

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	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

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	
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	
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	
2.1.2	他のスペックル測定系	
2.1.3	人間の眼を模擬したスペックル測定方法	
2.1.4	使用したスクリーンの特性	
2.2	測定系がスペックルに与える影響の検証	
2.2.1	カメラの f-number の影響	
2.2.2	測定距離の影響	
2.2.3	焦点位置の影響	
2.2.4	画像の輝度がスペックルに与える影響	
2.3	Non-speckle noise がスペックル測定に与える影響	
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	
2.4.1	偏光多重によるスペックル低減	
2.4.2	角度多重によるスペックル低減	
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	

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	2 スペックル場の複素振幅の規格化相関関数	54
3.2.3	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	
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	
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	
付録 B	トップハット型角度分布の角度範囲	105
参考文献		
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.

(a) Objective speckle

(b) Subjective speckle



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*₁ と平均値*Ī*の比を取ることで求められる.

$$C = \frac{\sigma_l}{\bar{l}}.$$
 (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 σ₁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{v} 、スペクトルの 1/e 全幅を δv 、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(θ_i , θ_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.

$$C = \left(1 + 2\pi^2 \left(\frac{\delta\nu}{\bar{\nu}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\lambda}}\right)^2 (\cos\theta_0 + \cos\theta_i)^2\right)^{-\frac{1}{4}}$$
$$\approx \left(1 + 2\pi^2 \left(\frac{\delta\lambda}{\bar{\lambda}}\right)^2 \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\lambda}}\right)^2 (\cos\theta_0 + \cos\theta_i)^2\right)^{-\frac{1}{4}}, \qquad (1-2)$$

ここで、 $\delta \lambda \approx \bar{\lambda} \times (\delta v / \bar{v})$ は波長幅である. 例えば $\sigma_h = 30 \ \mu m$ 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. $\sigma_h = 30 \ \mu m$ 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, $\theta_i = \theta_o = 0^\circ$.

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].

$$K \approx \frac{\Omega_{\rm p}}{\Omega_{\rm d}},$$
 (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.

Ωp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/√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+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.

	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
	\odot	\bigcirc	\bigcirc	×
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 	・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

Table 1.1 Comparison between each speckle reduction method.

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 θ₀ は 実験によって変更した.



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

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

Table 2.1 Specification of speckle measuring camera and lens.

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.

Item	Oxide [53,88]	LIPA [106]
Comoro trans	16 bit monochrome	8 bit monochrome CCD
camera type	cooled CCD camera	Camera
Camera temperature	0°C	-
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

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

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/m²)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]

$$K \approx 4.7 \times 10^{-7} \left(\frac{Dz_{\rm e}}{\lambda z_{\rm p}}\right)^2$$
, (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, ze はスクリーンと眼の距離, zp 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

$$K \approx \left(\frac{Dz_{\rm e}}{D_{\rm e}z_{\rm p}}\right)^2$$
, (2-2)

とかける.ここで, De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].

$$K = \left(\frac{1}{A_c^2} \iint d\Delta x d\Delta y P_e(\Delta x, \Delta y) \left| \mu_p(\Delta x, \Delta y) \right|^2 \right)^{-1}.$$
 (2-3)

ここで、µp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、 Peはスクリーン上での眼の点像分布関数の自己相関関数、Ae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.

Saroon	Manufacturar	Type	Gain	Surface
Screen	Manufacturer			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 List of screens.

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 $\sqrt{I_1^2 + I_2^2}/(I_1 + I_2)$ 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.

まず,カメラの f-number fn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.

$$C_{I}(r) = \left| 2 \frac{J_{1}\left(\frac{\pi D r}{\lambda z_{i}}\right)}{\frac{\pi D r}{\lambda z_{i}}} \right|^{2}.$$
 (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. $C_l(r_s)=0.5$ 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.

$$r_{\rm s} = 0.51 \frac{\lambda z_{\rm i}}{D} = 0.51 \lambda f_{\rm n}.$$
 (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_0 =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 $\sqrt{A_p/A_c}$ に依存する.ここで, A_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.

