

コンシューマ・デバイス論文

透明なカット検知センサの設計と評価

藤川 真樹^{1,a)} 釜井 了典¹ 恒次 創¹ 菅原 美智子¹

受付日 2014年4月24日, 採録日 2014年10月15日

概要: ディスプレイに表示されている情報をスマートフォンやデジタルカメラを使って撮影して持ち出すという情報のリーク方法に対抗するために, 著者らはディスプレイの表面に赤外線を発光する透明なシートを貼り付けるという方法を提案している. しかしながら, 撮影を強行するために「引きはがし」や「カット」によって当該シートを不正に取り外し, ディスプレイの表面をあらわにする攻撃が考えられる. これに対して, 著者らはすでに引きはがしを検知できる方法を考案しているため, 本論文ではカットを検知できるセンシングデバイスの開発について報告する. カットの検知は, 目視では視認しにくい一筆書きの微細な導電線を赤外線発光シートの表面に印刷しておき, カットによって導電線の抵抗値が大きくなることをリアルタイムに観察することで実現できる. 著者らは, 導電線がもたらす2つの影響(可視光透過率が低下すること, ディスプレイの表面にモアレが発生すること)を抑制するために, 透明導電性フィルムの製造技術とオフセット印刷のノウハウを活用してセンシングデバイスを設計した. また, 試作したセンサは耐屈曲性があり(曲げによって導電線が切れることがない), 縦, 横, 斜めのカットを検知できるとともに, 8mm以上カットされたときにアラートを出力できる. 本論文の後半では, 実用化に向けた考察について述べる.

キーワード: 情報漏洩, カット検知, 極細導電線, 透明度, 印刷技術

Design and Evaluation of Transparent Cut Detection Sensor

MASAKI FUJIKAWA^{1,a)} RYOSUKE KAMAI¹ SOU TSUNETSUGU¹ MICHIKO SUGAWARA¹

Received: April 24, 2014, Accepted: October 15, 2014

Abstract: In this paper, the authors developed a transparent sheet sensor that can detect cutting of the IR emitting sheet. This cut detection sensor is produced by printing a single stroke pattern of ultra-thin conductive lines almost invisible to naked eye on the surface of IR emitting sheet. As the conductive lines are almost invisible, the sheet does not obstruct viewing of the display screen and is unlikely to be unnoticed by a person who considers photo/video shooting. Detection of a cut is made by real time measurement of electrical resistance of the conductive lines or real time monitoring of transmission/reception of information, and the information can be protected by turning off power to the display. Visible transmittance of the prototype sensor was as high as 84.9% and no moiré pattern was observed when it was applied to the display screen. The prototype sensor showed excellent bending resistance and can detect a cut in vertical, horizontal, and oblique directions and can raise alert when the sensor is cut in a length exceeding about 8 mm. Discussions were made for practical application of such cut sensor, and it was found that the sensor can be produced at low cost, is resistant for harsh environment, and is compatible for use with the microuver.

Keywords: information leakage, cut detection, ultra-thin conductive line, high transparency, printing technology

1. はじめに

スマートフォンやデジタルカメラの普及により, 私たちは動画や静止画の撮影を手軽に楽しめるようになったが,

¹ 総合警備保障株式会社
Sohgo Security Services Co., Ltd., Koto, Tokyo 135-0014, Japan

^{a)} fujikawa-masaki@alsok.co.jp

その一方で、撮影による情報の不正な持ち出しが報道されるようになった [1], [2]. これは、パソコンのディスプレイや監視カメラのモニタに表示されている情報を従業員が撮影して事業所外に持ち出すというものであり、「情報の漏洩」や「映像の目的外使用」にあたることから、事業所は持ち出した従業員に対して重大なペナルティを与える（なお、ペナルティを与えた事業所も、従業員の監督不行き届きを追及されて損害を賠償したり [3], 監督官庁から勧告や命令を受けたりすることがある*1).

著者らは、撮影によって情報が持ち出されないようにするための方法の1つとして、赤外線を発光する透明かつ柔軟なシートをディスプレイやモニタの表面に貼り付けるというアイデアを提案している [4]. これは、人間の目は赤外線を認識しにくい、カメラのイメージセンサは赤外線を認識しやすいという現象を利用したものであり、これによって情報が記録されている画像や映像に光学的なノイズを含ませることができることから、撮影によって情報を持ち出したとしてもその情報を視認することを困難にできる。また、「シートを貼り付ける」というシンプルな作業であり、既存のディスプレイやモニタを継続して利用できることから、赤外線を発光する平面パネルをディスプレイに取り付けたり [5], 赤外線を発光するディスプレイやモニタに買い替えたりすることに比べて時間的・金銭的成本を抑制できるというメリットがある。

ところで、赤外線発光シートをディスプレイに貼り付けるために使用する粘着剤は、ディスプレイを傷や汚れから保護するシートに採用されているものと同様に弱粘着性であることが望ましい。なぜならば、シートを貼り付けるときにディスプレイとの間に入った気泡を取り除いたり、シートの貼り付け位置を改めたりすることがありうるため、シートの着脱を容易にすることがその理由であるが、このことを逆手にとって、悪意のある者がシートを無断で引きはがしてディスプレイ表面を露わにしてから情報を撮影することが懸念される。

これに対抗するために、図 1(a) に示すように曲げを検知できる細い帯状のセンサ [6] をシートの長辺または短辺に取り付けておき、曲げの度合いをリアルタイムにセンシングするソリューションが考えられるが、図 1(b) に示すようにセンサが取り付けられていないシートの部分を切り取ってディスプレイ表面を露わにしてから情報を撮影するという攻撃が懸念される。

このため著者らは、赤外線発光シートには「引きはがし」に加えて「カット」を検知できる機能が必要であると考えた。なお、当該機能はディスプレイ面に重ねあわせて使用

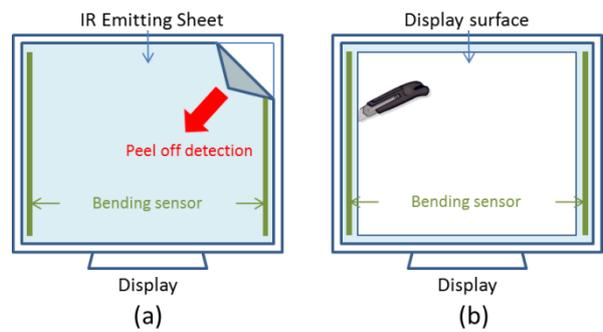


図 1 (a) 引きはがしの検知, (b) カットによるディスプレイ面の露出
Fig. 1 (a) Peel off detection, (b) Exposure of display surface by cut.

