

令和元年6月24日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03218

研究課題名(和文) 身体機能代替技術の基盤を支える埋込み型超多点計測集積回路システムの開発研究

研究課題名(英文) Development of the multi-channel neural recording system supporting the basis of physical function substitution technology

研究代表者

安藤 博士 (Ando, Hiroshi)

国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報通信融合研究室・主任研究員

研究者番号：00638794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：BMIシステムによりALSや麻痺等の患者に向けて身体機能を代替する新リハビリテーション技術開発が進んでいるが、大脳皮質で100億も存在する神経細胞に対し、既存の100チャンネル程度でしかない神経活動記録方法では、意図推定精度の向上という高性能化に限界があると考えられる。本研究ではチョッパ技術、低クロストークアナログマルチプレクサ技術、入力容量低減T型容量スプリット技術を組み合わせ、低雑音化と高集積化を両立し、従来のアンプ集積度を1桁以上改善する埋込み型超多点計測集積回路システムの開発研究に取り組み、新しい身体機能代替技術の基盤研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の神経信号計測ではたかだか100点程度でしかなく、もっと詳細な神経細胞活動を記録したいという要求が本質的にある。本研究はこれにも応じるものであり、将来的には1万、10万チャンネルの計測が必要になる可能性もあり、その必要性に迫られるよりも前に、次世代に向けた新しいエネルギーエフィシエントな超多点計測技術の基盤技術を世界に先駆けて開発することに挑戦することで、脳科学における学術的成果に貢献する。

研究成果の概要(英文)：Development of a new rehabilitation technology that substitutes physical functions for patients such as ALS and paralysis with the BMI system is in progress. However, it is considered that there is a limit to the high performance improvement of the intention estimation accuracy in the existing neural activity recording method with only about 100 channels for neurons that have 10 billion in the cerebral cortex. In this research, we develop a multi-channel recording integrated circuit system that achieves both low noise and high integration by combining chopper technology, low crosstalk analog multiplexer technology, and input capacity reduction T type capacity split technology.

研究分野：ブレイン・マシン・インタフェース

キーワード：神経信号計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

神経電極や信号増幅回路などの電子機器を用いて計測した脳神経信号から、その意味合いを計算機で解釈(デコード)することで動作意図を推定し、外部機器を本人の意図通りに制御する、ブレイン・マシン・インタフェース(BMI)の開発研究が進んでいる。BMIは義手や会話システムなどの身体機能を代替できる画期的な新リハビリテーション技術であり、ALSや四肢麻痺患者のQOLを飛躍的に向上させる。これまで、ヒトも対象としたBMI成功例が複数報告されており、およそ100点(チャンネル)程度の神経活動計測を通して、複数テキストの推定による会話や、ロボットアームによるリーチング制御などが実現している。

このようにBMIによる身体機能代替技術が成功しつつあるものの、動物が本来備えている身体制御機能と現状のBMIとを比較すると、依然として大きな性能格差がある。ヒトでの先駆的BMI成功例から10年近くが経過しているが、技術進歩の速度は緩やかであり、簡易に装着可能なシステム等も開発されていない。BMIは社会の期待(特に患者)が大きい新技術であるので、システムの小型軽量化や多機能化・高性能化が急務であり、課題や未解明の問題を明らかにし、一刻も早く、より身近に利用できるBMIを実現する必要がある。

そこで我々はこれまでの研究において、動作意図推定精度を向上させる課題に取り組み、現状の100チャンネル程度という少ない計測データ量に課題があり、到達可能な性能を制限していると考え、1000チャンネル以上の信号神経計測が可能な超多チャンネル計測システムのプロトタイプを開発した。神経信号計測用の専用集積回路(ASIC)も開発済みで、サルを用いた動物実験評価も開始しており、超多チャンネル化に伴い大容量化したデータを、超広帯域無線(UWB)により高速無線通信(128Mbps)する技術が他の研究と比較して優れたシステムである。

