Osaka University Knowledge Archive

Title	レーザーディスプレイにおけるスペックル低減に関する研究
Author(s)	山田, 裕貴
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/77496
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

博士学位論文

レーザーディスプレイにおける
スペックル低減に関する研究

山田 裕貴

2020 年 6 月

大阪大学大学院工学研究科

概要

本論文は著者が行ったレーザーディスプレイにおけるスペックル低減に関する研究をまとめたものであり，6 章から構成されている．以下に各章の概要を述べる．

第 1 章 序論

本章ではスペックルに関する基礎理論として，スペックルの低減とスペックルの測定方法について論じた．一般的にレーザーディスプレイにおいては，波長多重・角度多重・偏光多重を用いる方法や，スクリーンを振動させる方法によりスペックルが低減される．スクリーン振動は効果が大きいが，装置が大掛かりでコストも高く，既存のスクリーンに振動機構を追加することも難しいため積極的には利用されず，波長多重・角度多重・偏光多重だけでスペックルを低減することが望まれる場合が多い．

スペックルの評価には，単色スペックルの指標であるスペックルコントラストが一般的に用いられる．スペックルコントラストの測定値は測定系に大きく依存するため，測定方法の標準化が進められている．

第 2 章 スペックル測定系の構築とその検証

本章ではスペックルを評価するためのスペックル測定系を構築し，測定系のパラメータがスペックルに与える影響を評価した．角度多重によるスペックル低減効果がカメラの f-number や測定距離，焦点位置に依存しているため，これらの値を変えることでスペックルコントラストが変化することを示した．

また，角度多重・波長多重・偏光多重によるスペックル低減効果の検証を行い，角度多重の大きさが波長多重によるスペックル低減効果に影響を与えることを示した．これは，波長多重によるスペックル低減と角度多重によるスペックル低減はそれぞれ独立であるとする従来の研究に基づく理論モデルでは説明できない結果である．角度多重によるスペックル低減と波長多重によるスペックル低減の依存性を明らかにすることは効果的にスペックルを低減するために非常に重要である．

第 3 章 波長多重と角度多重の相互依存性を考慮したスペックル低減の理論モデル構築

本章では波長多重と角度多重の相互依存性を考慮したスペックル低減の理論モデルを構築した．まず，角度多重度がない場合について従来知られている理論モデルを拡張することで，スペクトルが複数のガウシアンの和で表される場合の波長多重によるスペックル低減の理論モデルを導出した．

次に，スクリーン散乱光に印加される位相のうち従来の理論モデルでは無視していた斜入射や斜出射による位相項を考慮することで，角度多重と波長多重が同時に存在する場合の理論モデルを導出した．導出した理論モデルにおいて，スクリーン入射光のスペクトルが複数のデルタ関数の和で表され，角度分布がトップハット型であるときのスペックルコントラストを求め，角度多

重によるスペックル低減と波長多重によるスペックル低減が独立ではないことを示した．また，導出した理論モデルにおいて角度多重が十分小さいときの結果が，波長多重のみを考えた理論モデルによる計算値とよく一致した．

第 4 章 波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した理論モデルの実験的検証

本章では，第 3 章で導出した理論モデルの実験的検証を実施し，理論モデルの妥当性を示した．まず，波長多重が無視できる場合について角度多重度を変化させてスペックルコントラストを測定し，スペックルコントラストがスクリーンからカメラのアパチャーを見込む立体角と投影レンズを見込む立体角に依存することがわかった．次に，波長の異なる 2 つのレーザーを用いた実験により，スペックル低減に必要な波長間隔がスクリーン入射光の入射角度，測定角度，及び角度広がりに強く依存することを明らかにした．いずれの場合も理論計算により実験結果をよく再現できることを示した．

第 5 章 プロジェクターへの適用

本章では，プロジェクターの光源に波長の異なる 5 つのレーザーを使用した場合のスペックル低減効果を測定し，理論モデルとの比較を行った．シルバースクリーンでは画像サイズによって波長多重によるスペックル低減効果が異なることがわかった．これは，画像サイズによって角度多重度が変化し，波長多重によるスペックル低減に影響を与えたためであると考えられる．一方でマットスクリーンでは，画像サイズを変えても波長多重によるスペックル低減効果はほとんど変化しなかった．マットスクリーンの場合にはスクリーン散乱時の光路長分布幅が大きいため，スペックル低減に必要な波長間隔がスクリーンの特性のみによって決定され，角度多重度による影響が表れなかったと考えられる．いずれの場合も理論計算によって実験結果がよく再現でき，第 3 章で導出した理論式がレーザープロジェクターに適用できることを示した．

また，プロジェクターの光源に Xe ランプを用いた場合についてスペックルコントラストを測定し，理論計算結果と比較することで理論モデルがレーザーだけでなく Xe ランプにも適用できることがわかった．

さらに，スクリーン振動によってスペックルを低減している映画館でスペックルコントラストを測定するとともに理論計算を実施し，スクリーン振動なしでスペックルを十分低減するための波長構成を示した．

第 6 章 結論

本章では，本研究で得られた結果を総括するとともに，将来の展望について記述し，本論文の結論とした．

目次

第 1 章　序論 1

1.1　研究の背景 1

1.1.1　レーザーディスプレイ 1

1.1.2　スペックルとその分類 4

1.1.3　スペックルコントラスト 7

1.2　スペックルの低減 8

1.2.1　波長多重 9

1.2.2　角度多重 11

1.2.3　偏光多重 14

1.2.4　スクリーン 15

1.2.5　スペックル低減方法の比較 15

1.3　スペックルの測定方法 16

1.3.1　スペックル測定方法の標準化 16

1.3.2　測定系のスペックルに対する影響 17

1.3.3　スペックルコントラストの許容値 18

1.4　先行研究の課題 19

1.5　研究の目的 20

1.6　論文構成と概要 20

第 2 章　スペックル測定系の構築とその検証 23

2.1　スペックル測定系 23

2.1.1　本研究で用いた測定系 23

2.1.2　他のスペックル測定系 24

2.1.3　人間の眼を模擬したスペックル測定方法 25

2.1.4　使用したスクリーンの特性 27

2.2　測定系がスペックルに与える影響の検証 29

2.2.1　カメラの f-number の影響 30

2.2.2　測定距離の影響 33

2.2.3　焦点位置の影響 34

2.2.4　画像の輝度がスペックルに与える影響 35

2.3　Non-speckle noise がスペックル測定に与える影響 35

2.4　偏光多重・角度多重・波長多重によるスペックル低減効果の検証 37

2.4.1　偏光多重によるスペックル低減 37

2.4.2　角度多重によるスペックル低減 40

2.4.3　Xe ランプを用いた場合の波長多重によるスペックル低減 44

2.4.4 レーザーを用いた場合の波長多重によるスペックル低減 46
2.5 まとめ 48
第 3 章 波長多重と角度多重の相互依存性を考慮したスペックル低減の理論モデル構築 50
3.1 波長多重のみの場合のスペックルコントラスト導出 50
3.2 波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した場合のスペックルコントラスト導出 52
3.2.1 スペックルコントラストの導出 52
3.2.2 スペックル場の複素振幅の規格化相関関数 54
3.2.3 入射光の分布関数とスペックルコントラスト 58
3.2.4 スペックルコントラストの計算例 59
3.3 スペックル低減についての理論モデルの適用範囲 62
3.4 まとめ 62
第 4 章 波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した理論モデルの実験的検証 64
4.1 角度多重度によるスペックル低減 64
4.2 波長多重と角度多重によるスペックル低減 68
4.2.1 入射角・測定角を変えた場合の波長多重によるスペックル低減効果 68
4.2.2 角度多重度を変えた場合の波長多重によるスペックル低減効果 72
4.2.3 スクリーンを変えた場合の波長多重によるスペックル低減効果 73
4.2.4 考察 76
4.3 まとめ 77
第 5 章 プロジェクターへの適用 79
5.1 レーザープロジェクターでの波長多重及び角度多重によるスペックル低減実験 79
5.1.1 プロジェクターを用いた実験系 79
5.1.2 シルバースクリーンにおけるスペックル低減 80
5.1.3 マットスクリーンにおけるスペックル低減 84
5.2 Xe ランププロジェクターとレーザープロジェクターのスペックル比較 88
5.3 官能試験によるスペックルの評価 90
5.3.1 輝度またはスペックルコントラストが異なる画像の見え方に関する官能評価 90
5.3.2 考察 95
5.4 映画館におけるスペックルの測定 95
5.4.1 スクリーン振動オン・オフでのスペックルコントラストの違い 96
5.4.2 考察 98
5.5 まとめ 99
第 6 章 結論 101
6.1 本研究の結論 101
6.2 展望 103

付録 **A** **NECSEL** レーザー **104**

付録 **B** トップハット型角度分布の角度範囲 **105**

参考文献 **106**

謝辞 **112**

博士論文に関する業績一覧 **113**

第 1 章
序論

1.1　研究の背景

1.1.1 レーザーディスプレイ

レーザーディスプレイの歴史は古く，1964 年には He-Ne レーザーを光源としたディスプレイの動作が Texas Instruments 社によって実証されている [1,2]．その後 Zenith Radio 社，General Telephone & Electronics 社によっても He-Ne レーザーや Ar+レーザーなどのガスレーザーを用いたディスプレイが報告されている [3,4]．日本においても日立製作所及び NHK 総合技術研究所にてレーザーディスプレイの研究が行われ [5–7]，1970 年には大阪万博でレーザーカラーテレビの展示が実施された．しかし，これらのレーザーディスプレイはガスレーザーを用いていたために消費電力が大きく，当時は実用化には至らなかった．

レーザーディスプレイが商用化されたのは高出力の可視光半導体レーザーが普及し始めた 2000 年代以降であり，2008 年には三菱電機により世界で初めて民生用レーザーテレビが上市された [8]．その後もレーザープロジェクターやヘッドアップディスプレイ，ヘッドマウントディスプレイなどの商品化が進められているが，特に近年はレーザープロジェクターの市場が大きく発展し始め, 2014 年以降にはレーザープロジェクターの製品投入が本格化している [9,10].

レーザープロジェクターは，MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)などの走査機構をもつ走査型プロジェクターと，従来のランププロジェクターと同様に DMD (Digital Micromirror Device)や LCD (Liquid Crystal Display)，LCOS (Liquid Crystal on Silicon)といった空間光変調素子を用いるプロジェクターに分けられる. 走査型レーザープロジェクターは，小型化が可能でフォーカスフリーな映像投影が可能であるという利点がある．また，スクリーンではなく網膜上に直接レーザー光を走査して画像を形成する網膜走査型のプロジェクターも提案されている [11].

空間光変調素子を用いるプロジェクターは，1 つの色に複数のレーザー素子を用いる場合が多く，高い輝度が要求される用途に用いられることが多い．空間光変調素子を使用するレーザープロジェクターの例として，赤・緑・青の三色すべてにレーザー光源を用いたピュア RGB レーザープロジェクターの構成例を Figure 1.1 に示

す．ピュア RGB レーザープロジェクター以外にも，青色レーザー励起による蛍光光源プロジェクターがある．例えば，青色レーザーとレーザー励起黄色蛍光光源を用いた蛍光光源プロジェクターや，青色レーザーとレーザー励起蛍光体の構成に赤色レーザーを加えた赤レーザーアシスト型蛍光光源プロジェクターなどが一般的に用いられている．

ピュア RGB レーザープロジェクターの利点は色純度が高く非常に広い色域を再現できる点で，次世代 UHD (Ultra High Definition)の規格である BT.2020 の色域をカバーすることが可能である．また，輝度も高く大画面の投影に適している．一方で蛍光光源プロジェクターは，ピュア RGB レーザープロジェクターよりも低コスト化が可能であり，比較的出力の低いプロジェクターでよく使用されている．

レーザープロジェクターに用いるレーザーとしては，青色レーザーには InGaN 系の材料を用いた半導体レーザー [12]，緑色レーザーには青色レーザーと同様の InGaN 系の材料を用いた半導体レーザーか，半導体レーザーや半導体レーザー励起固体レーザーを SHG (Second Harmonic Generation)素子によって波長変換した波長変換レーザー [13,14]が使用され，赤色のレーザーには AlGaInP 系の材料を用いた半導体レーザー [15,16]が使用されることが多い．初期のレーザープロジェクターでは緑色レーザーとして波長変換レーザーの使用が一般的であったが，現在では緑色半導体レーザーの長波長化に伴い波長変換レーザーから半導体レーザーに置き換わりつつある．ただし，550 nm 前後の長波長の緑色レーザーが必要な場合には依然として波長変換レーザーが使用されている．長波長の緑色レーザーが使用される例としては，3D 方式として左右の眼で波長が 20 nm 程度異なる波長を用いる 6P3D (6 Primary 3D)方式を使用する場合などが挙げられる．

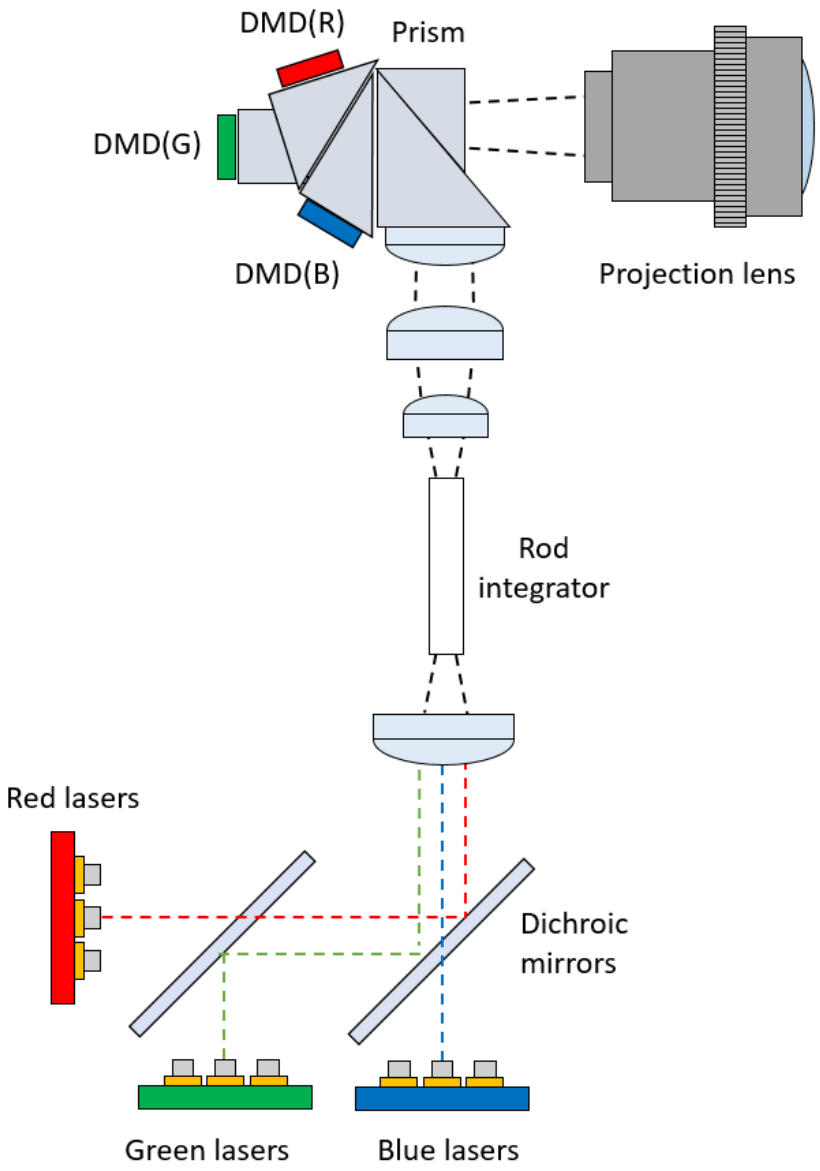


Figure 1.1 Schematic diagram of pure RGB laser projector with 3 chip DMDs.

レーザープロジェクターの用途はビジネス用，ホームシアター用，映画館やイベント・コンサートホール用など多岐にわたるが，特に映画館向けでは高い画質が求められる．商用のレーザーシネマがスタートしたのは 2010 年代で，2013 年に Christie Digital Systems 社が米国バーバンクの AMC シアターにおいて期間限定でレーザープロジェクターを運用したのが世界で初めての商用レーザーシネマプロジェクターである [10]．その後，2014 年には米国の映画館でレーザープロジェクターの常設運用が開始された [17]．日本においても 2015 年に IMAX 社によって大阪にレーザープロジェクターが導入されたのを皮切りに，2017 年に鹿児島，2018 年に名

古屋・川崎，2019 年には札幌・池袋・新宿・埼玉・千葉・沼津・奈良・沖縄などにもレーザープロジェクターが導入され，日本でのレーザーシネマの本格普及に向けて大きく進展している．

これらのレーザープロジェクター普及に対して大きな障害となるのが，レーザーの干渉によって生じるスペックルノイズである．スペックルノイズが発生すると画質が大きく低下するため，スペックルノイズの低減がレーザープロジェクターでの大きな課題となっている．スペックルノイズの低減は，プロジェクター側での対策とスクリーン側での対策にわけられる．スクリーン側での代表的な対策としてスクリーンを振動させる方法があるが，スクリーン振動には多大なコストがかかる場合が多く,また既存のスクリーンに後から導入することが難しいといった問題がある．したがって，プロジェクター側でのスペックル対策が重要である．

しかし,現状ではプロジェクター側でのスペックル低減が十分であるとは言えず,新規にレーザープロジェクターを導入する際にスクリーン振動機構も併せて導入してスペックルを低減している場合も多い．高価なスクリーン振動システムの導入が必須となれば，レーザープロジェクターの普及を鈍化させる要因となるため，今後レーザープロジェクターを更に普及させるためには，プロジェクター側でのさらなるスペックル低減が求められている．

1.1.2 スペックルとその分類

スペックルはコヒーレントな光が粗面によりランダムに散乱されることによって生じる干渉現象であり，例えば Figure 1.2 に示すようにスクリーンで散乱されたレーザー光が網膜上で干渉することによって生じる．スペックルはレーザー光を使用した場合に顕著に現れるがレーザー特有の現象というわけではなく，古くはナトリウムランプや水銀の線スペクトルなどを用いて研究が行われていた [18]．本格的な研究が始まったのはレーザーが発明された 1960 年以降で [19–21]，特に 1970 年ころから Goodman や Dainty, 朝倉らによって基礎的な研究が加速されてきた [22–25]．2000 年代に入ると, レーザーディスプレイの開発に伴ってレーザーディスプレイにおけるスペックルについての研究もさかんに行われるようになった [26,27]．

スペックルにはその発生原理や発生場所によっていくつかの種類があり，レーザープロジェクターで発生するスペックルは Figure 1.3 に示す objective speckle と subjective speckle の 2 種類に分けられる [28,29]．Subjective speckle はスクリーン

の散乱光が結像光学系を通って生成されるスペックルパターンで，一方の objective speckle は結像光学系なしで得られるスペックルパターンである．Subjective speckle はさらに，プロジェクター内の光学系が原因でスクリーン上に強度のパターンができる projected speckle と，スクリーンの凹凸パターンが原因で干渉が生じてセンサー上にパターンが現れる screen speckle に分けることができる [29]．レーザープロジェクターで特に問題となるのは screen speckle であるため，本研究では screen speckle を主に取り扱う．

Screen speckle は，コヒーレントまたは部分的にコヒーレントな光が，スクリーンのようにランダムな凹凸パターンのある要素で反射や透過することで発生する．スクリーンの凹凸パターンにより，スクリーンでの散乱光にはランダムな位相分布が発生する．ランダムな位相分布を持った散乱光が結像光学系を通り，網膜上やカメラのセンサー上で結像する際に位相分布に応じた干渉パターンが生じる．この干渉パターンが screen speckle である．スクリーンの凹凸による干渉が原因であるので，同じ光源を使った場合でもスクリーンの種類が異なるとスペックルパターンが大きく変化する特徴がある．

Projected speckle などのスクリーン上に生じるパターンは観測者の位置が変わっても変化しないが，screen speckle は観測者の位置によってパターンが変わることから，観測位置を変えた際のパターン変化から screen speckle とスクリーン上に実際に明暗のパターンができる他のノイズとを見分けることが可能である．

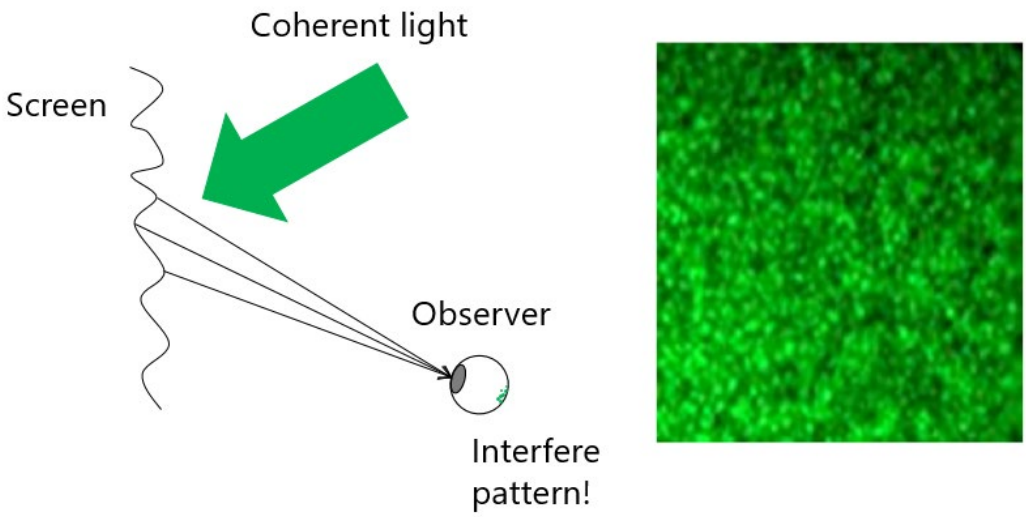


Figure 1.2 (left) Principle of speckle generation, (right) monochromatic speckle pattern of green laser taken by a CCD camera.

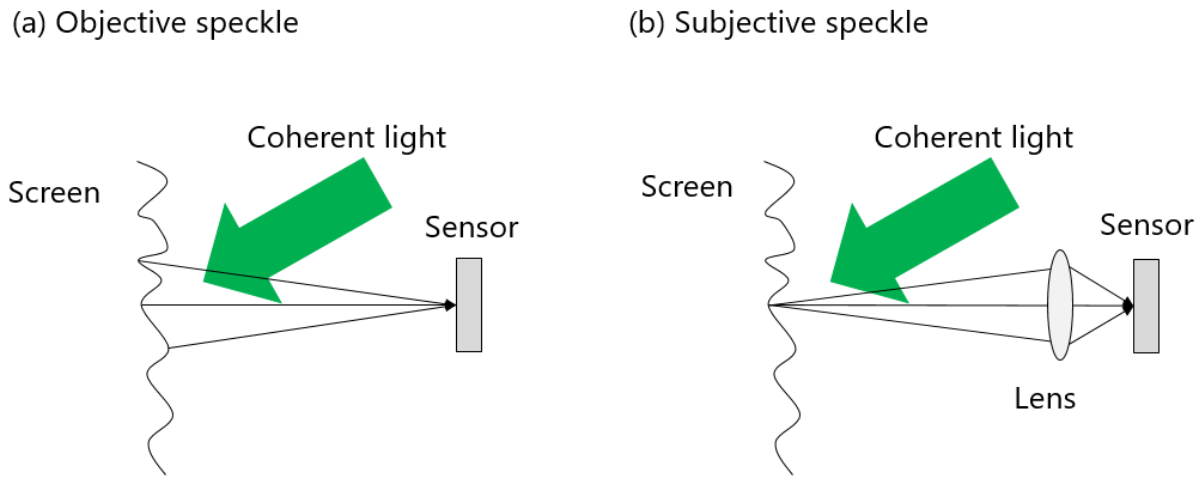


Figure 1.3 Objective speckle and subjective speckle.

また，スペックルの他の分類として，単色スペックルとカラースペックルに分類することができる [30–34]．単色スペックルは，光源に一つの原色のみ（赤のみ，緑のみ，青のみなど）を用いた場合のスペックルで，Figure 1.2 に示すように明暗のパターンとして認識される．一方でカラースペックルは，光源が複数の原色からなる場合に現れるスペックルである．複数の原色が単色スペックルを形成している場合，それぞれの原色で明暗のパターンが異なるため，それらを合成した際に結果として Figure 1.4 に示すように色が分離してカラースペックルを形成する．

複数色の光源によって現れるスペックルパターンは 1970 年代から研究されていたが [35,36]，レーザーディスプレイにおいては 2014 年に黒田 [30,31]によってカラースペックルとして提唱されるまでは単色のスペックルコントラストでの議論がほとんどであった．黒田によってレーザーディスプレイでのカラースペックルの概念が提唱された後は，カラースペックルについても盛んに議論がなされるようになった．

レーザープロジェクターでの実際の映像には，このような単色スペックルとカラースペックルの両方が現れる．ただし，それぞれの色で単色スペックルを低減すれば同時にカラースペックルも低減されるため，本研究では特に単色スペックルの低減に着目した．

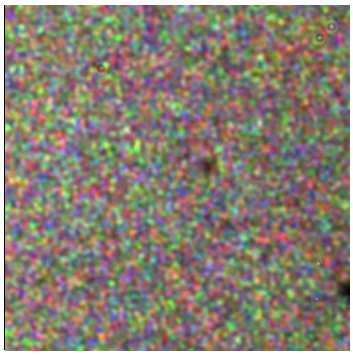


Figure 1.4 Color speckle with red, green and blue lasers.

1.1.3 スペックルコントラスト

スペックルの定量化には，単色スペックルの程度を表す指標であるスペックルコントラストが一般的に用いられる．スペックルコントラストは，下式の通りカメラで撮影した単色のスペックル画像について光強度の標準偏差 σ_I と平均値$\bar{I}$の比を取ることで求められる．

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}. \tag{1-1}$$

Figure 1.5 は，スペックルが全く無い場合と最も顕著な場合での光強度の確率密度関数を示す．Figure 1.5(a)はスペックルが全くない場合の確率密度関数で，標準偏差 σ_I が 0 であるためスペックルコントラストも 0 となる．Figure 1.5(b)は，非常にコヒーレンスの高い光源を用い，スクリーンでの散乱光の位相分布が 2π にわたり均一に分布している場合に生じる fully developed speckle の確率密度関数で，この場合は確率密度関数が負の指数関数に従うことが知られている [27,37]. このとき，標準偏差と平均が等しいためスペックルコントラストは 1 となる．一般には，スペックルはこれら 2 つの間の状態をとる．

なお，スペックルコントラスト以外の指標によるスペックルの評価も提案されており，例えば SID (Speckle Influence Degree) [38,39]という指標を用いることなどが提案されている．しかし，スペックルコントラストのように広く普及した指標にはなっていないのが現状である．

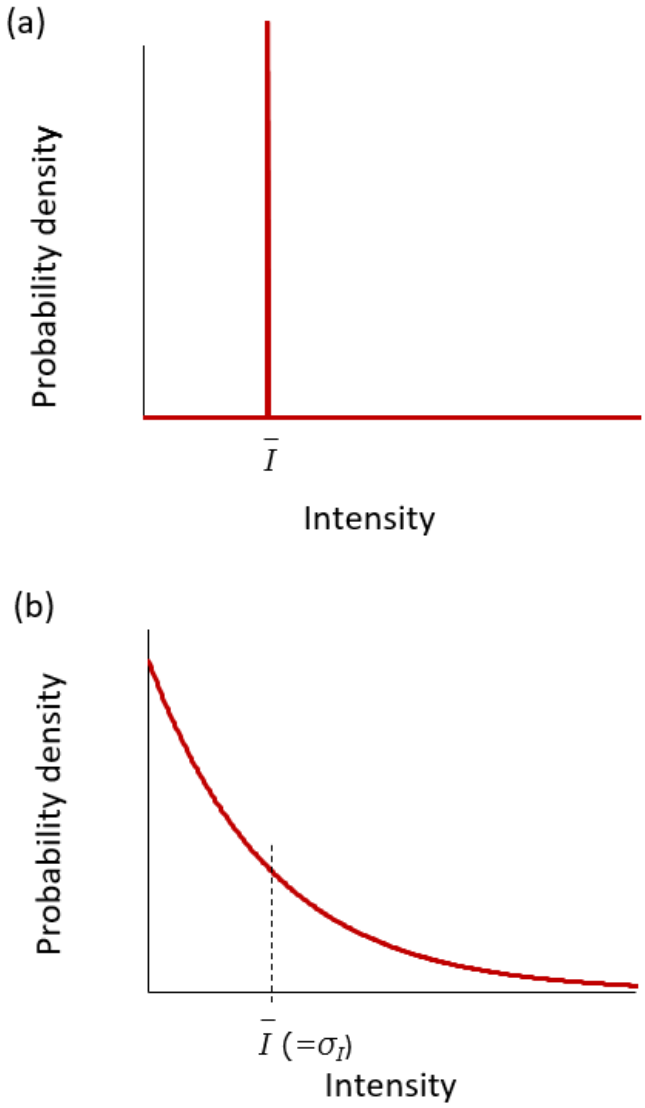


Figure 1.5 (a) Probability density function of intensity when there is no speckle. (b) Probability density function of intensity of fully developed speckle.

1.2 スペックルの低減

スペックルの低減手法についてもこれまでに様々な研究が進められている．例えば照射光の発散角を広げることやスクリーンを動かすことによってスペックルの低減が可能であるということが，レーザースペックルが初期に報告された際に報告されている [19]．また，複数の波長を用いることによってスペックルが低減できる点についても，1970 年代前半には実験的 [40,41]及び理論的 [42,43]に報告されている．

その後も多くの研究結果が報告されているが，特にレーザーディスプレイの開発が本格化した 2000 年代以降には，レーザーディスプレイに特化したスペックル低減手法の報告が数多くなされている．

レーザープロジェクターでのスペックル低減手法としては，波長多重・角度多重・偏光多重と，スクリーンを使ったスペックル低減が挙げられる．ここで，それぞれの方法について簡単に説明する．

1.2.1 波長多重

波長多重は最もよく使用されるスペックル低減手法の一つである．レーザープロジェクターで波長多重を実現する方法として，Figure 1.6 に示すように中心波長の異なる複数のレーザーを用いて多波長化する方法や，レーザーのスペクトル幅を広げる方法がよく用いられる．

スペクトル幅を広げる方法によるスペックル低減は Goodman [27]により定式化されている．スクリーンでの散乱が表面での一回散乱で，スペクトルがガウシアンで表される場合に，中心周波数を$\bar{\nu}$，スペクトルの 1/e 全幅を$\delta\nu$，中心波長を$\bar{\lambda}$，スクリーンの二乗平均表面粗さをσ_h，スクリーンへの入射角と出射角を$(\theta_\mathrm{i}, \theta_\mathrm{o})$とおくと，スペックルコントラストは下式で表すことができる．

$$C = \left(1 + 2\pi^2 \left(\frac{\delta\nu}{\bar{\nu}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\lambda}}\right)^2 (\cos\theta_\mathrm{o} + \cos\theta_\mathrm{i})^2\right)^{-\frac{1}{4}}$$
$$\approx \left(1 + 2\pi^2 \left(\frac{\delta\lambda}{\bar{\lambda}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\lambda}}\right)^2 (\cos\theta_\mathrm{o} + \cos\theta_\mathrm{i})^2\right)^{-\frac{1}{4}}, \qquad (1-2)$$

ここで，$\delta\lambda \approx \bar{\lambda} \times (\delta\nu/\bar{\nu})$は波長幅である．例えば σ_h=30 μm のときのスペックルコントラスト計算結果を Figure 1.7 に示す．σ_h=30 μm の場合には波長幅が数 nm あればスペックル低減効果が得られる．

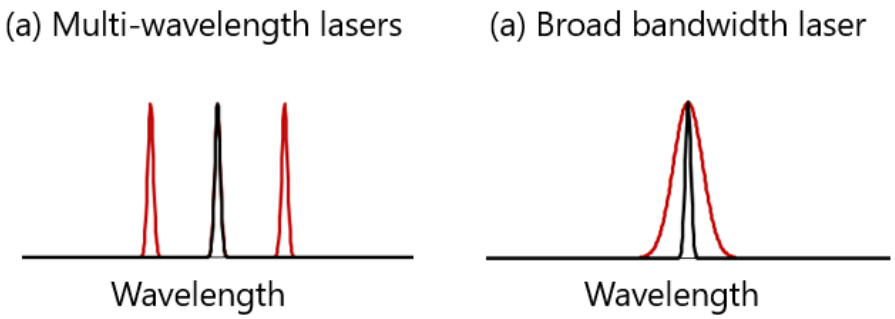


Figure 1.6 Speckle reduction by wavelength diversity using: (a) multi-wavelength lasers, (b) broad bandwidth laser.

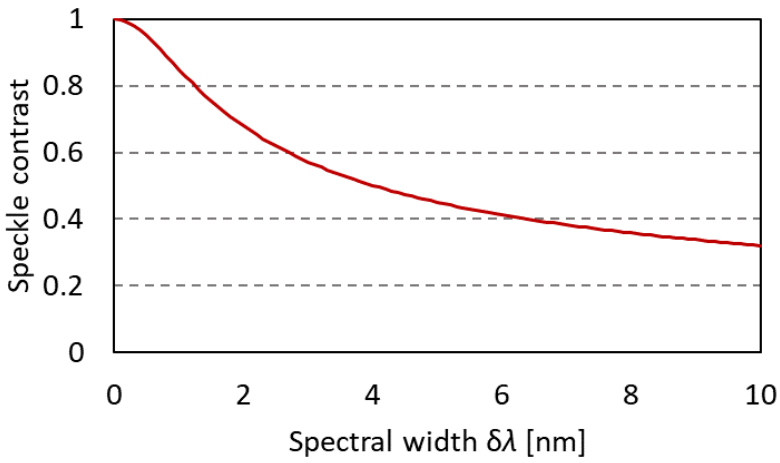


Figure 1.7 Speckle reduction effect by using broad bandwidth laser. σ_h=30 μm, $\bar{\lambda}$=532 nm, θ_i=θ_o=0°.

プロジェクターにおける波長多重によるスペックル低減の結果は，2000 年代以降に様々な報告がなされている．Murata らは，赤色，緑色，青色各色のレーザーの駆動電流に高周波を重畳することで波長幅を広げ，スペックルコントラストが低減することを報告している [44,45]．Furukawa らは，マルチストライプ赤色半導体レーザーで隣接するエミッタ間隔を変えて各エミッタの温度を変化させ，スペクトルの半値全幅を 0.8 nm から 3.7 nm まで拡大することで，スペックルコントラストが 0.2 から 0.05 まで低減したと報告している [46]．Yao らは，波長幅の広いフェムト秒レーザーを用いたスペックル低減を報告している [47]．また，Yu らは TPLN (Tandem-poled Lithium Niobate)結晶を用いることで，6.5 nm 幅の緑レーザーを実現

してスペックルを低減したと報告している [48].

複数の波長を用いた結果は Kuksenkov らが緑色レーザーを 0.5 nm 間隔で 3 波長使用した結果 [49]を，Wang らが緑色レーザーを 4 nm 間隔で 3 波長使用した結果 [50]を，Tran らが青色レーザーで多波長化した結果 [51]を報告している．また，Ma らは複数波長のレーザーによるスペックル低減の理論計算を実施し，532 nm の DPSS (Diode Pumped Solid State)レーザーと 520 nm の LD (Laser Diode)を用いた検証結果を報告している [52].

レーザープロジェクターに適用する場合，波長多重はスペックル低減効果が大きく，また光源に異なる波長のレーザーを用いるだけで実施可能であるため比較的採用が簡単であるという利点がある．しかし，多波長化するために視感度の低い波長のレーザーを使うと明るさが低下するといった問題や，レーザープロジェクターの利点である高い色純度が損なわれる可能性があるといった問題がある．視感度が低下する問題は特に青と赤で顕著であり，例えば赤では 640 nm に比べて 655 nm の視感度が半分弱であるため，640 nm を 1 波長だけで使用するシステムに比べ，レーザーのパワーを変えずに半分のレーザーを 655 nm に変更して多波長化したシステムでは明るさが 3 割程度低下する．

1.2.2 角度多重

角度多重は，スクリーンへ異なる角度の光を入射することでスペックルを低減する方法である．Figure 1.8 に示すように，スクリーン入射光が有限の角度分布を持っている場合にスペックルを低減できる．

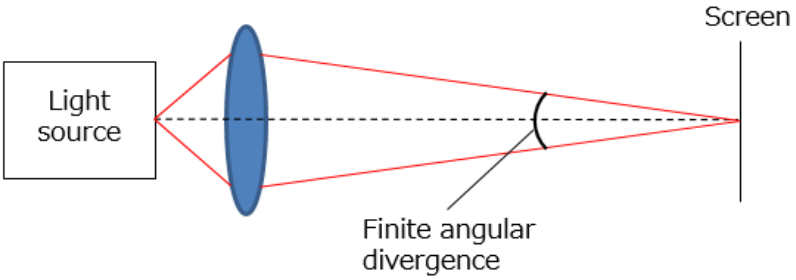


Figure 1.8 Speckle reduction by angular diversity. Speckle is reduced when the illumination light has finite angular divergence.

Goodman によると，空間光変調素子を用いるプロジェクターで拡散板を使用した場合の角度多重によるスペックル低減は下式で表される [27,53].

$$C = \left(\frac{K + M \pm 1}{KM}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{1-3}$$

ここで，K は空間多重度，M は時間多重度，±の符号は投影レンズが照射光に overfill されている(+)か，underfill されている(-)かによって決まる.

スペックルをカメラで測定する場合，空間多重度 K は次のように近似される [27].

$$K \approx \frac{\Omega_{\mathrm{p}}}{\Omega_{\mathrm{d}}}, \tag{1-4}$$

ここで，Figure 1.9 に示したように Ω_{p} はスクリーン上の一点から投影レンズを見込む立体角，Ω_{d} はスクリーン上の一点からスペックル測定カメラのアパチャーを見込む立体角である．したがって，空間多重度 K を大きくすることでスペックルを低減するためには，投影レンズを見込む立体角 Ω_{p} を大きくするか，測定カメラのアパチャーを見込む立体角 Ω_{d} を小さくする必要がある.

Ω_{p} を大きくする方法としては，拡散角度の大きい拡散板を使用する方法や MEMS ミラーを 2 次元的にスキャンする方法 [54]などがある.

