

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26820147

研究課題名(和文)空間変調を用いて、与干渉成分を抑制し、かつ周波数利用効率の高い無線通信の実現

研究課題名(英文)Spatial Modulation based High-Efficient Wireless Communications

研究代表者

石井 光治 (Koji, Ishii)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：50403770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、1)個々の送信機が簡素である、2)低速、低遅延な通信が要求される、3)従来の通信と比べて非常に多くの数の機器が同時に通信を行う、という条件下において、いかに効率的な通信を行うのかを検討した。詳細は以下である。(1)全二重通信を実装し、それらの利点、欠点を実験的に示した。(2)空間変調を用いて、超多端末マルチプルアクセス技術を構築した。(3)空間変調を用いた全二重通信の発展として、複数の端末が協力する協力通信技術を構築し、その協調通信プロトコルを設計した。(4)アンプ効率を考慮した空間変調として、空間変調を一般化空間変調へと拡張し誤り訂正符号と統合的に設計し、電力利用効率を改善した。

研究成果の概要(英文)：This study has proposed how to construct high-efficient wireless communications based on spatial modulation under the constraints of 1) simple device construction 2) low-rate and low-latency communications 3) a massive number of transmitter wishes to simultaneously transmit to the common receiver. Our contributions of this work are as follows, (1) We have implemented the full-duplex wireless communication and provided its advantages and disadvantages. (2) We have provided the space-time code division multiple access based on spatial modulation. (3) We have provided full-duplex cooperative transmission protocol based on spatial modulation. (4) We have provided the integrated design for non-binary spatial modulation and error correcting code considering the efficiency of amplifiers.

研究分野：無線通信

キーワード：空間変調 超多数マルチプルアクセス 非二元空間変調 全二重通信型協調通信

1. 研究開始当初の背景

M2M(Machine to Machine)通信ではすべてのモノに通信装置がつくため、携帯電話端末に比べ非常に多くの通信装置が同じ空間(通信範囲内)に混在し、同時かつ自律分散的に通信を行う。また、個々の通信装置が低コスト(簡素)であることが求められる、個々の通信ペアは低速、低遅延で通信する、という特徴を持つ。M2Mを実現する上で、i)自律分散的制御により、いかに局所的に通信を集中させないか、もしくは、ii)局所的に集まった通信機器にいかに同時に通信させるか、が重要である。

2. 研究の目的

本研究は「局所的に集まった通信機器にいかに同時に通信させるか」という課題を克服するため、各通信ペアが自身の通信のみを考えて(自己中心的に)通信するのではなく、他の通信ペアに与える干渉(与干渉)を配慮した通信の実現を目指す。具体的に、他の通信機へ与える干渉成分を抑制し、かつ周波数利用効率の高い通信を簡素な機器構成で実現する。

3. 研究の方法

本研究は簡素な通信機器(構成)を用いるという制約条件下において、他へ与える干渉を抑制し、かつ周波数/電力利用効率の高い通信を実現するため、(1)空間変調を用いた全二重通信の研究、(2)アンプ性能を考慮した空間変調、位相振幅変調の最適化、(3)空間変調を用いた全二重通信型協力通信プロトコルの研究、(4)USRPを用いた実装、実環境における特性評価、の4テーマに分類して遂行する。1年目に課題(1)、(2)に関する研究を主に遂行し、同時に課題(1)に関しては有線系、USRP2を用いて実装実験評価を行う。2年目以降では課題(1)を拡張し、課題(3)全二重通信型協力通信に関する研究を行う。また、USRP2の台数を増やして提案する協力通信を実装し、実環境における提案システムの評価を行う。

