

光変調材料を用いた 赤外波面情報の可視化・再生手法に関する研究

学位論文内容の要旨

1960年代におけるレーザーの実用化にともない、可干渉性の高いレーザーを光源として用いた干渉計測、あるいはホログラフィ干渉法に代表される光計測手法による流れの可視化、光学素子の形状測定等が可能となり、現在においても広く利用されている。また、近年における検出器の画素の高密度化と計算機のデータ処理速度の高速化にともない、CCD等によりデジタルデータとして記録されたホログラムを数値計算することで物体を再生するデジタルホログラフィにより、3次元物体の任意の断面プロファイルの再生や物体に加わる応力の解析等が可能となっている。これらの光計測では一般的に可視域の光源が用いられている。

一方、可視域よりも波長の長い赤外領域において、これらの光計測を同様に行うことが可能となれば、その応用としてプラズマ計測や非破壊検査、医療画像診断等が考えられることから、赤外光を用いた干渉計測、ホログラフィに関する研究は学術的興味にとどまらず、産業分野に寄与する貢献が大きいと考えられる。しかし、単に赤外線を検出するという観点から考えるといくつかの素子が既に実用されているが、それらの多くは赤外線により形成されるホログラムを記録するだけの十分な空間分解能を有してはいない。また、赤外ホログラム記録媒体として利用可能な材料に関しては、これまでにゼラチンフィルム等が報告されているが、素子の作製、制御が複雑であるものが多く、赤外情報を実時間的に読み出すことに適した材料は少ないため、その利用範囲は限られてしまう。

そこで本研究では、高空間分解能と実時間的な読み出しが期待できる光変調材料を用いた簡便な赤外位相測定、赤外波面再生手法を提案し、その有用性を実験的に確かめることを目的とする。本論文では位相変調型の光変調材料として有機系液体であるニトロアニソールを利用した。ニトロアニソールは照射される赤外線を熱として吸収することでその屈折率が変化する性質を有していることから、読み出しに用いる可視光に照射赤外線強度に対応した位相変調を与える。したがって、例えば赤外ホログラムがニトロアニソールに形成されている場合、ニトロアニソールが可視光に対して位相ホログラムとして機能することで、赤外波面情報を可視光により再生することが可能となる。また、ニトロアニソールの温度変化を利用するため、準実時間的に赤外情報を読み出すことが可能である。赤外-可視変換素子として利用するためには、二枚の基板の間にニトロアニソールを注入したセルを作製するだ

けでよいので構造がシンプルであり、アレー状の画素構造を必要としないことから高空間分解能を期待できる。また、素子の大面積化等に関しても、電気光学的な既存の赤外線検出素子と比較して自由度が高い等の利点がある。

本論文は全7章から構成されており、以下のような概要となっている。第1章は序論であり、本研究の位置付けとして研究背景、目的および本論文の構成について記述した。第2章では、本研究の基盤となる干渉法およびホログラフィの原理を考えるうえで重要となる光の性質として、光の回折と干渉について記述した。また、赤外波面の数値的再生の過程において必要となるデジタルホログラフィの再生理論について記述した。また、赤外領域で主に用いられている検出素子、記録材料についてまとめ、本研究で提案する光変調材料を用いた手法の必要性について論じた。第3章では、光変調材料として利用するニトロアニソールに関してその緒特性を記述し、赤外-可視変換素子として用いる場合の可視化再生手法、時間分解能、回折効率について、理論的アプローチによる考察とともに実験結果を示した。時間分解能に関しては立上り、立ち下がりともに数十 msecであることを確認し、準実時間的に赤外情報を読み出すことが可能であることを示した。また、回折効率を空間分解能の一つの指標として考えた場合、波長 $10.6\mu\text{m}$ の中赤外領域においても感度を有する焦電素子カメラの空間分解能と比較して高いことを確認した。第4章では、赤外情報が干渉縞として光変調材料に形成された状態で、材料を透過して変調を受けた可視光が形成する回折像の変化と赤外干渉縞の変化の対応関係を明らかにすることにより、赤外位相情報を可視情報に変換して読み出すことが可能であることを示した。また、可視回折像に対して位相シフト法を適用することにより、赤外位相変化を定量的に測定する手法を新たに考案し、赤外光学材料の形状を精度良く測定した結果を示した。第5章では、光変調材料を可視光に対する位相ホログラムとして機能させることにより、ホログラフィの再生理論から推定されたとおりに赤外波面が可視光により再生されることを確認した。加えて、可視光による二重露光ホログラフィ干渉法を併用することで、赤外位相情報も可視再生像の強度変化として可視化可能であることを示し、これにより、振幅、位相を含む赤外波面情報を可視光により読み出すことが可能であることを確認した。第6章では、光変調材料に赤外線によって形成されるホログラムを可視光に対する位相変調分布として抽出する手法を新たに提案し、抽出された位相変調分布をもとに数値計算することにより、赤外波面の振幅情報だけでなく、位相情報に関しても数値的な再生に成功した例を示した。これにより、可視光で行われているデジタルホログラフィによる計測を赤外領域でも同様に行うことが可能であることを示した。第7章は結論であり、本論文の総括を記述した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 日 野 友 明
副 査 教 授 板 垣 正 文
副 査 助 教 授 富 岡 智