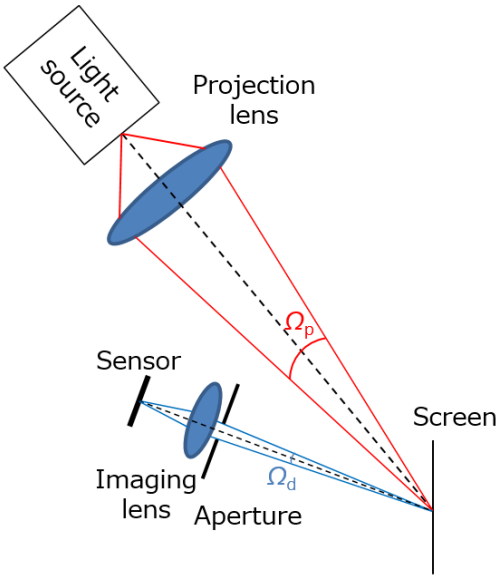


Figure 1.9 Solid angles subtended by projection lens and camera aperture.

Ω_{d}を小さくことによるスペックル低減は，例えばスクリーン・カメラ間距離を大きくするか，カメラのアパチャーサイズを小さくするなど，カメラでの測定条件を変化させることで実現できる [46,53]．しかし，映画館などでの実際の使用条件を考えると，スクリーンから観客までの位置は固定されており，観客の瞳孔サイズも変化させることはできないため，スペックルを低減するために Ω_{d} を小さくすることは実際には難しい．ただし，後述するようにスペックルを評価する際には非常に重要である．

時間多重度 M は，人の眼や検出器の積分時間内に表れる統計的に独立な強度パターンの数であり，例えば拡散板を振動させて位相を時間的に変化させる方法 [37,55–61]や，ミラーを振動させる方法 [62–65]，ファイバーを使用する方法 [66–68]，回折光学素子(DOE, Diffractive Optical Element)を振動・移動・回転させる方法 [69–72]，ライトパイプなどその他の光学素子を振動させる方法 [73]などで増加させることができる．

光源がレーザーでない場合には，位相が時間的にランダムに変動するため M は一般的に非常に大きな値となる [27]．同様に，独立なレーザーの個数を増やすと，独立なレーザー同士は位相ゆらぎが異なるので，レーザー線幅の逆数以上の時間で積分すると統計的に独立なパターンが生じて M が増加する．また，一つのレーザーから出射される発振モードの数を増やすことも同様の効果がある．例えば，スペックル低減のために一つの共振器から 1000 程度の独立なモードが発振するレーザーが報告されている [74]．また，安倍らによって独立なレーザー個数を増やすことによるスペックル低減効果が報告されている [75]．ただし，独立なレーザーの個数を増やした場合には，時間多重度 M だけでなく空間多重度 K も変化することが考えられるので注意が必要である．

角度多重はスペックル低減効果が大きいが，レーザープロジェクターに適用する場合，角度広がりの上限は投影レンズの f-number (f/#)で決まっている．角度広がりを大きくするためには f-number の小さな投影レンズを使用する必要があるが，f-number の小さな投影レンズを使用するとプロジェクターのコントラストが低下するという問題や，投影レンズのコストアップにつながるという問題がある．したがって，投影レンズの f-number は変えない範囲でできるだけ角度広がりを大きくすることでスペックルを低減する場合が多い．

1.2.3 偏光多重

直交する 2 種類の偏光は互いに干渉しないため，異なる偏光状態の光を用いることでスペックルを低減できる場合がある．偏光多重によるスペックル低減は，Figure 1.10 に示すように 2 種類に分けることができる．

一つ目は，スクリーンでの偏光解消によるスペックル低減である．例えば光沢の無い表面状態のマットスクリーンやコピー紙で入射光を複数回散乱することで入射光の偏光解消が生じる場合，2 種類の偏光成分が互いに独立なスペックルパターンを形成し，スペックルが低減する [22,23]．偏光解消による偏光多重度が最大 2 であるため，偏光解消によるスペックル低減でスペックルコントラストを$1/\sqrt{2}$まで低下させることが可能である．

二つ目は，入射光の偏光状態によるスペックル低減である．スクリーン入射光に無偏光の光を用いることで，さらに 2 つの偏光多重度を導入することが可能である [26,27]．入射光の偏光状態によるスペックル低減としては，例えば液晶によって偏光状態を変えることで実現した例が報告されている [76]．

これら 2 種類の自由度を合わせると偏光多重の自由度は最大 4 となり，スペックルコントラストを 1/2 まで低下させることができる．偏光多重は導入が容易であるが，LCD や LCOS などの液晶素子を用いるプロジェクターや，偏光方式の 3D 投影技術を用いる場合には偏光多重は利用できないなど，利用できる条件は限られている．

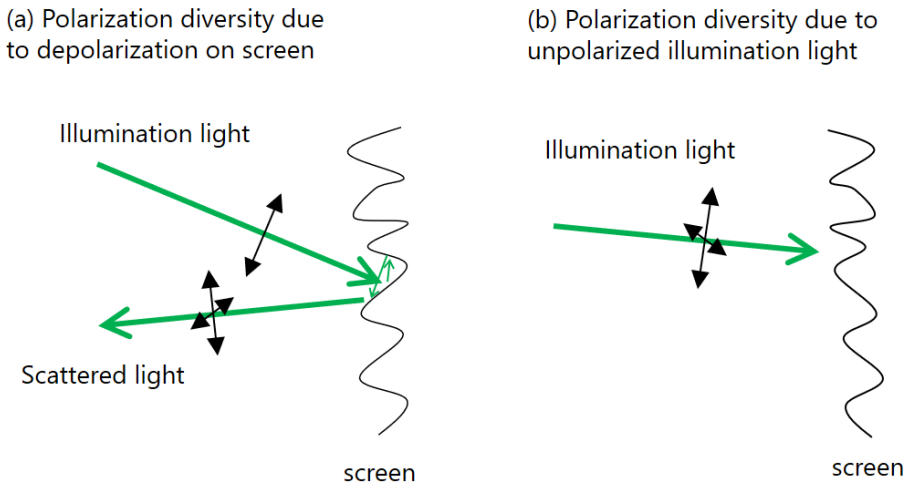


Figure 1.10 Two types of polarization diversity: (a) polarization diversity due to depolarization on screen, (b) polarization diversity due to unpolarized illumination light.

1.2.4 スクリーン

波長多重・角度多重・偏光多重以外によるスペックル低減法としては，スクリーンを利用するものがある．スペックルはスクリーンのランダムな凹凸パターンによって生じる干渉であるため，スクリーンの特性がスペックルに与える影響は非常に大きい．特によく用いられるスペックル低減手法はスクリーンを振動させる方法 [46,77–80]で，スクリーンを振動させてスクリーンの凹凸のパターンを時間変化させると，スクリーンの凹凸が原因で生じるスペックルパターンも時間的に変化する．したがって，カメラの露光時間や人間の眼の時間分解能（数十 ms）内で変動するスペックルパターンが平均化されるため，スペックルが低減される．

スクリーン振動によるスペックル低減効果は大きいが，シネマ用スクリーンのように大きなスクリーンに振動機構を設けることは非常にコストがかかり，また既存のスクリーンには振動機構を追加することが難しいといった問題がある.そのため，スクリーン振動は使用せずに波長多重・角度多重・偏光多重などの方法だけでのスペックル低減が求められる場合が多い．

他にも，マイクロレンズアレイをスクリーンとして用いることでスペックルを低減する方法 [81,82]や, 電荷をもった粒子を含むマイクロカプセルをスクリーンとして使用してスペックルを低減する方法 [83,84], コロイドを分散させたスクリーンを用いたスペックル低減 [85]なども報告されている．

また，スクリーンの性質は波長多重度や偏光多重度を通してスペックル低減効果に影響を与える．例えば，1.2.1 項で示したように，スクリーンの表面粗さが大きいほど波長多重によるスペックル低減効果が大きくなる．また，1.2.3 項で示したように，入射光の偏光解消が生じるスクリーンを用いると偏光多重によってスペックルが低減する．

1.2.5 スペックル低減方法の比較

波長多重･角度多重･偏光多重とスクリーン振動によるスペックル低減について，効果とコストをまとめて Table 1.1 に記載した．波長多重と角度多重の組み合わせが，効果及びコストを考えて最適と考えられる．

Table 1.1 Comparison between each speckle reduction method.

	波長多重	角度多重	偏光多重	スクリーン振動
効果	○ ・波長幅・波長数を増やすほど効果が高くなる	○ ・角度広がりを大きくするほど効果が高くなる	△ ・効果は最大で1/2倍と限定的	◎ ・効果は非常に大きい
コスト	◎ ・もともと複数のレーザーを使用している場合は,波長を変えるだけであるため比較的低コスト	○ ・角度広がりを大きくするためにf/#の小さな投影レンズを使用するとコストアップ ・投影レンズを変えない範囲であれば低コストで可能	◎ ・容易に導入可能	× ・大掛かりな振動機構が必要で，コストが高い
デメリット	・表現できる色域が損なわれる可能性がある ・視感度の低い波長を使うと明るさが低下する	・f/#の小さな投影レンズを使用すると，プロジェクターのスペックに悪影響が出る	・LCDやLCOSを使ったプロジェクターでは利用できない	・既存のスクリーンにあとから導入することは難しい

1.3 スペックルの測定方法

1.3.1 スペックル測定方法の標準化

このように，スペックル低減のために様々な方法が研究されているが，一方でスペックルを定量的に評価することも非常に重要である．スペックルの評価にはスペックルコントラストが一般的に使用される．スペックルコントラストは，スペックルをカメラなどにより撮影し，得られた光強度の標準偏差と平均値の比として求められる．

スペックルの測定系は，スクリーンを結像するためのレンズと人間の眼の結像性能を模擬するためのアパチャーからなる結像光学系，CCD (Charge-Coupled Device) などのセンサーから構成される．なお，以下では結像光学系とセンサーを含むスペックル測定系をカメラと記載する場合がある．

同じ画像のスペックルコントラストを評価する場合でも測定系が変わればその値は大きく変化する．そのため，スペックルコントラストを比較するには同一の条件

で測定した結果を比較することが必要であるが，評価系の詳細なパラメータは各団体によって様々であるため [86]，様々な団体が異なる測定系で測定した結果を比較することは難しかった．

そこで，2012 年から国際標準機関である IEC (International Electrotechnical Commission)の Technical Committee TC110 において，スペックル測定の標準化が進められている [87]．IEC TC110 では，まず 2015 年にスペックルに関する用語の国際標準が制定された(IEC 62906-1-2:2015 Laser display devices – Part 1-2: Vocabulary and letter symbols)．その後，2016 年には単色のスペックルコントラストの測定方法について国際標準が制定された(IEC62906-5-2:2016 Laser display devices –Part 5-2: Optical measuring methods of speckle contrast)．国際標準 IEC62906-5-2:2016 で提案されている測定系に準拠したスペックル測定器としては，例えばオキサイド社の Dr. Speckle [53,88]が挙げられる．

また，単色スペックルに次いでカラースペックルについても標準化が進められており，2018 年にカラースペックルの測定方法についての国際標準が制定された(IEC 62906-5-4:2018 Laser display devices – Part 5-4: Optical measuring methods of colour speckle)．

1.3.2 測定系のスペックルに対する影響

スペックルコントラストの測定に影響を与えるパラメータとしては，結像光学系の f-number やアパチャーサイズ，スクリーン・カメラ間の距離，センサーのピクセルサイズ，測定角度，露光時間，結像光学系の収差などが挙げられる．

スクリーン・カメラ間の距離とカメラのアパチャーサイズを変化させると，1.2.2 項で示したように角度多重度が変化する．スクリーン･カメラ間距離が大きいほど，またアパチャーサイズが小さいほどスペックルコントラストが低下する [46,53]．また，アパチャーサイズはスペックルのサイズにも影響を与える．Goodman によると，波長を λ，結像光学系の f-number を f_n とすると，センサー上でのスペックルサイズは λf_n に比例する [27]．F-number はカメラのアパチャーサイズに反比例するため，アパチャーサイズが大きいほどスペックルサイズが小さくなる．スペックルサイズがセンサーのピクセルサイズよりも小さい場合，撮影して得られたスペックルパターンは平均化されたものとなるため，スペックルサイズが小さいほどスペックルコントラストが小さくなる [89]．つまり，アパチャーサイズを大きくするなどによっ

て f-number を小さくすると，角度多重度の増加によるスペックルコントラスト増加と，スペックルサイズが小さくなりカメラの 1 ピクセル内で平均化されることによるコントラスト減少の 2 つの効果が生じる．ピクセルサイズが十分小さい場合には f-number の減少とともに単調にコントラストが増加する [90,91]が，ピクセルサイズが十分小さくない場合には f-number を減少させてもスペックルコントラストが減少することがある．

また，スペックルの測定角度によってもスペックルコントラストは変化する．測定角度が大きくなると，スペックル測定系のスクリーン上での解像サイズが大きくなるため，角度多重度が増加してスペックルがより低減することが報告されている [92–94].

振動や回転など駆動する光学素子を使用している場合，スペックル測定系の露光時間もスペックル測定に影響を与えることが考えられる．露光時間が短いほど積分される独立パターンが少なくなり，スペックルコントラストが増加することが予想されるが，数十 ms～数 s の範囲ではスペックルコントラストはほとんど変化しないことが報告されている [95,96].

また，スクリーン上の画像をスペックル測定系のセンサー上や網膜上に結像する結像光学系の収差もスペックルコントラストに影響を与える．Kang らは，照射光がコヒーレント光の場合には光学系の収差はスペックルコントラストに影響しない [97]が，空間的に部分コヒーレントな光の場合には収差がスペックルコントラストに影響を与える [98]ことを報告している．一般にプロジェクターにおいてはスクリーンを照射する光は部分的にコヒーレントであるため，結像光学系に収差がある場合にはスペックルコントラストが大きく低減する．したがって，人間の眼を模擬した測定系でスペックルコントラストを測定する場合には，人間の眼の収差を考慮する必要がある．

1.3.3 スペックルコントラストの許容値

1.3.1 項で示したように，スペックルコントラストの測定法については標準化が行われたが，レーザープロジェクターの開発のためにはスペックルコントラストの許容値を明らかにすることも重要である．なお，スペックルコントラストの許容値とは人間が眼で見た際にスペックルが知覚できなくなる値を指す．スペックルコントラストの許容値はこれまでに統一された値はなく，様々な値が提案されている．

例えば,単色の静止画像についてのスペックルコントラストの許容値は,Roelandtらは赤 0.036，緑 0.032，青 0.044 [99]，大阪大学と島津製作所は赤 0.05，緑 0.05，青 0.08 と報告しており [100]，色によっても許容値が異なる結果となっている．

また，動画でのスペックルコントラストの許容値については Verschaffelt らが赤 0.07，緑 0.06，青 0.05 と報告しており，静止画像の結果とは異なり青の許容値が他の 2 色より低い結果となっている [101]．しかし，報告されている動画での許容値は 3 色のスペックルコントラストを同時に変化させて評価した結果であるため，最もスペックルコントラストの高い赤色のスペックルによって他 2 色の結果が左右されたと考えられる．したがって，赤以外の 2 色については許容値が実際よりも小さく算出され，静止画像と異なる結果となっている可能性がある．

このように,スペックルコントラストの許容値には様々な値が提案されているが,最も厳しい場合でもスペックルコントラストが 0.03 以下であれば許容可能としているため,スペックルコントラストを 0.03 以下まで低下させることでスペックルが許容できるレベルになると考えられる．

また，色によってもスペックルコントラストの許容値が異なることが報告されているが，一般的には静止画像での結果が示すように青色のスペックルは赤と緑に比べて知覚しにくいと考えられている．青のスペックルが知覚しにくい原因は，人間の視細胞である 3 種類の錐体細胞のうち，青を感じる S 錐体の割合が全体の 5%程度と非常に少ないためであると考えられる [102]．なお，赤を感じる L 錐体と緑を感じる M 錐体については，正常色覚を持っていても人によって L 錐体と M 錐体の比 L/(L+M)が 0.27~0.94 と大きく異なり [103]，赤と緑のどちらも十分なスペックル低減が必要となる．

1.4 先行研究の課題

このように，スペックルについてはこれまでに様々な研究が行われてきた．しかし，レーザーディスプレイにおけるスペックル低減に関してはまだ多くの課題が残っている．

大きな課題の一つとして，波長多重によるスペックル低減と角度多重によるスペックル低減の依存性が明らかにされていないことが挙げられる．レーザープロジェクターのスペックル低減に関するこれまでの研究では，波長多重と角度多重によるスペックル低減は独立に扱われており [26,51,66]，それぞれのスペックル低減効果

の相互依存性について理論的または実験的に調査した文献は見られなかった．一方で，それぞれが独立であることを示す理論や実験結果も示されておらず，詳細な研究が待たれるところであった．波長多重と角度多重は有用なスペックル低減手法であり，多くのレーザープロジェクターではこれらを組み合わせてスペックルを低減している．したがって，その依存性を明らかにすることは効果的にスペックルを低減するために重要である．

本研究では，スペックルによる画質の劣化を解決してレーザープロジェクターの開発を加速させるために，理論及び実験の両面からスペックル低減に関する研究を行った．

1.5 研究の目的

本研究の主たる目的は，様々なスクリーンにおいて角度多重と波長多重の相互依存性を考慮したスペックル低減効果を理論･実験両面から明らかにすることである．

前述した通り，スペックル低減についてはこれまでに様々な理論検討や実験の報告がなされているが，波長多重と角度多重によるスペックル低減の依存性については理論的にも実験的にも示されていなかった．そこで，本研究では波長多重及び角度多重によるスペックル低減の依存性を実験的に明らかにする．さらに，波長多重と角度多重によるスペックル低減の依存性を考慮した理論モデルの構築を行い，実験による検証を行う．

また，この結果をプロジェクターに適用した場合として，プロジェクターの光源に波長の異なる複数のレーザーを用いた実験や Xe ランプを用いた実験を行い，理論計算との比較を実施する．これにより，本研究で構築する理論モデルがプロジェクターに適用可能であることを示す．

他にも，これまで論じられていなかったマットスクリーンとシルバースクリーンでの偏光多重によるスペックル低減効果の違いや，画像の明るさがスペックルコントラストとスペックルの見え方に与える影響なども実験的な検証を行う．

1.6 論文構成と概要

本論文は全 6 章で構成される．Figure 1.11 に本論文の構成と各章のつながりを図式化する．

第 1 章では，本研究の背景とスペックルに関する基礎理論を述べる．まず，スペ

ックルの分類や発生原理，低減方法について述べた後に，単色スペックルの指標であるスペックルコントラストの測定方法と，測定系がスペックルコントラストの測定結果に与える影響について述べる．最後に，本研究の目的と論文構成について述べる．

第 2 章では，本研究で構築したスペックル測定系の構成について述べ，測定系のパラメータとスペックルコントラストの関係を評価する．また，人間の眼を模擬した測定系についても考察を行う．さらに，構築したスペックル測定系を用いて波長多重・角度多重・偏光多重それぞれのスペックル低減効果を測定した結果についても議論し，波長多重と角度多重によるスペックル低減が独立でないことを実験的に示す．

第 3 章では，波長多重と角度多重の依存性を考慮したスペックル低減の理論モデルについて述べる．波長多重のみの場合についてはこれまでに Goodman がシングルガウシアンスペクトルの場合の理論モデルを報告している [27]．そこで，まず従来のモデルをスペクトルが複数のガウシアンの和で表される場合に拡張した理論モデルの導出を行う．

次に，スクリーン散乱光に印加される位相のうち従来の理論モデルでは無視していた斜入射・斜出射による位相項を考慮し，McKechnie によって示されている波長・角度が異なる場合のスペックル場の相関関数 [43]を組み合わせることで，波長多重と角度多重両方を考慮した場合の理論モデルを導出する．導出した理論モデルを用いて，波長多重と角度多重によるスペックル低減効果の依存性を議論する．

第 4 章では，第 3 章で導出した理論モデルの妥当性を実験的に検証する．波長の異なる 2 つのレーザーを用いて波長多重及び角度多重によるスペックル低減効果を測定し，理論モデルと実験結果との比較，考察を行う．

第 5 章では，プロジェクターへ適用した場合として，プロジェクターに波長の異なるレーザーを 5 つ使用した場合について波長多重及び角度多重によるスペックル低減効果を検証する．さらに，Xe ランプを使用した場合についてもスペックル低減効果の検証を行い，第 3 章で導出した理論モデルがプロジェクターに適用可能であることを示す．また，レーザープロジェクターを用いたスペックルの官能評価，映画館におけるレーザープロジェクターのスペックル測定結果についても報告する．

第 6 章では，第 1 章から第 5 章までの研究成果を総括し，本研究で得られた結論を述べる．

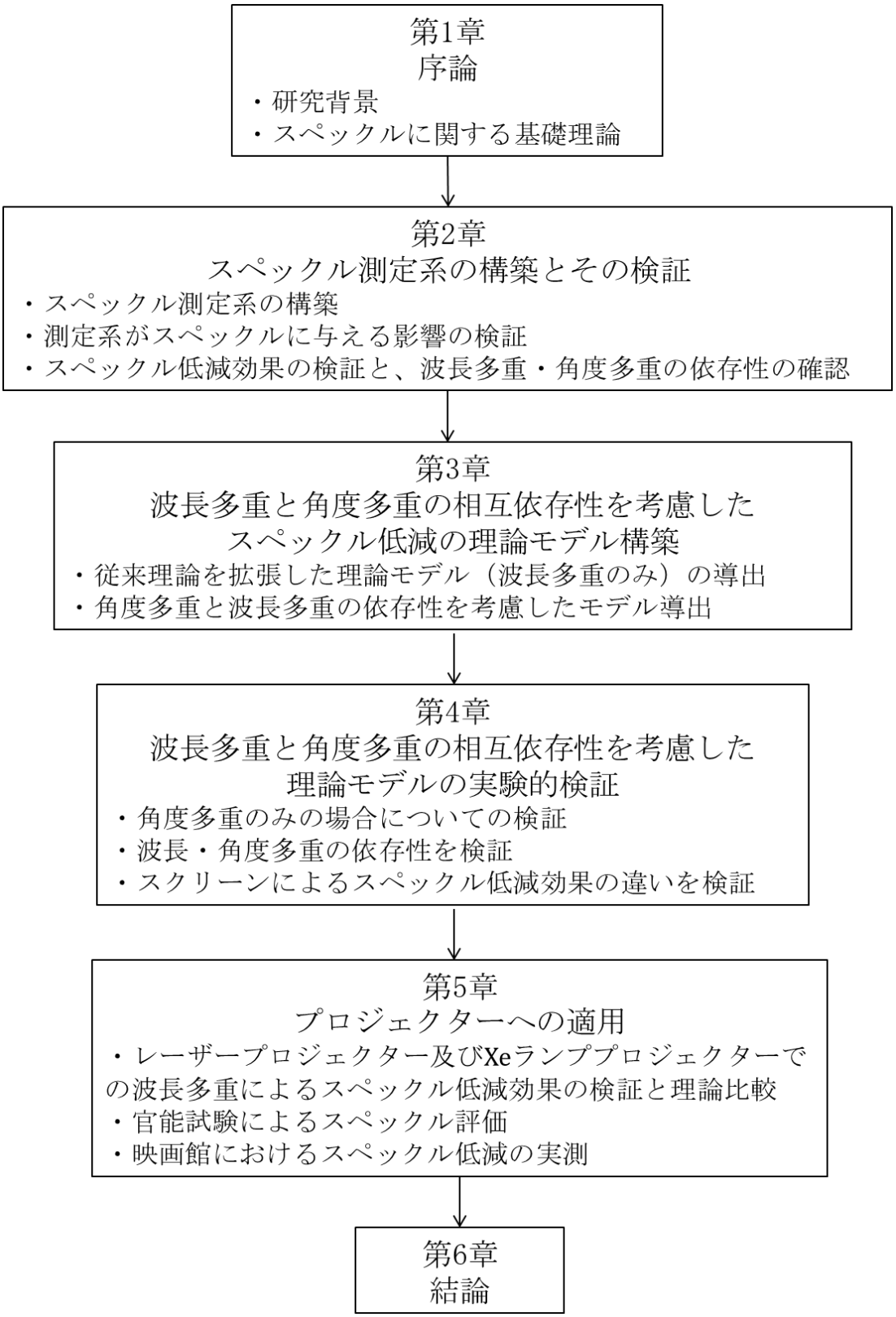


Figure 1.11 Organization of the dissertation.

第 2 章
スペックル測定系の構築とその検証

本章では，本研究においてスペックルを評価するために構築したスペックル測定系について記述する．また，測定系がスペックルコントラストに与える影響について検証した結果と，角度多重，波長多重，偏光多重によるスペックル低減効果の測定結果を報告する．最後に角度多重と波長多重によるスペックル低減効果の依存性を実験的に示す．

2.1 スペックル測定系

2.1.1 本研究で用いた測定系

Figure 2.1 に本研究で用いたスペックル測定系の模式図を示す．スペックルは単色の冷却 CCD カメラ（ビットラン株式会社，BS-44DUV）で撮影し，CCD カメラにはスクリーン像を CCD センサー上に結像するためレンズ（興和光学株式会社，LM50HC）とアパチャーを設置した．CCD カメラとレンズの仕様は Table 2.1 に示す．アパチャーサイズは，人間の目を模擬した系での測定を行う場合は直径 D=1.0 mm とし [104,105]，それ以外の場合は D=0.2 mm, 0.4 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 6.0 mm の中から選択した．スクリーン・カメラ間の距離 L や測定角度 θ_o は実験によって変更した．

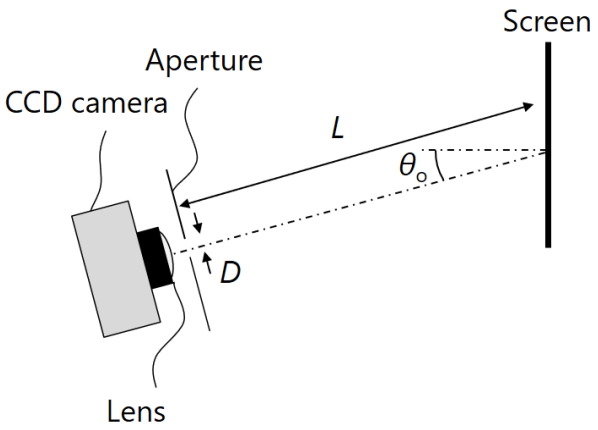


Figure 2.1 Schematic diagram of speckle measurement system used in this study.

Table 2.1 Specification of speckle measuring camera and lens.

Camera type	16 bit monochrome cooled CCD camera
Camera temperature	5℃
Pixel pitch	7.4 μm
Speckle measurement area	256×256 pixels
Lens focal length	50 mm
Lens focus	Screen

2.1.2 他のスペックル測定系

1.3 節で述べたように，各企業や団体によって異なるスペックル測定系が用いてられている．各社の違いは Schmidt によってまとめられているが [86]，ここでは代表的な測定系である Oxide 社の測定系 [53,88]と LIPA (Laser Illuminated Projector Association)の測定系 [106]について述べる．

それぞれの測定系の特徴を Table 2.2 に示す．両者とも CCD カメラを用いているが，大きく異なるのはレンズの焦点距離とアパチャーの直径である．いずれも人間の眼を模擬するためにこれらの値を採用しているが，Oxide の測定系は Kubota の提案 [104]に基づいているのに対し，LIPA の測定系は Roelandt らの提案 [89]に基づいており，レンズの焦点距離とアパチャーの直径がそれぞれ異なる値となっている．

本研究では，次項に述べる理由により人間の眼を模擬した測定系とする場合には Kubota の提案に基づいた測定系を用いたため，Oxide の測定系と類似の測定系を採用している．

Table 2.2 Comparison between speckle measuring system from Oxide and LIPA.

Item	Oxide [53,88]	LIPA [106]
Camera type	16 bit monochrome cooled CCD camera	8 bit monochrome CCD Camera
Camera temperature	0℃	-
Pixel pitch	6.45 μm	4.65 μm
Lens focal length	50 mm	16 mm
Camera aperture diameter	0.8~1.5 mm	3~4 mm

2.1.3 人間の眼を模擬したスペックル測定方法

スペックルコントラストはスペックル測定系のパラメータに大きく依存する．したがって，人間の知覚と一致するようにスペックルの測定を行うためには，人間の眼を模擬した測定系を使用しなければならない．特に，測定系のアパチャーサイズは測定結果に大きく依存するので注意深く選択する必要がある．人間の眼をシミュレーションするためのアパチャーサイズとしては複数の提案があり，2 つに大別できる [89,104,106,107].

一つは，Roelandt ら [89]及び LIPA [106]が提案する直径 3～4 mm のアパチャーを使用する方法で，もう一つが Kubota [104]が提案する直径 0.9~1.2 mm のアパチャーを使用する方法である．ここでそれぞれの提案をまとめる．

Roelandt らは，人間の眼をシミュレーションするために 3.2 mm のアパチャーを使うことを次の理由から推奨している．

- 映画館のスクリーン輝度(48 cd/m^2)では，人間の眼の瞳サイズはおよそ 3.2 mm である．
- 人間の眼の解像度は収差の影響を受けているが，収差によるスペックルへの影響は無視できる [97].

これら 2 つの根拠から，彼らは実際の人間の眼の瞳サイズと同じサイズのアパチャーを推奨している．

しかしながら，Roelandt らが引用している Kang らの収差とスペックルの関係に関する研究結果 [97]は，レーザープロジェクターに適用するのは不適切である．Roelandt らが引用しているように，Kang らは照明光が完全なコヒーレント光の場合には結像系の収差がスペックルに与える影響は無視できると報告しているが，レ

ーザープロジェクターの場合には照明光は部分コヒーレント光であることがほとんどである. したがって, Kang らの結果はレーザープロジェクターには適用できない. Kang らは空間的に部分コヒーレントな光を照明光として用いた場合は収差によってスペックルが大幅に低減されることも報告しており [98], レーザープロジェクターではこちらの結果を適用するのが妥当である.

一方で Kubota と Goodman は 2010 年に人間の眼を模擬するために直径 0.8 mm のアパチャーを使用することを提案していた [37,58]. この値は, 人間の眼とカメラの空間多重度 K を比較することで導出された.

人間の眼の空間多重度 K は, Goodman によると [27]

$$K \approx 4.7 \times 10^{-7} \left(\frac{D z_{\mathrm{e}}}{\lambda z_{\mathrm{p}}} \right)^2, \tag{2-1}$$

とかける. ここで, D はプロジェクターのアパチャーの直径, z_{e} はスクリーンと眼の距離, z_{p} はプロジェクターとスクリーンの距離である. 式(2-1)は実験的に得られた人間の眼の LSF (Line spread function)をもとに算出したものであり [108], 人間の眼の収差を考慮した値となっている.

一方で, カメラの空間多重度 K は

$$K \approx \left(\frac{D z_{\mathrm{e}}}{D_{\mathrm{e}} z_{\mathrm{p}}} \right)^2, \tag{2-2}$$

とかける. ここで, D_{e} はカメラのアパチャーの直径である. この 2 つの空間多重度を等しいと置くと, 緑色の光に対して D=0.8 mm が得られる.

式(2-1)及び(2-2)で表される人間の眼とカメラの空間多重度 K はいずれも近似値であるため, Kubota はより精密な計算を行うことで, 2014 年に人間の眼を模擬するためのアパチャーサイズとして D=0.9~1.2 mm を再提案した [104]. より正確な空間多重度 K の表式は, Goodman によって下記の通り与えられている [27].

$$K = \left(\frac{1}{A_{\mathrm{c}}^2} \iint \mathrm{d}\Delta x \mathrm{d}\Delta y P_{\mathrm{e}}(\Delta x, \Delta y) \left| \mu_{\mathrm{p}}(\Delta x, \Delta y) \right|^2 \right)^{-1}. \tag{2-3}$$

ここで, μ_{p} は投影レンズからスクリーンに到達した光の振幅の規格化相関関数で, P_{e} はスクリーン上での眼の点像分布関数の自己相関関数, A_{e} は点像分布関数の面積である.

複数の眼のモデルについて, 瞳サイズが 3 mm のときの点像分布関数から求めた

空間多重度 K と収差の無視できる円形アパチャーを備えたカメラでの空間多重度 K を比較することで，最適なアパチャーサイズが D=0.9~1.2 mm であると結論づけた．

以上によれば，部分コヒーレント光を使用するレーザープロジェクターにおいては，人間の眼の収差を考慮していない Roelandt らの提案は適切ではないと考えられる．一方で，Kubota は収差のある眼のモデルを使用して，角度多重によるスペックル低減の比較を行っている．したがって，0.9~1.2 mm のアパチャーを使用するという Kubota の提案がより人間の眼を模擬するのに適している．

2.1.4 使用したスクリーンの特性

スペックル低減効果はスクリーンの種類にも大きく依存する．本研究では複数のスクリーンを用いてスペックルの測定を行った．使用したスクリーンの一覧を Table 2.3 に示す．

Table 2.3 List of screens.

Screen	Manufacturer	Type	Gain	Surface roughness (μm)
Finesilver240	Kikuchi Science Laboratory Inc.	Silver	2.4	2.1
Spectral240	Harkness Screens Ltd.	Silver	2.4	2.3
Solution240	Screen solution	Silver	2.4	-
Perlux220	Harkness Screens Ltd.	Pearl	2.2	3.5
Perlux180	Harkness Screens Ltd.	Pearl	1.8	-
Perlux140	Harkness Screens Ltd.	Pearl	1.4	-
MattPlus	Harkness Screens Ltd.	Matte	1.0	1.8

Table 2.3 に記載のスクリーンのうち，Finesilver240，Spectral240，Perlux220，MattPlus について，レーザー顕微鏡（VK-8700，株式会社キーエンス）を用いてスクリーンの表面粗さと表面高さ分布の確率密度関数の測定を行った．測定ピッチは 280 nm，測定エリアは 200 μm × 270 μm である．二乗平均表面粗さはそれぞれ Finesilver240 が 2.1 μm，Spectral240 が 2.3 μm，Perlux220 が 3.5 μm，MattPlus が 1.8 μm であった．また，それぞれの表面高さ分布の確率密度関数を Figure 2.2 に示す．同じシルバースクリーンである Finesilver240 と Spectral240 は確率密度関数も

類似しており，スペックルに対する影響も同程度となると考えられる．MattPlus もシルバースクリーンと類似した確率密度分布となっているが，スクリーンの種類が異なるためスペックルに対する影響は異なる．

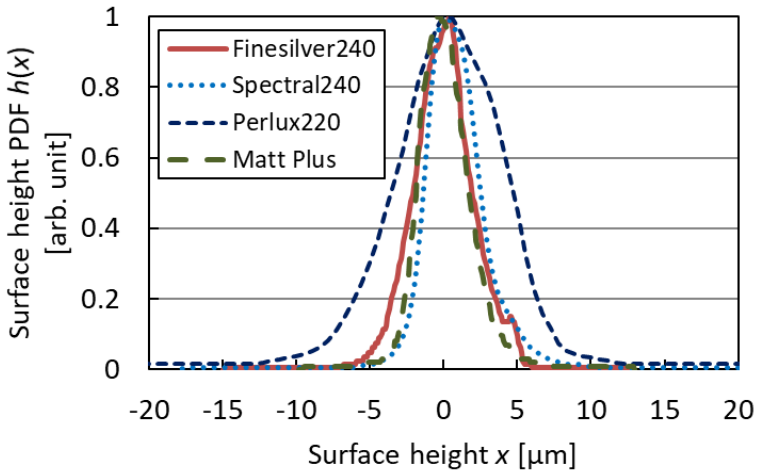


Figure 2.2 Probability distribution function (PDF) of surface height of screens. Adapted partly from ref. [109].

次に，シルバースクリーンの偏光消光比について，角度依存性の確認を行った．シルバースクリーンは偏光方式の 3D 映像に使われるスクリーンで，偏光を保持する性質を持っているが，偏光保持の程度を示す消光比には角度依存性がある．そのため，本研究で使用したシルバースクリーンのうち，Finesilver240 の偏光消光比の角度依存性を実験により確認した．Figure 2.3 に Finesilver240 の測定結果を示す．測定角度が 5°の場合には消光比がおよそ 180 程度で偏光をよく保存するが，測定角度が大きくなると消光比は徐々に小さくなっていき，測定角度 45°の場合には消光比が 20 程度まで低下した．

消光比が大きい場合には，入射光の偏光状態を保存して散乱するため偏光多重によるスペックル低減はほぼ生じないが，消光比が小さいと入射光が直線偏光であっても散乱光に複数の偏光成分が混ざり，偏光多重によるスペックル低減が生じる可能性がある．一つの偏光成分の光量を I_1，もう一方の偏光成分の光量を I_2 としたとき，偏光多重によるスペックル低減によるスペックルコントラストの下限は $\sqrt{I_1^2+I_2^2}/(\mathrm{I}_1+I_2)$とかけるため，消光比が 20 の場合のスペックルコントラストの下限は 0.95 程度となる．したがって，45°の角度から測定した場合でも偏光多重による

スペックル低減は最大で 5%程度であり，偏光多重によるスペックル低減効果は大きくない．

また，Spectral240 についてカタログ [110]に記載されているデータを元に作成したグラフを Figure 2.4 に示した．Spectral240 も Finesilver240 と同様の傾向を示しており，いずれのスクリーンでも偏光多重によるスペックル低減効果は大きくないことがわかった．

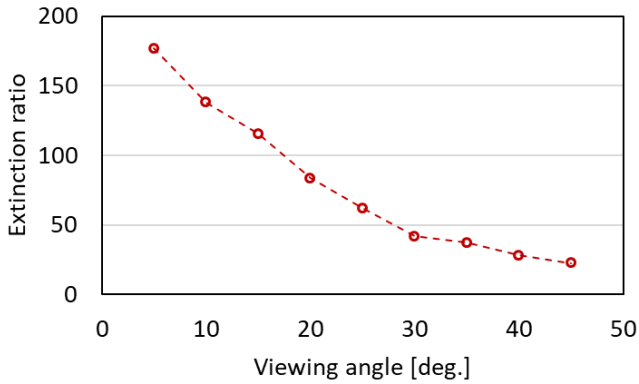


Figure 2.3 Viewing angle dependence of extinction ratio of Finesilver240.

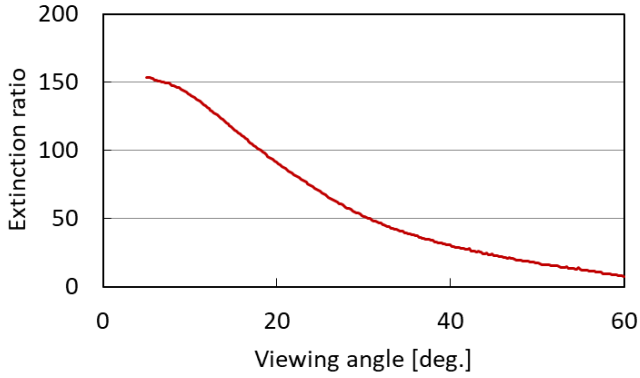


Figure 2.4 Viewing angle dependence of extinction ratio of Spectral240. The data is taken from the Harkness screens catalog [110].

