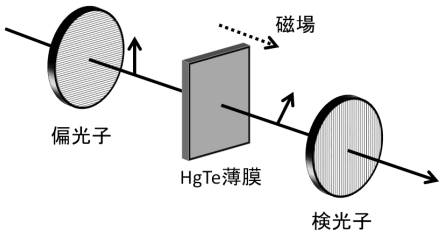
気になる論文コーナー

テラヘルツ・スペクトル帯域における HgTe 薄膜の巨大磁気光学ファラデー効果

Giant Magneto-Optical Faraday Effect in HgTe Thin Films in the Terahertz Spectral Range
[A. M. Shuvaev, G. V. Astakhov, A. Pimenov, C. Brüne, H. Buhmann and L. W. Molenkamp: Phys. Rev. Lett., **106**（2011）107404]

磁気光学ファラデー効果とは，磁場を印加した物質中を磁場方向に平行に進行する直線偏光光線が透過すると偏光面が回転する現象をいい，非相反性を示す．大きなファラデー回転を示す鉄ガーネットなどの単結晶物質が，光部品や高周波部品のアイソレーターとして利用されてきた．ファラデー回転能は，ベルデ定数（単位磁場，単位厚さあたりの回転角）で表される．これまでテラヘルツ・スペクトル帯域におけるベルデ定数は，半導体では InSb の 10^4 rad/(Tm) が報告されてきた．この論文で著者らは，零ギャップ半導体 HgTe 薄膜がサブテラヘルツの周波数において室温で 10^6 rad/(Tm) にも達するベルデ定数を有することを報告している．この現象は，HgTe が非常に高いキャリヤー易動度を示し，かつ室温において熱励起によってキャリヤーが多数生成されることによって説明される．（図 4，文献 13）

著者らによると，HgTe/CdTe 多層膜を作製することによって，さらに 1 桁高いベルデ定数が予想されるという．テラヘルツ・スペクトル領域のアイソレーターや変調素子として，幅広く利用されると期待できる．（佐藤　琢哉）



HgTe 薄膜のファラデー効果測定配置

縮尺された瞳径に適用可能なツェルニケ係数

Zernike Coefficients of a Scaled Pupil
[V. N. Mahajan: Appl. Opt., **49**, No. 28（2010）5374–5377]

ツェルニケ多項式は単位円内で直交化された関数であり，波面収差や面形状の成分ごとの分解表現に適しているため，さまざまな光学分野で活用されている．ツェルニケ多項式は単位円に規格化された関数を適用する必要があるため，異なる瞳径の収差成分を考察するのが難しい．本論文は，既知のツェルニケ係数から異なる瞳径のツェルニケ係数を求める際の一般式を提供する．瞳径のスケールファクターと動径変数を（漸化式を用いて）分離表現することで，式の一般化を実現した．これにより，既知のツェルニケ係数にスケールファクターの関数を掛けることで，スケーリング後のツェルニケ係数を一意に求められる．文中でザイデルの 5 収差に関して瞳径を縮小させた際の係数変化を例示することで，提案した一般式の理解を手助けしている．（文献 9）

ここ数年で，同じ目的の一般式を提供する論文が複数発表されている．本論文の数式は一見煩雑に見えるが，同目的の論文中で最もシンプルな数式として筆者が選んだ文献である．数式が一般化されると，一度プログラム中に書き込めば任意の項数を計算できる点がよい．ツェルニケ多項式を使われる方は，本論文で紹介するスケーリング技術も活用してみてはいかがだろうか．（加藤　正磨）

$$b_{n'm} = \sum_n \sqrt{\frac{n+1}{n'+1}} h_{n'}(n;\varepsilon) a_{nm}$$

$$h_{n'}(n;\varepsilon) = (n'+1)\sum_s \sum_{s'} \frac{(-1)^s (n-s)!\,\varepsilon^{n-2s}}{s!\,s'!\,(n'+s'+1)!}$$

a_{nm} : スケーリング前のツェルニケ係数
$b_{n'm}$: スケーリング後のツェルニケ係数
m : 回転成分の係数
n, n' : 動径変数の次数
ε : スケーリングファクター

