

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：34419

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630309

研究課題名(和文) 液晶のランダムテクスチャを用いた光セキュリティタグ認証システムの構築

研究課題名(英文) Development of authentication system for the optical security tag using random textures in liquid crystals

研究代表者

中山 敬三 (NAKAYAMA, Keizo)

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：80324333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液晶で観察されるランダムなテクスチャ(模様)を利用したセキュリティタグの素子作製装置、カメラとコンピュータを利用した読み取り光学系および画像処理プログラムを作成し、認証システムの基本的要素技術を構築した。素子作製装置は温度制御が可能であり、熱相転移を利用し人工的なパターンを有する素子を安定した条件で作製でき、精度の高い素子評価が可能となった。また、カイラルネマチック液晶の指紋状組織およびネマチック液晶のシュリーレン組織に適した画像処理プログラムを開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, I have developed a basic preparation equipment of the optical security tag using random textures in liquid crystals and a basic image scanning optical system. Using the preparation equipment with the temperature control unit, the stable preparations of the proposed tags, which use the thermal phase transition in liquid crystals for patterning of artificial patterns, were achieved. This enables us to estimate tags precisely. Image processing programs suitable to kinds of the liquid crystal textures also have been developed.

研究分野：電子工学

キーワード：液晶 セキュリティ ランダム 指紋状組織 シュリーレン組織

1. 研究開始当初の背景

近年、科学技術および工業技術の高度化に伴い、パスポートやクレジットカードなど偽造の脅威が増加しており、更なる偽造防止技術の開発が必要となっている。ICチップなど現在広く用いられているデジタル技術の他に、物質のランダム性を利用したアナログ的な偽造防止技術も提案・研究されている。アイデアの基本は、複製・偽造を防止したいパスポートや紙幣等の人工物（以降 ID カードの表記に統一）に、複製が困難でランダムな情報が得られる物質・構造物（以降セキュリティタグと呼ぶ）を埋め込むものである。すなわち、ID カードに埋め込まれたセキュリティタグが示すランダム情報は、個々の ID カードの指紋情報（固有情報）として扱える。具体的な使用方法例としては、ID カード使用時には、それに埋め込まれたセキュリティタグの情報を読み取り、事前に登録された情報と照合を行うことで偽造のチェックを行う方法がある。このタグへの応用材料としては、ランダムな特徴、すなわち、作製毎にばらつきが生じる特徴を用いることから、様々な物質の利用が提案されている。

一方、液晶材料は液晶分子が流動性を有しつつ秩序を有している状態である。液晶分子が向きを揃えることを配向と呼び、偏光顕微鏡で液晶相の材料を観察すると、分子配向による光学的性質の変化を可視化することができる。液晶相の種類により、分子配向の様式が異なるため、観察される模様が異なる。この模様は光学組織あるいはテクスチャと呼ばれ、液晶相の種類により異なるテクスチャを示すことから、研究等では液晶相の種類の同定等に使用される。また、素子作製時に液晶分子の配向を制御する処理を強く施さなければ、素子内の場所ごとに配向の向きが変化し、ランダムで多様なテクスチャを示す。しかし、一般的な液晶の応用であるディスプレイなどの光学素子では、素子内での不均一性は好まれないため、如何に分子を並べるかという配向処理技術の向上が重要な課題となっており、ランダムなテクスチャの応用研究は極めて少ない。

上記の背景のもと、申請者は、液晶材料で観察される μm オーダーのテクスチャのランダム性が高く、制御・複製が困難なこと、また、光重合によるフィルム化が可能な液晶材料が存在することから、液晶フィルムが上述のランダム性を利用したセキュリティタグとしての可能性を有していると考え応用を提案した[K. Nakayama and J. Ohtsubo, Opt. Eng. 51, 040506 (2012)]。

2. 研究の目的

従来の液晶素子応用ではランダムなテクスチャが現れないよう基板に強い配向処理を施し作製することがほとんどであり、本研究のランダムなテクスチャを固定化しその二次元パターンを画像情報として利用する

