CdS セルをもとにした光・電気統合型センサによる非接触材質厚さ検出

辻 聡史*・木 本 晃*・信 太 克 規*

Contactless Material Thickness Detection Using Optical and Electrical Integrated Sensor
with CdS Cell

Satoshi TSUJI*, Akira KIMOTO* and Katsunori SHIDA*

In this paper, discrimination of material and detection of the thickness and distance between the sensor and the material are presented by the proposed sensor. The proposed sensor uses a pair of CdS cells as the electrodes of the plane type capacitance sensor and measures capacitance by changing the strength of emission of the light emitting diode (LED). Several capacitance values are obtained by the proposed sensor because the resistance of CdS changes. Accordingly, the optical and electrical properties of the object are obtained from capacitance values. In this experiment, discrimination of two kinds of sample materials and detection of the thickness and distance between the sensor and the material were demonstrated by the proposed sensor. As a result, it was suggested that discrimination of insulating and conductive materials including detection of the thickness between 2 mm and 10 mm and the distance between 1 mm and 4 mm were possible by the proposed sensor.

Key Words: photoconductive element, material discrimination, thickness detection, capacitance

1. はじめに

現在, 光, 超音波および電磁波等さまざまな方法を用いた非接触センシングシステムに関する研究が盛んに行なわれ, それらを用いた非接触センサが産業界を中心にさまざまな分野で利用されている^{1)~12)}. 本研究の目的は, 非接触で物体の距離情報を含めた材質や形状等の複数の情報を検出するシステムを確立することである. そのための測定手法として, これまでに, 光および電気測定を統合したセンサを提案し, その有用性を示した^{13), 14)}. 本手法は, 平面型静電容量センサの電極として CdS セルを用いることで単一センサにより, 測定対象の光特性と電気特性を測定しようとするものである. すなわち, 1 対の CdS セルにより静電容量を測定することで, 測定対象の電気特性を得ることができる. また, 測定対象に一定の光を照射し, 測定対象からの反射光を CdS で受光することで, CdS の抵抗値が光量により変化し, 測定電極面積が等価的に変化するゆえ, 静電容量値から測定対象の光特性としての反射率の違いを得ることができる. よって, 複数の光の状態で静電容量を測定することで, 対象の電気特性および光特性を得ることが可能となる. 本稿では, 提案する光・電気統合型センサを用い, 対象までの距離の検出と材質識別

に加え, 厚さの検出を試み, 提案センサの有用性について考察した. 実験としては, 測定試料として, 導電性材質としてのアルミニウムと絶縁性材質としてのアクリルを用いた. また, それぞれの材質について 4 種類の厚さを用意した. 合計 8 種類の測定試料について, LED を用い, 測定試料に光を照射した場合と照射しない場合で, 1 対の CdS セル間の静電容量を測定した. 測定した静電容量値により, 導電性および絶縁性の材質識別と測定試料までの距離および試料の厚さの検出を試みたので報告する.

2. 光・電気統合型センサ

Fig. 1 に提案センサの概略図および等価回路を示す. 本提案手法は, 平面型静電容量センサの電極として光導電素子である CdS セルを用い, LED で光の状態を変化させ, 静電容量を測定することにより, 非接触で測定対象の電気特性および光特性を測定しようとするものである. さらに, それらの測定値から対象の材質識別, 材質の厚さおよび材質までの距離を検出しようとするものである. Fig. 1 に示すように, おおのこの CdS セルの内側の電極を浮かした状態で外側の電極により静電容量を測定する. そのときの静電容量は, 外側電極間の静電容量を C_{out} , 内側電極間の静電容量を C_{in} , CdS の抵抗 (可変抵抗) を R_1 , R_2 とおくと, 以下の式で表わされる.

$$C = C_{out} + \frac{C_{in}}{1 + \omega^2 C_{in}^2 R^2} \quad (1)$$
$$R = R_1 + R_2 \quad \omega = 2\pi f$$

* 佐賀大学大学院工学系研究科 佐賀市本庄町 1

* Faculty of Science and Engineering, Saga University, 1 Honjo-machi, Saga

(Received January 12, 2007)

(Revised July 23, 2007)

