

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560216

研究課題名(和文) 干渉トモグラフィーによる三次元温度分布の非接触計測

研究課題名(英文) Non-destructive three-dimensional temperature measurement using interferometric tomography

研究代表者

富岡 智 (Tomioaka, Satoshi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40237110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：気体の三次元温度分布を非接触に計測するために、入射方向が可変の干渉計を構築した。得られたそれぞれの入射方向からの干渉画像を、新たに開発した雑音に強い位相結合アルゴリズムにより位相画像に変換し、これらをコンピュータトモグラフィーにより処理し、三次元温度分布を再構成した。有効性を示すために、ろうソクの炎の周辺温度を計測し、熱電対により測定した温度との比較により、本システムの妥当性が示された。

研究成果の概要(英文)：In order to measure nondestructive three-dimensional temperature distribution of heated gas, we have developed an incident angle variable interferometer. The interferogram from each incident angle is converted to phase image by newly developed phase unwrapping algorithms. The three-dimensional distribution is reconstructed by a computed tomography. To demonstrate validity of this system, we have measured three-dimensional gas temperature distribution around candle flame. From a comparison with a result by using a thermocouple, we conclude that the developed measurement system can measure the nondestructive three-dimensional distribution successfully.

研究分野：計算科学

キーワード：三次元非接触計測 温度分布 トモグラフィー 位相 入射方向可変干渉計 屈折率 位相アンラッピング 重みつき再構成

1. 研究開始当初の背景

本研究は、気体の温度分布を光の干渉を用いて非接触かつ三次元的に測定しようとするものであり、今まで、このような試みはほとんどなく、時間的に安定なものに限定されたものが数例報告されているに過ぎない。これが可能となれば、燃焼の研究あるいは異常発熱等のモニタリングツールとして多くの分野での応用が期待できる。

非接触かつ三次元的に測定する方法としては、医学の分野で発展したコンピュータトモグラフィー(CT)を用いる。既に応用されているCTでは、人体等の測定対象に対する入射方向の異なる複数のX線によるレントゲン写真をコンピュータにより三次元分布を再構成する。レントゲン写真は、測定対象の測定ビームに沿った減衰率の積分を測定したものである。測定対象が気体の場合、減衰は起こらないが、温度に応じて気体の屈折率が変化する。屈折率の光路に沿った積分は、干渉計により位相変化として計測することができるので、医療用のCTのアルゴリズムを流用すれば、三次元の屈折率分布が得られ、温度分布を非接触で計測できることになる。

干渉計は、古くからの手法であるが、CTに利用するために、入射方向を変えるような方法は、今までに研究されていない。

2. 研究の目的

本研究では、入射方向を可変とする干渉計を構築し、コンピュータトモグラフィーにより三次元の温度分布を計測するシステムを構築し、それによる測定結果の妥当性の評価を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1)入射方向可変干渉計の構築

二つの移動ステージのそれぞれに全反射鏡用ならびに半反射鏡用の回転ステージを載せ、これらにより干渉計を構築した。これらのステージは計算機により制御し、異なる入射方向からの干渉縞を取り込むことができる。レイアウトの都合から、入射方向を制御できる範囲が限られているため、CTによる三次元再構成結果が特定の方向に伸びてしまう現象が起きるため、入射方向可変干渉計の他に、入射方向が固定の通常の干渉計を一系統追加した。これらの構成を図1に示す。

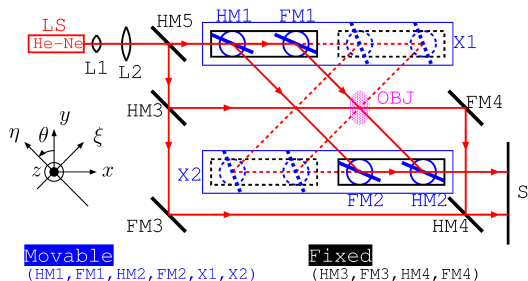


図1. 入射方向可変干渉計

このシステムでは、入射方向を変える際に、振動が発生し干渉縞が時間的に積分されたばけた像になってしまう。この影響を低減するために、カメラの露光時間を短くする必要があるが、露光時間を短くすると干渉縞に含まれる雑音の影響が大きくなってしまいます。この雑音は最終的に三次元再構成に影響を与えるため、干渉縞の処理には雑音に強いアルゴリズムが必要となる。

