

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560416

研究課題名(和文) 1kWデジタル直接駆動大電力スピーカシステムの高精度/効率化と電気機械系への適用

研究課題名(英文) A high accurate and efficient digitally direct driven speaker system for 1 kW applications for an electrical machine system

研究代表者

安田 彰 (YASUDA, Akira)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30339501

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は大規模施設等やアクティブ消音装置で用いられる大電力スピーカシステムの電力効率の大幅な改善、消費電力の削減を目的とする。このためデジタル信号直接駆動型技術DDDSPを応用し、その特性を大幅に改善する方法を検討した。この方式ではアクチュエータ(ACT)数を増加させることで出力電力(音圧)の増大を図り、小振幅出力時に使用するACT数を減らすことで効率の向上を実現している。また、ACTを選択駆動するミスマッチシェーパーの高性能化および駆動信号の高精度化等を行い、最大信号から小信号まで80%以上の効率を有し、100dB以上の高SNRかつ100-1kWの大電力システム駆動回路を実現した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is improving the power efficiency of a high power loud-speaker system. In order to improve the power efficiency, a digitally direct driven speaker system technology (DDDSP) is applied to the high power system. Increasing number of actuators (ACT), output power and sound pressure level can be increased. Decreasing number of ACT during low output power, the low power efficiency can be improved. High power system with 80% power-efficiency and 100 dB of SNR, whose output power is 0.1 to 1 kW, has been realized.

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：電子デバイス・集積回路 デジタル直接駆動スピーカ デジタル スピーカ 高効率 大出力

1. 研究開始当初の背景

我々は、基盤研究(C)平成16~18年度、研究課題名「デジタル信号直接駆動型スピーカの解析と高性能化」および基盤研究(C)平成19~20年度、研究課題名「積層分割構造電気-音響変換器を用いたデジタル直接駆動スピーカの高性能化」にて研究を進め、従来にないデジタル直接駆動スピーカ(DDDSP)を提案し、構成方法の確立、実証を行ってきた。我々の提案した手法ではアナログアンプやデジタルアナログ変換器を用いることなくデジタルデータを直接音波に変換することが可能となり、スピーカを用いたシステムの高性能化、高効率化、小型化を実現した。これまでの研究では、数10W程度までの室内等で使用するレベルのものを対象としてきた。

一方、屋外や広い空間を有する展示会場、コンサートホールなどでは数100Wから数kWのような大電力出力が可能なスピーカシステムが使用されている。また、エレベータ、工場、新幹線や高速道路等で生じる騒音や振動を低減するアクティブ消音技術の研究が進み、このような分野でも大電力スピーカ(振動)システムが使用されている。このような大電力分野では、従来からA級やAB級アナログ増幅器が用いられている。しかし、これらの増幅器は電力効率が25%から最大でも70%と電力効率が悪い。このため近年では、D級増幅器がその効率の高さから用いられるようになってきているが、最大出力時の効率は90%程度と高いが出力電力が1/10以下では30%以下の効率となっている。

これらの分野に我々の提案しているDDDSPを用いることができれば、効率の問題をさらに改善し、小型で高性能なシステムを構築することが可能となる。大電力分野では、その消費電力が大きいことから、電力効率を改善することは大幅な消費電力の削減に役立ちCO₂削減効果も期待される。通常の音楽や音声等の再生時は、信号レベルが大幅に変動することから、その平均出力電力は最大電力の1/10から1/100となっている。最大出力電力ではDDDSPとD級増幅器の消費電力に差は無いが、通常の使用レベルでは消費電力の減少が下げ止まり電力効率が大幅に劣化する。一方、DDDSPでは、出力電力に比例して消費電力が減少し高い電力効率が維持される。このように、電力効率を考えた場合、デジタル信号直接駆動型スピーカの優位性が高いことが理解される。

2. 研究の目的

本研究は、大規模施設等やアクティブ消音装置で用いられる大電力スピーカシステムやモータ等の精密駆動装置の電力効率の大幅な改善、消費電力の削減を目的とする。このためデジタル信号直接駆動型技術を応用し、その特性を大幅に改善する方法を研究する。この方式ではアクチュエータ(ACT)数