2.2 測定系がスペックルに与える影響の検証

次に，2.1.1 項で示した測定系を用いて，カメラの f-number，測定距離，焦点位置，画像の輝度がスペックル測定に与える影響を検証した．

2.2.1 カメラの f-number の影響

まず，カメラの f-number f_{n} がスペックルに与える影響についての測定を行った．カメラの f-number はスペックルサイズとスペックルコントラストに影響することが知られている [27,89]．F-number はカメラレンズの焦点距離とアパチャーサイズの比で決まるが，測定では焦点距離を f=50 mm で一定とし，アパチャーサイズを変えることで f-number を変化させた．

まず，CCD カメラ上でのスペックルサイズについて測定を行った．Goodman([27] Section 5.1)によると，CCD センサー上でのスペックル強度の規格化共分散関数は次のようにかける．

$$C_I(r) = \left| 2\frac{J_1\left(\frac{\pi D r}{\lambda z_{\mathrm{i}}}\right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z_{\mathrm{i}}}} \right|^2 . \qquad (2-4)$$

ここで，J_1 は第一種ベッセル関数，D はカメラアパチャーの直径，λ は波長，z_{i} はカメラレンズから CCD センサーまでの距離である．$C_I(r_{\mathrm{s}})$=0.5 となる r_{s} をスペックルサイズと定義すると，スペックルサイズは次のようにかける．

$$r_{\mathrm{s}} = 0.51\frac{\lambda z_{\mathrm{i}}}{D} = 0.51\lambda f_{\mathrm{n}}. \qquad (2-5)$$

Figure 2.5 にスペックルサイズ測定実験系の概略図を示す．レーザー光源から出射した光を光ファイバー（Numerical aperture NA0.39, コア直径 400 μm）に入射し，光ファイバーの出射光を六角ロッドインテグレータ（辺の長さ 2 mm, 長さ 50 mm, CB18769，Fiberguide Industries, Inc.）で均一化した．ロッドインテグレータの端面像はコリメートレンズ（焦点距離 7.9 mm）と集光レンズ（焦点距離 750 mm）でスクリーンに投影した．スクリーンはマットスクリーン(MattPlus)とシルバースクリーン(Finesilver240)を用いた．波長は λ=532 nm，カメラのレンズとセンサーまでの距離は z_{i}=50 mm，スクリーン・カメラ間距離は 700 mm，測定角は θ_{o}=17°とした．カメラのレンズ前には直径が D=0.2~6.0 mm のアパチャーを設置した．

得られたスペックル画像は強度の勾配を補正した後に平均と標準偏差を計算し，それらの比を取ることでスペックルコントラストを算出した．スペックルコントラストの計算範囲は 256×256 ピクセルとした．六角ロッドインテグレータの端面像をスクリーンに投影する倍率は 100 倍程度で，スクリーン上での六角形イメージの 1

辺の長さはおよそ 200 mm であった．スクリーンとカメラの距離が 700 mm のときのスクリーン上での撮影領域はおよそ 26 mm × 26 mm であるため，撮影領域が投影画像よりも十分小さい構成となっている．なお，スペックルの測定位置は画像の中央とした．

レーザー光源には外部共振器型垂直面発光レーザーの共振器内部に波長変換素子を備えた NECSEL (Necsel Extended Cavity Surface Emitting Laser)レーザー [13,14]を用いた．NECSEL レーザーは基本波が半導体レーザーであるため 521 nm~555 nm という広い波長範囲から特定の波長を選択することができ，多波長化によるスペックル低減効果の検証に適している．1 つの NECSEL レーザーからは合計 48 本の緑色光ビームが出射され，48 本のビーム全体の波長幅は半値全幅で 0.1～0.2 nm 程度である．

NECSEL レーザーの構成の詳細は付録 A に記載した．

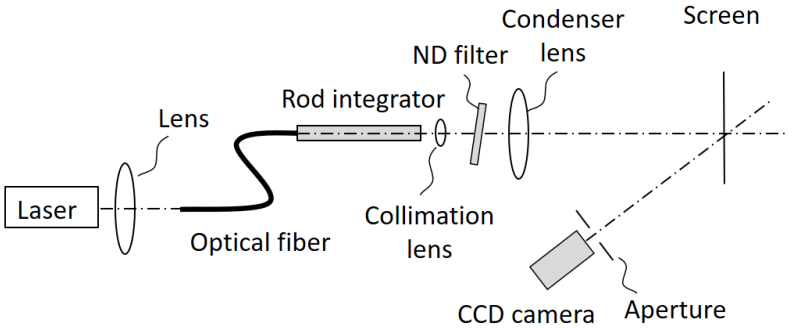


Figure 2.5 Schematic diagram of speckle measurement system.

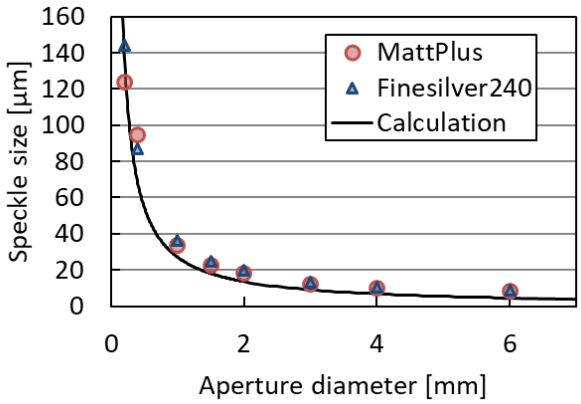


Figure 2.6 Speckle size on CCD sensor. Circle and triangle points show the measured results. Solid lines shows the calculated results from Eq. (2-5). Adapted from ref. [111].

Figure 2.6 に，カメラのアパチャーサイズを D=0.2~6.0 mm (f_{n}=8.3~250)まで変化させた場合のスペックルサイズの計算値と実測値を示す．式(2-5)で示した通り，アパチャーサイズが大きくなるほどスペックルサイズが小さくなった．また，シルバースクリーンとマットスクリーンではスペックルのサイズに差は見られず，スペックルサイズはスクリーンには依存しないことがわかった．

スペックルサイズが CCD センサーのピクセルサイズより小さい場合，スペックルパターンが空間的に平均化され，スペックルコントラストの測定値が小さくなることが Roelandt らによって報告されている [89]．空間平均によるスペックルコントラストの変化は$\sqrt{A_{\mathrm{p}}/A_{\mathrm{c}}}$に依存する．ここで，$A_{\mathrm{p}}$ はカメラピクセルの面積，A_{c} は下記で表されるスペックルサイズである．

$$A_{\mathrm{c}} = \frac{4\lambda^2 z_{\mathrm{i}}^2}{\pi D^2}. \tag{2-6}$$

Figure 2.5 の実験系では，ピクセルサイズ 7.4 μm x 7.4 μm であるので A_{p}=54.76 μm^2，A_{c} はスペックルサイズが最も小さくなる D=6.0 mm の場合について計算すると A_{c}=25.02 μm^2 であるので，$\sqrt{A_{\mathrm{p}}/A_{\mathrm{c}}} = 1.5$となる．Roelandt らによれば，$\sqrt{A_{\mathrm{p}}/A_{\mathrm{c}}} = 1.5$のときは，空間平均化によりスペックルコントラストが 1 割程度低下するため，わずかにスペックルコントラストに影響を与えることがわかった．$D \leq 2.0$ mmの場合には$\sqrt{A_{\mathrm{p}}/A_{\mathrm{c}}} \leq 0.5$となり，スペックルの空間平均化はほぼ無視できる．

次に，カメラのアパチャーサイズを変えたときのスペックルコントラストについて Figure 2.5 の実験系を用いて測定を行った．Figure 2.7 にスペックルコントラストの測定結果を示す．カメラのアパチャーサイズを小さくすると，スペックルコントラストが小さくなった．これは，アパチャーサイズが小さいほど角度多重度が大きくなったためである．Furukawa ら [46]や Geri ら [91]，Janssens [90]によれば，f-number が小さくなるとスペックルの空間平均によってスペックルコントラストが低下することが報告されている．一方で，Roelandt ら [89]や Schmidt [86]によれば，f-number を一定値以上に増加させると角度多重の効果によりスペックルが低下することが示されている．本研究での測定範囲では，スペックルパターンの空間平均効果は大きくないため，アパチャーサイズを小さくする，つまり f-number を大きくするとスペックルコントラストは単調に減少する結果となった．

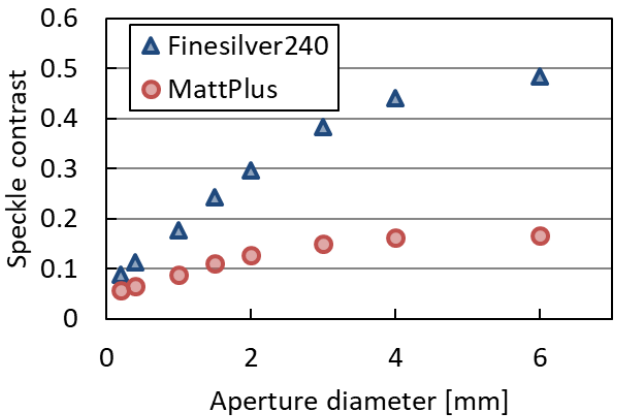


Figure 2.7 Speckle contrast versus camera aperture size. Camera-to-screen distance is 700 mm.

2.2.2 測定距離の影響

次に，同じ実験系を用いてスクリーン・カメラ間距離を変化させた場合についてスペックルコントラストの測定を行った．カメラのアパチャーサイズは D=1.0 mm とした．Figure 2.8 にスペックルコントラストの測定結果を示す．マットスクリーン，シルバースクリーンともにスクリーン・カメラ間距離が小さくなるほどスペックルコントラストが大きくなることが確認できた．これは，アパチャーサイズを変えたときと同様にスクリーン・カメラ間距離を変化させると角度多重によるスペックル低減が変化するためである．

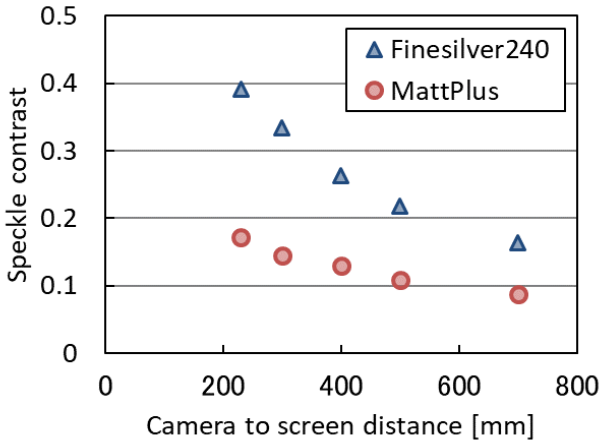


Figure 2.8 Speckle contrast versus camera-to-screen distance. Camera aperture size is 1.0 mm.

2.2.3 焦点位置の影響

次に，カメラの焦点位置がスペックルコントラストへ与える影響を調べるため，焦点位置をスクリーン上からずらしてスペックルコントラストの測定を実施した．Figure 2.5 に示した実験系を用い，カメラのアパチャーサイズは D=1.0 mm，スクリーン・カメラ間距離は 700 mm とした．カメラの焦点位置は 250 mm～無限遠まで変化させ，スペックルコントラストの測定を行った．

Figure 2.9 に様々な焦点位置でのスペックルコントラストの測定値を示す．スペックルコントラストはスクリーン上に焦点を合わせたときが最大で，焦点がスクリーンからずれるほどコントラストが小さくなり，Roelandt ら [89]によって報告されている結果と同様の結果が得られた．これは，焦点位置がずれることによってレンズの点像分布関数のスクリーン上でのサイズが大きくなり，スクリーンの広い範囲からの光がセンサー上の一点で重なり合うことにより角度多重度が増加したためであると考えられる．人間がスペックルを観測する場合にはスクリーンに焦点を合わせるため，カメラで測定する際にも焦点位置をスクリーンに合わせることが重要である．

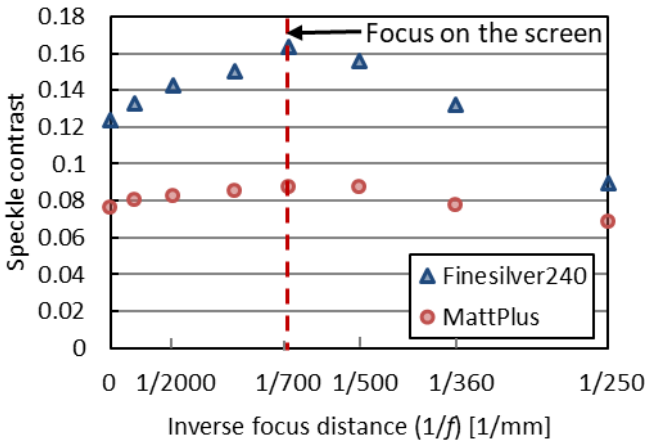


Figure 2.9 Speckle contrast versus focus position. Camera-to-screen distance is 700 mm. Camera aperture size is 1.0 mm.

2.2.4 画像の輝度がスペックルに与える影響

次に，画像の輝度がスペックルコントラストに与える影響を測定した．Figure 2.5 の実験系で，ND (Neutral Density)フィルターを使用しない場合，OD (Optical Density)0.3（透過率 50%）の ND フィルターを使用する場合，OD0.7（透過率 20%）の ND フィルターを使用する場合の 3 通りについてスペックルコントラストの測定を行った．輝度を変えた際に CCD センサーのカウントがおよそ同程度になるよう，ND フィルターの種類に応じて露光時間を調整した．なお，スペックルの測定時間はスペックルコントラストに影響しないことが Suzuki らによって報告されている [95].

測定したスペックルコントラストを Figure 2.10 に示す．マットスクリーン，シルバースクリーンのいずれにおいても，輝度が変化してもスペックルコントラストは変化しなかった．したがって，スペックルをカメラで測定する場合には画像の輝度はスペックルコントラストには影響しないことがわかった．

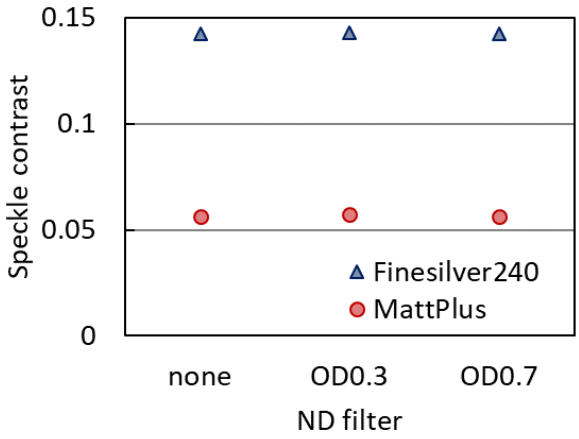


Figure 2.10 Speckle contrast with various ND filters. Adapted from ref. [111].

2.3 Non-speckle noise がスペックル測定に与える影響

スペックルコントラストをカメラで測定する場合，コントラストの測定値はスペックル以外のノイズ(non-speckle noise)の影響を受ける．撮影した画像の光強度の分散は speckle noise と non-speckle noise の分散の和となるため，コントラストの測定値は次のようにかくことができる．

$$C_{\mathrm{total}} = \left(C_{\mathrm{speckle}}^2 + C_{\mathrm{non-speckle}}^2\right)^{0.5}. \qquad (2-7)$$

ここで，C_{speckle} は speckle noise によるコントラスト，$C_{\text{non-speckle}}$ は non-speckle noise によるコントラストである．Non-speckle noise の原因としては，検出される光子数の統計的変動に起因するショットノイズや熱雑音に起因する暗電流ノイズなどのカメラノイズや，スクリーンのパターンなどが考えられる [59,106].

$C_{\text{non-speckle}}$ の測定を行うため，Xe ランププロジェクターを用いて均一な緑色の画像を形成し，画像幅 W を変化させてスペックコントラストの測定を行った．Xe ランププロジェクターからの光はレーザー光に比べるとコヒーレンスが低いが，完全なインコヒーレント光ではないためスペックルパターンを形成する．このとき，画像サイズを変えると角度多重度が変化するためにスペックルコントラストも変化した．Speckle noise によるコントラストは画像サイズにおよそ比例するが，non-speckle noise によるコントラストは画像サイズが変化してもほぼ変化しないため，Xe ランプのコントラストは次のように近似できる．

$$C_{\text{Xe}} = \left(C_{\text{non-speckle}}^2 + C_W W^2\right)^{0.5}, \qquad (2-8)$$

ここで，C_W は定数である．

Figure 2.11 は Xe ランプのスペックルコントラスト測定値と，式(2-8)で C_W をフィッティングパラメータとした場合の近似曲線を示す．測定結果から，$C_{\text{non-speckle}}$ の値は MattPlus で 0.013，Finesilver240 で 0.058 であった．

前述したとおり，non-speckle noise はカメラのノイズとスクリーンのパターンによるノイズが含まれる．CCD カメラによるノイズは，主にショットノイズ，読み取りノイズ，暗電流ノイズの和となる．本研究での測定条件では，暗電流ノイズと読み取りノイズはショットノイズに比べて小さいため，ショットノイズが主なカメラノイズである．実験での CCD センサーのカウントはおよそ 8000~10000 カウント程度であり，本研究で使用した CCD カメラでは CCD センサーの 1 カウントが電子 1.6 個分に相当するため，CCD カウントが 8000~10000 であれば電子 13000~16000 個程度に相当する．ショットノイズは電子数の平方根で与えられるので，この場合にはショットノイズによるコントラストはおよそ 0.008~0.009 であったと考えられる．

Finesilver240 においては non-speckle contrast はおよそ 0.06 であったため，主な non-speckle noise はショットノイズではなくスクリーンのパターンによるノイズであると考えられる．一方で，MattPlus では non-speckle contrast はおよそ 0.01 であったためショットノイズの寄与が大きい．

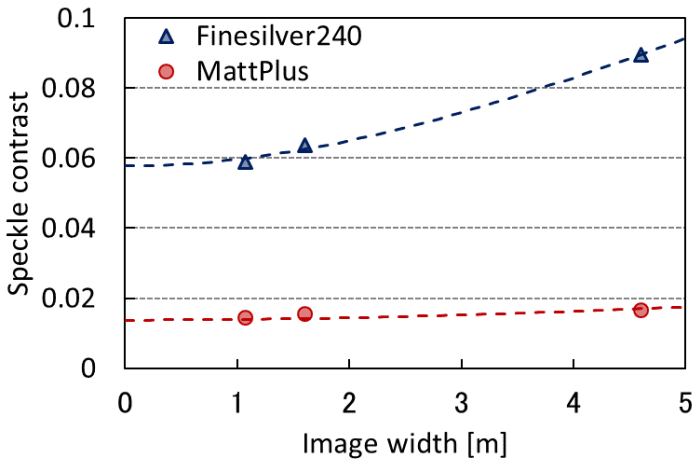


Figure 2.11 Speckle contrast of Xe lamp with various image sizes.

2.4 偏光多重・角度多重・波長多重によるスペックル低減効果の検証

次に，偏光多重・角度多重・波長多重それぞれによるスペックル低減効果を 2.1.1 項で示した測定系を用いて測定した．

2.4.1 偏光多重によるスペックル低減

まず，偏光多重によるスペックル低減について測定を行った．偏光多重にはスクリーン照射光に無偏光の光を用いることによる偏光多重と，スクリーンでの偏光解消による偏光多重の 2 種類があり，それぞれの効果について検証を行った．

実験系を Figure 2.12 に示す．Figure 2.5 に示した実験系に波長板や偏光子などを追加した．光ファイバーの長さは 30 m とし，レーザー光の偏光を光ファイバーによって解消した．光ファイバー出射光をロッドインテグレータで均一化した後，偏光子や波長板などの偏光光学素子を通してスクリーンに投影した．スクリーンは散乱光の偏光を保存しないマットスクリーン(MattPlus)と，偏光を保存するシルバースクリーン(Finesilver240)を用いた．スクリーンと CCD カメラの距離は 700 mm とし，CCD カメラには焦点距離 50 mm のレンズと直径 D=1.0 mm の円形アパチャーを設置した．

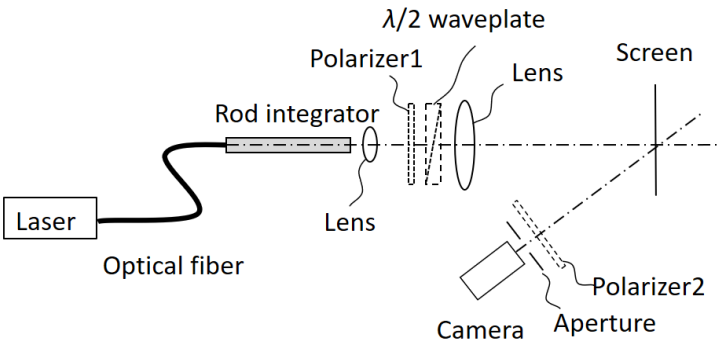


Figure 2.12 Experimental setup to measure speckle reduction by polarization diversity.

入射光の偏光状態によるスペックルへの影響を測定する場合には，Figure 2.12 に示した偏光子 2 は用いず，偏光子 1 の有無及び波長板を静止させた場合と回転させた場合の組み合わせについてスペックルを測定し，比較を行った．

偏光子 1 の有無と，波長板回転の有無を組み合わせた際のスペックルコントラスト測定結果を Figure 2.13 に示す．マットスクリーンにおいては，偏光多重がない場合（ファイバーによって偏光解消された光を偏光子で再び直線偏光に変え，かつ波長板を静止させた場合）はスペックルコントラストが 0.1 程度であった．偏光多重を導入した場合はスペックルコントラストが 0.082~0.085 程度まで低下し，スペックルコントラストの低下量は偏光多重の方法によらずほぼ同程度であった.つまり，マットスクリーンでは照射光の偏光を時間的に変化させるか，ファイバーなどを用いて照射光の偏光度を低くすることでスペックルを低減することが可能であることがわかった．一方で，シルバースクリーンにおいては偏光多重の有無によらずスペックルコントラストはほぼ一定であった．つまり，偏光を保存するシルバースクリーンにおいては偏光多重によるスペックル低減の効果がないことがわかった．

異なる偏光同士は独立で干渉しないにもかかわらず，シルバースクリーンでは偏光多重によるスペックル低減効果がない理由は，次のように推察される．独立な二つの偏光がシルバースクリーンで散乱された場合，それぞれの偏光成分は互いに独立で干渉しない．しかし，それぞれの偏光成分について，スクリーンの同じ位置で散乱された光についてはスクリーンの凹凸パターンによって同じ位相分布が印加される．スペックルパターンはスクリーンで印加される位相分布によって決定されるため，結果として二つの偏光成分は同一のスペックルパターンを形成する．したがって，同一のスペックルパターンの重ね合わせとなりスペックルが低減しなかったと考えられる．

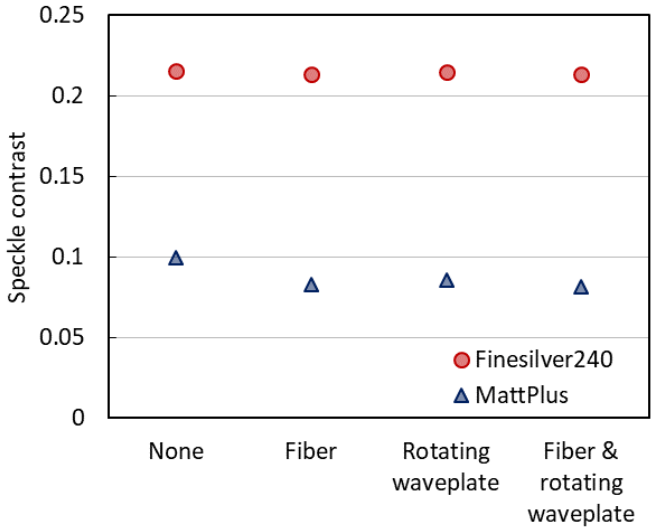


Figure 2.13 Speckle reduction by polarization diversity. Adapted from ref. [112].

次に，マットスクリーンに関してスクリーンでの偏光解消によるスペックル低減効果について検証を行うため，Figure 2.12 の実験系で波長板は用いず，偏光子 1 及び 2 の有無の組み合わせについてスペックルを測定し，比較を行った．なお，シルバースクリーンでは偏光が保持されるため，偏光子の位置をスクリーンの前後で交換しても結果には影響を与えない．そのため，本実験はマットスクリーンのみで行った．

偏光子 1 と 2 の両方を使用した場合，偏光子 1 のみ使用した場合，偏光子を使用しなかった場合についてそれぞれスペックルを測定した結果を Figure 2.14 に示す．偏光子 1 と 2 を両方使用した場合と，偏光子 1 のみ使用した場合を比較すると，偏光子 1 によってスクリーン入射光を直線偏光とした場合には，偏光子 2 の有無によってスペックルコントラストが変化していることがわかった．つまり，スクリーンでの偏光解消によるスペックル低減が生じた．また，偏光子 2 を使用せずスクリーンでの偏光解消によってスペックルが低減している場合についても，偏光子 1 の有無によってスペックルコントラストが変化した．したがって，マットスクリーンでは入射光の偏光状態によるスペックル低減とスクリーンでの偏光解消の両方によってスペックルが低減することがわかった．

偏光多重によるスペックル低減の理論上の最大値は入射光の偏光状態によるスペックル低減が 0.71 倍，スクリーンでの偏光解消によるスペックル低減が 0.71 倍で，合計 0.5 倍であるが [27]，本研究の測定結果では Figure 2.14 より入射光の偏光状態

によるスペックル低減が 0.75 倍程度，スクリーンでの偏光解消によるスペックル低減が 0.75 倍程度であり，合計でスペックル低減は 0.57 倍程度であった．入射光が完全には無偏光になっていない，スクリーンでの偏光解消が完全ではない，スペックル以外のノイズを含んだ測定となっているなどの理由によって理論限界値に達しなかったと考えられる．

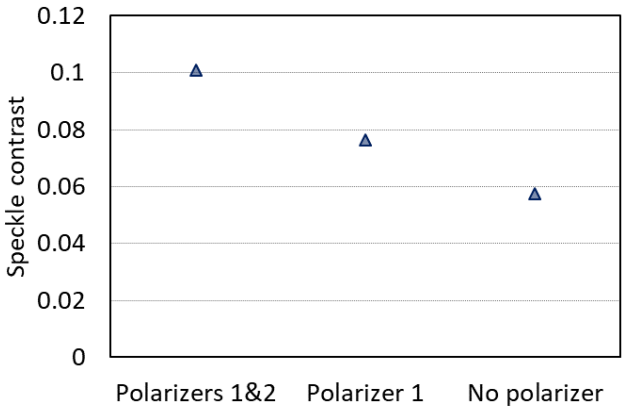


Figure 2.14 Speckle contrast measured on the matte screen with various polarization diversity. Adapted from ref. [112].

2.4.2 角度多重によるスペックル低減

次に，角度多重によるスペックル低減効果を測定した．1.2.2 項で記した通り，K を空間多重度，M を時間多重度とすると，角度多重によるスペックルコントラストは次のように表される．

$$C = \left(\frac{K + M \pm 1}{KM}\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (2-9)$$

それぞれの多重度がスペックルコントラストに与える影響を検証するため，まず時間多重度 M を変化させてスペックルコントラストの測定を行った．

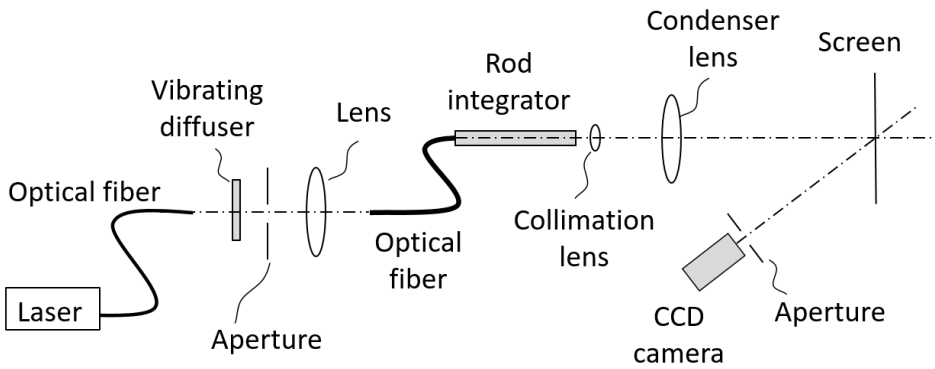


Figure 2.15 Experimental setup to measure speckle reduction by angular diversity.

Figure 2.15 に実験系を示す．Figure 2.5 に示した実験系に加え，時間多重度 M を変化させるために振動拡散板(LSR-3010-6D-VIS, Optotune Switzerland AG)を追加した．光源には 2.2 節と同様 NECSEL レーザーを用いた．レーザー光源から射出された光をファイバー（NA 0.22，コア直径 400 μm，長さ 1 m，Fiberguide Industries, Inc.）に入射し，ファイバーからの出射光を振動拡散板で散乱した．その後，2 つ目のファイバー（NA 0.39，コア直径 1.5 mm，長さ 2 m，M93L02，Thorlabs, Inc.）に入射した後に六角ロッドインテグレータで均一化し，スクリーンに投影した．レーザーから出射された光は直線偏光だが，光ファイバーを伝播する際に偏光が解消するため，スクリーンに入射する光は直線偏光ではなく，無偏光に近い状態となっている．スクリーンと CCD カメラの距離は 700 mm とし，CCD カメラには焦点距離 50 mm のレンズと直径 D=1.0 mm の円形アパチャーを設置した．スペックルの測定位置は画像の中央とした．

時間多重度はレーザーの駆動電流値及び拡散板の振動の ON/OFF によって変化させた．振動拡散板の振動 ON/OFF それぞれについて NECSEL レーザーの電流値を 12 A から 20 A まで変化させ，シルバースクリーン(Finesilver240)とマットスクリーン(MattPlus)でスペックルコントラストを測定した結果を Figure 2.16 に示す．電流値を変化させると Figure 2.16 に示したようにスクリーン照度も変化するため，CCD カメラのカウント数が同程度となるよう照度に応じて露光時間を変化させた．

マットスクリーンにおいて電流値を増加させると，振動 OFF の場合にはスペックルコントラストが減少したが振動 ON の場合にはスペックルコントラストにほとんど変化がなかった．また，電流値が大きくなるほど振動 ON と OFF のスペックルコントラストの差は小さくなった．シルバースクリーンにおいては，振動 ON の場合

もOFFの場合も電流値を変化させた際のスペックルコントラストの変化はほとんど見られなかった．

マットスクリーンにおいて振動OFFの状態で電流値を増加させるとスペックルが低減したのは，レーザーの発振モードが変化したためと考えられる．NECSEL レーザーは低電流領域では各エミッタは横モードがシングルモードで発振するが，電流値が増加するとマルチモードとなり独立な光源数が増加する．そのため，電流値の増加とともに時間多重度 M が増加してスペックルコントラストが低下したと考えられる．

一方で振動拡散板の振動を ON にした場合には，振動拡散板によってレーザー光の位相が時間的に変化するため，時間積分することで実質的に独立な光源数が増加したときと同様の効果が生じる．そのため，電流値が低くレーザーの発振モード数が少ない場合でも時間多重度 M が十分大きくなり，高いスペックル低減効果が得られたと考えられる．

なお，レーザーの駆動電流とスペックルコントラストについては，Tran らが端面発光型半導体レーザーを用いた場合に電流値を上昇させるとスペクトル幅が増加するためにスペックルコントラストが低下するという報告をしている [51]．端面発光型半導体レーザーの場合には電流値を変化させると発振モードとともにスペクトル幅も変化するため，スペックルコントラストの変化にはスペクトル幅の影響が無視できない．一方，NECSEL レーザーは付録 A に示したように発振波長が波長選択素子 VBG (Volume Bragg Grating)で決定され，スペクトル幅も電流値にほとんど依存しない．したがって，スペックルコントラストの変化はスペクトル幅ではなく発振モード数に起因していると考えられる．

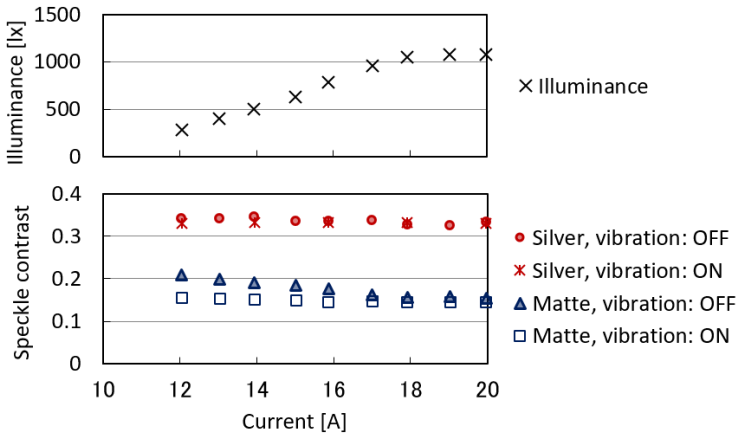


Figure 2.16 Illuminance and speckle contrast with various driving current.

次に，拡散板の振動を ON にして時間多重度 M が十分大きい状態において，空間多重度 K がスペックルコントラストに与える影響を測定した．空間多重度 K は，スクリーンの一点に入射する入射光の立体角 Ω_{p} と，スクリーンの一点からカメラのアパチャーを見込む立体角 Ω_{d} の比に依存する [26,27]．したがって，Ω_{p} か Ω_{d} のいずれかを変化させることで空間多重度を変化させることができる．本実験では，Figure 2.15 において Ω_{p} と Ω_{d} のそれぞれを次の方法で変化させてスペックル低減効果の測定を行った．スクリーンはシルバースクリーンを用いた．

- Ω_{d} を変化させる場合：レーザー光の投射条件を一定にし，スクリーン・カメラ間距離 L を 240~700 mm，カメラのアパチャーサイズ D を 0.2~2.0 mm の範囲で変化させた．Ω_{d} は $(D/L)^2$ に比例して変化する．
- Ω_{p} を変化させる場合：コリメートレンズの焦点距離を f=4.3 mm, 7.9 mm, 18 mm のいずれかから選び，ロッドインテグレータのスクリーンへの投影倍率 m を変えることで投射光の角度分布を変化させた．Ω_{p} は m^2 におよそ反比例して変化する．

コリメートレンズの焦点距離を変えた場合，六角ロッド端面像の投影倍率 m はそれぞれ 170 倍(f=4.3 mm)，100 倍(f=7.9 mm)及び 40 倍(f=18 mm)となった．投影倍率が変わると像の明るさも変化するため，得られる CCD センサーのシグナルが同程度の大きさとなるよう明るさによって露光時間を変化させた．

Figure 2.17 にスペックルコントラストの測定結果を示す．●は L=700 mm, D=1 mm で固定して Ω_{p} を変化させた結果で，□は投影倍率を m=100 で固定して Ω_{d} を変化させた結果である．両者の結果を比較すると，理論で示されている通りスペックルコントラストが Ω_{d} と Ω_{p} の比に応じて変化することがわかった．

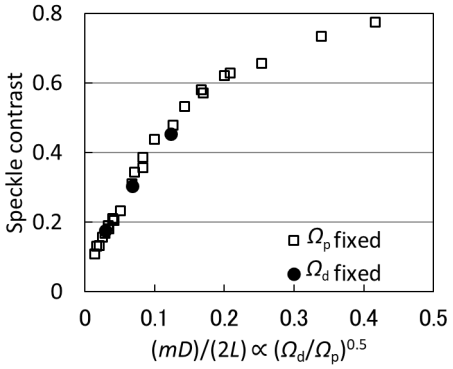


Figure 2.17 Speckle contrast with various angular diversity. (●)Ω_{d} is fixed and Ω_{p} is changed, (□) Ω_{p} is fixed and Ω_{d} is changed. Adapted with modification from ref. [112].

2.4.3 Xe ランプを用いた場合の波長多重によるスペックル低減

次に，波長多重によるスペックル低減に関する実験を行った．波長多重の方法としては，連続スペクトルの波長幅を変化させる方法と，離散的に波長数を増やす多波長化の二通りの方法がある．まず，可視域で非常に広いスペクトル幅を持つ Xe ランプ光源とバンドパスフィルターを用いることでスペクトル幅を変化させた連続スペクトル光での波長多重の効果の測定を行った．

Figure 2.18 に波長多重によるスペックル低減の実験系を示す．Xe ランプを搭載したプロジェクターを用いてスクリーンに画像を投影し，投影された画像のスペックルコントラストを CCD カメラによって測定した．スクリーンは，マットスクリーン(MattPlus)とシルバースクリーン(FInesilver240)を使用した．単色の画像についてスペックルを測定するため，プロジェクターに緑色の画像を入力し，CCD カメラの前にバンドパスフィルターを設置することで，スペクトル幅を様々に変化させてスペックルの測定を行った．

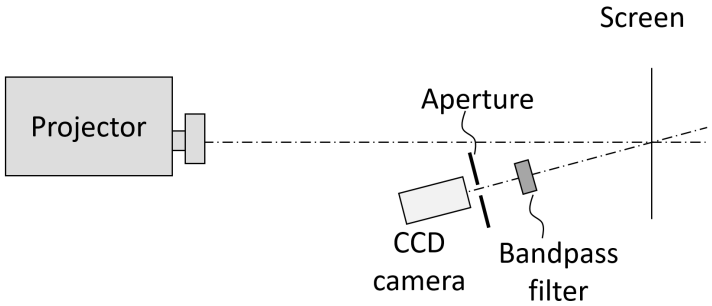


Figure 2.18 Experimental setup to measure speckle contrast of Xe lamp projector.