工学研究はユニークなものである。また、液晶材料は温度変化で相転移を生じさせることができ、また、電圧の印加で分子配列を制御することが可能である。これは、液晶を用いる本提案素子は、光重合時の温度や印加電圧の条件を変えることにより一つの液晶素子内に、ランダムパターンを示す領域とランダムパターンが生じない領域を作り込むことが可能なセキュリティタグであることを意味する。偏光顕微鏡でなくとも、それらの領域の散乱特性のわずかな違いは肉眼で読み取ることができ、ロゴマーク等の人工パターンの情報提示機能をも有するユニークな素子である。

本研究では、このような特徴を有している提案素子の作製からコンピュータによる認証プログラムに至までの認証システム全体の基本技術の構築を大きな目的としている。より具体的な目的について述べる。本提案素子は、紫外線露光による光重合を利用し、また、セキュリティ認証に用いる情報は素子から取得する画像情報であるため、素子作製の光学系および素子読み取り光学系のハードウェアの構築が一つの目的である。また、液晶相で観察されるテクスチャの分析、認証プログラムのベースとなる画像間の類似度評価、人工パターンの切り出しなどのソフトウェア開発も目的である。

3. 研究の方法

目的の遂行に向けての技術的な取り組みとしては、素子の作製装置や読み取り光学系に代表されるハードウェアの構築、および、テクスチャのコンピュータによる画像処理プログラムなどのソフトウェア開発が二つの柱となる。主な実験方法を下記に示す。

(1) 温度制御、紫外線露光強度・露光時間、フォトマスクの使用が可能な露光装置の構築。

(2) 市販の偏光顕微鏡ではなく、産業用の小型カメラを用いた提案素子専用の読み取り光学系の構築。

(3) 指紋状の複雑なテクスチャを示すカイラルネマチック液晶、黒い帯で構成されるよりシンプルなテクスチャを示すネマチック液晶を用いた素子作製および評価。

(4) 各テクスチャ分析に適した画像処理プログラム、フォトマスクでパターンニングした人工パターンの切り出しプログラム等の開発。

4. 研究成果

本研究で提案している素子は、液晶材料が温度による熱相転移を生じ、分子配向が変化しテクスチャが異なる状態へと変化することを利用し、人工的なパターンの書き込みを行う。すなわち、紫外線露光時には露光強度、露光時間のみならず、温度制御のそれぞれが精度よく制御できる作製装置が必要である。そこで、照射強度、照射時間および重合時の

温度制御が可能な露光光学系の構築を行った。XYZ ステージ、ラバーヒーターを用いて作製した温度調整と位置調整が可能なステージとスポット UV 照射装置を組み合わせる構築した。

フォトマスクパターンの液晶素子への転写方法としては、液晶素子とフォトマスクを密着させる密着露光と、光学系を用いて液晶素子上に結像させる投影露光の両者の系を実際に作製し比較した。投影露光ではフォトマスクと液晶素子とを離すことができ、また、同一マスクを用いても書き込みパターンのサイズ変更ができる利点がある。しかし、レンズの性能およびわずかなアライメントの変化により書き込みパターンに歪みが出やすいことがわかった。特に、現段階では、フォトマスクの変更、光源とサンプルの距離など様々な条件を変更し検討すること、また、本研究で書き込むパターンは目視で確認できるロゴなどを現状では考えているため露光光学系の高解像度の利点を必要としないことから、等倍のパターンが安定して書き込める密着露光をベースに検討を続けた。本研究の素子では、液晶は二枚のガラス基板間に挟まれているが、光重合前は流動性があるため強い圧力が加わると内部の液晶が流動し配向に影響を与え、テクスチャのランダム性に影響を与えることがある。また、素子にフォトマスクを密着させるため温度制御にも影響を与えることも考えられたが、治具等の作製により、素子作製への影響は確認されなかったため、密着露光を採用した。