を増加させることで出力電力(音圧)の増大を図り、小振幅出力時に使用するACT数を減らすことで効率の向上を実現する。ACTを選択駆動するミスマッチシェーパーの高性能化や3状態駆動方式の検討、駆動信号の高精度化等を行い、最大信号から小信号まで80%以上の効率を有し、100dB以上の高SNRかつ100W-1KW以上の大電力システム駆動回路の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、100W-1000Wの大電力かつSNR100dB以上の高精度を同時に実現し、従来の小信号系の高精度回路および大電力パワーエレクトロニクス技術の双方を両立させる高度な技術を目指している。このためDDDSPシステムの大電力化の実現に関する基礎検討および100WクラスのDDDSPシステムの試作を行い、この評価を通して大電力化した場合の特性の明確化を行う。また、この結果を再現するシステムレベルモデルを導出し、これを用いてシステムの性能向上方法の検討、提案を行う。SNRの向上には、内部 $\Delta\Sigma$ 変調器の高SNR化、ミスマッチシェーパーの高性能化が必要となる。さらなる出力電力の増大のためサブスピーカ数を増加させる場合、ミスマッチシェーパーをこれに対応させることが必要となり、その実現手法の検討を行う。

(1) デジタル直接駆動スピーカシステムの大電力化の実現に関する基礎検討

デジタル直接駆動スピーカシステム(図1参照)の大電力化の実現に関する基礎検討を行い、その問題点を明らかにする。このために、DDDSP技術をそのまま大電力向けに適用した100W級プロトタイプを試作・評価し、大電力・高精度DDDSPを実現できるシステム実現方法の検討を行う。

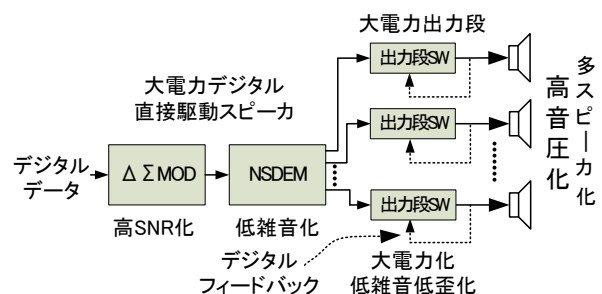


図1 提案する大電力デジタル直接駆動大電力スピーカシステム

(2) 大電力デジタル直接駆動スピーカシステム出力回路およびサブスピーカの基本特性の測定、評価、モデル化

大電力化を実現するためには、出力ドライバ回路、大電力出力段からなる大電力出力回路(電気系)および大電力サブスピーカ、ス

ピーカキャパティ（機械系）が必要となる。まず、これらの特性評価を行うために 100W 程度のプロトタイプ試作を行う。個別 Tr. を用いて電気系を、大電力に対応したマルチコイルダイナミックスピーカを複数用いて機械系を試作する。また、デジタル系に関しては、FPGA を用いてアルゴリズムを実装する。このシステムを用いて、電気-音響変換特性の測定を行い、その基本特性の評価を行う。大電力に伴い、電気系では、出力 MOSTr. の大型化・入力容量の増大による遅延特性の劣化、出力電流の増大による Tr. の非線形性特性の影響による歪特性の劣化が懸念される。機械系では、スピーカユニットの大型化による影響が出ると考えられる。大電力 DDDSP の高性能化を実現するには、これらの影響を再現する数学的モデルが必須となり、これらの電気系、機械系の特性を表わすモデルの構築を行う。

(3) 100dB を超える SNR を実現するためのシステム構成検討

大電力スピーカシステムには、小信号で再生した場合にも十分な SNR を得るために小音量システムよりも高い SNR を実現する必要がある。一方、DDDSP では量子化雑音、サブスピーカのマッチング精度が雑音源要素であり、小信号時における雑音源の影響の低減が重要な課題となる。

①量子化雑音の低減：100dB 以上の SNR を実現するため、内部で用いる $\Delta\Sigma$ 変調器のノイズシェーピング特性を向上させた変調器を設計する。またこの際、DDDSP システムの特徴である複数のサブスピーカを用いる特徴を活かし、内部量子化レベル数を 8 以上に増やすことにより、変調器の安定性を確保する。これにより従来困難であった高次ループフィルタの使用が可能となり、大幅な雑音特性の向上が期待できる。②サブスピーカの mismatch 誤差の影響の低減方法検討：100dB 以上の SNR を実現するためには、mismatch シェーピング特性をこれまで提案してきた以上に高める必要がある。また、①でサブスピーカの数を増加させるため、mismatch シェーピング特性の劣化が想定されるが、2 次以上の特性を用い、さらに mismatch シェーパの安定化およびフィルタの階層化処理を用いることで特性の向上を図る。③入力レベルに適應させた mismatch シェーパー方式の検討：入力レベルに応じて駆動数を変動させることにより、電力効率の向上、低レベル再生時のノイズの発生の低減、SNR の向上が可能である。サブスピーカを一時的に切り離す出力回路、およびこれに適した mismatch シェーパーの構成方法を検討する。

