

令和 3 年 5 月 2 4 日現在

機関番号： 8 2 6 2 6

研究種目： 基盤研究(C)（一般）

研究期間： 2018 ~ 2020

課題番号： 1 8 K 0 4 9 5 3

研究課題名（和文）立体視を利用した超近距離条件におけるLEDの放射照度測定に関する研究

研究課題名（英文）Study on of LED irradiance measurement under near field condition using stereoscopic method

研究代表者

神門 賢二（GODO, KENJI）

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： 3 0 3 7 1 0 4 0

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）：本研究は、従来の測光・放射測定の測定距離限界を打破し、超近距離条件でのLEDの放射照度測定を目指した研究である。そのために、ステレオカメラ方式の立体視計測を導入する新たな放射照度測定方法の研究を行った。研究期間内において、専用ステレオカメラ受光器によるLED発光部の3次元座標の決定、3次元座標をLEDの2次元放射輝度分布へのマッチングによる3次元放射輝度分布の導出、そして、3次元放射輝度分布からの光学計算による放射照度値決定等の成果を達成した。一方、本手法による放射照度導出には、研究を進める中でいくつかの課題があることも判明しており、今後は課題の解決を進め、本方法の確立を進める予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高効率化が著しいLEDを利用することにより、半導体プロセス用紫外線照射装置等の小型化が進んでいる。半導体プロセスを正確に行うためには、放射照度値(W/m²)の管理・計測が不可欠であるが、照射装置の小型化により照射間距離が光源サイズ以下、即ち10 mm以下となり、放射照度値の正しい計測が難しくなっている。この問題を解決するために、ステレオカメラ方式の立体視計測を利用する超近距離条件でのLEDの放射照度測定技術の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：This research purpose to break through measurement distance limitation in traditional photometry and radiometry, and to measure irradiance of LEDs under near-field condition accurately. For this purpose, new irradiance measurement method using stereo camera vision have been investigated. During grant period of KAKENHI, the following results were achieved: determination of the three-dimensional(3D) coordinates of LED emitting area using stereo camera vision, derivation of the 3D radiance distribution by matching the 3D-coordinates to the two-dimensional(2D) radiance distribution of the LED, and determination of the irradiance at near field condition by optical calculation based on the 3D radiance distribution. On the other hand, our proposal measurement method has been found to have some improve point. In the future, we plan to overcome the problems and establish new irradiance measurement method using stereo camera vision.

研究分野： 測光・放射分野、発光デバイス計測，イメージングセンサ計測

キーワード： LED 立体視 放射照度 ステレオカメラ 発光デバイス イメージング 放射輝度

1. 研究開始当初の背景

固体素子光源である LED は、高効率化や発光波長の紫外・赤外域への拡張が進むことにより、照明用途だけでなく、様々な産業分野で従来光源の代替として、更には従来光源と異なる使用条件下で利用され始めている。例えば、紫外線硬化樹脂のための照射装置には、従来まで用いられていた水銀ランプからの代替が進み、UV-LED が用いられている。この UV-LED を利用した照射装置では、LED とプリント基板の距離は、10 mm 以下と光源サイズ以下となり、従来装置に比べ、一桁以上短くなっている(図 1)。これは、LED を用いることにより、設計自由度の向上、熱設計の容易さにより、装置の小型化が進んだためであるが、一方でプリント基板上に照射される放射照度値を正しく計測することができず、プロセス管理が困難になっているという問題が発生している[1]。異なる放射照度計を用いて測定した場合、放射照度値(W/m^2)が 2 倍以上異なるという報告もある[2]。

超近距離条件で放射照度測定が困難な原因の一つは、測光・放射量の歴史的体系に起因する。即ち、放射照度計を用いて試験光源を測定する際、試験光源は点光源と見なせるぐらい十分長い距離で使用される(点光源近似:光源サイズの 10 倍以上)という前提に基づき放射照度計が設計、およびその校正が行われているためである。

以上より、技術の進歩により点光源近似の限界以上で LED が使用されるという状況の中、新しい測定方法や、新たな測光・放射体系の構築が急務な課題であると言え、これが本研究開発を提案した背景である。

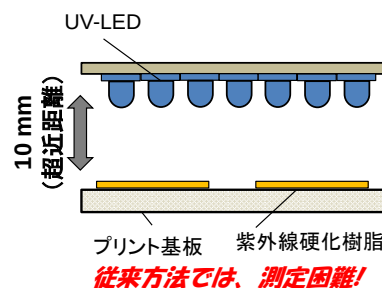


図 1. 照射装置における LED 計測課題。

[1] “UV Measurements of Medium-Pressure Lamps and UV-LEDs for Process Design and Control”, R.W.Stowe, AIMCAL Web Coating & Handling Conference USA.