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

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 µm², 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 µm² であるので, $\sqrt{A_p/A_c}$ = 1.5となる. Roelandt らによれば, $\sqrt{A_p/A_c}$ = 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 $\sqrt{A_p/A_c} \leq 0.5$ 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.

$$C_{\text{total}} = \left(C_{\text{speckle}}^2 + C_{\text{non-speckle}}^2\right)^{0.5}.$$
 (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*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.

$$C_{\rm Xe} = \left(C_{\rm non-speckle}^2 + C_W W^2\right)^{0.5},$$
 (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 Cw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,Cnon-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

39

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.

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

41

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.
- Ωp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. Ωp は m² 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、ロは投影倍率を *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. (\bullet) Ω_d is fixed and Ω_p is changed, (\Box) 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.

Screen



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].

Spectrum #	Full width at	Speckle contrast	
	1/e ² maximum [nm]	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

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

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 $1\sim5$ 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.

47

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 $\Omega_d \ge \Omega_p$ 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

48

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.

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

ここで,

$$R_g(\Delta \nu) = \int_0^\infty g(\nu)g(\nu + \Delta \nu)d\nu, \qquad (3-2)$$

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

$$\Delta q_z = \frac{2\pi |\Delta \nu|}{c} (\cos \theta_0 + \cos \theta_i), \qquad (3-4)$$

g(v)は規格化パワースペクトル密度、v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.

$$g(\nu) = \sum_{i} A_{i} \frac{2}{\sqrt{\pi}\delta\nu_{i}} \exp\left(-\left(\frac{\nu - \nu_{i}}{\delta\nu_{i}/2}\right)^{2}\right), \qquad (3-5)$$

 A_i は規格化条件 $\sum_i A_i = 1$ を満たす定数で、 δv_i はそれぞれのガウシアンのスペクトル幅、 v_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.

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

$$B_{i,j} = 2\pi^2 \frac{\delta v_i}{v_i} \frac{\delta v_j}{v_j} \frac{\sigma_h^2}{\lambda_i \lambda_j} (\cos \theta_0 + \cos \theta_i)^2.$$
(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 $\theta_i=10^\circ$, $\theta_o=10^\circ$ 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/√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_α, 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_{λ,0}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 *Î*(*x*, *y*; λ, *α*, *β*)を形成する. (cos*α*, cos*β*)は入射光の方向余弦のスクリーン面方向 成分, λ は波長, (*x*, *y*)は像面の座標で, *Î*(*x*, *y*; λ, *α*, *β*)は規格化条件 ∬dxdy *Î*(*x*, *y*; λ, *α*, *β*) = *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 $\iint d\lambda d\Omega_{\alpha,\beta} f(\lambda, \alpha, \beta) = 1$ 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.

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

ここで、 $\int d\lambda$ は波長全体、 $\int d\Omega_{\alpha,\beta}$ 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.

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

$$\langle I^2 \rangle = \iint dx dy I^2(x, y)$$

$$= \iint d\lambda_1 d\Omega_{\alpha_1, \beta_1} \iint d\lambda_2 d\Omega_{\alpha_2, \beta_2} f(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1) f(\lambda_2, \alpha_2, \beta_2) \iint dx dy \hat{I}(x, y; \lambda_1, \alpha_1, \beta_1) \hat{I}(x, y; \lambda_2, \alpha_2, \beta_2)$$

$$= \iint d\lambda_1 d\Omega_{\alpha_1, \beta_1} \iint d\lambda_2 d\Omega_{\alpha_2, \beta_2} f(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1) f(\lambda_2, \alpha_2, \beta_2) \Gamma_I(\lambda_1, \alpha_1, \beta_1, \lambda_2, \alpha_2, \beta_2), \qquad (3 - 12)$$

ここで, $\Gamma_{I}(\lambda_{1}, \alpha_{1}, \beta_{1}, \lambda_{2}, \alpha_{2}, \beta_{2}) = \iint dx dy \hat{I}(x, y; \lambda_{1}, \alpha_{1}, \beta_{1}) \hat{I}(x, y; \lambda_{2}, \alpha_{2}, \beta_{2}) はスペックル 場の強度相関数である. Goodman [27]によると, fully developed speckle の強度相$

関関数は次のようにかくことができる.