(4) サブスピーカを増加させた場合の指向特性の検討および改善方法の提案

用いるサブスピーカ数を増加させた場合これを同一平面上に配置すると、音響信号の輻射が 1 方向に集中し正面にビームが集中する特性となる。通常の音楽再生、拡声用途で

は広い角度方向へ拡散する特性が望ましい。次に各スピーカへの駆動時間に時間差を NSDEM で与える回路を構成し、制御方法の検討、提案を行う。

4. 研究成果

(1) 大電力デジタル直接駆動スピーカシステムの低歪み大電力化手法の確立

大電力駆動回路では、出力トランジスタのオン抵抗が出力電流の増大に伴い非線形に変化する。このため、電源電圧を上げることにより大電力化する従来の方法では、出力増大に伴い出力電力が入力信号に比例して増加せず歪みが発生する（図 2、図 3）。一方、DDDSP では、使用するサブスピーカ数を増加させることで出力電力の増加を図ることができる。この手法を用いた場合、図 3 に示したように入力レベルに比例した出力を得ることが可能である。

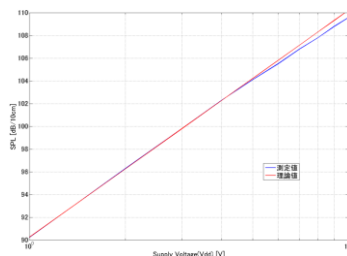


図 2 電源電圧対 SPL 特性

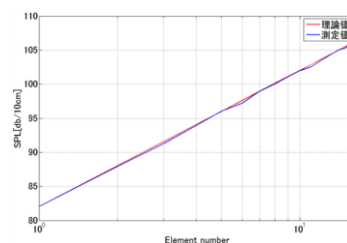


図 3 入力スピーカ数対 SPL 特性

出力電力を高くした場合、スピーカ本体の最大電力特性を超えることは出来ないため、本方式は大電力化に適している。本研究では 100W 出力時の歪み率 0.2% を実現している。

(2) 高精度デジタル直接駆動スピーカシステムの実現

大電力スピーカシステムでは、出力電力が高くなり、これに伴いノイズも増幅され大きくなる。このため、SNR は同じであるが、無音時のノイズが大きくなる問題がある。アナログアンプを用いる場合も同様な問題が存在する。本研究では、サブスピーカ数を増やすことで出力電力の増大を図っている。また、出力電力が小さい場合は、ノイズシェーピング・ダイナミック・エレメント法 (NSDEM) を用いることで、駆動するスピーカ数を動的に減少させている。このため、大出力設定時に無音区間があった場合のノイズを低減することが可能となった。

(3) NSDEM の回路器簿の小型化実現

しかし、NSDEM の回路規模は、使用するスピーカ数の増大に対し、指数関数的に増加し、実装が困難となる。本研究では、図 4 に示した NSDEM を階層的に用いる手法を提案することにより、この問題の解決を図った。この構成により、16 スピーカ 2 次 NSDEM の回路規模の 40%削減を実現した。このときの出力スペクトルを図 5 に示した。従来方式 (赤) と提案方式 (青) の特性はほぼ等しく特性の劣化無く小型化を実現できる。