(2)雑音に強い位相連結アルゴリズムの開発

干渉縞は、明暗の画像として取り込まれるが、これを屈折率の積分である位相変化に変換するアルゴリズムを適用する必要がある。

測定対象がない場合の干渉縞は複数の平行な縞模様となり、これをフーリエ変換すると原点と縞の間隔から決まるキャリア周波数にピークが発生する。後者は、原点を中心とした対称な位置に現れるため計三つのピークができる。測定対象が存在する場合の干渉縞のフーリエ変換はキャリア周波数のピークが測定対象の影響で広がる。キャリア周波数近傍のピーク以外を除去し、それを逆フーリエ変換し、複素数の偏角を求めれば、測定対象による位相変化として得られる。得られた位相変化は、偏角を求めるための関数が多価関数となるため、 $-\pi \sim +\pi$  の間に限定され、 $2\pi$  の整数倍の任意性が残っている。この任意性を除去する処理は位相連結と呼ばれるが、入射方向可変干渉計から得られる干渉縞には雑音が多く含まれるため、従来から用いられるアルゴリズムでは大きな誤差が生じる。そこで、新たに雑音に強い位相連結アルゴリズムを開発した。

上述のように、干渉縞から求められる位相は  $-\pi \sim +\pi$  の主値しか得られない。この場合、画像の隣接点間で位相のジャンプが発生し、不連続点が現れる。位相連結は隣接点間の位相差の絶対値が  $\pi$  を超える場合には、一方に  $2\pi$  の位相を加算あるいは減算により連続位相に変換する。ある点から任意の経路に沿って位相結合を行って元の点に戻ってきた場合には、元の位相と一致しなければならない。しかし、サンプリングが十分に細くなくならない場合には、この条件を満たさない特異と呼ばれる状態が発生する。画像の最も小さな閉路として  $2 \times 2$  の画素を考えた場合でも、特異性が発生し、この経路の中心に特異点を置く。この特異点は経路のどこかに  $\pi$  を超える位相差が存在することを意味する。これまで、多くの位相連結アルゴリズムが提案されてきたが、いずれも特異性を如何にして除去するかが課題であった。従来の位相連結アルゴリズムの代表的なものに経路追跡型アルゴリズムと、最少二乗法に基づく離散コサイン変換を用いる方法が知られている。前者は、複数の特異点間の距離の総和が最少になるように特異点同士を直線で結び、この直線をまたぐ場合には、位相差の絶対値が  $\pi$  を超えることを許す。この方法で

は、特異点同士を結び直線を誤ると、画像域全体で致命的な誤差を含む。一方、最少二乗法の場合は、致命的な誤差は含まないが、画像の至る所に誤差が生じ、過小評価となってしまう。我々が開発した方法(局所補償連結法)は、特異点をグループ化し特定の領域のみを正規化できる。その結果、閉じ込められた特異点グループの近傍では、最少二乗法と同様に過小評価となるが、特異点がない領域では正しい位相連結がなされ、トータルの性能としては従来の方法より優っている。

