

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04086

研究課題名(和文)熱放射の空間コヒーレンス制御による透過物体の温度計測法の開発

研究課題名(英文) Spatial coherence control of thermal radiation for temperature measurement of transparent objects

研究代表者

井邊 真俊 (IMBE, Masatoshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：00760191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：放射温度計測の課題である背景放射との分離のために空間コヒーレンスに着目した。所望の熱放射と迷光である背景放射の空間コヒーレンスの違いを利用して分離する。そのために計測系を新たに提案した。この計測系では汎用的な光学素子のみで実現でき、対象とする温度域で扱う熱赤外域の熱放射への適用も原理的に可能である。原理実証実験をおこない、空間コヒーレンスの計測と、それをを用いた計算による計測対象の画像の再構成を実証した。本計測系では、計測対象の空間コヒーレンスに依存して性能が変化し、再構成画像にも影響する。したがって、この性質を利用した、熱放射と背景放射の空間コヒーレンスの違いによる分離可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した空間コヒーレンス計測法では、従来までの計測法とは異なりイメージセンサーが不要であり、フォトダイオードのような点計測用の受光器で実現できる。加えて、レンズやミラーなどの汎用的な素子のみで実現できるので、熱赤外域などの波長域にも適用可能である。また、計測した空間コヒーレンスから計算処理により計測対象の画像を再構成できることから、単一画素イメージングとしても有効である。

研究成果の概要(英文)：Background radiation is an issue in radiation thermometry. It needs to be separated from thermal radiation emitted by a target because they work as stray light and desired radiation for temperature measurement, respectively. In this project, spatial coherence is focused on and utilized to separate them. To measure spatial coherence, a novel interferometer has been proposed. It consists of commercially available optical elements and can be realized in wavelength of thermal infrared for temperature measurement at room temperature. Experimental results are given to confirm the capability of measurement of spatial coherence and numerical reconstruction of a target. The functionality of the proposed interferometer depends on the spatial coherence of a target; therefore, it can be applied to the separation of thermal radiation and background radiation.

研究分野：計測工学

キーワード：空間コヒーレンス 温度計測 熱放射

### 1. 研究開始当初の背景

すべての物体は、その温度に応じた電磁波（熱放射）を自身から放出している。放射温度計測は、この原理に基づき、熱放射の強さを測定して温度を決定する。光を用いた計測であるので、非侵襲かつ高速という特徴をもつ。

放射温度計測の課題に背景放射がある。これは、計測対象から放出される熱放射とは無関係な迷光である。計測対象の周辺からの光が、計測対象の表面で反射および内部を透過することにより生じる。所望の光である熱放射と、迷光である背景放射が重なった状態では、誤った温度計測結果を招く。しかし、放射温度計測では、これらをまとめて捉えてしまい、分離は困難である。そのため、放射温度計測は、主に周辺環境よりも高い温度の物体や、反射率・透過率の低い物体に対して活用されてきた。

しかし、近年では計測対象と周辺環境の温度が同等の場合でも、放射温度計測は活用されている。また、金属試料のレーザー加工時のモニタリングや透明なフィルムの熱物性値の計測など、反射率・透過率が高い物体に対しても用いられている。いずれも背景放射は無視できない誤差要因である。それにもかかわらず、根本的な解決は困難である。例えば、接触式温度計との併用や、テープなどで反射率・透過率を低くするなどの策がある。しかし、これらは非接触計測の良さを無くしてしまう。

そこで、本研究では、計測対象の熱放射と背景放射の分離のために、これらの空間コヒーレンスに着目する。空間コヒーレンスは光源自体の性質に加えて、伝搬および途中の光学系によって変調することができる。計測対象の熱放射の空間コヒーレンスを変調し、フィルタリングにより背景放射と分離させる。それから熱放射の強さを算出できれば、その後は放射温度計測と同じ原理で温度を決定できる。

### 2. 研究の目的

空間コヒーレンス制御による、計測対象の熱放射と背景放射の分離技術を開発する。背景放射の影響の大きい常温域における温度計測および透過物体の温度計測への適用を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究で対象とする温度域では、熱赤外の波長域における熱放射を扱う。当初は、画素構造をもつ光変調素子を用いた制御を考えていた。マイクロミラーアレイであればこの波長域でも使用可能と考えていたが、困難であった。そのため、当初の画素構造をもつ光変調素子を用いた制御につい

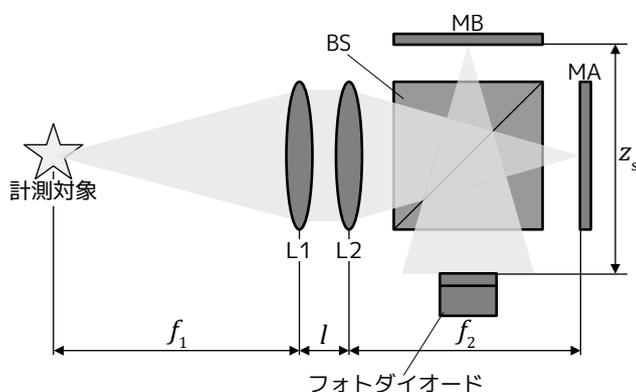


図1 空間コヒーレンス制御・計測干渉計: L1, L2, レンズ; MA, MB, ミラー; BS, ビームスプリッター.  $f_1$  および  $f_2$  はそれぞれ L1 および L2 の焦点距離.  $l$  は L1 と L2 間の距離.  $z_s$  はミラーからフォトダイオードまでの距離.