4. 研究成果

(1)空間変調を利用した全二重通信型協調通信

本研究では、空間変調を用いた全二重通信を提案し、その一つの応用として協力通信を用いた場合の効果を示した。近年 MIMO 技術の一つとして空間変調が提案され、通信機器の簡素化、周波数/電力利用効率などの面から非常に注目されている。空間変調では、複数本の送信アンテナから1本(または複数本)を選び送信し、受信側ではチャンネル情報を用いて、どのアンテナから送信されたかを推定する技術である。予め定めたマッピングルールに則り、送受信を行うことで通信機器の複雑化を抑えつつ、効率的に情報を伝送できる利点がある。本研究では、空間変調で選ばれ

なかったアンテナ素子に着目し、そのアンテナ素子を受信アンテナとして利用することで、送受信を同時に行う全二重通信を実現させる。これにより、アンテナリソースを最大限利用し、通信のさらなる効率化を図る。また、この技術の応用例として、リレーノードが空間変調を用いた全二重通信で機能する場合の協力通信プロトコルを設計し、その特性を示した。

アンテナ本数が任意の場合における空間変調を用いた全二重通信に関して述べる。いま、送受信機が N 本のアンテナを持ち、1本のアンテナを選択する空間変調を用いると仮定する。また、 M 値位相振幅変調を併用するとする。これにより、送信機は $\log_2 M + \log_2 N$ の切り捨て整数 [bit/sym] の伝送を行う。 N または M が 2 のべき乗でない場合や GSM(Generalized Spatial Modulation) (送信アンテナを1本でなく、複数本選択することも含めた、より一般的な空間変調)を利用する場合は、そのポテンシャルを引き出すために誤り訂正符号などを有効に活用する必要があるため、本稿では議論の対象としない。よって伝送レートは $\log_2 M + \log_2 N$ [bit/sym] となる。つまり、送受信機は 2 のべき乗である N 本のアンテナのうち 1 本を送信アンテナとして使用し、 $N-1$ 本のアンテナを受信アンテナとして使用する。図 1 に送受信アンテナ本数(N)を 4 とした場合の送受信機構成を示す。すべてのアンテナ素子間の到来遅延時間、チャンネル特性(パスロス含む)を予め用意し($N-1$)個の自己干渉キャンセラが必要となる。また、送信 RF 回路と自己干渉キャンセラを含む受信 RF 回路を、送信情報により切り替えるためのスイッチング回路が必要である。

本システムの興味深い点として、送受信アンテナの振り分け本数により、送信レートと受信特性にトレードオフ関係が存在する。具体的には送信アンテナ本数を増やす($N/2$ まで)と空間変調による送信レートが向上するが、使用できる受信アンテナ本数が減少することで受信アンテナダイバーシティ利得が減少し、受信特性が劣化する。

アンテナの振り分け本数により、送信レートとリレー通信システムを示す。半二重通信プロトコルと最も異なる点は、リレーノードが全二重通信で機能することで、システム全体のリソースを常に最大限利用できる点である。ソースノードとリレーノードが各タイムスロットにおける送信信号を示す。ソースノードはリレーノードの送信状態にかかわらず、常に自身の情報をリレーノードと宛先ノードにブロードキャストする。いま M を送信ノードで用いる IQ 信号の変調レベルとする(例えば、 $M=4$ であれば QPSK)。このときの 1 タイムスロット内で伝送できる情報ビット(伝送レート)は $R = \log_2 M$ [bit/time-slot] となる。送信シンボル S は M -QAM 信号に変換され、送信信号 x^s は

送信される。リレーノードでの受信信号は、1) リレーノードが 1 時点前の受信に失敗した場合(と最初のタイムスロットの場合)と、2) リレーノードが 1 時点前のソースノードからの受信に成功し、情報を転送している場合、で異なる。以下、時点 t におけるリレーノードの受信信号と宛先ノードの受信信号を場合分けして説明する。1) リレーノードが前時点($t-1$)の受信に失敗した場合、現時点 t においてリレーノードは情報を転送しないため、すべて(N 本)のアンテナを受信アンテナとして利用するため、受信信号は以下で与えられる。

$$\begin{bmatrix} y_{r_1}(t) \\ y_{r_2}(t) \\ \vdots \\ y_{r_N}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{sr_1}(t) \\ h_{sr_2}(t) \\ \vdots \\ h_{sr_N}(t) \end{bmatrix} x_s^F(t) + \begin{bmatrix} n_{r_1}(t) \\ n_{r_2}(t) \\ \vdots \\ n_{r_N}(t) \end{bmatrix}.$$