2. 研究の目的

BMIシステムによりALSや麻痺等の患者に向けて身体機能を代替する新リハビリテーション技術開発が進んでいるが、大脳皮質で100億も存在する神経細胞に対し、既存の100点(チャンネル)程度でしかない神経活動記録方法では、意図推定精度の向上という高性能化に限界があると考えられる。本研究ではチョッパー技術、低クロストークアナログマルチプレクサ技術、入力容量低減T型容量スプリット技術を組み合わせ、低雑音化と高集積化を両立し、従来のアンプ集積度を1桁以上改善する埋込み型超多点計測集積回路システムの開発研究に取り組み。従来にないBMIシステムの小型化・高性能化を達成し、桁違いに神経信号活動記録数を増加させることで革新的に性能を向上させる新しい身体機能代替技術の基盤研究を行う。

3. 研究の方法

(A)チョッパー技術による低面積・低雑音化や、(B)低クロストークアナログ多重化技術による超多点入力回路、(C)T型容量スプリットによる低入力容量・低雑音アンプの研究に取り組み、製造バラつきやランダム要因などを考慮した回路シミュレーションを行って実現可能性を明らかにし、低雑音と高集積の両立を目指す。集積回路の実試作を通して性能評価を行い、全ての研究成果を統合して、目標10倍以上のチャンネル集積度を有する(D)超多点計測集積回路システムの開発研究に取り組み。研究が順調に進んだ場合、集積回路内に無線回路も含めるところや、動物実験を通して、(E)超多点計測によりBMIシステムの性能がどこまで向上するのか、を明らかにするところまでも挑戦する計画とし、最終実施形態を視野にいれて研究に取り組み。

4. 研究成果

(A)チョッパー技術による低面積・低雑音アンプの開発

BMIシステムでは、微弱でゆっくりとした成分である神経信号を、集積回路を用いて低雑音で増幅する必要があり、周波数が低いほど桁を増して大きくなる $1/f$ 雑音(特にCMOS回路で顕著)を考慮した設計が最重要となる。一般的に低雑音化するには低雑音アンプ(LNA)の面積を広くすることで対策可能であるが、これはワンチップでマルチチャンネル計測という目的に対してトレードオフとなる。そこで本研究では、低雑音アンプの前後を生体信号の周波数帯域よりも充分高い周波数で変調することで、低雑音アンプの持つ $1/f$ 雑音のみを高い周波数成分に変換し、結果的に全体の $1/f$ 雑音を抑制する、チョッパー回路を用いてこのトレードオフ課題に取り組みことを計画した。

(B)低クロストークアナログ多重化技術による超多点入力回路の開発

上記研究計画(A)による限界まで狙ったアンプ小型化に加えて、さらなる高集積化に向けて入力段にアナログの信号多重化回路(マルチプレクサ、MUX)の搭載を計画した。通常であれば1チャンネル毎に低雑音アンプが必要となり、集積度が制限されてしまうが、MUXを用いて計測するチャンネルを逐次的に切り替えることで、アンプ搭載数を増やさずに多重化数倍の高集積化が期待できる。

しかしながら、各チャンネルの信号線が本来不必要なスイッチを介して接続することで、無視できないクロストーク雑音を発生してしまう懸念がある。また、MUXでのスイッチング動作もチョッパー回路と同様のキックバック雑音を発生する懸念も有る。そこでクロストーク低減スイッチを用いて、スイッチがオフ動作の時にはREF電圧(回路の中間電位もしくは生体電位)に固定することで(同時にバッファアンプは該当チャンネルで停止)、クロストーク雑音を抑制す