するものであることから、情報の視認に影響を与えないことが重要である。現時点において、このような検知機能は提案されていないため、著者らは当該機能をカット検知センサとして具現化することにした。

本論文では、以下の流れで論述を展開する。2章では、カット検知センサが備えるべき要件と本論文における前提条件を定義する。3章では、センサの設計と製造に関することを述べる（導電線パターン設計、モアレの抑制、パターンの転写技術、設計時と実装時のギャップを埋める方法）。4章では、試作したセンサが要件を満たしているか否かを評価する。5章では、センサの実用化に向けた考察を行う。

2. 前提条件と要件

本章では、本論文における前提条件とカット検知センサが備えるべき要件を定義する。

2.1 前提条件

- (1) センサに電源を供給する機器やセンサから受け取った信号を処理する機器、およびセンサとそれぞれの機器とを接続するケーブルに対する攻撃は議論の対象外とする*2。
- (2) 著者らは、撮影された画像や映像に光学的なノイズを含ませることができ、目視による情報の視認を困難にできるほど十分にノイズを含ませることができる（つまり、十分な量の赤外線を発光する）透明な赤外線発光シートを開発するには至っていないが、本論文では便宜上、このような赤外線発光シートの存在を仮定する。なお、本論文執筆時点において、透明かつ柔軟なシート状の有機 EL 基盤 [7] や赤外線を発光する有機発光ダイオード [8] が研究開発されていることから、近

*1 たとえば、不正に持ち出された情報に顧客情報が含まれていた、防犯カメラの映像に映っている人の許可を得ることなく無断で映像を公開したりした場合には、個人情報保護法に沿って違反行為の中止や必要な措置を取るよう勧告や命令を受ける。

*2 本論文の主題は、「透明かつ柔軟なシート状のカット検知センサのセンシング部分を開発すること」であって、「上記のセンシング部分を含んだ、包括的なセキュリティシステムを開発すること」ではないことに留意されたい。このため、上記の攻撃を議論の対象外にしたとしても、本論文の学術的な意義が失われることはない。

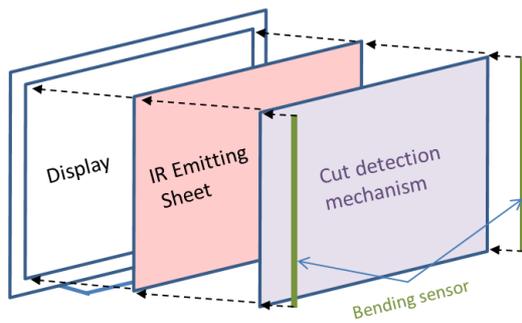


図 2 カット検知センサのイメージ
Fig. 2 Image of cut detection sensor.

い将来において赤外線発光シートが開発されて市場に流通し、身近なデバイスになるものと考えられる。

2.2 要件定義の前に (センサのイメージ)

著者らが設計・製造するカット検知センサのイメージとディスプレイ面への重ねあわせについて述べる (図 2 参照)。

はじめに、赤外線発光シートの表面に「カットを検知する仕掛け」を直接施す (こうすることで、赤外線発光シートがカット検知センサとして機能する)。次に、図 1 で示したように、1 章で説明した曲げ検知センサを赤外線発光シートの長辺または短辺に貼り付ける (こうすることで、赤外線発光シートの引きはがしを検知できる)。その後、当該赤外線発光シートをディスプレイ面に直接貼り付ける。

2.3 要件 1 (可視光透過率)

赤外線発光シートは透明であることから、カット検知センサにおいても透明に近いこと (可視光透過率が高いこと) が求められる。そこで、以下の要件を定義する。

カットを検知する仕掛けを無色透明なシートに施したとき、その可視光透過率は 70%以上とする。本研究では、無色透明なシートとして日常的によく目にする PET (ポリエチレンテレフタレート) シートを用いる。

可視光透過率を上記の値に設定した理由は、ディスプレイを傷や汚れから保護するシートのうち、出荷数が高いと考えられるスタンダードな保護シート [9] が持つ可視光透過率 (おおむね 70%以上) が、本研究における指標になると考えたからである。

2.4 要件 2 (モアレの抑制)

カット検知センサをディスプレイに貼り付けたときに、ディスプレイに表示されている情報が見えにくくなるのは好ましいことではない。特に、ディスプレイ面の前にモアレ (干渉縞) が発生し、情報を見ることに支障が出ることは避けなければならない。

一般的に、モアレは規則正しい複数のパターンを重ね合わせたときに発生する。このため、センサをディスプレイ

に貼り付けたときに、ディスプレイを構成する縦横に交わる二次元配列^{*3}と、カットを検知する仕掛け (たとえば、微小な格子状の配列) との間で干渉が発生し、ディスプレイ面の前にモアレが発生する可能性がある。そこで、以下の要件を定義する。

センサをディスプレイに貼り付けたとき、ディスプレイ面の前にモアレが発生することがないものとする。

2.5 要件 3 (耐屈曲性)

著者らは、カット検知センサは耐屈曲性を持つべきであると考え。なぜならば、赤外線発光シートの貼り付けや貼り直しによって生じる曲げによってカットを検知する仕掛けが破損すると、検知漏れ (カットが検知できない) や誤検知 (カットしていないのにカットを検知する) が発生するからである。