また、宛先ノードでは送信ノードからの情報のみを受信する。

$$y_{sd}(t) = h_{sd}x_s^F(t) + n_d(t)$$

このとき、リレーノードはオーダ N のダイバーシティ利得が得られる。次に 2) リレーノードが前時点($t-1$)の受信に成功し、情報を転送する場合について述べる。リレーノードは N 本のアンテナから 1 本の送信アンテナを選ぶ空間変調を用いるため、空間領域の変調(SSK:Space-Shift Keying)により $R_{SSK} = \log_2 N$ ビットを伝送し、位相振幅変調を用いて $R_{IQ} = \log_2 M_{IQ}$ ビットを伝送する。つまり、 $R = R_{SSK} + R_{IQ}$ [bit/sym] で伝送する。本方式の特徴として、ソースノードが変調多値数の大きな変調を用いたとしても、リレーノードでは空間領域の変調が利用できるため、ソースノードより変調多値数の小さい位相振幅領域の変調を利用することができる。リレーノードが k 番目のアンテナを選択して送信する場合、リレーノードにおける受信信号は以下となる。

$$\begin{bmatrix} y_{r_1}(t) \\ \vdots \\ y_{r_{k-1}}(t) \\ y_{r_k}(t) \\ y_{r_{k+1}}(t) \\ \vdots \\ y_{r_N}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{sr_1}(t) \\ \vdots \\ h_{sr_{k-1}}(t) \\ h_{sr_k}(t) \\ h_{sr_{k+1}}(t) \\ \vdots \\ h_{sr_N}(t) \end{bmatrix} x_s^F(t) + \begin{bmatrix} n_{r_1}(t) \\ \vdots \\ n_{r_{k-1}}(t) \\ n_{r_k}(t) \\ n_{r_{k+1}}(t) \\ \vdots \\ n_{r_N}(t) \end{bmatrix}$$

よって、リレーノードではオーダ $(N-1)$ のダイバーシティ利得となる。また、上式では送信アンテナ k から送信された信号成分は理想的に除去可能と仮定し、除去後の信号であることに注意されたい。宛先ノードの受信信号は、送信ノードからの信号とリレーノードからの信号とが合成されて受信するため、以下となる。

$$y_{sd}(t) = h_{sd}x_s^F(t) + \begin{bmatrix} h_{sr_1}(t) \\ \vdots \\ h_{sr_N}(t) \end{bmatrix}^T \mathbf{x}_r^F(t) + n_d(t).$$

これらを受信側ではビタビ復号で復号する。

計算機シミュレーションを用いてビット誤り率(BER 特性)を評価する。提案する空間変調を用いた全二重通信型協力通信と従来方式として時空間符号を用いた半二重通信型協力通信プロトコルとを比較する。半二重通信と全二重通信とを比較する上で、各ノードの A) 送信レートと B) 送信電力をそれぞれの方式により変化させることで正当(送信レート、消費電力を等しい条件)な評価/比較を行う。半二重通信型協力通信プロトコルでは、全二重通信型協力通信プロトコルに比べ、各ノードが半分の時間のみ動作する。そのため、半二重通信型協力通信プロトコルの送信レートは全二重通信型協力通信のそれと比べて、倍にする必要がある。例えば、全二重通信型協力通信プロトコルの送信ノードが $16(=2^4)$ QAM 信号を用いている場合は、伝送レートを等しくするという観点より、半二重通信型協力通信プロトコルの送信ノードは $256(=2^8)$ QAM 信号を用いる。また、消費電力の観点から両システムを比較する場合、半二重通信型協力通信プロトコルは全二重通信型協力通信プロトコルに比べ半分の時間しか稼働していないため、倍の電力を利用することで消費電力を等しくする。以下の評価では、横軸に全二重通信型協力通信プロトコルにおける送信ノードから宛先ノードまでの受信信号対雑音比(SNR)を用いる。リレーノードが 2 本のアンテナを持っている場合空間変調を用いた全二重通信では、リレーノードは転送している場合は 1 本のアンテナで受信する。ただし、1 時点前の受信に失敗した場合は送信にアンテナを必要としないため、2 本で受信する。以下の評価では、1