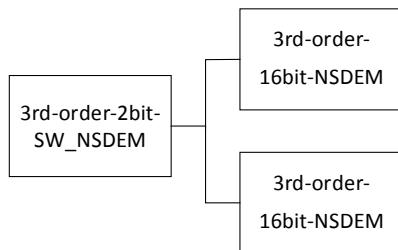


図 4 階層型 NSDEM

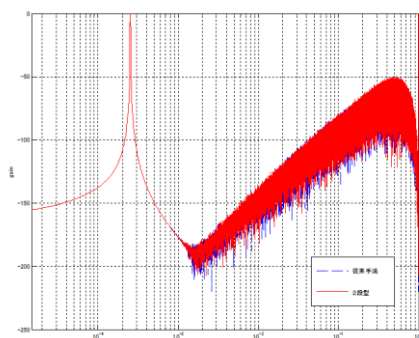


図 5 出力スペクトル

(4) 帯域外雑音低減出力段の実現

DDDSP は、大電力を直接出力できる D/A 変換器である。このため、クロック周波数付近にベースバンド信号のイメージ信号が発生する。DDDSP では、 $\Delta\Sigma$ 変調器を用いているため、クロック成分がキャリア信号として漏れることは無く、ノイズは広帯域に分布している。しかし、信号成分のイメージ信号はクロック信号周辺に存在する。このレベルを下げることで、EMI (Electro-Magnetic Interference) を低減する上で重要である。本研究では、DDDSP 出力クロックに疑似ランダム信号を用いることで、スペクトルを拡散させ、さらに図 6 のように出力を通常のクロック信号で動作するループフィルタにフィードバックすることで、信号帯域への影響を防止している。このときの信号帯域内スペクトルは図 7 のようになり、ノイズの上昇はみられない。

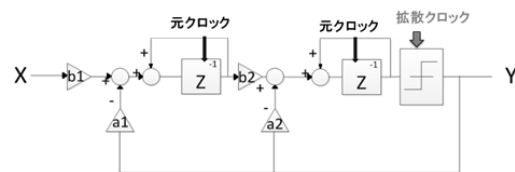


図 6 スペクトラム拡散型 DDDSP

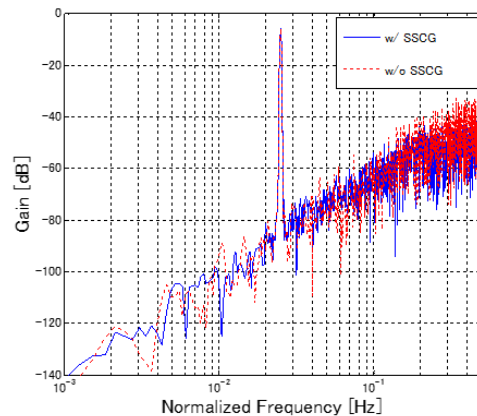


図 7 帯域内出力スペクトル

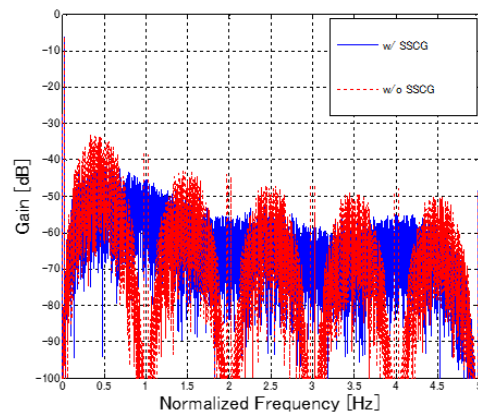


図 8 帯域外スペクトル

このときの帯域外スペクトルを図 8 に示す。青の提案方式では、赤の従来手法におけるクロック周波数の整数倍 (正規化周波数 1, 2, 3...) におけるイメージ信号が抑圧され、全体の雑音レベルも低減されている。

(5) DDDSP を用いた指向性制御

各スピーカの駆動タイミングに遅延を与えることで指向特性を DDDSP では容易に実現することができる。さらに本研究では、各スピーカへの重みをコントロールすることでより急峻な指向特性を実現可能とした。DDDSP では、出力を 0, 1 のデジタル信号で直接駆動しているため、各サブスピーカへの信号の重みをパルス幅変調により付加している。しかし、この場合、出力パルス幅が各サブスピーカに異なることになり、NSDEM の特性が劣化する。本研究では、各スピーカの出パルス幅を分割し、図 9 に示したように

それらをそれぞれ仮想エレメントとして取り扱うことで、NSDEM の特性を実現している。このときの指向性特性を図 10 に示す。重み制御を加えることでサイドローブ特性を 11dB 改善している。本方式を用いることで複数のスピーカを整列配置した場合においても無指向性特性を実現することも可能となる。

