

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18707

研究課題名（和文）UV配光による超微細な液晶配向制御と波面自在制御の創成と焦点可変AR素子への応用

研究課題名（英文）Establishment of ultra-fine liquid crystal alignment control and wavefront control by UV light alignment and its application to focus-variable AR devices

研究代表者

石鍋 隆宏（Ishinabe, Takahiro）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30361132

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、液晶中で自己組織化により形成される高分子の二次元凝集構造制御による新たな光制御技術の確立と焦点可変光学系の構築に向けて、フォトリソグラフィにより形成した微細構造による高分子構造制御を確立すると共に、液晶の応答性の改善を実現した。また、液晶の配向状態に捻れを導入し、方解石基板と組み合わせた焦点可変光学系を提案し、空間への画像結像距離を110cmから210cmまで高画質でかつ高速に制御できることを確認し、提案光学系の有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、液晶中に形成した高分子の凝集構造を微細にかつ高精度で制御する手法を確立し、その制御メカニズムを解明すると共に、液晶の屈折率制御による焦点可変の光学系を構築し、その高速制御を達成した。本研究成果は、屈折率の動的な制御とそれによる光制御において重要な知見であり、液晶光デバイスの応用工学についての学理構築に資するものである。高速に画像の結像位置を制御できる光学系の構築は、ARデバイスや、照明装置等、様々な分野への波及が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we established a new optical control technology by controlling the two-dimensional aggregation structure of polymers formed by self-assembly in liquid crystals and focus tunable optics. We also established polymer structure control by microstructures formed by photolithography and improved the response of liquid crystals. We also introduced a twist to the alignment state of the liquid crystal and proposed a variable focus optical system combined with a calcite substrate. We confirmed that the image formation distance in space can be controlled from 110 cm to 210 cm with high image quality and at high speed, demonstrating the effectiveness of the proposed optical system.

研究分野：電子工学

キーワード：液晶 配向制御 光制御 ARデバイス 可変焦点光学系

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、人が見る実環境にコンピュータで描写された情報を重畳表示する拡張現実技術が注目され、医療分野や工業分野等、様々な分野への応用が期待されている。一般に拡張現実技術では、凹面鏡やレンズ、ハーフミラー等の光学系を用いて画像を虚像として結像するが、像が表示される結像距離が一定であることから、目の焦点距離が変化すると適切な情報を得ることができないことが問題となっていた。この問題に対して、ディスプレイの物理的な位置を制御する方法や、レンズの屈折率を制御する方法が提案されているが、応答が遅く、画像の解像度が低下する等の課題があり、高精細な画像の結像位置を高速に制御するシステムは確立されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、これまでに屈折率の高速な制御技術の確立に向けて、液晶・高分子複合膜における高分子凝集構造を光重合に用いる紫外線の指向性を利用して制御する手法を確立してきた。このことから、液晶中に形成する高分子構造の微細化の実現と、液晶の微小領域における独立した配向制御による大面積での屈折率空間分布制御の構築、それら技術を基にした高精細な画像の結像位置を高速に制御する技術の構築を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、配光制御が可能な紫外線光源の光学系を構築し、液晶・高分子混合材料に指向性紫外線を照射する。試料の表面には、レジストを塗布後、フォトリソグラフィによる微細構造を作製し、液晶・高分子混合材料に入射する配光分布の制御を行い以下の実験を行った。

