対象物検知用平面型静電容量センサの特性解析

非会員 瀬戸 学雄* 正員 信太 克規**

The Property Analysis of a Plane Type Capacitance Sensor for Object Detection

Michio Seto*, Non-member, Katsunori Shida**, Member

The authors focused on the applicability of capacitance sensors as a human body detecting/monitoring means to realize high-performance equipment to assist in caring for the aged. As the human body contains a high percentage of water, it has a high specific inductive capacity to be detected, that sets it apart from objects such as plastics. This report describes the positive result obtained by using FEA (Finite Element Analysis) to determine how capacitance is affected by parameters such as the interval between measurement electrodes, the distance from an object, and differences in specific inductive capacity of objects with respect to a pair of square electrodes arranged on a plane. Capacitance was calculated by preparing a 2-dimension model of plane type capacitance sensor utilizing the general-purpose FEA software ANSYS. As a result, it was found that increasing the interval between measurement objects enables them to be detected from a greater distance. This distance is approximately equal to that between electrode centers, and is an important factor for detection limit distance defining the performance of plane type capacitance sensors. Furthermore, this paper shows that the sensor is impervious to intervening material, which may exist between the sensor and object, and that the sensor is capable of detecting the presence of a person, due to the high dielectric constant of the human body.

キーワード：平面型静電容量センサ，補助電極，有限要素法

Keywords: plane type capacitance sensor, dummy electrode, finite element method

1. はじめに

2025年には、国民の4%強が介護を必要とする高齢社会になると推定されている。この本格的な高齢社会の到来を迎え、障害者や寝たきり老人の増加などから、介護、福祉機器への需要が高まっている。車椅子や介護ベッドなどはすでに実用化・普及の段階に入っているが、要介護老人や障害者のニーズが多様化するにつれ、より高度な介護・福祉機器の開発が急がれている。

福祉・安全機器の人体検知技術には電気抵抗、静電容量、超音波、赤外線、CCDカメラなどを利用したものがある⁽¹⁾⁽²⁾。これらの中で、接触式の場合に生物／非生物を判別するには静電容量型センサが有効である。なぜなら、静電容量は誘電率と比例関係にあり、表1に示すように、人体は水分が多く含まれているゆえ、比誘電率が高く、検知対象物と

して樹脂等の物体と明確な差を示すからである。なお、表1で用いている樹脂Aはプラスチック等、樹脂Bはウレタン等を想定しており、人相当の比誘電率51.7は衣服を着用した成人男性の静電容量より仮定した。さらに、平面型静電容量型センサは電極を平面的に設置できるゆえ、機器内部へ埋設するという利点がある。ただし、センサと対象物の間にクッション材などの介在物が存在する場合にも人体検知が正確に行われることが要求される。

本稿は、ある平面上に配置された一対の矩形電極による静電容量値が測定電極間隔、対象物との距離、対象物の比誘電率の違い、介在物の存在により、それぞれがどのよう

表1 材料特性

Table 1. Material characteristics.

Material	Relative permittivity
Air	$\epsilon_a = 1.0$
Resin A	$\epsilon_A = 3.0$
Resin B	$\epsilon_B = 8.0$
Human	$\epsilon_h = 51.7$
Water	$\epsilon_w = 80.0$

* 佐賀大学大学院工学系研究科生体機能システム制御専攻
〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地Department of Advanced Systems Control Engineering,
Saga University, Honjo-1, Saga Shi 840-8502

** 佐賀大学理工学部電気電子工学科

〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地

Faculty of Science and Engineering, Saga University,
Honjo-1, Saga Shi 840-8502

に影響するかについて有限要素法解析を用いて行ったものであり、有用な結果が得られたことからここに報告する。

2. 解析条件

〈2・1〉 平面型静電容量センサの原理 はじめに本センサの原理を示す。本センサは静電容量を測定することにより、空气中或いは介在物を挟んで、対象物の存在を検知するものである。その原理は一对の矩形電極を同一平面に設置した時に電極間を通る電気力線が介在物や検知対象物によって受ける影響を測定するものである。

電極付近に空気以外の対象物が存在する場合、図 1 に示すように、電気力線が対象物に入り込み、コンデンサの静電容量に影響するゆえ、対象物の存在を検知できると考える。

