



可視光半導体レーザー応用コンソーシアムガイドライン
スペックルに関するガイドライン 第1版

2016年6月30日



目次

1	目的と適用範囲	4
1.1	目的	4
1.2	適用範囲	4
2	用語	5
2.1	デバイスと方式.....	5
2.2	スペックルの種類	5
3	単色スペックルコントラストの測定方法	9
3.1	概論.....	9
3.2	スペックル測定器の構成	10
4	狭線幅のスペクトルを持つ光源の光学測定	11
4.1	半導体レーザーのスペクトル特性	11
4.2	狭線幅スペクトルの測光/測色測定の精度に関する注意点.....	11
5	カラースペックルの求め方	13
5.1	カラースペックルの間接的な求め方	13
5.2	カラースペックルの測定法(直接測定).....	14
6	スペックルの許容度	15
付録 1.	カラースペックルの定式化.....	16



参考文献..... 19



1 目的と適用範囲

1.1 目的

このガイドラインは、可視光応用製品(セット)のスペックル特性の用語と評価方法を標準化して、公正な性能評価による製品の普及を目的とする。

1.2 適用範囲

このガイドラインは、可視光のコヒーレント(もしくは部分的コヒーレント)光源によって発生するスペックルとその評価方法に関する。



2 用語

ここでは、スペックルに関する用語を定義する。

なお、国際標準としての定義は、次の文書を参照すること。

IEC 62906-1-2 Laser display devices - Part 1-2: Vocabulary and letter symbols
(2015年7月16日発行)