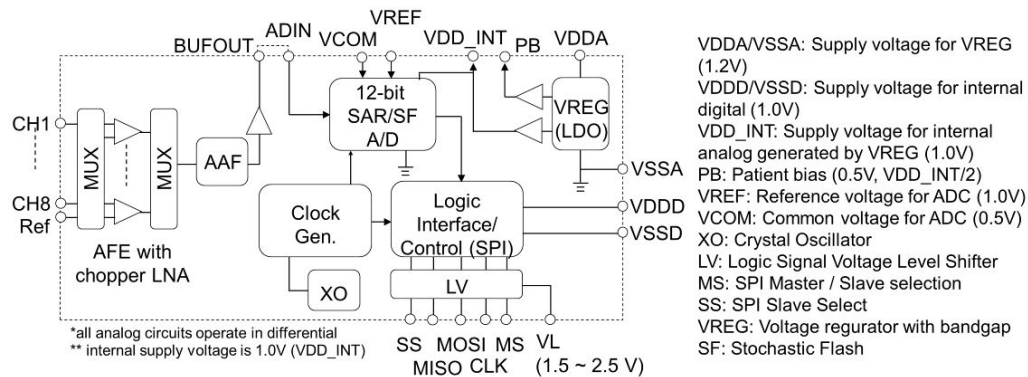
る。

(c) T型容量スプリットによる低入力容量・低雑音アンプの開発

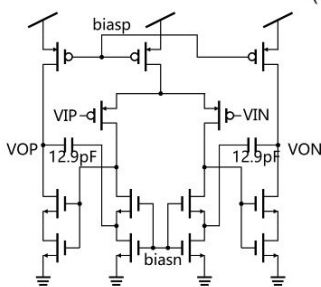
神経信号から必要な帯域成分のみ抽出するため、一般的には低雑音アンプで帯域制限する必要がある。この課題に対しては、ローカットオフ周波数 0.1Hz からハイカット周波数 1000Hz までの帯域制限を、ゲイン 40dB (1000 倍) で実現する低雑音アンプを開発済みである。しかしながら、容量を用いてゲインや帯域制限を実現する場合は、集積回路の製造歩留まり・誤差ばらつき等を考慮して、製造可能な最小サイズの容量よりも数十倍の大きさのユニット容量 (C_u) が必要であり、回路面積の増加を引き起こす課題があった。そこで本研究では T 型容量スプリット技術の利用を計画し、ユニット容量のサイズはそのまま、トータルの容量値を 1/10 程度まで削減可能な低雑音アンプの実現を目指した。

本研究では、ECoG 計測時にはチョッパー技術による低雑音化を行い、spike 計測時にはこの機能をオフして帯域を広げることが可能な LNA を設計し、これを 8ch 搭載した ASIC を開発した。同時に、12bit の ADC とバンドギャップレファレンスによる電圧レギュレータに加えて SPI によるシリアルインタフェースも搭載した。LNA のアナログ出力はマルチプレクサで時分割多重され、一つの ADC を用いてデジタル変換される。

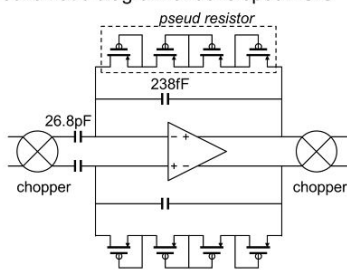
設計した ASIC は $0.13 \mu\text{m}$ CMOS プロセスを用いて試作され、チップ面積は $2.0\text{mm} \times 2.0\text{mm}$ 、電源電圧は 1.2V で、レギュレータにより生成される内部アナログ電源電圧は 1.0V であった (図 2(a)、(b))。ASIC を QFN によりパッケージングし、専用開発した QFN 評価ボードを用いて基本動作と特性の評価を行った (図 2(c))。結果を図 2(d) 及び (e) に示す。設計値として期待された 40dB の最大ゲイン値特性と、1-1000Hz のバンド特性が得られた。入力換算雑音は 1-800Hz のバンド幅で $4.4 \mu\text{Vpp}$ 、High- 帯域を想定した 70-180Hz のバンド幅では $1.6 \mu\text{Vpp}$ であった。