- (1) 微小な高分子構造制御に向けた作製プロセスの探索
- (2) 可変焦点光学システムの設計
- (3) 焦点可変光学システムの作製と評価

4. 研究成果

- (1) 微小な高分子構造制御に向けた作製プロセスの探索

ネマティック液晶材料 E-7 (Merck 社) および光硬化性モノマー N0A65 (Norland Product 社) を重量比 1:1 で混合し、液晶セルに注入した。液晶セル表面には、フォトリソグラフィによる幅 1 ミクロンの微細構造を形成した。コリメートした紫外線を試料の垂直に入射することで 2 ミクロンのピッチでストライプ状に紫外線を照射することができる。紫外線照射時の温度を変化させて、形成した高分子構造を評価した結果、混合材料が等方相状態となる 50 度以上で、紫外線の配光分布に応じた高分子構造が形成できることを確認した。この現象は低温時において試料は液晶状態を示し、この結果、紫外線を散乱させるためであることを明らかにした。等方相状態では、試料は透明であり紫外線の指向性に沿って高分子が形成された。また、コリメートした紫外線のわずかな広がりの影響を抑えるためには、基板および液晶層を薄くすることが有効であり、最終的に幅が 1 ミクロン以下のストライプ形状の高分子構造の作製に成功した。また、作製した素子に電圧を印加することで、1 ミクロン以下の領域における液晶の高速な屈折率制御の実現に成功した。

- (2) 可変焦点光学システムの設計

本研究では、高速で高画質かつ低電圧駆動が可能な可変焦点光学システムの実現に向けて図 1 に示す液晶と複屈折性基板を用いた光学システムを提案した。液晶により複屈折板に入射する偏光状態を制御することで画像光の光路を変化させ、結像距離を制御できる。複屈折板に対して常光が入射した場合、画像光とレンズの距離 a 、レンズの焦点距離 f 、複屈折板の厚さ t と常光屈折率 n_o を用いて結像距離 b_o は (1) 式で表される。

$$b_o = \frac{f(a + \frac{t}{n_o} - t)}{(a + \frac{t}{n_o} - t) - f} \quad (1)$$

この液晶素子と複屈折板を組み合わせた素子を複数枚組み合わせることで、複数の結像距離を実現することができる。各パラメータの必要条件について検討を行った結果、複屈折板は複屈折性 Δn が大きく、かつ常光および異常光屈折率がそれぞれ小さいこと、複屈折板の厚みが厚いこと、結像レンズの焦点距離 f を小さくすることで、観察者の近傍で大きく結像距離を変化できることを明らかにした。

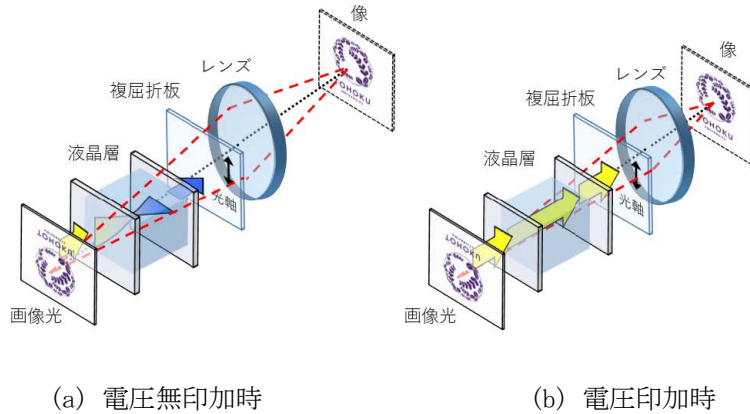


図 1 液晶と複屈折性基板を用いた可変焦点光学システム

(3) 焦点可変光学システムの作製と評価

導出した条件を基に光学システムを設計した。複屈折板として方解石を用いた。方解石の常光屈折率は $n_o=1.656$ 、異常光屈折率は $n_e=1.485$ である。また、複屈折板の厚さは 2.58mm とし、結像レンズの焦点距離は $f=20\text{mm}$ とした。画像光がネガチャートとハロゲンランプを用いて作製し、レンズとの距離は $a=21.31\text{mm}$ とした。

画像評価として、対面に配置したカメラのピント位置を 90cm から 310cm まで移動させ、撮影した像の光強度の最大値 I_{\max} と最小値 I_{\min} から(2)式で計算されるコントラスト C を評価した。

