



Title	確率的A/D変換とデジタル支援技術を用いた生体信号センシング・システムに関する研究
Author(s)	平井, 雄作
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/101463
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名（平井 雄作）	
論文題名	確率的A/D変換とデジタル支援技術を用いた生体信号センシング・システムに関する研究

論文内容の要旨

近年、医療費の増加は多くの国々において大きな問題となっており、その主要な要因となっている循環器系疾患の早期発見のために、心電図検査の需要が高まっている。また、脳から得られた信号により外部の機械やコンピュータを制御する技術としてブレイン・マシン・インターフェースが盛んに研究されており、脳波計測の需要が高まっている。心電計や脳波計をはじめとする生体信号センサは、体表に貼り付け、または体内に埋め込み長時間動作させるため、小型で低消費電力であることが求められる。また、数μVから数mVの微小な信号を検出するため、高精度であることが求められる。

生体信号センサの小型化や低消費電力化を実現する上で、デジタル回路を中心とするシステムでは半導体製造プロセスの微細化が有効である。しかし、生体信号センサはアナログ的な物理量を扱うため、フロントエンドの増幅器などのアナログ回路やA/D変換器、D/A変換器などのミックロドシグナル回路を含む。これらの回路では、プロセス微細化に伴う電源電圧の低下や素子特性ミスマッチの増加により、ダイナミックレンジの確保が困難となる。従来はこれらの課題に対して、内部ノイズを低減する手法や誤差補正といった、誤差要因を抑制する技術が主流であった。しかし、更なる微細化・低電圧化に対応するためには、ノイズや素子特性ミスマッチに制限されない方式やデジタル回路を中心とした方式が望ましい。

そこで、本論文ではノイズや素子特性ミスマッチを積極的に利用した確率的A/D変換を用いて微細化・低電圧化に適した生体信号センシング・システムを実現する。確率的A/D変換は一定の条件下でノイズにより信号が増幅される確率共鳴現象を利用した方式であり、ノイズや素子特性ミスマッチに埋もれた信号を検出できることが特徴である。しかし、確率的A/D変換ではコンパレータのオフセット電圧やノイズを参照電圧として用いるため、他のA/D変換方式と組み合わせる場合、特有の課題が存在する。本論文では提案方式の特徴に合わせた誤差補正技術として機械学習を用いた最適化手法を提案する。また、デジタル回路中心のアーキテクチャを実現するため、デジタル支援技術を適用した方式を提案する。

本論文は全7章で構成される。第1章にて、序論を述べ、第2章では関連研究に基づいて確率的A/D変換とデジタル支援技術について説明する。

第3章では確率的A/D変換を応用した $\Delta \Sigma$ 型A/D変換器を提案する。提案方式は並列型確率的A/D変換器を $\Delta \Sigma$ 型A/D変換器の量子化器として利用し、その閾値をデジタル的に制御することで内部フィードバックD/A変換器の誤差を補正する。また、補正回路のパラメータ最適化の手法として遺伝的アルゴリズムを用いた手法について検討する。システムレベル・シミュレーションにより提案手法の有効性を示す。

第4章では高分解能A/D変換方式として、並列型確率的A/D変換器を用いた逐次比較型A/D変換器を提案する。提案方式では、コンパレータのオフセット電圧の統計性を利用し、動的に閾値を制御することで、内部D/A変換器の誤差を補正する。また、提案方式特有の誤差要因をモデル化し、誤差補正閾数を定義する。さらに誤差補正閾数のパラメータの最適化のためにベイズ線形回帰を用いた誤差補正技術を提案する。試作チップの評価により、提案方式の有効性を示す。

第5章ではノイズの統計性を利用した確率的A/D変換技術を逐次比較型A/D変換器に適用した方式を提案する。提案方式では低消費電力化のために一つのコンパレータを用いて最下位ビットの残差を繰り返し比較することで、ノイズレベル以下の信号の検出を可能とする。また、自動キャリブレーション技術を提案し、試作チップを用いた評価により、その有効性を示す。

第6章ではデジタル支援技術として、システムレベル・ショッピング技術を用いた多チャンネルのアナログ・フロントエンド回路を提案する。提案方式では、従来アナログ回路だけで構成されていたショッピング回路をA/D変換器を含むシステム全体に拡張し、アナログフィルタの削減を可能にする。また、提案方式では多チャンネルのアナログ・フロントエンド回路で問題となるチャンネル間クロストークを抑制する。さらに、試作チップを用いた評価により、その有効性を評価する。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の展望について述べる。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名	平井 雄作		
	(職)		氏名
論文審査担当者	主査	教授	尾上 孝雄
	副査	教授	三浦 典之
	副査	准教授	谷口 一徹
	副査	准教授	松岡 俊匡 (大阪大学大学院工学研究科)

論文審査の結果の要旨

本論文は、確率的A/D変換とデジタル支援技術を用いた生体信号センシング・システムに関する研究の成果をまとめたものであり、以下の主要な結果を得ている。

1. **ΔΣ A/D変換器への確率的A/D変換の適用の検討**

ΔΣ A/D変換器に対して、コンパレータのオフセットの統計性を利用した並列型確率的A/D変換器(Stochastic Flash ADC, SF-ADC)を適用した方式を提案している。内部量子化器としてSF-ADCを用いることで、微細化・低電圧化に適した方式を実現している。また、SF-ADCを用いたプログラマブル量子化器により内部D/A変換器の誤差を補正する手法を提案している。さらに、遺伝的アルゴリズムにより量子化特性を最適化する手法を提案している。システムレベル・シミュレーションにより、提案方式の有効性を確認し、内部D/A変換器の誤差補正が有効であることを示している。

2. **確率的A/D変換と機械学習を用いた生体信号センシング・システムの提案**

高分解能A/D変換方式として、SF-ADCを用いた逐次比較型A/D変換器を提案している。提案方式ではコンパレータのオフセットの統計性を利用して、動的に閾値を制御することで内部D/A変換器の誤差を補正する手法を提案している。また、提案方式について誤差補正関数を提案し、機械学習アルゴリズムを用いた誤差補正技術を提案している。試作チップの評価により、提案方式の有効性を示している。

3. **ノイズ統計を用いた確率的A/D変換の提案**

ノイズの統計性を利用した確率的A/D変換技術を逐次比較型A/D変換器に適用した方式を提案している。提案方式では一つのコンパレータを用いて、逐次比較型A/D変換器の残差を繰り返し比較することで、ノイズレベル以下の信号に対して分解能を確保している。また、ノイズ統計のばらつきを調整するキャリブレーション技術を提案している。試作チップの評価により、提案方式の有効性を確認している。

4. **システムレベル・ショッピングを用いた多チャンネルAFEの提案**

デジタル支援技術として、システムレベル・ショッピング技術を用いた多チャンネルのアナログ・フロントエンド(Analog Front End, AFE)回路を提案している。従来アナログ回路だけで構成されていたショッピング回路を、A/D変換器を含むシステム全体に拡張し、アナログフィルタの削減を可能にしている。試作チップの評価により、提案方式により1/fノイズが抑制できることを確認している。また、チャンネル間クロストークが抑制できることを示している。

以上のように、本研究による確率的A/D変換とデジタル支援技術を用いた生体信号センシング・システムに関する一連の研究成果は、生体信号センシング・システムの小型化・低コスト化・低消費電力化を達成する上で有用なものである。本成果は、心疾患の早期発見など、医療技術の進歩やサービスの普及に貢献するものと期待できる。したがって、博士（情報科学）の学位論文として価値のあるものと認める。