本稿では本原理に基づいた 3 種類の構成での解析を示す。

〈2・2〉では基本形でのセンサの検知限界について、〈2・3〉では補助電極を付加し、介在物が存在する場合について、〈2・4〉では電極下部のシールドの効果についてである。なお、〈2・2〉から〈2・4〉で使用した有限要素法解析ソフトは ANSYS engineering analysis system release 5.6, 使用要素タイプは静電場 2 次元四辺形要素 (PLANE121) である。

〈2・2〉 静電容量センサの検知限界の検討 はじめに

図 1 同一平面上の電極を通る電気力線の様子
Fig. 1. Distribution of electric lines of force with a plane type capacitance sensor.

図 2 電極と対象物の位置関係

Fig. 2. Bird's-eye view of measuring electrodes and an object.

基本形でのセンサ検知限界について考える。平面型静電容量センサの構成は、図 2 に示すように一对の測定電極を同一平面上に設置し、測定電極の下部にシールド電極を配したものである。ここでは基本的な特性を得るための代表例として以下のような寸法とした。電極幅は 20mm, 測定電極とシールド電極の距離は 2mm, 測定電極間隔は 1,2,5,10,20,50,100mm のいずれかで固定した上で、幅が 302mm, 厚さが 40mm の対象物を電極の極近傍から最大 200mm まで少しずつ離していき、それぞれの距離 do にあるときの静電容量を計算する。

このように対象物の距離(do)を変化させたとき、対象物が無い場合(つまり空気)の静電容量と比較して、ここでの電場解析上で静電容量変化に有意差が見られなくなった距離を検知限界距離とする。また測定電極間隔が検知限界距離に与える影響も検討する。電場解析は図 2 の断面 A-A を図 3 のようにモデル化して行った。また、対象物の材質には代表的な物質として樹脂 A (比誘電率 $\epsilon_A=3$) と水 ($\epsilon_w=80$) を選択した。

〈2・3〉 介在物および対象物の材質と検知距離の検討 ここでは平面型静電容量センサにおいて、より顕著に高さ方向の情報を得るため、測定電極の両側に補助電極⁽³⁾が設置

図 3 解析モデル概略 (2 次元)

Fig. 3. Model for analysis.

図 4 解析対象の部分断面図 (各電極幅は 20mm)

Fig. 4. Model for analysis using dummy electrodes.

される場合で、かつ介在物がある場合について考える。補助電極の効果については別の報告に譲る。全ての電極幅は20mm、測定電極とシールド電極の距離は2mm、測定電極の内側間隔は50mm、隣接する各電極の間隔は図4に示す配置とする。本センサが実際に使用される場合に、測定電極上にクッション材が置かれる場合があることも考慮して、対象物との間に介在物（樹脂A、樹脂B）を設定する。

〈2・2〉と同様に対象物を電極の極近傍から最大200mmまで少しずつ離していき、各距離に置かれたときの静電容量を計算する。

〈2・4〉 平面型静電容量センサにおける測定電極とシールド電極間距離の効果検討 実際の平面型センサが使用される状況を考えた場合、周囲の電磁ノイズ環境がかなり厳しいケースも考えられる。それゆえ、シールド電極を設置することにより外部からのノイズ侵入を低減すると共に平面型センサからのノイズ漏洩を防止する構成を考えた。平面型静電容量センサでは測定電極とシールド電極との距離および両電極間の材質が静電容量の絶対値に影響を及ぼすゆえ、それらの影響を調べるために前項同様、対象物と測定電極との距離に対する静電容量を計算した。なお、測定電極より上部の解析モデルは〈2・3〉で使用する図4と同様であるが、測定電極の下面からシールド電極までの距離は一定間隔ではなく2,20,50,100mmの4種類で検討した。