Fig. 1 Schematic diagram of proposed method and equivalent circuit

ここで、測定対象から CdS への入射光がない場合、CdS の可変抵抗 R は大きいゆえ、静電容量値 C は C_{out} で近似できる。よって、静電容量値より測定対象の電気的特性が得られる。つぎに、LED により測定対象に照射した光が、測定対象の表面によって反射され、CdS に入射する場合、CdS の可変抵抗 R は小さくなる。よって、(1) 式の関係により、 C が C_{in} の影響を受ける。 C に対する C_{in} の影響は、CdS の可変抵抗 R に入射する光量、すなわち、測定対象の表面の光の反射率により異なるゆえ、静電容量値により、測定対象の光特性が得られる。よって、本提案手法により、複数の光の状態での静電容量を測定することで、測定対象の光特性と電気特性を得ることができるゆえ、それらの測定値より対象の複数の情報を検出しえる可能性を有している。

3. 実験方法

Fig. 2 に今回試作したセンサの側面および下部の構造を示す。静電容量測定のための電極として、CdS セル (最大感度波長 515 nm) を用い、光の状態を変化させるための発光素子として、LED (ピーク波長 525 nm, 指向角 15°) を用いた。直径 60 mm のアクリル板の中心に LED を配置し、その両側に 1 対の CdS セルを固定し、アクリル板をステンレス板で被うことでシールドとした。また、外部からの光の入射を防ぐとともに CdS セルから測定対象までの距離を変化させるために外径 60 mm, 内径 50 mm のアクリルパイプを用いセンサを覆った。測定試料は、大きさ 100×100×30 mm のアクリル板 (黒) の上に、センサの中心に位置するように置かれた。

Fig. 3 に測定システムの概略図を示す。静電容量の測定は、各 CdS セルの外側電極に LCR メータ (周波数 500 kHz, 印加電圧 10 V) を接続し、光なし (LED 印加電圧 0 V) と光あり (LED 印加電圧 2.8 V) の場合で行なわれた。実験として

Fig. 2 Schematic diagram of sensor structure

Fig. 3 Schematic diagram of measuring system

Table 1 Characteristic of measurement object

Material	Relative permittivity	color
Insulator : Acrylic	3	clear
Conductor : Aluminum	***	silver

各測定試料について CdS セルから測定対象までの距離 (d) を 1 mm から 4 mm まで 1 mm 間隔で変化させ、光なしと光ありの場合で静電容量の測定を行なった。距離の調節は、測定装置のアクリルパイプの高さを調節することにより行なわれた。今回、LED の発光電圧は、測定対象の表面の色に対する静電容量の変化が比較的大きい 2.8 V を用いた¹⁴⁾。また、実験は、恒温室内温度 25 °C 一定で行なわれた。それぞれの測定値は、1 回の設定で 5 個のデータを取り、それを 3 回繰り返した合計 15 個のデータの平均と標準偏差で示した。

Table 1 に今回用いた測定試料を示す。導電性材質として、銀色のアルミニウムを、絶縁性材質として、透明のアクリルを用いた。また、それぞれの試料について、4 種類の厚さ、2 mm, 5 mm, 8 mm および 10 mm を用意した。各試料の大きさは 30×30×10 mm とした。

4. 実験結果

Fig. 4(a)(b) にアクリル、アルミニウムにおける静電容量の測定結果を示す。Fig. 4(a)(b) の横軸には測定対象までの

距離を、縦軸に光なし (印加電圧 0 V) の場合の静電容量値 C_{off} と光あり (印加電圧 2.8 V) の場合の静電容量値 C_{on} をそれぞれ示す。Fig. 4(a) より、電極と各測定試料までのそれぞれの距離における測定値は、絶縁性材料であるアクリルが小さく、導体であるアルミニウムが大きいことがわかる。また、CdS セルと測定試料との距離が離れていくに従い、徐々に静電容量値が減少することがわかる。よって、CdS セル電極による測定対象の電気特性の測定が可能であるといえる。ここで、アクリルにおいて、材質の厚さの変化により、静電容量値に変化が見られない。これは、測定試料と試料を置いた基盤の比誘電率が同じであることから、測定対象の厚さを変化させても、静電容量値は変化しないと考えられる。一方、アルミニウムにおいては、材質の厚さの変化により、静電容量値に変化が見られる。これは、測定試料が導体であるのに対して基盤が絶縁体であることから、対象の厚さの変化により測定部に対する基盤の比誘電率の影響が変化することにより静電容量が変化したのではないかと考えられる。この結果より、測定電極と測定試料の距離が 4 mm 以内であれば、静電容量に変化が見られるゆえ、距離もしくは材質および材質の厚さが既知であれば、静電容量の測定から、基盤と異なる電気特性を有する測定対象の厚さあるいは距離の検出の可能性を有していることがわかる。