[2] “正確な紫外発光ダイオードの評価に向けたスペクトルミスマッチング補正の重要性を検討した紫外放射照度計の比較検”, 木下 健一, 神門 賢二 等, 光学 49, pp.381—387, (2020).

2. 研究の目的

点光源近似を打破するための方法としては、Near-field Photometry と呼ばれる方法が 1980 年代に提案されている[3]。この方法は、光源上の放射輝度分布を CCD カメラにより測定し、放射照度や放射束を光学計算により導出する方法である。この方法は、従来の点光源近似に基づく放射照度測定に比べ、比較的短い測定距離で行うことができるが、放射輝度分布の 3 次元座標を正確に測定しているわけではないため、測定距離に大きく依存してしまうことは従来方法と変わらない。つまり、現在の測光・放射測定の距離限界を超えて、超近距離条件で放射照度測定を行うためには、Near-field Photometry の概念を進化させ、直接光源表面の放射輝度分布とその 3 次元座標を正確に決定する必要があると言える。

本研究では、対象物を複数の異なる方向から同時に撮影することにより、その奥行き方向の座標を決定するステレオカメラ方式を用いた立体視計測を利用する新たな放射照度測定方法の研究を行い、測定距離限界の打破を目指した。即ち、LED の 3 次元座標を 2 台の CCD カメラから構築されるステレオカメラ式受光器により決定し、別に測定する LED の 2 次元輝度分布とその 3 次元座標をマッチングさせ、3 次元座標を考慮した光学計算により放射照度値を導出する方法の研究を行った。

[3] “On Near-Field Photometry”, P.Y.Nagi, Journal of the Illuminating Engineering Society, pp 129-136 (1987).

3. 研究の方法

研究の方法として、具体的には、以下の(1)～(3)を行った。

(1) ステレオカメラ式受光器の設計と構築

ステレオカメラ方式による 3 次元座標の決定精度は、2 つの CCD カメラ間距離と測定距離等により決定される。目標とする奥行き座標(z 座標)の測定誤差は $500\ \mu\text{m}$ 、2 次元平面(x-y 座標)の座標測定誤差は $20\ \mu\text{m}$ であり、それを満たすために最適な 2 対のマクロレンズ、CCD カメラ等から構成される高精度なステレオカメラ式受光器の光学設計・開発を行った。また併せて LED の放射輝度を計測する 2 次元輝度分布測定用受光器の設計・開発も行った。特に奥行き構造がある LED の 2 次元輝度分布測定であると考えて、焦点深度が深い光学系を有する受光器を構築することを検討した。

(2) ステレオカメラ受光器による LED の 3 次元座標導出とその最適化

上述の(1)で開発したステレオカメラ式受光器を用いて LED の 3 次元座標の導出を行った。

そのために、ステレオカメラ式受光器のカメラ座標を校正する必要があるが、その方法として、Z.Zhang の方法に基づくバンドル調整法により行うことを検討し、校正用グリッドターゲットの作成等も併せて行った。次に得られた LED のステレオ画像から視差を正確に得るための方法(左画像と右画像の対応付け方法)として、Semi Global Matching 方式を用いることを併せて検討した。これらの検討結果に基づき、導出のための測定・解析プログラムの構築を行った。

(3) LED の 2 次元輝度分布測定と 3 次元座標とのマッチングによる放射照度の導出

LED の発光部の 3 次元座標と別途測定する LED の 2 次元放射輝度分布(ピクセル座標と放射輝度の分布)をマッチングさせ、3 次元放射輝度分布(x-y-z 座標と放射輝度)を導出する方法を検討した。即ちピクセル座標で与えられる 2 次元放射輝度分布を 3 次元座標への変換を行う方法の検討を行い、それぞれの測定において同じ座標基準を定め、その座標基準に基づき、3 次元放射輝度分布を得る方法が有力だと考えた。そして、得られた 3 次元放射輝度分布から任意距離における放射照度を導出する方法の検討を行い、解析プログラムの作成等を行った。