<https://webstore.iec.ch/publication/22908>

2.1 デバイスと方式

2.1.1 レーザーディスプレイデバイス

laser display device
LDD

誘導放出光を発光するレーザーを用いたディスプレイデバイス

2.1.2 レーザー照明

laser lighting

誘導放出光を発光するレーザーを用いた照明装置もしくは照明方式

2.2 スペックルの種類

2.2.1 スペックル

speckle

網膜を含むセンサ面上で(部分的)コヒーレント光の干渉の結果発生する不規則な空間変調イメージ

2.2.2 スペックルパターン

speckle pattern

スペックルの照度分布パターン

2.2.3 非結像系スペックル

objective speckle

結像系を含まない光学センサ系で観測されるスペックル

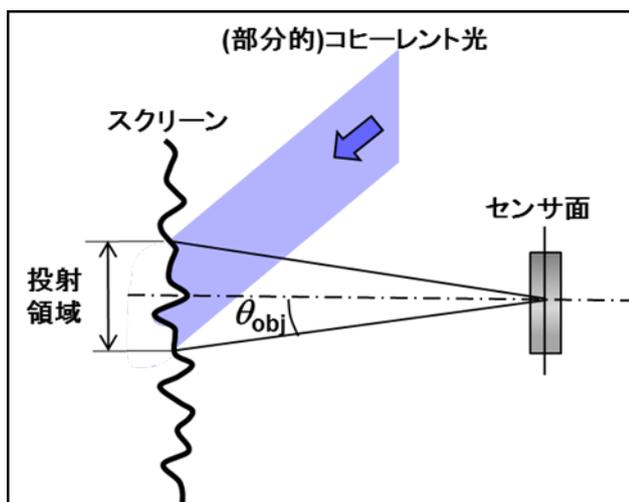


図2.1 非結像系スペックル

2.2.4 結像系スペックル subjective speckle

結像系を含む光学センサ系で観測されるスペックル

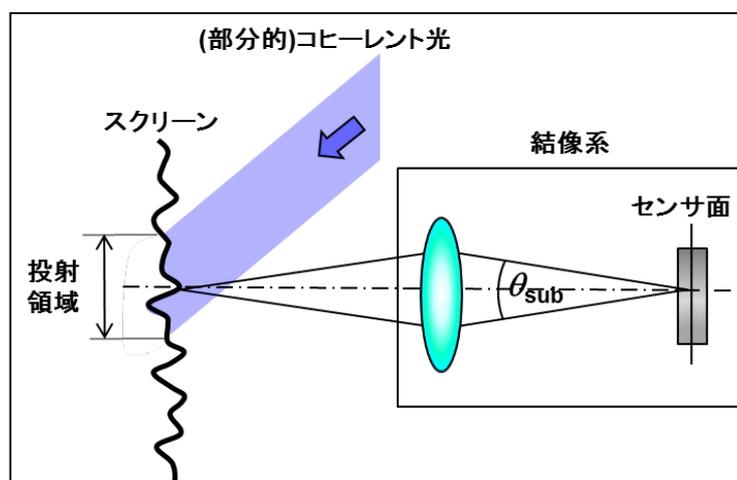


図2.2 結像系スペックル

2.2.5 スクリーンスペックル screen speckle

スクリーン上の拡散/散乱光を原因とする結像系スペックル

(応用において、一般的に評価しようとするスペックルである。サイズが細かく、眼の位置が動けば変化する。)

2.2.6 投射スペックル

projected speckle

スクリーン投射前に投射光学系で発生して、スクリーンに投射されるスペックル
(投射光学系での干渉パターンであるためサイズが粗いケースが多く、眼の位置が動いても固定して見える。)

2.2.7 ファイバースペックル

fiber speckle

投射光学系のファイバーで発生する投射スペックル

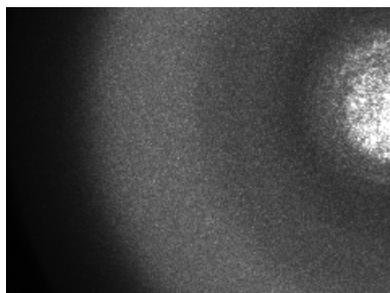


図2.3 ファイバースペックルパターン(ファイバー: MMF)が乗ったスクリーンスペックルの観測例

2.2.8 単色スペックル

monochromatic speckle

光源が単色(もしくは準単色)の場合のスペックル

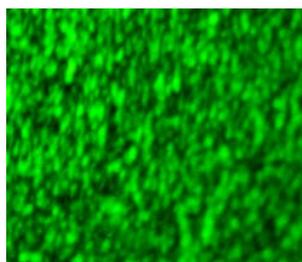


図2.4 単色スペックルパターン

2.2.9 スペックルコントラスト(比)

speckle contrast (ratio)

C_s

単色スペックルの代表的評価指数

単色スペックルパターンの標準偏差(σ)の平均値(\bar{I})との比で定義する。

$$C_s = \frac{\sigma}{\bar{I}}$$

2.2.10 カラースペックル color speckle

光源が多色の場合のスペックル



図2.5 カラースペックルパターン

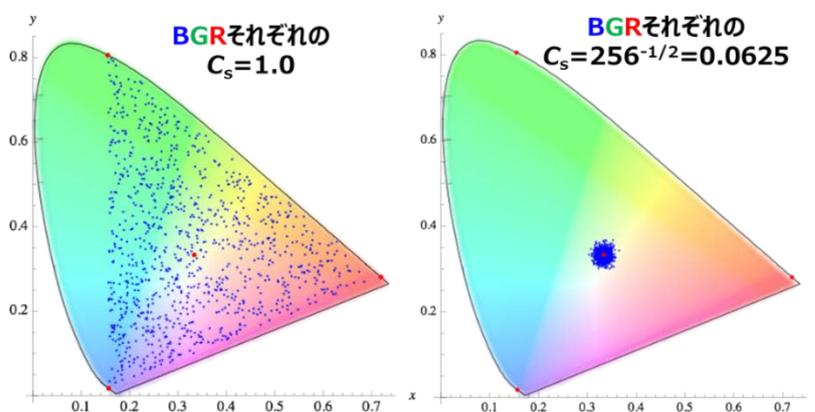


図2.6 カラースペックルの色空間(CIE 1931)での分布例

3 単色スペックルコントラストの測定方法

3.1 概論

ディスプレイと照明におけるスペックルは、ヒトがみることを前提としている。ヒトの眼は結像系を持つため、結像スペックルの測定方法である。したがって、その測定装置はヒトの眼と等価な結果が得られる必要がある。そのためには、測定装置は、ヒトの眼と等価な MTF (Modulation Transfer Function) を持つように設計されなければならない^{[1][2][3]}。