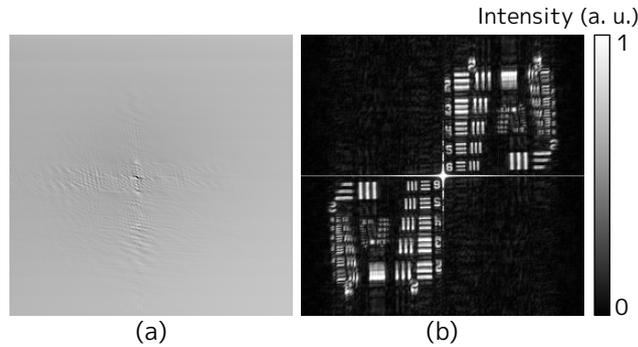


図2 原理検証実験結果: (a) 空間コヒーレンス分布画像, (b) 計測対象の再構成画像.

では、その素子に対応する可視域に波長域を変更した一方で、画素構造をもつ光変調素子が不要な空間コヒーレンスの制御・計測法を新たに提案し、その研究に注力した。原理検証の段階なので、こちらでも可視・近赤外域を対象とした。ただし、この計測系はレンズやミラーなどの汎用的な光学素子のみで実現できる。目的の波長に対応する（存在もする）素子を使用すれば、原理的には熱赤外域へも適用可能である。この計測系の空間分解能や計測対象の空間コヒーレンスについて原理的・実験的に調べた。また、外部光源を用いた、計測系のインパルス応答取得による、透過物体への適用についても検討した

#### 4. 研究成果

図1に、提案した、汎用的な光学素子のみを用いた空間コヒーレンス計測用の干渉計を示す。この干渉計は Michelson 干渉計を基にしている。計測対象をレンズとビームスプリッターを介して2つのミラーに結像する。2つのミラーで反射した光波をビームスプリッターにより合波させ干渉させる。片方のミラーの傾きを変え、その各角度ごとの干渉縞強度をフォトダイオードにより逐次測定する。

2つのミラー上の光学像の片方に対して、ミラーのティルトにより線形な位相変調がおこなわれる。この変調は、空間周波数変調である。つまり、この干渉計では、各空間周波数における、2つの光学像の自己干渉による強度を測定している。これは、空間周波数に依存した可干渉性、すなわち、空間コヒーレンスを計測していることを意味する。ミラーの角度は既知であるので、それから空間周波数を求められる。測定した干渉強度をアレイ状に並べれば、空間コヒーレンス分布画像を求められる。空間コヒーレンス分布から、van Citter-Zernike の定理に基づき、フーリエ変換の計算により元の計測対象の強度分布画像を求めることができる。

従来までの空間コヒーレンス計測用の干渉計とは異なり、本計測系ではイメージセンサーは不要であり、フォトダイオードなどの点計測用の受光器で実現可能である。例えば、Young の干渉計では2つのピンホールから伝搬した光波の干渉縞のコントラストとピンホールの位置関係から空間コヒーレンスを求める。コントラストを知るためには、干渉「縞」を撮影する必要がある。そのためにイメージセンサーが必要になる。点計測用の受光器の走査でも「縞」は画像化できるが、ピンホールの走査と合わせて膨大な数の測定が必要である。

対して、本計測系では、計測対象が空間的にインコヒーレントである場合、原理的に干渉縞は「縞」の構造をもたない。ミラーの角度に応じて、全体の明るさが変わる、いわゆるワンカラーの干渉縞になる。そのため、点計測用の受光器を用いることができる。

図2に原理検証実験結果を示す。計測対象は解像度チャートであり、LED と積分球により拡散照明し、空間的にインコヒーレントな物体とした。図2(a)は各ミラー角度の干渉縞強度から求めた空間コヒーレンス分布画像である。図2(b)は(a)をフーリエ変換して得られた画像である。元の解像度チャートの画像を得られていることがわかる。なお、所望の計測対象像の他に0次光および共役光も得られる。この計測系では計測対象を光軸から離れて配置することにより、図2(b)の

ように空間的に分離することができる。

本計測系では、計測対象の空間コヒーレンスに依存して性能が変化する。図 2 (b) は計測対象が空間的にインコヒーレントの場合であるが、そのコヒーレンスを変えた場合、得られる画像にも影響する。例えば、レーザー光のような空間的にコヒーレントな場合、先述のワンカラーの干渉縞ではなくなるが、計測系を特定の条件へと調整することにより、図 2 (b) と同様の結果を得ることができる。現在までに、計測対象の空間コヒーレンスと、干渉強度を測定して得られる空間コヒーレンス分布画像、計算により得られる元の計測対象画像の関係を調べている。熱放射と背景放射は、空間コヒーレンスの状態も異なることから、この性質を利用すれば分離できる可能性がある。加えて、元の計測対象を再構成できるので、それから放射温度計測に基づき温度を決定できる。また、外部光源を用いた、計測系のインパルス応答取得による透過物体への適用についても、任意のコヒーレンスの外部光源を扱えることから、本計測系は有効と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masatoshi Imbe	4. 巻 47
2. 論文標題 Single-pixel imaging interferometer based on the synthesis of spatial coherence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 5901--5904
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.473338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------