4. 研究成果

上述した研究の方法に従い研究を行い、以下の(1)～(3)の研究成果を得た。

(1) ステレオカメラ式受光器の設計と構築

図 2 (a)が、光学計算に基づき構築したステレオカメラ式受光器であり、2 対のマクロレンズ、CCD カメラ等と既存測定装置への取り付けのための移動ステージを用いた精密調整機構から構築される。設計上では、目標とする各座標測定精度を達成した。

図 2 (b)が構築した LED の 2 次元輝度分布測定用受光器であり、この受光器は CCD カメラと焦点深度が深いテレセントリックレンズを用いて構築される。またステレオカメラ式受光器と同様に、本受光器にも既存測定装置に取り付けるための精密調整機構を取り付けた。

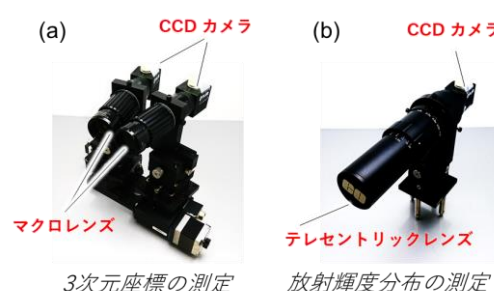


図 2. 開発した各受光器.

(2) ステレオカメラ式受光器による LED の 3 次元座標導出とその導出方法の最適化

ステレオカメラ式受光器のカメラ座標校正は、ドット間距離 250 μm または 125 μm のグリッドターゲットを用いて行った(図 3)。その結果から複数の素子から構築された LED の 3 次元座標の決定を試みた。当初は決定可能な 3 次元座標部は、構造に特徴のある外観のパッケージ部だけであり、構造に特徴がない実際の LED の発光部(素子部)の 3 次元座標を決定することができなかった(図 4)。ステレオカメラ方式の原理上の課題である。このため、各種パラメータの最適化や 3 次元座標を導出する際に発光部以外の不必要な部分に対するマスク処理等を行う方法を検討した。これらの検討結果により、発光部の 3 次元座標を

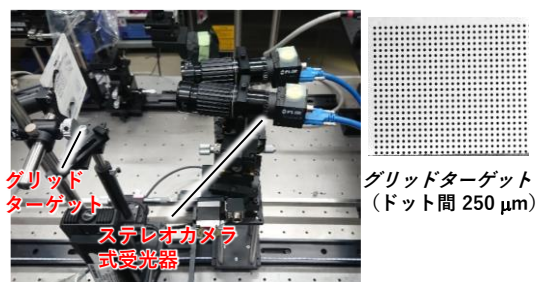


図 3. カメラ座標校正.

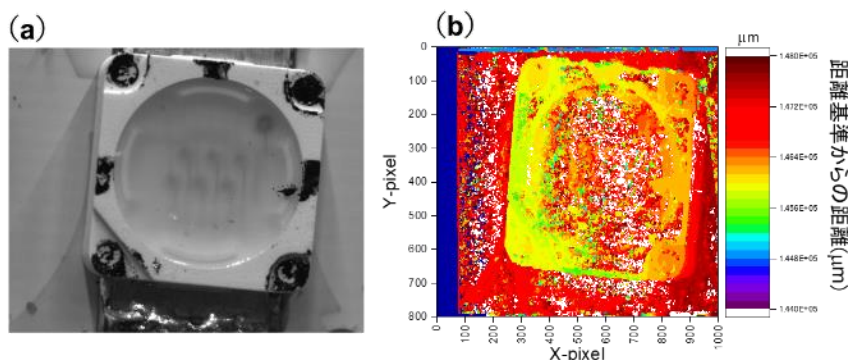


図 4. 非点灯時の LED のステレオ画像:(a)LED 写真, (b)ステレオ画像.