一般的に、耐屈曲性を有する配線として FPC (フレキシブルプリント配線板 [10]) が知られているが、FPC は屈曲半径が小さく、屈曲させた状態における可動部の往復運動が繰り返し発生するような、透明である必要がない配線に使用されている (たとえば、インクジェットプリンタにおけるヘッド部分に取り付けられる配線があげられる)。

本研究で開発するカット検知センサには、FPC のような耐屈曲性を必要とする状況は発生しないが、赤外線発光シートの貼り付けや貼り直しの際に屈曲が発生することから、これによってセンサが破損しないことを確認しておく必要がある。そこで、以下の要件を定義する。

紙どうしの貼り合わせを想定している両面テープを使用してセンサを滑らかな平面に貼り付ける。センサの端部を持って 90 度方向に引きはがしたときに、センサが破損することがないものとする。

1 章で述べたが、赤外線発光シートに塗布される接着剤の粘着度は、上記の両面テープよりも弱く設定するべきである。このため、上記の要件を満たすならば耐屈曲性があると考えてよい。ちなみに、90 度方向への引きはがしは、粘着テープが持つ粘着度の試験方法として採用されている [11]。

2.6 要件 4 (カットを許容できる長さ)

赤外線発光シートがカットされる長さが長くなるに従って、撮影が可能になる情報の量は増加する。このため、カットを検知する仕掛けは感度良く設定されるべきであるが、切り方によっては迅速にカットを検知できないことがある^{*4}。しかし、このような場合でもカットされた長さがあ

^{*3} ブラックマトリクスと呼ばれる格子状の配列のことで、この配列の上にカラーレジストと呼ばれる R (赤)、G (緑)、B (青) の三色を配置する。

^{*4} 扉の焼き破りを検知するセンサには一筆書きで書かれたつづら折りの導電線が施されているが、導電線間が切断された場合には焼き破りを検知できない。

る一定の長さを超えることがあってはならない。本論文では、この一定の長さのことを「カットを許容できる長さ」と定義する。

これまでに著者らと同じ目的を持ち、前述の要件（可視光透過率、モアレの抑制、耐屈曲性）を備えたカット検知センサは提案されていない。このため、本研究における指標として以下の要件を定義する。

センサ上の任意の点に刃が置かれ、縦、横、斜めのいずれかの方向に向かってまっすぐにカットされることを想定する。このとき、カットを許容できる長さは7.5mmとする。

著者らは、文字情報から静止画・動画に至る幅広いコンテンツに対する撮影に対抗するために赤外線発光シートを開発しているが、ここでは、何らかの情報にアクセスするためのパスワードが記載された、個人を特定しうる情報（氏名、所属、電話番号など）を含む一覧表をコンテンツの例として取り上げる。当該表においては、パスワードはアクセス制御システムの健全性を維持するための要となる情報であることから、優先して保護すべき情報と位置づけることができる。

当該表を、出荷台数の多い23型のFull HDディスプレイ^{*5}（解像度1920×1080）上に、一般的な10ポイント文字^{*6}で表示させた場合、パスワードの推奨文字列である8文字[12]の長さは、ほぼ8mmとなる。8文字ちょうどのパスワードを設定する人もいることから、著者らはパスワードとして成立する長さに満たない値（7.5mm）を、カットを許容できる長さとして定める。

3. センサの設計と製造

本研究では、効率良くセンサの設計と製造を行うために、設計と製造に転用できる技術・ノウハウを調査し、適切であると考えられるものを選出して活用する。本章では、活用した技術・ノウハウを紹介しながらセンサの設計と製造について説明する。

3.1 基本パターンの設計

ここでいうパターンとは「型」のことであり、PETシートに導電線を印刷するための「版下」に相当する。一般的に、物理セキュリティでは切断を検知する仕掛けとして「一筆書きの導電線」が用いられており、シンプルかつ省電力な電気回路により実装できることから、防犯[13]をはじめとする幅広い分野で利用されている（通信線の断線[14]や土石流の検知[15]など）。本研究では要件1を満たすために、可視光のさえぎりの抑制が期待できる、目視では確

^{*5} 2010年～2011年にかけて最も出荷された液晶ディスプレイは、23型のFull HDディスプレイである（GfK Japan調べ）。

^{*6} DTP（Desktop Publishing）では、ある程度の年齢の人間が読む紙面として10ポイント（13級～14級。1級は0.25mm）が一般的とされている。

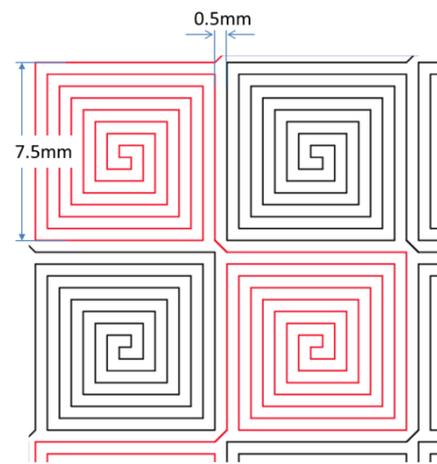


図3 導電線パターン（一部を拡大）

Fig. 3 A part of conductive line pattern.

認しにくいほど細い導電線を使用するというアイデアをもとにして、物理セキュリティにおける導電線パターンの設計ノウハウを活用しながら基本パターンを設計する。

物理セキュリティで使用されるシート状の切断検知センサ^{*7}は、以下に示す2つのノウハウをもとに設計されている。

導電線の施し方とその間隔：

検知漏れを防止するために導電線を可能な限りシートの全面に施す。このとき、隣り合う導電線の間隔を可能な限り狭く均一にすることで導電線を回避した切断を困難にする。

製造コストの抑制：

シートの両面に導電線を施すことはセンサの製造コストを高めることになるため、シートの片面にのみ導電線を施す。

著者らは、上記のノウハウと要件4のポイント（縦、横、斜めのカットを検知できる）をおさえながら、図3に示すような一筆書きの基本パターンを設計した^{*8}。これは、正方形をモチーフとした微小な渦巻を極細の線を用いて一筆書きで描き、渦巻どうしを市松模様のように連結させたものである（図3では、渦巻どうしの連結の様子を分かりやすくするために赤と黒で色分けしている）。

