

# 博士論文要旨

## 論文題名： I o Tシステムに向けた 集積化CMOS-MEMSデバイスにおける 容量センシングの高感度化に関する研究

シマムラ トシシゲ  
島村 俊重

本研究は、I o Tシステムに向けた集積化CMOS-MEMSデバイスにおける容量センシングの高感度化に対し、CMOS-MEMSインターフェースを伴う容量センサ回路において、寄生素子の補償、未知パラメータ抽出のモデリング、異種センサー一体化のレイアウトに対する課題を克服することを目的とした。

第2章「集積化CMOS-MEMSデバイスにおける容量センシングの高感度化技術」では、基盤技術として、CMOS-MEMSインターフェースの相互作用機構により容量センシングを高感度化させる技術のコンセプトを提案した。パルス変調方式の容量センサ回路は、テクノロジノードが大きい場合でも回路面積を抑えるのに適しており、プロセスコストに対する費用対効果が大きいことを示した。CMOS-MEMSインターフェースの構成例として、寄生素子補償機能、統合設計シミュレーション機能、統合設計レイアウト機能について説明し、容量センサ回路の高感度化に有効であることを示した。

第3章「寄生容量を伴う可動体容量のリアルタイム検出手法」では、寄生素子の補償の課題を解決するために、CMOS LSI上に積層されたMEMSデバイスを制御するための新しい容量検出手法を提案した。提案手法の有効性を評価するために、 $0.6\mu\text{m}$  CMOSプロセスとMEMSプロセスを用いてテストチップを作製した。提案手法を用いることで検出容量と出力電圧の比で定義される検出感度が、提案手法を用いない場合と比べて6倍に向上する結果を得た。

第4章「寄生直列抵抗を伴う被検体容量による表面形状認識手法」では、寄生素子の補償の課題を解決するために、センサプレートに隣接して配置されたエンハンスメント電極と電圧制御回路で構成するエンハンスメント回路を提案した。提案回路の有効性を評価するために、 $0.5\mu\text{m}$  CMOSプロセスとセンサプロセスでテストチップを作製した。電圧制御回路としてインバータ回路を使用し、ピクセルサイズを増加させずにエンハンスメント回路を追加した。テストチップにより乾燥した指でも鮮明な画像を良好なコントラストで取得できた。提案回路により、指の表面状態によらず鮮明な指紋画像の取得が可能とな

った。

第5章「寄生並列抵抗を伴う被検体容量の周波数特性計測手法」では、寄生素子の補償の課題を解決するために、生体インピーダンスを検出するための2つの電極の一方を接地電位として指に流れる電流を指に印加する電圧にフィードバックする単一利得バッファを用いた回路構成を提案した。インピーダンス検出回路が人間の指の表面状態の範囲のインピーダンスを検出できることを解析的に示した。インピーダンス検出回路のテストチップを、 $0.5\ \mu\text{m}$  CMOSプロセスとセンサプロセスを用いて作製した。振幅データは、ネットワークアナライザの測定値と一致すること、指の表面状態の異なる湿潤の指と乾燥した指を検出できることを確認した。

第6章「複合構造を有するセンサと電荷非破壊センサ回路の設計統合手法」では、未知のパラメータを抽出するモデリングの課題を解決するために、振動センサが振動検出時に可動体に生じる運動エネルギーを利用することで電力を消費せずにメカニカルに電荷を転送する振動検出手法について述べ、この検出手法のための振動センサとセンサ回路の設計統合手法を提案した。連続励振用とインパルス励振用の振動センサ回路2種を搭載したテストチップを $0.35\ \mu\text{m}$  CMOSプロセスを用いて作製した。抽出したパラメータを用いたシミュレーション結果が測定結果の全領域で一致することにより提案手法の妥当性を示したことで、振動増幅機構を含めた振動センサを設計するためのモデルを取得した。提案手法は、評価のために複雑な構造のセンサを接続する必要があるセンサ回路の設計に有効であると結論づけた。

第7章「容量周波数特性の計測機能を有する表面形状認識センサLSI」では、寄生素子の補償の課題を解決するために第5章で説明したインピーダンス検出回路を用いることにより、指紋センサのピクセルを置き換えて配置するとともに、制御線を指紋センサ回路と共用化して、チップサイズを増加させることなく、異種センサ一体化のレイアウトの課題を解決する手法を提案するとともに、未知のパラメータを抽出するモデリングの課題を解決するために第6章で説明したモデリング手法を用いて合成構造を有する電極モデルを提案し、応用技術として、容量の周波数特性を計測する機能を内蔵した表面形状認識センサLSIを提案した。容量周波数特性を計測するインピーダンス検出機能を備えた指紋センサのテストチップを、 $0.5\ \mu\text{m}$  CMOSプロセスとセンサプロセスを用いて作製した。テストチップにより鮮明な指紋画像を取得でき、ESD耐性も低下しないことを示した。生体指と偽造指のインピーダンスの周波数依存性の違いを検出した。これらの結果から、提案回路が不正検出のためのインピーダンス検出機能を指紋センサLSIに追加するのに有効であることを示した。

## **Abstract of Doctoral Dissertation**

### **Title: Sensitivity Improvement of Capacitive Sensing on Integrated CMOS-MEMS Devices for IoT Systems**

シマムラ トシシゲ

SHIMAMURA Toshishige

This research is aimed to overcome the problems, which is composed of compensation of parasitic elements, modeling of unknown parameter extraction, and layout of heterogeneous sensor integration, in capacitive sensing circuits with CMOS-MEMS interface for sensitivity improvement of capacitive sensing in integrated CMOS-MEMS devices for IoT systems.