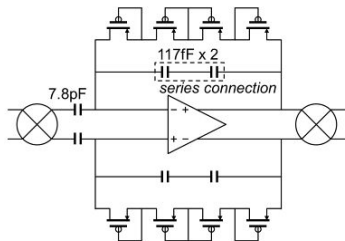
(a) schematic diagram of developed ASIC



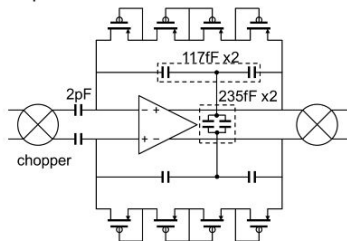
(b) circuit design of LNA



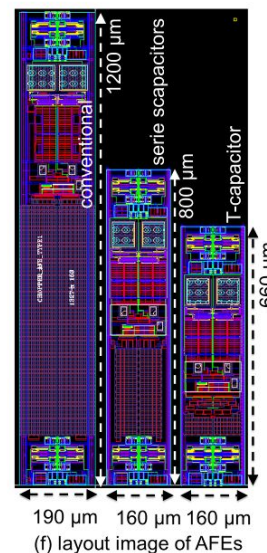
(c) 40 dB gain AFE with conventional capacitor feedback



(d) AFE with series capacitors



(e) AFE with T-capacitor



(f) layout image of AFEs

図 1 開発した ASIC のブロック図とレイアウト

(< 引用文献 : H. Ando, et al., Development of a neural recording ASIC for an ECoG and spike and its wireless system for BMI, EMBC2018, 2018.>)

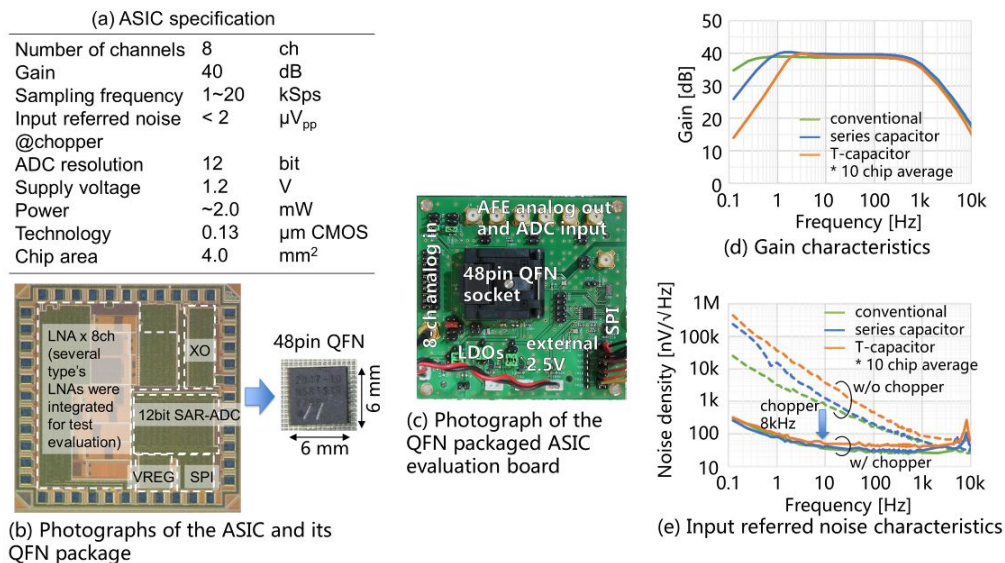


図 2 試作された ASIC の諸元と評価結果

(< 引用文献 : H. Ando, et al., Development of a neural recording ASIC for an ECoG and spike and its wireless system for BMI, EMBC2018, 2018.>)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

H. Ando, T. Kamata, K. Suzuki, S. Kameda, T. Suzuki and M. Hirata, Development of a neural recording ASIC for an ECoG and spike and its wireless system for BMI, EMBC2018, 2018.

〔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 : なし

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

該当なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 鈴木 隆文

ローマ字氏名 : Suzuki Takafumi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。