Figure 2.19 は緑色の画像を入力した場合にプロジェクターから出射される光のスペクトルを示す．スペクトルの測定には分光器(HR2000, Ocean Optics Inc.)を用いた．Figure 2.19 のスペクトル 1 はプロジェクターから出射された光をそのまま分光器に取り込んだ場合のスペクトル，スペクトル 2~5 はバンドパスフィルターを用いてスペクトルを狭窄化した場合のスペクトルである．

次に，Figure 2.19 で示した 5 つのスペクトルについてスペックルコントラストの測定を行った．画像サイズは 840 mm×1600 mm，スクリーン・カメラ間距離は 700 mm とし，人間の眼の解像力を模擬するためにカメラに設置したアパチャーサイズは 1.0 mm とした．スペックルの測定位置は，スクリーン中央から 200~300 mm 程度左の位置とした．

各々のスペクトルのスペクトル幅とスペックルコントラストの測定結果を Table

2.4 に示す．スペクトル幅（1/e² 全幅）を 86 nm から 13 nm まで狭窄化することで，シルバースクリーン，マットスクリーンともに 6 割程度スペックルコントラストが増加することが明らかになった．

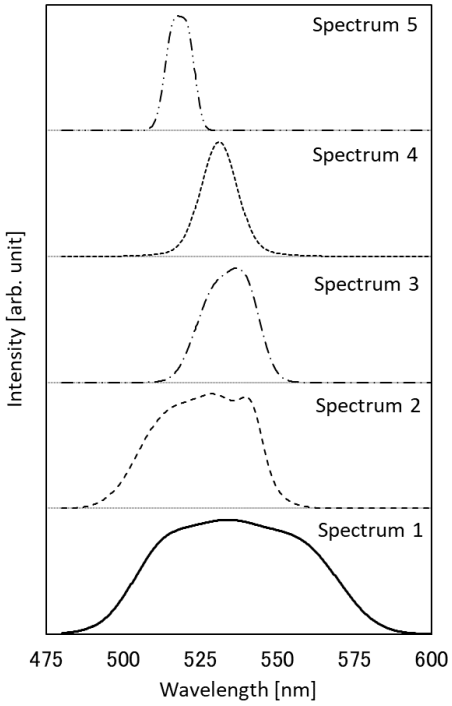


Figure 2.19 Spectra of green light from a Xe lamp projector. Spectrum 1 is the spectrum of the green light from the projector. Spectra 2~5 are narrowed by using band pass filters. Adapted from ref. [112].

Table 2.4 Spectral width and speckle contrast of green light from a Xe lamp projector. Adapted from ref. [112].

Spectrum #	Full width at 1/e² maximum [nm]	Speckle contrast	
		Matte	Silver
1	86	0.019	0.84
2	54	0.020	0.95
3	31	0.023	0.109
4	24	0.025	0.117
5	13	0.031	0.135

2.4.4 レーザーを用いた場合の波長多重によるスペックル低減

次に，波長の異なる複数のレーザーを用いて離散的なスペクトルによる波長多重の効果の測定を行った結果を報告する．Figure 2.20 に示した実験系で波長の異なる 1~5 個のレーザーを用いた場合について，2 種類の画像サイズ (840 mm × 1600 mm, 2400 mm × 4500 mm)で多波長化によるスペックル低減効果を測定した．

用いたレーザーの波長は 530.1 nm, 531.4 nm, 532.5 nm, 533.5 nm, 534.4 nm の 5 波長で，波長間隔がおよそ 1 nm であった．画像サイズはプロジェクターの倍率を調整することで変化させた．なお，画像サイズを変化させるとスクリーンの一点に入射する入射光の立体角 Ω_p が変化するため角度多重度が変化する．Figure 2.21 に示したように，投影倍率が大きくなるほどスクリーン上の測定点から投影レンズを見込む角度は小さくなるため，画像サイズが大きいほど角度多重度が小さくなる．

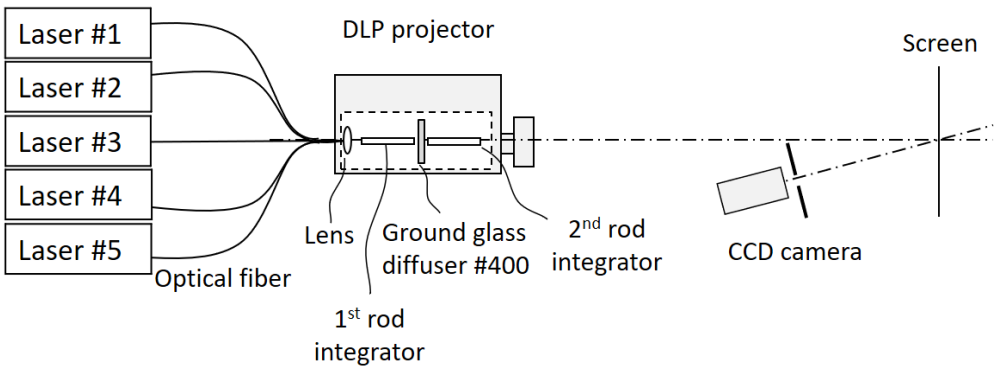
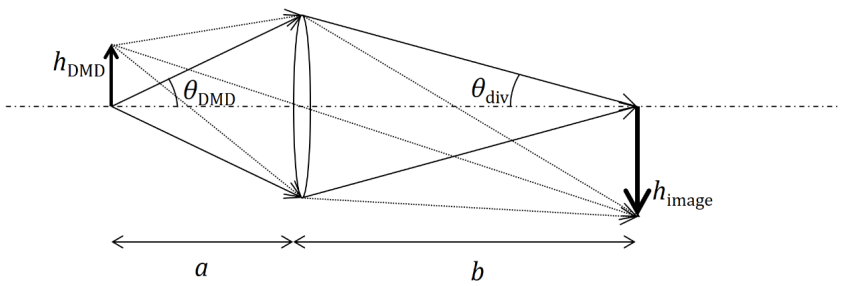


Figure 2.20 Schematic diagram of laser projector and speckle measuring system.



Magnification: $m=h_{image}/h_{DMD}=b/a$

$\tan\theta_{div}/\tan\theta_{DMD}=a/b=1/m$

Figure 2.21 Ray diagram of a simplified system to show the relation between the magnification of the image and angular diversity.

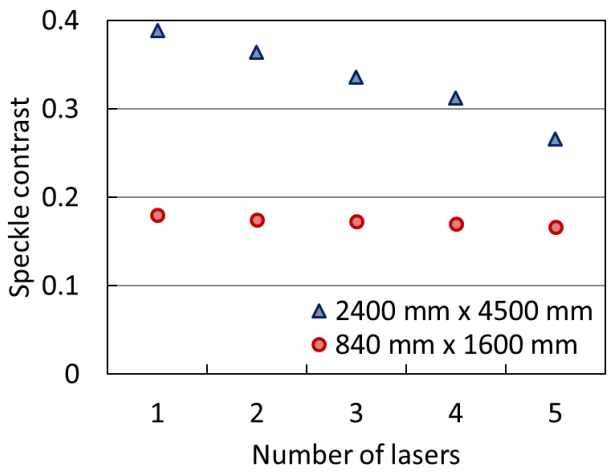


Figure 2.22 Speckle contrast of a projector using 1~5 lasers with different wavelengths. Image size is 840 mm × 1600 mm and 2400 mm × 4500 mm. Adapted from ref. [112].

Figure 2.22 には同時に点灯するレーザーの個数を 1 個から 5 個まで変化させた場合のスペックルコントラストを示す．複数個のレーザーを同時に点灯する際は，波長の短い順にレーザーを使用した．横軸は同時に点灯したレーザーの個数を示している．画像サイズが大きい，つまり角度多重度が小さい場合には，1 波長のときのスペックルコントラストは 0.39 程度で，5 波長に多波長化することでスペックルコントラストが 0.27 になり，3 割程度低減した．一方で，画像サイズが小さい，つまり角度多重度が大きい場合には，1 波長のときのスペックルコントラストは角度多重の効果で 0.19 程度と小さいが，5 波長に多波長化することによりスペックルコントラストが 0.17 となり，スペックル低減効果は 1 割程度であった．

この結果は，波長多重によるスペックル低減効果が角度多重の大きさに依存していることを表している．従来の研究では波長多重と角度多重によるスペックル低減は独立に取り扱われているため，これは従来提案されている理論モデルでは説明できない結果である．

2.5　まとめ

本章ではスペックルを評価するためのスペックル測定系を構築し，カメラの f-number，測定距離，焦点位置などの測定系のパラメータがスペックルコントラストに与える影響について測定を実施した．その結果，カメラの f-number が小さくなるほど，また測定距離が近くなるほどスペックルコントラストが増加することがわかった．これは，角度多重によるスペックル低減効果が f-number や測定距離に依存しているためである．また，f-number はスペックルサイズにも影響を与え，f-number が小さいほどスペックルサイズが小さくなることがわかった．カメラの焦点位置については，焦点がスクリーン上からずれるとスペックルコントラストが大きく低下することがわかった．

また，構築した測定系を用いて偏光多重・角度多重・波長多重によるスペックル低減効果の測定を行った．マットスクリーンとシルバースクリーンにおいて偏光多重によるスペックル低減についても評価を行い，シルバースクリーンでは偏光多重によってスペックルが低減しないことを示した．一方，マットスクリーンでは入射光の偏光状態と，スクリーンでの偏光解消の両方によってスペックルが低減することが確認できた．スペックル低減は合計で 0.57 倍程度であった．

角度多重については，スクリーンのある一点に入射する入射光の立体角 Ω_{p} を変化させる方法と，スクリーンの一点からカメラのアパチャーを見込む立体角 Ω_{d} を変化させる方法の二通りで角度多重度を変化させ，スペックルコントラストの測定を行った．その結果，いずれの方法で角度多重度を変化させた場合でも，スペックルコントラストは Ω_{d} と Ω_{p} の比に応じて変化することがわかった．

波長多重については，Xe ランプとバンドパスフィルターを用いることでスペクトル幅を変化させた連続スペクトル光での波長多重によるスペックル低減効果の測定を行った．マットスクリーンとシルバースクリーンのいずれのスクリーンでも，バンドパスフィルターによってスペクトルを狭窄化するとスペックルコントラストが上昇することが確認できた．スペクトル幅を 86 nm から 13 nm まで狭窄化することで，いずれのスクリーンでもスペックルコントラストがおよそ 6 割程度上昇することがわかった．

さらに，波長の異なる複数のレーザーを用いた波長多重によるスペックル低減効果についても検証を行った．角度多重度の異なる 2 つの条件で波長多重によるスペックル低減効果の測定を行い，角度多重の大きさが波長多重によるスペックル低減

効果に影響を与えることを示した．従来の研究では波長多重と角度多重によるスペックル低減は独立に取り扱われているため，従来提案されている理論モデルでは説明できない結果を示すことができた．角度多重及び波長多重によるスペックル低減は広く用いられている手法であるため，これらの依存性を明らかにすることは効果的にスペックルを低減し，レーザーディスプレイの普及を加速するために非常に重要である．

第 3 章
波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した スペックル低減の理論モデル構築

本章では，波長多重及び角度多重によるスペックル低減に関する理論モデルの導出を行う．これまでに波長多重や角度多重によるスペックル低減の理論モデルは報告されているが,波長多重と角度多重によるスペックル低減は独立に扱われており，それぞれのスペックル低減の相互依存性についての理論モデルは報告されていなかった．

第 2 章で示したとおり，本研究において波長多重と角度多重によるスペックル低減の相互依存性を示す実験結果が初めて得られた．そこで，本章では波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した理論モデルの構築を行う．はじめに波長多重のみの場合について従来知られているガウシアンスペクトルでの理論式を拡張して複数波長の場合の理論モデルの導出を行い，次に波長多重と角度多重の両方を考慮した場合の理論モデルの導出を行う．

3.1 波長多重のみの場合のスペックルコントラスト導出

まず，波長多重のみの場合のスペックルコントラストを導出する．スペクトルがガウシアンで表される場合の波長多重によるスペックルコントラストについては，Goodman によって導出されている [27]．ここでは，Goodman の表式をスペクトルが複数のガウシアンの和で表される場合に拡張することで，任意のスペクトルに適用可能なスペックルコントラストの式を導出する．

Goodman によると，ガウシアンのスペクトルをもった光がプロジェクターから出射され，スクリーン表面での一回散乱によってスペックルパターンを形成したとすると，スペックルコントラストは次のようにかける．

$$C_\lambda = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} R_g(\Delta\nu)|\mu(\Delta q_z)|^2 \mathrm{d}\Delta\nu}\ , \tag{3-1}$$

ここで，

$$R_g(\Delta\nu) = \int_0^{\infty} g(\nu)g(\nu+\Delta\nu)\mathrm{d}\nu, \tag{3-2}$$

$$|\mu(\Delta q_z)|^2 = \exp(-\sigma_h^2 \Delta q_z^2), \tag{3-3}$$

$$\Delta q_z = \frac{2\pi|\Delta\nu|}{\mathrm{c}}(\cos\theta_\mathrm{o} + \cos\theta_\mathrm{i}), \tag{3-4}$$

$g(\nu)$は規格化パワースペクトル密度，ν は周波数，σ_h はスクリーンの二乗平均表面粗さ，c は光速，Δq_z は散乱ベクトルの垂直成分の差，θ_o はカメラの測定角度，θ_i はスクリーンへの入射角度である．

Goodman の表式を拡張し，パワースペクトル密度が次のように複数のガウシアンの和で表される場合を考える．

$$g(\nu) = \sum_i A_i \frac{2}{\sqrt{\pi}\delta\nu_i} \exp\left(-\left(\frac{\nu - \nu_i}{\delta\nu_i/2}\right)^2\right), \tag{3-5}$$

A_i は規格化条件$\sum_i A_i = 1$を満たす定数で，$\delta\nu_i$ はそれぞれのガウシアンのスペクトル幅，ν_i は中心周波数である．この場合，スペックルコントラストは解析的に求めることができる．式(3-5)を式(3-2)に代入し，積分した結果を式(3-3)，(3-4)とともに式(3-1)に代入すると，スペックルコントラストは次のように表される．

$$C_\lambda = \left[\sum_{i,j} A_i A_j \frac{\exp\left(-\frac{2(\nu_i - \nu_j)^2}{\delta\nu_i\delta\nu_j}\frac{B_{i,j}}{1+B_{i,j}}\right)}{\sqrt{1+B_{i,j}}}\right]^{\frac{1}{2}}, \tag{3-6}$$

$$B_{i,j} = 2\pi^2 \frac{\delta\nu_i}{\nu_i}\frac{\delta\nu_j}{\nu_j}\frac{\sigma_h^2}{\lambda_i\lambda_j}(\cos\theta_\mathrm{o} + \cos\theta_\mathrm{i})^2. \tag{3-7}$$

任意のスペクトルは複数のガウシアンの和で近似できるため，式(3-6)を用いて任意のスペクトルでの波長多重によるスペックルコントラストが計算できる．式(3-6)を用いて，スペクトルが Figure 3.1(a)に示したように 530 nm，534 nm，538 nm，542 nm の 4 波長の和である場合についてのスペックルコントラストの計算を行った結果を Figure 3.1(b)に示す．4 波長とも波長幅は同じとし，波長幅が 0.1 nm，0.5 nm，1 nm の場合についてスペックルコントラストを求めた．入射角度，測定角度はそれぞれ θ_i=10°，θ_o=10°とした．波長幅が 0.1 nm の場合，表面粗さが 10 μm 程度までは表面粗さが大きくなるとスペックルが低下し，10 μm 以上ではスペックルコントラストがほぼ一定となった．これは，表面粗さが 10 μm 以上では 4 つの波長

によるスペックルパターンは完全に独立となり，4 つの独立したスペックルパターンの足し合わせでスペックルコントラストが$1/\sqrt{4} = 0.5$程度まで低下したためである．波長幅が 0.5 nm や 1 nm の場合も，表面粗さが 10 μm 以下の領域ではほぼ同様の結果を示している．しかし，表面粗さが 10 μm 以上になると波長幅の影響によってスペックルコントラストに差が現れており，波長幅 0.5 nm や 1 nm ではスペックルコントラストが 0.5 以下に減少するという計算結果が得られた．

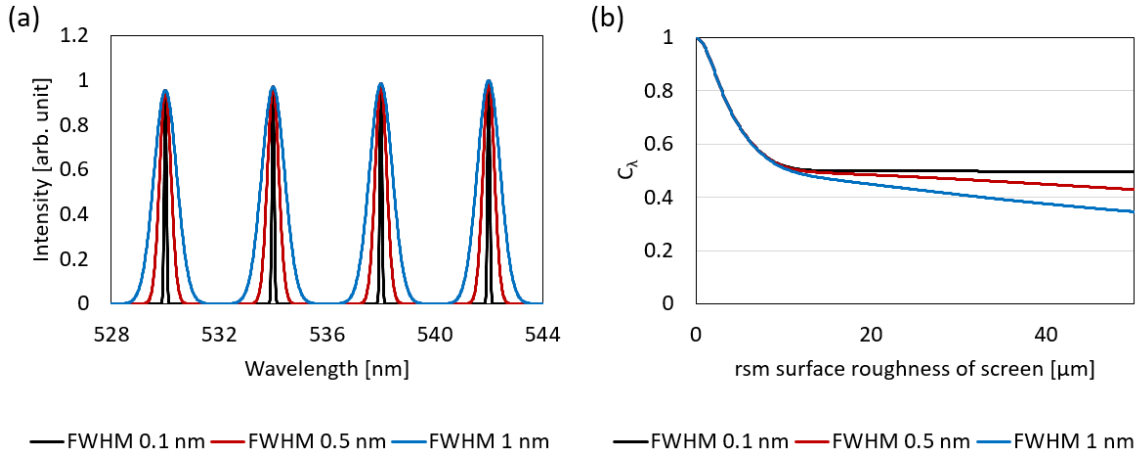


Figure 3.1 Calculation results of speckle contrast by wavelength diversity. (a) Spectra used for calculation, (b) calculated speckle contrast.

3.2 波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した場合のスペックルコントラスト導出

3.2.1 スペックルコントラストの導出

多くの文献では波長多重によるスペックルコントラスト C_λ と，角度多重によるスペックルコントラスト C_Ω, 偏光多重によるスペックルコントラスト C_σ は独立に取り扱われており，すべてを同時に考慮した場合のスペックルコントラストは次のように表されている．

$$C = C_\lambda C_\Omega C_\sigma. \tag{3-8}$$

しかし，波長多重によるスペックル低減と角度多重によるスペックル低減が独立であるかどうかはこれまでに示されていなかった．本研究で初めて角度多重と波長多重の相互依存性を示す実験結果が得られたため．ここでは波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した理論モデルを導出する．波長多重と角度多重の影響を合わせ

たスペックルコントラストを $C_{\lambda,\Omega}$ とすると，合計のスペックルコントラストは次のようになる．

$$C = C_{\lambda,\Omega} C_{\sigma}. \tag{3-9}$$

この節では，$C_{\lambda,\Omega}$ を表す理論モデルの導出を行う．

波長多重と角度多重によるスペックル低減を導出するために，次の条件を仮定した．

(1) スクリーンに異なる角度で入射する光同士は互いにインコヒーレントである．つまり，投影レンズの射出瞳の異なる 2 点から射出される光はインコヒーレントである．（角度多重によるスペックル低減に関わる時間多重度 M と空間多重度 K のうち，M が K よりも十分大きい場合に相当する．）

(2) スクリーン入射光の各入射角・波長成分は fully developed speckle $\hat{I}(x, y; \lambda, \alpha, \beta)$を形成する．$(\cos\alpha, \cos\beta)$は入射光の方向余弦のスクリーン面方向成分，$\lambda$ は波長，(x, y) は像面の座標で，$\hat{I}(x, y; \lambda, \alpha, \beta)$ は規格化条件 $\iint \mathrm{d}x\mathrm{d}y\ \hat{I}(x, y; \lambda, \alpha, \beta) = I_0$ を満たす．ただし，I_0 は λ, α, β に依存しない．

入射光の波長・角度分布が $f(\lambda, \alpha, \beta)$とかけ，$f$ が規格化条件$\iint \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\Omega_{\alpha,\beta} f(\lambda, \alpha, \beta) = 1$ を満たすとすると，座標(x, y)でのスペックルの強度は次のようにかくことができる．

$$I(x,y) = \iint \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\Omega_{\alpha,\beta} f(\lambda,\alpha,\beta) \hat{I}(x,y;\lambda,\alpha,\beta), \tag{3-10}$$

ここで，$\int \mathrm{d}\lambda$ は波長全体，$\int \mathrm{d}\Omega_{\alpha,\beta}$ は入射角全体についての積分を表す．したがって，スペックルパターンの平均強度と 2 次モーメントは次のようにかくことができる．

$$\langle I \rangle = \iint \mathrm{d}x\mathrm{d}y I(x,y) = \iint \mathrm{d}\lambda \mathrm{d}\Omega_{\alpha,\beta} f(\lambda,\alpha,\beta) \left(\iint \mathrm{d}x\mathrm{d}y \hat{I}(x,y;\lambda,\alpha,\beta) \right) = I_0, \tag{3-11}$$

$$\begin{aligned}
\langle I^2 \rangle &= \iint \mathrm{d}x\mathrm{d}y I^2(x,y) \\
&= \iint \mathrm{d}\lambda_1 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_1,\beta_1} \iint \mathrm{d}\lambda_2 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_2,\beta_2} f(\lambda_1,\alpha_1,\beta_1) f(\lambda_2,\alpha_2,\beta_2) \iint \mathrm{d}x\mathrm{d}y \hat{I}(x,y;\lambda_1,\alpha_1,\beta_1) \hat{I}(x,y;\lambda_2,\alpha_2,\beta_2) \\
&= \iint \mathrm{d}\lambda_1 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_1,\beta_1} \iint \mathrm{d}\lambda_2 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_2,\beta_2} f(\lambda_1,\alpha_1,\beta_1) f(\lambda_2,\alpha_2,\beta_2) \Gamma_I(\lambda_1,\alpha_1,\beta_1,\lambda_2,\alpha_2,\beta_2),
\end{aligned} \tag{3-12}$$

ここで，$\Gamma_I(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1, \lambda_2, \alpha_2, \beta_2) = \iint \mathrm{d}x\mathrm{d}y\ \hat{I}(x, y; \lambda_1, \alpha_1, \beta_1)\ \hat{I}(x, y; \lambda_2, \alpha_2, \beta_2)$はスペックル場の強度相関関数である．Goodman [27]によると，fully developed speckle の強度相

関関数は次のようにかくことができる．

$$\Gamma_I = I_0^2[1 + |\mu_A(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1, \lambda_2, \alpha_2, \beta_2)|^2], \tag{3-13}$$

ここで，μ_{A} は規格化したスペックル場の複素振幅の相関関数である．したがって，光強度の分散とスペックルコントラストは次のようにかくことができる．

$$\sigma_I^2 = I_0^2 \iint \mathrm{d}\lambda_1 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_1,\beta_1} \iint \mathrm{d}\lambda_2 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_2,\beta_2} f(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1) f(\lambda_2, \alpha_2, \beta_2) |\mu_A(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1, \lambda_2, \alpha_2, \beta_2)|^2, \tag{3-14}$$

$$\begin{aligned} C_{\lambda,\Omega} &= \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \\ &= \sqrt{\iint \mathrm{d}\lambda_1 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_1,\beta_1} \iint \mathrm{d}\lambda_2 \mathrm{d}\Omega_{\alpha_2,\beta_2} f(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1) f(\lambda_2, \alpha_2, \beta_2) |\mu_A(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1, \lambda_2, \alpha_2, \beta_2)|^2}. \end{aligned} \tag{3-15}$$

3.2.2 スペックル場の複素振幅の規格化相関関数

次に，文献 [27,43]を参照してスペックル場の複素振幅の規格化相関関数を導出する．Figure 3.2 に示したように，スクリーン入射光がスクリーンで散乱反射される反射型スクリーンである場合を考え，光軸を z 軸，スクリーン面の座標を(ξ, η)，像面での座標を(x, y)，入射光と散乱光の波数ベクトルが ξ，η，z 軸となす角をそれぞれ$(\alpha_{\mathrm{i}}, \beta_{\mathrm{i}}, \theta_{\mathrm{i}})$，$(\alpha_{\mathrm{o}}, \beta_{\mathrm{o}}, \theta_{\mathrm{o}})$，その方向余弦を$(D_{\alpha_{\mathrm{i}}}, D_{\beta_{\mathrm{i}}}, D_{\theta_{\mathrm{i}}})$，$(D_{\alpha_{\mathrm{o}}}, D_{\beta_{\mathrm{o}}}, D_{\theta_{\mathrm{o}}})$と置く．このとき，スクリーン面上での散乱光の場の複素振幅は，次のように与えられる．

$$a(\xi, \eta) = E_0 \exp\left(\mathrm{i}\Phi(\xi, \eta) + \frac{2\pi\mathrm{i}}{\lambda}\left\{\left(D_{\alpha_{\mathrm{i}}}\xi + D_{\beta_{\mathrm{i}}}\eta\right) - \left(D_{\alpha_{\mathrm{o}}}\xi + D_{\beta_{\mathrm{o}}}\eta\right)\right\}\right), \tag{3-16}$$

ここで，Φ はスクリーンでのランダムな散乱によって散乱光に印加される位相分布，E_0 は定数である．スクリーンは均一に照明されていると仮定している．スクリーンで散乱される入射光がスクリーン表面での一回散乱のみによって散乱されると仮定すると，Φ は次のようにかくことができる．

$$\Phi(\xi, \eta) = q_z h(\xi, \eta), \tag{3-17}$$

ここで，$q_z = \frac{2\pi}{\lambda_1}(\cos\theta_{\mathrm{o}} + \cos\theta_{\mathrm{i}})$ はスクリーン上での散乱ベクトルの垂直成分，$h(\xi, \eta)$ はスクリーンの表面高さ分布である．

像面上でのスペックル場の複素振幅 $A(x, y)$は結像系の点像分布関数 $k(\lambda; x, y; \xi, \eta)$ を用いて次式で表すことができる．

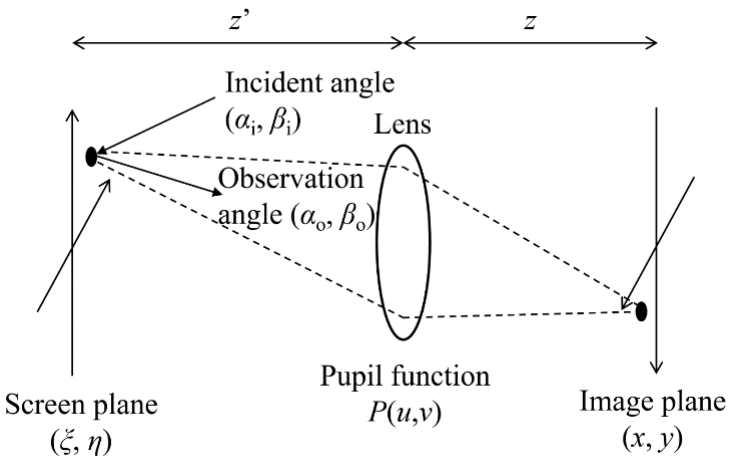


Figure 3.2 Coordinate system of imaging system. Adapted from ref. [105].

$$A(x,y) = \iint \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\eta k(\lambda; x, y; \xi, \eta) a(\xi, \eta). \tag{3-18}$$

Γ_A を 2 つのスペックル場の複素振幅の相関関数とする．2 つのスペックル場は波長と入射角度が$(\lambda_1, \alpha_{i1}, \beta_{i1})$と$(\lambda_2, \alpha_{i2}, \beta_{i2})$で，測定角度はともに$(\alpha_o, \beta_o)$であるとすると，$\Gamma_A$ は次のようにかくことができる．

$$\begin{aligned}\Gamma_A(x_1, y_1, x_2, y_2) &= \overline{A_1(x_1, y_1) A_2^*(x_2, y_2)} \\ &= \iint \mathrm{d}\xi_1 \mathrm{d}\eta_1 \iint \mathrm{d}\xi_2 \mathrm{d}\eta_2 \left\{ k(\lambda_1; x_1, y_1; \xi_1, \eta_1) k^*(\lambda_2; x_2, y_2; \xi_2, \eta_2) \overline{a_1(\xi_1, \eta_1) a_2^*(\xi_2, \eta_2)} \right\},\end{aligned} \tag{3-19}$$

ここで，バーは統計平均を表す．

文献 [27]で示されているように，スクリーンの表面高さ分布が標準偏差 σ_h のガウス分布であり，散乱光場の相関長がデルタ関数と見なすことができるほど十分小さいと仮定する．散乱光場の積の統計平均はスクリーンの表面高さ h についての確率密度関数の特性関数 Λ を用いて次のように表される．

$$\begin{aligned}\overline{a_1(\xi_1, \eta_1) a_2^*(\xi_2, \eta_2)} &\propto \Lambda(\Delta q_z) \\ &\times \exp\left[2\pi \mathrm{i} \frac{(D_{\alpha_{i1}} - D_{\alpha_o})\xi_1 + (D_{\beta_{i1}} - D_{\beta_o})\eta_1}{\lambda_1} - 2\pi \mathrm{i} \frac{(D_{\alpha_{i2}} - D_{\alpha_o})\xi_2 + (D_{\beta_{i2}} - D_{\beta_o})\eta_2}{\lambda_2} \right] \\ &\times \delta(\xi_1 - \xi_2) \delta(\eta_1 - \eta_2),\end{aligned} \tag{3-20}$$

$$|\Lambda(\Delta q_z)| = \exp\left(-\frac{1}{2} \sigma_h^2 (\Delta q_z)^2 \right), \tag{3-21}$$

ここで，$\Delta q_z = q_{z1} - q_{z2} = 2\pi\left|\frac{1}{\lambda_1}(\cos\theta_{o1} + \cos\theta_{i1}) - \frac{1}{\lambda_2}(\cos\theta_{o2} + \cos\theta_{i2})\right|$は散乱ベクトルの垂直成分の差である．また，スペックル計算に影響しない定数項は省略した．

スクリーンでの散乱が表面での一回散乱ではなく複数回の散乱や体積散乱である場合，Λ をスクリーン入射光がスクリーンに入射してから出射するまでの光路長 l についての確率密度関数の特性関数と置き換えることで同じ表式を用いることができる [27]．光路長 l の確率密度分布が標準偏差 $2\sigma_l$ のガウス分布とすると，式(3-21)と同様に$|\Lambda(\Delta q_z)| = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_l^2(\Delta q_z)^2\right)$と表すことができる．以降は体積散乱である場合を考慮し，σ_l を用いて記述する．

次に，$P(u, v)$を結像光学系の瞳関数，m を拡大率とすると，点像分布関数は次のようにかくことができる [113]．

$$k(\lambda; x, y; \xi, \eta) = \frac{1}{\lambda^2 zz'}\iint \mathrm{d}u\mathrm{d}v P(u, v)\exp\left(-\mathrm{i}\frac{2\pi}{\lambda z}\{(x - m\xi)u + (y - m\eta)v\}\right), \qquad (3-22)$$

ここで，Figure 3.2 に示すように z' はスクリーンから結像光学系までの距離，z は結像光学系から像面までの距離で，z と z'は $m=z/z'$を満たす．スクリーンでの散乱が体積散乱である場合について式(3-20)と式(3-22)を式(3-19)に代入し，スペックルコントラストの計算に影響しない位相項を無視すると，相関関数は次のようになる．

$$\begin{aligned}\Gamma_A &= \iint \mathrm{d}\xi_1\mathrm{d}\eta_1 \iint \mathrm{d}\xi_2\mathrm{d}\eta_2 \left\{k(\lambda_1; x_1, y_1; \xi_1, \eta_1)k^*(\lambda_2; x_2, y_2; \xi_2, \eta_2)\overline{a_1(\xi_1, \eta_1)a_2^*(\xi_2, \eta_2)}\right\} \\ &= \frac{1}{z^2}\Lambda(\Delta q_z)\iint \mathrm{d}u_0\mathrm{d}v_0\, P\left(\lambda_1 u_0 - z'\left(D_{\alpha_{i1}} - D_{\alpha_o}\right), \lambda_1 v_0 - z'\left(D_{\beta_{i1}} - D_{\beta_o}\right)\right) \\ &\qquad \times P^*\left(\lambda_2 u_0 - z'\left(D_{\alpha_{i2}} - D_{\alpha_o}\right), \lambda_1 v_0 - z'\left(D_{\beta_{i2}} - D_{\beta_o}\right)\right) \\ &\qquad \times \exp\left(2\pi\mathrm{i}\left\{\frac{u_0(x_2 - x_1)}{z} + \frac{v_0(y_2 - y_1)}{z}\right\}\right), \qquad (3-23)\end{aligned}$$

ここで,次の変数変換を行った:$u = \lambda_1 u_0 - z'\left(D_{\alpha_{i1}} - D_{\alpha_o}\right), v = \lambda_1 v_0 - z'\left(D_{\beta_{i1}} - D_{\beta_o}\right)$. また，$x_1 = x_2$, $y_1 = y_2$ と置くことで，スペックル場の複素振幅の規格化相関関数は次のように得られる．

$$\begin{aligned}\mu_A(\lambda_1, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, \lambda_2, \alpha_{i2}, \beta_{i2}) &= \frac{\Gamma_A}{\Gamma_A(\lambda_1 = \lambda_2, \alpha_{i1} = \alpha_{i2}, \beta_{i1} = \beta_{i2})} \\ &= \Lambda(\Delta q_z)\Psi(\lambda_1, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, \lambda_2, \alpha_{i2}, \beta_{i2}; \alpha_o, \beta_o), \qquad (3-24)\end{aligned}$$

ここで，

$$\Psi(\lambda_1,\alpha_{\mathrm{i}1},\beta_{\mathrm{i}1},\lambda_2,\alpha_{\mathrm{i}2},\beta_{\mathrm{i}2};\alpha_{\mathrm{o}},\beta_{\mathrm{o}}) = \frac{\iint \mathrm{d}u_0\mathrm{d}v_0 P(\overline{u_1},\overline{v_1})P^*(\overline{u_2},\overline{v_2})}{\left[\iint \mathrm{d}u_0\mathrm{d}v_0[P(\lambda_1 u_0,\lambda_1 v_0)]^2 \iint \mathrm{d}u_0\mathrm{d}v_0[P(\lambda_2 u_0,\lambda_2 v_0)]^2\right]^{\frac{1}{2}}}, \tag{3-25}$$

$$\overline{u_k} = \lambda_k u_0 - z'\left(D_{\alpha_{\mathrm{i}k}} - D_{\alpha_{\mathrm{o}}}\right), \overline{v_k} = \lambda_k v_0 - z'\left(D_{\beta_{\mathrm{i}k}} - D_{\beta_{\mathrm{o}}}\right),\ k = 1,2.$$

結像系が収差の無視できる半径 r の円形レンズであるとき，瞳関数は次のように表される．

$$P(u,v) = \begin{cases} 1\ (u^2+v^2 \le r^2) \\ 0\ (u^2+v^2 > r^2) \end{cases}. \tag{3-26}$$

式(3-26)を式(3-25)に代入すると，Ψ は次のように表される．

$$\Psi = \frac{\mathrm{S}}{\sqrt{S_1 S_2}}, \tag{3-27}$$

ここで，S_1 と S_2 はそれぞれ Figure 3.3 に示す 2 つの円の面積で，S は 2 つの円の重なり合う部分の面積である．

- 円 1: 半径 $\frac{r}{\lambda_1}$, 中心 $\left(\frac{z'}{\lambda_1}\left(D_{\alpha_{\mathrm{i}1}} - D_{\alpha_{\mathrm{o}}}\right), \frac{z'}{\lambda_1}\left(D_{\beta_{\mathrm{i}1}} - D_{\beta_{\mathrm{o}}}\right)\right)$.
- 円 2: 半径 $\frac{r}{\lambda_2}$, 中心 $\left(\frac{z'}{\lambda_2}\left(D_{\alpha_{\mathrm{i}2}} - D_{\alpha_{\mathrm{o}}}\right), \frac{z'}{\lambda_2}\left(D_{\beta_{\mathrm{i}2}} - D_{\beta_{\mathrm{o}}}\right)\right)$.

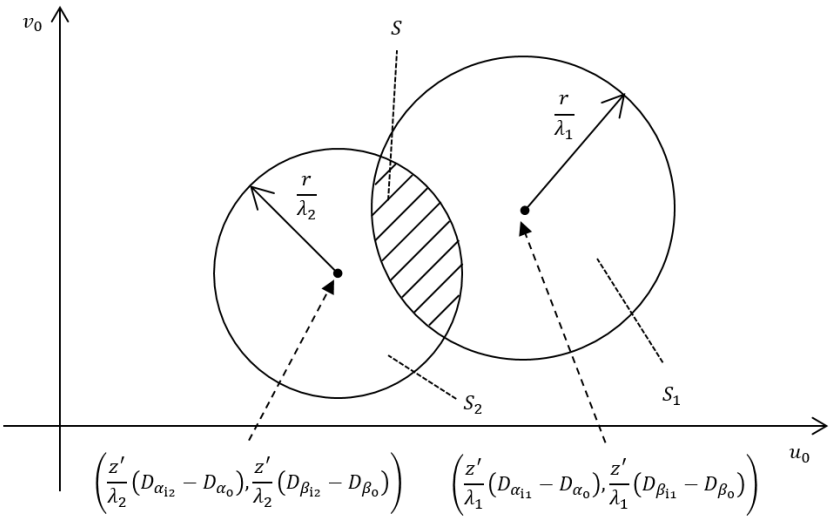


Figure 3.3 Domain of integration for the correlation function Ψ. Adapted with modification from ref. [105].