導電線の間隔を0.5mmにすることで導電線を回避した切断を困難にし、渦巻にすることでPETシートの片面への印刷だけで縦、横、斜めのカットを検知できるようにした。また、可能な限り細い導電線を使用することで可視光のさえぎりを抑制し、渦巻の辺の最大長を7.5mmにすることでカットを許容できる長さと同じにした。

^{*7} たとえば、扉の裏側に取り付けられるセンサがある。これは、バーナなどを使用した扉の焼き切りを検知できる。

^{*8} 要件4を満たしつつシートの片面にのみ導電線を施すことのできる方法は、著者らが調査・検討した限りでは一筆書きのみである。このため、著者らは一筆書きを用いて基本パターンを設計した。なお、導電線を一筆書きとすることで、描かれる導電線は物理セキュリティ用のセンサと同様にシンプルな閉回路に見立てることができるため、カット検知の原理を容易に理解できるというメリットもある。

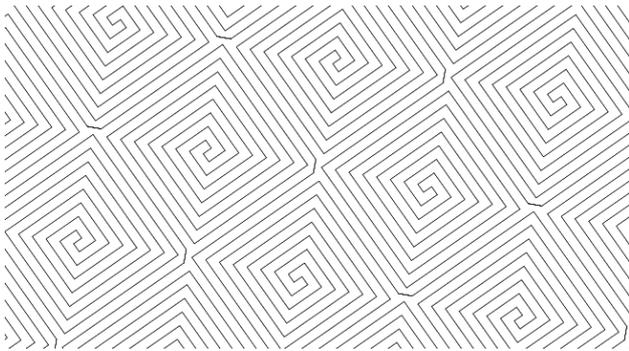


図 4 導電線パターン (一部を拡大)

Fig. 4 Inhibition method for moiré.

3.2 モアレの抑制

パターンを PET シートに転写する (印刷する) 際にはオフセット^{*9}印刷技術を使用する。

ところで、当該技術は「網点」と呼ばれる小さな格子状のドットパターンを複数枚重ね合わせることでグレイスケールやカラーの情報を表現するのだが、それぞれの網点に角度を持たせることによって印刷面上に発生するモアレを抑制している [16]。そこで本研究では、このノウハウを活用して PET シートに印刷するパターンに角度を持たせることで、当該シートをディスプレイに貼り付けたときにディスプレイ上にモアレが発生しないようにする。具体的には図 4 に示すように、設計したパターンを 30 度回転させてから PET シートに印刷する。30 度は、オフセット印刷技術におけるモアレ抑制のための基本角度である。

参考までに、オフセット印刷におけるモアレ抑制方法を説明する。オフセット印刷では、モアレが発生しにくい基本角度 (30 度または 45 度) があり、当該角度を用いて網点に角度を持たせる。たとえば、カラー印刷で使用される 4 色の網点の場合、イエローとブラックに基本角度 (45 度) を使用し、シアンとマゼンタの角度はブラックの角度 (45 度) から 30 度引いた値 (15 度) とし、マゼンタの角度はブラックの角度 (45 度) に 30 度を足した値 (75 度) とする。

今回、著者らは 4 章で述べるセンサの試作において別の基本角度である 45 度を使用しなかったが、その理由は後述する 3.4 節で述べる。

3.3 最適な転写 (印刷) 技術

著者らは、PET シートに極細かつ微小な導電線パターンを転写 (印刷) するのに最適な技術を活用する。この技術は、スマートフォンやタブレット端末のタッチパネルに使用されている透明導電性フィルムを製造するのに使用されているもので、導電性粒子を用いて PET シート上に導電線を印刷する。以下に、ITO (酸化インジウムスズ) を使用した従来の透明導電性フィルムに比べて優位な点を示す。

耐屈曲性, 低抵抗性:

ITO は硬質な素材であるためフィルムの曲げによって導電線が断線するが、導電性粒子は軟質な素材であるため断線が発生しにくい [17]。また、ITO では実現できなかった表面抵抗値を $0.1 \Omega/\text{sq}$ まで下げることができる [17]。

大量生産, 任意のパターンを印刷可能:

ITO フィルムの製造には大規模な蒸着設備が必要であり、露光、現像、エッチング、洗浄といった工程が必要であったが、導電性粒子を使用した印刷ではそのような工程が必要ないため大量生産が可能である [17]。また、ITO では実現できなかった任意のパターンの印刷が可能であるため [17]、CAD やドロー系のソフトウェアを用いて作成したパターンをそのまま版下として利用できる。

印刷性能の向上:

PET シートだけでなく、ガラスやポリカーボネートシートにも印刷ができる [18]。

3.4 実装時のギャップとパターンの修正

実装時においては、設計時には想定していなかった状況が発生することがある。これをギャップと呼び、設計されたものに対して適切な修正を加えて実装が行われる [19]。本節では、設計時には想定していなかった実装時のギャップとその修正内容について述べる。

3.3 節で紹介した印刷技術により、 $14 \mu\text{m}$ ($\pm 1 \mu\text{m}$) の幅を持つ導電線を印刷できるのだが、印刷には銀粉などの導電性粒子を用いるため、ときとして十分に転写が行われなことが考えられる。これにより、導電線の一部に「途切れ」が発生して導通がとれなくなるのだが、3.1 節で設計した基本パターンは単線であるために途切れは致命的である (つまり、不良品が発生して製品生産数比率が低下する)。途切れの発生を少なくするには線幅を太くすればよいが、導電線が視認できるようになるほか、可視光をさえぎるため可視光透過率の低下が懸念される。

このため著者らは、設計したパターンに 2 つの修正を加えることでギャップを埋める。1 つ目の修正は、細い糸を織りあわせたメッシュにヒントを得て、導電線を複線化することである (これにより、メッシュを構成する複数の単線に途切れが発生したとしても、残りの導電線によって導通を維持できる)。また、導電線を太くする方法に比べて、導電線の視認の難しさを維持しながらさえぎられる可視光の量を抑えることができる (ちなみに、印刷技術を用いて製造されているタッチパネル向けの透明導電性フィルムにも、メッシュ化された導電線が使用されている [17])。

図 5 に、メッシュを構成する複数の単線に途切れが発生したとしても導通を維持できることを示す (図中の緑色の矢印は電流の流れる方向を、黒色の線は単線を、青色の丸は単線が交差する点を、それぞれ表している)。幅 1 mm のメッシュ部分は、少なくとも 4 本の単線によって導通が維

*9 印刷の版に凹凸がないことから、平版印刷とも呼ばれる。

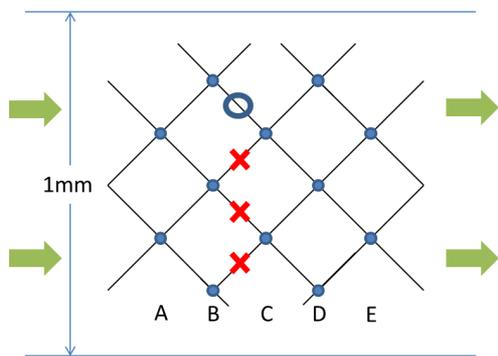


図 5 メッシュによる導通の確保

Fig. 5 Guarantee of conductivity by using mesh.

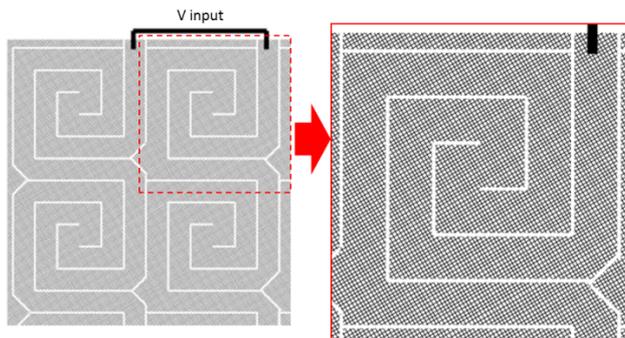


図 6 メッシュを用いた導電線パターン

Fig. 6 Conductive line pattern by using mesh.

持されている。このため、たとえば交差点群 B から C に至るまでの間に 3 本の単線に途切れが発生したとしても、少なくとも残りの 1 本の単線で導通が維持できる。

図 6 に、改良したパターン（一部）を示す。3.1 節で設計した基本パターンについて導電部分（導電線）と不導電部分を置き換えたあと、置換後の導電部分にメッシュを採用している。メッシュの線幅（14 μ m）とピッチ（300 μ m）はタッチパネルで使用されている透明導電性フィルムと同じ値を使用するが、メッシュは縦と横の線から構成される微細かつ微小な格子であるためモアレの発生が懸念される。このため、3.2 節で説明したように、このメッシュを 30 度回転させたものを導電線として使用する。なお、著者らは、改良したパターンを 30 度および 45 度回転させた、試し刷りの PET シートをそれぞれディスプレイに貼り付けてモアレの発生の有無を目視で確認した。その結果、30 度の場合にはモアレが発生しなかったが 45 度の場合には若干のモアレが発生した。このため、4 章で述べるセンサの試作では 30 度回転させた改良パターンを用いる。

2 つ目の修正は、カットを許容する長さで導電部分の幅の調整である。1 つ目の修正によるパターンでは、図 7 の左図において黄色の線で示すように、導電部分を完全に切断せずに導通を保ちながらカットされることが懸念される（このとき、カットされる長さの最大長はカット検知センサの縦の長さと同じになる）。このようなカットに対抗するために、

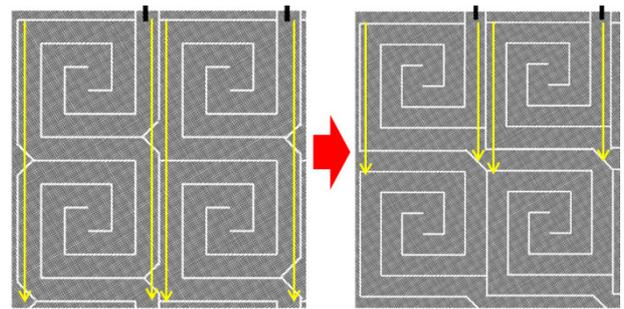


図 7 カットできる長さの抑制

Fig. 7 Inhibition of cuttable length.

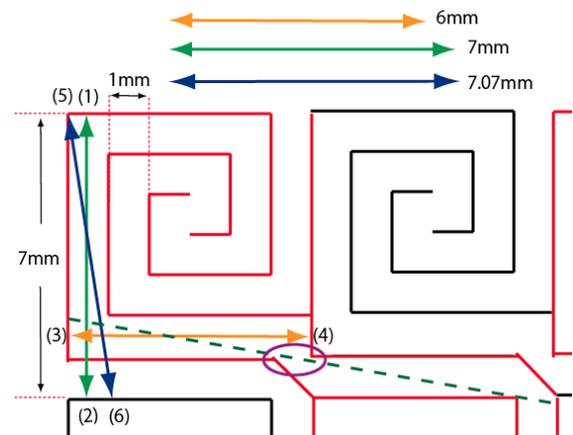


図 8 カットできる最大長と導電部分の幅

Fig. 8 Cuttable length and width of conductive part.

図 7 の右図に示すように渦巻を斜めに連結するとともに、図 8 に示すように縦、横、斜めにカットされることをシミュレーションしながらカットを許容できる長さで導電部分の幅を調整した。この調整によってカットできる長さの最大は 7.07mm となり、目標である 7.5mm を下回ることができた。

【図 8 の補足説明】

縦の場合 (1) から (2) に、横の場合 (3) から (4) に、斜めの場合 (5) から (6) に向かってカットしたとき、それぞれの長さは最大となる。導電部分の幅を 1mm に設定したとき、それぞれの長さは 7mm, 6mm, 7.07mm となる。緑の破線のようにカットされることが考えられるが、楕円で囲んだ導電部分が完全に切断されるため導通を維持できないことが分かる（つまり、当該カットを検知できる）。

4. センサの試作とその検証

本章では、修正した導電線パターンを用いてセンサを試作したあと、センサが要件を満たしていることを検証する。

4.1 試作と導通の確認

著者らは、修正した導電線パターンを一筆書きにつなぎ合わせるとともに、当該パターンを A3 サイズ*10 の PET

*10 23 型 Full HD ディスプレイのサイズに近いので当該サイズを選択した。

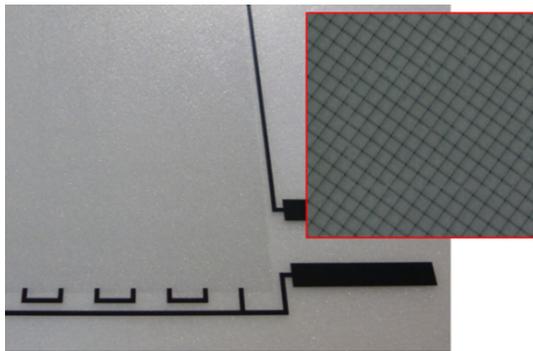


図 9 試作したセンサ（一部）と拡大画像（x60）
Fig. 9 Prototype sensor and expanded image.

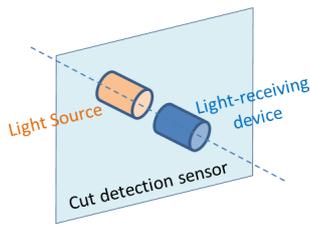


図 10 可視光透過率の測定方法
Fig. 10 Measurement method of transmittance rate.

シート 100 枚に印刷した（図 9 にその一部を示す）。次に、すべてのシートについて導通を検査したところ、導通がとれなかった不良品は発生しなかった。このことは、3.4 節における考察（製品生産数比率の向上）が生かされた証左であるといえる。

4.2 検証 1（可視光透過率）

はじめに、試作したセンサの可視光透過率を検証する。自動車の窓ガラスや着色フィルム付きガラスの可視光透過率を測定できる機器を使用し、図 10 に示すように光源部と受光部の間にセンサを挟みながら任意の 10 カ所における当該値の平均を算出したところ 84.9%であり、目標（70%以上）を達成した。このため、試作したセンサは要件 1 を満たしているといえる。

4.3 検証 2（モアレの抑制）

次に、試作したセンサをディスプレイに貼り付けたときに、ディスプレイの表面にモアレが発生しないことを確認する。著者らは、23 型 Full HD ディスプレイについてノングレアモデルとグレアモデルの 2 種類を用意し、それぞれのディスプレイにセンサを貼り付けたあと、センサの右半分に文字情報を、左半分に画像情報を表示した。

モアレの有無を確認する方法として、目視は有効な方法である [20] ことから、20 人の被験者にモアレの有無を目視により確認してもらった（具体的には、被験者にあらかじめモアレの見え方についてレクチャしたあと、それぞれのディスプレイについてモアレの有無を回答してもらった）。

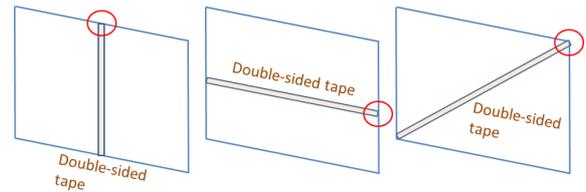


図 11 両面テープの貼り付けとシートの引きはがし
Fig. 11 Paste of double-sided tape and peel off point.

表 1 抵抗値の測定結果

Table 1 Measurement results of resistance.

| No. | 両面テープの種類と貼り付け方 | 引きはがす前の抵抗値 (kΩ) | 引きはがした後の抵抗値 (kΩ) | |
|-----|----------------|-----------------|------------------|-------|
| 1 | 弱 | 縦 | 22.36 | 22.37 |
| 2 | | 横 | 21.91 | 21.92 |
| 3 | | 斜め | 22.30 | 22.31 |
| 4 | 普通 | 縦 | 21.93 | 21.95 |
| 5 | | 横 | 21.82 | 21.83 |
| 6 | | 斜め | 22.82 | 22.22 |
| 7 | 強 | 縦 | 21.23 | 21.27 |
| 8 | | 横 | 21.41 | 21.43 |
| 9 | | 斜め | 21.57 | 21.72 |
| 10 | 超強力 | 縦 | 21.00 | 21.01 |
| 11 | | 横 | 21.35 | 21.38 |
| 12 | | 斜め | 21.50 | 21.52 |

その結果、被験者全員が「モアレは視認できなかった」と回答した。このことから、試作したセンサは要件 2 を満たしているといえる。

4.4 検証 3（耐屈曲性）

次に、曲げの力が加わったときに試作したセンサが故障しないこと（具体的には、PET シートに印刷された導電線が断線しないこと）を確認する。著者らは、紙どうしの貼り合わせを想定している 4 段階の粘性を持つ両面テープを用意した（ニチバン株式会社製・紙両面テープ、幅 15mm、粘着力：弱、普通、強力、超強力）。次に、それぞれの両面テープについて図 11 に示すような 3 パターンの貼り付けを行うことで、合計 12 枚のセンサを用意した（No.1～No.12）。なお、両面テープは導電線が印刷されていない面に貼り付けた。そして、両面テープの片方の剥離紙を取り払ってそれぞれのセンサを滑らかな平面（スチール製のオフィス用ロッカの背面）に貼り付けたあと、図 11 に示すセンサ端部を保持しながら 90 度方向に引きはがした（引きはがし速度は、粘着テープの試験方法である JIS Z 0237 に準拠した速度（300mm/分）に設定した）。

上記の要領で引きはがした合計 12 枚のセンサについて、引きはがす前と引きはがした後の平均抵抗値を測定・比較したところ表 1 に示す結果になった。引きはがす前後にお

ける各センサの抵抗値の変動は $\pm 3\%$ であることから断線が発生している可能性は低いと考えられる。このため、試作したセンサは要件3を満たしているといえる。

4.5 検証4 (カットを許容できる長さ)

最後に、試作したセンサに対して図8に示すような切り方で少しずつカットしていき、抵抗値が変化した時点でのカット長が7.5mmを超えないことを確認する。著者らは3枚のセンサを用意し、1つの方向につき1枚のセンサを使って実験を行った。カットする方向を決めたセンサについて、図8に示すようなカットができる導体部分をマイクロスコープによる目視で無作為に選出したあと、導体部分にカッターナイフの刃をおいて少しずつカットしていった。そして、抵抗値が10%以上上昇したときにカットを止めてカットした長さを計測したところ、いずれの方向についても7.5mmを超えることはなかった。このため、試作したセンサは要件4を満たしているといえる。

5. 実用化に向けた考察

本章では、カット検知センサの実用化に向けた考察を行う。

5.1 コスト

4章で紹介したカット検知センサ(100枚)の試作費用は50万円であったため、単純に計算するとセンサ1枚あたり5,000円となる。ただ、PETシートの実勢価格が20,000円/100枚、導電性銀粉の実勢価格が2,000円/1kgであることを考慮すると、試作費用のほとんどは製版プロセス(トレース、製版、校正)にかけられたと考えてよい。

一般的に、人手が介在する上記のプロセスにはコストがかかるが、製版後は機械によって大量に印刷ができることから1枚あたりの価格は大量生産によって十分に抑制できるものと考えられる。参考までに、大量生産されており、かつ販売価格が公開されている透明導電性フィルムを調べたところ、幅1m、長さ20mのロール状のフィルムが市販されていた(税込74,272円[21])。当該フィルムはPETシートの両面に導電膜が形成されているが、当該ロールからA3サイズのフィルムが最大何枚得られ、1枚あたりの金額がいくらになるかを試算したところ、 $74,272 \text{円} \div 141 \text{枚} = 526 \text{円}$ であった。

著者らが量産しようとしているセンサは、(1)上記のフィルムと同様に、試作を委託した事業者が持つ製造ラインにおいてロール状のフィルムとして製造できること、(2)両面に導電膜(導電線)を施す必要がないこと(一般的に、両面印刷は片面印刷よりもコストがかかる[22]ことから、両面印刷されたセンサよりも当該コスト分だけ価格を抑えて出荷できる)、(3)同じ製造ラインにおいてロールから任意のサイズのフィルムをカットできること、などから、量

産性が高く、かつ、上述のフィルムよりも価格を抑えることができるものと推察できる。

5.2 導電線の環境耐久性

PETシート上に形成される導電線は、導電性銀粉と導電性コーティング材によって構成される。現時点では、導電線に対する加速試験や寿命の予測は行われていないが、文献[23]から推測できるように、導電性銀粉をPETシートに接着させる働きを持つ導電性コーティング材に耐久性があれば、カット検知センサを長期的に使用できるものと考えられる。文献[24]によると、PETシート向けの導電性コーティング材には耐水性と耐アルコール性があり、温度50°C、相対湿度98%RHの環境で保存しても表面抵抗率に変化しないことが確認されている。このことから、導電線には高い環境耐久性があるものと考えられるが、著者らは引き続き、導電線に対する加速試験や寿命の予測についてもウォッチしていく予定である。

5.3 マイクロルーバとの親和性

マイクロルーバは、斜めからディスプレイを覗き見られることを防止するためにディスプレイの表面に貼り付ける薄い光学フィルタである。赤外線発光シートとカット検知センサを貼り合せたものが実用化によって発売された場合、マイクロルーバと重ね合わせることで斜めからの覗き見や撮影を困難にしたいと思う消費者が現れることが考えられる。そこで著者らは、3種類のマイクロルーバ(3M社製:PF15S, PF10MD, エレコム社製:EF-PFS22W)を1枚ずつ用意して、カット検知センサとそれぞれのマイクロルーバとの重なりによるモアレ発生の有無を確認した。その結果、モアレは発生しなかった。このことから、カット検知センサはマイクロルーバと親和性があることが分かった。

5.4 導電線パターンの改良

今回の開発では、基本的な図形の1つである正方形をモチーフとした渦巻を用いて導電線パターンを設計したが、基本的な図形にはそのほかに正三角形や円がある。これらの図形をモチーフとした渦巻を斜めに連結してセンサを試作した場合、正方形のときに比べて縦、横、斜め方向におけるカットの最大長を短くできる可能性があるが、正方形の場合に比べて視認性が向上するか否かについては予想が難しい。このため著者らは、これらの図形をモチーフとした導電線パターンを設計してセンサを試作し、今回開発したセンサとの比較を行う予定である。

6. まとめ

本論文では、カットによる赤外線発光シートの不正な取り外しに対抗するために、透明度の高いカット検知センサ

を設計・開発した。カットの検知は、透明な PET シートの表面に目視では視認しにくい一筆書きの微細な導電線を印刷しておき、切断によって導電線の抵抗値が大きくなることをリアルタイムに観察することで実現した。

著者らは、導電線がもたらす 2 つの影響（可視光透過率が低下すること、ディスプレイの表面にモアレが発生すること）を抑制するために、透明導電性フィルムの製造技術と平版印刷の技術を応用してセンサを試作した。その結果、高い可視光透過率を持ち、モアレが発生しない、耐屈曲性がある（曲げによって導電線が切れることがない）センサを試作することができた。なお実装時において、設計時には想定しなかったギャップが確認されたため、製品生産数比率を高めることを念頭に置きながらパターンの修正を行ったところ、許容できるカットの最大長を 8mm 以下に抑えることができた。

今後は、許容できるカットの最大長をさらに短くするためにパターンの見直しと試作を重ねる予定である。

謝辞 富士フィルム株式会社の村山裕一郎様にはカット検知センサの開発に際して有益なアドバイスをいただいた。謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Kaiser, T.: Air Force One Flight Plan Blogged by Tokyo Air Traffic Controller (Posted Sep. 12, 2011), available from (<http://www.dailytech.com/Air+Force+One+Flight+Plan+Blogged+by+Tokyo+Air+Traffic+Controller/article22691.htm>) (accessed 2013-11-14).
- [2] JCAST ニュース：コンビニ店員「ももクロきた w」防犯カメラ画像のツイッター公開は大問題だ，入手先 (<http://www.j-cast.com/2012/08/16143092.html?p=all>) (参照 2013-11-14)。
- [3] 弁護士ドットコム：「個人情報」を流出させた企業が払うべき「慰謝料」の相場はいくら？，入手先 (<http://blogos.com/article/70691/>) (参照 2013-11-14)。
- [4] 藤川真樹，釜井了典，小田史彦，森安研吾，瀧 真悟，竹田美和：撮影によるコンテンツの持ち出しに対抗するための研究，情報処理学会・コンピュータセキュリティシンポジウム (CSS2011) (2010)。
- [5] 越前 功：人間とデバイスの感度の違いを利用したディスプレイの盗撮防止技術，p.17 (2011)，入手先 (http://www.nii.ac.jp/userimg/NIIPress_iechizen_110704.pdf) (参照 2013-11-14)。
- [6] 有限会社計測サポート：曲げセンサー，入手先 (<http://www1.megaegg.ne.jp/~keisokusp/bending/bending.html>) (参照 2013-11-14)。
- [7] 日本経済新聞社：京都大学が紙を透明に，熱膨張率が低く「有機 EL の基盤に使える」，2012 年 8 月 25 日，入手先 (<http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK2402Q-U2A820C1000000/>) (参照 2014-08-15)。
- [8] 学校法人同志社：有機発光ダイオード，特許公開番号 2012-60094
- [9] サンワダイレクト：OA・液晶フィルターの販売商品一覧，入手先 (<http://direct.sanwa.co.jp/contents/sp/lcdfilter/>) (参照 2013-11-14)。
- [10] 沖電線株式会社：耐屈曲性について，入手先 (<http://www.okidensen.co.jp/jp/prod/fpc/flexible/kukkyoku.html>) (参照 2013-11-14)。
- [11] 3M：よくあるご質問（テープ・接着剤製品），入手先 (<http://www.mmm.co.jp/tape-adh/faq/>) (参照 2013-11-14)。
- [12] 早稲田大学メディアネットワークセンター：情報化推進レター，パスワードはなぜ 8 文字以上にするのか，入手先 (http://www.waseda.jp/mmc/letter/2011sep/end_column.html) (参照 2013-11-14)。
- [13] 株式会社昭電：トラップ式フェンスセンサ，入手先 (<http://www.sdn.co.jp/products/security/fence/index.html>) (参照 2013-11-15)。
- [14] 山下道寛，近江昭穂，矢野健児：車両引通し線の断線を検知する，RRR, Vol.69, No.8, pp.20-23 (2012)。
- [15] 豊澤康男，梅崎重夫，堀井宜幸：土石流検知・警報システムの検討及び開発，産業安全研究所特別研究報告，NIIS-SRR-No.25, pp.47-56 (2002)。
- [16] 中嶋隆吉：紙の基礎講座印刷編 (8) モアレトラブルについて，入手先 (<http://dtp-bbs.com/road-to-the-paper/basic-lecture-of-the-paper/basic-lecture-of-the-paper-025.html>) (参照 2013-11-14)。
- [17] 大日本印刷株式会社：印刷方式の透明導電性フィルムを開発，ITO フィルムに比べて生産性が向上，入手先 (<http://www.dnp.co.jp/news/1205144.2482.html>) (参照 2013-11-14)。
- [18] 日立化成株式会社：転写形透明導電フィルム，入手先 (<http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/products/do/005.html>) (参照 2013-11-14)。
- [19] 内平直志：製品ライフサイクル高信頼化—仕様と実装と環境のギャップをライフサイクルで管理する技術，東芝レビュー，Vol.64, No.8, pp.2-7 (2009)。
- [20] 外池正清：「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトの中間報告，pp.52-54，入手先 (<http://www.newglass.jp/mag/TITL/maghtml/92-pdf/+92-p052.pdf>) (参照 2013-11-14)。
- [21] 株式会社 MonotaRO：アキレス，透明導電性フィルム ST-PET シート，入手先 (<http://www.monotaro.com/p/0689/8762/>) (参照 2014-08-15)。
- [22] 株式会社プリントバック：価格表，入手先 (https://www.printpac.co.jp/contents/pricepages/leaflet_a3_c53-76day.html) (参照 2013-11-14)。
- [23] 佐々木喜七：導電接着剤実装と部品接合湿度加速試験の検討，入手先 (http://www.rcj.or.jp/test-lab/pdf_files/RCJpaper_conductive_adh_joint_reliability.pdf) (参照 2013-11-14)。
- [24] ナガセケムテックス株式会社：Denatron P-5025，入手先 (<http://www.nagasechemtex.co.jp/products/denatron.pdf>) (参照 2013-11-14)。



藤川 真樹 (正会員)

1996 年徳島大学工学部知能情報工学科卒業。1998 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2004 年中央大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。1998 年総合警備保障株式会社入社。セキュリティとセーフティに関する研究に従事。IEEE 会員。情報処理学会全国大会奨励賞，日本セキュリティ・マネジメント学会賞 (現，論文賞)，情報処理学会特選論文等受賞。



釜井 了典

2009年金沢工業大学工学部ロボティクス学科卒業。2009年総合警備保障株式会社入社。セキュリティに関する研究・開発に従事。



恒次 創

2003年東京工科大学工学部電子工学科卒業。2005年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了。2005年総合警備保障株式会社入社。セキュリティ用センサに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



菅原 美智子

1993年日本大学理工学部工業化学科卒業。1993年総合警備保障株式会社入社。セキュリティ用センサに関する研究に従事。電気学会会員。同学会環境・福祉分野におけるスマートセンシング調査専門委員。