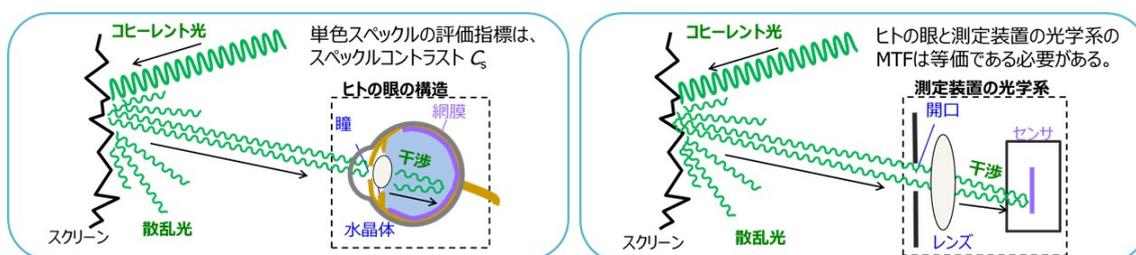


図3.1 ヒトの眼の結像系と測定装置の結像系

なお、単色スペックルの測定方法における、環境条件、暗室条件などは、IEC TC110 の電子ディスプレイデバイスの各種測定方法の文書に記載されているものと共通とする。また、測定における安全も IEC TC76 のレーザー安全に準拠する。たとえば、測定環境は、温度：25 °C±3 °C、湿度：25 % to 85 %、気圧：86 kPa ~ 106 kPa とし、異なる環境での測定の場合は、その条件を記録する。また、測定の安全に関しては、IEC 60825-1 の最新版に従う。

測定装置の型式や投射するスクリーンの型式を記録する。

測定装置は、装置の仕様書に記載されている標準条件で駆動し、それ以外は条件を記録する。

評価対象の可視光応用装置の型式を記録する。可変な駆動条件は測定時の駆動条件を記載する。特に、レーザー光源の波長や駆動電流、変調条件(CW/パルス)等、スペックルコントラストに影響を与える条件に留意する。

各装置は十分安定してから測定する。

3.2 スペックル測定器の構成

単色スペックルの測定装置の構成を図 3.2 に示す。

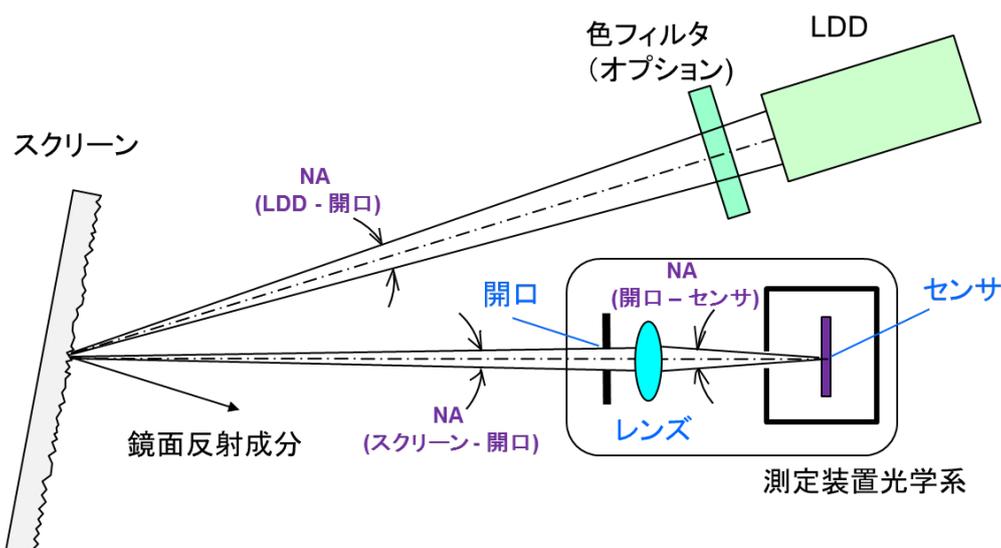


図3.2 単色スペックルの測定装置の構成

測定装置は、ヒトの眼のMTFをシミュレートしていることをメーカーに確認する。

また、測定装置は較正されたものを用いる。

色フィルタは、光源によって必要な場合に使用する。

なお、測定方法の詳細は、次のIEC国際標準(IS)となっているので、参照のこと。

IEC 62906-5-2 ED.10 Laser display devices -Part 5- 2 : Optical measuring methods of speckle contrast (2016年6月7日発行)