２つの円の半径をそれぞれ r_1，r_2，中心間距離を d と置き直し，$r_1 \leqq r_2$ とすると，

$$S = \begin{cases} \pi r_1^2 & (d \leq |r_2 - r_1| \text{のとき}) \\ \phi_1 r_1^2 + \phi_2 r_2^2 - d r_1 \sin\phi_1 & (|r_2 - r_1| \leq d < r_1 + r_2 \text{のとき}), \\ 0 & (d \geq r_1 + r_2 \text{のとき}) \end{cases} \tag{3-28}$$

$$S_1 = \pi r_1^2, \tag{3-29}$$

$$S_2 = \pi r_2^2, \tag{3-30}$$

となる．ただし，

$$\cos\phi_1 = \frac{r_1^2 + d^2 - r_2^2}{2 d r_1}, \tag{3-31}$$

$$\cos\phi_2 = \frac{r_2^2 + d^2 - r_1^2}{2 d r_2}. \tag{3-32}$$

3.2.3 入射光の分布関数とスペックルコントラスト

入射光の分布関数 $f(\lambda, \alpha, \beta)$は実験条件により決まるが，ここでは線幅がデルタ関数で近似できる複数の波長成分からなり，角度分布が Figure 3.4 に示したような入射角 θ_{i} で光軸が ηz 平面上にあり，発散半角 θ_{div} のトップハット型分布である入射光の場合を考える．付録 B に示した通り，入射光の分布関数は次のようにかくことができる．

$$f(\lambda, \alpha, \beta) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{N} A_k \delta(\lambda - \lambda_k) & (\alpha, \beta) \in \Omega_{\mathrm{top-hat}}, \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{3-33}$$

$$\Omega_{\mathrm{top-hat}} = \left\{ (\alpha, \beta) \,\middle|\, \cos^2\alpha + \left(\cos\beta\cos\theta_{\mathrm{i}} + \sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta}\sin\theta_{\mathrm{i}}\right)^2 < \sin^2\theta_{\mathrm{div}} \right\},$$

ここで，A_k は定数である．式(3-33)と式(3-24)を式(3-15)に代入すると，次のスペックルコントラストが得られる．

$$C_{\lambda,\Omega} = \left(\int_{(\alpha_1,\beta_1)\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{top-hat}}} \mathrm{d}\Omega_{\alpha_1,\beta_1} \int_{(\alpha_2,\beta_2)\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{top-hat}}} \mathrm{d}\Omega_{\alpha_2,\beta_2} \sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} A_k A_l |\Lambda(\Delta q_z)\Psi(\lambda_k,\alpha_1,\beta_1,\lambda_l,\alpha_2,\beta_2)|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left(\int_{(\alpha_1,\beta_1)\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{top-hat}}} \mathrm{d}\Omega_{\alpha_1,\beta_1} \int_{(\alpha_2,\beta_2)\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{top-hat}}} \mathrm{d}\Omega_{\alpha_2,\beta_2} \sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N} A_k A_l \exp(-\sigma_l^2(\Delta q_z)^2) \frac{S^2}{S_1 S_2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3-34)$$

トップハット型角度分布をもった複数波長光源のスペックルコントラストは，この表式を用いて求めることができる．

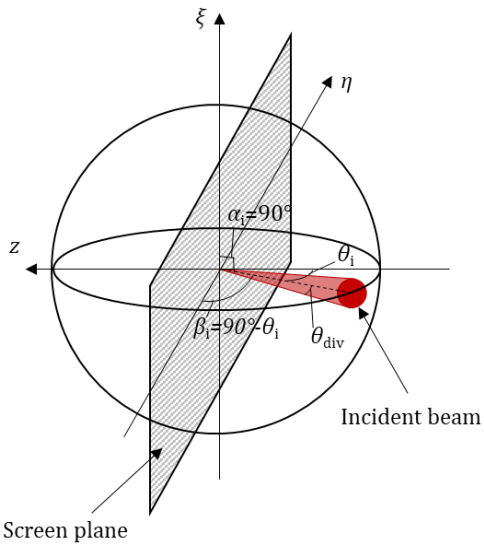


Figure 3.4 Illumination light toward a certain point on screen with top-hat angular distribution.

3.2.4 スペックルコントラストの計算例

次に，式(3-34)を用いた計算例をいくつか示す．まず，波長多重がなく角度多重度のみの場合，すなわち式(3-34)で N=1 の場合についての計算結果を Figure 3.5 に示す．θ_{div} を変化させた場合について計算を行い，その他のパラメータは θ_{i}=0°，z'=700 mm，r=0.5 mm，λ=530 nm，σ_l=3 μm とした．Ω_{d} と Ω_{p} はそれぞれスクリーンからカメラのアパチャーを見込む立体角と，スクリーンへの入射光の立体角であり，$\Omega_{\mathrm{d}}=2\pi(1-\cos\theta_{\mathrm{div}})$，$\Omega_{\mathrm{p}}=2\pi(1-\cos(\mathrm{atan}(r/z')))=1.6\times10^{-6}$ sr である．

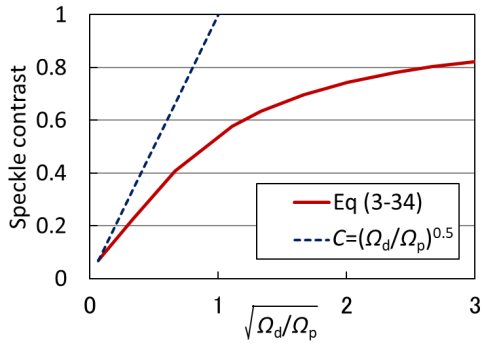


Figure 3.5 Calculated speckle contrast of single wavelength laser.

角度多重によるスペックル低減は$C \approx \sqrt{\Omega_p/\Omega_d}$と近似できることが報告されている [26,27]が，Figure 3.5 に示したように本研究での計算結果は$C = \sqrt{\Omega_p/\Omega_d}$よりも小さくなっており，特に$\sqrt{\Omega_p/\Omega_d}$が大きい領域では近似式$C \approx \sqrt{\Omega_p/\Omega_d}$からの乖離が大きかった．

次に，2 波長の場合，すなわち式(3-33)で N=2 の場合についての計算結果を Figure 3.6 に示す．θ_{div}=0.0005 rad または 0.0015 rad, θ_i=15°, θ_o=0°, z'=700 mm, r=0.5 mm, λ_1=530 nm（固定），λ_2=530~540 nm（可変），σ_l=3 μm とした．λ_2-λ_1=0 nm のときには角度多重のみによってスペックルが低減しており，λ_2-λ_1 が大きくなると波長多重によるスペックル低減効果が見られた．λ_2-λ_1 が一定値以上になるとそれ以上スペックルが低減しなかった．これは λ_2-λ_1 が小さい場合には 2 つの波長が作るスペックルパターンが完全に独立ではなく，λ_2-λ_1 の値によって 2 つのパターンの相関が変化するが，λ_2-λ_1 が一定値以上になると波長差によらず 2 つのスペックルパターンが完全に独立となり，波長差を大きくしても波長多重によるスペックル低減効果が変化しなくなるためである．なお，2 波長の場合は波長多重度が最大で 2 であるため，波長多重によるスペックル低減は$1/\sqrt{2}$で飽和する．したがって，波長差が十分大きい場合には，λ_2-λ_1=0 nm のときに比べてスペックルコントラストが$1/\sqrt{2}$倍となった．

θ_{div} の異なる 2 つの結果を比較すると，λ_2-λ_1=0 nm のときには角度多重度の違いによりスペックルコントラストが異なっており，波長差を大きくした場合に波長多重によるスペックル低減が飽和する波長差が θ_{div} によって異なる結果となった．θ_{div} が大きいほど，つまり角度多重度が大きいほどスペックル低減に必要な波長差が大きくなった．これは，波長多重と角度多重によるスペックル低減が独立ではないことを示している．

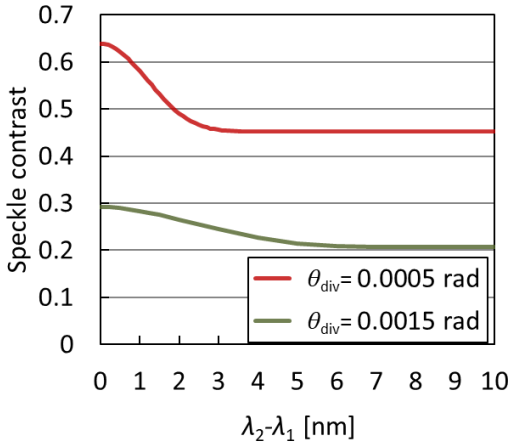


Figure 3.6 Calculated speckle contrast of two wavelength lasers.

最後に，2 波長で角度多重度が無視できる場合について式(3-6)を用いて計算した場合と式(3-34)を用いて計算した場合の結果を比較する．θ_i=0°，θ_o=0°，z'=700 mm，r=0.5 mm，λ_1=530 nm，λ_2=530~540 nm，σ_l=3 μm（式(3-6)では σ_h=3 μm）とし，式(3-34)では角度多重によるスペックル低減効果がほぼなくなるよう θ_{div}=0.000001 rad とした．計算結果を Figure 3.7 に示す．角度多重と波長多重の両方を考慮した式(3-34)で得られた値と，波長多重のみを考えた式(3-6)の結果がよく一致していることが確認できた．

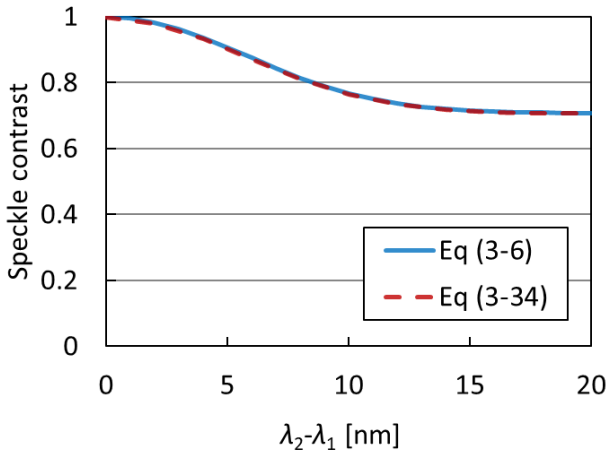


Figure 3.7 Speckle contrast of two wavelength lasers without angular diversity calculated by Eqs. (3-6) and (3-34).

3.3 スペックル低減についての理論モデルの適用範囲

式(3-34)の理論モデルは次の条件に当てはまる場合には適用できない可能性があるため注意が必要である.

- 独立な光源数が少ない場合
- 極端な斜め入射・斜め測定の場合
- 特殊スクリーンを使用した場合

Goodman によると, 角度多重によるスペックルコントラストは, M を時間多重度, K を空間多重度として

$$C = \sqrt{\frac{M + K \pm 1}{MK}}, \tag{3-35}$$

とかける. 理論モデル導出の際に時間多重度 M が空間多重度 K よりも十分大きいと仮定しているため, 独立な光源数が少ない場合にはこの仮定が成り立たなくなる可能性がある.

測定角度が大きい場合, スクリーン上でのコヒーレンス領域の形状や点像分布関数に対応するスクリーン上での形状が扁平するため, スペックルコントラストが変化することが Kubota, Kurashige ら [92–94]によって報告されている. 測定角度を θ_o とした場合, スペックルコントラストは$(\cos\theta_o)^{0.5}$ にしたがって低下する. 入射角度が大きい場合についても同様で, これらの場合には式(3-34)による計算と実測とのずれが生じると考えられる.

スクリーンについては, 正反射以外の方向に最も強く散乱されるよう特殊に設計されたスクリーンなどの場合には, 式(3-16)の位相項が一般的なスクリーンとは異なる形となることが考えられるため, 計算には注意が必要である.

また, 波長多重のみを考慮した式(3-6)については, 入射光の角度広がりや斜め入射・斜め測定の影響を考慮するために必要な式(3-24)の Ψ を無視しているため, 入射角度と測定角度が正反射の位置関係(θ_o=θ_i)で, かつ角度多重によるスペックル低減がない場合にのみ良い近似となる.

3.4 まとめ

本章では, まずスペクトルが複数のガウシアンの和で表される場合について波長多重によるスペックル低減の理論モデルの導出を行った. このモデルでは, 入射角

度と測定角度が正反射の位置関係で，かつ角度多重によるスペックル低減がない場合に良い近似となることがわかった．

次に，スクリーン散乱光に印加される位相のうち従来の理論モデルでは無視していた斜入射・斜出射による位相項を考慮し，角度多重と波長多重の依存性を考慮した理論モデルを導出した．このモデルを用いた計算により，角度多重と波長多重によるスペックル低減に相互依存性が現れることを示すことができた．また，導出した理論モデルにおいて角度多重によるスペックル低減が無視できるほど小さい場合のスペックルコントラスト計算結果が，波長多重のみを考えた理論モデルから計算した結果と一致することを示した．

第 4 章
波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した理論モデルの実験的検証

第 3 章で角度多重と波長多重によるスペックルコントラストの理論式(3-34)を導出し,角度多重と波長多重によるスペックル低減の相互依存性を示した.本章では,原理検証実験により理論モデルの妥当性を示す．4.1 節では，レーザーを 1 つ用いて角度多重によるスペックル低減効果を測定した結果を示し，理論モデルとの比較を行う．4.2 節では波長の異なる 2 つのレーザーを用いて波長多重によるスペックル低減効果を測定し，理論モデルと比較した結果を示す.

4.1　角度多重度によるスペックル低減

まず，レーザーを 1 つ用いて角度多重によるスペックル低減効果を測定し，理論モデルを用いて解析を行った．実験方法は 2.4.2 項で説明した方法と同じである．実験系の概略図を Figure 4.1 に再掲する．緑色レーザー光を振動拡散板で拡散し，ロッドインテグレータで均一化した後にロッドインテグレータの端面像をスクリーンに投影してスペックルコントラストを測定した．スクリーンはシルバースクリーン(Finesilver240)を用いた.

角度多重度は次の 2 通りの方法で変化させた.

- スクリーンからカメラのアパチャーを見込む立体角 Ω_{d} を変化させる方法：
  レーザー光の投射条件を一定にし,スクリーン･カメラ間距離 L を 240~700 mm, カメラのアパチャーサイズ D を 0.2~2.0 mm の範囲で変化させた.
- スクリーンのある一点に入射する入射光の立体角 Ω_{p} を変化させる方法：
  コリメートレンズの焦点距離を f=4.3 mm, 7.9 mm, 18 mm のいずれかから選び, ロッドインテグレータのスクリーンへの投影倍率を変えることで投射光の角度分布を変化させた.

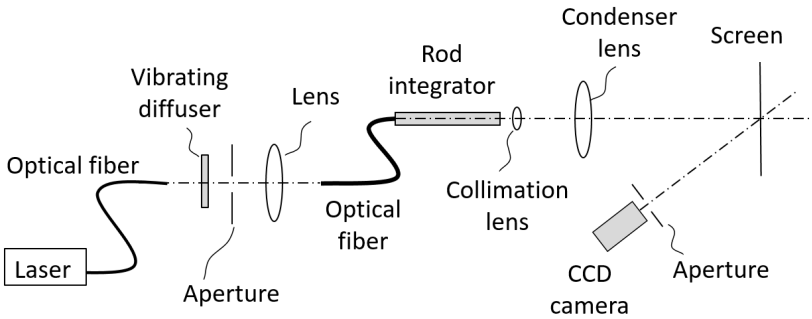


Figure 4.1 Experimental setup to measure speckle reduction by angular diversity.

Figure 4.2 は Ω_{d} を変化させた結果を示す．コリメートレンズの焦点距離は f=7.9 mm で，投影倍率は 100 倍，スペックル測定位置は画像中央とした．入射光の条件が同じ場合にはアパチャーサイズとスクリーン・カメラ間距離の比 $D/2L$ が小さいほど角度多重度が大きくなるため，スペックルコントラストが小さくなった．実線は次式で表される理論計算値を示す．

$$C_{\mathrm{total}} = \left(\left(C_{\lambda,\Omega} C_{\sigma} \right)^2 + C_{\mathrm{non-speckle}}^2 \right)^{0.5}. \qquad (4-1)$$

$C_{\lambda,\Omega}$ はトップハット型の角度分布を仮定した場合の理論式(3-34)で波長数 N=1，θ_{div}=0.0015 rad の場合の計算値を用い，2.4.1 項で示したようにシルバースクリーンでは偏光多重によるスペックル低減効果がないため C_{σ}=1 とした．$C_{\mathrm{non\text{-}speckle}}$ は 2.3 項に示した結果から 0.06 とした．トップハット型角度分布のカットオフ角度 θ_{div} はフィッティングパラメータとして実験結果から求めた．理論計算値により実験結果を非常によく再現できることがわかった．

Figure 4.3 はスペックル測定条件を一定とし，ロッドインテグレータの投影倍率を変えることで投射光の角度分布を変化させた場合の結果を示す．アパチャーサイズは D=1.0 mm，スクリーン・カメラ間距離は 700 mm とした．Figure 2.21 に示した関係より，カットオフ角度 θ_{div} は投影倍率に反比例するため，Figure 4.2 で使用したカットオフ角度から投影倍率を変化させた場合のカットオフ角度を算出した．実験値に対応するカットオフ角度はそれぞれ 0.0033 rad (f=18 mm)，0.0015 rad (f=7.9 mm)，0.00080 rad (f=4.3 mm)である．測定条件が同じ場合には投影倍率が小さいほど角度多重度が大きいため，スペックルコントラストが小さくなることがわかった．実線はトップハット型の角度分布を仮定した場合の計算値を示しており，測定条件を変化させた場合と同じように計算値により実験結果を非常によく再現できることがわかった．

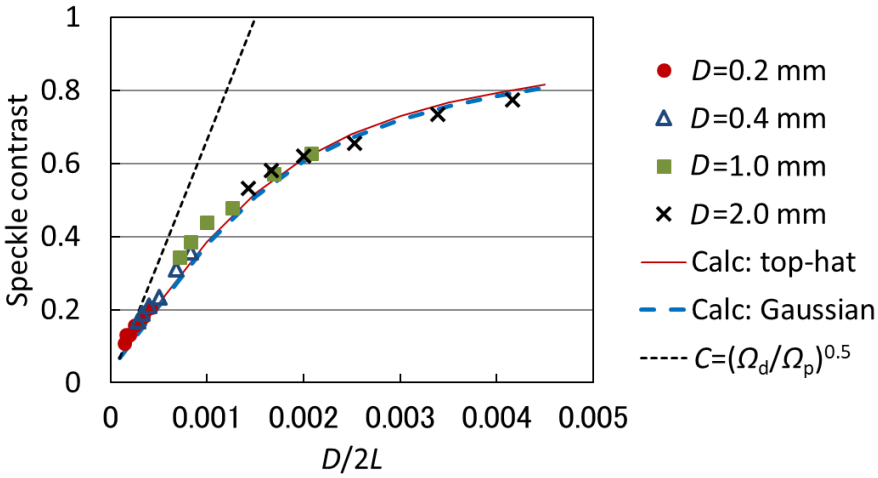


Figure 4.2 Speckle contrast with various angular diversity. Angular diversity is altered by changing camera aperture size D and camera-to-screen distance L. Focal length of collimation lens f is 7.9 mm. The solid line shows the calculated contrast with top-hat angular distribution, and the dashed line shows the calculated contrast with Gaussian angular distribution. Adapted partly from ref. [105].

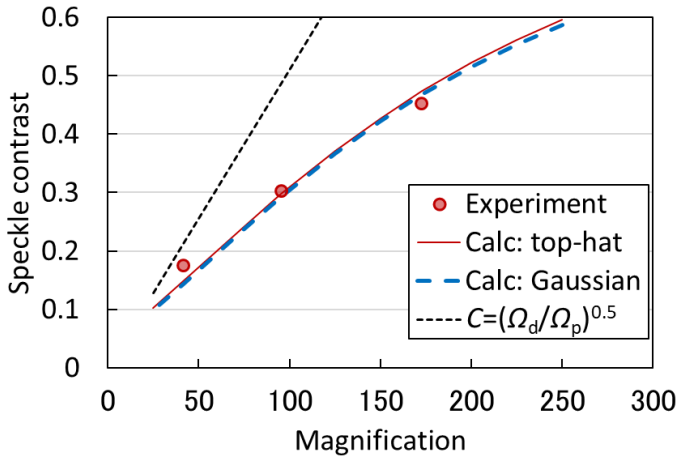


Figure 4.3 Speckle contrast with various angular diversity. Angular diversity is altered by changing the magnification of the rod integrator to the screen. Camera aperture size D is 1.0 mm, camera-to-screen distance L is 700 mm. The solid line shows the calculated contrast with top-hat angular distribution, and the dashed line shows the calculated contrast with Gaussian angular distribution.

また，3.2.3 項では角度分布がトップハット型の場合についてスペックルコントラストの導出を行ったが，実際の角度分布は完全なトップハット型にはなっていないことが推定される．そこで，トップハット型の角度分布ではなく Figure 4.4 に示すガウシアン型の角度分布を用いた場合についても同様の計算を行った．角度分布を標準偏差 σ のガウシアンとした場合の結果は Figure 4.2，Figure 4.3 の破線で示しており，ガウシアンの 2σ に相当する角度をトップハットのカットオフ角度と一致させるようにガウス分布の幅を決定すると，トップハット型の角度分布の場合とガウシアンの角度分布の場合の計算結果がほぼ一致することがわかった．いずれの角度分布を採用した場合でも実験結果をよく再現できたことから，角度広がりという 1 つの変数をフィッティングパラメータとすることで，角度分布の詳細な形によらずスペックルコントラストをよく近似できると考えられる．

なお，Figure 4.3 で f=18 mm（倍率約 40 倍）の実測値が理論値よりも少し大きい結果となったが，この原因として f=18 mm のコリメートレンズでは高角度成分が遮られていることが考えられる．使用したコリメートレンズの NA は f=4.3 mm のレンズで NA=0.57，f=7.9 mm のレンズで NA=0.51 なのに対し，f=18 mm のレンズでは NA=0.15 と他のレンズよりも小さい．投影倍率とスクリーン入射光のカットオフ角度からコリメートレンズの入射角度を算出すると NA=0.14 程度相当であるため，f=18 mm のレンズではレンズの NA ぎりぎりまで光線が広がっていると考えられる．実際の角度分布はトップハット型ではなく Figure 4.4 のガウス分布のように広がっていることが考えられるため，高角度成分が NA=0.15 のレンズに遮られ，少しスペックルコントラストが高くなった可能性がある．

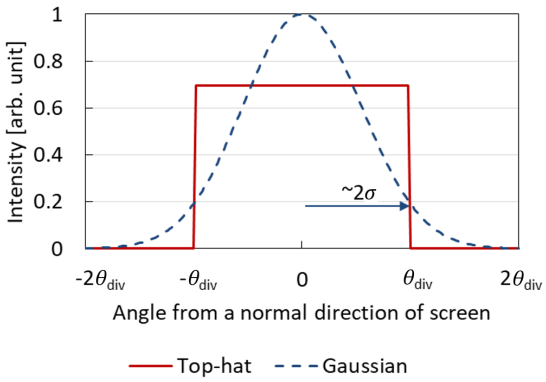


Figure 4.4 Top-hat and Gaussian angular distribution. The cutoff angle of top-hat distribution θ_{div} corresponds to 2σ of Gaussian distribution.

Trisnadi [26]や Goodman [27]は，時間多重度 M が十分大きい場合，角度多重によるスペックル低減 R_Ω は $\Omega_\mathrm{p}>\Omega_\mathrm{d}$ のときに $R_\Omega=(\Omega_\mathrm{p}/\Omega_\mathrm{d})^{0.5}$ と近似できると報告している．これは，スクリーン上でのコヒーレンス領域の大きさ s とカメラの解像スポットの大きさ d との比が $s:d=\Omega_\mathrm{d}^{0.5}:\Omega_\mathrm{p}^{0.5}$ であることから，カメラの解像スポットの中でおよそ $N=(d/s)^2=\Omega_\mathrm{p}/\Omega_\mathrm{d}$ 個の独立なスペックルパターンが発生するという近似を用いているためである．しかし，Figure 4.2，Figure 4.3 の結果ではスペックルコントラストは $C_\Omega=1/R_\Omega=(\Omega_\mathrm{d}/\Omega_\mathrm{p})^{0.5}$ よりも小さく，特に角度多重が小さい場合，すなわち $(\Omega_\mathrm{d}/\Omega_\mathrm{p})^{0.5}$ が大きい場合に近似からのずれが大きくなった．

これは，コヒーレンス領域やカメラの解像スポットのサイズが非連続的に定まっているものではなく，連続的に相関が変化しているためであると考えられる．例えば $\Omega_\mathrm{p}=\Omega_\mathrm{d}$ の場合にはコヒーレンス領域とカメラの解像スポットのサイズが等しくなり，上記の近似によるとカメラの解像スポット 1 つの中で独立なスペックルパターンが 1 つしか発生しないため，スペックルは低減しない．しかし実際にはカメラの解像スポット内，つまりコヒーレンス領域内全域で完全にコヒーレンスがあるわけではないため，スペックルコントラストが減少すると考えられる．

4.2 波長多重と角度多重によるスペックル低減

4.2.1 入射角・測定角を変えた場合の波長多重によるスペックル低減効果

次に，波長の異なる 2 つのレーザーを同時にスクリーンに入射することで，波長多重によるスペックル低減効果の測定を行った．Figure 4.5 に実験系の概略図を示す．

2 波長のレーザーは波長間隔が 0~15 nm となるように波長を 524~550 nm の中から選択した．スクリーンとカメラの距離は 700 mm で固定とし，入射角 θ_i と測定角 θ_o はスクリーンを回転させるかカメラの位置を変えることで変更した．コリメートレンズの焦点距離は f=4.3 mm，7.9 mm，18 mm の 3 種類から選んだ．人間の眼を模擬するために，CCD カメラに設置したアパチャーのサイズは直径 1.0 mm とした．その他の条件は Figure 4.1 に示した実験系と同じである．

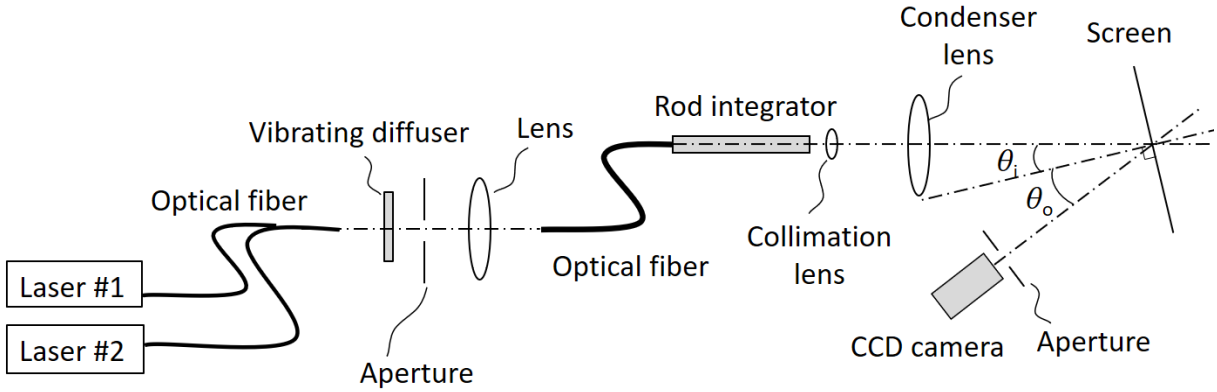


Figure 4.5 Schematic diagram of speckle measurement system using two lasers.

まず，入射角度 θ_i と測定角度 θ_o が波長多重によるスペックル低減に与える影響について測定を行った．スクリーンはシルバースクリーン(Finesilver240)を使用した．コリメートレンズの焦点距離は 7.9 mm で固定し，入射角度及び測定角度を変化させ，レーザー1 つずつのスペックルコントラストとレーザーを 2 つ同時につけた場合のスペックルコントラストを測定した．

Figure 4.6~Figure 4.8 は入射角度と測定角度を変化させた場合のスペックルコントラストを示す．グラフの縦軸は次式から算出した規格化スペックルコントラスト $C_{\mathrm{normalized}}$ を示す．

$$C_{\mathrm{normalized}} = \frac{C_{\#1,2}}{(C_{\#1} + C_{\#2})/2}. \tag{4-2}$$

ここで，$C_{\#1,2}$ は 2 つのレーザーを同時に点灯した場合のスペックルコントラスト，$C_{\#1}$ と $C_{\#2}$ はレーザーを 1 つずつ点灯した場合のコントラストである．

シルバースクリーンでは偏光多重によるスペックル低減はなく，またレーザーが 1 つの場合には波長多重によるスペックル低減もないため，レーザー1 つの場合のスペックルコントラストは角度多重のみによって決定されることがわかっている．一方で，レーザーが 2 つの場合には角度多重に加えて波長多重によるスペックル低減効果が生じる．独立光源数が十分多く，時間多重度 M が空間多重度 K よりも十分大きいときは，角度多重によるスペックル低減効果はレーザーが 1 つの場合も 2 つの場合も同じとなることが期待されるので，レーザーを 2 つ同時につけた場合のコントラストを 1 つずつつけた場合のコントラストで規格化することで波長多重によるスペックル低減効果のみに着目することができる．なお，入射角度が 0°，測定角度が 17°の場合に，波長多重効果が無視できるよう中心波長差が 0.1 nm 以下である 2 つのレーザーのスペックルコントラストを測定すると，1 つずつ点灯した場合が

0.302 と 0.305，2 つ同時に点灯した場合が 0.303 であった．したがって，この実験系においては，角度多重によるスペックル低減効果はレーザーが 1 つの場合も 2 つの場合も同程度となっており，時間多重度 M が十分大きい条件となっていることがわかった．

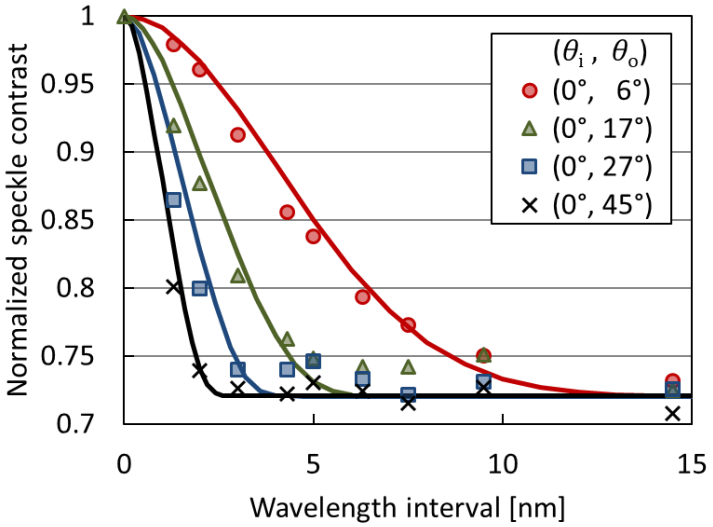


Figure 4.6 Speckle contrast of two lasers divided by the average speckle contrast of each laser. Incident angle is fixed to 0°, and measuring angle is changed from 6° to 45°. Solid lines show the calculated contrast. Adapted with modification from ref. [105].

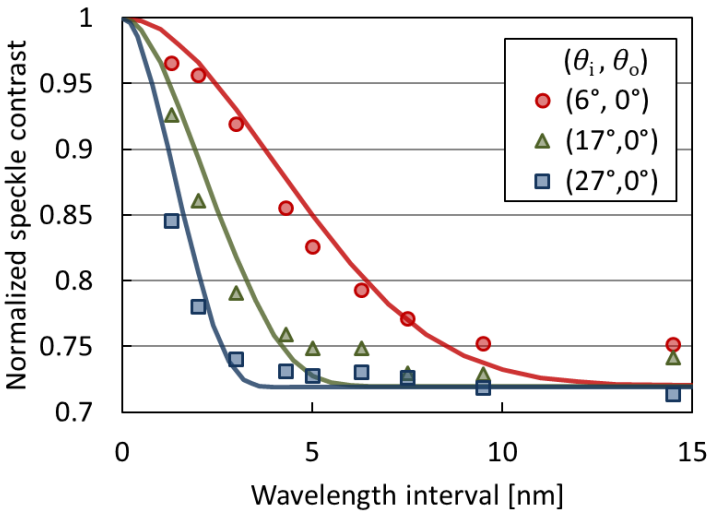


Figure 4.7 Speckle contrast of two lasers divided by the average speckle contrast of each laser. Measuring angle is fixed to 0°, and incident angle is changed from 6° to 27°. Solid lines show the calculated contrast. Adapted with modification from ref. [114].

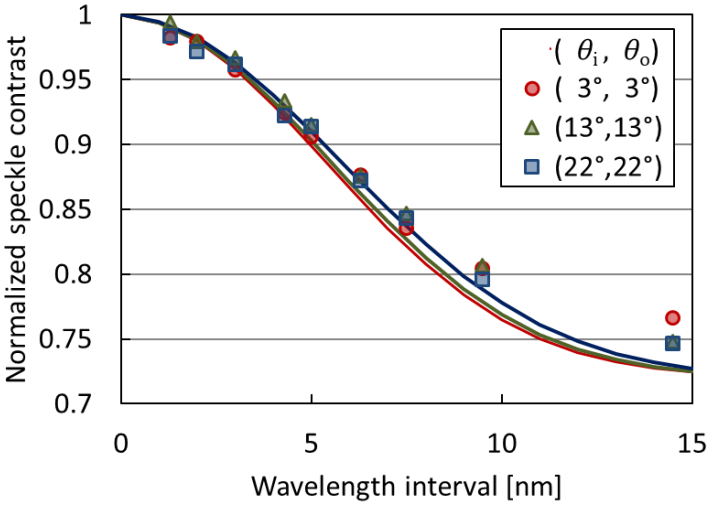


Figure 4.8 Speckle contrast of two lasers divided by the average speckle contrast of each laser. Incident angle and measuring angle are changed together while keeping specular position. Solid lines show the calculated contrast. Adapted partly from ref. [114].

Figure 4.6~Figure 4.8 の結果からわかるように，いずれの条件においても 2 波長の波長間隔が大きくなるほどスペックルコントラストは小さくなった．これは，2 つのレーザーの波長が同じ場合には同一のスペックルパターンを示すが，2 波長の波長差が大きくなると徐々にスペックルパターンの相関が小さくなり，異なるスペックルパターンの重ね合わせとなるためである．波長差が一定値以上になると，2 波長のレーザーが作るスペックルパターンは完全に独立となるため，それ以上波長差を大きくしてもスペックルコントラストは変化しなくなった．2 つのスペックルパターンが完全に独立である場合は，理論的には規格化スペックルコントラストは $1/\sqrt{2}=0.71$ となるが，Figure 4.6~Figure 4.8 に示した実験結果では十分波長差が大きい場合でも規格化スペックルコントラストの測定値は 0.71 よりも大きくなった．これは，本研究の測定結果が式(4-1)に示したようにスペックル以外のノイズを含んだ測定になっているからであると考えられる．

また，これらの結果から 2 波長のスペックルコントラストは入射角度と測定角度に大きく依存することがわかった．Figure 4.6，Figure 4.7 の結果から，一方の角度を 0°で固定した場合にはもう一方の角度が大きくなるほどスペックル低減に必要な波長間隔が小さくなった．一方で，Figure 4.8 に示したように照射角度と測定角

度を常にスクリーンに対して正反射の関係 (θ_i=θ_o)となるように保ちながら両方の角度を変化させると，波長多重によるスペックル低減効果にはほとんど影響がなかった．

Figure 4.6~Figure 4.8 において実線は式(4-1)で表されるスペックルコントラストの理論計算値である．スクリーン散乱時の光路長分布の標準偏差 $2\sigma_l$（以後，σ_lを光路長分布幅と記載する）をフィッティングパラメータとして実験結果から決定し，σ_l=3.2 μm とした．θ_{div}，C_σ と $C_{\text{non-speckle}}$ は 4.1 節に示した 1 波長の実験結果と同じ θ_{div}=0.0015 rad，C_σ=1，$C_{\text{non-speckle}}$=0.06 とし，その他のパラメータは実験値を用いた．Figure 4.6~Figure 4.8 に示したいずれの条件においても，理論計算値は実験結果とよく一致していることがわかった．

4.2.2 角度多重度を変えた場合の波長多重によるスペックル低減効果

次に，同じ実験系で角度多重度を変化させた場合についてスペックルコントラストの測定を行った．入射角度と測定角度は (θ_i, θ_o)=(0°, 17°)で固定し，ロッドインテグレータ後のコリメートレンズの焦点距離を変えることで角度多重度を変化させた．コリメートレンズの焦点距離は，f=18 mm，7.9 mm，4.3 mm として測定を行った．

Figure 4.9 は，コリメートレンズの焦点距離を変えた場合において，2 つのレーザーを同時につけた場合のスペックルコントラストをレーザー1 つずつのコントラストで規格化した値を示す．測定結果から，波長多重によるスペックル低減効果は角度多重の大きさに明らかに依存していることがわかった．角度多重度が大きいほど，スペックル低減に必要な波長間隔が大きくなった．

赤，緑，青の実線はそれぞれ焦点距離が 18 mm，7.9 mm，4.3 mm の場合についてスペックルコントラストを計算した値である．発散角 θ_{div} は 4.1 節と同じ値を採用し，それぞれ 0.0033 rad (f=18 mm)，0.0015 rad (f=7.9 mm)，0.00080 rad (f=4.3 mm)とした．理論計算によって実験結果と同様の結果を再現できた．

ただし，発散角が大きい場合は，波長間隔が小さくなると理論計算値に比べて実験結果のコントラストが少し小さく，理論と実験の乖離が見られた．理論では空間多重度 K に比べて時間多重度 M が十分大きい場合についてスペックルコントラストを計算しているが，発散角が大きいほど K が大きくなるため，発散角が大きい条件では $M \gg K$ が成り立たず，実測と理論計算が乖離した可能性がある．また，f=18 mm

の場合は，4.1 節で言及したようにコリメートレンズで高角度成分が少し遮られている可能性があり，その影響で実測と理論計算にずれが生じた可能性がある．

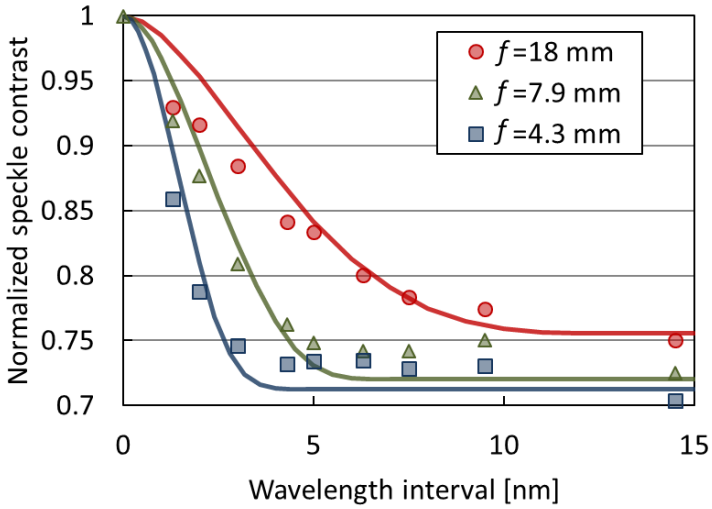


Figure 4.9 Speckle contrast of two lasers divided by the average speckle contrast of each laser. Incident angle and measuring angle are fixed to (θ_i, θ_o)=(0°, 17°). Angular diversity is altered by changing the focal length of the collimation lens. Solid lines show the calculated contrast. Adapted from ref. [105].