本研究では、液晶としてカイラルネマチック液晶とネマチック液晶を用いて実験を行った。それぞれ、観察されるテクスチャが異なるため、テクスチャパターンのコンピュータによる類似度評価などのプログラムは、テクスチャに依存する処理の開発が必要であった。以下に、各液晶での結果について説明する。

カイラルネマチック液晶が示すテクスチャは縞が場所ごとに異なり人間の指紋に似た模様を示し、指紋状組織と呼ばれる。本研究で用いたカイラルネマチック液晶材料では縞の間隔は数 μm であった。画像の位置ずれ等を考慮する必要が無い状態で、複数の指紋状組織画像の類似性の比較のみであれば、画像を構成する画素毎の輝度情報を用いた相関係数を用いることことも可能である。しかし、パターンのランダム性の定量評価などへの応用も考え、偏光顕微鏡写真から指紋状組織の縞の方向の抽出プログラムを開発した。図 1(a)は垂直配向処理で作製したカイラルネマチック液晶素子の指紋状組織の偏光顕微鏡写真である。縞の間隔は約 $2.4\mu\text{m}$ で、同じ処理を施した素子を複数作製しても、素子毎にパターンは異なった。図 1(b)は開発したプログラムにより縞方向を抽出した結果である。矢印が各小領域での縞の方向であり、多くの領域で実際の縞方向と一致した結果

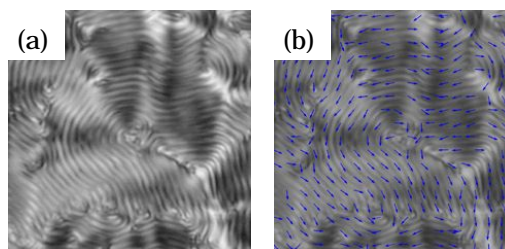


図 1 指紋状組織の方向抽出

が得られた。

開発したプログラムの主な処理手順を示す。指紋状組織は偏光顕微鏡により可視化された画像のため、図 1(a)の様に縞の方向により輝度の差が大きい画像となり、画像全体に対する一括した二値化処理では縞の抽出は出来なかった。そこで、画像全体を小領域に分割し、その小領域毎で二値化処理を行った。その後、小領域毎にハフ変換により線の方向を評価した。

次に、このアルゴリズムを用いた画像の類似度評価を検討した。画像間の類似度評価として最も基本的な考え方は、2つの画像の対応画素の輝度値に基づいて相関を求めるものである。しかし、液晶素子では偏光子とサンプルとの角度により、同一サンプルであっても、輝度が反転して観察されることもある。図 2(b)は、図 2(a)と同一の素子で偏光子・検光子を 45° 回転させて取得した画像である。偏光子の回転により明暗の変化が生じているため、正規化相互相関係数は -0.33 と負の値で、絶対値も小さくなっていた。このよ