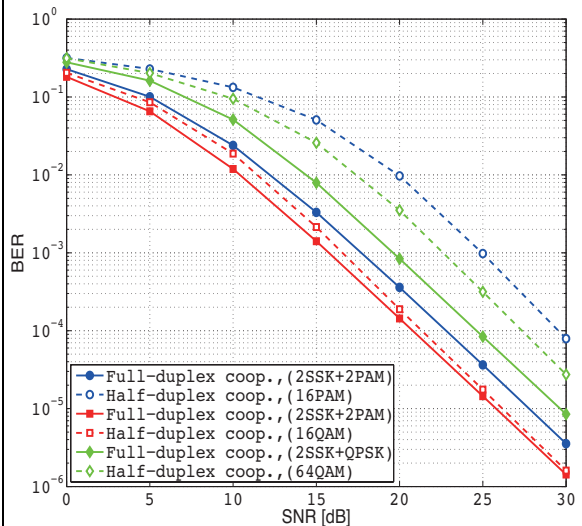


図 1 リレーが 2 本のアンテナを持つ場合の BER 特性

タイムスロットあたりの伝送ビット数を伝送レートと定義する。半二重伝送の場合は全二重通信に比べ倍の伝送レートが必要となる。そのためリレーノードにおける受信信頼度は、半二重伝送では変調多値数を全二重通信に比べ倍の信号を倍の電力で送信し、複数

本のアンテナで受信した場合と変調多値数が伝送レートと同等で1本のアンテナで受信した場合と同等となる。送信ノード、リレーノードがそれぞれ1次元変調信号(具体的にはPAM信号)を用いる場合を比較する。伝送レートを2 [bit/time-slot]とすると、全二重通信型協力通信における送信ノードは4PAM信号を用いて自身の情報をブロードキャストし、リレーノードは2PAMと2SSKを用いて転送する。一方、半二重通信型協力通信では送信ノードは16PAM信号を用いて自身の信号をブロードキャストし、リレーノードは16PAM-2STCで情報を転送する。図1より、全二重通信協力通信はBER=10⁻³の領域で約7.5 [dB] 特性を改善する。次に直行位相成分(複素振幅信号)を用いた場合を評価する。先と同じ2 [bit/time-slot] の伝送レートを用いると、全二重通信型協力通信における送信ノードは4QAM(PSK)信号を用いて自身の情報をブロードキャストし、リレーノードは2PAM(BPSK)と2SSKを用いて転送する。一方、半二重通信型協力通信では送信ノードは16QAM信号を用いて自身の信号をブロードキャストし、リレーノードは16QAM-2STCで情報を転送する。図1より、両方式の特性差は小さくなるが、提案する空間変調を用いた全二重通信型協力通信の方が特性が良い。注意されたいのは、半二重通信型協力通信の方がリレーノード、宛先ノードにおいてダイバーシティオーダが高いが(理論的には、リレーノードではダイバーシティオーダは2であり、宛先ノードでは3となる)、評価しているSNR領域では十分にダイバーシティ利得が得られていない。そのため、高SNR領域では特性が逆転すると予想される。また、特性差が小さくなった理由は、全二重通信型協力通信のリレーノードにおいて、位相振幅変調が同相成分の信号のみ(BPSK)を用いているためである。次に全二重通信型協力通信のリレーノードがIQ成分を利用できる場合の特性を評価する。伝送レートを3 [bit/time-slot]とすると、全二重通信型協力通信における送信ノードは8PSK信号を用いて自身の情報をブロードキャストし、リレーノードは4QAMと2SSKを用いて転送する。一方、半二重通信型協力通信では送信ノードは64QAM信号を用いて自身の信号をブロードキャストし、リレーノードは64QAM-2STCで情報を転送する。図1より、全二重通信協力通信はBER=10⁻³の領域で約3 dB特性を改善する。

