

令和元年6月14日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14696

研究課題名(和文)熱放射自己干渉ホログラフィによる三次元放射温度計測

研究課題名(英文)Thermal radiation self-interference digital holography for three dimensional radiometric temperature measurement

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・研究員

研究者番号：00760191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：熱放射の自己干渉によるホログラムの記録・再生による三次元放射温度計測を提案し、その原理を実証した。提案する温度計測技術では、熱放射の再生像から放射温度計測の原理に基づき温度を算出する。そのためには、再生像から放射輝度を求める必要があるため、これらの関係を理論的に明らかにした。次に、このような再生像を取得可能なインコヒーレントホログラフィ光学系を提案した。この光学系を用いて温度計測の原理検証実験を実施した。異なる距離に配置した熱放射源の温度計測に成功し、原理を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インコヒーレントホログラフィの新たな応用分野を開拓した。ホログラムの記録後にフォーカスの位置を変更できるので、奥行き方向に形状に変化のある物体や立体的に移動する物体の温度計測に有効である。例えば、生体やガス中粒子の温度分布計測などへの適用が考えられる。

研究成果の概要(英文)：Radiometric temperature measurement by incoherent digital holography was proposed. In the proposed method, the temperature measurement is performed with the reconstructed image of a thermal radiation based on radiation thermometry. For this measurement, radiance must be derived from a reconstructed image of a digital hologram. The relationship between a reconstructed image and its radiance was derived. The incoherent holography setup for the acquisition of a radiance from a reconstructed image was also proposed. With this setup, the holographic temperature measurement was performed. The temperature measurement of objects located at different distances was verified.

研究分野：計測工学

キーワード：三次元放射温度計測 ホログラフィ 放射温度

1. 研究開始当初の背景

放射温度計測では物体自身から放出される熱放射を測定して温度を決定する。非接触・高速・高感度（温度変化に対する熱放射の変化量が大きい）という特徴をもつ。サーモグラフィは、アレイ素子の導入による二次元放射温度計測技術である。空間的な温度の分布がわかるので、多様な分野で活用されている。しかし、放射温度計測技術はカメラと同じく物体にフォーカスを合わせる必要がある。そのため、奥行方向に形状の変化のある物体の場合は一部分しか正確な測定ができない。立体的に移動する物体への適用も困難である。また、物体の放射率情報が別途必要であり、光を透過する物体に対しても適用が困難である。

他方、熱放射のようなインコヒーレントな自発光ではなく、コヒーレント光を物体へ照射し、その反射・透過光から温度を計測する技術もある。デジタルホログラフィを用いた位相計測による温度計測技術がこれに該当する。位相から屈折率を求め、その温度依存性から温度を決定する。光波伝搬計算により任意の距離における物体の再生像を取得できるので、立体的な、三次元計測が可能である。しかし、屈折率の温度依存性は熱放射のそれに比べ小さく、感度が低い。また、位相は熱膨張などの温度に依存する別のパラメーターにも影響を受ける。以上の温度計測技術は、計測原理および長所・短所が相補の関係にある。放射温度計測の高感度とデジタルホログラフィの三次元計測が両立できれば温度計測技術として有望である。

2. 研究の目的

デジタルホログラフィを用いた三次元放射温度計測の実現を目的とした。白色干渉計測の原理が示すように、インコヒーレント光も自分自身とは干渉する。インコヒーレントデジタルホログラフィは自己干渉と計算処理によりホログラムの記録・再生が可能である。本研究では、熱放射自己干渉ホログラフィによる三次元放射温度計測実現のための研究を実施した。

3. 研究の方法

放射温度計測の原理は Planck の式が基になる。これは熱放射の放射輝度の波長と温度の関係を示す。対象の温度域に応じた波長の放射輝度を測定し、Planck の式に基づいて温度を決定する。熱放射自己干渉ホログラフィでは、熱放射のホログラムを記録し、その再生像からこの放射温度計測の原理に基づいて温度を求める。したがって、再生像から放射輝度を算出しなければならない。しかし、従来までホログラフィは相対的な分布を求めるイメージングとしての使用が主であり、定量的な物理量である放射輝度との関係は不明であった。また、再生像の値そのものは信号値であるので、放射温度計やサーモグラフィと同じく、信号と放射輝度および温度との関係を校正により求める必要がある。