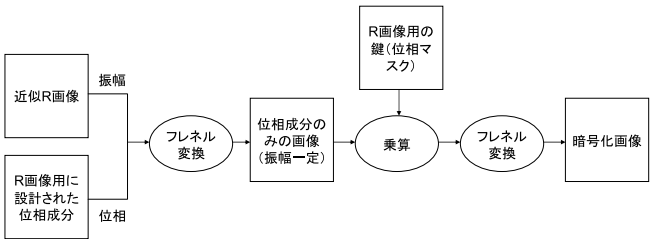
瞳径を変化させた際のツェルニケ係数

変則 Gerchberg-Saxton アルゴリズムとフレネル領域における相互符号化を用いた単一チャネルカラー画像暗号

Single-Channel Color Image Encryption Using a Modified Gerchberg-Saxton Algorithm and Mutual Encoding in the Fresnel Domain
[X. Deng and D. Zhao: Appl. Opt., **50**, No. 31（2011）6019–6025]

本論文では，光学的暗号化手法である二重ランダム位相暗号化を発展させた手法として，RGB カラー画像をひとつの暗号化画像の中に格納可能な暗号化手法を提案している．本論文で提案する暗号化手法では，RGB 画像のうちある 1 つの画像を実面およびフレネル面で位相マスクを乗算することにより暗号化を行うが，このとき用いる位相マスクを Gerchberg-Saxton アルゴリズムと同様の反復手法（変則 GS アルゴリズム）を用いて設計している．復号化では，変則 GS アルゴリズムによって設計した R 画像用の復号鍵（位相マスク）を用いて復号化することで R 画像が復元され，同様に G および B 画像についても，同じ暗号化画像に対してそれぞれに対応する復号鍵を用いることで得ることができる．この暗号化手法では，RGB それぞれの画像を用いて鍵（位相マスク）を設計しているため，得られた位相マスクから元の RGB 画像のいずれかが復元されることが危惧されるが，RGB のいずれかの情報を有する 2 つの位相マスクを合成したものを鍵として用いるため，各鍵画像から RGB 画像が復元されることはない．（図 6，文献 21）

本論文で提案している光学的暗号化手法は，1 つの暗号文から 3 つの画像を復元できるという点で斬新であり，さまざまな応用が期待できる．しかし，暗号化手法の安全性について考えると，暗号鍵（位相マスク）は RGB 画像を元に設計された情報であり，鍵として存在しうる空間がある領域に限定されていると考えられ，安全性がどの程度確保できているのか興味がある．（鈴木　裕之）



提案手法の流れ（暗号化）

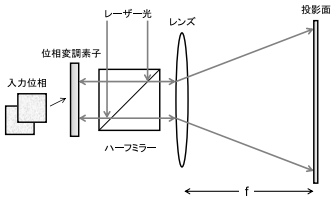
負の相関を用いた時間積分法によるホログラフィックプロジェクションディスプレイのスペックル抑制

Speckle Suppression in Holographic Projection Displays Using Temporal Integration of Speckle Images from Diffractive Optical Elements
[W.-F. Hsu and C.-F. Yeh: Appl. Opt., **50**, No. 34 (2011) H50–H55]

近年，位相変調素子によるレーザー光の回折を利用して投影を行うホログラフィックプロジェクションディスプレイが研究されている．この方式では，投影画像の位相がランダムとなることからスペックルが生じ，画質低下の原因となっている．著者らは，相関係数が負となるようなスペックルパターンを時間積分することにより，スペックルを抑制する手法を提案している．従来手法では，位相変調素子への入力位相を適切に設計することによりほぼ無相関なスペックルパターンが生成され，時間的に M 枚足し合わせることで，スペックル強度を $1/\sqrt{M}$ に低減していた．しかし，フレームレート 60 fps の位相変調素子を利用して 20 fps の動画を投影する場合，M は 3 程度となってしまい，抑制効果は小さい．そこで本論文では，$1/\sqrt{M}$ よりも抑制効果の大きなスペックル低減を行うための手法として，1 枚目の入力位相を従来手法と同様に求めた後，2 枚目では反転させたスペックルパターンが投影されるよう入力位相を設計する．その結果，2 枚のスペックルパターンの相関係数が負の値となり，より大きなスペックル抑制効果を得ることができる．シミュレーションでは，相関係数−0.49 となり，スペックルが従来法より 35% 低減されることを確認した．光学再生においても 2 倍程度のスペックル抑制効果があり，提案手法の有効性が示された．(図 6，表 4，文献 21)

レーザープロジェクションにおけるスペックル抑制手法として，負の相関に着目した点が興味深い．アルゴリズム改良の余地もあり，より相関係数を−1 に近づけることができる可能性もある．今後の発展が期待される．

(鈴木　裕之)



ホログラフィックディスプレイ概念図

可視波長域における機能的拡散反射分光法を用いた炎症皮膚の脈波と全血液量の同時評価

Simultaneous Assessment of Pulsating and Total Blood in Inflammatory Skin Lesions Using Functional Diffuse Reflectance Spectroscopy in the Visible Range
[I. Seo, P. R. Bargo and N. Kollias: J. Biomed. Opt., **15**, No. 6 (2010) 060507]