3. 結果および考察

〈3・1〉 測定電極間隔と静電容量の関係 ここには〈2・2〉に対応するセンサ検知限界についての結果とその考察を示す。図5(a)~(d)に測定電極と対象物までの距離 d_o が変化したときの静電容量値を示す。それぞれの図は測定電極の間隔を変えたもので、(a)は2mmの場合、(d)は100mmの場合である。図5(c), (d)で示されるように、一般的に対象物と測定電極との距離が離れていくに従い、徐々に静電容量の減少が起こる。この現象は対象物毎で静電容量減少の傾きが異なっているが、最終的に空気に対する静電容量に一致する。ところが、図5(a), (b)に示すように、測定電極の間隔が狭い場合には静電容量値は極小値を持ち、これは水のように比誘電率が大きい場合に顕著であった。このような場合、対象物までの距離が異なっているにもかかわらず同じ静電容量値を示すことになり、センサとして不都合を生じる恐れがあるので、静電容量がこのような極小値を示す電極配置は避けなければならない。

図6(a), (b)は図5(c), (d)の結果を表現を変えて示したものである。縦軸は空気の静電容量を1としたときの各材質における静電容量比、横軸は対象物までの距離 d_o を測定電極中心間距離($2a+b$)で除したものである（以後、この値を検知距離指数と表記する）。ここで、図7に示すように、 a は中心線と両測定電極の内側間隔、 b は測定電極の幅である。測定電極と対象物の距離的關係を正規化するために、測定電極の設置寸法因子を代表する値として前述の a および b を検知距離指数に取り入れた。図6(a), (b)に示すように、

対象物までの距離 d_o と測定電極中心間距離($2a+b$)の比が1となるとこで静電容量値に対象物の影響が現れなくな

(a)測定電極間隔が2mmの場合

(b)測定電極間隔が20mmの場合

(c)測定電極間隔が50mmの場合

(d)測定電極間隔が100mmの場合

図5 (a)~(d) 測定電極間隔と静電容量の関係
Fig. 5. (a)~(d) Effect of electrode interval on capacitance.

る。すなわち、平面型静電容量センサが対象物を検知する高さ方向の限界は、電極設置平面から垂直方向に、ちょうど測定電極中心間距離程度であることが明らかになった。検知限界距離を長くするには測定電極中心間距離を長くすればよいが、静電容量の絶対値が低下する。

一方、平面型静電容量センサでは対象物の空気、樹脂 A、水を明確に区別できることがわかる。各対象物の比誘電率の相違が静電容量値または空気との静電容量比に現れるため、本手法は水のような高誘電率の対象物とその他の物体を識別することにおいては非常に有効と考えられる。

〈3・2〉 介在物および対象物の材質の影響 ここには

(a)測定電極間隔が 50mm の場合

(b)測定電極間隔が 100mm の場合

図 6 (a),(b) 空気に対する静電容量比と検知距離指数の関係

Fig. 6. (a),(b) Relation of capacitance and detectability factor.

図 7 電極と対象物の配置と寸法記号

Fig. 7. Arrangement of electrodes and object.

〈2・3〉に対応するセンサと対象物の間に存在する介在物の影響についての結果と考察を示す。図 8(a)に示すように介在物が樹脂 A ($\epsilon_A=3$) の場合、対象物(樹脂 B, 人相当, 水)までの距離が離れるに従って静電容量は低下する。対象物が樹脂 A の場合は測定電極の周囲が介在物と共に比誘電率 $\epsilon_A=3$ の物質で占められるため静電容量に変化が現れない。対象物が空気の場合は介在物の厚さ(つまり対象物までの距離)が増加すると検知限界距離までは静電容量が増加し、その後一定となる。一方、介在物が樹脂 B の場合(図 8(b))で対象物が人相当と水の場合は対象物までの距離が離れると静電容量が低下する現象は同様であるが、空気と樹脂 A は検知限界距離まで静電容量が増加し、それ以上は対象物が樹脂 B の静電容量値と同値となる。図 8(a)と (b)を比較すると、介在物の比誘電率が高いものほど静電容量の絶対値は上がることがわかる。さらに、介在物よりも対象物の比誘電率が高いものでは距離と共に静電容量値は低下し、逆に対象物の比誘電率が低いものでは距離と共に静電容量値は増加する。

介在物が樹脂 A ($\epsilon_A=3$) と樹脂 B ($\epsilon_B=8$) のそれぞれについて、対象物が空気の場合を基準として、その他の対象物の静電容量の比を図 9(a), (b)に検知距離指数との関係で示す。いずれの対象物の場合も検知距離指数の増加と

(a)介在物が樹脂 A ($\epsilon_A=3$) の場合

(b)介在物が樹脂 B ($\epsilon_B=8$) の場合

図 8 (a),(b) 測定電極間隔と静電容量の関係 (介在物および対象物の材質の影響)

Fig. 8. (a),(b) Effect of interfering objects/obstructions on capacitance.

