

Small-Area, Low-Power Circuits and Systems for Ultrasound Matrix Probes

September 2025

Shinya Kajiyama

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	甲	第	号	氏 名	梶山 新也
主 論 文 題 名 :					
Small-Area, Low-Power Circuits and Systems for Ultrasound Matrix Probes (超音波マトリックスプローブ向け小面積・低電力回路およびシステム)					
(内容の要旨)					
医療用超音波画像診断は、安全性、リアルタイム性、低コストのため、広く使用されているモダリティであるが、画質や検査スループットが検査者の手技に依存する問題がある。本研究では、3次元撮像により手技依存の低減が可能な2次元アレイマトリックスプローブに内蔵される特定用途向け集積回路(ASIC)に向けて、小面積化、低消費電力化に必要な技術を検討した。さらに、生体深部の高空間分解能と信号対雑音比(SNR)を両立させるために必要な技術を検討した。 第1章では、背景とASIC内蔵マトリックスプローブに関する課題を概説した。 第2章では、システム要求からASIC仕様の検討を行った。 第3章では、送信と受信で時分割共用可能なコンフィギュラブル送受信ビームフォーマー回路の詳細を述べた。この回路は、ASIC内の3072チャンネル送受信器各々に実装する必要がある。回路面積と消費電力に大きな影響を与える。デジタル送信バス信号を、受信用に用意された並列スイッチト・キャパシタ型遅延回路によって遅延させることで、送信専用の先入れ先出し(FIFO)メモリを不要とし、送受共用により小面積で低消費電力な構成を可能とした。提案する回路方式により、$300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$の1チャンネル送受信回路面積とチャンネル当たり0.74 mWの消費電力を達成した。 第4章では、低圧受信回路を送信高圧パルスから保護する送受分離スイッチ(TRSW)の詳細について述べた。わずか3個の高電圧MOSFETを使用し、小面積と低消費電力を実現した。提案したダイナミック・シャント・アーキテクチャにより、低電圧MOSFET回路だけでスイッチのオフ状態を保証し、高電圧MOSFETは1つだけでオン/オフ制御を可能とした。さらに、3072チャンネル送受信器の信号導通を3072個の電極に針当てすることなくテストするために、チャンネル毎のループバックテスト機能を実装した。 第5章では、チャープ波形を送信し、受信側でパルスを圧縮することにより、バースト送信におけるSNRと軸方向空間分解能間のトレードオフを解消し、信号増強と空間分解能の両立を可能とする連続時間パルス圧縮器(CTPC)の詳細について述べた。受信信号を、遅延が周波数に対して線形に変化するCTPC回路を通過させることにより時間領域で圧縮し、パルスのピークが6.7 dB向上することを示した。さらに、音響測定と輝度(B)モードイメージングにより空間分解能の向上を確認した。 第6章では、本研究の結果をまとめ、さらに展望について述べた。					

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ “KOU” ☐ “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	KAJIYAMA, Shinya
Thesis Title			
Small-Area, Low-Power Circuits and Systems for Ultrasound Matrix Probes			
Thesis Summary			
Medical ultrasound imaging diagnosis is a widely used modality due to its safety, real-time capability, and low cost. However, it also involves issues that depend on the examiner's skills, which can affect image quality and examination throughput. This study examines the technologies required for small-area and low-power dissipation in application-specific integrated circuits (ASICs) for two-dimensional array matrix probes capable of volumetry imaging without skills. Additionally, it explores the technologies required to achieve both high spatial resolution and signal-to-noise ratio (SNR) in the deep regions of the human body. Chapter 1 summarizes the background and issues related to ASIC-embedded matrix probes. Chapter 2 examined ASIC specifications based on system requirements. Chapter 3 describes the details of the novel time-shared configurable transmit (TX)/receive (RX) beamformer, which is implemented in each of the 3072-channel transceivers in the ASIC and has a significant impact on area and power dissipation. The digital TX bus signal is delayed by parallel delayers for RX, allowing for a compact and low-power configuration without requiring an extra first-in-first-out (FIFO) memory. The proposed circuit configuration achieved a single-channel transceiver circuit area of $300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$ and power dissipation of 0.74 mW/channel. Chapter 4 describes the details of the novel TX/RX isolation switch (TRSW), which protects low-voltage RX from high-voltage TX pulse, using only three high-voltage MOSFETs, resulting in a small area and low power operation. The proposed dynamic shunt architecture ensures the switch is in the off state with only a low-voltage MOSFET circuit and requires only one high-voltage MOSFET for on/off control. Furthermore, a per-channel loopback test function is provided to verify the signal continuity of the 3072-channel transceiver without probing the 3072 electrodes. Chapter 5 describes the details of a continuous-time pulse compressor (CTPC) that achieves both signal enhancement and higher axial spatial resolution by transmitting a chirp waveform and compressing pulses at the RX, thereby resolving the trade-off between SNR and axial spatial resolution in burst TX. The RX signal is compressed in the time domain by passing it through a proposed CTPC whose delay varies linearly with frequency, and the pulse peak is enhanced by 6.7 dB. Furthermore, improvement in spatial resolution was verified by acoustic measurements and brightness (B)-mode imaging. Chapter 6 summarizes the results of this study and further discusses prospects.			