(2) 空間変調に基づく時空間符号分割多元接続による超多数同時通信

本研究では、空間変調技術を用いた符号分割多元接続を提案した。空間変調とは、入力情報を空間領域に割り当てることで伝送レートの向上を図る技術である。本研究では、空間変調を多元接続に応用し、信号を空間領域に拡散するための符号生成に用いる。さらに、従来のスペクトル拡散符号を組み合わせ

ることで時空間領域の符号を形成し、従来の時間領域の符号のみを用いる場合と比較して、同時接続端末数増加による特性劣化を抑えることが可能であることを示す。また、提案する時空間符号分割多元接続の個々の送信端末は1つのRF回路で実装可能であるため、各送信端末の機器構成を複雑化しない。以下では、提案方式の最適な符号構成について、理論解析と計算機シミュレーションにより評価する。さらに、従来の多元接続方式と比べて多数の端末で優れた特性を達成できることを示す。

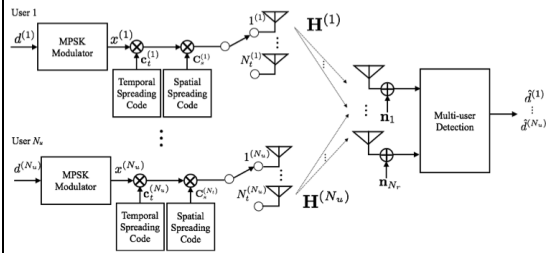


図 2 ST-CDMA システム

Nu個の全ての送信端末が同一時刻、同一周波数で共通の受信機に信号を送る場合を想定する。各送信端末はNt本の送信アンテナを具備し、受信機はNr本の受信アンテナを具備する。従来の空間変調と同様に、各送信端末は1時点で1本の送信アンテナを動作させる。

次に、個々の送信端末の変調方法について説明する。送信端末uは長さm=log₂M [m bit]の送信情報d^{(u)}をM-PSK変調信号x^{(u)}に変調する。ここで、E[|x^{(u)}|^2]=1とする。その後、x^{(u)}は時間拡散符号c_t^{(u)}_{t}によって次式のように符号化される。

$$\mathbf{x}_t^{(u)} = x^{(u)} \mathbf{c}_t^{(u)}$$

C_t^{(u)}は時間領域で信号を拡散する符号であり、本稿では時間拡散符号と呼ぶ。Lは拡散符号の符号長である。従来のCDMAと同様に、時間拡散符号はウォルシュ系列等の直交符号を用いる場合に最も良い特性が得られる。さらに、時間領域に拡散された信号x_t^{(u)}は空間拡散符号c_s^{(u)}_{s}によって次式のように時空間領域信号に符号化される。

$$\mathbf{X}^{(u)} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_t^{(u)} & \mathbf{x}_t^{(u)} & \dots & \mathbf{x}_t^{(u)} \end{bmatrix}^T \circ \mathbf{C}_s^{(u)}$$

C_s^{(u)}は次式で表される。

$$\mathbf{C}_s^{(u)} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_s^{(u)}(1) & \dots & \mathbf{c}_s^{(u)}(l) & \dots & \mathbf{c}_s^{(u)}(L) \end{bmatrix}$$