<https://webstore.iec.ch/publication/25037>

また、ファイバースペックルなどの影響を排除する必要もある^[5]。

4 狭線幅のスペクトルを持つ光源の光学測定

4.1 半導体レーザーのスペクトル特性

可視光のディスプレイ/照明応用に用いる半導体レーザー(LD: Laser Diode)のスペクトルは、線幅が狭くて、コヒーレンシーの高いものから、縦多(マルチ)モード発振して、実効的に数nmの半値幅まで広がっているものまで様々である。特に、高出力用は、ストライプ幅も広く、電流密度も高いところで用いるので、横モードも縦モードもマルチモードで発振するのが普通である。

たとえば、InGaN/GaN系の青色LDのCW動作(DC動作の意味)では、図4.1のように、しきい値直後では、単一(シングル)縦モードに準ずる狭い線幅で発振するが、駆動電流の上昇に伴い、マルチ縦モード発振する。

いずれにしても、一般に、10nm以上のスペクトル半値幅を持つLED等の従来光源と比べて、一桁以上の狭いスペクトル線幅を持つ。

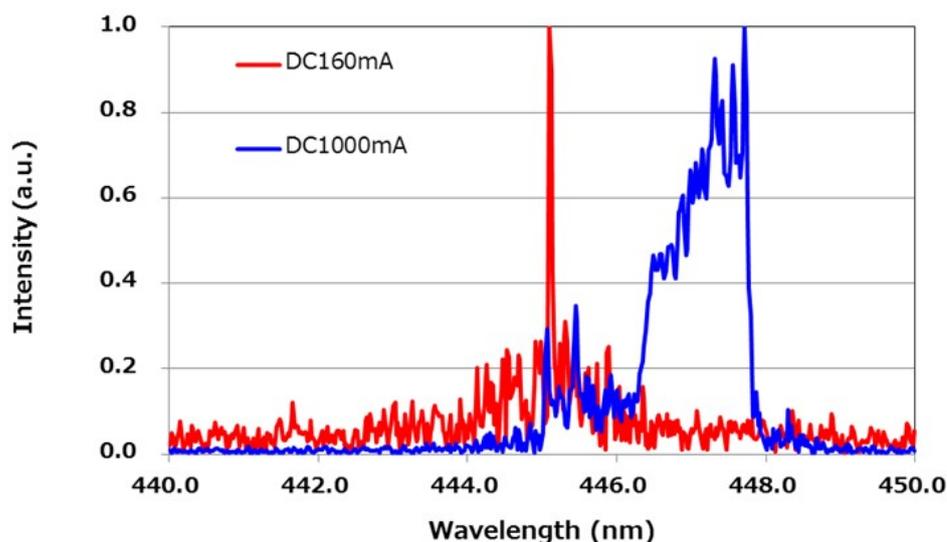


図4.1 青色LDのスペクトルの一例

4.2 狭線幅スペクトルの測光/測色測定に関する注意点

可視光のディスプレイ/照明応用では、一般に、測光/測色測定が基本となる。しかし、従来の光源は広いスペクトル幅を対象としているため、使用するスペクトルの精度は、せいぜい1nm程度である。スペクトルの分光評価装置の精度も同様である。

CIEで定義されている色空間における、等色関数なども、1nm刻みのデータの仕様が一般的である。測定されたスペクトルデータと等色関数を掛け合わせて色度を求めるためである。

したがって、精度の高い測定には、内挿して、0.1nm以下の精度のデータテーブルを準備する必



要がある。また、スペクトル測定においても、光スペアナなどの精度の高い装置で測定したスペクトルデータが必要となる。

線スペクトルの形状をローレンツ型と仮定し、上記のように0.1nm間隔のデータで、等色関数に掛け合わせ、半値幅をパラメータとして、CIE1931の色度図にプロットしたのが、図4.2である。