性を有していることがわかる。

Fig. 4(b) より、各測定試料において、CdS セルと測定試料の距離の変化および厚さに対し、静電容量値の変化が見られるため、距離もしくは材質および材質厚さが既知であれば、静電容量の測定から、材質の厚さあるいは距離の検出の可能性を有していることがわかる。結果より、光なしあるいは光ありのどちらかの静電容量から材質識別、厚さおよび距離の検出は困難である。しかしながら、光なしの場合と光ありの場合における静電容量の測定値は距離、材質および材質の厚さの変化に対して異なっているゆえ、それらの測定値を用いることで、絶縁体と導体の 2 種類の材質識別、距離および厚さの検出の可能性を有しているといえる。

5. 考 察

Fig. 5 にそれぞれの測定対象の厚さおよび距離をパラメータとして光なしと光ありにおける静電容量値の関係を示す。横軸に光なし (LED 印加電圧 0 V) の場合の静電容量値 C_{off} を、縦軸に光あり (LED 印加電圧 2.8 V) の場合の静電容量値 C_{on} を示す。たとえば、光なしの測定結果 A だけでは、距離および厚さ検出を含めた材質識別は困難である。また、光ありの測定結果 B だけでも、アルミニウムの 3 種類の厚さの可

(a) Measurement result at C_{off}

(b) Measurement result at C_{on}

Fig. 4 Relationship between distance and capacitance

Fig. 5 Relationship between C_{off} and C_{on}

Fig. 6 Relationship between resistance of CdS cell and distance

Fig. 7 Relationship between resistance of CdS cell and distance in acrylic black

能性があり、距離および厚さ検出を含めた材質識別は困難である。しかしながら、これらの2種類の測定値を用いることで、厚さ5mmのアルミニウム、距離3mmと決定できる。これにより、2種類の材質識別と2mm~10mmの範囲の厚さおよび1mm~4mmの範囲の距離の検出が可能であるといえる。

今回の測定精度に関して、静電容量の測定で最大で±6%程度の誤差が生じた。この主な原因は、今回アクリルパイプにより調節したCdSセルと測定対象までの距離の誤差であると考えられる。よって、電極と測定対象までの距離をより精密に制御することにより、測定精度の向上を図ることが可能であると考えられる。

つぎに、Fig. 4(b)における静電容量の測定結果が、測定試料の光特性を含んだものであるかを検討するために、同じ測定条件で1個のCdSセルの抵抗値の測定を行なった。Fig. 6に光あり(LED:印加電圧2.8V)における各測定試料の表面の反射に対するCdSセルの抵抗の測定結果を示す。横軸に測定試料までの距離を、縦軸にCdSセルの抵抗値を示している。アルミニウムの場合は反射光が測定試料表面で生じ、距離によってのみ変化するゆえ、測定試料の厚さに対して抵抗値に変化が見られないことがわかる。これに対して、透明のアクリルの場合は、測定試料の厚さが変化することで、反射の光量が変化し、抵抗値が変化しているのは、測定試料の表面よりもむしろ光が試料を透過し、試料と基盤との間で反射光の影響を受けていることが考えられる。

Fig. 7に光あり(LED:印加電圧2.8V)における測定試料を設置しない場合、すなわち黒のアクリル基盤の表面の反射に対する1個のCdSセルの抵抗値の測定結果を示す。横軸

Fig. 8 Frequency dependency of capacitance in this measurement system

の距離は各厚さの測定試料が設置されたときの基盤の距離を示す。Fig. 7より距離が10mm付近までは抵抗値が減少し、それ以降は増加していることがわかる。これは、距離を短くするとLEDの指向性によりCdSセルで反射光を受光できないため抵抗値が大きくなり、距離を長くすると光が減衰することから抵抗値が大きくなることが考えられる。Fig. 6とFig. 7を比較すると同等の抵抗値を示しているゆえ、抵抗の変化は基盤に用いたアクリルでの反射光の影響であるといえる。しかし、Fig. 6とFig. 7の厚さ8mmと10mmにおいて、抵抗値および距離に対する変化の傾向が異なっていることがわかる。これは、空気屈折率が約1に対して、アクリルの屈折率が約1.5であることから、スネルの法則¹⁵⁾によりわかるように屈折角が変化し、極値をとる距離が等価的に長くなったことが原因ではないかと考えられる。