そこで、まず、再生像と放射輝度の理論的な関係を明らかにした。再生像の信号値から放射輝度に比例した値を算出する式と、その成立に必要な近似条件を導出した。放射輝度は放射束、面積、立体角から求められる。再生像からそれらを求め、放射輝度を算出する方法を提案した。

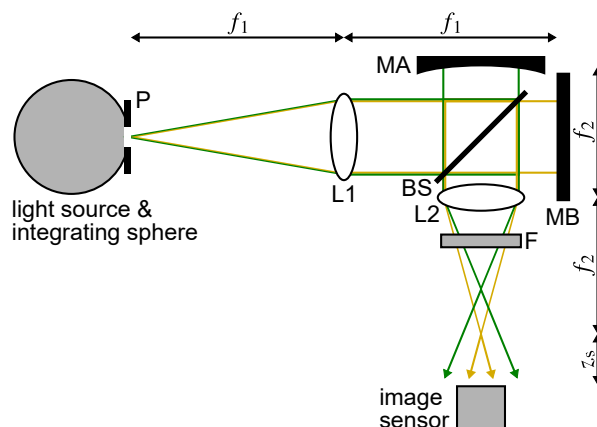


図1 倍率不変のインコヒーレントホログラフィ光学系。

次に、このような再生像を取得可能なインコヒーレントホログラフィ光学系を設計した。従来までのインコヒーレントホログラフィ光学系では、2つの理由により、このような再生像は得られない。どちらも倍率に関するものである。1つめの理由は、従来までの系では再生像の倍率が物体の配置位置により変わることである。光学素子の少ない簡単な系ではそれを求められるが、リレーレンズなどを導入する実際の系ではその算出が複雑で困難になる。また、配置位置で倍率が異なるのは、温度計測に適用する際にも解析を複雑にさせる。2つ目の理由は、自己干渉を形成する光学像の倍率が異なることである。自己干渉では物体からの光を2つに分割し、それぞれで異なる曲率の波面変調を与える。その後、光学像を自由空間に形成し、そこからの球面波どうしを干渉させる。しかし、2つの光路で与える波面変調が異なるために、光学像の倍率が異なる。結果、物体が分布をもつ場合は、放射輝度が違う部分どうしからの光が干渉する恐れがある。以上から、2つの光路で異なる波面変調を加えても、光学像の大きさ同じで、かつ、物体の配置位置にも依存しない記録系を提案した。図1のようにアフォーカル系を干渉計に組み込むものである。2つのレンズの焦点距離が一致するフーリエ面に波面変調素子である凹面鏡および平面鏡を配置している。倍率は2つのレンズによって決まり、物体の距離に依存しない。

その後、放射輝度に比例した値から放射温度を決定するための校正方法を検討した。放射温度計やサーモグラフィの校正で用いられている Sakuma-Hattori の式を用いた。温度が既知の放射源を用い、3つの温度で放射輝度に比例した値を求める。この式を用いて温度を算出するための係数（校正パラメータ）を決定した。以上から熱放射自己干渉ホログラフィにより放射温度計測が可能となった。放射温度計測で温度標準として使用される黒体炉を用い、この原理を実証した。

4. 研究成果

図1に示す放射輝度の算出のために提案した光学系の検証実験を実施した。倍率不変であることを示すために、撮像素子を移動させてホログラムを記録し、それぞれの再生距離で再生像を取得した。撮像素子の移動は物体の移動と原理的に等価である。倍率不変であれば、再生像は常に同じ大きさで得られる。計測対象の物体にはハロゲンランプ、積分球および開口を用いた。ハロゲンランプからの光を積分球で拡散反射させ、出射ポートの直後に配置した開口を照明させる。これを一様な放射輝度をもつ円形の自発光の物体とした。ホログラムの記録には、この光源の波長に適した InGaAs の撮像素子を用いた。この系は倍率不変であるので、従来までの系とは違い、再生距離に依存せず再生像の大きさは不変である。