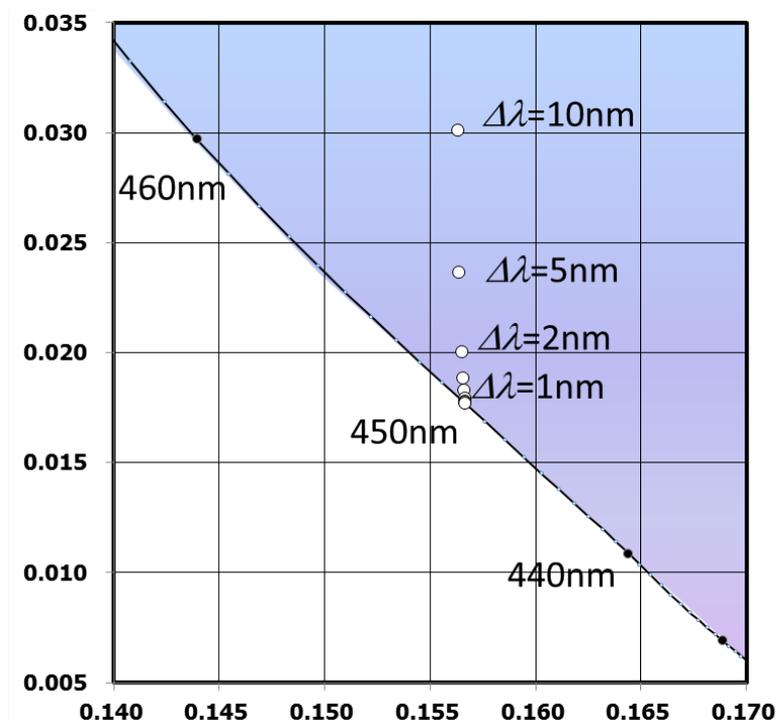


図4.1 ローレンツ型線スペクトルの半値幅と色度の関係

この図より、半値幅の広がりとともに、色度座標は内側に移動することが分かる。

この例では、ローレンツ型を仮定したが、実際のスペクトルの裾の広がり方や、しきい値以下の自然放出光などを拾えば、さらに色度図上の移動は大きくなると予想される。

色再現性規格の三角形の面積や、カラースペックルの精確な計算等には、このような精度の高いデータ処理が必要になる。



5 カラースペックルの求め方

5.1 カラースペックルの間接的な求め方

RGB の単色スペックルの加法混色によって生じるカラースペックルの間接的な求め方のフローチャートを図 5.1 に示す。基本的に、確立されている単色スペックル測定結果を用いて、色空間(色度座標)でカラースペックルの分布をプロットする。この理論的な定式化を付録 1 に記載する^{[4][6]}。

図 5.1 に示すように、カラースペックルの間接的な求め方は、次の 2 つに分類できる。

- 1) RGB 単色のスペックルコントラスト値 (C_s 値) から統計手法 (Monte Carlo simulation) で色空間での分布を求める
- 2) RGB 単色のスペックルの空間分布を直接合成して、色空間の分布に変換する

上記のどちらの方法を用いるかは、得られた単色スペックルのデータに依存する。1)の統計手法を用いると、 C_s 値が分かれば、すぐに計算できるので非常に便利である。