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

ここで、µA 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.

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

$$C_{\lambda,\Omega} = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle}$$

= $\sqrt{\iint d\lambda_1 d\Omega_{\alpha_1,\beta_1} \iint d\lambda_2 d\Omega_{\alpha_2,\beta_2} f(\lambda_1,\alpha_1,\beta_1) f(\lambda_2,\alpha_2,\beta_2) |\mu_A(\lambda_1,\alpha_1,\beta_1,\lambda_2,\alpha_2,\beta_2)|^2}.$ (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(α_i , β_i , θ_i), (α_o , β_o , θ_o), その方向余弦を(D_{α_i} , D_{β_i} , D_{θ_i}), (D_{α_o} , D_{β_o} , D_{θ_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.

$$a(\xi,\eta) = E_0 \exp\left(i\Phi(\xi,\eta) + \frac{2\pi i}{\lambda} \left\{ \left(D_{\alpha_i}\xi + D_{\beta_i}\eta \right) - \left(D_{\alpha_o}\xi + D_{\beta_o}\eta \right) \right\} \right\}, \qquad (3-16)$$

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、 Eo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.

$$\Phi(\xi,\eta) = q_z h(\xi,\eta), \qquad (3-17)$$

ここで, $q_z = \frac{2\pi}{\lambda_1} (\cos \theta_0 + \cos \theta_i)$ 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*(*λ*; *x*, *y*; *ξ*, η) 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].

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

 $\Gamma_A を 2 つのスペックル場の複素振幅の相関関数とする. 2 つのスペックル場は波長と入射角度が(<math>\lambda_1, \alpha_{i1}, \beta_{i1}$)と($\lambda_2, \alpha_{i2}, \beta_{i2}$)で、測定角度はともに(α_0, β_0)であるとすると、 Γ_A は次のようにかくことができる.

$$\begin{split} \Gamma_A(x_1, y_1, x_2, y_2) &= \overline{A_1(x_1, y_1)A_2^*(x_2, y_2)} \\ &= \iint d\xi_1 d\eta_1 \iint d\xi_2 d\eta_2 \{ k(\lambda_1; x_1, y_1; \xi_1, \eta_1) k^*(\lambda_2; x_2, y_2; \xi_2, \eta_2) \overline{a_1(\xi_1, \eta_1)a_2^*(\xi_2, \eta_2)} \}, \end{split}$$

$$(3-19)$$

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 A を用いて次のように表される.

$$a_1(\xi_1,\eta_1)a_2^*(\xi_2,\eta_2) \propto \Lambda(\Delta q_z)$$

$$\times \exp\left[2\pi i \frac{(D_{\alpha_{11}} - D_{\alpha_{0}})\xi_{1} + (D_{\beta_{11}} - D_{\beta_{0}})\eta_{1}}{\lambda_{1}} - 2\pi i \frac{(D_{\alpha_{12}} - D_{\alpha_{0}})\xi_{2} + (D_{\beta_{12}} - D_{\beta_{0}})\eta_{2}}{\lambda_{2}}\right] \\ \times \delta(\xi_{1} - \xi_{2})\delta(\eta_{1} - \eta_{2}),$$
 (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 I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 I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].

