

人体検知用高精度静電容量センサモジュール

電子電装開発センター 戸倉 武¹・中村 靖²・明石 一弥³

Long-Range Human Body Sensing Module with Electric Field Sensor

T. Togura, Y. Nakamura, and K. Akashi

当社では、人体の接近や接触を検知するための自動車用静電容量センサモジュールの開発を進めている。今回、その高精度化について検討を行い、2 fF以下のセンサモジュールの静電容量検知精度を実現し、既存の静電容量センサと比較してより遠い300 mmの位置にある人体を検出することが可能となった。また、車室内におけるセンサ電極構造を最適化することで、ノイズ耐性や指向性を改善した。さらに、センサモジュールを試作して車室内での感度を評価した結果、試作したモジュールはセンサ電極から300 mm以上離れた手を検知できることを確認した。

We have developed a long-range version of human body sensing module. This module has a high-measurement accuracy with a capacitance of less than 2 fF and can detect human bodies from a greater distance compared with conventional sensors. Furthermore, by optimizing the electrode structure of this module, noise tolerance and directivity have been improved. We produced some prototypes of this sensor module and evaluated their sensitivity in a vehicle. The results show that the prototype can detect a hand at a distance of 300 mm from the sensor electrode.

1. ま え が き

近年、人体の接近や接触を検知するセンサとして静電容量センサが注目されており、タッチパッドやドアハンドルスイッチなどで実用化されている。当社では、この静電容量センサに注目し、センサの要素技術である静電容量検知回路、フレキシブルプリント基板やメンブレンシートなどのセンサ電極材料¹⁾、電極構造、実装技術²⁾、接続技術³⁾⁴⁾、静電容量解析技術などの開発を行っている。静電容量センサは、等価的にグラウンドとみなせる人体とセンサ電極の間に発生する電界を測定することから、センサ電極を意匠パネルや布などの誘電体の下に配置することができる。したがって、静電容量センサは設計自由度の高い入力デバイスであるという大きな利点がある。さらにセンサ電極は単純に平面の導体であればよいため、センサモジュールを安価でかつ薄く構成することができ、プリント基板にセンサ電極、検知回路、そのほかの電子回路を一体化することも可能である。しかしながら、従来の人体検知を目的とした静電容量センサは、人体の接触またはごく近い接近を検出するアプリケーションに限

定されている。そこで、当社では、高精度な静電容量センサモジュールの開発を進め、車室内での人体の検知距離を300 mm以上にまで拡張することに成功した。このセンサモジュールを機器の入力デバイスに適用することにより、ユーザが操作対象の機器を見ないで手や足を動かすだけで操作させることが可能になる。また、このセンサモジュールは危険なエリアに人体が入った場合に動作を停止させるような安全装置にも適用することができる。

本報では、当社が開発した人体検知用高精度静電容量センサモジュールについて報告する。

2. 静電容量センサの原理

人体検知用の静電容量センサは、センサ電極から等価的にグラウンドとみなせる人体までの静電容量を測定する。正確には人体はグラウンドではなく、グラウンドとの静電容量を持つことになるが、人体はセンサ電極と比較して十分大きく、かつ空気や誘電体と比較して高い導電率を有しているため、本センサを議論する場合には、人体はグラウンドとみなすことができる。図1にセンサの基本構成と人体がセンサ電極の近くに存在しないときに観測される静電容量のイメージを示す。静電容量センサは導体であるセンサ電極に静電容量検知回路が接続され、観測された静電容量を電圧値に変換して出力する。

1 自動車電装開発部

2 自動車電装開発部主席部長

3 自動車電装開発部次長

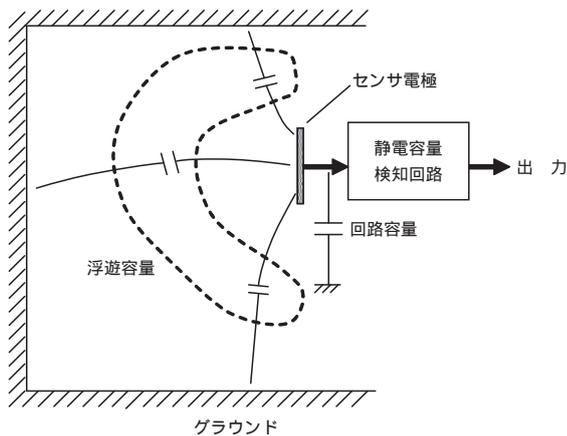


図1 人体が近くに存在しないときの浮遊容量と回路容量
Fig. 1. Floating capacitance and stray capacitance without a human body in proximity.

