

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560197

研究課題名（和文） 位相トモグラフィーによる屈折率分布の三次元非接触計測

研究課題名（英文） Three dimensional measurement of refractive index using phase tomography

研究代表者

富岡 智 (TOMIOKA SATOSHI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40237110

研究成果の概要（和文）：

気体の温度分布や液体の濃度分布を測定する場合、熱電対等のセンサーを挿入すると測定対象の状態が変わってしまうため、正しい測定ができない。本研究では、光をプローブとした干渉法による位相計測とコンピュータトモグラフィーの組み合わせによる、位相トモグラフィーを用いて三次元かつ非接触な屈折率分布計測を検討した。これにより発熱体周辺の気体の温度を求め、理論値と比べ定性的に妥当な結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：

In measurement of distribution of gas temperature or concentration of liquid, the correct measurement is difficult, since the condition of the object to be measured is changed due to the sensor (e.g thermo couple) itself. In this study, we propose a phase tomography that is a coupling method of optical interferometer and computed tomography that is three dimensional non-destructive measurement. Experimental measurement of three dimensional gas temperature distribution agree with theoretical distribution qualitatively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学・対流

キーワード：屈折率、位相、干渉、コンピュータトモグラフィー、応用光学、計測工学、応用数学

1. 研究開始当初の背景

気体の温度分布や液体の濃度分布を測定する場合、熱電対等のセンサーを挿入すると測定対象の状態が変わってしまうため、正しい測定ができない。光をプローブ光として用いればこのような擾乱は起こらず正確な測

定が可能となる。このような非接触な内部分布の測定としては、医療診断あるいは工学分野でも用いられているX線コンピュータトモグラフィー(CT)が知られている。X線CTでは、X線が媒質を透過する際に吸収あるいは散乱による減衰量を画像として取得する。入

射方向を測定対象の回りのあらゆる方向(180°)からの減衰量画像を計算により、媒質内部の減衰率を算出する。X線の減衰量の代わりに、可視光を入射光とした場合の位相変化量に置き換えれば、媒質中の屈折率分布を測定でき、屈折率に依存する気体の温度分布、プラズマの電子密度分布、液体の濃度分布等が測定可能となる。このような位相計測とCTを組み合わせた測定方法を申請者等は位相トモグラフィーとして提案する。この研究は今までにほとんどなかった。

2. 研究の目的

位相トモグラフィーには、医療用等で用いられている振幅トモグラフィーと異なり、位相抽出の過程が追加され、以下の三つのステップが必要となる。

(1) 干渉体系による干渉縞画像の計測

(2) 干渉縞画像からの位相変調画像の算出

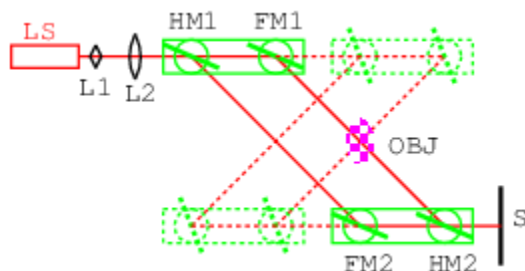
(3) 位相画像から、媒質内部屈折率の再構成
本研究では、これらのステップを気体の温度の三次元非接触測定に応用し、その実現の可否を評価することを目的とする。

3. 研究の方法

前述の目的に記した三つのステップのそれぞれについて予想された問題点と方法を記す。

(1) 干渉体系による干渉縞画像の計測

医療用のCTでは測定対象を回転させることができるが、気体の温度分布を測定対象とする場合には、測定対象を回転させると対流が発生し、測定対象自身の状態が変わってしまうために、回転させることができない。そこで、測定体系の工夫に測定対象への入射光の角度を変化させる必要がある。しかし、光学的に精密なアライメントが必要な干渉体系を回転させることは容易ではない。そこで、180°の方向からのデータの取得はあきらめ、入射角を60°程度と限定し、再構成アルゴリズムの工夫により再構成を行う。この体系を実現するために、二つの一軸移動自動ステージのそれぞれに二つずつの自動回転ステージを載せそれにミラーならびにハーフミラーを搭載させたマッハ・ツェンダー干渉系を採用した。