(a) 介在物が樹脂 A ($\epsilon_A=3$) の場合

(b) 介在物が樹脂 B ($\epsilon_B=8$) の場合

図9 (a),(b) 空気に対する静電容量比と検知距離指数の関係 (介在物および対象物の材質の影響)

Fig. 9. (a),(b) Relation of capacitance ratio and distance detecting factor.

表2 検知距離指数 (静電容量比 1.2 の場合)

Table 2. Distance detecting factor at capacitance ratio 1.2.

Material and Relative permittivity	Intervening material		$\epsilon=3 \rightarrow 8$ Reduction rate of detection distance
	$\epsilon_A=3$	$\epsilon_B=8$	
Resin A ($\epsilon_A=3.0$)	0.198	0.064	0.68
Resin B ($\epsilon_B=8.0$)	0.291	0.222	0.24
Human ($\epsilon_h=51.7$)	0.385	0.303	0.21
Water ($\epsilon_w=80$)	0.389	0.315	0.19

共に静電容量比は低下し、指数が 1 近傍で静電容量比が 1 となる。このことより、介在物の比誘電率が 3~8 に変わる程度では検知限界距離に大きな影響を与えず、〈3・1〉で示したことと同じように、平面型静電容量センサの検知限界は、電極設置平面から垂直方向に、測定電極中心間距離程度であることが分かった。

対象物による検知距離の影響を検討するため、便宜的に静電容量比 1.2 となる検知距離指数を図 9(a), (b) より求め、表 2 に示す。この表より、介在物がいずれのときも対象物の比誘電率が高いほど検知距離指数も高くなる。また、介在物の比誘電率が高くなると検知距離指数は低くなり、特に対象物の比誘電率が低いほど指数の低下が大きい。言い

(a) 介在物が樹脂 A ($\epsilon_A=3$) の場合

(b) 介在物が樹脂 B ($\epsilon_B=8$) の場合

図10 (a),(b) 介在物ごとの測定電極とシールド電極間距離の影響

Fig. 10. (a),(b) Effect of distance between measuring and shielding electrodes.

換えると、平面型静電容量センサにおいて、人とその他の物質を判別する際、「人」は比誘電率が高いため、介在物の材料特性の影響を受けにくく、判別には有利であることが分かる。

〈3・3〉 測定電極とシールド電極間距離の影響 ここには〈2・4〉に対応するシールドの効果についての結果と考察を示す。図 10 において、シールド電極までの距離を固定して静電容量比 1.2 のときの検知距離指数をみると、対象物の比誘電率が高いほど静電容量が大きい傾向は〈3・2〉と同様である。また、シールド電極までの距離が最も短い 2mm の場合が最も検知距離指数が高く、より離れた状態の対象物までの静電容量変化を捉えることができる。

一方、介在物の材質が樹脂 A のように比誘電率が 3 と低い場合、ある対象物に対してシールド電極までの距離が変化すると、20~2mm にかけて急激な検知距離指数の増加が見られる。仮に、測定電極とシールド電極の間に置かれる材料が軟らかく、低弾性率で、両電極の間隔が初期時に 20mm であった場合、センサ部に荷重がかかることによって測定電極とシールド電極との間隔が狭くなり、図 10 に見られるように検知距離指数が高くなる。これは、対象物の

表3 シールドまでの距離を変更した場合の検知距離指数（静電容量比 1.2 の場合）

Table 3. Distance detecting factor with shielding distance at capacitance ratio 1.2.