C_s^{(u)}の1列目c_s^{(u)}(1)は次式で表され、ただ1つの要素が`1'であり、残りの要素は全て`0'である。

$$\mathbf{c}_s^{(u)}(l) = [0 \ \cdots \ 1 \ \cdots \ 0]^T \in \{0, 1\}^{N_t \times 1}$$

時空間拡散符号によって符号化された後、全ての送信端末は信号を同時に送信し、受信側では次式に示す受信信号が得られる。

$$\mathbf{Y} = \sum_{u=1}^{N_u} \mathbf{H}^{(u)} \mathbf{X}^{(u)} + \mathbf{N}$$

受信側では最尤復号を用いて復号する。従来の時間領域の拡散符号のみを用いた CDMA との比較を行う。公平な比較のため、提案方式同様に CDMA に送信アンテナ 2 本を搭載し 1 つの RF 回路を用いるとする。ここで、CDMA の時間領域の符号はウォルシュ系列を用いる。また、送信ダイバーシティ効果を得るため、単純なアンテナスイッチング（空間拡散符号 $\mathbf{C}_s = [1212]$ ）を適用し、2 本の送信アンテナを交互に切り替える。復調方法として、最尤推定を用いる。ここで、両方式の伝送レートは同じである。

図 3 に ST-CDMA と CDMA の ABER 特性を比較した結果を示す。参考のため、 $N_t=1$ の場合の CDMA の ABER 特性も示す。CDMA は送信アンテナを 2 本搭載することにより送信ダイバーシティ利得が得られるため、 $N_u=1$ では ST-CDMA と同等な結果が得られる。ただし従来の CDMA は、マルチユーザー環境下において、各端末が直交した符号を用いた場合でも、アンテナスイッチングによりその直交性が崩れることに注意されたい。2 つの方式を比較すると、 $N_u=3$ の場合の特性の差は少ないが、 $N_u=12$ の場合は従来の CDMA に比べて提案する ST-CDMA は良い特性を達成できる。これは、提案方式は従来の CDMA に比べて多くの異なる符号（の組み合わせ）を生成できるためである。符号長 $L=4$ の場合、従来の時間領域の CDMA の符号の種類は 4 種類であるのに対して、提案方式では 12 種類の異なる符号の組み合わせが生成できる。