(2) 干渉縞画像からの位相変調画像の算出

干渉縞画像としては縞模様が記録される。縞と縞の間隔は 2π 位相差に相当し、位相変調がなければ、これらの縞は平行なパターンとなるが、位相変調があればそれが歪む。この歪んだ部分から位相変調量を算出する。そのプロセスには、①キャリア成分の除去、②位相連結(位相アンラッピング)の二つのステップが必要である。

①のキャリア成分の除去では、上述の位相変調がない場合の平行な縞のパターンの除去を行う。通常は、測定対象を含まない場合の測定画像をバックグラウンドとして測定し、そこからキャリア成分を求めるが、今回の体系では、ミラーを移動させるため再現性が乏しくバックグラウンド画像が得られなかったため、測定信号自身からキャリア成分を除去する。測定画像を二次元フーリエ変換すれば、二つの点対象のスペクトルが得られる。この一方を除去し、残った方の重心を新たな原点として、逆フーリエ変換すれば、複素振幅画像が得られる。この実部と虚部の位相角がキャリアの除去された、位相画像になる。この位相画像は、 $-\pi$ から $+\pi$ の間の値しか取らず、部分的に不連続な場所が現われる。本来は、これらにはこのような不連続は存在せず、範囲も限定されない。これを連続的に接続する手順が②の位相アンラッピングである。上記のキャリア除去の過程でノイズが多く含まれるため、従来の位相アンラッピングアルゴリズムでは不十分だったため、ノイズが含まれる場合でも適用可能な新たな位相アンラッピングアルゴリズムを開発した。

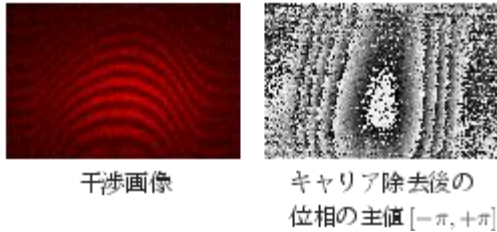
(3) 位相変調画像から、媒質内部屈折率分布の再構成

上記の(1)の干渉体系の制約から全ての方向からの透過画像が得られないため、通常のCTの再構成アルゴリズムは使えない。そこで、再構成アルゴリズムとして、最小ノルム解を、Lカーブ法と、最尤推定法に基づく繰り返し計算を用いた場合について、シミュレーションによりそれぞれの性能を評価し、どの方法を用いるべきかを決定した。それぞれ位相画像は内部の屈折率分布を積分したものと評価される。CTでは積分情報のみが得られており、それから内部の日積分関数を求める逆問題に相当する。その解は一つに決まる保証はないが、拘束条件を課すことにより一つの解を決定できる。その拘束条件が最小ノルム条件である。その選び方は、複数の解候補のなかで内部分布のノルム(絶対値の積分量)と勾配のノルムを用いた。

以上を組み合わせ、発熱体近傍の温度分布を例にとり、総合評価を行った。

4. 研究成果

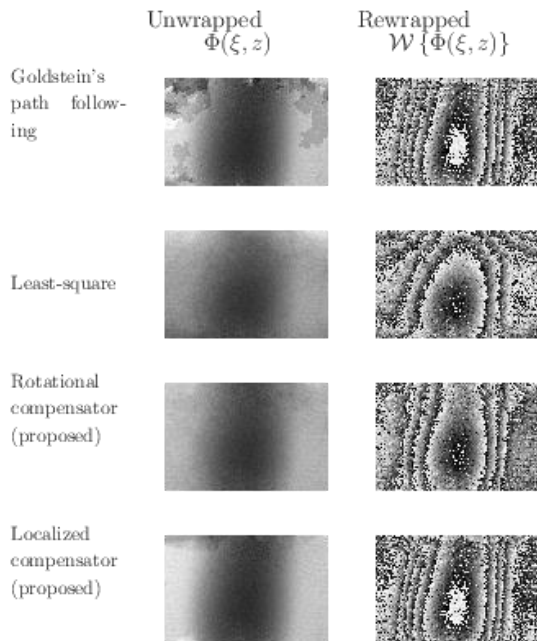
入射方向可変干渉系により取り込んだ干渉縞画像の一例を以下に示す。この図の左は可視のヘリウムネオンレーザー光をろうそくの炎を透過させた場合であり、画像下部の中心にろうそくの芯がある。右の図は、この干渉画像からキャリア成分を除去した結果である。この結果からノイズが大きいことが判り、位相連結ではノイズを除去可能なものを用いる必要があることが理解できる。