ds (mm)	Intervening material							
	Resin A ($\epsilon_A=3$)				Resin B ($\epsilon_B=8$)			
	3	8	51.7	80	3	8	51.7	80
2	0.198	0.291	0.385	0.389	0.064	0.222	0.303	0.315
20	0.062	0.136	0.215	0.222	0.041	0.128	0.255	0.265
50	0.052	0.130	0.228	0.237	0.032	0.125	0.271	0.282
100	0.043	0.127	0.239	0.248	0.027	0.123	0.278	0.309

ds : distance between measuring electrodes and shield

検知可能な距離が伸びることであり、センサとしては常に対象物を見失うことはない。逆に、対象物が人あるいは水の場合、シールド電極までの距離が初期時に 50mm だったものが、負荷により 20mm にまで変化すると、介在物の誘電率が表 3 に示すように 51.7 や 80 のような場合には検知距離指数がどちらかというと低下するゆえ、検知距離限界付近に対象物が置かれた場合は静電容量の変化が検知できなくなる可能性があることをこの結果は示している。

4. まとめ

平面静電容量型センサは、将来における実用面を考えると、椅子などを使用する人の存在を検出して着座位置、姿勢等を判別するシステムに活用できる。高齢社会を迎えて、日本でも高齢者・障害者に適合させた車椅子、介護ベッド、姿勢保持装置など、長時間にわたって使用する福祉機器の開発が求められている。これらの福祉機器では、接触面の性能が使用感や快適性に影響するため、人体接触部位付近にセンサをクッション材などに埋設して使用する場合の有効な人体検知手段と考えられる。

以下に、平面型静電容量センサに関する基礎的な電場解析により得られた結果をまとめて示す。

- (1) 平面型静電容量センサでは、対象物との距離が長くなると共に静電容量が低下する傾向にある。また、各対象物の比誘電率の相違が静電容量値または空気との静電容量比に現れるため、人または水のような高誘電率の対象物とその他物体を識別することにおいては非常に有効と考えられる。
- (2) 平面型静電容量センサの対象物検知可能距離は、電極設置平面から垂直方向に、測定電極中心間距離と同程度である。
- (3) 高誘電率の物体が測定電極付近にある場合、空気の場合と比較して静電容量が低下する現象は、測定電極間隔が電極幅と同程度以下の場合に現れる。
- (4) 介在物が測定電極と対象物の間に存在し、対象物の比誘電率が人のように高い場合、検知距離指数は介在物の比誘電率の影響を受けにくいため、人判別には有効である。
- (5) 測定電極とその下部にあるシールド電極までの距離が寸法 a（中心線と測定電極との内側間隔）より狭い範囲では

空気との静電容量比 1.2 の場合の検知距離指数が高くなるゆえ、両電極の配置状態をこの範囲に設定することにより、対象物を感度よく検知し得る距離に関して、その距離をさらに延ばすことができる。

(平成 14 年 3 月 25 日受付, 平成 14 年 10 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 宇佐美品:「100 例にみるセンサ応用技術」, 工業調査会, pp.129-137 (1993)
- (2) E. Makino and Y. Igeta: "Development of capacity sensor technology", 43th Automatic control union lecture meeting, p.239 (2000) (in Japanese)
牧野英一・井桁嘉一:「静電容量センサ技術の開発」, 第 43 回自動制御連合講演会, p.239(2000)
- (3) Noguchi and K. Shida: "The possibility of thickness recognition of the object by the capacity structure contact sensor", 16th The Society of Instrument and Control Engineers Kyushu branch academic lecture meeting, 105, pp.9-10 (1997) (in Japanese)
野口哲郎・信太克規:「容量構造接触センサによる物体の厚さ認識の可能性」, 第 16 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 105, pp.9-10 (1997)

瀬戸学雄

(非会員) 1968 年 12 月 27 日生。1993 年 3 月豊橋技術科学大学大学院生産システム工学専攻修士課程修了。同年 4 月松下電工株式会社入社。2000 年佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程進学。現在に至る。数値解析, 計算機応用工学に関する研究に従事。

信太克規

(正員) 1943 年 5 月 6 日生。1970 年 3 月東北大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月通産省工技院電気試験所(現, 独立行政法人 産業技術総合研究所)入所。1987 年同所標準計測部電気標準研究室長。1990 年佐賀大学理工学部電気工学科教授。1998 年同大学院工学系研究科生態機能システム制御工学専攻教授, 現在に至る。精密知能電気計測に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, 応用物理学会, 日本 ME 学会, 日本ロボット学会, IEEE 会員。