本論文では，可視波長域の拡散反射率から血液量と脈波変動を同時に計測できる機能的拡散反射分光法（functional diffuse reflectance spectroscopy; fDRS）を提案しており，簡易かつ安価なファイバー光学系で実現可能であることが示されている．実験で使用したシステムでは，ハロゲンランプからの白色光を 2 分岐ファイバーの片脚から導入し，共通端から皮膚へと照射している．共通端を介してファイバー内部へ戻る拡散反射光を 2 分岐ファイバーのもう一方の脚に接続した分光器により計測し，可視波長域の分光反射率を連続的に 6 Hz で取得し，拡散反射標準からの反射光強度 I_0 と皮膚からの反射光強度 I より，みかけの吸光度 $A=-\log_{10}[I/I_0]$ に変換している．提案手法を実証するために，6 名の被験者に対して 0.8〜1.8 MED の紫外線照射量で炎症を誘発し，分光拡散反射率の測定を行っている．

ヘモグロビンによる吸光が大きい波長 533 nm および 577 nm での吸光度には，心拍に由来する約 1 Hz の脈波と，血管拡張・収縮に由来する約 0.1 Hz のゆっくりとした時間変動が確認されている．一方で，ヘモグロビンの吸光が小さい 700 nm の吸光度には，血流および呼吸による有意な時間変動は確認されない．紫外線照射量の増加に従い，吸光度は 400〜700 nm の波長域全体で，また，心拍由来の脈波の振幅は 450〜600 nm の範囲で増加する結果が得られている．さらに，波長 529，545，570，584 nm の吸光度を用いて酸化ヘモグロビン量と還元ヘモグロビン量の変化量を推定し，それぞれの脈波成分と定常成分を評価している．この際，吸光スペクトルに対するメラニンの吸光と組織による光散乱の影響が考慮されている．酸化ヘモグロビンの定常成分は紫外線照射量の増加に対して線形に増加しており，これは従来の拡散反射分光法で得られた結果と一致している．また，脈波の振幅は 1.2 MED の照射量から大きく増加する二相性の変化を示しており，酸化ヘモグロビンの寄与が大きい．この二相性の変化はレーザードップラー血流計により得られる結果と類似している．(図 4，文献 10)

本論文では，炎症に対する微小循環応答の毛細血管レベルと細動静脈レベルでの違いが議論されている点が興味深い．また，ファイバー光学系による計測結果を示しているが，原理的にマルチスペクトルイメージングへの応用も可能であると思われる．さらに，炎症性皮膚以外にも，例えば血管腫，皮膚色素化障害，熱傷等の診断やモニタリングなど多くの応用が期待できる．

(西舘　　泉)

ジグスワップパズル画像を利用したステガノグラフィー手法

Novel Steganographic Method Based on Jig Swap Puzzle Images
[E.-J. Farn and C.-C. Chen: J. Electron. Imaging, **18**, No. 1 (2009) 013003]

ステガノグラフィーは，伝達したいメッセージを別の情報に埋め込むことで，その通信の事実および伝達される情報を秘匿する通信秘匿技術である．本論文では，ランダムに並べ替えられた画像を元に戻すパズルゲーム（ジグスワップパズル）にメッセージを埋め込む手法を提案している．パズルの元になる画像は複数のブロックに分割する．次にメッセージとステゴ鍵をもとに，並べ替え規則の初期状態を決定する．ステゴ鍵を用いて生成した乱数列を用いて，並べ替え規則の更新を行う．この操作を，すべてのブロックが元の画像と異なる位置に配置され，隣接ブロックがすべて異なる状態になるまで繰り返す．また，ステゴ鍵により決定される位置に，繰り返し回数に対応したインデックスをもつブロックを配置することで，繰り返し回数の情報をパズル画像に埋め込む．以上の処理により，パズル画像が生成される．復号処理は，まず最後の並べ替え規則および繰り返し回数を特定する．これらの情報とステゴ鍵をもとに並べ替え規則の初期状態を特定することで，メッセージを復号する．圧縮などに対する耐性などの評価を行い，提案手法のステガノグラフィーとしての妥当性を示している．(図 10，表 2，文献 36)

本手法では，ステガノグラフィーの情報キャリヤーとして，単なる画像ではなくパズルゲームを採用している点が興味深い．しかしながら，埋め込み可能な情報量は画像の分割数で決定されるため，その拡大が課題であるといえる．

(生源寺　類)

並び替え前後のジグスワップパズル画像の例