干渉画像

キャリア除去後の
位相の主値 $[-\pi, +\pi]$

また、キャリア成分を取り除いた結果に、位相アンラッピングを行い、従来の方法と新たに提案した手法による結果の比較を行った。以下の図にその一例を示す。

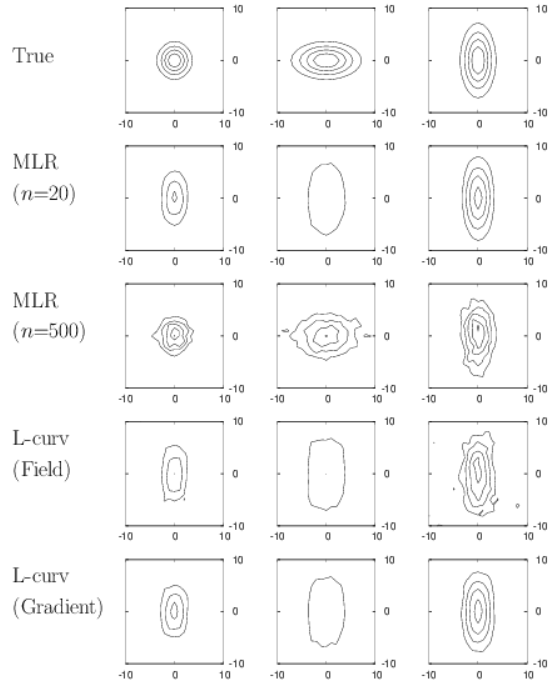


この結果の上段二つが従来の手法であり、下の二つが新たに提案した方法(一方は論文発表済み、他方は投稿中)である。左が位相連結した結果を示し、右は比較を容易にするために、 2π で除した余りを示している。

一番上の方法(Goldsteinの方法)は、位相連結後でも区分的な不連続が現われており使えない。下段の3つは、不連続は現われていないが、右の結果を見ると、最小自乗法

least-square)と、Rotational Compensatorによる方法は、過小評価されている様子が判る。最後の Localized Compensator による方法が最も高精度である。