In Chapter 2, "Techniques for Sensitivity Improvement of Capacitance Sensing in Integrated CMOS-MEMS Devices," a concept of technology for enhancing the sensitivity of capacitive sensing by the interaction mechanism of the CMOS-MEMS interface was proposed as a basic technology. The capacitive sensing circuit using the pulse modulation is suitable for suppressing the circuit area even when the technology node is large, and is cost-effective for the process cost. Parasitic element compensation function, integrated design simulation function, and integrated design layout function are explained as examples of the configuration of the CMOS-MEMS interface, and these functions are effective for enhancing the sensitivity of the capacitive sensing circuit.

In Chapter 3, "Real-Time Detection of Movable Capacitor with Parasitic Capacitance," a new capacitance detection method was proposed for controlling MEMS devices stacked on CMOS LSI to solve the problem of compensation of parasitic elements. To evaluate the effectiveness of the proposed method, a test chip was fabricated using a 0.6  $\mu\text{m}$  CMOS process and a MEMS process. By using the proposed method, the sensitivity, which is defined by the ratio of the detected capacitance to the output voltage, is improved by six times compared with the case without using the proposed method.

In Chapter 4, "Surface Shape Recognition Method Using Specimen Capacitances with Parasitic Series Resistance," an enhancement circuit composed of an enhancement electrode and a voltage control circuit arranged adjacent to a sensor plate was proposed to solve the problem of compensation of parasitic elements. To evaluate the effectiveness of the proposed circuit, a test chip was fabricated in a 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS process and a sensor process. An inverter circuit was used as the voltage control circuit, and an enhancement circuit was added without increasing the pixel size. With the test chip, a clear image can be obtained even with a dry finger with good contrast. The proposed circuit enables the acquisition of a clear fingerprint image regardless of the surface state of the finger.

In Chapter 5, "Frequency characteristic measurement method of the specimen capacitance with parasitic parallel resistance," a circuit configuration using a unity gain buffer in which one of two electrodes for detecting bioimpedance is used as a ground potential and the current flowing to the finger is fed back to the voltage applied to the finger was proposed to solve the problem of compensation of parasitic elements. The analysis showed that the impedance detection circuit can detect impedance in the range of surface states of a human finger. A test chip of the impedance sensing circuit was fabricated using a 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS process and a sensor process. The amplitude data agreed with the measurements of the network analyzer and that wet, and dry fingers with different surface conditions of the fingers were detected.

In Chapter 6, "Design integration method of sensor with composite structure and charge nondestructive sensing circuit," in order to solve the problem of modeling to extract unknown parameters, a vibration detection method in which a vibration sensor transfers electric charge to a mechanical device without consuming electric power by using kinetic energy generated in a movable element during vibration detection was described, and a design integration method of vibration sensor and sensing circuit was proposed for this detection method. A test chip with two vibration sensing circuits for continuous and impulse excitation was fabricated using a 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS process. The validity of the proposed method was shown by the fact that the simulation results using the extracted parameters agreed in all regions of the measurement results, and a model was obtained for designing a vibration sensor including a vibration amplification mechanism. The proposed method was effective for the design of sensing circuits where sensors with complex structures need to be connected for evaluation.

In Chapter 7, "Surface Shape Recognition Sensor LSI with Capacitance Frequency Characteristics Measurement Function," a method was proposed to solve the problem of layout of heterogeneous sensor integration without increasing the chip size by replacing and arranging the pixels of the fingerprint sensor, and sharing the control line with the fingerprint sensing circuit was proposed to solve the problem of compensation of parasitic elements by using an impedance detection circuit described in Chapter 5, and a method was proposed to solve the problem of layout of heterogeneous sensor integration without increasing the chip size by sharing the control line with the fingerprint sensing circuit, and an electrode model with a synthetic structure using the modeling method described in Chapter 6 was proposed to solve the problem of modeling to extract unknown parameters, and a surface shape recognition sensor LSI with built-in function to measure the frequency characteristics of capacitance was proposed as an application technology. A fingerprint sensor test chip with an impedance sensing function for measuring capacitive frequency characteristics was fabricated using a 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS process and a sensor process. The difference in the frequency dependence of the impedance between the real finger and the fake finger was detected. The proposed circuit is effective to add an impedance detection function for fraud detection to the fingerprint sensor LSI.