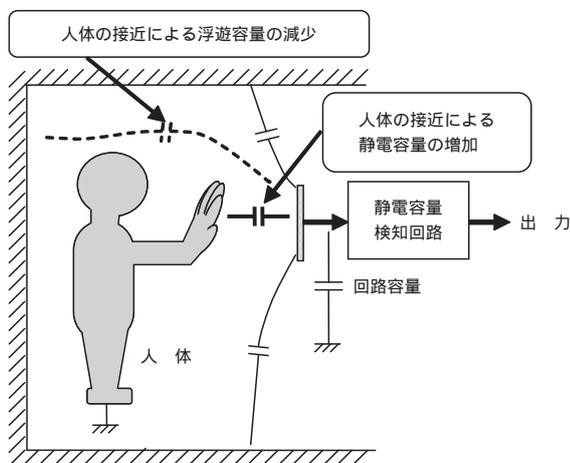


図2 人体がセンサ電極に接近したときの静電容量の変化
Fig. 2. Change in capacitance with the proximity of a human body.

図1のように近くに人体が存在しない場合、センサ電極と周囲にある地面、壁、車体などのグラウンドとみなせる物体との間に浮遊容量を持つことになる。さらに、静電容量検知回路では、その浮遊容量と検知回路自体がもつ静電容量が加算された値が測定される。図2に人体が接近した場合に観測される静電容量のイメージを示す。静電容量と人体との結合による電気力線が増加する一方、人体が現れたことにより、周囲のグラウンドと結合していた電気力線が減少する。その結果として、静電容量検知回路では、人体の接近によって増加した静電容量から浮遊容量の減少分を減算した値が観測されることになる。このとき、人体がセンサ電極に十分接近している場合は、浮遊容量の減少分に対して人体の接近による静電容量の増加分が十分大きくなるので、浮遊容量減少分は考慮する必要がない。したがって、接触あるいはごく近い距離の人体を検知する静電容量センサにおいては、人体が接近した場合の静電容量増加量だけを検討すればよい。しかしながら、より遠方にある人体を検出することを目的とする高精度静電容量センサモジュールでは、浮遊容量

の減少分を無視することができないため、センサ電極の構造や感度の検討においては、接近する人体だけでなく周囲に存在する金属や誘電体を含めた解析が必要となる。

なお、図1、図2の例では、人体の有無で説明したが、あらかじめ人体が存在して、そこからセンサ電極に手や足が接近した場合を検討する場合は、図1の浮遊容量には手が接近する前の人体との結合が含まれ、図2では手や足が接近することによって増加する静電容量と、それにより減少する浮遊容量を検討すればよい。

3. 目標性能

車室内で人が機器を操作しようと手を動かし始めたとき、インストゥルメントパネルや天井などに設置されている機器までは多くの場合300 mm以下であるといえる。そこで、それらの動作を検知することを目標とし、開発する静電容量センサモジュールの目標性能は、「車室内において300 mm以上離れた手のひらを検知」と設定した。

4. 電界シミュレーションによる解析

静電容量センサモジュールの目標性能を満足するために、必要な測定精度を有限要素法による電界シミュレーションにより検討した。上述のようにより遠方の人体の検出を検討するためには、周囲の金属や誘電体を含めた解析が必要となる。まずは、その影響が無視できる環境の約3 m × 3 m × 3 mのシールドルーム内での解析を行った。図3にそのシミュレーション結果の例を示す。この図は、センサ電極に人体の手が接近したときのセンサ電極と人体の周辺の電界分布（濃淡で図示）と等電位線を示したものである。図3からセンサ電極で検出される静電容量値を算出して、センサ電極と手の間の距離に対する静電容量変化量の特長（以下、静電容量変化量の距離特性）を示した結果を図4に示す。ここで静電容量増加量とは、手が接近したときの静電容量から手が接近していないときの静電容量の差分で定義される。この結果より、センサ電極と手の間の距離が増加するにつれて静電容量増加量は減少し、例えば50 mm × 50 mmの電極を用いた場合に300 mmの位置に手が存在する場合には約10 fFの静電容量増加量となる。