図2にその結果を示す。(a)–(c)までは、形状が異なるものの、倍率不変であることがわかる。なお、形状が異なるのは、撮像素子の移動により系の光学的伝達関数の遮断周波数が変化したためである。(d)–(f)では、そのローパスフィルタリングの影響が大きい。このことは計算機シミュレーションでも確認している。したがって、光学的伝達関数の帯域幅以内であれば、倍率不変であるといえる。

図1における物体を変更し、熱放射自己干渉ホログラフィによる三次元放射温度計測の原理検証実験を実施した。物体には黒体炉と開口を用いた。先述の積分球の場合と同じく、黒体炉の直後に開口を配置し、一様な放射輝度、すなわち、一様な温度分布をもつ円形の熱放射源とした。まず、黒体炉の位置は固定のまま、3つの温度で再生像を取得し、それから校正パラメータを求めた。これにより、温

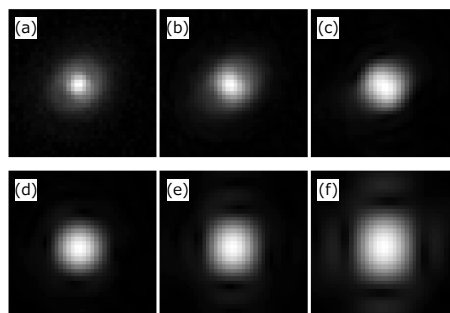


図2 倍率不変のインコヒーレントホログラフィ光学系で記録・再生により取得した再生像。撮像素子の移動距離は(a)を基点として(b) 40 mm, (c) 80 mm, (d) 120 mm, (e) 160 mm, (f) 200 mm である。

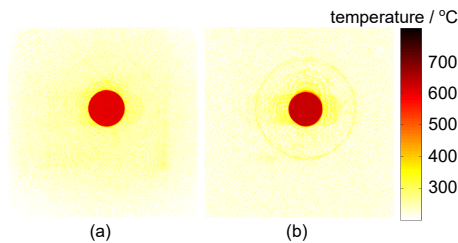


図3 温度画像. 開口部の平均温度は (a) 603 °C, (b) 627 °C であり, 移動距離は 100 mm である.

度計測が可能になった. 次に, 黒体炉を別の温度に設定した. これを温度未知の物体として, 先程求めた校正パラメーターを用いて温度を算出した. その後, 今度は温度はそのまま固定で, 黒体炉を移動させた. この再生像を取得し, 先程と同じ校正パラメーターを用いて温度を算出した. 同じ温度が求められれば, 異なる距離に配置した物体の温度計測を実証できる. すなわち, 三次元放射温度計測を実証できる.

図3に温度計測結果を示す. 中央部が開口である. 異なる距離に配置した物体の温度を, 光学系を変えずに計測できていることを示す. 温度差 (23 °C) の原因は現在調査中であるが, InGaAs の撮像素子の非線形性などが考えられる. また, 開口より外側が, 本来は室温であるにもかかわらず, 200 °C を示している. これは使用した波長域では室温域の放射温度計測が不可能なためであり, 従来までの放射温度計やサーモグラフィでも同様の値を示す. なお, この原理検証実験では黒体炉を校正および温度未知の物体の両方に使っているが, 一旦校正パラメーターを決定すれば, 他の物体の温度計測にも適用できる.

以上からホログラフィによる三次元放射温度計測を実証できたといえる. 他にも, 別途光学系を構築し, コヒーレント光を用いて金属の試料の放射率変動を把握する方法や空間光変調器を用いた断層画像化技術の導入の検討もおこなった. 今後はこれらをさらに進め, 熱放射自己干渉ホログラフィに導入する. また, 図3における温度差の原因を解明し, 低減するための研究をおこなう.

5. 主な発表論文など

[雑誌論文 (計 2 件)]

1. M. Imbe, “Optical configuration with fixed transverse magnification for self-interference incoherent digital holography,” *Appl. Opt.* **57**, 2268–2276 (2018).
2. M. Imbe, “Radiometric temperature measurement by incoherent digital holography,” *Appl. Opt.* **58**, A82–A89 (2019).