Fig. 4(b)とFig. 6でのアクリルを比較すると、CdSの抵抗値が小さい値を示す試料の厚さほど、大きい静電容量値を示しているゆえ、静電容量値は測定試料の光特性の情報を含んでいるといえる。よって、Fig. 4(b)およびFig. 6の結果から静電容量値に光と電気特性の情報が含まれていることがわかる。今回、4mm以上で、測定試料の比誘電率の変化による静電容量の変化が小さくなるために、4mm以上で得られる情報は、ほとんど光情報のみになる。また、1mm未満では、逆に発光の指向性および配置の関係から光の情報が少なくなり、対象の電気的な情報になる。このことより、現段階では、1mmから4mmまでの範囲において測定対象の光および電気特性が得られる。

(1) 式からわかるように静電容量は周波数により変化する。実際に、実験として、周波数をパラメータとし、アクリル白および黒を測定試料としたときのLEDの印加電圧と静電容量の関係性を調べた。Fig. 8にセンサと測定試料との距離が3mmのときの静電容量と周波数の関係を示す。横軸にLEDの印加電圧を、縦軸には光なしの静電容量値 C_{off} および光ありの静電容量 C_{on} と C_{off} と差異をそれぞれ示す。結果から、周波数を低くすると低い印加電圧で静電容量が変化するこ

Fig. 9 Flowchart of material thickness detection

同じ印加電圧，すなわち，一定の光量であれば，低い周波数のほうが静電容量の変化が大きいことがわかる．これらの関係は，(1)式において，周波数が低くなると左辺の静電容量が大きくなることからわかる．光がない場合，周波数を低くすると静電容量値が小さくなった．今回，250 kHz 以下では，測定状況により，静電容量値が小さくなり，静電容量値を測定することが出来なかった．これは，(1)式より，静電容量はほとんど C_{out} であるが，CdS セルのインピーダンスが大きくなるため電界が測定対象の方に広がり，等価的に C_{out} の静電容量が小さくなったためであると考えられる．今後，この点を含め，周波数特性と静電容量の関係を解析し，明確にする予定である．これらの結果から今回，比較的低い LED の印加電圧で静電容量が変化し，光なしの状態での静電容量の測定が可能な 500 kHz を用いた．

Fig. 9 に現段階における材質厚さ検出のフローチャートを示す．測定対象が透明な場合は，測定対象の厚さの違いにより光の影響が異なることから，材質の厚さにより静電容量が変化し，測定対象が基盤の電気特性と異なる場合，測定対象の厚さの違いにより静電容量が変化する．よって，材質が透明である場合又は，測定対象が土台の比誘電率と異なる場合，材質識別および厚さ検出および距離検出の可能性を有していることがわかる．

対象の光と電気特性の測定に関しては，別々のセンサで測定することが一般的であるが，センサから対象までの一定距離で対象の電気特性を測定する場合，光センサとインピーダンスセンサを配置して測定するよりも，提案手法のように，光と電気特性を同一のセンサで測ることで，センサの小型化を図ることや同一面に配置した別々のセンサで光およびインピーダンスを測定するときに生じる干渉等も低減できると考える．また，光センサとインピーダンスセンサをそれぞれ CdS セルとし，提案手法を用いることで，複数の CdS セルの組み

合わせて光および電気特性の測定が可能であるゆえ，対象の光および電気特性の情報量を増やすことが可能であると考えられる．1つの CdS セルの並列抵抗と静電容量を測ることで対象の光および電気特性を測定することも可能であるが，一般には，CdS セル電極間が狭いため，センサから対象までの距離が長くなると対象の電気特性を得ることが困難である．本提案手法では，4 mm までであれば，対象の電気特性を得ることが可能である．これらの点から，本手法は有用であると考えられる．

今後は，距離の検出範囲あるいは基盤と測定試料の比誘電率の違いによる厚さ検出能力および測定対象の色と測定容量との関係に関して，定量化することが必要である．また，これらの関係は，CdS セルおよび LED の大きさや配置等により変化するゆえ，センサ構造の最適化を含め有限要素法を用いた数値解析を行なう予定である．

6. ま と め

本論文では，提案した光・電気統合型センサを用い，材質識別と測定試料の厚さおよびセンサと測定試料の距離検出を試みた．本提案手法は，平面型静電容量センサの電極として CdS セルを用い，複数の光の状態での静電容量を測定することで複数の情報を得ようとするものである．すなわち，CdS セルの抵抗は光により変化するゆえ，発光の光量を変化させることで，測定対象からの反射光が変化し，結果として，複数の静電容量値が得られる．反射光は測定対象の光特性により変化するゆえ，静電容量値より対象の電気特性と光特性を得ることができる．よって，それらの静電容量値から対象の複数の情報を検出しようとするものである．実験として，導電性材質としてアルミニウムを，絶縁性材質としてアクリルを測定試料とし，それぞれ 4 種類の厚さを用意した．合計 8 種類の測定試料について，LED を用い，測定試料に光を照射した場合と照射しない場合で，1 対の CdS セル間の静電容量を測定した．測定した静電容量値により，2 種類の材質識別と測定試料までの距離および厚さの検出を試みた．結果として，本提案センサによる測定対象の電気および光特性の測定により，導電体と絶縁体の材質識別と 1 mm～4 mm の範囲での距離および 2 mm～10 mm の厚さ検出の可能性を示した．今後は，本提案センサの最適化と測定試料と静電容量との関係の定量化を試みる．

参 考 文 献

- 1) 稲荷隆彦：FA における非接触計測技術の動向，電学論 D，**110-3**，202/206 (1990)
- 2) 青木，青木，中島：近赤外線点マトリックス照影による非接触・無拘束就寝者呼吸監視システム，電学論 C，**124-6**，1251/1258 (2004)
- 3) 大谷，馬場：超音波センサアレイを用いた物体の音響インピーダンスに基づく素材と形状の同時認識，第 22 回センシングフォーラム，**2A-1**，177/181 (2005)
- 4) U. Grimaldi and M. Parvis: Noise-tolerant ultrasonic distance sensor based on a multiple driving approach, Measurement, **15**, 33/41 (1995)

- 5) M.T. Restivo and F.G. de Almeida: The use of eddy currents on the measurement of relative acceleration, *Sensors and Actuators A*, **113**, 181/188 (2004)
- 6) 森, A. Spagnoli, 近藤, 村上, 鳥越: 衝撃波を用いたコンクリート構造物の非接触非破壊検査法の開発とその自動化に関する研究, *日本機械学会論文集 (A 編)*, **70-7**, 986/994 (2004)
- 7) P. Purnell, T.H. Gan, D.A. Hutchins and J. Berriman: Noncontact ultrasonic diagnostics in concrete: A preliminary investigation, *Cement and Concrete Research*, **34**, 1185/1188 (2004)
- 8) 大森, 小林: スパイラル共振形水分センサを用いた布の非接触水分測定, *電学論 E*, **118-9**, 431/432 (1998) .
- 9) R.S. Jachowicz, G. Wójtowicz and J. Weremczuk: A non-contact passive electromagnetic transmitter to any capacitive sensor - design, theory, and model tests, *Sensors and Actuators A*, **85**, 402/408 (2000)
- 10) T. Hinz, F. Menke, R. Eggers and R. Knöchel: Development of a Microwave Moisture Sensor for Application in the Food Industry, *Lebensm.-Wiss. U.-Technol.*, **29-4**, 316/325 (1996)
- 11) 篠田, 山崎: 表面硬さの非接触センシング, *計測自動制御学会論文集*, **27-7**, 749/754 (1991)
- 12) 川原, 徳田, 金子: 非接触インピーダンスセンサの開発とヒト肌への応用, *福祉工学シンポジウム講演論文集*, 03-28, 225/228 (2003)
- 13) 辻, 木本, 信太: 光・電気統合型センサによる非接触材質識別, *電学論 E*, **126-8**, 481/485 (2006)
- 14) 辻, 木本, 信太: 非接触材質識別のための CdS セルを用いた静電容量測定手法, *ロボティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集*, 2P1-C39 (2006)
- 15) 河野芳文: 反射・屈折の法則を含む光の性質の数学的扱いについて, *研究紀要*, **50-3**, 7/23 (2004)

[著 者 紹 介]

辻 聡 史 (学生会員)

2005 年佐賀大学理工学部電気電子工学科卒業。同年佐賀大学大学院工学系研究科生体機能システム制御工学専攻修士課程進学, 現在に至る。現在, 同大学研究室にて電気計測に関する研究に従事。

木 本 晃 (正会員)

1997 年佐賀大学大学院工学系研究科博士後期課程システム生産科学専攻修了。同年同大学理工学部助手, 2001 年佐賀大学理工学部講師, 2004 年佐賀大学理工学部助教授, 現在に至る。センシング・イメージング工学に関する研究に従事。工学博士。日本 ME 学会, IEEE 各正会員。

信 太 克 規 (正会員)

1970 年東北大学大学院工学系研究科電子工学専攻修士課程修了。同年通産省工業技術院電気試験所(現, 産業技術総合研究所)入所。87 年同所標準計測部電気標準研究室長。90 年佐賀大学理工学部電気電子工学科教授, 現在に至る。知能精密電気計測およびセンシングに関する研究に従事。工学博士。応用物理学会, 日本 ME 学会, 日本ロボット学会, IEEE 各正会員。