次に、実際にセンサモジュールの設置が想定される車室内におけるシミュレーションを行った。車室内の場合、車体や意匠パネル等の金属や誘電体による影響は無視できないため、それらの条件を模擬してシミュレーションを行った。なお、センサ電極の位置は、図5に示すようにインストゥルメントパネルと天井とした。前者は手を近づけると現れるような隠しスイッチへの適用を、後者は照明用のスイッチへの適用を想定したセンサ電極配置の例である。図6に車室内における静電容量変化量の距離特性を示す。なお、両者の配置ともシミュレーション結果はほぼ一致しているため、図ではインストゥルメン

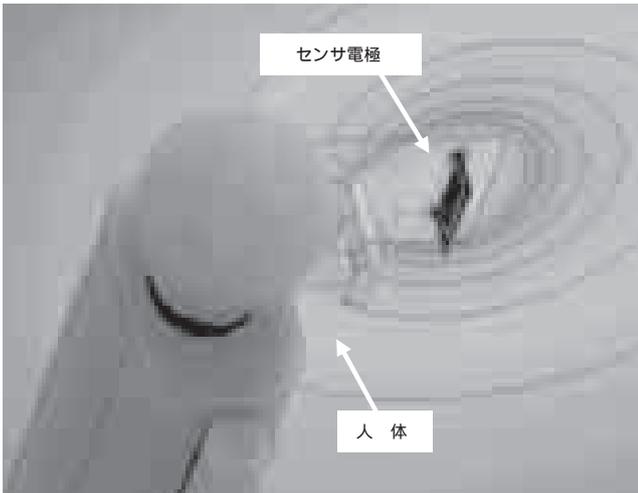


図3 電界シミュレーション結果の例
Fig. 3. Example simulation of electric field distribution.

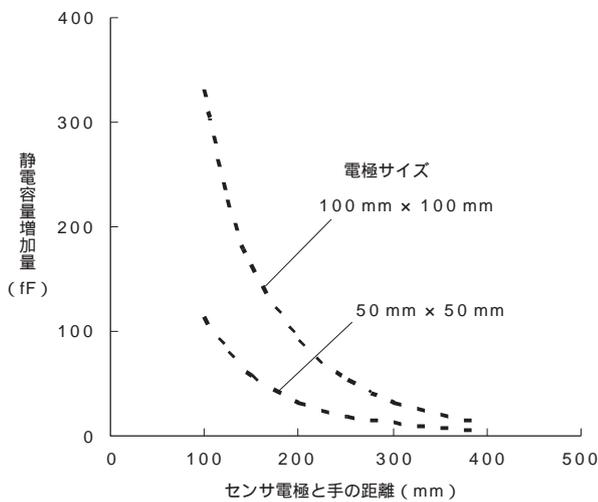


図4 シールドルーム内における
静電容量増加量の距離特性のシミュレーション結果
Fig. 4. Results of simulation of changes in capacitance.

トパネルの場合のみを示し、それを車室内における結果とした。この結果と図4を比較すると、近くに影響物のないシールドルーム内の検出値と比較して、車室内では同一距離における検出値が1/3～1/4程度に減少していることがわかる。これは、車室内ではセンサ電極が車体(すなわちグラウンド)に非常に近い位置に配置されており、手が接近する前の初期状態ですでに車体との静電容量結合が大きく、手が接近したときに増加する電気力線が少なくなることが原因である。また、図6から車室内で手を検知する場合、電極からの距離が300mm以上になると変化量が非常に小さくなること、および300mmの距離では2fF程度の静電容量増加量の測定精度が必要であることがわかった。

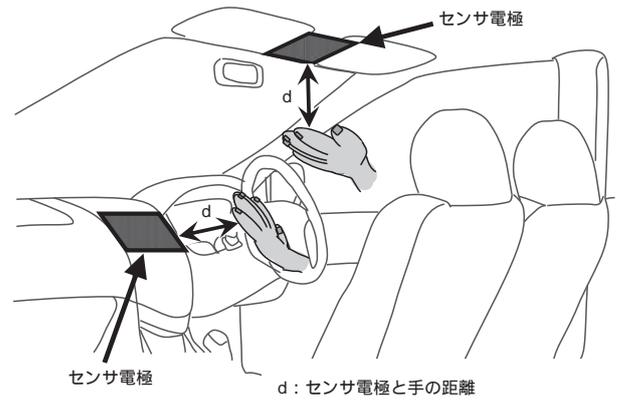


図5 車室内でのセンサ電極の配置
Fig. 5. Placement of sensor electrodes in the test vehicle.