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

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.

$$\begin{split} \Gamma_{A} &= \iint d\xi_{1} d\eta_{1} \iint d\xi_{2} d\eta_{2} \left\{ k(\lambda_{1}; x_{1}, y_{1}; \xi_{1}, \eta_{1}) k^{*}(\lambda_{2}; x_{2}, y_{2}; \xi_{2}, \eta_{2}) \overline{a_{1}(\xi_{1}, \eta_{1}) a_{2}^{*}(\xi_{2}, \eta_{2})} \right\} \\ &= \frac{1}{z^{2}} \Lambda(\Delta q_{z}) \iint du_{0} dv_{0} P\left(\lambda_{1} u_{0} - z'(D_{\alpha_{11}} - D_{\alpha_{0}}), \lambda_{1} v_{0} - z'(D_{\beta_{11}} - D_{\beta_{0}})\right) \\ &\times P^{*}\left(\lambda_{2} u_{0} - z'(D_{\alpha_{12}} - D_{\alpha_{0}}), \lambda_{1} v_{0} - z'(D_{\beta_{12}} - D_{\beta_{0}})\right) \\ &\times \exp\left(2\pi i \left\{\frac{u_{0}(x_{2} - x_{1})}{z} + \frac{v_{0}(y_{2} - y_{1})}{z}\right\}\right), \quad (3 - 23) \end{split}$$

ここで,次の変数変換を行った: $u = \lambda_1 u_0 - z' (D_{\alpha_{11}} - D_{\alpha_0}), v = \lambda_1 v_0 - z' (D_{\beta_{11}} - D_{\beta_0}).$ 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.

$$\mu_{A}(\lambda_{1}, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, \lambda_{2}, \alpha_{i2}, \beta_{i2}) = \frac{\Gamma_{A}}{\Gamma_{A}(\lambda_{1} = \lambda_{2}, \alpha_{i1} = \alpha_{i2}, \beta_{i1} = \beta_{i2})}$$
$$= \Lambda(\Delta q_{z})\Psi(\lambda_{1}, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, \lambda_{2}, \alpha_{i2}, \beta_{i2}; \alpha_{0}, \beta_{0}), \qquad (3-24)$$

ここで,

$$\Psi(\lambda_{1}, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, \lambda_{2}, \alpha_{i2}, \beta_{i2}; \alpha_{0}, \beta_{0}) = \frac{\iint du_{0} dv_{0} P(\overline{u_{1}}, \overline{v_{1}}) P^{*}(\overline{u_{2}}, \overline{v_{2}})}{\left[\iint du_{0} dv_{0} [P(\lambda_{1}u_{0}, \lambda_{1}v_{0})]^{2} \iint du_{0} dv_{0} [P(\lambda_{2}u_{0}, \lambda_{2}v_{0})]^{2}\right]^{\frac{1}{2}}},$$

$$(3 - 25)$$

$$\overline{u_k} = \lambda_k u_0 - z' (D_{\alpha_{ik}} - D_{\alpha_0}), \overline{v_k} = \lambda_k v_0 - z' (D_{\beta_{ik}} - D_{\beta_0}), \quad k = 1, 2.$$

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.

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

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

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.

- \mathbb{H} 1: $\# \stackrel{r}{\cong} \frac{r}{\lambda_1}$, $\# \stackrel{\sim}{\mapsto} \left(\frac{z'}{\lambda_1} (D_{\alpha_{11}} D_{\alpha_0}), \frac{z'}{\lambda_1} (D_{\beta_{11}} D_{\beta_0}) \right)$.
- \mathfrak{P} 2: $\# \underbrace{\mathbb{R}}_{\lambda_2}^r$, $\mathfrak{P} \stackrel{\sim}{\sim} \left(\frac{z'}{\lambda_2} (D_{\alpha_{12}} D_{\alpha_0}), \frac{z'}{\lambda_2} (D_{\beta_{12}} D_{\beta_0}) \right).$