4.2.3 スクリーンを変えた場合の波長多重によるスペックル低減効果

次に，Table 2.3 に示したマットスクリーン・パールスクリーン・シルバースクリーン計 7 種類についてスペックルコントラストの測定を行った．コリメートレンズの焦点距離は f=7.9 mm，照射角度と測定角度は(θ_i, θ_o)=(0°, 17°)とした．

Figure 4.10(a)は各スクリーンでのレーザー1 つの場合のスペックルコントラスト，Figure 4.10(b)はレーザー2 つを同時につけた場合のスペックルコントラストをレーザー1 つずつのコントラストで規格化した値を示す．3 種類のシルバースクリーン，3 種類のパールスクリーン，1 種類のマットスクリーンでの測定を行った結果，異なるタイプのスクリーンではスペックルコントラストが大きく異なることがわかった．赤，青，緑の実線はそれぞれシルバースクリーン，パールスクリーン，マットスクリーンについて式(4-1)を用いたスペックルコントラストの計算値を示す．

θ_{div} はスクリーンに依存しないため，全てのスクリーンで 4.1 節と同じ値 θ_{div}=0.0015 rad とし，σ_l と C_σ をスクリーンによって変更した．シルバースクリーン

の計算条件は 4.2.2 項の f=7.9 mm の場合と同じで，σ_l=3.2 μm，C_σ=1 とした．パールスクリーンとマットスクリーンについては，C_σ，σ_l をフィッティングパラメータとした．レーザー1 つの場合は波長多重の効果がなく，角度多重と偏光多重のみによってスペックルコントラストが決まるため，C_σ は Figure 4.10(a)に示したレーザー1 つの場合の測定結果から決定した．σ_l は波長多重の効果に影響を与えるため，Figure 4.10(b)に示したレーザー2 つを同時につけた場合の測定結果から決定した．また，$C_{\text{non-speckle}}$ はマットスクリーンでは 2.3 項に示した結果から 0.01 とし，パールスクリーンはシルバースクリーンと同様に光沢のあるスクリーンであるためシルバースクリーンと同じ値である 0.06 とした．実験結果から求めたフィッティングパラメータは，パールスクリーンが σ_l=10 μm，C_σ=0.9，マットスクリーンが σ_l=30 μm，C_σ=0.5 であった．

なお，シルバースクリーンでの C_σ=1 は偏光多重によるスペックル低減はないことを示している．マットスクリーンでの C_σ=0.5 は偏光多重により最大限スペックルが低減していること，パールスクリーンでの C_σ=0.9 は部分的な偏光解消によるスペックル低減が生じていることを示している．

また，2.1.3 項の Table 2.3 に示したように，レーザー顕微鏡で測定したスクリーンの表面粗さ σ_h は Finesilver 240 が 2.1 μm，Perlux 220 が 3.5 μm，MattPlus が 1.8 μm であった．スクリーンでの散乱が表面での一回散乱の場合，σ_l はスクリーンの表面粗さ σ_h と等しくなるため，表面での一回散乱が支配的なシルバースクリーンでは σ_l と σ_h が同程度の値であった．一方で，偏光を保存しないパールスクリーンとマットスクリーンでは複数回の散乱や体積散乱が生じていると考えられ，スクリーンの表面粗さ σ_h よりも σ_l の方が大きかった．

なお，シルバースクリーンにおいても σ_l が 3.2 μm なのに対して σ_h が 2.1 μm と両者は完全には一致していない．その原因の一つとして，表面粗さの測定範囲の大きさとスペックル測定時の入射光のコヒーレンス領域の大きさが異なることが考えられる．表面粗さの測定範囲は 200 μm × 270 μm なのに対し，コヒーレンス領域の大きさ（横コヒーレンス長）は θ_{div}=0.0015 rad の場合には $\lambda/\theta_{\text{div}}$ ~350 μmと測定範囲よりも大きいため，σ_l と σ_h にずれが生じた可能性がある．

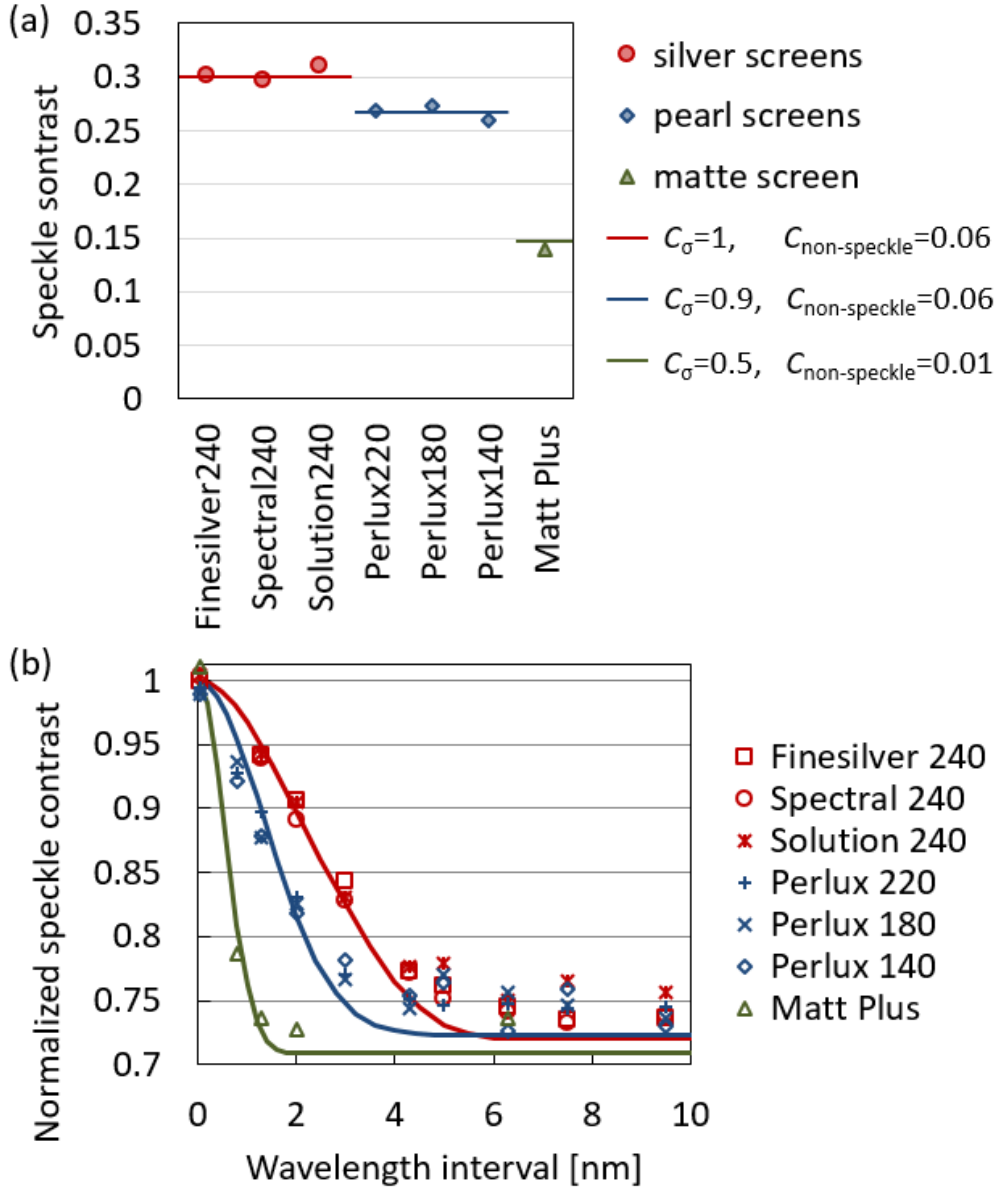


Figure 4.10 Speckle contrast on various screens. (a) The speckle contrast of one laser. (b) The speckle contrast of two lasers divided by the average speckle contrast of each laser. The red, blue, and green solid lines show the calculated contrast when σ_l is 3.2, 10, and 30 μm, the speckle reduction factor by polarization diversity C_σ is 1, 0.9, and 0.5, and the contrast of non-speckle noise $C_{\text{non-speckle}}$ is 0.06, 0.06, and 0.01, respectively. Adapted with modification from ref. [105].

4.2.4 考察

理論計算とスペックルコントラストの測定により，下記の結果が得られた．

- スクリーンに対して垂直方向からスペックルを測定する場合には入射光の入射角度が大きいほど，またスクリーンに対して垂直に入射する場合には測定角度が大きいほど短い波長間隔でスペックルが低減する．
- 入射角度と測定角度を正反射の位置関係に保ったままそれぞれの角度を変化させた場合は，スペックル低減効果は角度に依存しない．
- スクリーン入射光の角度分布が小さいほど短い波長間隔でスペックルが低減する．

これらの結果は，次のように考えることで説明できる．まず，スクリーンに対して入射光が斜めに入射した場合や，斜めからカメラで測定した場合にスクリーンでの散乱波に生じる位相分布について考える．測定角度が垂直で入射光を斜めにスクリーンに入射する場合には，Figure 4.11(a)に示しているようにスクリーンに入射する位置 x によって光路長差が生じる．同様に，垂直に入射して斜めから測定する場合にも，Figure 4.11(b)に示した光路長差が生じる．したがって，入射角，測定角がともに垂直ではない場合には，式(3-16)にも表れているようにスクリーンでの散乱波は次の位相分布 Φ_{oblique} を持つ．

$$\Phi_{\mathrm{oblique}} = \exp\left(2\pi \mathrm{i} x \frac{\sin\theta_{\mathrm{i}} - \sin\theta_{\mathrm{o}}}{\lambda}\right). \tag{4-3}$$

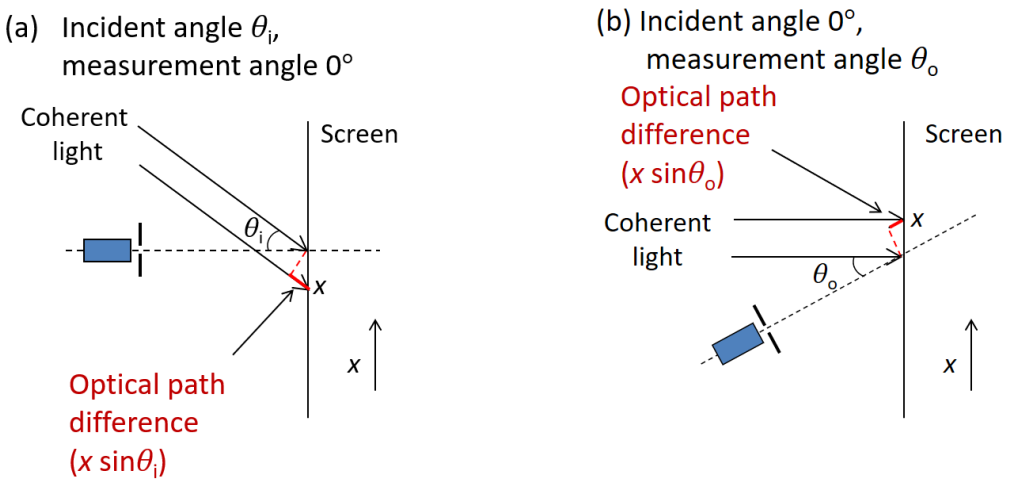


Figure 4.11 Difference in optical path length when incident or measurement angle is not normal to screen. (a) Incident angle is not normal to screen, (b) measurement angle is not normal to screen.

2 波長の光が入射した場合には，それぞれの波長についてスクリーンでの散乱波に生じる位相分布が異なると，異なるスペックルパターンを形成するためパターンが平均化されてスペックルが減少する．2 波長の光の位相分布の差が小さいときには，位相分布の差が大きくなるほどスペックル低減効果も大きくなるが，位相分布の差が一定値を超えるとそれぞれの光がつくるスペックルパターンは完全に異なるものとなるため，さらに位相分布の差を大きくしてもそれ以上はスペックルが低減しなくなる．

式(4-3)から，$\sin\theta_{\mathrm{i}} - \sin\theta_{\mathrm{o}}$が大きいほど 2 波長の波長差に対する位相分布の差が大きくなる．したがって，$\sin\theta_{\mathrm{i}} - \sin\theta_{\mathrm{o}}$が大きいほど短い波長間隔でスペックルが低減できる．$\sin\theta_{\mathrm{i}} - \sin\theta_{\mathrm{o}} = 0$となるのは入射角と測定角がスクリーンに対して正反射の位置関係となっているときであるので，入射角と測定角が正反射の位置関係から離れるほど短い波長間隔でスペックルが低減できる．

このため，Figure 4.6~Figure 4.7 の結果のように入射角と測定角のいずれか一方をスクリーンに対して垂直としている場合には，他方の角度を大きくするほどスペックル低減に必要な波長間隔が小さくなった．また，Figure 4.8 のように，$\sin\theta_{\mathrm{i}} - \sin\theta_{\mathrm{o}}$を一定に保っている場合には，それぞれの角度を変化させてもスペックル低減効果にはほとんど変化がなかった．

次に，2 波長の光が入射するときに，(i)それぞれの光が平行光である場合，(ii)それぞれの光がある程度角度広がりを持ってスクリーンに入射する場合の 2 通りについて考える．(i)の場合に，波長差がある値 $\Delta\lambda_{\mathrm{c}}$ 以上であればスペックル低減効果が飽和すると仮定すると，(ii)の場合で波長差がちょうど $\Delta\lambda_{\mathrm{c}}$ となった場合には，角度広がりがあるため一部の角度成分では 2 波長の位相分布差が(i)の場合よりも小さくなる．したがって，十分にスペックル低減できない成分が表れるため，(i)に比べて(ii)のほうが波長多重によるスペックル低減効果が小さくなると考えられる．角度広がりがさらに大きくなると，より顕著にこの効果が表れると考えられるので，Figure 4.9 の結果のように角度分布が大きいほどスペックル低減に必要な波長間隔が大きくなったと考えられる．

4.3 まとめ

本章では，レーザーを 1 つまたは 2 つ用いた場合のスペックルコントラストの測定を行い，第 3 章で導出したスペックルコントラストの理論式(3-34)による計算結

果と比較することで，理論式の妥当性を検証した．

レーザーを 1 つ用いた実験では，スクリーンの一点から入射光を見込む立体角 Ω_{p} か，カメラアパチャーを見込む立体角 Ω_{d} を変化させることで角度多重度を変化させ，理論計算値との比較を実施した．理論計算に用いる角度分布には，トップハット型の角度分布またはガウシアン型の角度分布を仮定したが，いずれの角度分布を用いた場合でも発散角 θ_{div} をフィッティングパラメータとすることで実験結果とよく一致する結果が得られた．また，角度多重によるスペックル低減は，従来用いられていた近似式 $C_{\Omega}=(\Omega_{\mathrm{d}}/\Omega_{\mathrm{p}})^{0.5}$ よりも小さくなることを示した．

レーザーを 2 つ用いた実験では，スペックル低減に必要な波長間隔がスクリーン入射光の角度広がり，入射角度，及び測定角度に強く依存することを示した．これは，斜め入射や斜め出射によって波長に反比例する位相項がスクリーン散乱光に生じ，波長変化に対する位相の変化量に影響を与えるためである．また，理論計算値と実験結果がよく一致することを示した．この結果は，波長多重によるスペックル低減効果が角度多重度に依存していることを明確に示しており，角度多重と波長多重のスペックル低減効果に依存性があることが実験的にも理論的にも明らかになった．

さらに，映画館でよく使用されるスクリーンであるマットスクリーン，パールスクリーン，シルバースクリーン計 7 種類について，1 波長の場合と 2 波長の場合のスペックルコントラストを測定した．それぞれのスクリーンでの実験結果は，スクリーン散乱時の光路長分布幅 σ_l をシルバースクリーンで 3.2 μm，パールスクリーンで 10 μm，マットスクリーンで 30 μm とすることでよく再現できることを示した．

第 5 章
プロジェクターへの適用

第 4 章では，波長の異なる 2 つのレーザーを用いた原理検証実験として波長多重と角度多重によるスペックル低減効果を実測し，第 3 章において導出した理論モデルを用いた計算結果と比較することで理論モデルの妥当性を示した．本章では理論モデルをレーザープロジェクターへ適用した場合として，プロジェクターと波長の異なる 5 つのレーザーを使用し，波長多重及び角度多重によるスペックル低減効果の測定結果と理論モデルとの比較を行う．さらに，プロジェクターの光源に Xe ランプを用いた場合についてスペックルコントラストを測定し，理論計算結果と比較することで理論モデルがレーザーだけでなく Xe ランプにも適用できることを示す．

また，レーザープロジェクターを用いたスペックルの官能評価についても報告する．最後に，映画館で商用利用されているレーザープロジェクターのスペックル測定を実施した結果を示す．

5.1 レーザープロジェクターでの波長多重及び角度多重によるスペックル低減実験

5.1.1 プロジェクターを用いた実験系

実験方法は 2.4.4 項に示した方法と同じである．Figure 5.1 に示すように，1~5 個の緑色 NECSEL レーザーがバンドルファイバーに入射し，ファイバーの出射光がプロジェクターに入射する．もともと設置してあった Xe ランプをプロジェクターから取り除き，代わりにレンズ，ロッドインテグレータ，拡散板を追加した．プロジェクターから投影される光はシルバースクリーン(Finesilver240)またはマットスクリーン(MattPlus)に垂直に入射した．拡散板は，砂番#400 の砂面で砂掛した擦りガラス状拡散板で，拡散角度が大きいためそれぞれのレーザーは拡散板透過後に類似した角度分布となり，ほぼ同じ角度分布でスクリーンを照射する．そのため，使用するレーザーの数を変化させても角度多重度はほとんど変化しない．スクリーン上の画像サイズはプロジェクター・スクリーン間の距離及び投影レンズの設定を変えることで変更し，840 mm × 1600 mm または 2400 mm × 4500 mm とした．プロジェ

クター・スクリーン間の距離は，画像サイズが 840 mm × 1600 mm のときは 3 m，2400 mm × 4500 mm のときは 13 m であった．スクリーン上に DMD の画素に起因する格子状のパターンが生じないよう，投影レンズはわずかにスクリーンからデフォーカスした．

スクリーン・カメラ間の距離は 700 mm とし，測定角度は θ_o=17°とした．4.2 節で示した実験と同様に，人間の眼を模擬した測定系とするために CCD カメラのレンズの前に直径 1.0 mm の円形のアパチャーを設置した．スペックルの測定位置は，スクリーン中央から 200~300 mm 程度左の位置とした．

なお，投影レンズをわずかにデフォーカスしても角度多重によるスペックル低減に影響しないことが期待される．これは，角度多重度はスクリーン上の測定点から投影レンズの照射エリアを見込む立体角で決まるが，投影レンズをわずかにデフォーカスしても立体角はほとんど変わらないためである．実際に，フォーカスの位置をスクリーンから約 0.2 m 手前側，1 m 奥側及び 3 m 奥側の 3 パターンで変化させてスペックルを測定しても，3 条件でのスペックルコントラストの差はほとんどなく，デフォーカスはスペックルコントラストにほとんど影響を与えないことがわかった．

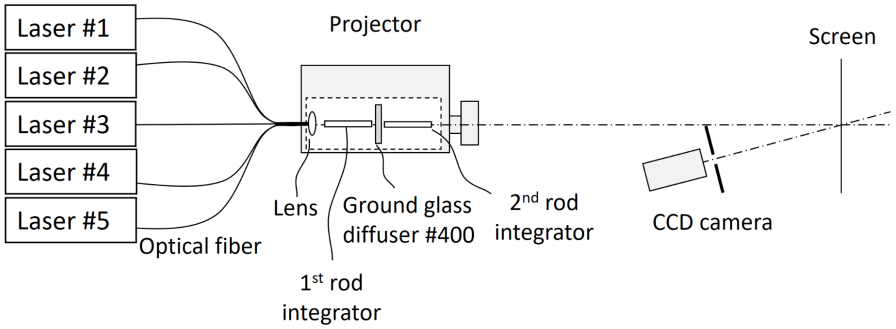


Figure 5.1 Schematic diagram of laser projector and speckle measurement system.

5.1.2 シルバースクリーンにおけるスペックル低減

まず，シルバースクリーンで画像サイズを変えた場合のスペックルコントラストを測定した．レーザーを 1 つだけ使用した場合について 2 つの画像サイズで測定を行った結果，スペックルコントラストは画像サイズが 840 mm × 1600 mm のときに 0.18~0.20 程度，画像サイズが 2400 mm × 4500 mm のときに 0.38~0.40 程度であった．

シルバースクリーンは偏光を保存するため，2.4.1 項に示したように偏光多重によるスペックル低減効果がない(C_σ=1)．また，レーザー1 つの波長幅は 0.1~0.2 nm であり，ガウシアンスペクトルの場合のスペックルコントラストの式(1-2)に代入すると波長多重によるスペックル低減は 0.1%以下となるため，波長多重によるスペックル低減効果も無視できる．したがって，スペックルコントラストは角度多重によるスペックル低減のみによって決まる．

角度多重によるスペックル低減は，1.2.2 項及び 2.4.2 項で示したとおり，光源数が十分多い場合には K を空間多重度として $C \approx 1/\sqrt{K}$ で表される．Figure 2.21 に示したように，投影倍率が大きくなるほどスクリーン上の測定点から投影レンズを見込む角度は小さくなり，空間多重度 K も小さくなるため，画像サイズが大きいほどスペックルコントラストが大きくなったと考えられる．

次に，波長の異なるレーザーを 2 つ使用した場合のスペックルコントラストを測定した．Figure 5.2 はレーザーを 2 つ同時に点灯した場合のスペックルコントラストをレーザー1 つずつ点灯した場合のコントラストの平均値で規格化した値を示す．赤の実線及び青の破線は式(4-1)を用いて計算した理論計算値である．

Figure 5.2 に示したように，スペックル低減に必要な波長間隔は画像サイズによって異なる．画像サイズが小さい場合，スペックル低減には大きな波長間隔が必要であるが，これは画像サイズを変化させると角度多重度が変化するためである．4.2.2 項に示したように，角度多重度が大きいほどスペックル低減に必要な波長間隔は大きくなるため，画像サイズが小さいほうが大きな波長間隔が必要になる．

理論計算では C_σ=1，θ_{div}=0.0027 rad（Figure 5.2 の赤実線）及び θ_{div}=0.0011 rad（Figure 5.2 の青破線）として計算した．他のパラメータは実際の実験系から取得した．Figure 2.21 に示したように，スクリーン上での発散角 θ_{div} と投影レンズの投影倍率 m から DMD 上での発散角 θ_{DMD} を求めることができる．本研究で使用したプロジェクターに搭載されている DMD は画素数が 2048×1080 ピクセルで，対角 1.2 インチであるため，計算で使用した θ_{div} に対応する DMD 上での発散角は 9.2~10.5° に相当する．投影レンズの f-number は F/2.5 であり，角度に変換すると 11.5°に相当するため，理論計算に用いた発散角 θ_{div} は妥当な値である．

なお，発散角は投影倍率におよそ反比例するため，画像サイズと発散角 θ_{div} は反比例するはずであるが，2 種類の画像サイズについて計算に用いた θ_{div} と画像サイズは反比例の関係から少しずれが生じている．この原因としては，スクリーン上の測定位置が中央からずれた位置であることが考えられる．投影レンズの f-number は

画像の中央と端では異なる値となっているため，画像サイズを変えた際に測定箇所の f-number が変化した可能性がある．

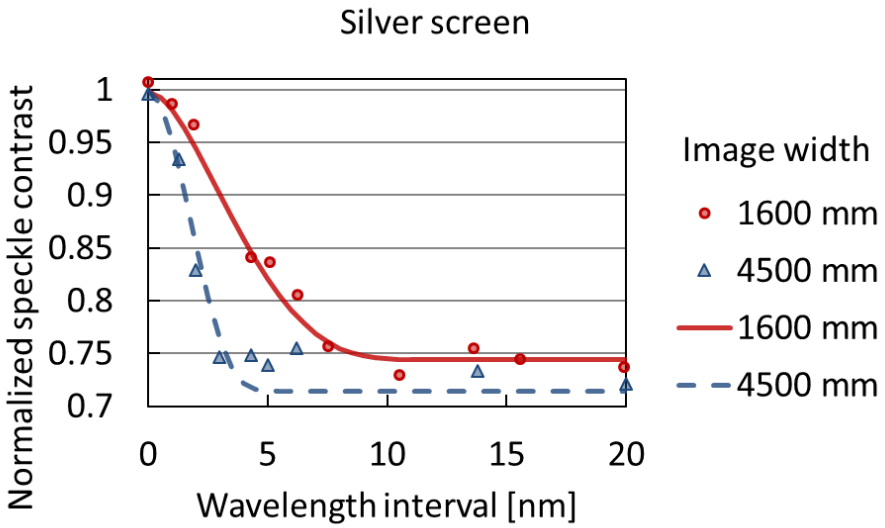


Figure 5.2 Measured and calculated speckle contrast of two lasers with various wavelength intervals normalized to the average speckle contrast of one laser. The red and blue lines are the calculated speckle contrast by Eq. (4-1) when the image size is 840 mm × 1600 mm and 2400 mm × 4500 mm, respectively. Adapted from ref. [109].

次に，レーザーを 1~5 個使用した場合のスペックル測定結果を理論計算結果と比較するため，Table 5.1 に示した波長間隔の異なる 3 セットのレーザーを用いて多波長レーザーによるスペックル低減効果を測定した．それぞれのレーザーセットの波長間隔は 0.1 nm 以下，1 nm 程度，6 nm 程度の 3 種類である．

Table 5.1 List of wavelengths of lasers.

Laser set	Wavelength intervals	Wavelength (nm)				
		#1	#2	#3	#4	#5
1	<0.1 nm	534.3	534.3	534.4	534.4	534.4
2	~1 nm	530.1	531.4	532.5	533.5	534.4
3	~6 nm	523.9	530.1	536.4	543.9	550.1

Figure 5.3 は，画像サイズが 840 mm × 1600 mm の場合と 2400 mm × 4500 mm の場合に，レーザーを 1~5 個同時につけて測定したスペックルコントラストを示す．複数のレーザーを同時につけるときには波長の短い順に使用した．レーザーが 1 つのときは，画像サイズが大きいほうが角度多重度は小さくなるためスペックルコントラストが大きくなった．2 つ以上のレーザーを使用する場合は，角度多重と波長多重の両方によってスペックルコントラストが低減された．波長間隔が 0.1 nm 以下のときは，画像サイズによらずレーザー1 つの場合と 5 つの場合のスペックルコントラストの差は小さく，ほとんどスペックル低減効果がなかった．一方で波長間隔が 6 nm のときは，画像サイズに関わらずレーザーの個数が増えるほどスペックルが低減した．これは，Figure 5.2 に示したように 0.1 nm の波長間隔は波長多重によってスペックルを低減させるには小さすぎるが，6 nm の波長間隔はスペックル低減に十分であるためである．波長間隔が 1 nm のときは画像のサイズによって異なるスペックル低減効果が得られた．画像サイズが小さい場合には 1 nm の波長間隔ではスペックル低減効果は僅かであるが，画像サイズが大きい場合には明らかにスペックルが低減した．

波長間隔が 0.1 nm 以下の場合には波長多重によるスペックル低減効果がほとんどなく，角度多重によってスペックルコントラストが決まるため，スペックルコントラストは$C = 1/\sqrt{MK/(M+K\pm 1)}$とかける．この実験系ではレーザーの個数を変えても K はほとんど変化しないため，レーザーの個数を変えると M だけが変化すると考えられる．Figure 5.3 に示したように波長間隔 0.1 nm 以下ではレーザーの個数を増やしてもスペックルコントラストはほとんど変化していないことから，この実験系ではレーザーを 1 つだけ使用した場合においても M が K よりも十分大きいことがわかった．

Figure 5.3 で赤，緑，青の実線は，波長間隔を 0.1 nm 以下，1 nm，6 nm としたときに式(4-1)を用いて計算したスペックルの理論計算値を示す．Figure 5.2 の実験と同じ実験系であるため，θ_{div} は同じ値を用いた．理論計算値と測定結果がよく一致することがわかった．

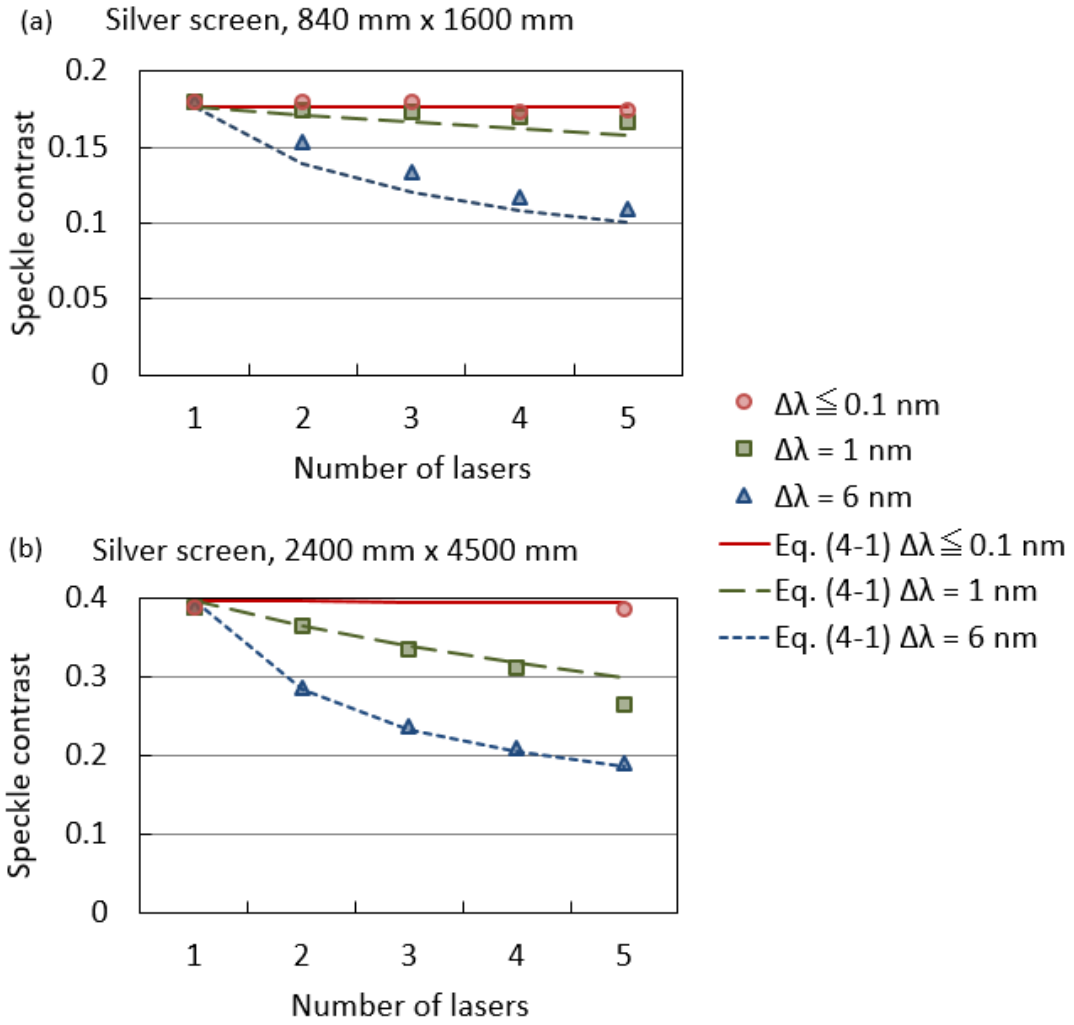


Figure 5.3 Speckle contrast of up to five lasers with various wavelength intervals. The image size is (a) 840 mm × 1600 mm and (b) 2400 mm × 4500 mm. The solid lines show the calculated speckle contrast by Eq. (4-1). Adapted from ref. [109].

5.1.3 マットスクリーンにおけるスペックル低減

次に，マットスクリーンにおいて同様の実験及び理論計算を実施した．理論計算には式(4-1)を用いた．入射光の偏光は光ファイバーによって偏光解消され無偏光に近い状態となっており，またスクリーンでの偏光解消も生じるため，偏光多重によるスペックル低減は C_σ=0.5 とした．また，カメラのショットノイズやスクリーン上のパターンによって生じる non-speckle noise は 4.2.3 項と同様に $C_{\text{non-speckle}}$=0.01 とした．Figure 5.4 は 2 つのレーザーを同時につけた場合の規格化スペックルコントラスト(Figure 5.4(a))と，様々な波長間隔のレーザーを最大 5 個使用した場合のス

ペックルコントラスト(Figure 5.4(b,c))を示す．実線及び破線は理論計算である．Figure 5.4(a)から，スペックル低減に必要な波長間隔はおよそ 1~2 nm であることがわかった．

Figure 5.4(b,c)に示したように，波長間隔が 1 nm の場合と 6 nm の場合では実験結果と理論計算値がよく一致しているが，波長間隔が 0.1 nm の場合には実験結果と理論計算値に乖離が見られる．また，Figure 5.4(a)に示した画像幅 4500 mm の結果では波長間隔が 0 nm の場合に規格化スペックルコントラストの測定値が 0.9 程度となっており，理論値よりも低い値となった．これらの乖離の原因の一つとして，時間多重度 M が空間多重度 K に比べて十分大きくなかった可能性がある．マットスクリーンでは偏光多重度が 4 であるため，偏光多重度が 1 であるシルバースクリーンに比べると同じ時間多重度を得るためには 4 倍の数の独立な光源が必要となる．したがって，シルバースクリーンでは独立な光源数は十分であっても，マットスクリーンでは十分でなかった可能性がある．$M \gg K$ が成り立たない場合には，同一の波長の光源数を増やした場合に M が増加することでスペックルコントラスト低減が生じる．

また，マットスクリーンでは波長間隔が 1~2 nm 以下であれば十分なスペックル低減効果が得られているが，Figure 4.10 や Figure 5.4(a)において波長間隔 1~2 nm 以下の実験データは数点と非常に少ない．そのため，実験結果のフィッティングによる光路長分布幅 σ_l の算出に誤差が大きく，実験結果と理論計算に乖離が生じた可能性がある．

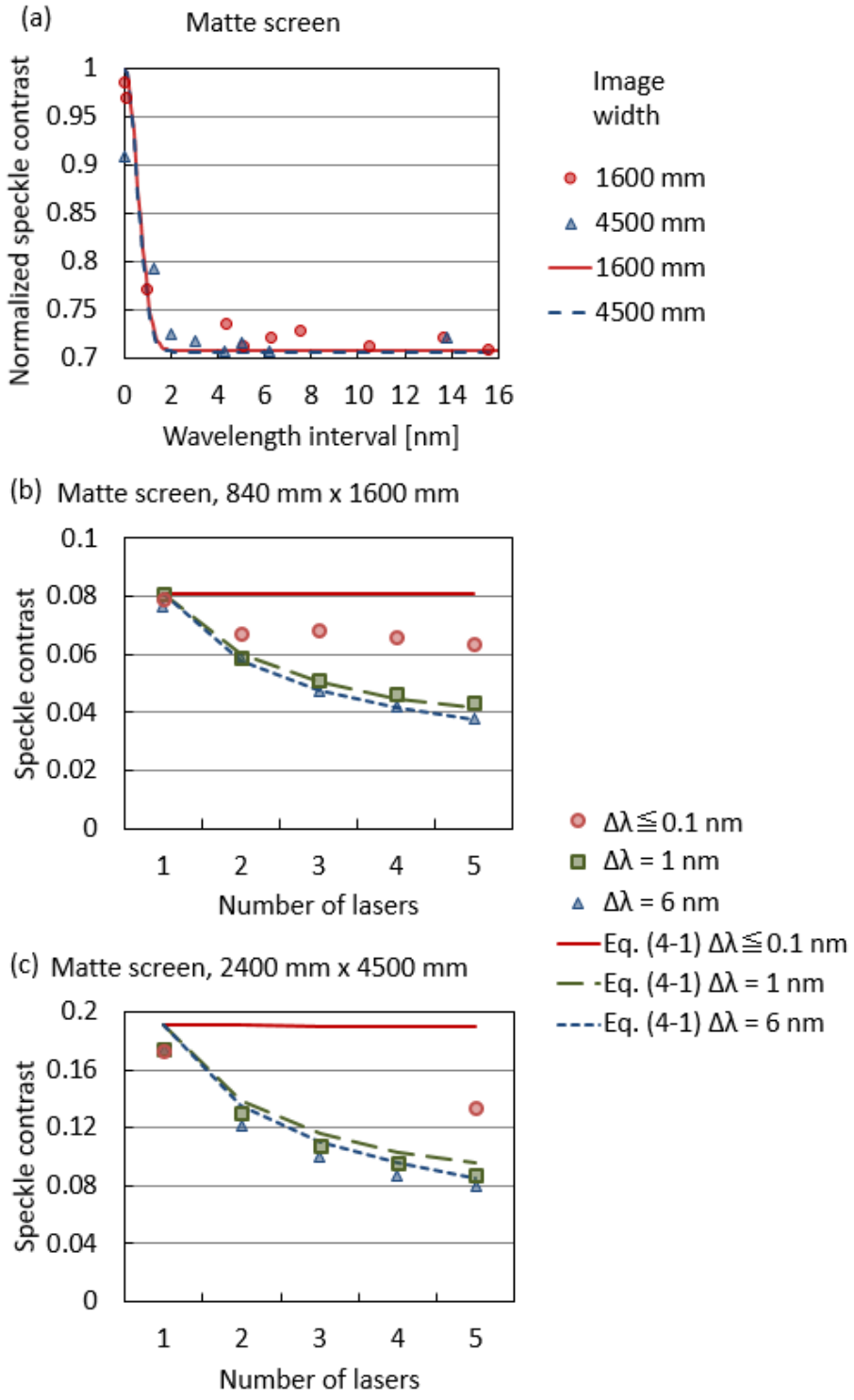


Figure 5.4 Speckle contrast on matte screen. (a) The speckle contrast of two lasers with various wavelength interval normalized to the speckle contrast of one laser. (b), (c) The speckle contrast of 1~5 lasers with various wavelength intervals with the image size of (b) 840 mm × 1600 mm, and (c) 2400 mm × 4500 mm. The solid lines show the calculated contrast. Adapted from ref. [109].

