

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540035

研究課題名(和文) ソフトウェア無線・音響統合プラットフォームの開発と動画配信実験

研究課題名(英文) Development of Software Radio and Audio Platform and Video Delivery Experiment

研究代表者

甲藤 二郎 (Katto, Jiro)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70318765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究開発では、ソフトウェア無線とソフトウェア音響のプラットフォーム作成と評価実験を行なった。ソフトウェア無線に関してはGNU Radioを活用し、送信電力、変調方式、誤り訂正方式などを変化させながら計測実験を行ない、応用として音楽、静止画像、動画の無線伝送実験を行なった。ソフトウェア音響に関しては市販のスピーカとマイク、MATLABを使用し、同じく送信音量、変調方式、誤り訂正方式などを変化させて特性計測を行ない、音楽と静止画像の配信実験を行なった。ソフトウェア音響に関しては動画伝送までは至らなかったが、学会の評価は高く、2015年3月開催のIEEE WCNC 2015に採択された。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed platforms for software radio and software audio and carried out evaluation experiments. For software radio, we used GNU Radio, measured communication characteristics by changing transmission power, modulation and error correction, and tried wireless delivery of music, still images and motion pictures as its application. For software audio, we used commercial speakers, microphones and MATLAB, measured communication characteristics, and tried delivery of music and still images modulated over audio signals. Our software audio failed video transmission due to low data rates, but the results were paid attention and accepted by IEEE WCNC 2015 held in March, 2015.

研究分野：通信工学

キーワード：ソフトウェア無線 ソフトウェア音響 動画配信

1. 研究開始当初の背景

ACM Mobicom などの国際会議において、ソフトウェア無線を用いた研究が非常に活発であり、本件の申請年度には採択論文の約3割を占めていた。また、当時は音響通信の使い方も多岐に渡っており、先の Mobicom を始め、MobiSys、SenSys などの国際学会において、音響信号を用いた位置検出の検討が活発に進められていた。その一方で、ACM WUJNet などにおいては、海中センサーネットワークに関する議論が活発に行われており、水中では電波の減衰量が非常に大きいため、音響信号にデータを乗せる音響通信の開発が進められていた。申請者は当時、海中通信の研究に従事し、東京海洋大と共同の船上実験にも参加してきたが、水中環境は想像以上に劣悪で、データの送受信に頻繁に失敗する事象に対して原因を特定することがいつも困難だった。

2. 研究の目的

本研究開発では、無線通信と音響通信を統合的に扱えるソフトウェア無線・音響プラットフォームの開発を試みた。ソフトウェア無線については、GNU Radio を使用し、物理層のプログラミングとして、送信電力、変調方式、誤り訂正などを切り替え、基本的な通信特性を検証する。ソフトウェア音響については、市販のマイクとスピーカを利用し、MATLAB をソフトウェア開発環境として、ソフトウェア無線と同じく、送信音量、変調方式、誤り訂正などを切り替えた通信特性の検証を行なう。さらに、具体的な応用として動画配信を取り上げ、無線チャネル、音響チャネルそれぞれにおける動画配信実験を試みた。

3. 研究の方法

(1) ソフトウェア無線

GNU Radio と USRP

GNU Radio はソフトウェア無線のためのオープンソースライブラリであり、USRP (Universal Software Radio Peripheral) ボードとセットで使用され、ソフトウェア無線の開発プラットフォームを構築することができる。GNU Radio は豊富な GUI を備え、波形情報を様々な形で視覚・聴覚的に出力することが可能である。周波数・時間軸表示、コンスタレーション、ウォータフォール波形など、様々な形で出力することが可能である。

GNU Radio のアプリケーションは Python と C++ で実装されている。信号処理の詳細は C++ で記述され、Python スクリプトから各種の引数が C++ ライブラリに渡され、信号処理が実行される。また、C++ ファイルを引数として Python スクリプトを生成する SWIG と呼ばれるラッパが用意されている。

USRP は安価なソフトウェア無線用拡張ボードである。USRP にはマザーボード、FPGA、AD/DA コンバータ、デジタルアップ・ダウ

ンコンバータ等が搭載され、PC と USRP 間はギガビットイーサネットや USB によってデータがやり取りされる。

マザーボードには電波送受信の電子回路が集積され、マザーボード上部にはドーターボードが設置される。本研究開発で使用した USRP N200 には MIMO (Multiple Input Multiple Output) ポートが備えられており、複数の USRP と通信することが可能である。また外部からのクロック周波数参照も可能である。FPGA はデジタル信号処理、クロックタイミング、チップレート、ボーレート、タイムスロットの合成をシステムに提供する。

USRP には AD/DA 変換と、ソフトウェアで制御可能なダウンコンバータが搭載されている。間引きの最大レートは 512、最低レートは 32 であり、最大サンプリングレートは 3.125MS/s、最低サンプリングレートは 195.3125KS/s である。また USRP の出力電力は 15[dBm] (31.62mW) に設定されている。この電力はノートパソコンに内蔵されている無線 NIC とほぼ同等の出力電力である。

変調方式

本研究開発では複数の変調方式を用いて動画配信実験を行った。以下に使用した変調方式について説明する。

DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) は 2 相を利用する差動位相偏移変調である。位相の異なる複数の波の組合せで情報を表現するデジタル変調方式の一つであり、正弦波の絶対位相でシンボル伝送する位相変調 (PSK) とは異なり、一つ前に送られた波の位相を基準に次の波の位相を検出する。

GMSK (Gaussian filtered Minimum Shift Keying) は FSK (Frequency Shift Keying) の欠点である周波数帯域の非効率性を改良した変調方式であり、位相の時間微分にガウスフィルタをかけることで位相変化を緩やかにしている。第 2 世代携帯電話で広く使用されている GSM (Global System for Mobile Communications) の変調方式にも使用されている。

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) は送信信号を複数の直交サブキャリアに分け、干渉しない点でサブキャリアを隣接させることで、伝送効率を改善した変調方式である。Wi-Fi や LTE、地上波デジタルにも使用されている。OFDM にはガード・インターバルも挿入されているため、マルチパスの影響は小さくなる。ただし、周波数オフセットが弱点とされ、隣接サブキャリア間の直交性が崩れてキャリア間干渉を引き起こす場合がある。

実験内容

GNU Radio と USRP によってソフトウェア無線環境を構築し、上に説明した変調方式や送信電力、誤り訂正方式などを切り替えることで動画の配信実験を行った。動画の符号

化と復号は VLC (VideoLAN Client) を使用した。大学内の実験室に無線通信環境を構築し、複数の電波暗箱内に USRP とアンテナを設置し、暗箱間を同軸ケーブルで接続して無線通信実験を実施した。

(2) ソフトウェア音響

音響通信プラットフォーム

ソフトウェア音響を実現するために、市販の音響機器と PC で動作可能な音響通信環境を作成した。作成したプラットフォームの処理の流れを図 1 に示す。上半分のブロックは送信側の処理を、下半分のブロックは受信側の処理である。各ブロックは MATLAB を用いてソフトウェア記述を行い、変復調や通信路符号化、フィルタリング等を実行している。各ブロック出力を視覚化することも容易で、通信失敗時の問題検出が行いやすい。

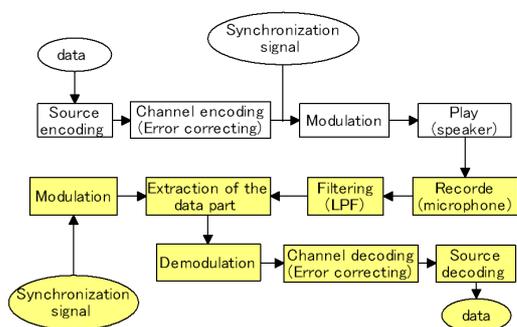


図 1: ソフトウェア音響プラットフォーム

MATLAB では、複数のアナログ変調とデジタル変調の関数が用意されている。アナログ変調の関数における被変調波はパスバンド表現で出力されるために、スピーカに入力される際に問題はないが、デジタル変調の関数における被変調波はベースバンド表現(複素エンベロープ)で出力され、そのままの形ではスピーカから再生することができない。そこで変調とパルス整形を組み合わせる必要がある。MATLAB では、誤り訂正符号も多数提供され、誤り訂正符号そのものに加え、生成多項式を作成する関数も提供されている。

一方、ソフトウェア音響通信プラットフォームを構築する際に、初めに送受信間のタイミング同期が必要となる。一般的には、送受信間で共通のユニークな同期信号を用意し、受信側では受信しながら、同期信号の検出を試みる。次に、同期信号を検出した後にデータ受信モードに切り替わり、データの受信を開始する。しかし、本プラットフォームでは、上記のようなリアルタイム動作は行わず、代わりに録音後に、録音信号と同期信号の相互相関値を計算し、相関値が最も高い部分を同期信号の始めとした。同期処理が正しく動作することを検証するために、4,000bit のデータを用意し、変調後、被変調波にノイズを加えることで疑似的に受信波を作成し、受信波と同期信号との相互相関を計算した。なお、ノイズは被変調波よりも大きいものを作成

し、ノイズが支配的な劣悪な環境を想定した。同期信号と送信データの生成から変調、ノイズ付加、同期検出に至る処理の一例を図 2 に示す。

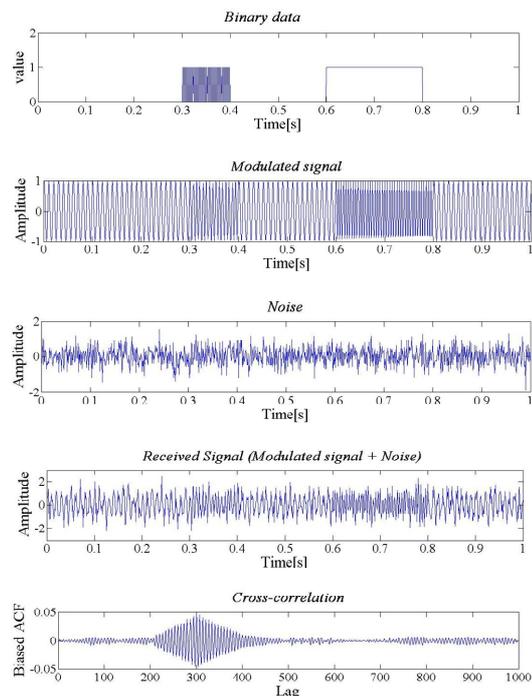


図 2: 信号生成から同期回復までの処理例

実験内容

大学の研究室内に PC と市販のスピーカ、マイクロフォンによってソフトウェア音響通信環境を構築し、MATLAB によって信号生成から変復調、同期回復までを行い、音響通信実験を行った。

4. 研究成果

(1) ソフトウェア無線

無線通信実験

実験では、まず送信側の VLC (サーバモード) がパケットを生成して GNU Radio に渡す。パケットサイズは 188Byte のトランスポートストリームである。GNU Radio は変調を行い、UHD の API を使用して USRP にデータを送る。PC からギガビットイーサネットを通じてデータを受け取った USRP は FPGA を用いてデータをアップコンバートし、DA 変換を行い、ドーターボードでベースバンドから RF 帯にデータを乗せ、電波を VERT2450 アンテナを通じて発信する。電波を受信した受信機は逆の要領でデータを受信し、待ち受ける VLC にデータを渡し、リアルタイムで再生を行った。無線の中心周波数は 2.4GHz とし、GNU Radio のパケットサイズは 1472Byte、受信ゲインを 1dB に固定し、送信ゲインを 1-30dB の間で変化させた。

実験環境を図 3 に示す。サーバ、クライアント共に OS は Ubuntu 12.04 LTS を使用した。USRP はサーバ側、クライアント側共に USRP N200 を用いた。

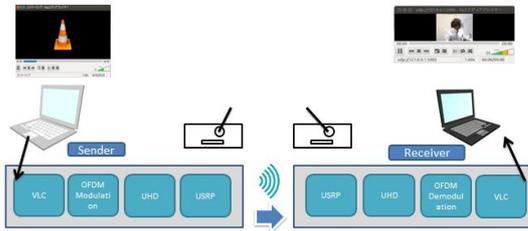
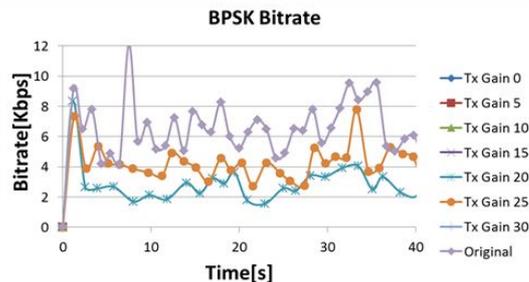


図 3: ソフトウェア無線実験環境

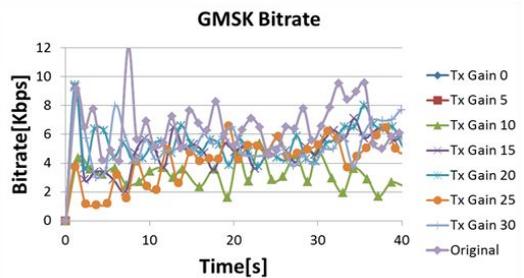
動画像の画素数は 480 x 360、ビットレートは 5kbps、フレームレートは 5fps とし、H.264/AVC で圧縮した。また、MPEG-DASH のセグメント長は 2s、パケットサイズは TS (Transport Stream) に合わせて 188Byte とし、UDP で配信を行った。ここでは、GNU Radio を介さずに PC 内でローカルにストリーミング配信した場合の再生ビットレートを Original とし、GNU Radio を介して送信した場合の計測ビットレートとの比較を行う。

変調方式の比較

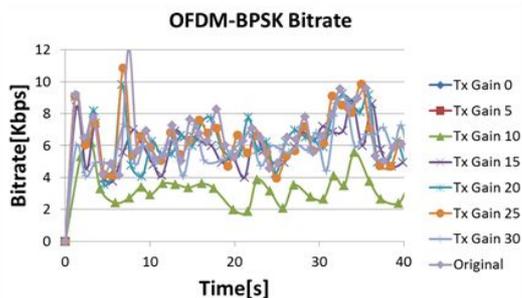
DBPSK、GMSK、OFDM-BPSK による配信結果を図 4 に示す。



(a) BSPK の場合



(b) GMSK の場合



(c) OFDM-BPSK の場合

図 4: 変調方式と映像配信結果

図 4(a) は DBPSK の場合の結果であり、送信ゲインが 20dB と 25dB 以外は再生不可であったことがわかる。また、パケット到着率は、20dB と 25dB の場合、それぞれ 30%強と 50%強であった。また、図 4(b) は GMSK の場合の結果であり、送信ゲインが 10dB ~ 30dB の範囲で再生可能であった。また、GMSK の方がパケット到着率、平均ビットレート両方の面において DBPSK よりも優れた特性を示すことを確認した。特に送信ゲインが 15dB の場合、パケット到着率は 60%以上を実現していた。最後に図 4(c) は OFDM-BPSK を用いた場合の結果であり、送信ゲインが 15dB 以上の場合に 70%以上のパケット到着率を実現し、かつ、平均ビットレートも最も高い結果が得られた。

(2) ソフトウェア音響

変復調実験

ソフトウェア音響通信の妥当性を評価するために、はじめに基本的な変調方式 PSK、ASK、FSK におけるビット誤り率 BER (Bit Error Rate) 特性のシミュレーション評価と実測の比較を行った。実験概要を以下に示す。実験パラメータは表 1 に示す通りであり、結果を図 5 に示す。ここで実測値は送受信機間の距離を 20-160cm で 20cm 単位に延長しながら、受信 SNR とビット誤り率を求めたものである。またシミュレーション値は、50,000bit のランダムビットを作成しては、符号化、変調、白色雑音の付加を行い、SNR 毎の復調、復号後のビット誤り率を求めたものである。図中の曲線はシミュレーション評価値、点は実測値を示しており、ほぼ想定通りの結果が得られていることがわかる。

表 1: 実験パラメータ

Carrier Frequency	8 KHz
Sampling Frequency	40 KHz
Bandwidth	8 KHz
Audio output level	20%
Microphone directivity	UNI

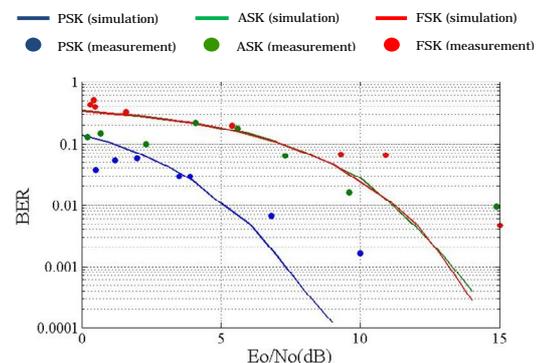


図 5: 実測とシミュレーションの比較 I

続いて、多値変復調方式として QPSK、8PSK、16PSK を適用し、各変復調方式における BER 特性を確認した。BER 特性を描くために、送受信間距離を変更しながら、4200bit のランダムバイナリデータの送受信を行い、各距離

においてビット誤り率と受信 SNR を測定した。また、誤り訂正符号は Hamming[7,4]符号を適用した。なお、各試行回数は 20 回であり、実験結果はその平均値としている。図 6 に、受信 SNR とビット誤り率の関係を示す。青線と青点は先に求めた(B)PSK であり、変復調の多値化を進めるほど誤りに弱くなる傾向が確認できる。

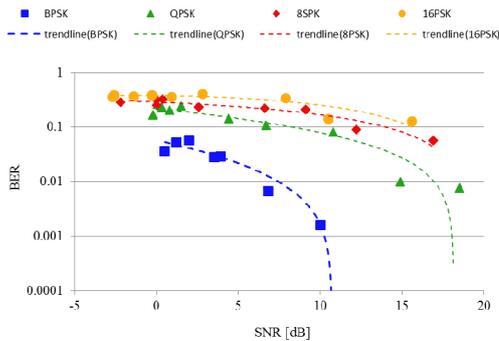
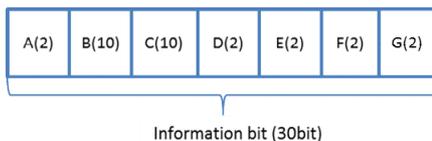


図 6: 実測とシミュレーションの比較 II

アプリケーション評価 I

送信側において送信データの種類、変調方式、誤り訂正符号、パケットサイズ、ブロックサイズ等を選択可能とし、送受信実験を行った。各データの先頭には、図 7 に示す 30bit のヘッダ情報を付加し、送信データの種類(テキスト、画像) サイズ、誤り訂正符号の種類、変調方式などを通知するようにした。また、ヘッダ情報は非常に重要度が高いと考え、接続符号化(畳み込み+リード・ソロモン)を適用し、変復調方式は BPSK で固定した。



Data type	A	B	C
text	0	Number of packet	/
image (binary)	1	Number of pixels (length)	Number of pixels (width)
image (gray)	2		
image (color)	3		

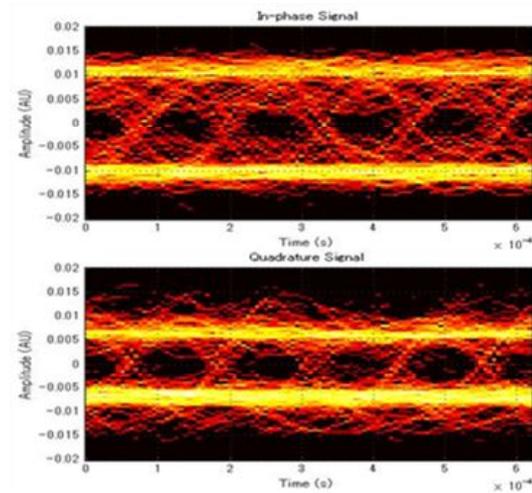
	D (Error correction code)	E (modulation)	F (packet size)	G (block size)
0	Convolutional [R=0.5]	BPSK	128	500
1	Hamming [R=0.57]	QPSK	256	1000
2	Hamming [R=0.73]	8PSK	512	2000
3	Hamming [R=0.84]	16PSK	1024	4000

図 7: ヘッダ情報

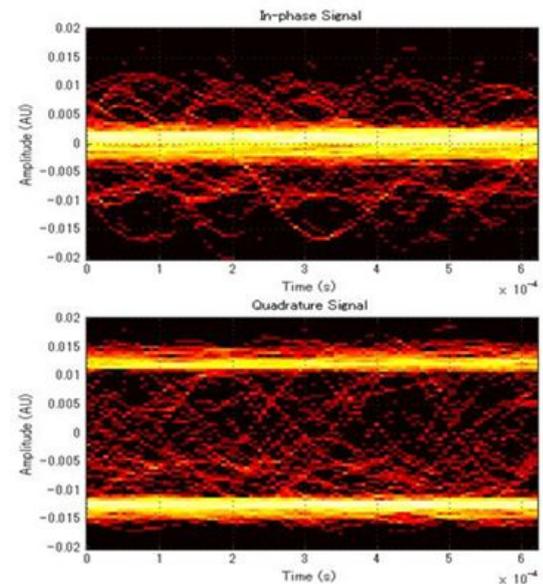
その上で、静止画像の送受信実験を行った。画像等のサイズの大きなデータを送信する場合、受信データが途中から急激に乱れるという問題が発生した。これはビット誤りのために同期回復に失敗するためであり、周期的に同期情報を挿入することで誤りの影響を局所的に抑えるようにした。図 8 は静止画像の送受信結果を示しており、左上が原画像、右上が BPSK、左下が QPSK、右下が 8PSK による送受信結果を示す。また、図 9 は受信音響信号のアイパターンを示しており、(a) は受信に成功した場合、(b) は失敗した場合を示す。



図 8: 静止画像の送受信結果 (原画、BPSK、



QPSK、8PSK)
(a) 受信に成功した場合



(b) 受信に失敗した場合
図 9: 受信音響信号のアイパターン

アプリケーション評価 II

本プラットフォームの第二の応用例として、音楽データに任意の情報を付加して転送可能なアプリケーションを作成した。本応用

では、搬送波として正弦波の代わりに音楽データを扱い、音楽データを変復調することで情報ビットを付加する。図 10 には送受信の処理の流れを示す。

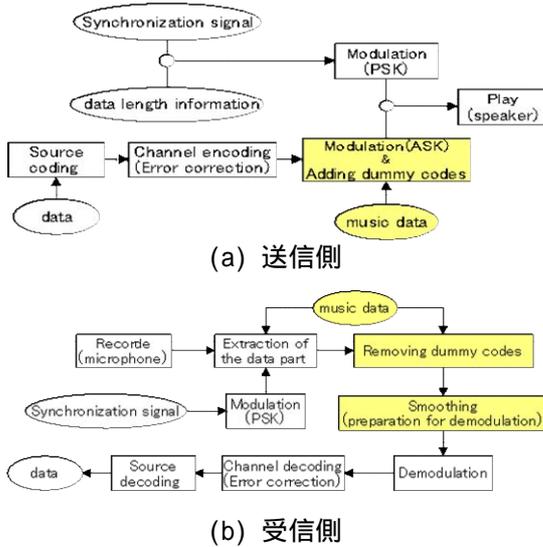


図 10: 第二の応用における送受信処理

音楽データは複数の周波数成分からなり、振幅値も一定でないため、搬送波として音楽データを使用することは容易ではない。本応用では、変調方式として ASK を使用したが、ASK の場合、小さな振幅値(無音に近い)部分に対応する情報ビットが誤って伝送されることが考えられる。そこで、閾値(以下、ダミー閾値)を設け、音楽データの振幅絶対値が閾値以下の場合にはダミーコードを追加する処理を加えた。なお、受信側においてもダミーコードの位置を把握できることが条件となるため、受信側においても同じ音楽データを保有しており、ダミー閾値も既知であると仮定した。

本アプリケーションの性能を定量的に評価するために 10 種類の QR コードの転送を行い、各 QR コード転送時の BER を測定した。なお、音楽データとしてピアノ音を用い、ダミー閾値は 0.01 とした。実験結果の一例として図 11 に受信 QR コード(BER:0.79%)を示す。10 パターンの QR コード転送において BER 平均値は 1.5%、最大値は 3.9%となった。また、受信 QR コードの読み取りには、10 種類のうち 7 種類は成功したが、残りの 3 種類は読み取ることができなかった。このような転送失敗事例も見られることから、改善が必要であるといえるが、本プラットフォームを応用することで、音楽データに情報を付加して転送することができることを示した。今後の課題として、変調による音楽データの歪みを小さくすることが挙げられる。



図 11: 受信 QR コードの例

5. 主な発表論文等 〔学会発表〕(計 3 件)

Ryo Kato and Jiro Katto: “Development of Software-Defined Acoustic Communication Platform and its Evaluations,” IEEE WCNC 2015, Atlanta, USA, Mar.2015.

松本光広, 瀧山稜太, 家令悠斗, 甲藤二郎: “GNU Radio を用いた VLC Streaming の特性評価,” 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, 宮崎, Mar.2014.

加藤凌, 甲藤二郎: “MATLAB を用いたソフトウェア音響通信プラットフォームの検討,” 電子情報通信学会総合大会, A-10-9, 新潟, Mar.2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲藤 二郎 (KATTO, Jiro)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 70318765