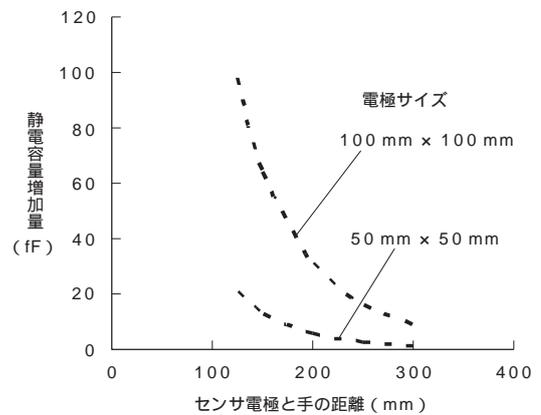


図6 車室内における静電容量増加量の
距離特性のシミュレーション結果
Fig. 6. Results of simulation in the test vehicle.

5. センサモジュールの試作

5.1 試作品の仕様とブロック図

前章のシミュレーション結果に基づき、静電容量センサモジュールの静電容量増加量の測定精度は2fF以下を目標とした。表1に試作品の仕様を示す。静電容量-電圧変換(C-V変換)効率(検知回路の可変増幅器の増幅度を変えることで1～16mV/fFに設定可能とした)。

図7に試作品のブロック図を示す。検知回路は、静電容量-電圧変換(C-V変換)回路、ローパスフィルタ(LPF)、可変増幅回路、温度補償回路、オフセット回路およびシールドドライブ回路から構成され、それを1つのIC内に組み込んだ。C-V変換回路の出力はオフセット回路で電圧をシフトし、LPFにてノイズを除去した後、可変増幅回路に入力される。ここで、可変増幅回路の増幅度によりC-V変換効率が決定されるが、その増幅度は外部から任意に設定可能とした。また、温度補償回路にてセンサ電極の温度変動を相殺可能とした。今回試作した静電容量センサモジュールでは、センサ電極およびシールド電極と検知回路をフレキシブルプリント基板上に一体化して配置した。

表 1 試作品の目標仕様
Table 1. Specifications of prototype.

項目	単位	Min.	Typ.	Max.	備考
最大検知距離	mm	300			手の検知にて
測定精度	fF			2	静電容量増加量
C-V 変換効率	mV / fF	1		16	
電源電圧	V	2.7	5	5.5	
動作温度範囲		- 40		85	

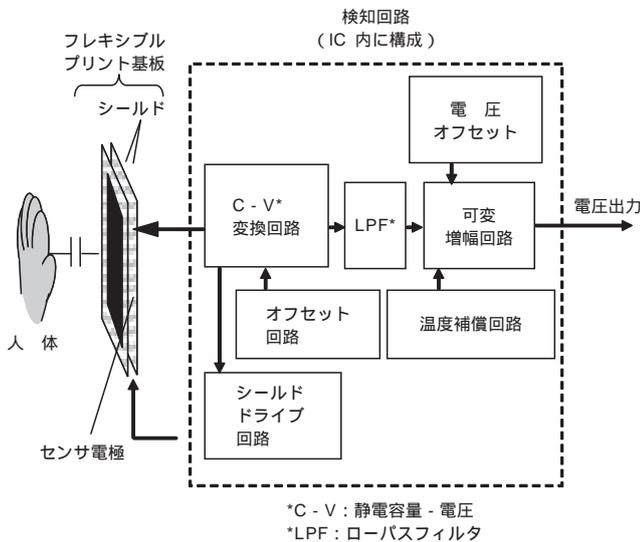


図 7 試作した静電容量センサモジュールのブロック図
Fig. 7. Block diagram of prototype of sensor module.