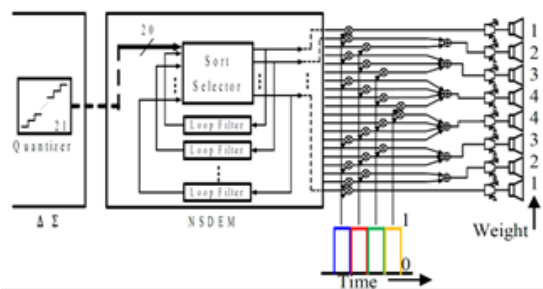


図 9 提案する DDDSP を用いた指向性制御手法

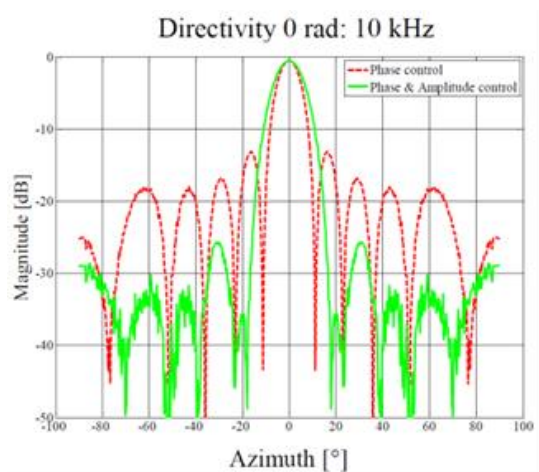


図 10 指向特性

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 7 件)

- ① Takemichi Ishikawa, Shuma Yokoyama, Noboru Harashima, Dai Takahashi, Jun Shiozawa, Michitaka Yoshino, Akira Yasuda, "A Highly Directional Speaker with Amplitude-Phase Control Using a Digitally Direct-Driven System," IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp. 135-136, 査読有, Jan, 2014.
- ② Satoshi Saikatsu, Michitaka Yoshino and Akira Yasuda, "A Delta - Sigma Modulator with a FIR Filter Reducing Quantization Noise in Signal - band," 2013 International Conference on

Analog VLSI Circuits, 査読有, pp. 17-pp. 20, Oct., 2013.

- ③ Yuki Kimura, Akira Yasuda, Michitaka Yoshino, "Continuous-time delta-sigma modulator using vector filter in feedback path to reduce effect of clock jitter and excess loop delay," Springer Analog Integrated Circuits and Signal Processing (Online), 査読有, February 2013. DOI: 10.1007/s10470-013-0038-6
 - ④ Masayuki Yashiro, Mitsuhiro Iwaide, Akira Yasuda, Michitaka Yoshino, Kazuyuki Yokota, Yugo Moriyasu, Kenji Sakuda, and Fumiaki Nakashima, "Digitally Driven Speaker System Using Direct Digital Spread Spectrum Technology to Reduce EMI Noise," Audio Engineering Society 133st Convention, 査読有, Convention Paper 8726, Oct. , 2012.
<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16468>
 - ⑤ Mitsuhiro Iwaide, Michitaka Yoshino, Daigo Kuniyoshi, Kazuyuki Yokota, Moriyasu Yugo, Kenji Sakuda, Fumiaki Nakashima, Masayuki Yashiro, and Akira Yasuda, "A novel sharp beam-forming flat panel loudspeaker using digitally driven speaker system," Audio Engineering Society 131st Convention, 査読有, Convention Paper 8469, Oct. , 2011.
<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15995>
 - ⑥ Shuhei Kato, Satoshi Saikatsu, Akira Yasuda, Michitaka Yoshino, "Complex Bandpass $\Delta \Sigma$ Modulator with Bandpass Error Feedback Structure," IEEJ AVLSIWS2012, CDROM, 査読有り, Oct. , 2011.
 - ⑦ Michitaka Yoshino, Mitsuhiro Iwaide, Daigo Kuniyoshi, Hajime Ohtani, Akira Yasuda and Jun-ichi Okamura, "A novel audio playback chip using digitally driven speaker architecture with 80%@-10dBFS power efficiency, 5.5W@3.3V supply and 100dB SNR," IEEE CICC2011, 査読有, pp.1-4, Sep. , 2011.
- [学会発表] (計 15 件)
- ① 横山秀磨, 西勝 聡, 吉野理貴, 安田 彰, "低EMI デジタル直接駆動型スピーカシステムに適した係数切り替え型NSDEMの検討", 電気学会, 電子回路研究会, ECT-13-088, Oct., 4, 2013. (東大寺総合文化センター 奈良県)
 - ② 塩澤 純, 石川武道, 高橋 大, 原島 昇, 吉野理貴, 安田 彰, "マルチビットデジタル直接駆動技術を用いたブラシレ