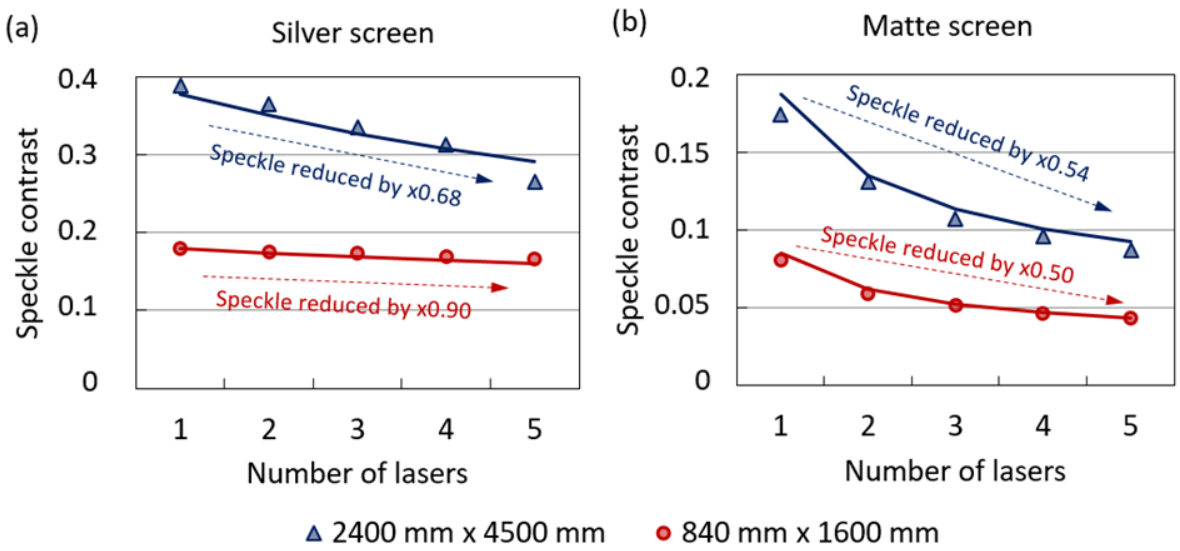


Figure 5.5 Comparison between speckle contrast on matte and silver screen using 1~5 lasers with ~1 nm wavelength interval. Image size is 840 mm × 1600 mm and 2400 mm × 4500 mm. Solid lines show the calculated speckle contrast.

シルバースクリーンとの比較のため，Figure 5.3 及び Figure 5.4(b,c)で波長間隔が 1 nm の場合の結果を Figure 5.5 に示す．シルバースクリーンでは画像サイズによって波長多重によるスペックル低減効果に明らかな差が生じていたが，マットスクリーンではほとんど違いが無い結果となった．

画像サイズにより波長多重の効果が変化する原因は式(3-24)で表されるスペックル場の相関関数 $\mu_A=\Lambda\times\Psi$ のうち，Ψ が画像サイズに依存するためである．したがって，$\Delta\lambda$ が増加した際に Ψ よりも十分早く Λ が減少すると，Ψ の変化はスペックルコントラストにはほとんど影響を与えず画像サイズによる違いが生じなくなる．マットスクリーンでは Λ が支配的な項であるため画像サイズが波長多重の効果に影響を与えなかったと考えられる．Table 5.2 に本研究の実験系で Λ や Ψ がほぼ 0 まで減少するときの $\Delta\lambda$ の値を示す．本研究の実験系では，Ψ がほぼ 0 まで減少するのは画像サイズが大きい場合で $\Delta\lambda$ が 6 nm 程度，小さい場合で $\Delta\lambda$ が 12 nm 程度になったときである．一方，Λ がほぼ 0 まで減少するのはマットスクリーン(σ_I=30 μm)の場合で $\Delta\lambda$ が 1.5 nm 程度，シルバースクリーン(σ_I=3.2 μm)の場合で $\Delta\lambda$ が 15 nm 程度となったときである．したがって，シルバースクリーンでは Ψ のほうが Λ よりも早く減少するために画像サイズの影響が表れていたが，マットスクリーンでは Λ のほうが Ψ よりも早く減少するため画像サイズの影響が生じなかった．

Table 5.2 The range of $\Delta\lambda$ at which Λ or Ψ becomes nearly zero.

Conditions		$\Delta\lambda$ at which Λ or Ψ becomes nearly zero.	
Screen	Image size	Λ	Ψ
Matte screen	Small	$\Delta\lambda > 1.5$ nm	$\Delta\lambda > 12$ nm
Matte screen	Large	$\Delta\lambda > 1.5$ nm	$\Delta\lambda > 6$ nm
Silver screen	Small	$\Delta\lambda > 15$ nm	$\Delta\lambda > 12$ nm
Silver screen	Large	$\Delta\lambda > 15$ nm	$\Delta\lambda > 6$ nm

5.2 Xe ランププロジェクターとレーザープロジェクターのスペックル比較

次に，2.4.3 項で示した Xe ランプとバンドパスフィルターを用いた場合のスペックルコントラストと，5.1 節で示したレーザーで多波長化した場合の結果を比較することで，離散的なスペクトルによる波長多重と連続スペクトルによる波長多重とを比較した．Figure 5.6(a)に Xe ランププロジェクターのスペクトルを再掲する．レーザーは Table 5.1 の Laser set 3 を使用した．なお，2.4.3 項で使用した Xe ランププロジェクターと 5.1 節で使用したプロジェクターは同一のものであり，5.1 節では Xe ランプを取り除いて使用した．画像サイズは 840 mm × 1600 mm とした．

Figure 5.6(b,c)の丸及び三角のプロットは Xe ランプのスペックルコントラストと 6~7 nm の波長間隔で複数波長のレーザーを用いたレーザープロジェクターのスペックルコントラストの測定結果を示す．Xe ランプとレーザーでスペクトル幅が同程度の場合，シルバースクリーンではスペックルコントラストがほぼ同程度となったが，マットスクリーンではスペックルコントラストに大きな差が見られた．

マットスクリーンとシルバースクリーンで異なる挙動を示した原因としては，スペックル低減に必要な波長間隔がスクリーンにより異なることが考えられる．Figure 5.2 及び Figure 5.4(a)の結果から，画像サイズが 840 mm × 1600 mm の場合，波長多重によってスペックルを低減するためにはシルバースクリーンでは 8 nm 程度，マットスクリーンでは 1~2 nm 程度必要であることがわかる．したがって，シルバースクリーンでは 8 nm 以下のスペクトル構造はスペックル低減に大きく影響しないため，本研究の結果では連続スペクトルの場合と離散スペクトルの場合で同程度のスペックル低減効果が得られたと考えられる．一方で，マットスクリーンの場合には 1~2 nm 程度の波長間隔があればスペックルが低減できるため，全体のスペクトル幅が同じ場合でも 6~7 nm 間隔の離散スペクトルよりも連続スペクトルの

ほうがよりスペックルが低減したと考えられる．

Figure 5.6(b,c)の破線と点線はそれぞれレーザーと Xe ランプのスペクトルを用いた場合のスペックルコントラストの計算値を示す．式(4-1)において，これまでの計算と同様にマットスクリーンでは $C_{\text{non-speckle}}$=0.01，C_{σ}=0.5，シルバースクリーンでは $C_{\text{non-speckle}}$=0.06，C_{σ}=1 とした．$C_{\lambda,\Omega}$ の計算に使用するスペクトル以外のパラメータは Xe ランプとレーザーで同一とした．理論計算によって実験結果をよく再現できることがわかった．

なお，Xe ランプのスペクトルは Figure 5.6(a)に示したように連続スペクトルであるため，直接式(3-34)を用いてスペックルコントラスト $C_{\lambda,\Omega}$ を計算することができない．そこで，マットスクリーンでは 0.1 nm 間隔，シルバースクリーンでは 0.5 nm 間隔でスペクトルを離散化することでスペックルコントラストの計算を実施した．

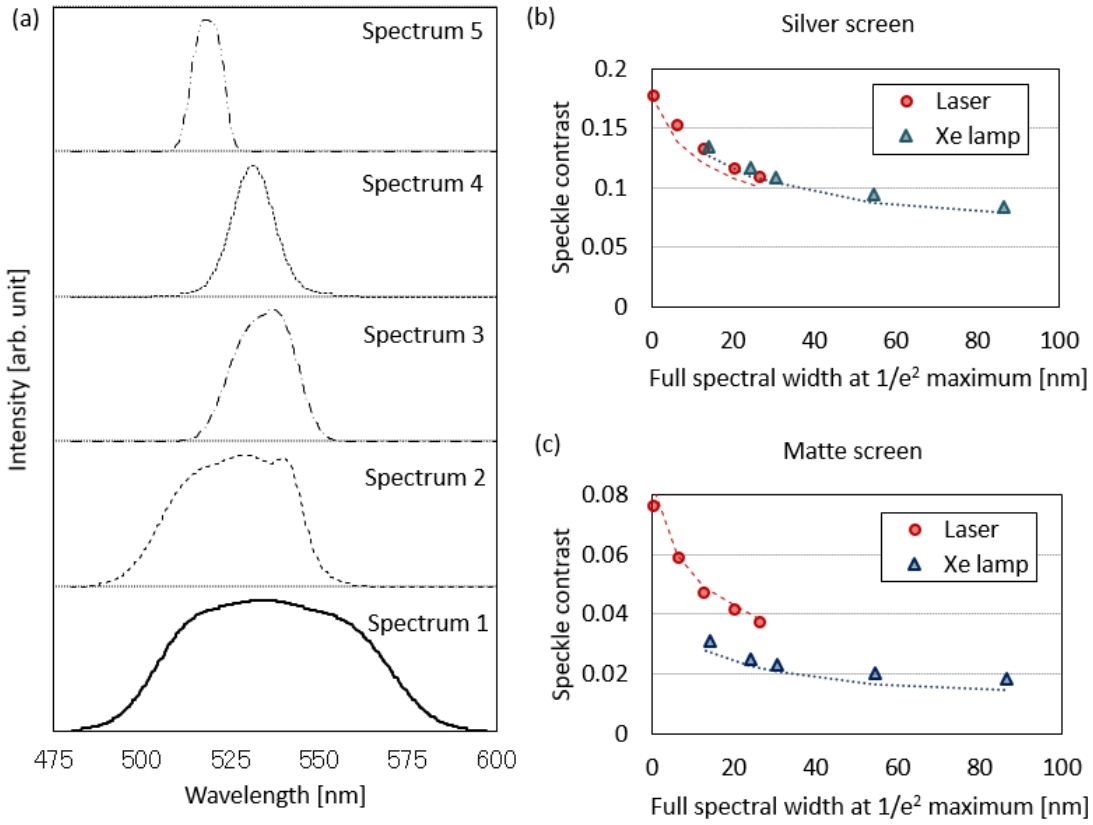


Figure 5.6 (a) Spectra of green light from a Xe lamp projector. (b,c) Speckle contrast of a projector with Xe lamp or lasers on: (b) silver screen; and (c) matte screen. Dashed and dotted lines show the calculated speckle contrast for lasers and Xe lamp, respectively. Adapted partly from ref. [112].

5.3　官能試験によるスペックルの評価

次に，レーザープロジェクターで表示した画像について，多波長化によるスペックル低減効果と，画像の明るさによるスペックルの見え方の違いを官能試験によって評価した．その結果，1 波長から 5 波長に多波長化することでスペックルが気にならない・見えないと回答する被験者の割合が大幅に増加し，多波長化によるスペックル低減効果が確認できた．また，スペックルコントラストが同じ場合には画像が明るい方がスペックルを知覚しやすいことが明らかになった．

5.3.1 輝度またはスペックルコントラストが異なる画像の見え方に関する官能評価

実験系は Figure 5.1 に示した系と同じである．画像サイズは 2400 mm × 4500 mm とし，全面に均一なパターンとした．Table 5.1 の Laser set 1（波長間隔 $\Delta\lambda$<0.1 nm）と Laser set 3（波長間隔 $\Delta\lambda$~6 nm）のそれぞれ 5 つのレーザーを同時に点灯させた場合について 2 種類の官能試験を行った．官能試験の参加者は 42 名であり，参加者の属性を Table 5.3 に示す．

試験は Table 5.4 に示した 3 つの条件で実施した．画像の輝度は，プロジェクターの投影パターンを輝度 100%の均一な画像と輝度 20%の均一な画像から選択することで変更した．輝度は DMD のデューティー比によって調整されている．また，それぞれの条件下でのスペックルコントラストも Table 5.4 に示した．スペックルコントラストの測定方法は 5.1 節の方法と同じであり，スクリーン・カメラ間の距離 700 mm，測定角度 θ_o=17°，CCD カメラのレンズ焦点距離 50 mm，レンズの前に設置したアパチャーサイズ 1.0 mm とした．2.2.4 項に示したように画像の明るさはスペックルコントラストには影響を与えないため，同じ Laser set を使用した場合は輝度が異なってもスペックルコントラストは同じである．スクリーンはマットスクリーンとシルバースクリーンを用いた．

Table 5.3 Participant attributes of the sensory test.

Participant attribute		Number of participant
Gender	Male	34
	Female	8
Age	20-29	7
	30-39	16
	40-49	12
	50-59	7
Previous experiences on speckle phenomena in laser projectors	Those who are acquainted with speckle phenomena.	11
	Those who are not acquainted with speckle phenomena.	31

Table 5.4 Measured speckle contrast in each condition.

Condition	Laser set	Luminance [cd/m^2]	Speckle Contrast
(a)	1	11 on matte screen	0.17
		23 on silver screen	0.39
(b)	3	11 on matte screen	0.08
		23 on silver screen	0.19
(c)	3	48 on matte screen	Same as condition (b)
		99 on silver screen	

1 つ目の官能評価の手順を下記に示す.

1. スクリーンのすぐ近くに立ち，スペックルが見えるかどうかを判断する.
2. 1 m 下がってスペックルが見えるかどうか判断する.
3. スペックルが見えなくなるか，スクリーンから 12 m の位置に下がるまで手順 2 を繰り返す.

1 つ目の官能評価の結果を Figure 5.7 に示す. 同じ輝度の結果 Figure 5.7(a,b)を比較すると，スペックルコントラストが大きい Laser set 1 のほうが遠くからでもスペ

ックルを感知できることがわかった．スペックルコントラストは同じで輝度だけ変えた結果 Figure 5.7(b,c)を比較すると，輝度が高いほうが遠くからスペックルを感知できることがわかった．

次に，2 つ目の官能評価の手順を下記に示す．

1. スクリーンから 4 m の位置に立つ．
2. スペックルを下記 4 段階で評価する：1. 不快，2. 気になる，3. 見えるが気にならない，4. 見えない．

Figure 5.8 に 2 つ目の官能評価の結果を示す．マットスクリーンでは，多くの被験者が 3 条件全てで見えない，または見えるが気にならないと回答した．シルバースクリーンでは，1 波長のみの Laser set 1 の場合にはほとんどの被験者が不快，または気になると回答した(Figure 5.8(a))が，同じ輝度で 5 波長使用した Laser set 3 の場合には半数以上の被験者が見えるが気にならない，または見えないと回答し(Figure 5.8(b))，波長多重によりスペックルコントラストが低下するとスペックルが感知しにくくなることがわかった．しかし，5 波長でも輝度が高い場合には多くの被験者が不快，または気になると回答し(Figure 5.8(c))，1 つ目の官能評価結果と同様に輝度によってスペックルの見え方が大きく変わることがわかった．

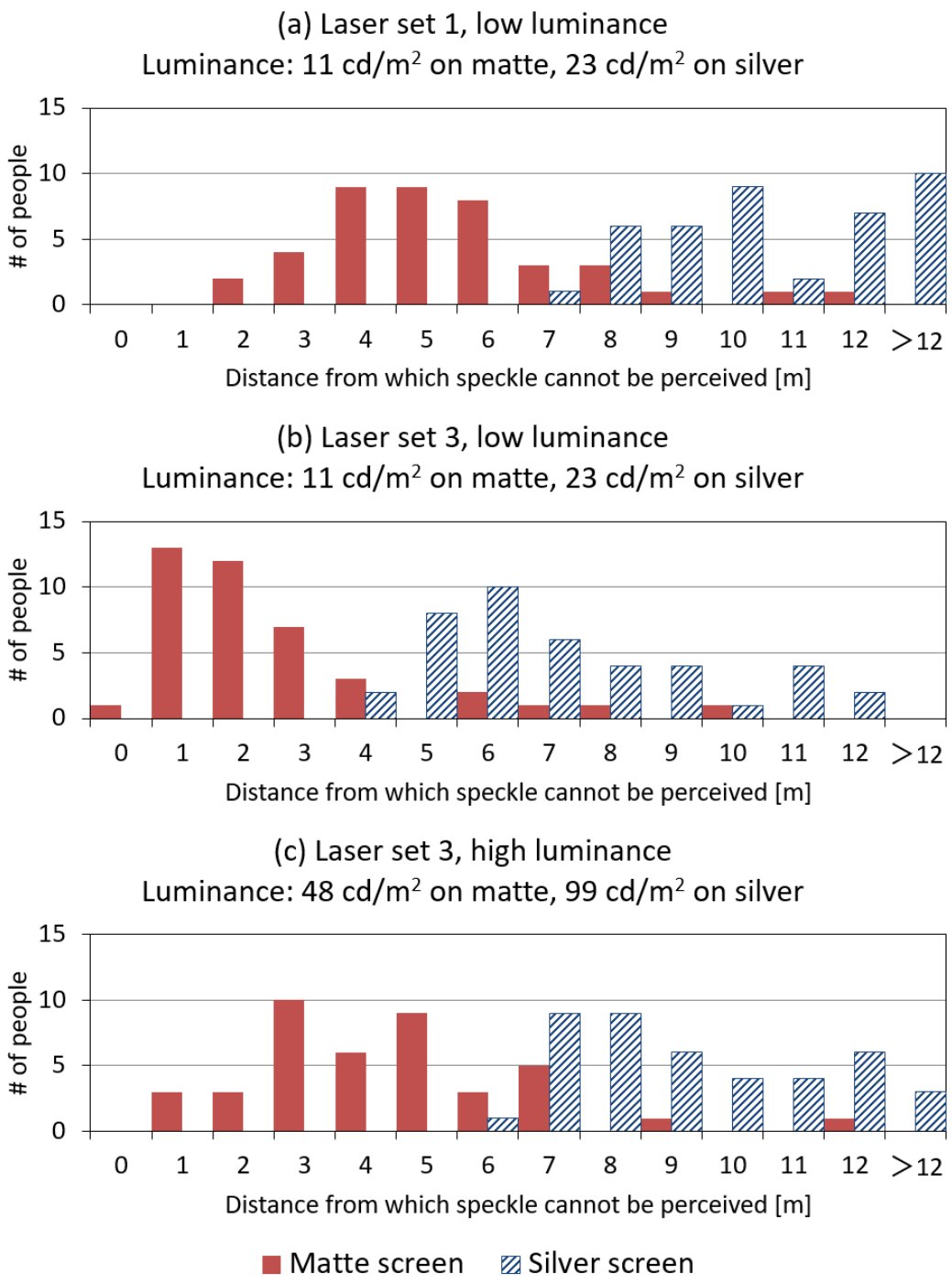


Figure 5.7 Distance from which speckle cannot be perceived. (a) Laser set 1, low luminance, (b) laser set 3, low luminance, and (c) laser set 3, high luminance. Adapted partly from ref. [111].

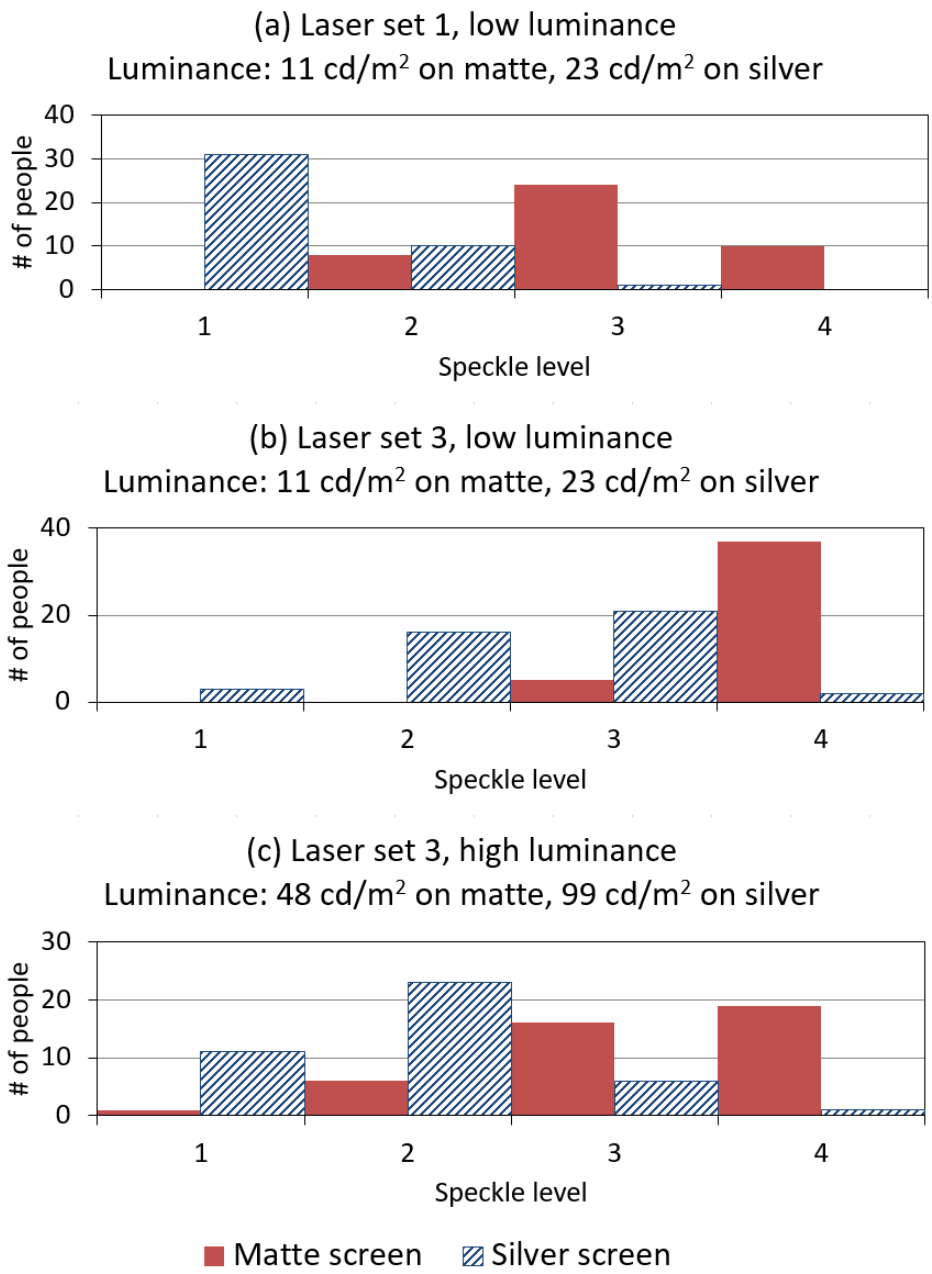


Figure 5.8 Speckle evaluation results on a four level scale (1. very annoying, 2. annoying, 3 visible, but acceptable, 4 imperceptible) at 4 m apart from the screen. (a) Laser set 1, low luminance, (b) laser set 3, low luminance, and (c) laser set 3, high luminance. Adapted partly from ref. [111].

5.3.2 考察

これら 2 つの結果から，単色スペックルの見え方はスペックルコントラストのみで決まるわけではないことが明らかになった.スペックルコントラストが同じでも，明るい画像のほうが明らかにスペックルは感知しやすかった.

明るい画像のほうがスペックルを感知しやすい一つの原因としては，明るさが人間の瞳孔の大きさに影響を与えることが考えられる．2.4.2 項に示したように，カメラではアパチャーサイズが大きくなるほどスペックルコントラストも大きくなる．これは，アパチャーサイズが大きくなるとカメラの解像度が高くなることに起因している．一方で人間の目では，瞳孔サイズが大きくなると収差が大きくなり解像度が低くなる．そのため，人間の眼の瞳孔サイズが小さくなると，対応するカメラアパチャーのサイズは大きくなることが報告されている [104]. したがって，人間の眼の場合には CCD カメラとは逆に，瞳孔サイズが小さくなるほど網膜上でのスペックルコントラストは大きくなると考えられる．そのため，輝度が高い画像のほうが網膜上のスペックルパターンのスペックルコントラストは大きくなり，スペックルが感知しやすくなると考えられる.

他の要因としては，瞳孔サイズによって網膜上でのスペックルの大きさが変わるためにスペックルの見え方が変化した可能性がある．Figure 2.6 に示したように，スペックルをカメラで測定した場合にはアパチャーサイズによって CCD センサー上のスペックルサイズが変化する．人間の眼でスペックルを観測する場合には，瞳孔サイズによって網膜上でのスペックルサイズが変化し，スペックルの見え方に影響を与えると考えられる.

5.4 映画館におけるスペックルの測定

最後に，映画館においてレーザープロジェクターのスペックルコントラストを測定した結果を示す．測定を実施した映画館では，プロジェクター側でのスペックル低減が不十分であったために振動スクリーンを設置している．そこで，スペックル測定と理論計算によって振動スクリーンなしでスペックルを低減するための方法を検討した.

なお，測定したレーザープロジェクターでは赤・緑・青全てにレーザーを用いているが, 1.3.3 項で述べたように青はスペックルを知覚しにくくスペックルが問題となることがほとんどないため，スペックルの測定は赤と緑のみについて実施した.

5.4.1 スクリーン振動オン・オフでのスペックルコントラストの違い

Table 5.5 及び Figure 5.9 に映画館でのスペックル測定条件を示す．スペックル測定には Table 2.1 で示した測定器を用い，CCD カメラに直径 1.0 mm のアパチャーを設置した．映画館での目視によるスペックル確認は，観客が入りやすい後方中央の座席付近で実施されることが多く，この映画館ではスクリーンからの距離がおよそ 15 m の位置に相当する．そのため，カメラの設置位置はスクリーンから 15 m の位置とした(Figure 5.9(a))．スクリーン上でのスペックル測定点は，スクリーン中心（Figure 5.9(b)の A 点）とした．カメラからスクリーン上の A 点を測定する際の測定角度は, 距離 15 m ではほぼ垂直であった. CCD カメラの露光時間は 30 s とした．Figure 5.10 にプロジェクターから投射される光のスペクトルを示す．緑色は 3 波長，赤色は 2 波長使用している．

Table 5.6 に測定したスペックルコントラストを示す．赤，緑それぞれについてスクリーンを振動させた場合と静止させた場合のスペックルコントラストを測定した．振動 off でのスペックルコントラストは赤が 0.045 に対し緑が 0.021 であり，緑のほうがスペックルコントラストは小さかった．これは，赤が 2 波長に対し緑が 3 波長と波長数が多く，またそれぞれの波長の波長幅も緑のほうが大きいためであると考えられる．スクリーンの振動を on にすると，赤も緑もスペックルコントラストが 0.012 まで低下した．

Table 5.5 Measurement condition at a movie theater.

#	Item	Description
1	Projector	CP4330-RGB (Christie Digital Systems) 1.38” 4K DMD
2	Screen	Perlux180 (Harkness Screens)
3	Screen size	18.4 m × 7.7 m
4	Auditorium size	~19 m × 22 m
5	Projection angle	7° (downward)

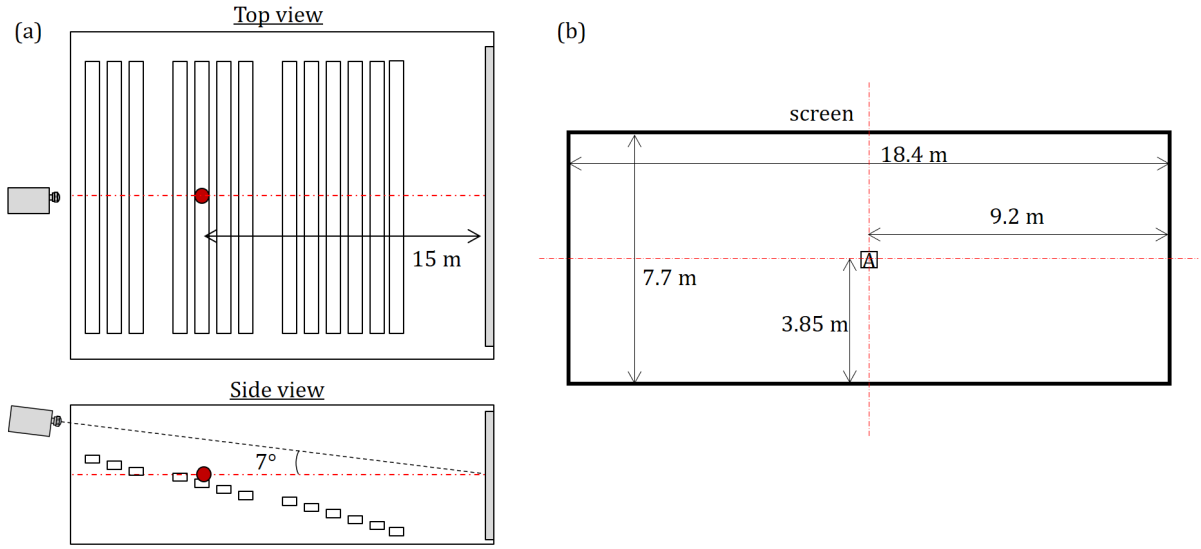


Figure 5.9 (a) Speckle measurement setting in the auditorium. Speckle was measured from the red point. (b) Screen size and speckle measurement point A on screen.

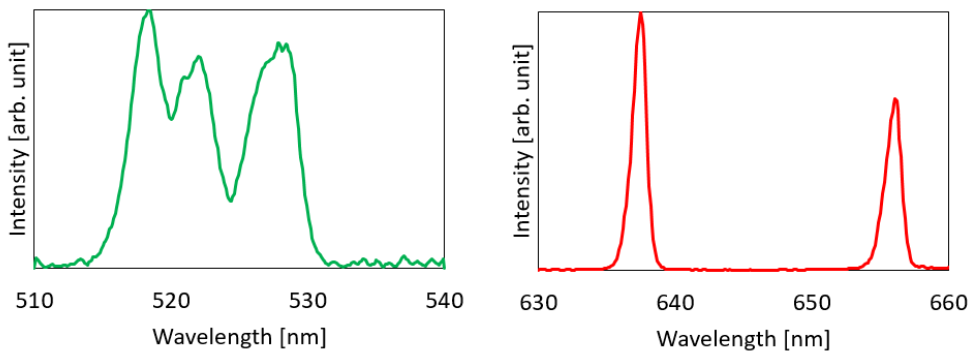


Figure 5.10 Spectra of green and red light from the projector.

Table 5.6 Measured speckle contrast.

Vibration	Color	Speckle contrast
off	Green	0.021
	Red	0.045
on	Green	0.012
	Red	0.012

5.4.2 考察

本研究でスペックルを測定した映画館では，プロジェクターでのスペックル低減では十分ではないためスクリーン振動によってスペックルを低減している．スクリーン振動なしでのスペックルコントラストを比較すると，緑の 0.021 に比べて赤が 0.045 と大きく，主に赤のスペックルが問題でスクリーン振動を導入する必要があった可能性が高い．

そこで，スクリーン振動なしで十分にスペックル低減するためにどのような波長構成にすれば良いかを理論計算により検討した．スペックルコントラストの理論計算値は，15 m の位置からスクリーン上の A 点を測定する条件で，赤の波長を 2 波長よりも増やした場合について式(3-34)により求めた．なお，角度分布がトップハット型で，DMD 出射光の発散角が 10°であると仮定した．DMD のサイズが対角 1.38 インチでピクセル数が 2160×4096 であることから，横幅 18.4 m のスクリーンへの投影倍率は 590 倍である．したがって，DMD 出射光の発散角が 10°の場合にはスクリーン入射光の発散角は θ_{div}=0.0003 rad となる．スクリーンへの入射角は Figure 5.9(a)に示した通り θ_{i}=7°とし，観測角度は垂直とした．また，4.2.3 項と同様 σ_l=10 μm，C_σ=0.9 とした．

Figure 5.11 に計算結果を示す．2 波長で波長間隔が 3 nm 以上の場合，スペックルコントラストは 0.046 となり，実験結果と近い値が得られた．1.3.3 項で論じたとおり，スペックルコントラストの許容値については議論が続いているが，最も厳しい場合でもスペックルコントラストが 0.03 以下であれば許容可能とされているため，スペックルコントラストを 0.03 以下まで低下させることでスクリーン振動なしでもスペックルが許容できるレベルになると考えられる．Figure 5.11 から，5 波長でそれぞれの波長間隔を 3 nm 以上とすることで，スペックルコントラストを 0.03 以下とすることが可能である．現状では 637 nm と 656 nm の 2 波長であるので，波長間隔を 3 nm 以上で 5 波長（例えば 637，641，646，651，656 nm）とすることでスクリーン振動なしで十分にスペックル低減できると考えられる．

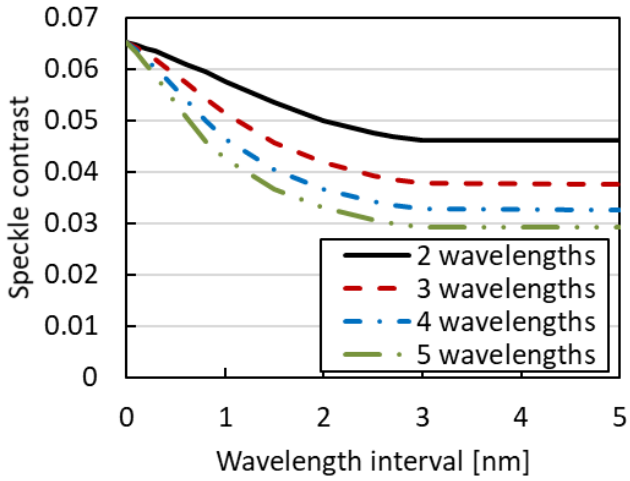


Figure 5.11 Calculated speckle contrast of red lasers on the point A from 15 m away from the screen. The number of wavelengths is altered from 2 to 5.