5.2 試作品の性能

図 8 にシールドルーム内における静電容量増加量の距離特性を示す。ここでセンサ電極の寸法はシミュレーションと同じ 50 mm × 50 mm と 100 mm × 100 mm とした。図 8 の結果より、シミュレーション結果と試作品の測定結果はよく一致していることがわかる。さらに、車室内において同様に静電容量増加量の距離特性を測定した結果を図 9 に示す。この結果より、試作品は目標性能である検知距離 300 mm 以上と測定精度 2 fF 以下を満足していることがわかった。さらに、図 8 と図 9 におけるシミュレーション結果と測定結果を比較すると、両者はシールドルーム内および車室内のどちらにおいても 5 % 以下の偏差で一致した。したがって、アプリケーションごとに異なるセンサ電極構造の最適設計と検知回路の設定値の調整に対して、電界シミュレーションを有効に活用することができる。

6. アプリケーション

試作した静電容量センサモジュールは人体とセンサ電極の距離に依存した電圧を出力することができる。このため、手や足の空間的な動きで操作するスイッチや、人体が危険エリアに接近した時に動作を停止させる安全装置などへの適用が期待できる。以下に本センサモジュールの適用例を示す。

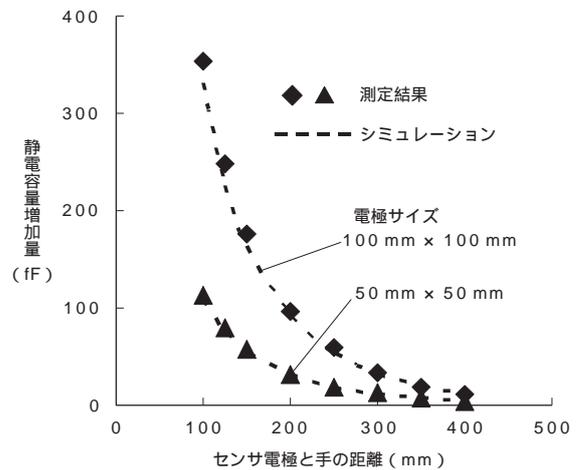


図 8 シールドルーム内での静電容量増加量の距離特性
Fig. 8. Capacitance versus distance in the shielded room.

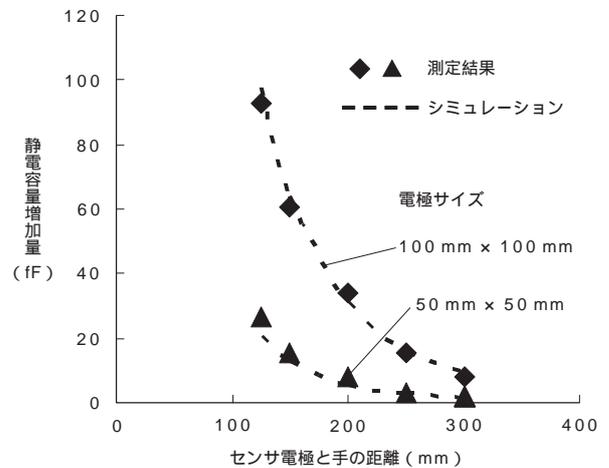


図 9 車室内での静電容量増加量の距離特性
Fig. 9. Capacitance versus distance in vehicle.

ルの適用例を示す。

- ・ ルームランプ：手を一定距離以内に近づけたとき最大輝度で点灯し、その後手の接近にともない、距離に応じて減光するような調光装置。
- ・ 隠しスイッチ：通常は意匠パネル等に隠れているが、ユーザが手を近づけた時にスイッチが現れる装置。
- ・ 挟み込み防止装置：パワーシート、パワーライドドア、パワーウィンドウなどで人体が接触したり巻き込まれたりする領域に存在する場合に動作を止める装置。

7. む す び

人体検知用の高精度静電容量センサモジュールを開発した。電界シミュレーションにより、車室内において 300 mm の距離の人体の接近を検出するには、静電容量増加量の測定精度を 2 fF 以下とする必要があることがわかった。さらにシミュレーション結果をもとに静電容量

センサモジュールを試作した結果、車室内でセンサ電極から 300 mm の位置にある手を検出可能であることを確認した。また、シミュレーション結果と試作品の測定結果はよく一致しており、センサモジュールの最適設計に電界シミュレーションの利用が有効であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 平田ほか：狭ピッチコネクタ対応メンブレン配線板，フジクラ技報，第 111 号，pp.34-38，2006
- 2) 関 善仁：FPC における実装技術動向，フジクラ技報，第 108 号，pp.35-38，2005
- 3) 中島ほか：自動車用 FPC カードエッジコネクタ，フジクラ技報，第 111 号，pp.45-47，2006
- 4) 高見ほか：はんだ接続による基板間接続技術，フジクラ技報，第 111 号，pp.26-30，2006