開発したアルゴリズムと従来のアルゴリズムの比較を図2に示す。我々の開発したアルゴリズム(c)では、他と比べ、雑音が小さく、かつ過小評価も見られない。

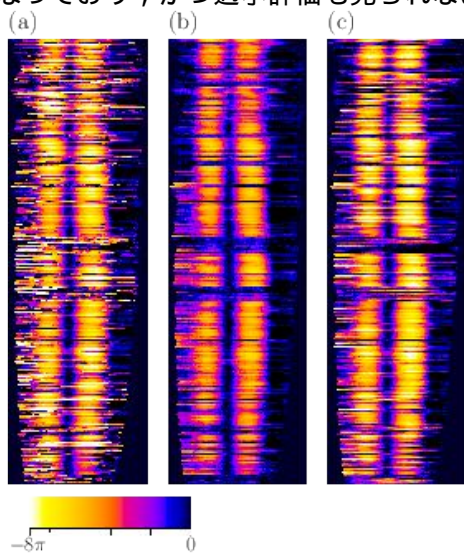


図2. 位相連結アルゴリズムによるサイングラムの比較: (a) Goldstein の経路追跡法, (b) 離散コサイン変換を用いた最少二乗法, (c) 局所補償連結法(我々が開発したもの)

### (3)重みを考慮した再構成アルゴリズムの開発

図1に示した測定系から得られる干渉縞(投影データ)には、入射方向可変干渉計から得られる複数のほぼ連続な投影データと、一つしか得られない固定入射角度からの投影データがある。徐々に変化するデータは、途中で一つのデータが失われても、周辺角度のデータにより補完が可能であり、再構成には大きな影響を与えないが、固定角度からのデータは他のデータでは代用できない。この意味から固定角度の投影データの持つ情報量は大きいと考えられる。この情報量の大きさを考慮するために、重みを考慮できる再構成アルゴリズムを開発した。図3に、二つのロウソクの炎およびその近傍の気体の温度の再構成結果の特定断面の分布を示す。固定方向の重みを他の方向からの投影方向の100倍にした場合には、縦方向に延びる現象等は観測されず、等方的な温度分布が得られていることがわかる。

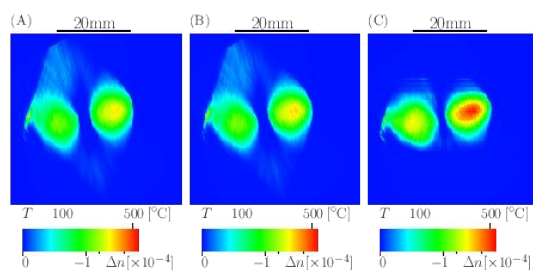


図3. 固定投影データ追加の効果(A) 固定方向なし, (B)固定方向あり(重みなし), (C) 重みつき固定方向あり(重み=100)

図4にある点を通る x-y,y-z,z-x 断面の三次元分布を示す。また、図5に熱電対によるいくつかの点における温度測定の結果を示す。

熱電対による測定結果と比較すると、2割程度過小評価になっているが、ほぼ妥当な結果が得られている。

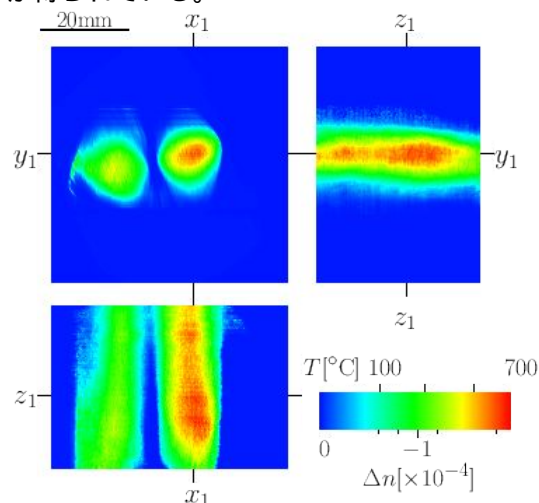


図4. ロウソク近傍気体温度の再構成結果



図5. 熱電対による温度測定結果

## 4. 研究成果

三次元気体温度分布の非接触計測を目的として、入射方向可変干渉計を構築し、雑音に強い位相連結アルゴリズムの開発、重みを考慮できるアルゴリズムを開発を行った。これらの併用により気体の温度分布の三次元非接触測定が可能となった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