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

液晶素子の電圧無印加時および印加時におけるカメラのピント位置に対するコントラストの変化を図 2 に示す。また、結像距離の理論値との比較の結果を表 1 に、それぞれのピント位置における撮影像を図 3 に示す。これら結果より、液晶素子への電圧印加により結像位置が 110cm から 210cm に変化したことを確認した。スイッチングに必要なとする応答時間は 2ms であり、高速での制御が実現できることも確認した。

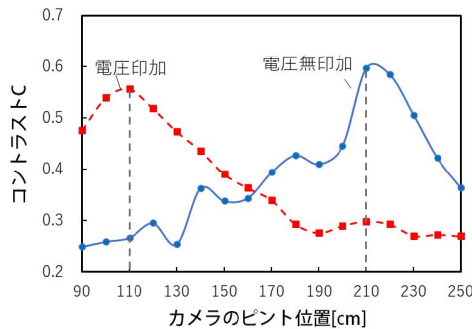


図 2 カメラのピント位置に対するコントラストの変化

表 1 電圧無印加時および印加時にける結像距離の実測値と理論値との比較

TN素子	複屈折板	結像距離実測値[cm]	結像距離計算値[cm]
OFF	n_o	210	211.6
ON	n_e	110	113.1

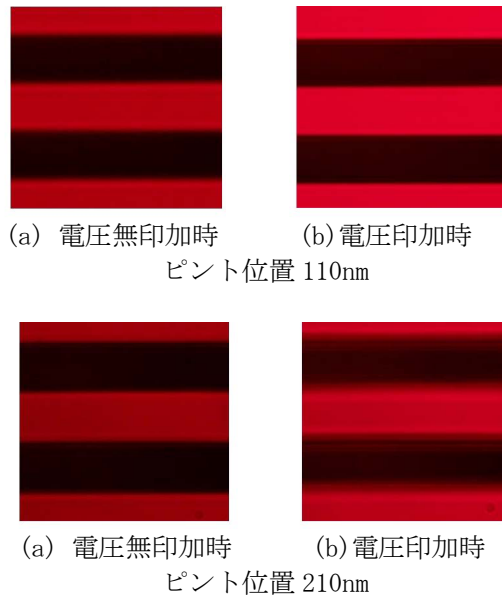


図3 それぞれのピン位置における撮影像

(4) 結論

本研究では、屈折率の高速な制御の確立に向けて、液晶・高分子複合膜における高分子凝集構造の微細化の実現と、液晶の微小領域における独立した配向制御による大面積での屈折率空間分布制御の構築、高精細な画像の結像位置を高速に制御する技術の構築を目的として検討を行った。この結果、液晶セルの上面にフォトリソグラフィによる微細構造を作製し、コリメートした紫外線を液晶・高分子複合膜に照射することにより、紫外線の指向性に沿った高分子構造制御が可能であることを明らかにした。また、基板および液晶セル厚を薄くすると共に、混合材料が等方性となる温度で紫外線を照射することで、大面積に渡って幅が1マイクロン以下の高分子凝集構造が形成できること、電圧印加により高速に液晶の屈折率制御が可能であることを示した。

また、高速で高画質かつ低電圧駆動が可能な可変焦点光学システムの実現に向けて液晶と複屈折性基板を用いた光学システムを提案し、画像の結像位置を大きく制御するための設計条件を明らかにすると共に、複屈折基板として方解石を用い、液晶により入射する偏光状態を制御することで2msで結像位置を110nmから210nmまで高速制御できることを明らかにした。本提案の光学システムが高い解像度を有する画像制御が可能であり、将来の拡張現実表示デバイスや、照明装置等、様々な分野への波及が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 櫻井皓太、柴田陽生、石鍋隆宏、藤掛英夫
2. 発表標題 拡張現実感眼鏡用の可変焦点液晶光学システムに関する研究
3. 学会等名 発光・非発光型ディスプレイ合同研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------