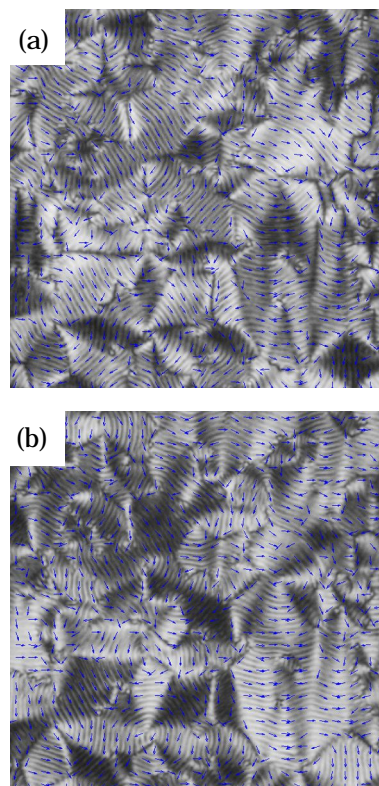


図 2 偏光子の配置が異なる同一サンプル素子画像における縞方向抽出結果

うに、偏光子との配置にかかわらず、同一サンプルからのパターンであるのかを、対応画素の輝度値に基づく相関のみで判断するのは難しい。次に縞模様から抽出した方向の情報を用いた類似度評価の結果を説明する。縞方向の抽出にはある程度の画素数を有するエリアが必要になるため $30 \times 30 = 900$ のエリア数に分割し、エリア毎に平均的な縞方向を計算した。図2の矢印が各エリアの平均的な縞方向である。図(a)と(b)の対応するエリア毎に縞方向を比較し角度差が 45° 未満のエリアを類似エリアと評価し、その割合を求めた結果、図2(a)と(b)の比較では73%が類似エリアとの判定結果となった。異なる素子から得られた画像の比較では約50%の値となった。この結果から、画像処理により抽出した縞方向を類似度評価に利用する手法は有効であることが分かった。更に、本プログラムを用いることにより、縞方向の分布の均一性などから指紋状組織パターンのランダム性評価が出来るようになった。今後は、ランダム性のみならず指紋状組織の新しい解析手法への発展も期待できる。

次に、ネマチック液晶材料で観察されるテクスチャを用いた素子の実験結果について報告する。ネマチック液晶は細長い液晶分子が平行に配向する秩序を有する相であり、螺旋構造を形成するカイラルネマチック液晶に比べてシンプルなテクスチャを示す。ディスプレイ応用に際して行われるラビング処理を施さない水平配向処理で液晶素子を作製した場合、図3に示すような黒い帯とその交点（結び目）で特徴付けられるシュリーレン組織と呼ばれるテクスチャを示す。数 μm オーダーの縞から構成される指紋状組織に比べ、テクスチャの情報量としては少ない。個々の素子の固有情報として用いるパターンを小さい面積から取得してしまうと、単純な模様となり、異なる素子からのパターン間の類似性が上昇してしまう恐れがある。そこで、シュリーレン組織の複雑性の面積依存性についての分析を行った。本研究では、シュリーレン組織のテクスチャの複雑性を増す要素として黒い帯の分岐点、すなわち、結び目に着目し、結び目の個数が多い程複雑なパターンであるとの指標を導入し分析を行った。また、素子固有の情報として用いるエリアがシュリーレン組織に対して十分大きければ、どの素子でも複雑さは一定であり、そのエリアに含まれる結び目の個数もほぼ同数であると考えられる。もし、対象エリアの面積が小さすぎれば、結び目の個数にばらつきが発生し、素子毎のパターンの複雑さにムラが生じることになる。この評価手法のもと、ムラが生じないエリアのサイズを評価した。およそ縦 $1300 \mu\text{m}$ 、横 $1700 \mu\text{m}$ のシュリーレン組織画像を用意し、一定サイズのエリアを任意に6カ所切り出し、各標本エリアでの結び目の個数で密度を算出した。シュリーレン組織に対してムラの生じない十分大きなサイズであれば、6カ所の標本エリアから求めた結び目の密度はほぼ同じ値となり標準偏差は小さくなる。実験では正方形の標本エリアとして1辺の長さが $100 \mu\text{m}$ から $500 \mu\text{m}$ まで $10 \mu\text{m}$ 間隔で分析を行った。3つの素子を用いた結果を図4に示す。標本エリアのサイズが小さい、すなわち、一辺の長さが短いときには、各標本エリアから求めた密度のばらつきが大きく標準偏差は大きい。一方、一辺の長さが長くなるに従い標準偏差は小さくなりばらつきは少なくなっている。すべてのサンプルにおいて、 $100 \mu\text{m}$ から $250 \mu\text{m}$ の範囲で急激に減少し、 $400 \mu\text{m}$ 以上では、ほぼ一定の値へと収束していることがわかった。すなわち、約 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 以上の面積の画像を用いれば、ほぼ同程度の複雑さを有したシュリーレン組織が得られることを示しており、認証に用いる面積の決定に際しての重要な指針、および、シュリーレン組織の複雑性の評価手法が提案できた。

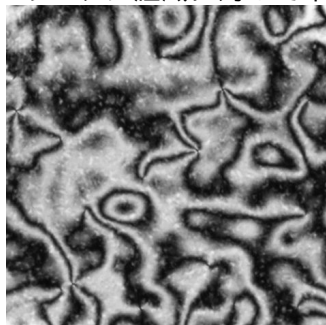


図3 ネマチック液晶で観察されるシュリーレン組織

れば、どの素子でも複雑さは一定であり、そのエリアに含まれる結び目の個数もほぼ同数であると考えられる。もし、対象エリアの面積が小さすぎれば、結び目の個数にばらつきが発生し、素子毎のパターンの複雑さにムラが生じることになる。この評価手法のもと、ムラが生じないエリアのサイズを評価した。およそ縦 $1300 \mu\text{m}$ 、横 $1700 \mu\text{m}$ のシュリーレン組織画像を用意し、一定サイズのエリアを任意に6カ所切り出し、各標本エリアでの結び目の個数で密度を算出した。シュリーレン組織に対してムラの生じない十分大きなサイズであれば、6カ所の標本エリアから求めた結び目の密度はほぼ同じ値となり標準偏差は小さくなる。実験では正方形の標本エリアとして1辺の長さが $100 \mu\text{m}$ から $500 \mu\text{m}$ まで $10 \mu\text{m}$ 間隔で分析を行った。3つの素子を用いた結果を図4に示す。標本エリアのサイズが小さい、すなわち、一辺の長さが短いときには、各標本エリアから求めた密度のばらつきが大きく標準偏差は大きい。一方、一辺の長さが長くなるに従い標準偏差は小さくなりばらつきは少なくなっている。すべてのサンプルにおいて、 $100 \mu\text{m}$ から $250 \mu\text{m}$ の範囲で急激に減少し、 $400 \mu\text{m}$ 以上では、ほぼ一定の値へと収束していることがわかった。すなわち、約 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 以上の面積の画像を用いれば、ほぼ同程度の複雑さを有したシュリーレン組織が得られることを示しており、認証に用いる面積の決定に際しての重要な指針、および、シュリーレン組織の複雑性の評価手法が提案できた。

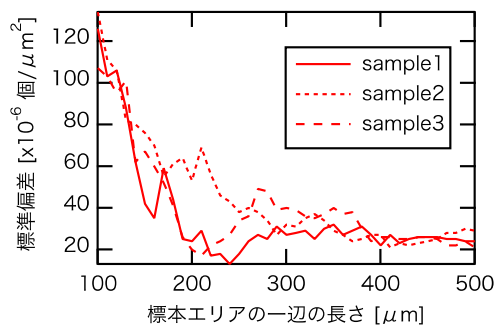


図4 6つの標本エリアから求められる密度の標準偏差

これまでの研究では、液晶素子の撮影に市販の偏光顕微鏡を使用していたが、より実際のシステムに近い形で実験ができるよう、素子の設置、コンピュータによる画像の取得および画像処理がシームレスに行える光学系を作製した。カメラには産業用の小型カメラを採用し、対物レンズ、偏光子などの光学部品を用いた。また、素子の設置に関しては、実際の使用状況を想定し、あえて精度の高い保持具を用いず、現在のクレジットカードの読み取り装置のように、手動にてガイドに沿わせて固定する方法にした。作製した装置で、設置時の位置ずれを検討した結果、数百 μm オーダーの位置ずれを考慮する必要がある

ことがわかった。この数百 μm オーダーの位置ずれは液晶のテクスチャサイズに比べて大きい。カメラでの読み取り後に補正が必要となった。本提案素子におけるフォトマスクによるパターンニングは、液晶相で重合した領域と、高温での等方相状態で重合した領域との共存を利用している。等方相の領域は屈折率の異方性が無く、液晶相の領域は屈折率の異方性を示す。そのため、偏光顕微鏡を用いると等方相領域は図 5(a)のように暗状態で観察され、液晶相で重合した領域は明状態で観察される。すなわち、本提案素子では書き込まれた人工パターンと背景とのコントラストが高く、画像処理による切り出しは比較的容易である。また、書き込むパターンにより重合領域がマスク形状より外側にわずかにしみ出す状況も観察されたが、紫外線が直接照射されて重合した領域としみ出しにより重合した領域とでは光学特性に違いが見られ、図 5(a)の白い領域の様に色が異なる傾向が見られた。この特徴を用いることにより、位置ずれが生じた画像から対象エリアである人工パターンの領域を切り出すプログラムを開発した(図 5(a)、(b)、(c))。また、図 5(c)、(d)はシュリーレン組織の特徴である黒い帯を抽出するプログラムの適用結果である。シュリーレン組織画像は、輝度の大きな画素が多いため、取得画像を単純に用いた相関では、異なる画像でも比較的高い相関係数が出る傾向があったが、図 4(d)の様な抽出画像を用いて評価することにより、扱うデータの情報量の大幅な削減とともに、異なる画像間の相関係数も小さくすることができた。また、人工パターンのコンピュータによる切り出しが可能となったことから、人工パターンを単なるロゴマークのみならずコンピュータ処理可能な情報を埋め込むこ

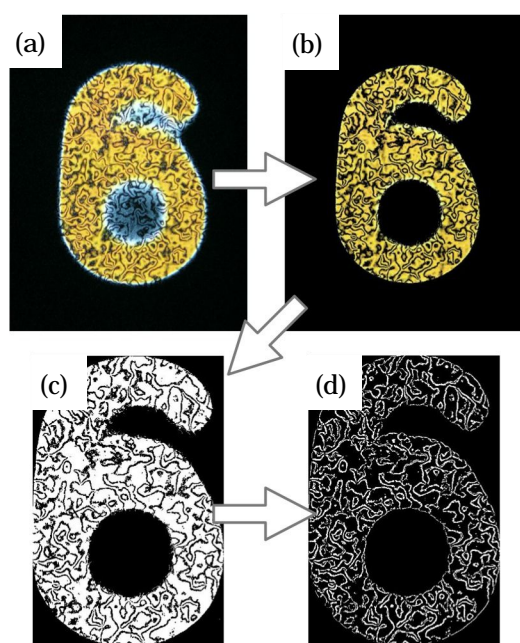


図5 パターンニングされた人工パターンの抽出およびシュリーレン組織の抽出

とも可能であることが実証できた。

以上のように、本助成による研究により実証実験に近い基礎的知見が得られた。また、指紋状組織およびシュリーレン組織の特徴抽出プログラムの開発は、コンピュータ画像を用いた液晶材料の自動評価などへの発展が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計6件)

中山敬三、液晶の光学組織の不均一性を利用した光セキュリティ素子、日本液晶学会液晶フォトニクス・光デバイスフォーラム(招待講演)、2014年10月25日、カレッジプラザ(秋田県秋田市)

中山敬三、大坪順次、カイラルネマチック液晶の指紋状組織パターンの縞方向情報による類似度評価、2014年日本液晶学会討論会、2014年9月8日、松江くびきメッセ(島根県松江市)

中山敬三、大坪順次、液晶光 ID タグ応用のための画像処理によるカイラルネマチック液晶における指紋状組織の縞方向抽出、第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月19日、青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市)

中山敬三、大坪順次、熱相転移と光重合を用いてパターンニングしたネマチック液晶光 ID タグ、Optics & Photonics Japan 2013、2013年11月13日、奈良県新公会堂(奈良県奈良市)

中山敬三、大坪順次、ネマチックおよびカイラルネマチック液晶の光学組織における不均一性のセキュリティ応用、電子情報通信学会 有機エレクトロニクス研究会、2013年10月11日、大阪大学中之島センター(大阪府大阪市北区)

中山敬三、大坪順次、紫外線硬化型ネマチック液晶の水平配向セルにおけるテクスチャーのセキュリティ素子への応用、2013年日本液晶学会討論会、2013年9月8日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市)

〔その他〕

<https://sites.google.com/site/optinfomater/research>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 敬三 (NAKAYAMA, keizo)

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：80324333