※:図 4(b)はステレオカメラの距離基準(約 140 mm)からの z 座標分布

導出するには、微弱な電流で点灯させることにより、発光部の 3 次元座標を導出する方法が有効であることが分かり、LED の発光部の 3 次元座標導出に成功した(図 5)。

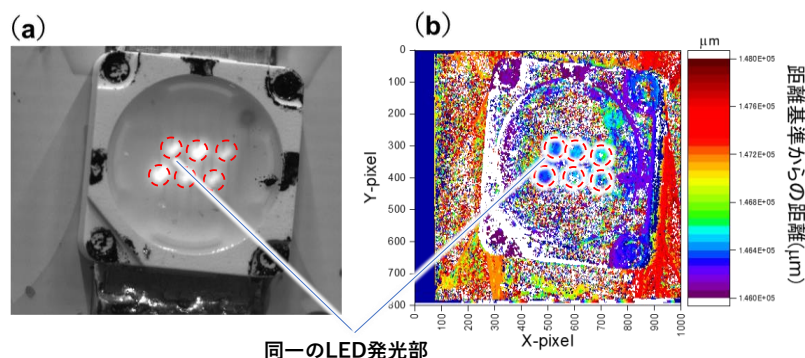


図 5. 微弱点灯時の LED のステレオ画像:(a)LED 写真, (b)ステレオ画像.

※:図 5(b)はステレオカメラの距離基準(約 140 mm)からの z 座標分布

(3) LED の 2 次元輝度分布と 3 次元座標のマッチングによる放射照度の導出

LED の発光部の 3 次元座標と LED の 2 次元放射輝度分布(図 6)をマッチングさせ、3 次元放射輝度分布を導出した。このために、それぞれの測定において同じ座標基準を定め、その座標基準に基づき、3 次元放射輝度分布を得る方法を検討した。

次に、得られた 3 次元放射輝度分布から任意距離における放射照度の導出方法の検討を行い、解析プログラムの作成を行った。図 7 は図 6 で示した LED の放射輝度分布に対して行った各測定距離における放射照度値の従来法(3 次元座標を考慮せずに放射輝度から放射照度を導出する方法)と 3 次元座標を考慮し放射輝度分布から放射照度を計算する本方法の差を示す。この 2 つの計算は、微細放射輝度分布を直接、放射輝度から放射照度変換の原理に基づき行っており、 $\Phi 1 \text{ mm}$ の受光径を持つ放射照度受光器の放射照度を計算から求めている。計算結果から、測定距離 10 mm で約 3 %程度の違いが発生することが示された。また同様の実験・計算を他の LED 素子に対して行くと、LED 発光部の形状にも大きく依存するという結果が示された。

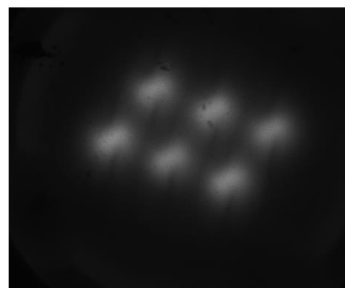


図 6. LED の 2 次元放射輝度分布.

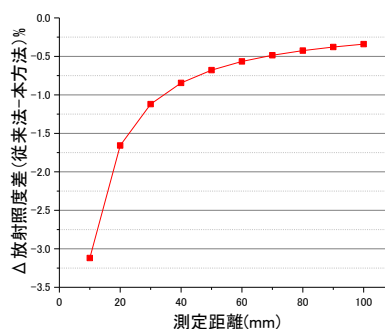


図 7. 従来法との放射照度値の比較.

以上の結果より、本研究成果を纏めると、本研究は、従来の測光・放射測定の測定距離限界を打破し、超近距離条件での放射照度測定を目指した研究である。そのために、専用のステレオカメラ式受光器開発し、LED 発光部の 3 次元座標導出を試みた。そして、LED の 2 次元放射輝度分布をマッチングさせ、3 次元放射輝度分布導出に成功した。3 次元放射輝度分布計測の概念は、従来の測光・放射測定にはない、全く新しい手法であり、科研費助成期間の成果により最初の基礎実験は終了したといえる。この手法は応用すれば μ -LED や OLED 等のフレキシブル光源の計測にも応用できる技術として期待できる。一方、3 次元放射輝度分布からの放射照度変換については、いくつかの課題があることも判明しており、今後改善していく必要がある。

今後の研究展開としては、判明している課題の解決や他の放射照度測定方法との比較などを行い、当該方法の確立を目指すことである。

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 Godo Kenji	4. 巻 32
2. 論文標題 A new traceability chain for luminance scale with LED-based transfer standard	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 015003 ~ 015003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6501/aba93c	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 神門賢二
2. 発表標題 立体視を利用した3次元測定に基づく放射照度・放射輝度測定方法
3. 学会等名 2020年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2021年

〔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
---------	---------