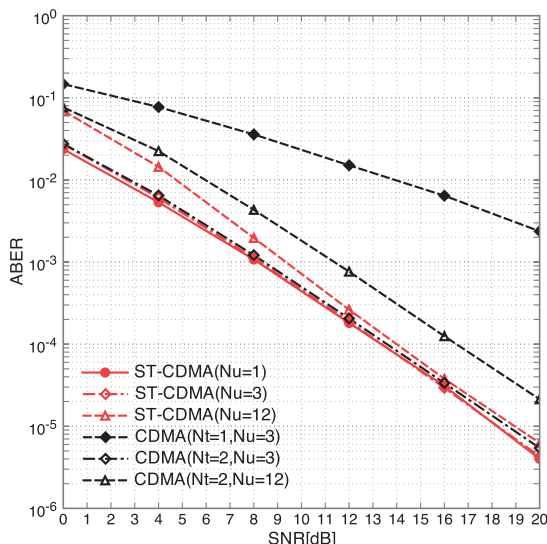


図 3 ST-CDMA の特性比較評価

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 5 件）

- ① 大西 健太、石井 光治、合意形成における送信電力制御に関する検討、システム制御情報学会論文誌、査読有、30 巻、4 号、2017、122-127、DOI: <https://doi.org/10.5687/iscie.30.122>
- ② 福間 恵、石井 光治、空間変調に基づく時空間富豪分割多元接続、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、J100-B、4 号、335-343、DOI: [10.14923/transcomj.2016JBP3058](https://doi.org/10.14923/transcomj.2016JBP3058)
- ③ K. Ishii, Y. Li, B. Vucetic, Y. Peng, Distributed Soft-Input Soft-Output Coding for Two-Way Wireless Relay Networks、2015、IEEE Wireless Communications Letters、4 巻、6 号、657 - 660、DOI: [10.1109/LWC.2015.2479227](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2479227)
- ④ 橋下 樹明、石井 光治、XOR 符号化空間変調、電子情報通信学会 B、J98-B、11 号、1193-1201、2015
- ⑤ S. Hashimoto, K. Ishii, Non-binary Turbo Coded Spatial Modulation over Peak Power Limited Channel, Journal of Signal Processing、19 巻、6 号、2015、235-242、DOI: [http://doi.org/10.2299/jsp.19.235](https://doi.org/10.2299/jsp.19.235)

〔学会発表〕（計 33 件）

- ① 大西健太、石井光治、セクタアンテナを用いた合意形成の一検討、電子情報通信学会総合大会、査読無、2017.3
- ② 柰本賢太、石井光治、予測値に基づく優先プラントの選択方法に関する一検討電子情報通信学会総合大会、査読無、2017.3
- ③ Yuki Nomura, Koji Ishii、Scanning Method for Wireless Tomography with Compressed Sensing、RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing、査読有、2017.2
- ④ 野村有希、石井光治、ワイヤレストモグラフィのために最適な観測方法、電子情報通信学会高信頼性制御通信研究会、査読無、2016.12
- ⑤ 千田紘平、石井光治、制御品質に基づく可変長パケットを用いた適応分散電力制御、電子情報通信学会高信頼性制御通信研究会、査読無、2016.12

- ⑥ 忒本賢太、石井光治、電子情報通信学会高信頼性制御通信研究会、査読無、2016.12
- ⑦ 大西健太、石井光治、Slotted-Alohaに基づく合意形成のための呼生起確率制御の一検討、電子情報通信学会高信頼性制御通信研究会、査読無、2016.12
- ⑧ 中原寛大、石井光治、事象駆動型通信方式を用いた無線フィードバック制御、電気関係学会四国支部連合大会、査読無、2016.9
- ⑨ 山田美槻、石井光治、全二重 OFDM 伝送におけるアンテナ干渉除去性能の評価、電気関係学会四国支部連合大会、査読無、2016.9
- ⑩ Kenta Onishi、Koji Ishii、Average Consensus Problem based on Slotted-Aloha、電気関係学会四国支部連合大会、査読無、2016.9
- ⑪ Kenta Matsumoto、Koji. Ishii、Tolerance to the Number of Plants in Wireless Control based on TDM with Priority Control、電気関係学会四国支部連合大会、査読無、2016.9
- ⑫ Kohei Senda、Koji Ishii、Adaptive Distributed ON-OFF Control Based on Quality of Control Considering the Interference、電気関係学会四国支部連合大会、査読無、2016.9
- ⑬ Yuki Nomura、Koji Ishii、Optimum Scanning Method for Wireless Tomography、電気関係学会四国支部連合大会、査読無、2016.9
- ⑭ 大西 健太、石井 光治、合意形成における送信電力制御に関する検討、システム情報制御学会、査読無、2016.5
- ⑮ Kenta Onishi、Koji Ishii、Power Saving for Wireless Communication

in Multi-Agent Consensus Problem、RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing、査読有、2016.2

- ⑯ Kohei Senda、Koji Ishii、Distributed Power Control Strategy for Reliable Control Quality、RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing、査読有、2016.2

他 17 件

〔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

<http://www.ceda.kagawa-u.ac.jp/kudb/ser/vlet/RefOutController?exeB0=WR4100RB0&monitorID=WR4100S&workType=detail&primaryKey=1000026530&kyoinID=&gyosekiNendo=null&secondaryKey=&dummyKyoinID=>

6.

研究組織

(1) 研究代表者

石井 光治 (ISHII, Koji)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：50403770

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし