

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21800062

研究課題名（和文）境界面音場の1ビット符号化を用いた音響ディスプレイ

研究課題名（英文）Acoustic Display Using High Speed 1-bit Signal Processing for Boundary Surface

研究代表者

武岡 成人（TAKEOKA SHIGETO）

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：30514468

研究成果の概要（和文）：

高速 1bit 信号処理を用いた極めて制御点数の多い音場の記述・伝送手法を提案し実験を行った。具体的には 576ch 個別駆動型超音波スピーカを用いた指向性制御，1024chMEMS マイクロホンアレイを用いた音場解析，高速度カメラを用いた動画情報からの粒子速度分布解析の実験を行った。結果として現実的な規模で空間の標本化定理を満たし得る多チャンネル制御が可能であることを示し，今後の応用技術の可能性を拓けたと考える。

研究成果の概要（英文）：

In this report, we present the recording and reproduction method of sound field by controlling a large quantity of points. Specifically, directionally controllable parametric array speaker system consisting of 576 ultrasonic transducers controlled individually, recording of sound field by using 1024ch MEMS- microphone array, and measurement of particle velocity distribution by PIV method with high speed camera are described. As a result, we have realized sound recording and reproduction systems that satisfy the spatial aliasing. And the possibilities of various applied technologies of this method are suggested.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：メディア情報学・データベース

キーワード：超多チャンネル信号処理，高速 1bit 信号処理，パラメトリックスピーカ，音場可視化，高速度カメラ，3次元音場

1. 研究開始当初の背景

聴覚は人間にとって極めて重要な感覚器官であり、音場をあるがまま記録・伝送する技術はコミュニケーションツールや演奏等音文化財の記録など人類の文化に大きく寄与する。約120年前のエジソンらの機械式レコーダにより初めて実用化された録音・再生技術は様々な発展を遂げ、現在では知覚限界に近いS/Nのレコーダも市販されている。しかしながら立体音場再生の試みは優れた研究が数多くあるものの決定的なシステムの提案がなされているとは言いがたく未だ途上の技術といえる。一方、受聴者の姿勢に追従して頭部運動を再現するダミーヘッドを使用したところ音像定位試験において音響的厳密性が緩和されることが平原らにより報告されている。これは人間の音場の認識には瞬時的な音響信号のみならず自分の変化に対する応答、能動性も重要な役割を占めていることを示唆している。一般に広く利用されているいわゆるステレオや5.1ch再生、ヘッドホン受聴の様な両耳周辺の音場を制御する手法では受聴者の姿勢の変化に追従するのは困難であるのに対し、それら能動性への応答を満たすシステムとしてホイヘンスの原理に基づく波面合成による手法が知られている。これは境界面上各点の音圧と法線方向の粒子速度を原音場と一致させることにより所望の音場を生成することができるというもので、制御空間内での姿勢や位置にとらわれない立体音響再生が可能となる。しかしながら厳密な再生には空間の標本化定理を満たすような間隔、すなわち境界面上に対象となる周波数帯の半波長毎（可聴域全般であれば1cm毎）にマイクロホンやスピーカを設置する必要があり実現困難とされてきた。その様な状況に対し海外では1988年にBerkhoutにより提案されたWave Field Synthesis (WFS) と呼ばれる手法や国内では伊勢らによる境界面制御による手法など波面合成に関する研究が盛んに行われている。これらの研究は必ずしも3次元音場の厳密な再生を目的とせず、すなわち前述の空間の標本化定理を満たすような膨大な量ではなく10~100ch程度のスピーカアレイを用いて聴感上問題ない音場生成を行うもので、高度なフィルタ処理や圧縮信号処理を併用することにより興味深い知見が得られている一方で、依然として駆動点の設置間隔が充分な細かさでないことから誤差が発生する空間のエリアシングや垂直方向の3次元情報の放棄など原理的な限界を含んでしまうことは不可避であった。

2. 研究の目的

本研究においてはいわゆるデジタル信号処理と通常のマイクロホンやスピーカを用いる手法ではなく、トランスデューサの構

成・駆動方法にも着目することにより、空間の標本化定理を満たすような音場の記録・再生手法を確立することを目的とする。具体的にはこれまで高品質な記録方式として研究を進めてきた高速1bit信号処理のアナログ信号との親和性の高さをを用い、駆動方法を考慮した符号化を行うこと、またトランスデューサとして超音波スピーカやMEMSマイク、高速度カメラといった技術を導入することにより、一般的な構成では大規模になってしまう極めて駆動点数の多いシステムを実用的な規模で実現する。

3. 研究の方法

(1) 超音波スピーカの指向性制御

本研究の目的である空間の標本化定理を満たす音場の再生システムでは約1cm毎にスピーカを設置する必要がある。しかしながらそれだけのスピーカを設置し個別配線・制御するのは一般的な手法では非現実的であり、それが3次元音場再生の一つの原理的な壁となっている。一方、超音波スピーカ、あるいはパラメトリックスピーカと呼ばれる特殊なスピーカシステムがある。これは超音波の伝播時における非線形性を利用したもので、変調した超音波を照射することにより伝播過程において可聴信号を復調することができ、その結果超音波の非常に鋭い指向性を有しながら可聴音を再生する超指向性スピーカとなる。スピーカの構成は直径1cm程度の超音波域に共振点を持つセラミック振動子数百~1000個程度をアレイ状にして同相駆動する方法が知られている。

そこで本研究では超音波スピーカシステムの各素子を個別駆動することにより指向性制御し、任意の方向・本数の超指向性出力を行うシステムを提案し実験を行った。超音波素子は出力信号の周波数が高いことから可聴域のスピーカと比較して素子単位では小型であり実効的に多チャンネルの集積化が行える。また多チャンネルスピーカの駆動には高速1bit信号を用いる。

① 指向性制御実験

576chの個別駆動型超音波スピーカを作成し、遅延量を制御することにより指向性制御の実験を行った。また、波面の加算により複数方向への同時出力も可能なはずである。そこで異なった音源からなる超音波出力の多方向同時出力実験を行った。

② 応用技術の検討

提案法の応用技術として画像処理との併用により受聴者の耳元のみ音場を集中させるシステムの検討を行った。

(2) MEMSマイクアレイを用いた音場の記録

集積技術の発展により半導体のみではなく機械的な部品をも集積化しワンチップ化

する MEMS 技術が近年注目されている。すでに携帯電話などの分野で MEMS マイクロホンが実用に供しており、その大きさは 5mm 角以下でなおかつ基板実装に適している。本研究ではこれらを用いた空間の標本化定理を満たすマイクロホンアレイの実現として約 1cm 毎に MEMS マイクロホンを 1024 個配置した試作装置を用い、基礎的な録音実験及びリアルタイム指向性制御の実験を行った。

(3) 高速度カメラによる粒子速度分布の算出

MEMS マイクロホンアレイを用いることにより標本化定理を満たす収録系の実現は可能であるもののマイクロホン設置による音場への影響、回路規模などの問題が課題として挙げられる。一方撮像素子の高速化、半導体メモリの大容量化により高速度カメラの撮像速度が秒 10000 コマを超えるものなどが業務用レベルでは実現され始めており、十分に音響振動を捕らえるものとなってきた。そこで本研究では音響信号を映像情報として収録することにより、いわゆるマイクロホンを設置することなく画角内の音場の様子を算出する手法を試みた。具体的には流体力学の分野で広く用いられている P I V 法を音場の解析に導入しスピーカ出力の粒子速度分布を算出した。トレーサ粒子と呼ばれる直径 $1\mu\text{m}$ 程度の油滴を空气中に散布しそれらを秒 8000 コマで撮影した。得られた動画に対して 2mm 四方程度を単位として各画像間で相関をとり対象となる範囲の油滴群の移動量ベクトルを算出することにより音場の粒子速度分布解析を行った。また本手法では音圧のみならず音の方向成分が取得できる。その検証実験として複数のスピーカ出力を同様に撮像・解析し、その方向成分により音源分離の実験を行った。

4. 研究成果

(1) 超音波スピーカの指向性制御

40cm 四方の基板に超音波素子を 576 個実装した基板を作成し実験を行った。

試作した装置の外観を図-1に示す。本装置の構成を図-2に示す。高速 1bit 信号により符号化された再生信号を SD カードより読み出し遅延量の制御のみで指向性を制御している。超音波振動子の共振周波数は約 40kHz で、用いた高速 1bit 信号の標本化周波数は 1.4MHz である。高速 1bit 信号は量子化ビット数を 1 とする代わりに標本化周波数を高くとり量子化雑音を所望の帯域に制御する手法で、量子化ステップが 1 か 0 の 2 段階となることから D 級アンプと同様のスイッチング駆動が可能となり原理的に DA コンバータを必要としない。本装置では高速 1bit 信号による直接駆動を行うことにより各スピーカ素子までの配線にはデジタル信号

の利点であるシリアル-パラレル変換などの特徴を利用して伝送し、駆動時には DA コンバータを用いることなくかつ高効率な D 級アンプとして駆動することができる。

結果として通常の方法では大規模になってしまう 600ch 弱という個別制御点数の音響再生システムを、DA コンバータレスで構成しまた配線量を大幅に減らしたなおかつ高効率駆動することにより一枚の基板上で実現することができた。また高速 1bit 信号処理は通常マルチビット信号と比較して 32~128 倍以上の標本化周波数であることからアレイ処理に際してアップサンプリングを必要とせずソフトウェア面でも大幅な小規模化に寄与している。

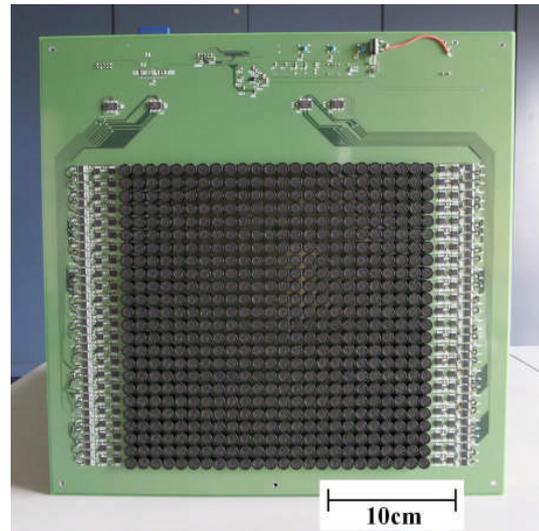


図-1 576ch 個別駆動型超音波スピーカ

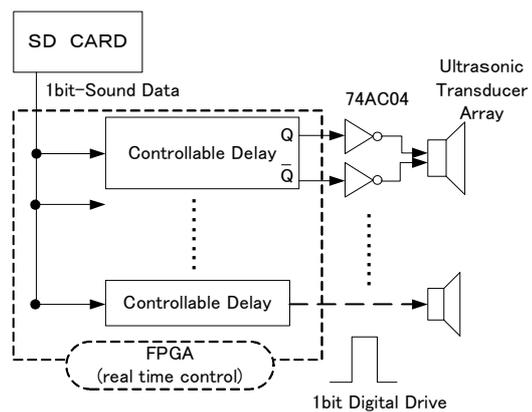


図-2 試作システム構成

また本装置の構成は記憶媒体を増やすことにより遅延量による処理ではなくプリプロセスを行った信号を各スピーカの音源として扱うようなシステムにも容易に応用することが可能である。

① 指向性制御実験

試作した装置を用いて指向性制御実験を行った。スピーカから 1m の距離における復

調音の指向特性を図-3上に、30度の方向に指向性制御したときの指向特性を下に示す。15度で20dB程度の差があるなど超音波スピーカの極めて鋭い指向性を保ちながら指向性制御時には所望の方向へ超指向性出力がなされている様子がわかる。標準化周波数を1.4MHzとしていることからアップサンプリングを行うことなく約2度の分解能で制御することができる。また4kHz正弦波を変調出力時の消費電力はスピーカシステムより2mの地点で搬送波110dB、復調波80dB程度で約6Wであった。

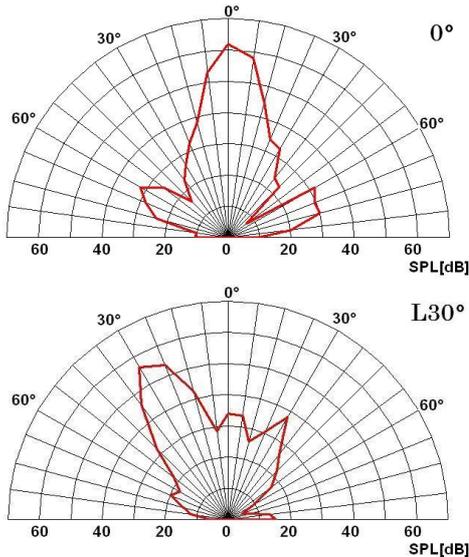


図-3 指向性制御結果

また、これら指向性制御された波面を重ね合わせることによる多方向出力実験を行った。実験時の配置概要を図-4に示す。試作機より正面および左右15度方向にそれぞれ異なった音源による超指向性ビームの同時出力を行い、それぞれの地点における復調音の収録波形を比較した。音源の波形を図-5上に、収録された波形を図-5下に示す。それぞれの方向に極めて指向性の鋭い出力がなされている様子がわかる。

② 画像処理を用いた応用技術

提案手法は音場の3次元再生技術のみではなくバイノーラル再生、注意喚起、案内など様々な応用技術が期待できる。一例として画像処理と組み合わせることより、対象者の両耳の位置を認識し受聴者の姿勢の変化や移動に追従してアナウンスするシステムを提案、試作し学会講演時におけるデモンストレーションなどで好評を博した。今後は電気自動車への応用など期待できる。

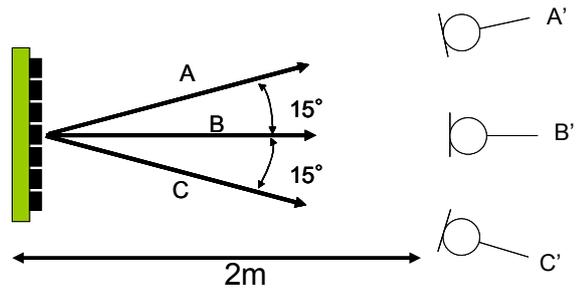
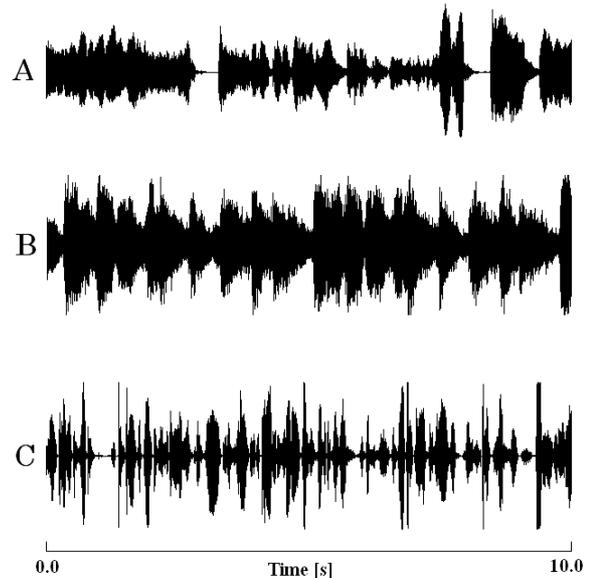
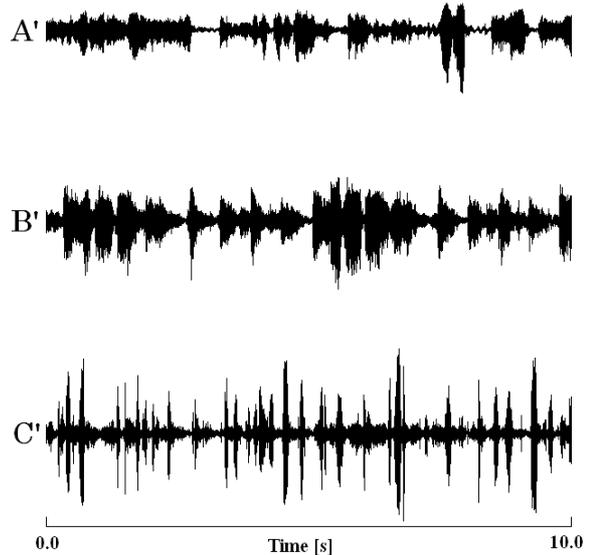


図-4 多方向出力実験



(a) それぞれの音源信号波形



(b) 収録された復調信号の波形

図-5 多方向出力実験

③ 総括

高速1bit信号を用いた符号化により576ch

個別駆動型の超音波スピーカシステムを構築し、指向性制御、多方向出力が可能であることを示し、応用技術の検討を行った。本成果の位置づけとしてはまず多チャンネル駆動方式の提案が挙げられる。高速 1bit 信号処理を多チャンネル駆動に導入することにより現実的な規模で 1cm 毎のスピーカを駆動するシステムを実現した。配線量、消費電力の点で優位性が高く膨大な制御点という課題へのキーテクノロジーのひとつになりえるものであると考えている。次に超音波スピーカの応用技術としての成果が挙げられる。超音波スピーカは極めて指向性が強いスピーカであるが実用面での用途は限られていた。本研究では原理は単純でありながらも個別制御により指向性制御を実現し、立体再生はもとより応用技術で検討したような画像処理との組み合わせによる案内やバイノーラル再生など即時性の高い応用技術が期待できる。また、超音波スピーカは指向性の鋭さゆえに壁面からの反射音が反射音のように聞こえるという特徴が知られている。そこで本方式に壁面反射を利用することが可能であればスピーカを回転・移動させることなく任意の位置から音響信号を再生することが可能であり、制御系を集積していることから膨大な量のスピーカ設置という問題に対しても大きなブレイクスルーとなりえる。

(2)MEMS マイクロホンをを用いた音場の記録

(1)で示したスピーカシステムで得られた知見をもとに設計・作成した 1024chMEMS マイクロホンアレイを用い、音場の記録・リアルタイム制御の実験を行った。マイクロホンアレイの外観を図-6に示す。1cm 四方に 32×32、計 1024 個の高速 1bit 出力型 MEMS マイクロホン(SPM0405HD4H, KNOWLES 社)が配置されており、32 枚の SDHC カードにより全チャンネルの記録が可能である。また高速 1bit 信号は量子化ビット数が 1 であるが故に語同期の必要がなくいわゆる WORD SYNC 分の配線を無くすことができ、ハードウェアの小規模化に寄与している。本装置を用いて 8kHz 正弦波の収録実験を行った。記録波形の一部(8×8ch)を図-7に示す。補間を用いずに十分な密度で波面が記録できている様子がわかる。また、スピーカシステムと同様に高速 1bit 信号処理はロジックレベルで信号を扱えることから FPGA を介しての並列処理が比較的容易に実装できる。基礎実験として簡潔な遅延和によるリアルタイム指向性制御実験を行いほぼ理論値の結果を得た。

結果として、MEMS マイクロホンと高速 1bit 信号処理を用いることにより空間の標本化定理を満たすような密度の収録系を実現した。今後は(1)の成果と組み合わせることによる 3次元音場再生技術の収録系として期

待できる。またロジックレベルでのリアルタイム制御に適していることから受聴者の姿勢の変化に対応するバイノーラルシステムなど即応かつ 3次元の音場情報を扱うシステムへの応用を検討していく。

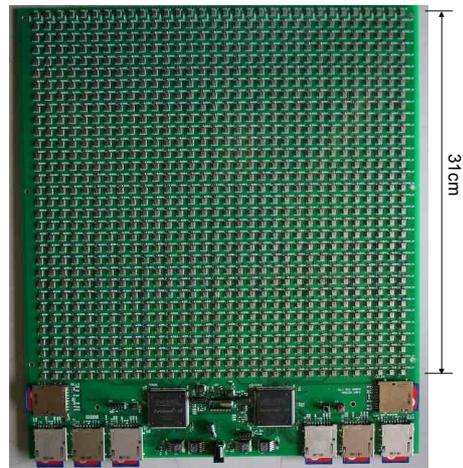


図-6 1024ch マイクロホンアレイ

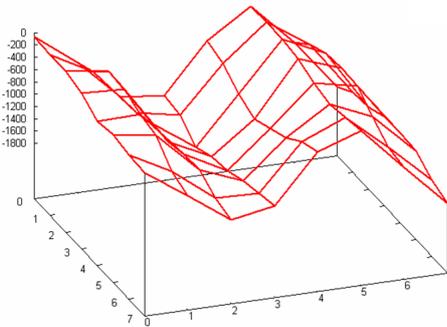


図-7 正弦波の収録波形

(3)高速度カメラによる粒子速度分布の算出
近年高速度カメラが充分音響振動を観察できる速度になってきている。そこで流体力学の分野で研究が進められている粒子画像流速測定 (Particle Imaging Velocimetry : 以下 PIV) 法を用いて音場の粒子速度分布を算出した。測定系の概要を図-8に示す。

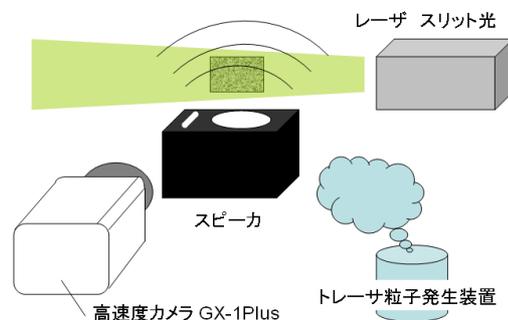


図-8 PIV法による音場の観察

トレーサ粒子として直径約 $1\mu\text{m}$ 程度のジエチルヘキシルセパケート (DEHS) を霧状に

散布し、スピーカ出力により振動する様子を撮像した。250Hz, 110dB の正弦波による音場を撮像し得られた動画情報から、約 2mm 四方をテンプレート（比較単位）として次画像との相関からベクトル量を算出する画像相関法により音場の粒子速度分布を求めた。結果を図-9に示す。ベクトル量の変化から算出した S/N は 60dB 程度であった。また粒子速度の方向成分に着目した音源分離実験を行い、各点の音圧のみではなくベクトル量として音場の情報が得られている事を確認した。

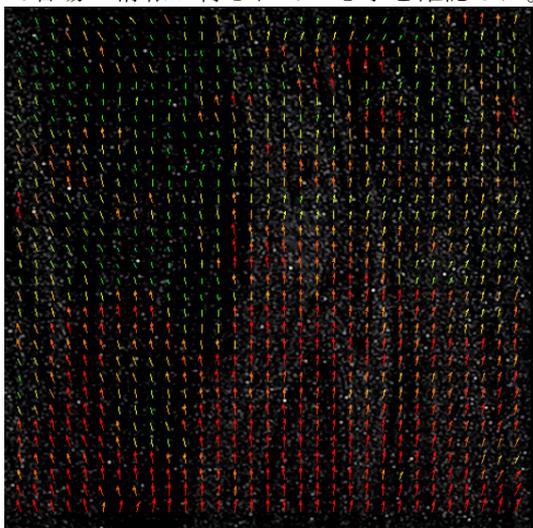


図-9 算出された粒子速度分布

高速度カメラを用いた動画からの音場の粒子速度分布を算出した。本方式は原理的にいわゆるマイクロホンを設置する必要がなく、また音圧のみではなく方向成分も含めた粒子速度分布として十分に細かい密度で観察することができる。また本期間内では 2 次元の振動解析に留まったが、基礎実験から複数のカメラを用いることにより 3 次元化が可能であることを確認しており、今後は 3 次元音場の収録法としての応用を行っていく。

(4) 研究成果全体の総括

3 次元音場の記述と伝送を目的に、空間の標本化定理を満たすような収録・再生方法の提案と実現を行った。特に、これまで高品質な記録方式として研究を進めてきた高速 1bit 信号処理のアナログ信号との親和性の高さに着目して、多チャンネル信号処理への導入を行い、576ch, 1024ch といった一般的な手法では非常に大規模となってしまうような制御点数の記録・再生を実現した。今後はこれら知見を応用し極めて制御点数の多い処理系を扱ういわば「超多チャンネル信号処理」とでも言うべき研究分野の提案に努める所存である。

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)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 武岡成人, Frey Mathias, 及川靖広, 山崎芳男, 両耳に追従する指向性制御型超音波スピーカ, 日本音響学会講演論文集, 777-778, 2011. 3. 11, 早稲田大学
- ② 阿久津真理子, 武岡成人, 及川靖広, 山崎芳男, 空气中浮遊物の高速撮影による音場情報の取得, 日本音響学会講演論文集, 1559-1560, 2011. 3. 11, 早稲田大学
- ③ 八十島乙暢, 武岡成人, 及川靖広, 山崎芳男, 1bit8ch ポータブル半導体レコーダを用いた音場の収録・再生, 日本音響学会講演論文集, 721-722, 2011. 3. 10, 早稲田大学
- ④ 武岡成人, 八十島乙暢, 酒井寿理, 及川靖広, 山崎芳男, 高速度カメラを用いた PIV 法による粒子速度分布の測定, 日本音響学会アコースティックイメージング研究会, AI2010-3-03, 2010. 10. 29, 早稲田大学
- ⑤ 武岡成人, 小樽亮太, 及川靖広, 山崎芳男, 1bit 信号処理を用いた 1024ch マイクロホンアレイ, 1 ビットコンソーシアム研究会, 2010. 9. 24, 早稲田大学
- ⑥ 武岡成人, 小樽亮太, 山崎芳男, 高速 1bit 信号処理を用いた超多チャンネルマイクロホンアレイ, 日本音響学会講演論文集, 765-766, 2010. 9. 16, 関西大学
- ⑦ Shigeto TAKEOKA, Yoshio YAMASAKI, Acoustic Projector Using Directivity Controllable Parametric Loudspeaker arrays, The 20th International Congress of Acoustics, No. 921, 2010. 8. 25, Sydney Convention Centre (Australia)
- ⑧ 武岡成人, 阿久津真理子, 及川靖広, 山崎芳男, 高速度カメラを用いた PIV 法による音場収録, 日本音響学会講演論文集, 1451-1452, 2010. 3. 9, 電気通信大学
- ⑨ 石井紀義, 武岡成人, 及川靖広, 山崎芳男, パラメトリックスピーカの高速 1bit 信号処理による指向性制御, 日本音響学会講演論文集, 737-738, 2010. 3. 9, 電気通信大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武岡 成人 (TAKEOKA SHIGETO)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号 : 30514468