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 r1, r2, 中心間距離を d と置き直し, r1≦r2とすると,

$$S = \begin{cases} \pi r_1^2 & (d \le |r_2 - r_1| \mathcal{O} \succeq \mathfrak{E}) \\ \phi_1 r_1^2 + \phi_2 r_2^2 - dr_1 \sin \phi_1 & (|r_2 - r_1| \le d < r_1 + r_2 \mathcal{O} \succeq \mathfrak{E}), \\ 0 & (d \ge r_1 + r_2 \mathcal{O} \succeq \mathfrak{E}) \end{cases}$$
(3-28)

$$S_1 = \pi r_1^2,$$
 (3 – 29)

$$S_2 = \pi r_2^2$$
, (3-30)

となる.ただし,

$$\cos\phi_1 = \frac{r_1^2 + d^2 - r_2^2}{2dr_1},\tag{3-31}$$

$$\cos\phi_2 = \frac{r_2^2 + d^2 - r_1^2}{2dr_2}.$$
 (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*(λ, α, β)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.

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

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

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.

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

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 $\theta_i=0^\circ$ 、 z'=700 mm、r=0.5 mm、 $\lambda=530$ nm、 $\sigma_i=3$ µm とした. $\Omega_d \ge \Omega_p$ 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、 $\Omega_d=2\pi(1-\cos\theta_{div}), \Omega_p=2\pi(1-\cos(atan(r/z')))=1.6\times10^{-6}$ 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ではなく、 λ_2 - λ_1 の値によって 2 での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 での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. $\theta_i=0^\circ$, $\theta_o=0^\circ$, z'=700 mm, r=0.5 mm, $\lambda_1=530$ nm, $\lambda_2=530\sim540$ nm, $\sigma_i=3$ µm (式(3-6)では $\sigma_h=3$ 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 $\theta_{div}=0.000001$ 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

$$C = \sqrt{\frac{M+K\pm1}{MK}},\tag{3-35}$$

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_0 とした場合,スペックルコントラストは(cos θ_0)^{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(θ₀=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.

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

 $C_{\lambda,a}$ 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. $C_{non-speckle}$ 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 $\Omega_{p}>\Omega_{d}$ のときに $R_{\Omega}=(\Omega_{p}/\Omega_{d})^{0.5}$ 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*= $\Omega_{d}^{0.5}$: $\Omega_{p}^{0.5}$ であることから、カメラの解像スポットの中でおよそ $N=(d/s)^{2}=\Omega_{p}/\Omega_{d}$ 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 $C_{\Omega}=1/R_{\Omega}=(\Omega_{d}/\Omega_{p})^{0.5}$ よりも小さく、特に角度多重が小さい場合、すなわち(Ω_{d}/Ω_{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 Ω_p=Ω_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*normalizedを示す.

$$C_{\text{normalized}} = \frac{C_{\#1,2}}{(C_{\#1} + C_{\#2})/2}.$$
 (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/√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 ($\theta_i = \theta_o$)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 $C_{non-speckle}$ 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, $C_{non-speckle}$ =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≫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 $(\theta_i, \theta_o) = (0^\circ, 17^\circ)$. 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, $C_{non-speckle}$ 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 $C_{\sigma}=1$ 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 $C_{\sigma}=0.5$ 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 $C_{\sigma}=0.9$ 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 λ/θ_{div} ~350 µmと測定範囲よ りも大きいため、 $\sigma_l \ge \sigma_h$ 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_{obligue}を持つ.

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



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、 $\sin\theta_i - \sin\theta_o$ 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、 $\sin\theta_i - \sin\theta_o$ が大きいほど短い波長間隔でスペックルが低減できる. $\sin\theta_i - \sin\theta_o = 0$ 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、 $\sin \theta_i - \sin \theta_o \delta$ 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 Δλ_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 Δλ_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 $C_{\Omega}=(\Omega_d/\Omega_p)^{0.5}$ 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 σι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_0 =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≈1/√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 $C_{\sigma}=1$, $\theta_{div}=0.0027$ rad (Figure 5.2 の赤実線)及び $\theta_{div}=0.0011$ 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.