5.5 まとめ

本章では，プロジェクターと波長の異なる 5 つのレーザーを使用した場合のスペックル低減効果を測定し，理論モデルとの比較を行った．シルバースクリーンでは画像サイズによって波長多重によるスペックル低減効果が異なることがわかった．これは，画像サイズによって角度多重度が変化し，波長多重によるスペックル低減に影響を与えたためと考えられる．一方でマットスクリーンでは，画像サイズを変えても波長多重によるスペックル低減効果はほとんど変化しなかった．マットスクリーンの場合にはスクリーン散乱時の光路長分布幅 σ_l が大きいため，スペックル低減に必要な波長間隔がスクリーン形状のみによって決まり，角度多重度による影響が表れなかったと考えられる．理論計算によっても同様の結果が得られ，第 3 章で導出した理論式がレーザープロジェクターに適用できることを示した．

また，Xe ランプとバンドパスフィルターを用いた連続スペクトルによる波長多重効果と，同じプロジェクターヘッドに対して波長間隔が 6~7 nm のレーザーを複数個用いた離散的なスペクトルによる波長多重効果の比較を行った．その結果，Xe ランプとレーザーでスペクトル幅が同程度の場合には，シルバースクリーンではスペックルコントラストがほぼ同程度となり，マットスクリーンでは Xe ランプのスペックルコントラストのほうが小さくなった．これは，スペックル低減に必要な波長間隔がシルバースクリーンでは 8 nm 程度なのに対し，マットスクリーンでは

1~2 nm 程度であるためだと考えられる．シルバースクリーンでは 8 nm 以下のスペクトル構造はスペックル低減に大きな影響は与えないため，6~7 nm 間隔で複数の波長を用いた離散スペクトルの場合と連続スペクトルの場合とでほぼ同程度のスペックル低減効果が得られたと考えられる．理論計算でも同様の結果が得られ，Xe ランプを用いた場合についても理論計算によって実験結果を再現できることを示した．

また，官能評価の結果から，波長多重によりスペックルコントラストが低下すると明らかにスペックルが知覚しにくくなることと，スペックルコントラストが同じでもスペックルの感じ方は輝度に依存し，輝度が高いほどスペックルを知覚しにくいことを示した．

最後に，映画館でレーザープロジェクターのスペックル測定を実施した．赤色を 2 波長(637, 656 nm)だけ使用している現状では，スクリーン振動なしではスペックルコントラストが 0.045 と高いためスペックル低減のためにスクリーン振動機構が必要であった．しかし，理論計算により，5 波長(637, 641, 646, 651, 656 nm)に多波長化することでスクリーン振動なしで 0.03 以下までスペックルコントラストを低減できることを示した，スペックルコントラストが 0.03 以下となれば，スクリーン振動なしでもスペックルが許容できる可能性が高く，スペックル低減は十分であると言える．

第 6 章
結論

6.1　本研究の結論

本論文は，レーザープロジェクターにおける角度多重と波長多重の依存性を考慮したスペックル低減効果を理論・実験両面から明らかにすることを目的としたものである．スペックル低減についてはこれまでに様々な理論検討や実験結果が報告されているが，波長多重によるスペックル低減と角度多重によるスペックル低減の依存性については理論的にも実験的にも示されていなかった．本研究では波長多重及び角度多重によるスペックル低減の相互依存性を考慮した新しい理論モデルの構築を行い，実験による検証を行うことでその依存性を理論的にも実験的にも初めて明らかにした．以下に各章の要約を示す．

第 1 章でスペックルに関する基礎理論としてスペックルの低減方法及び測定方法を論じた．第 2 章ではスペックルを評価するためのスペックル測定系を構築し，測定系のパラメータがスペックルに与える影響を評価した．角度多重によるスペックル低減効果がカメラの f-number や測定距離，焦点位置に依存しているため，これらの値を変えることでスペックルコントラストが変化することを示した．また，構築した測定系によって角度多重・波長多重・偏光多重によるスペックル低減効果の検証を行い，波長多重によるスペックル低減と角度多重によるスペックル低減の依存性を初めて実験的に示した．角度多重及び波長多重によるスペックル低減は広く用いられている手法であるため，これらの依存性を明らかにすることは効果的にスペックルを低減するために非常に重要である．

第 3 章では波長多重と角度多重の相互依存性を考慮した理論モデルを構築した．まず，角度多重がない場合について従来知られている理論を拡張することで，スペクトルが複数のガウシアンの和で表される場合の波長多重によるスペックル低減の理論モデル導出を行った．次に，スクリーン散乱光に印加される位相のうち従来の理論モデルでは無視していた斜入射・斜出射による位相項を考慮し，角度多重と波長多重が同時に存在する場合の理論モデルを導出した．このモデルを用いた計算により，角度多重と波長多重によるスペックル低減の依存性を示した．また，導出し

た理論モデルにおいて角度多重が十分小さいときの結果が，波長多重のみを考えた理論モデルによる計算値と一致することを示した．

第 4 章では，第 3 章で導出した理論モデルの実験的検証を実施し，理論モデルの妥当性を示した．まず，波長多重が無視できる場合について角度多重度を変化させてスペックル測定を行い，理論計算値との比較を実施した．理論計算に用いる角度分布として，トップハット型またはガウシアン型の角度分布を仮定したが，いずれの角度分布を用いた場合でも角度広がりをフィッティングパラメータとすることで実験結果とよく一致する結果が得られた．次に，波長の異なる 2 つのレーザーを用いた実験により,スペックル低減に必要な波長間隔がスクリーン入射光の入射角度,測定角度，及び角度広がりに強く依存することを明らかにし，理論計算によって実験結果をよく再現できることを示した．

第 5 章では，プロジェクターの光源に波長の異なる 5 つのレーザーを使用した場合のスペックル低減効果を測定し，理論モデルとの比較を行った．シルバースクリーンでは画像サイズによって波長多重によるスペックル低減効果が異なることを示した．これは，画像サイズによって角度多重度が変化し，波長多重によるスペックル低減に影響を与えたためであると考えられる．一方で，マットスクリーンでは画像サイズを変えても波長多重によるスペックル低減効果はほとんど変化しなかった．マットスクリーンの場合にはスクリーン散乱時の光路長分布幅が大きいため，スペックル低減に必要な波長間隔がスクリーンの特性のみによって決定され，角度多重度による影響が表れなかったと考えられる．いずれの実験結果も理論計算によってよく再現できた．また，Xe ランプを用いた場合についても理論計算によって実験結果を再現できることを示した．これらの結果により，第 3 章で導出した理論式がプロジェクターに適用できることを示した．

さらに，映画館でレーザープロジェクターのスペックルコントラストを測定した結果を示した．本研究で測定したプロジェクターは赤色に 2 波長(637, 656 nm)のみ使用されており，スクリーン振動なしではスペックルコントラストが 0.045 と高いためスクリーンに振動機構を設けることでスペックルを低減している．この映画館においては，理論計算により現行の 2 波長から 5 波長(637, 641, 646, 651, 656 nm)に多波長化することで,スクリーン振動なしで 0.03 以下のスペックルコントラストが得られることを示した．スペックルコントラストが 0.03 以下となれば，スクリー

ン振動なしでもスペックルが許容できる可能性が高く，スペックル低減は十分であると言える．

以上をまとめると，本研究では波長多重・角度多重によるスペックル低減が独立でないことを初めて実験的に明らかにし，波長多重・角度多重によるスペックル低減の依存性を考慮した新しい理論モデルを導出した．導出した理論モデルにより実験結果をよく再現できることを示し，理論モデルの妥当性を示した．さらに，プロジェクターを用いた実験結果から，理論モデルがプロジェクターに適用可能であることを示した．波長多重と角度多重によるスペックル低減の依存性は理論的にも実験的にも本研究において初めて明らかになったものであり，今後レーザーディスプレイにおけるスペックル低減に大きく貢献することが期待される．

6.2 展望

国内外問わず映画館でレーザープロジェクターの普及が進んでいるが，スペックル低減が十分でないため振動スクリーンを導入している映画館も多い．本研究の結果をもとに光源側でのスペックル低減を進めることで，高価な振動スクリーンが不要となり，レーザープロジェクターの普及がさらに加速することが期待される．

また，映画館用をはじめとする高輝度のレーザープロジェクターの普及によりレーザーのコストが低下すれば，輝度の低いプロジェクターにもレーザープロジェクターが広まることが期待される．低輝度のレーザープロジェクターにおいてもスペックル低減は必須の課題であり，本研究の結果が大いに貢献すると期待される．

レーザープロジェクター以外のレーザーディスプレイや，レーザー光を照明として利用するレーザー照明の研究開発も進んでいるが，スペックルはこれらの分野でも課題となっており，本研究結果の応用が期待される．スペックルの問題を解決することで今後様々なレーザー照明・ディスプレイが実現されていくものと考える．

付録 A　Necsel レーザー

本研究で使用した NECSEL (Necsel Extended Cavity Surface Emitting Laser)レーザーについて説明する．

NECSEL レーザーは，Figure A.1 に示すように赤外光を出射する VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)アレイと波長選択素子 VBG (Volume Bragg Grating)による赤外光の共振器の内部に，波長変換のための非線形結晶 PPLN (Periodical Poled Lithium Niobate)を備えた構造となっている．

赤外 VCSEL アレイは 24 個のエミッタにより構成されており，それぞれのエミッタから出射された赤外光が共振器内を往復することで，共振器内部の非線形結晶によって緑色の光に変換される．緑色に変換された後，VCSEL から VBG に向かって伝播する光(primary beam）は VBG を通して共振器外部に取り出される．一方，VBG から VCSEL アレイに向かって伝播する光(secondary beam)は，光軸に対して 45°傾けて配置したダイクロイックミラーによって反射され，さらに折り返しミラーによって反射されて primary beam と同一方向に取り出される．赤外 VCSEL アレイから出射する 24 本の赤外光ビームがそれぞれ primary beam と secondary beam に分離するため，1 つのレーザー光源から合計 48 本の緑色光ビームが取り出される．

各ビームの横モードは低出力時には TEM_{00} モードであり，出力が増加するとマルチモードとなる．また，発振波長は VBG によって決定されるため，波長が素子温度や電流値などに依存せず安定しているという特徴がある．48 本のビーム全体の波長幅は，典型的には半値全幅で 0.1～0.2 nm 程度である．

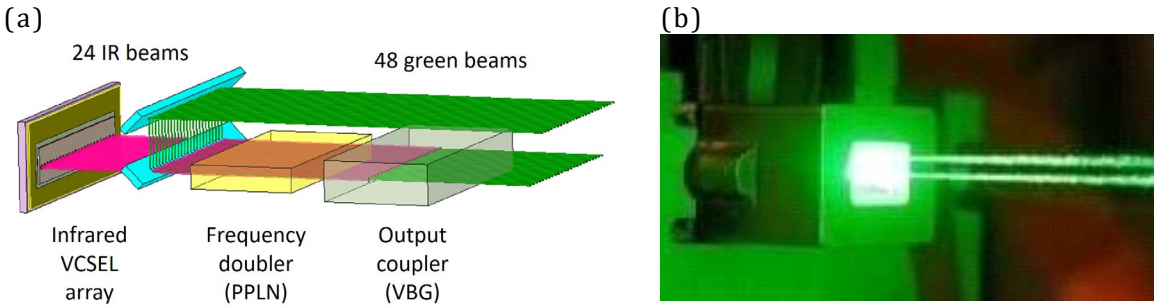


Figure A.1 NECSEL green laser. (a) Schematic diagram of the laser, and (b) photo of the green laser in operation. [14]

付録 B　トップハット型角度分布の角度範囲

Figure B.1 に示したようにトップハット型の角度分布をもった入射光がスクリーンに斜めに入射する場合に，入射光の角度範囲を求める．スクリーンが $\xi\eta$ 平面上にあり，スクリーンへの入射角（入射光の光軸と z 軸とのなす角）が θ_{i} である場合を考える．このとき，光軸が ηz 平面上にあるとして一般性を失わない．座標系 $\xi\eta z$ についての光軸の方向余弦 $\cos\alpha$，$\cos\beta$，$\cos\theta$，光軸が座標軸と一致するように座標系 $\xi\eta z$ を ξ 軸回りに角度 θ_{i} 回転した座標系 $\xi\eta'z'$についての方向余弦を $\cos\alpha$，$\cos\beta'$，$\cos\theta'$とする．半角 θ_{div} のトップハット型の角度分布の場合，入射光の範囲は $\theta'<\theta_{\mathrm{div}}$ で表されるため，入射光の α，β'の範囲として次式が成り立つ．

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta' < \sin^2\theta_{\mathrm{div}}.$$

座標系 $\xi\eta z$ の基底ベクトルを$\boldsymbol{e}_\xi, \boldsymbol{e}_\eta, \boldsymbol{e}_z$，座標系 $\xi\eta'z'$の基底ベクトルを$\boldsymbol{e}_\xi, \boldsymbol{e}_{\eta'}, \boldsymbol{e}_{z'}$，光軸を通る光線の方向ベクトルを$\boldsymbol{L}$とすると，

$$\cos\beta' = \boldsymbol{L}\cdot\boldsymbol{e}_{\eta'} = \boldsymbol{L}\cdot\left(\boldsymbol{e}_\eta\cos\theta_{\mathrm{i}} - \boldsymbol{e}_z\sin\theta_{\mathrm{i}}\right) = \cos\beta\cos\theta_{\mathrm{i}} - \cos\theta\sin\theta_{\mathrm{i}}$$
$$= \cos\beta\cos\theta_{\mathrm{i}} - \sqrt{1-\cos^2\alpha-\cos^2\beta}\,\sin\theta_{\mathrm{i}}.$$

したがって，入射光の α，β の範囲は下式で表される．

$$\cos^2\alpha + \left(\cos\beta\cos\theta_{\mathrm{i}} + \sqrt{1-\cos^2\alpha-\cos^2\beta}\,\sin\theta_{\mathrm{i}}\right)^2 < \sin^2\theta_{\mathrm{div}}.$$

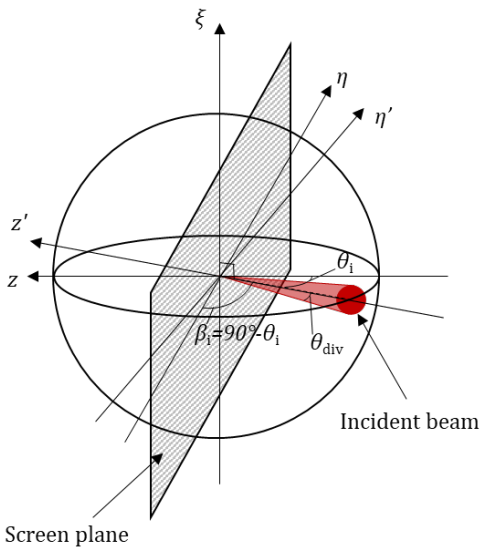


Figure B.1 Incident beam on screen and corresponding coordinate systems.

参考文献

1. C. E. Baker and A. D. Rugari, "A large-screen real-time display technique," Proc. Soc. Inf. Disp. 6th Natl. Symp. **3**, 37–39 (1966).
2. C. E. Baker, "Laser display technology," IEEE Spectr. **5**, 39–50 (1968).
3. A. Korpel, R. Adler, P. Desmares, and W. Watson, "A television display using acoustic deflection and modulation of coherent light," Appl. Opt. **5**, 1667–1675 (1966).
4. S. M. Stone, "Experimental Multicolor Real-Time Laser Display System," Proc. Soc. Inf. Disp. 8th Natl. Symp. 161–168 (1967).
5. 種田悌一, "レーザーディスプレイ," テレビジョン **27**, 340–348 (1973).
6. 山本学, "走査線1,125本方式レーザディスプレイ," 日立評論 **56**, 85–90 (1974).
7. 種田悌一, 龍岡静夫, 愛甲明毅, 益子仁, "1125本方式レーザーカラーディスプレイ[I]," テレビジョン **29**, 117–123 (1975).
8. H. Sugiura, T. Sasagawa, A. Michimori, E. Toide, T. Yanagisawa, S. Yamamoto, Y. Hirano, M. Usui, S. Teramatsu, and J. Someya, "65-inch, Super Slim, Laser TV with Newly Developed Laser Light Sources," SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **39**, 854–857 (2008).
9. K. V. Chellappan, E. Erden, and H. Urey, "Laser-based displays: a review," Appl. Opt. **49**, F79–F98 (2010).
10. 畑中秀和 and G. T. Niven, "高輝度レーザー光源のレーザーシネマ応用," O plus E Opt. Electron. **36**, 661–667 (2014).
11. M. Sugawara, M. Suzuki, and N. Miyauchi, "Retinal Imaging Laser Eyewear with Focus-Free and Augmented Reality," SID Symp. Dig. Tech. Pap. **47**, 164–167 (2016).
12. Y. Nakatsu, Y. Nagao, T. Hirao, Y. Hara, S. Masui, T. Yanamoto, and S. Nagahama, "Blue and green InGaN semiconductor lasers as light sources displays," Proc. SPIE **11280**, 112800S (2020).
13. J. G. McInerney, A. Mooradian, A. Lewis, A. V Shchegrov, E. M. Strzelecka, D. Lee, J. P. Watson, M. Liebman, G. P. Carey, A. Umbrasas, C. Amsden, B. D. Cantos, W. R. Hitchens, D. Heald, V. V Doan, and J. L. Cannon, "High brightness 980 nm pump lasers based on the Novalux Extended Cavity Surface-Emitting Laser (NECSEL) concept," Proc. SPIE **4947**, 240–251 (2003).
14. 畑中秀和 and G. T. Niven, "第二高調波による可視・外部共振器・電流注入型高輝度面発光レーザーと照明応用," レーザー研究 **42**, 534 (2014).
15. K. Kuramoto, S. Abe, M. Miyashita, M. Kusunoki, T. Nishida, and T. Yagi, "Highly reliable operation under high case temperature in 638-nm BA-LD," Opt. Rev. **26**, 201–212 (2019).
16. M. Hagimoto, S. Miyamoto, Y. Kimura, H. Fukai, M. Hashizume, and S. Kawanaka, "USHIO 3.5W red laser diode for projector light source," Proc. SPIE **10939**, 109391I (2019).
17. B. Beck, "Lasers light up the silver screen," IEEE Spectr. **51**, 32–39 (2014).
18. 朝倉利光, 魚住純, "レーザースペックル研究の展開," 電子科学研究 **4**, 3–12 (1997).
19. J. D. Rigden and E. I. Gordon, "The Granularity of Scattered Optical Maser Light," Proc. IRE **50**, 2367–2368 (1962).
20. B. M. Oliver, "Sparkling Spots and Random Diffraction," Proc. IEEE **51**, 220–221 (1963).
21. L. I. Goldfischer, "Autocorrelation Function and Power Spectral Density of Laser-Produced Speckle Patterns," J. Opt. Soc. Am. **55**, 247–253 (1965).

22. J. W. Goodman, "Statistical Properties of Laser Speckle Patterns," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, ed. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975), pp. 9–75.
23. J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle," J. Opt. Soc. Am. **66**, 1145–1150 (1976).
24. J. C. Dainty, "The Statistics of Speckle Patterns," in *Progress in Optics Volume 14* (Elsevier, 1977), pp. 1–46.
25. J. Ohtsubo and T. Asakura, "Statistical properties of the sum of partially developed speckle patterns," Opt. Lett. **1**, 98–100 (1977).
26. J. I. Trisnadi, "Speckle contrast reduction in laser projection displays," Proc. SPIE **4657**, 131–137 (2002).
27. J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*, Second ed. (SPIE, 2020).
28. D. Gabor, "Laser Speckle and Its Elimination," IBM J. Res. Dev. **14**, 509–514 (1970).
29. M. Kurashige, K. Ishida, and Y. Ohyagi, "Classification of subjective speckle for evaluation of laser display," SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **45**, 419–422 (2014).
30. 黒田和男, "カラースペックル," レーザー研究 **42**, 543–550 (2014).
31. K. Kuroda, T. Ishikawa, M. Ayama, and S. Kubota, "Color Speckle," Opt. Rev. **21**, 83–89 (2014).
32. J. Kinoshita, K. Yamamoto, and K. Kuroda, "Color speckle measurement errors using system with XYZ filters," Opt. Rev. **25**, 123–130 (2018).
33. K. Ochi, M. Kurashige, S. Kubota, and K. Ishida, "Direct Measurement of Color Speckle Applying XYZ Filters," SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **47**, 99–102 (2016).
34. J. Kinoshita, H. Aizawa, A. Takamori, K. Yamamoto, H. Murata, and K. Kuroda, "Color Speckle Evaluation Using Monochromatic Speckle Measurements," SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **47**, 95–98 (2016).
35. G. Parry, "Speckle Patterns in Partially Coherent Light," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, ed., 2nd ed. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975), pp. 77–121.
36. 中川一夫, 朝倉利光, "多色光スペックルの特性と応用," 光学 **8**, 120–127 (1979).
37. 久保田重夫, "スペックル測定とその低減デバイス," 光学 **39**, 149–158 (2010).
38. Y. Yuan, Y. Bi, M. Y. Sun, D. Z. Wang, D. D. Wang, W. N. Gao, and S. Zhang, "Speckle evaluation in laser display: From speckle contrast to speckle influence degree," Opt. Commun. **454**, 124405 (2020).
39. Y. Yuan, Y. Bi, M. Y. Sun, D. D. Wang, W. N. Gao, S. Zhang, and J. Y. Zhu, "Quantification of the effects of time-varying speckle patterns on speckle images using a modified speckle influence degree method," Opt. Commun. **463**, 125368 (2020).
40. M. Elbaum, M. Greenebaum, and M. King, "A wavelength diversity technique for reduction of speckle size," Opt. Commun. **5**, 171–174 (1972).
41. N. George and A. Jain, "Speckle Reduction Using Multiple Tones of Illumination," Appl. Opt. **12**, 1202–1212 (1973).
42. N. George and A. Jain, "Space and Wavelength Dependence of Speckle Intensity," Appl. Phys. **4**, 201–212 (1974).
43. T. S. McKechnie, "Speckle Reduction," in *Laser Speckle and Related Phenomena*, J. C. Dainty, ed., 2nd Ed. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975), pp. 123–170.
44. 村田博司, 岡村康行, 山本和久, "半導体レーザーのスペックル低減," レーザー研究 **42**, 551–555 (2014).

45. H. Murata, K. Shibasaki, K. Yamamoto, and Y. Okamura, "Speckle Control Using High-Frequency Signal Superposition to Semiconductor Laser," Opt. Rev. **21**, 79–82 (2014).
46. A. Furukawa, N. Ohse, Y. Sato, D. Imanishi, K. Wakabayashi, S. Ito, K. Tamamura, and S. Hirata, "Effective speckle reduction in laser projection displays," Proc. SPIE **6911**, 69110T (2008).
47. Y. Yao and W. H. Knox, "Speckle-free femtosecond red-green-blue (RGB) source from a fiber laser driven spectrally efficient two zero dispersion wavelength fiber source," Opt. Express **23**, 536–544 (2015).
48. N. E. Yu, J. W. Choi, H. Kang, D.-K. Ko, S.-H. Fu, J.-W. Liou, A. H. Kung, H. J. Choi, B. J. Kim, M. Cha, and L.-H. Peng, "Speckle noise reduction on a laser projection display via a broadband green light source," Opt. Express **22**, 3547–3556 (2014).
49. D. V. Kuksenkov, R. V. Roussev, S. Li, W. A. Wood, and C. M. Lynn, "Multiple-wavelength synthetic green laser source for speckle reduction," Proc. SPIE **7917**, 79170B (2011).
50. D. Z. Wang, B. X. Yan, Y. Bi, D. H. Sun, Y. H. Sang, H. Liu, A. Kumar, and R. I. Boughton, "Three-wavelength green laser using intracavity frequency conversion of Nd:Mg:LiTaO3 with a MgO:PPLN crystal," Appl. Phys. B **117**, 1117–1121 (2014).
51. T.-T.-K. Tran, Ø. Svensen, X. Chen, and M. N. Akram, "Speckle reduction in laser projection displays through angle and wavelength diversity," Appl. Opt. **55**, 1267–1274 (2016).
52. Q. Ma and C.-Q. Xu, "Wavelength blending with reduced speckle and improved color for laser projection," Opt. Lasers Eng. **97**, 27–33 (2017).
53. K. Suzuki, T. Fukui, S. Kubota, and Y. Furukawa, "Verification of speckle contrast measurement interrelation with observation distance," Opt. Rev. **21**, 94–97 (2014).
54. M. N. Akram, Z. Tong, G. Ouyang, X. Chen, and V. Kartashov, "Laser speckle reduction due to spatial and angular diversity introduced by fast scanning micromirror," Appl. Opt. **49**, 3297–3304 (2010).
55. Y. Kuratomi, K. Sekiya, H. Satoh, T. Tomiyama, T. Kawakami, B. Katagiri, Y. Suzuki, and T. Uchida, "Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser," J. Opt. Soc. Am. A **27**, 1812–1817 (2010).
56. Y. Kuratomi, K. Sekiya, H. Sato, T. Kawakami, and T. Uchida, "Analysis of speckle-reduction performance in a laser rear-projection display using a small moving diffuser," J. Soc. Inf. Disp. **18**, 1119–1126 (2010).
57. S. Lowenthal and D. Joyeux, "Speckle Removal by a Slowly Moving Diffuser Associated with a Motionless Diffuser," J. Opt. Soc. Am. **61**, 847–851 (1971).
58. S. Kubota and J. W. Goodman, "Very efficient speckle contrast reduction realized by moving diffuser device," Appl. Opt. **49**, 4385–4391 (2010).
59. Y. Tomita, K. Suzuki, T. Fukui, H. Tokita, and S. Kubota, "Nonuniform intensity distribution of the scattered light by moving diffuser across projection lens pupil and its influence in speckle reduction," Opt. Rev. **21**, 90–93 (2014).
60. J.-W. Pan and C.-H. Shih, "Speckle noise reduction in the laser mini- projector by vibrating diffuser," J. Opt. **19**, 045606 (2017).
61. J.-W. Pan and C.-H. Shih, "Speckle reduction and maintaining contrast in a LASER pico-projector using a vibrating symmetric diffuser," Opt. Express **22**, 6464–6477 (2014).
62. T.-K.-T. Tran, X. Chen, Ø. Svensen, and M. N. Akram, "Speckle reduction in laser projection using a dynamic deformable mirror," Opt. Express **22**, 11152–11166 (2014).

63. H.-A. Chen, J.-W. Pan, and Z.-P. Yang, "Speckle reduction using deformable mirrors with diffusers in a laser pico-projector," Opt. Express **25**, 18140–18151 (2017).
64. F. P. Shevlin, "Speckle Reduction In Laser-Illuminated Picoprojectors," Proc. SPIE **8252**, 825206 (2012).
65. J.-Y. Lee, T.-H. Kim, B. Yim, J.-U. Bu, and Y.-J. Kim, "Speckle reduction in laser picoprojector by combining optical phase matrix with twin green lasers and oscillating MEMS mirror for coherence suppression," Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 08RF03 (2016).
66. J. G. Manni and J. W. Goodman, "Versatile method for achieving 1% speckle contrast in large-venue laser projection displays using a stationary multimode optical fiber," Opt. Express **20**, 11288–11315 (2012).
67. M. Tilleman, "A new method for laser speckle suppression," Proc. SPIE **7618**, 76180A (2010).
68. D. S. Mehta, D. N. Naik, R. K. Singh, and M. Takeda, "Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined temporal, spatial, and angular diversity," Appl. Opt. **51**, 1894–1904 (2012).
69. L. Wang, T. Tschudi, T. Halldórsson, and P. R. Pétursson, "Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements," Appl. Opt. **37**, 1770–1775 (1998).
70. S. An, A. Lapchuk, V. Yurlov, J. Song, H. Park, J. Jang, W. Shin, S. Karpoltsev, and S. K. Yun, "Speckle suppression in laser display using several partially coherent beams," Opt. Express **17**, 92–103 (2009).
71. A. Lapchuk, G. A. Pashkevich, O. V. Prygun, V. Yurlov, Y. Borodin, A. Kryuchyn, A. A. Korchovyi, and S. Shylo, "Experiment evaluation of speckle suppression efficiency of 2D quasi-spiral M-sequence-based diffractive optical element," Appl. Opt. **54**, E47–E54 (2015).
72. A. Lapchuk, G. Pashkevich, O. Prygun, I. Kosyak, M. Fu, Z. Le, and A. Kryuchyn, "Very efficient speckle suppression in the entire visible range by one two-sided diffractive optical element," Appl. Opt. **56**, 1481–1488 (2017).
73. Q.-L. Deng, B.-H. Lin, P.-J. Wu, K.-Y. Chiu, P.-L. Fan, and C.-Y. Chen, "A hybrid temporal and spatial speckle-suppression method for laser displays," Opt. Express **21**, 31062–31071 (2013).
74. B. Redding, A. Cerjan, X. Huang, M. L. Lee, A. D. Stone, M. A. Choma, and H. Cao, "Low spatial coherence electrically pumped semiconductor laser for speckle-free full-field imaging," Proc. Natl. Acad. Sci. **112**, 1304–1309 (2015).
75. 安部高明，奥田倫弘，松本慎也，前田誠，安東孝久，辻企世子，寺内智哉，天野隆平，井上益孝，池田貴司，金山秀行，"レーザ光源プロジェクタ向け高輝度・超短焦点投写光学系および色再現処理技術の開発，" 映像情報メディア学会誌 **64**, 1489–1497 (2010).
76. H. Furue, A. Terashima, M. Shirao, Y. Koizumi, and M. Ono, "Control of laser speckle noise using liquid crystals," Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 09NE14 (2011).
77. E. G. Rawson, A. B. Nafarrate, R. E. Norton, and J. W. Goodman, "Speckle-free rear-projection screen using two close screens in slow relative motion," J. Opt. Soc. Am. **66**, 1290–1294 (1976).
78. S.-Y. Tu, H. Y. Lin, and M.-C. Lin, "Efficient speckle reduction for a laser illuminating on a micro-vibrated paper screen," Appl. Opt. **53**, E38–E46 (2014).
79. S. C. Shin, S. S. Yoo, S. Y. Lee, C.-Y. Park, S.-Y. Park, J. W. Kwon, and S.-G. Lee, "Removal of hot spot speckle on laser projection screen using both the running screen and the rotating diffuser," Displays **27**, 91–96 (2006).

80. Y. Yuan, D. Wang, D. Wang, M. Sun, W. Gao, S. Zhang, and Y. Bi, "Influence and evaluation of vibrating screen methods on subjective speckle reduction," Proc. SPIE **11023**, 110234A (2019).
81. Q. Ma and C.-Q. Xu, "Analysis of laser speckle reduction utilizing microlens-array-based projection screen," J. Opt. Soc. Am. A **34**, 1595–1601 (2017).
82. J. Pauwels and G. Verschaffelt, "Speckle reduction in laser projection using microlens-array screens," Opt. Express **25**, 3180–3194 (2017).
83. S. Okagaki, J. Kondo, K. Kojima, Y. Nakano, A. Miyata, K. Kubo, and Y. Yoshida, "Reliability of prototype microcapsule diffuser for speckle noise reduction in laser displays," J. Soc. Inf. Disp. **22**, 316–322 (2014).
84. J. Kondo, S. Okagaki, K. Kojima, Y. Nakano, and A. Miyata, "Microcapsules diffuser screen for speckle noise reduction," J. Soc. Inf. Disp. **23**, 607–613 (2015).
85. F. Riechert, G. Bastian, and U. Lemmer, "Laser speckle reduction via colloidal-dispersion-filled projection screens," Appl. Opt. **48**, 3742–3749 (2009).
86. T. C. Schmidt, "Standardization of speckle measurement for large screen laser illuminated video projection systems," SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. **45**, 423–426 (2014).
87. 倉重牧夫, "レーザーディスプレイ国際標準化," レーザー研究 **42**, 561–565 (2014).
88. T. Fukui, K. Ito, K. Suzuki, H. Tokita, Y. Furukawa, and S. Kubota, "Effective Calibration Method for Absolute Speckle Contrast Measurement," Proc. LDC LDC8-3 (2012).
89. S. Roelandt, Y. Meuret, G. Craggs, G. Verschaffelt, P. Janssens, and H. Thienpont, "Standardized speckle measurement method matched to human speckle perception in laser projection systems," Opt. Express **20**, 8770–8783 (2012).
90. P. Janssens and K. Malfait, "Future prospects of high-end laser projectors," Proc. SPIE **7232**, 72320Y (2009).
91. G. A. Geri and L. A. Williams, "Perceptual assessment of laser-speckle contrast," J. Soc. Inf. Disp. **20**, 22–27 (2012).
92. S. Kubota, M. Kurashige, and K. Ishida, "Measurement of Angular Characteristics of Speckle Contrast," Proc. LDC LDC5-3 (2017).
93. M. Kurashige and K. Ishida, "Theoretical Analysis of Angular Dependency of Speckle Contrast," Proc. LDC LDC6-4 (2018).
94. M. Kurashige, K. Ishida, and S. Kubota, "Viewing-Angle Characteristics of Speckle Contrast among Different Types of Screens," Proc. IDW 1154–1156 (2017).
95. K. Suzuki and S. Kubota, "Understanding the exposure-time effect on speckle contrast measurements for laser displays," Opt. Rev. **25**, 131–139 (2018).
96. K. Suzuki and S. Kubota, "Understanding the Exposure-time Effect on Speckle Contrast Measurement for Laser Projection with Rotating Diffuser," Proc. LDC LDCp9-11 (2018).
97. D. Kang, E. Clarkson, and T. D. Milster, "Effect of optical aberration on Gaussian laser speckle," Opt. Express **17**, 3084–3100 (2009).
98. D. Kang and T. D. Milster, "Effect of optical aberration on Gaussian speckle in a partially coherent imaging system," J. Opt. Soc. Am. A **26**, 2577–2585 (2009).
99. S. Roelandt, Y. Meuret, A. Jacobs, K. Willaert, P. Janssens, H. Thienpont, and G. Verschaffelt, "Human speckle perception threshold for still images from a laser projection system," Opt. Express **22**, 23965–23979 (2014).

100. *平成26～28年度成果報告書 ク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」報告書管理番号20170000000517* (NEDO, 2017).
101. G. Verschaffelt, S. Roelandt, Y. Meuret, W. Van Den Broeck, K. Kilpi, B. Lievens, A. Jacobs, P. Janssens, and H. Thienpont, "Speckle disturbance limit in laser-based cinema projection systems," Sci. Rep. **5**, 14105 (2015).
102. A. Roorda and D. R. Williams, "The arrangement of the three cone classes in the living human eye," Nature **397**, 520–522 (1999).
103. H. Hofer, J. Carroll, J. Neitz, M. Neitz, and D. R. Williams, "Organization of the human trichromatic cone mosaic," J. Neurosci. **25**, 9669–9679 (2005).
104. S. Kubota, "Simulating the human eye in measurements of speckle from laser-based projection displays," Appl. Opt. **53**, 3814–3820 (2014).
105. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Dependency of speckle reduction by wavelength diversity on angular diversity in laser projection system," J. Soc. Inf. Disp. **26**, 237–245 (2018).
106. M. Cowan, ed., *Measurement of Speckle in Laboratory Conditions* (Laser Illuminated Projector Association, 2015).
107. Y. Yuan, T. Fang, M. Y. Sun, W. N. Gao, and S. Zhang, "Speckle measuring instrument based on biological characteristics of the human eyes and speckle reduction with advanced electromagnetic micro-scanning mirror," Laser Phys. **28**, 075002 (2018).
108. G. Westherimer, "The eye as an optical instrument," in *Handbook of Perception and Human Performance*, K. R. Boff and J. P. Thomas, eds. (Wiley, 1986), p. Vol. 1, pp. 4/1-4/20.
109. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, H. Hatanaka, and K. Yamamoto, "Theoretical calculation and experimental investigation of speckle reduction by multiple wavelength lasers in laser projector with different angular diversities," J. Opt. **21**, 045602 (2019).
110. "Harkness Screens Screen Surfaces Catalog," https://static1.squarespace.com/static/54e3086ee4b0a566f12d72e6/t/5af16d93f950b790adcfd69c/1525771671647/Cinema_Screen_Surface_Catalogue.pdf (Retrieved Jan. 9, 2019).
111. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, H. Hatanaka, and K. Yamamoto, "Effect of brightness on speckle contrast and human speckle perception in laser projection systems," OSA Contin. **2**, 349–357 (2019).
112. 山田裕貴, 森安研吾, 佐藤弘人, 畑中秀和, 山本和久, "角度・波長・偏光多重制御によるレーザープロジェクターにおけるスペックル低減," レーザー研究 **47**, 464–469 (2019).
113. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Second Ed. (The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996).
114. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Effect of incidence/observation angles and angular diversity on speckle reduction by wavelength diversity in laser projection systems," Opt. Express **25**, 32132–32141 (2017).

謝辞

本研究は大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻において行われたものであり，御指導御鞭撻を賜りました山本和久教授に心よりの感謝の意を表するとともに厚く御礼申し上げます.

本論文を作成するにあたり，御助言，御指導頂いた近藤正彦教授，藤岡加奈准教授に心から感謝致します.

本論文に関して貴重な御教示を頂きました森勇介教授，片山光浩教授，片山竜二教授，尾崎雅則教授，森伸也教授，廣瀬哲也教授，八木哲也教授，大岩顕教授，山﨑順准教授，斗内政吉教授，河仲準二教授に深く感謝致します.

ウシオ電機株式会社 内藤宏治氏，河本雅人氏，堀川好広氏，山田宏二氏，山口明康氏，亀井宏市氏には，社会人博士としての進学を許可頂いた上，博士課程を修了するため多くのサポートを頂き，深く感謝致します.

ウシオ電機株式会社 畑中秀和博士には，スペックルに関する研究を実施する機会を与えて頂き，研究遂行にあたり多大な御助力を頂くとともに，博士課程進学，学会発表，論文執筆の際にも丁寧な御助言を頂きました．心より感謝致します.

ウシオ電機株式会社 杉谷晃彦氏，佐藤弘人氏には，本研究を遂行するにあたり多大な御助力を頂きました．深く感謝致します.

ウシオ電機株式会社 森安研吾氏には，共に研究を遂行する中で様々な御指導を頂くとともに，有益な議論をして頂きました．心より感謝致します.

本研究は，上記以外の多くの方々からの御協力，御指導，御助言のもとで遂行されたものであります．心より御礼申し上げます.

最後に，社会人博士後期課程進学という選択を快諾し，終始支援してくれた妻と両親，姉に深く感謝し，謝辞の結びとします.

博士論文に関する業績一覧

学術論文（査読有り）

1. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Effect of incidence/observation angles and angular diversity on speckle reduction by wavelength diversity in laser projection systems," Opt. Express 25, 32132–32141 (2017).
2. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Dependency of speckle reduction by wavelength diversity on angular diversity in laser projection system," J. Soc. Inf. Disp. 26, 237–245 (2018).
3. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, H. Hatanaka, and K. Yamamoto, "Effect of brightness on speckle contrast and human speckle perception in laser projection systems," OSA Contin. 2, 349-357 (2019).
4. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, H. Hatanaka, and K. Yamamoto, "Theoretical calculation and experimental investigation of speckle reduction by multiple wavelength lasers in laser projector with different angular diversities," Journal of Optics 21, 045602 (2019).
5. 山田裕貴，森安研吾，佐藤弘人，畑中秀和，山本和久，“角度・波長・偏光多重制御によるレーザープロジェクターにおけるスペックル低減”, レーザー研究第 47 巻第 8 号, 464-469 (2019).

国際会議

1. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Difference in Speckle Reduction by Wavelength Diversity between Two Types of Screen," The 21st International Display Workshops, Paper Number: PRJ3-4L, Niigata, Japan (Dec., 2014).
2. H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Dependency of Speckle Reduction by Wavelength Diversity on Angular Diversity in Laser Projection System," SID Display Week 2018, Paper Number: 63-2, Los Angeles, USA (May, 2018).
3. (Invited) H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Effect of Angular Profile and Wavelength on Speckle Reduction in Laser Projection System," The 25th International Display Workshops, Paper Number: PRJ3-1, Nagoya, Japan (Dec., 2018).
4. (Invited) H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, H. Hatanaka, and K. Yamamoto, "Speckle Reduction in Laser Projector," Laser Display and Lighting Conference 2019, Paper Number: LDC-6-2-01, Yokohama, Japan (Apr., 2019).
5. (Invited) H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, H. Hatanaka, and K. Yamamoto, "Speckle Reduction in

Laser Projectors by Angular, Wavelength, and Polarization Diversities," SID Display Week 2020, Paper Number: 82.4, Online Conference (Aug., 2020, Accepted).

国内会議

1. 山田裕貴，森安研吾，佐藤弘人，畑中秀和，”スクリーンの違いが多波長化によるスペックル低減に及ぼす効果”，レーザー学会学術講演会 第 35 回年次大会，講演番号: H1-4，東海大学，東京（2015 年 1 月）.

その他講演

1. 山田裕貴，”レーザープロジェクタにおける多波長化によるスペックル低減効果”，第 12 回レーザー照明，ディスプレイ専門委員会，2015 年 2 月 23 日.
2. 山田裕貴，”レーザープロジェクタにおけるスペックル低減－波長多重，偏光多重，角度多重－”，第四回可視光半導体レーザー応用シンポジウム，2018 年 12 月 5 日.
3. 山田裕貴，”レーザースペックルの基礎とその対策”，レーザー照明・ディスプレイセミナー，2019 年 7 月 12 日.

特許

［国外特許］

1. H. Yamada, “LASER LIGHT SOURCE DEVICE AND IMAGE PROJECTION DEVICE", US 2016/0223894 A1 (2016.8.4).
2. H. Yamada, K. Moriyasu, “LASER LIGHT SOURCE DEVICE AND IMAGE PROJECTION DEVICE”, US 2016/0341972 A1 (2016.11.24).
3. H. Yamada, K. Moriyasu, “LASER LIGHT SOURCE DEVICE AND IMAGE PROJECTION DEVICE”, US 2017/0168313 A1 (2017.6.15).
4. H. Yamada, “LASER LIGHT SOURCE DEVICE AND IMAGE PROJECTION DEVICE”, CN 105518517 B (2018.12.7).

［国内特許］

1. 森安研吾，山田裕貴，「レーザ光源装置及び画像投影装置」，特開 2015-162662 (2015.9.7).
2. 森安研吾，山田裕貴，「画像表示システム，及び，反射型スクリーン」，特許第 5794435 号

(2015.10.14).

3. 山田裕貴，森安研吾，「レーザ光源装置及び画像投影装置」，特許第 5804101 号 (2015.11.4).
4. 山田裕貴，森安研吾，「レーザ光源装置及び画像投影装置」，特許第 5804102 号 (2015.11.4).
5. 山田裕貴，「光源装置及び画像投影装置」，特許第 5930233 号 (2016.6.8).
6. 山田裕貴，「光源装置及び画像投影装置」，特開 2016-118680 (2016.6.30).
7. 山田裕貴，「投影システム」，特開 2016-148770 (2016.8.18).
8. 山田裕貴，「投影システム」，特開 2016-151731 (2016.8.22).
9. 山田裕貴，「光源装置及び画像投影装置」，特開 2016-161846 (2016.9.5).
10. 山田裕貴，「レーザ光源装置及び画像投影装置」，特許第 6008810 号 (2016.10.19).
11. 山田裕貴，「レーザ光源装置」，特許第 6009044 号 (2016.10.19).
12. 山田裕貴，奥田知広，「半導体レーザ光源装置」特願 2019-181226 (2019.10.1) .

受賞

1. Distinguished Paper Award, SID Display Week 2018 (2018).
   H. Yamada, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Dependency of Speckle Reduction by Wavelength Diversity on Angular Diversity in Laser Projection System".
2. 第 44 回レーザー学会業績賞論文賞 オリジナル部門 (2020).
   山田裕貴，森安研吾，畑中秀和，山本和久，“角度・波長・偏光多重制御によるレーザープロジェクターにおけるスペックル低減”.