これに対し、2)の方法は、単色のスペックルコントラスト測定装置で実際に測定された空間分布のデータを合成して色空間にプロットするので、測定時の条件が反映される。

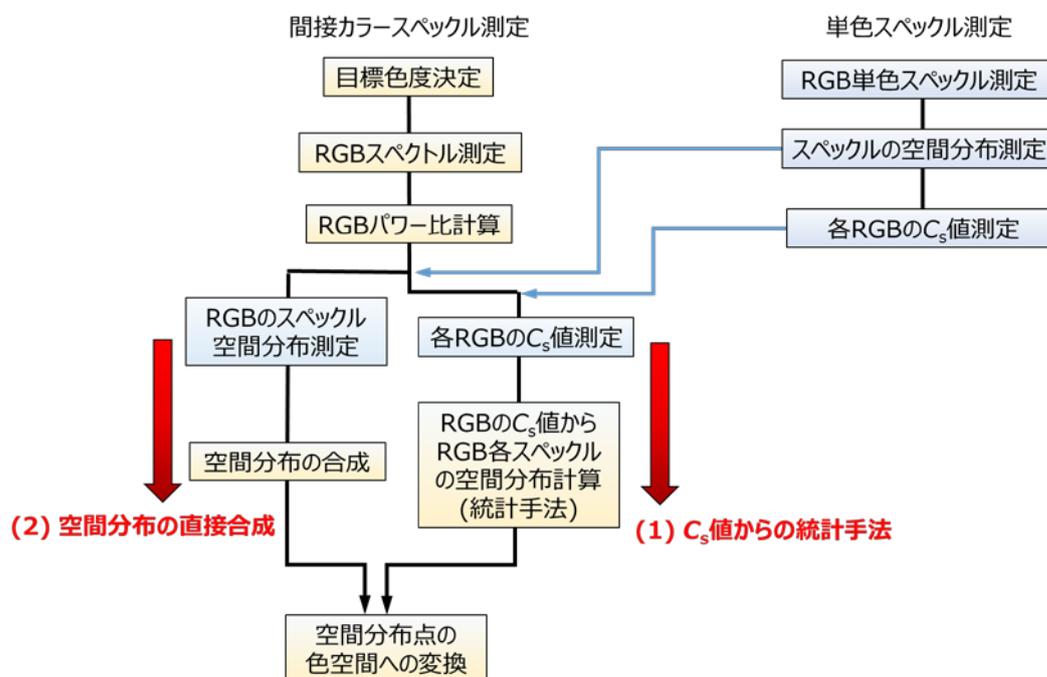


図5.1 カラースペックルの間接的な求め方のフローチャート



5.2 カラースペックルの測定法(直接測定)

カラースペックルを直接測定する方法は、現時点では研究中である。しかしながら、IEC TC110のWG10において、将来の文書: IEC 62906-5-4 として、カラースペックルの求め方とそれを直接測定する方法として、国際標準化のプロセスがスタートしている。

基本的には、等色関数を模したカラーフィルタを用いて、2次元のカラースペックル空間パターンを色空間に変換する。



6 スペックルの許容度

スペックルの許容度は、各種応用によって異なることと、個人差も大きいため確定することは難しい。しかしながら、主観評価を通して、品質等級としての目安を明確にしていく研究は重要である。

NEDO (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の事業の一環として、グリーンデバイス社会実装推進事業「最先端可視光半導体レーザーデバイス応用に係る基盤整備」の事業において、フルフレーム方式のフロントプロジェクトの映像を用いて、RGBWのスペックルの主観評価 (被験者:13名)を実施した。

被験者の1/3以上が、スペックルが見えたと回答した最小のスペックルコントラスト値は、下記の表のとおりであった。

表6.1 被験者の1/3以上が、スペックルが見えたと回答した最小のスペックルコントラスト値

色	1/3以上がスペックルを認識できるスペックルコントラスト値
R	5%
G	5%
B	8%

暫定的な目安として、上記の値以下であれば、スペックルはほとんど見えないため、許容されると考えられる。

ただし、上記条件を緩和しながら、最終的なさらに細かく品質等級を決めるには、まだ実験と議論が必要である。また、白色に関しては、カラースペックルの測定方法が確定した後に同様の主観評価を行って、測定値との相関を取る必要がある。



付録1. カラースペックルの定式化

RGB それぞれの単色スペックルコントラスト値 C_s は次式で表される。

$$C_s = \frac{\sigma}{\langle E \rangle_T} \quad (1)$$

ただし、 E はスペックルの空間分布の網膜上の相対強度(照度)であり、 $\langle E \rangle_T$ は後述するスペックル確率密度関数の全平均値、 σ は分布の標準偏差である。

また、独立光源数を M と仮定するとスペックルの確率密度関数は、ガンマ関数を用いて次式で表現される。

$$p_M(E) = \frac{M^M E^{M-1}}{\Gamma(M) \langle E \rangle_T^M} \exp\left\{-\frac{ME}{\langle E \rangle_T}\right\} \quad (2)$$

ただし、 $\Gamma(M)$ はガンマ関数である。 M は個数難度で物理的には整数であるが、excel の関数は一般化された関数として小数にも対応できる。したがって、Monte Carlo simulation の際は、便宜的に小数として使うことができるので、より実践的である。