Laser set	Wavelength	Wavelength (nm)				
	intervals	#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

Table 5.1 List of wavelengths of lasers.

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/√MK/(M+K±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 $C_{non-speckle}$ =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≫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 σ₁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 $1 \sim 5$ 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 $\Lambda や \Psi$ 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.

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

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

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_{non-speckle}=0.01, C_σ=0.5,シルバースクリーンで は C_{non-speckle}=0.06, C_σ=1 とした. C_{λ,0}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*_{λ,0}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 θ₀=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.

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

Table 5.3 Participant attributes of the sensory test.

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
	1	23 on silver screen	0.39
(b)	2	11 on matte screen	0.08
	3	23 on silver screen	0.19
(c)	2	48 on matte screen	
	3	99 on silver screen	Same as condition (b)

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.
- 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4mの位置に立つ.

 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.

#	Item	Description	
1	Duciestar	CP4330-RGB (Christie Digital Systems)	
	Projector	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)	

Table 5.5 Measurement condition at a movie theater.



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.

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

Table 5.6 Measured speckle contrast.

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_i =10 μ m、 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 σ₁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

101

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 TEM₀₀ 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 cosa、 cosβ、 cosθ、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 cosa、 cosβ'、 cosθ'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 $\theta' < \theta_{div}$ 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.

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

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

$$\cos \beta' = \mathbf{L} \cdot \mathbf{e}_{\eta'} = \mathbf{L} \cdot (\mathbf{e}_{\eta} \cos \theta_{i} - \mathbf{e}_{z} \sin \theta_{i}) = \cos \beta \cos \theta_{i} - \cos \theta \sin \theta_{i}$$
$$= \cos \beta \cos \theta_{i} - \sqrt{1 - \cos^{2} \alpha - \cos^{2} \beta} \sin \theta_{i}.$$

したがって、入射光のα、βの範囲は下式で表される.

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



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

- 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).
- 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).
- 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**, 1093911 (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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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, "Threewavelength 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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-sequencebased diffractive optical element," Appl. Opt. 54, E47–E54 (2015).
- 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 microvibrated paper screen," Appl. Opt. **53**, E38–E46 (2014).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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 (NED0, 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).
- 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/5af16d93f950b790adcfd
 69c/1525771671647/Cinema_Screen_Surface_Catalogue.pdf (Retrieved Jan. 9, 2019).
- 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).
- 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,山崎順准教授,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.

112

博士論文に関する業績一覧

学術論文(査読有り)

- <u>H. Yamada</u>, 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. <u>H. Yamada</u>, 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).
- <u>H. Yamada</u>, 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. <u>H. Yamada</u>, 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. <u>山田裕貴</u>, 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

- <u>H. Yamada</u>, 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).
- 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).
- (Invited) <u>H. Yamada</u>, 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).
- (Invited) <u>H. Yamada</u>, 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

 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

- 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.
- 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 ー", 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.
- 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. <u>H. Yamada</u>, "LASER LIGHT SOURCE DEVICE AND IMAGE PROJECTION DEVICE", US 2016/0223894 A1 (2016.8.4).
- H. Yamada, K. Moriyasu, "LASER LIGHT SOURCE DEVICE AND IMAGE PROJECTION DEVICE", US 2016/0341972 A1 (2016.11.24).
- 3. <u>H. Yamada</u>, K. Moriyasu, "LASER LIGHT SOURCE DEVICE AND IMAGE PROJECTION DEVICE", US 2017/0168313 A1 (2017.6.15).
- 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. <u>山田裕貴</u>,「光源装置及び画像投影装置」,特許第 5930233 号 (2016.6.8).
- 6. <u>山田裕貴</u>,「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. <u>山田裕貴</u>,「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).

<u>H. Yamada</u>, K. Moriyasu, H. Sato, and H. Hatanaka, "Dependency of Speckle Reduction by Wavelength Diversity on Angular Diversity in Laser Projection System".

 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".