学 位 論 文 題 名

光変調材料を用いた

赤外波面情報の可視化・再生手法に関する研究

光技術は現在、通信、医療等の多岐の分野において応用されており、今後もさらなる技術の開発、発展が期待される場所である。中でも、光計測の分野においては物体表面の形状を光源波長以下の精度で測定することが可能となっているだけでなく、近年においてはデジタルホログラフィーによる3次元物体の再生技術が様々な分野で応用されている。これらの光計測は可視光領域においては確立された技術となっているが、より長波長である赤外光により同様の測定が可能となれば、その計測対象と応用の幅を広げることが可能となることから、赤外光を用いた干渉計測、ホログラフィーに関する研究は学術的興味にとどまらず、産業分野に寄与する貢献が大きいと考えられる。

本論文は、赤外光の照射に際して光学的特性が変化する材料に着目し、それを光変調材料として用いることにより赤外情報を可視光で読み出すための新しい手法を提案し、優れた計測手法、波面再生手法である干渉計測、ホログラフィーを赤外領域へ展開することを目的としたものであり、光変調材料として機能するニトロアニソールの有用性とそれを利用した赤外位相測定に特化した手法、および波面再生手法それぞれの原理と実験に基づく考察が記述されている。その主要な成果は次のように要約される。

(1) 光変調材料としての利用を目的としたニトロアニソールに関して、その基本的性能、および機能性を確認するために、時間分解能、回折効率を測定し、本論文で提案する手法のための素子として充分機能するだけの特性を有していることを確認しており、回折効率を空間分解能の指標の一つとして考えた場合、ニトロアニソールの空間分解能が既存の赤外カメラの画素ピッチと比較しても高いことを見出して

いる。

(2) 赤外干渉法による位相計測に特化した手法として、赤外干渉縞が形成された光変調材料を可視光に対する位相回折格子として機能させることにより、可視光が形成する回折像から赤外位相変化を測定する手法を提案し、可視回折像と赤外干渉縞との対応関係を理論的、実験的に明らかにすることで、回折像の変化から赤外領域での位相変化を定量的に測定可能であることを見出している。また、回折像に対して位相シフト干渉法を適用することにより二次元的な赤外位相分布を精度良く得る手法を新たに提案し、同手法による光学基板の形状測定を行うことによりその実現性を示している。

(3) 光変調材料の高い空間分解能を生かし、素子上に形成された赤外ホログラムを可視光により再生することで、赤外波面の振幅情報に加え、可視光の二重露光ホログラフィ干渉法を併用することにより、赤外位相情報も可視再生像の強度変化として再生可能であることを示し、振幅、位相を含む赤外波面情報を可視光により読み出すことが可能であることを見出している。

(4) 赤外波面の新しい再生手法として、光変調材料に赤外線により形成されるホログラムを可視光に対する位相変調分布として抽出することで、それを数値計算することにより赤外波面の振幅に加えて位相情報も計算機上で数値的に再生する手法を提案し、同手法による赤外波面の振幅、位相両方の数値的再生に成功し、可視光で行われているデジタルホログラフィによる計測を、赤外領域でも同様に行うことを可能とした。

これを要するに、著者は光変調材料を用いた新しい赤外波面情報の再生手法を考案し、理論的アプローチと実験によりその実現性を確認しており、既存の赤外線検出素子では困難な赤外波面再生を可能にしたことから、量子エネルギー工学分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。