式(2)を $\langle E \rangle_T / M = 1$ のように規格化すると、単色のスペックルコントラストの式(1)は、次のように表現できる。

$$C_s = \frac{\sqrt{M}}{\langle E \rangle_T} = \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (3)$$

上式を用いて確率密度関数の式(2)を C_s の関数として表すと次式を得る。

$$p(E) = \frac{E^{C_s^{-2}-1}}{\Gamma(C_s^{-2})} \exp(-E) \quad (4)$$

つまり、平均値で規格化したスペックルの強度分布の各点の振幅 E は、 C_s の関数として計算できる。この単純化した統計学的定式化は、放射測光(radiometry)に基づいている。これを色測光(photometry/colorimetry)に適用する。

RGB の光源それぞれのスペクトルパワー分布を波長で積分した値を 1 として規格化する ($S_{B,G,R}(\lambda) = 1$)。次に、RGB を合成して実現したい目標色度(白色色度の場合が多い)を決める。この目標色度を実現するために必要な RGB のパワー比、 $r_B : r_G : r_R$ (ただし、 $r_B + r_G + r_R = 1$) を計算する必要がある。

CIE 1931 の色度座標、 x, y は次式で求められる。



$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (5)$$

三刺激値 X, Y, Z は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \cdot \{r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\ Y &= \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \cdot \{r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\ Z &= \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \cdot \{r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)\} d\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ は等色関数である。

合成目標色度 x, y は、RGB の規格化スペクトルパワー分布に RGB それぞれのパワー比を乗じた合成スペクトル分布、 $r_B S_B(\lambda) + r_G S_G(\lambda) + r_R S_R(\lambda)$ に等色関数を乗じて波長領域全体にわたって積分して三刺激値 X, Y, Z を求めて算出する。

逆に、与えられた合成目標色度から RGB のパワー比、 r_B, r_G, r_R を未知数として求めるには、そのパワー比を変化させて、目標色度に収束させる計算をすることになる。収束良く確実に求めるために、色度図上で 2 段階のグラフ解法を用いた。図 A.1 で説明する。例えば、緑点(G 点)から目標白色色度点 W を通る直線を引く。その延長が G 点の対面にある B-R ラインと交わる点を P 点とする。

まず、B-R ライン上の P 点の色度を実現する B と R のパワー比 $r_B : r_R$ を求める。この時、G のパワーはオフなので、 $r_G = 0$ である。つまり、 $r_B + r_R = 1$ となり、 r_B か r_R の一方を決めれば他方が決まるので、1 変数の解法となる。B-R ライン上の色度を挟み込んで収束させれば良いので、数回のうちに収束する。

次に、G-P ライン上の白色点 W に注目して、 $r_B + r_R = r_{BR}$ と r_G の比を変化させて W 点でのパワー比を、挟み込みで収束させて求める。この時も $r_{BR} + r_G = 1$ であり、一方を決めれば他方が決まるので、B-R ライン上の方法と同様に 1 変数の解法となる。 $r_B : r_R$ は、B-R ライン上の解法で求めてあるので、比例配分すれば、W の色度を実現する $r_B : r_G : r_R$ (ただし、 $r_B + r_G + r_R = 1$)、つまり、各色のパワー比を求めることができる。なお、この手法は、B-G ライン、G-R ラインからスタートしても同じ結果が得られる。

