東海支部連合大会、講演論文集、0-455、2009年9月11日.
- ⑪ 太田征輝, 佐原僚介, 宇佐見庄五, 臼田毅, 拡大体量子信号に対する相互情報量導出の簡略化の検討、平成21年度電気関係学会東海支部連合大会、講演論文集、0-457、2009年9月11日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

臼田 毅 (USUDA TSUYOSHI)

愛知県立大学・情報科学部・准教授

研究者番号: 80273308