- ス DC モータシステム”, 電子情報通信学会 ソサエティ大会, A-1-10, Sep. 17, 2013. (福岡工大, 福岡県)
- ③ 高橋 大, 石川武道, 塩澤 純, 吉野理貴, 安田 彰, “デジタル直接駆動型スピーカシステムにおけるミスマッチシェーパー回路規模の削減法”, 電気学会, 電子回路研究会, ECT-13-056, Jul., 4, 2013, (サン・リフレ函館, 北海道).
- ④ 塩澤 純, 秋山和博, 倉持大悟, 原島 昇, 吉野理貴, 安田 彰, “マルチビットデジタル直接駆動技術を用いた三相モータシステム”, 電子情報通信学会 全国大会, A-1-21, Mar., 21, 2013 (岐阜大学, 岐阜県).
- ⑤ 黒澤 亮輔, 安田 彰, 吉野 理貴, “デジタル直接駆動型スピーカにおける指向性制御法に関する研究”, 日本音響学会 春期研究発表会, 3-10-1, pp. 755-756, 3月15日, 2013. (東京工科大学, 東京都)
- ⑥ 石川 武道, 安田 彰, 吉野 理貴, “平面スピーカを用いたデジタル直接駆動指向性制御方式”, 日本音響学会 春期研究発表会, 3-10-2, pp. 757-760, 3月15日, 2013. (東京工科大学, 東京都)
- ⑦ 中島 文彬, 安田 彰, 吉野 理貴, “並列化によりミスマッチシェーパーの回路規模を削減したデジタル直接駆動型スピーカシステム”, 日本音響学会 春期研究発表会, 3-10-2, pp. 761-762, 3月15日, 2013. (東京工科大学, 東京都)
- ⑧ 横山 秀磨, 矢代 真之, 吉野 理貴, 安田 彰, “低EMI スペクトラム拡散デジタル直接駆動スピーカシステムの検討”, 電子情報通信学会 シリコンアナログRF研究会, 3月5日, 2013. (中央大学, 東京都)
- ⑨ 小沼和彦, 横田和幸, 安田 彰, 吉野理貴, “デジタル直接駆動型スピーカーにおける多指向性制御に関する研究”, 電気学会, 電子回路研究会, CT-13-002, Jan., 24, 2013. (香川大学, 香川県)
- ⑩ 横田和幸, 小沼和彦, 中島文彬, 矢代真之, 安田 彰, 吉野理貴, “デジタル直接駆動スピーカを用いた振幅制御による高指向性”, 電気学会, 電子回路研究会, CT-13-003, Jan. 24, 2013. (香川大学, 香川県)
- ⑪ 矢代真之, 小沼和彦, 中島文彬, 横田和幸, 安田 彰, 吉野理貴, “スペクトラム拡散技術を用いたデジタルスピーカシステムの EMI 低減回路の実証”, 電気学会, 電子回路研究会, ECT-13-004, Jan. 24, 2013. (香川大学, 香川県)
- ⑫ 倉持大悟, 原島 昇, 安田 彰, 吉野理貴, “デジタル直接駆動技術の三相同期電動機への適用”, 電気学会, 電子回路研究会, ECT-13-005, Jan. , 24, 2013. (香川大学, 香川県)

- ⑬ 原島 昇, 山口 圭, 作田健二, 矢代真之, 安田 彰, 吉野理貴, “デジタル直接駆動スピーカの大電力化に関する一考察”, 電気学会, 電子回路研究会, ECT-12-034, Mar., 30, 2012. (横須賀市産業交流プラザ, 神奈川県)
- ⑭ 矢代真之, 安田 彰, 吉野理貴, “デジタル直接駆動型スピーカ用自励式ドライバ回路の提案”, 電子情報通信学会 全国大会, A-1-14, Mar., 22, 2012. (岡山大学, 岡山県)
- ⑮ 中嶋文彬, 安田 彰, 吉野理貴, “デジタル直接駆動型スピーカシステムにおけるハードウェア規模削減に関する研究”, 電子情報通信学会 全国大会, A-1-15, Mar., 22, 2012. (岡山大学, 岡山県)

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 安田 彰, トランジスタ技術、CQ 出版社, 95 (18), 2013 年 12 月号

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 彰 (YASUDA, Akira)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30339501