- (1) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, Samia Heshmat, Yasuhiro Hashimoto, Kodai Kurita, "Three-dimensional gas temperature measurements by computed tomography with incident angle variable interferometer", Proceedings of SPIE, 査読有, 9401, 0J01-0J10, DOI: 10.1117/12.2082499 (2015)
- (2) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, Samia Heshmat, "Carrier peak isolation from single interferogram using spectrum shift technique", Applied Optics, 査読有, 53(25), 5620-5631, DOI: 10.1364/AO.53.005620 (2014)
- (3) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Performance Evaluation of Phase Unwrapping Algorithms for Noisy Phase Measurements", International Journal of Optomechatronics, 査読有, 8(4), 260-274, DOI: 10.1080/15599612.2014.942927 (2014)
- (4) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Weighted denoising for phase unwrapping", Proceedings of SPIE, 査読有, 9019, 0M1-0M10, DOI: 10.1117/12.2039390 (2014)
- (5) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Phase extraction and unwrapping using rotational and direct compensators for digital hologram", Optical Engineering, 査読有, 52(10), 101910-1--8, DOI: 10.1117/1.OE.52.10.101910 (2013)
- (6) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Phase unwrapping for noisy phase map using localized compensator", Applied Optics, 査読有, 51(21), 4984-4994, DOI: 10.1364/AO.51.004984 (2012)
- (7) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Rotational and direct compensation for digital hologram phase unwrapping", Proceedings of SPIE, 査読有, 8413, OS\_1-6, DOI: 10.1117/12.975750 (2012)
- (8) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Phase unwrapping algorithm based on singularity compensation for three-dimensional shape measurement", Optical Review, 査読有, 19(6), 444-450, DOI: 10.1007/s10043-012-0076-9 (2012)

[学会発表](計9件)

- (1) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama,

Samia Heshmat, Yasuhiro Hashimoto, Kodai Kurita, "Three-dimensional gas temperature measurements by computed tomography with incident angle variable interferometer", IS&T/SPIE Electronic Imaging, Image Processing: Computational Imaging XIII, 2015年2月10日, San Francisco, California, USA

- (2) 橋本 康弘, 富岡 智, 西山 修輔, 佐々木 浩一, "キャリア成分を含む干渉縞からの2次元位相変調分布の抽出", 第50回応用物理学会北海道支部/第11回日本光学会北海道地区合同学術講演会, 2015年1月9日, 旭川市勤労者福祉会館(旭川)
- (3) Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Weighted denoising for phase unwrapping", IS&T/SPIE Electronic Imaging, Image Processing: Algorithms and Systems XII, 2014年2月4日, San Francisco(California, USA)
- (4) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Performance Evaluation of Phase Unwrapping Algorithms for Noisy Measurements", FRINGE 2013 - 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology, 2013年9月18日, Nurtigen (Germany)
- (5) 橋本康弘, 富岡智, 西山修輔, 佐々木浩一, "拡張ウィンドウを用いたバックグラウンドFRINGEを含む干渉縞のキャリア周波数評価", 2013年応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16-20日, 同志社大学京田辺キャンパス(京田辺)
- (6) 及川 裕, 富岡 智, "不完全データによる光音響イメージングにおける音源分布推定の精度評価", 第62回理論応用力学講演会, 2013年3月6日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京)
- (7) 及川 裕, 富岡 智, "光音響CTにおける音源分布推定の精度評価", 画像計測研究会2013, 2013年9月6日, 核融合科学研究所(土岐)
- (8) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Investigation of phase unwrapping process for laser induced plasma interferometry", 7th International Conference on Laser Induced Breakdown Spectroscopy, 2012年9月29日, Luxor, Egypt
- (9) Samia Heshmat, Satoshi Tomioka, Shusuke Nishiyama, "Rotational and direct compensation for digital hologram phase unwrapping", Speckle 2012 : V International conference on Speckle Metrology, 2012年9月11日, Vigo, Spain

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

## 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・助教

研究者番号：30333628