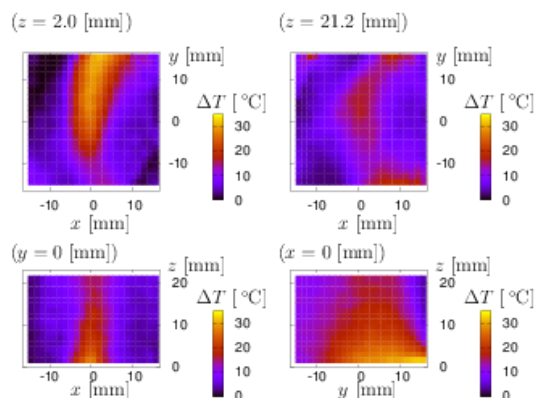
再構成アルゴリズムのシミュレーション結果を次の図に示す。



内部分布を等方的(上図の左列)なもの、横方向に広がったもの(中列)、縦方向に広がったもの(右列)として、それらのそれぞれについて複数の方向からの投影データ(積分量)を計算し、それを逆問題の入力とした。入射方向は、実験の入射方向可変干渉体系に合わせて縦方向が密で、横方向が疎とした。図の最上段が真の結果(シミュレーションで最初に仮定した分布)、二段目と三段目が繰り返しによる最優推定解法の20回目と500回目の結果を示している。下の二段は、Lカーブ法による絶対値ノルムが最小となる解、勾配ノルムが最小となる解を示している。最尤推定解では初期の段階では縦長(入射光が密な方向)の分布が得られるが、ある程度収束した状態では、仮定した分布と似た結果になる。一方、Lカーブ法はいずれも縦長の分布になってしまう。以上のシミュレーションより、入射方向がまばらなデータに対する再構成アルゴリズムとしては、これらの中では最尤推定法に基づく繰り返し計算が最も誤差が小さかったと考えられ、後述の実験結果の評価にはこの方法を用いた。

今回の研究で提案したシステム全体の評価を行うためにセラミック抵抗(径5mm、長さ

10mm の円筒径)を発熱体として、その近傍の温度分布を三次元的に求めた。その結果を以下に示す。



この結果ではセラミック抵抗を長い方向を y 方向として配置しており、温度分布もその方向に伸びた形で現われている。また、セラミック抵抗のすぐ上では高温で、離れるにしたがい温度が低下する様子も判る。しかし、x-y 面内の分布が楕円状にならず三日月状になっている。また、x 方向に長手方向を選んだ結果(図は省略)では、x 方向に対する分布の伸びは y 方向の結果と比べると小さい。これらは再構成アルゴリズムに精度に関する問題が残っていることを示唆している。

以上より、温度分布計測を例とした実験では、定性的には妥当な結果が得られたが、まだ精度は低く、今後、再構成アルゴリズムの改良が必要であることが判った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Rotational and direct compensation for digital hologram phase unwrapping", Proceedings of SPIE, in press (2012), 査読あり
- (2) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Nondestructive three-dimensional measurement of gas temperature distribution by phase tomography", Proceedings of SPIE, vol.8296, pp.17_1-9 (2012), 査読あり
- (3) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Reliable phase unwrapping algorithm based on rotational and direct compensators", Applied Optics, vol.50, pp.6225-6233(2011), 査読あり
- (4) Satoshi Tomioka, Samia Heshmat, Naoki Miyamoto, and Shusuke Nishiyama, "Phase unwrapping for noisy phase maps using rotational compensator with virtual

singular points", Applied Optics, vol. 49, pp.4735-4745 (2010), 査読あり

[学会発表] (計 5 件)

- (1) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Phase Unwrapping Algorithm Based on Compensation for 3D Shape Measurement", The 1st International Laser Display Conference, 2012/4/26, Yokohama, Japan
- (2) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Nondestructive three-dimensional measurement of gas temperature distribution by phase tomography", IS&T/SPIE Electronic Imaging, Computational Imaging X, 2012/1/24, Burlingame, California, USA
- (3) 富岡 智, 「位相トモグラフィによる非接触三次元気体温度分布計測」, 核融合科学研究所画像計測研究会, 2011/9/2, 土岐
- (4) Samia Heshmat, Shusuke Nishiyama, Satoshi Tomioka, "Two-dimensional Phase Unwrapping Using Virtual Residues", 応用物理学関係連合講演会, 2010/3/19, 平塚
- (5) Samia Heshmat, Shusuke Nishiyama, Satoshi Tomioka, "Direct Compensation Phase Unwrapping Algorithm for Interferometric Application", 2009/12/14, 日本原子力学会北海道支部研究発表会, 札幌

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

雑誌論文の(3)は次の URL により公開

<http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/48197>

雑誌論文の(4)は次の URL により公開

<http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/44812>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富岡 智 (TOMIOKA SATOSHI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：40237110

(2) 研究分担者

西山 修輔 (NISHIYAMA SHUSUKE)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：30333628

(3) 連携研究者

加美山 隆 (KAMIYAMA TAKASHI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：50233961

(4) 連携研究者

坂下 弘人 (SAKASHITA HIROTO)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：00142696