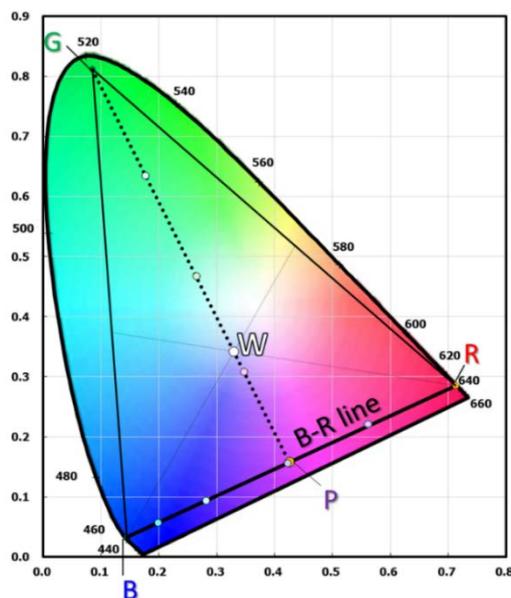


図 A.1 パワー比を求める方法を説明する色度図

各色の光源がインコヒーレントで、スペックルが無ければ、W 点の色度が実現されるが、各色がスペックルを持つと、人間の網膜上で空間的な強度ばらつきを生じる。つまり、パワー比 $r_B : r_G : r_R$ が一定ではなく、スペックルで変化する。したがって、白色の色度点を中心に別の色度点が発生する。空間的には、白色の画面の中に、別の色の細かな点が分布するようになる。

カラースペックルは、RGB 各色の単色スペックルの強度分布から計算により求めることができる。各色の光源の平均値のパワー比は、光源の駆動条件で一定に制御されているが、パワー自身の変動するモデルを用いる。つまり、 $r_B S_B(\lambda)$, $r_G S_G(\lambda)$, $r_R S_R(\lambda)$ の代わりに、 $r_B E_B S_B(\lambda)$, $r_G E_G S_G(\lambda)$, $r_R E_R S_R(\lambda)$ を用いる。平均値のときは、 $E_B = E_G = E_R = 1$ だが、スペックルがあると、その空間的なばらつきを示す変数とする。これは、式(4)の E と一致する。したがって、単色の E_B , E_G , E_R を式(4)にしたがって統計的に処理できる。また、式(4)は、各色の単色スペックルコントラスト C_s の関数なので、各色の C_s の値が決まれば、式(4)の逆関数を用い、 $p(E)$ を乱数発生させることで、 E の分布を再現することができる。この分布を色度 x, y に対応させるには、式(6)に E の要素を追加した次式を用いれば良い。

$$\begin{aligned}
 X &= \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) \cdot \{r_B E_B S_B(\lambda) + r_G E_G S_G(\lambda) + r_R E_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\
 Y &= \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) \cdot \{r_B E_B S_B(\lambda) + r_G E_G S_G(\lambda) + r_R E_R S_R(\lambda)\} d\lambda \\
 Z &= \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) \cdot \{r_B E_B S_B(\lambda) + r_G E_G S_G(\lambda) + r_R E_R S_R(\lambda)\} d\lambda \quad (7)
 \end{aligned}$$



参考文献

本ガイドラインの内容に関し、参考になる文献をリストアップする。

(本文中で引用されていないものも含む。ただし、国際標準は本文中に示した。)

- [1] J. W. Goodman, “Speckle phenomena in optics”, Roberts and Company Publishers, Greenwood Village, CO, (2006)
- [2] S. Kubota, “Spatial coherence measurement of a scanning laser system and applicability of the Zernike’s approximation to the exit pupil on the scan mirror”, *Optical Review* **19** (6), 432-435 (2012)
- [3] K. Suzuki, T. Fukui, S. Kubota, Y. Furukawa, “Verification of speckle contrast measurement interrelation with observation distance”, *Optical Review* **21** (1), 94-97 (2014)
- [4] K. Kuroda, T. Ishikawa, M. Ayama, S. Kubota, “Color speckle”, *Optical Review* **21** (1), 83-89 (2014).
- [5] J. Kinoshita, H. Aizawa, A. Takamori, K. Yamamoto, H. Murata, K. Tojo, “Angular dependence of screen speckle and fiber speckle of coupled output of nine high power blue laser diodes through a multimode fiber”, *Optical Review* **23** (1), 121-132 (2016).
- [6] J. Kinoshita, H. Aizawa, A. Takamori, K. Yamamoto, H. Murata, K. Kuroda, “Color speckle evaluation using monochromatic speckle measurements”, 2016 SID Digest, **10.1** (2016).
- [7] 「解説 レーザー照明・ディスプレイ –究極の照明・ディスプレイを目指して」
(一社)日本光学会レーザーディスプレイ技術研究グループ企画、
黒田和男・山本和久 編、出版:(株)オプトロニクス社 (2016)