



Title	液晶を用いた適応的な光量調節による撮影システムの高ダイナミックレンジ化に関する研究
Author(s)	万波, 秀年
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/294
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

**液晶を用いた適応的な光量調節による
高ダイナミックレンジ撮影システムに関する研究**

提出先 大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月 2009年1月

万 波 秀 年

内容梗概

屋外などの明暗の差が激しいシーンの情報を損失なく撮影するためには、ダイナミックレンジ性能の高い撮影システムが必要である。それらのシステムにより撮影される光量は、通常より多くの光量情報を持つため、例えば画像処理など、様々な用途での活用が考えられる。一方、ダイナミックレンジの低い表示機器においては、撮影された光量を直接表示できず、光量情報を圧縮して表示を行う必要がある。そのため、撮影システムは、シーンの光量をより正確に表すダイナミックレンジの高い出力のみでなく、表示機器に合わせてダイナミックレンジの低い出力を、用途に応じて出力することが望まれる。そこで本研究では、液晶を用いた適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮像システムを提案する。光量に対して適応的に液晶の制御を行い、各画像素子の受光量を調節して撮影する。画像素子における受光量と液晶の制御情報からシーンの光量を計算することで高ダイナミックレンジ画像の出力を行える。この手法では画像素子としては通常のものを用いるため、光量調節により各画像素子の出力をそのままダイナミックレンジの低い出力として用いることができる。撮影システムは、液晶の種類とレンズの構成により分類される。液晶の種類として透過型液晶と反射型液晶が考えられ、また、レンズの構成として単レンズとリレーレンズを考える。分類のうち、透過型液晶及び単レンズを用いたシステムは光学系が簡単であるため、構築コストが少ないという利点があるものの、画素単位的光量調節が難しい。一方、反射型液晶及びリレーレンズを用いたシステムは画素単位的光量調節が実現できるものの、光学系が複雑になるという問題があり、それぞれ一長一短であるため、実際に両者を構築し、その特性を評価した。透過型液晶を用いたシステムにおいては、人間の視覚特性を考慮した光量調節の実現を確認した。光量調節の効果が広がりをもつが、この広がり関数を実データから求めることで、より正確に光量を求められることを確認した。また、反射型液晶を用いたシステムにおいては、液晶面にフォーカスを合わせているためより密に適応的な光量調節が可能であり、また光量調節の情報から元の光量を復元することで適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮像システムが実現できることを確認した。

研究業績

学術論文

- [1] 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木 康史, “透過型液晶フィルタリング方式によるカメラの広ダイナミックレンジ化”, 計測自動制御学会論文集, vol.41, no.12, pp.1026-1035, Dec. 2005.
- [2] 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木 康史, “反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラ”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J90-D No.8, pp.1921-1929, Aug. 2007.
- [3] Hidetoshi Mannami, Ryusuke Sagawa, Yasuhiro Mukaigawa, Tomio Echigo, Yasushi Yagi, “Adaptive Dynamic Range Camera with Reflective Liquid Crystal”, Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol.18, Issue 5, pp.359-365, Oct. 2007.

国際会議

- [1] Hidetoshi Mannami, Ryusuke Sagawa, Yasuhiro Mukaigawa, Tomio Echigo, Yasushi Yagi, “High Dynamic Range Camera using Reflective Liquid Crystal”, Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV 2007), Oct. 2007.

国内発表

- [1] 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木 康史, “液晶フィルタを用いた広ダイナミックレンジカメラの提案”, 情報処理学会研究報告, 情報処理学会, no.2005-CVIM-149, pp.23-30, Apr. 2005.

- [2] 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木 康史, “透過型液晶フィルタリング方式によるカメラの広ダイナミックレンジ化”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp.1208-1215, Jul. 2005.
- [3] 万波 秀年, 佐川 立昌, 向川 康博, 越後 富夫, 八木 康史, “反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラの提案”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp.412-417, Jul. 2006.

目次

研究業績	iii
第1章 序論	1
第2章 関連研究	5
2.1 実世界の光量とダイナミックレンジ	5
2.2 光量の計測	7
2.3 光量の表示	17
2.4 ファイルとしての光量の表現	21
2.5 関連手法のまとめと本論文の位置づけ	23
第3章 適応的な光量調節に基づくダイナミックレンジ撮影システム	27
3.1 適応的な光量調節に関するモデル	27
3.1.1 調光機器を用いた適応的な光量の調節	27
3.1.2 調光機器の出射効率と光量の関係	28
3.2 幾何関係に関するモデル	30
3.2.1 カメラレンズの歪みとその補正	30
3.2.2 画像素子と調光機器間の位置関係	31
3.3 構成による分類	32
3.3.1 調光機器による分類	32
3.3.2 レンズ構成による分類	35
3.3.3 分類に関する考察	37
第4章 透過型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジ撮影システム	39
4.1 システムのモデル	39
4.2 液晶の制御方法	41
4.3 試作システムにおける評価実験	42

4.3.1	試作システムの概要	42
4.3.2	広がり関数の算出	45
4.3.3	高ダイナミックレンジの撮影	50
第 5 章	反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジ撮影システム	55
5.1	システムのモデル	55
5.2	システムの光学特性	57
5.3	試作システムにおける評価実験	58
5.3.1	試作システムの概要	58
5.3.2	光学シミュレーションを用いた光学素子の位置合わせ	64
5.3.3	高ダイナミックレンジの撮影	67
第 6 章	結論	73
	謝辞	77
	参考文献	78

第1章 序論

世界に存在する物質は程度の違いはあるものの、自身の発光、他からの光の反射、あるいはその両方により光を発する。デジタル画像素子では各波長における光の強さを電荷へと変換し、これを光量として計測する。こうして計測された光量は、例えばシーンの再現による情報の共有など、様々な用途に用いられる。そのため、シーンの情報を損失することなく記録・再生を行うことが望まれる。実世界を表現する指針として、空間分解能、色、立体感、光量の幅などがあるが、市販のカメラとディスプレイではそれらを完全には表現できない。空間分解能に関しては、カメラの高解像度化が進んでおり、またシーンをより精細に表現する技術として、すでにハイビジョンが実用化され、さらにスーパーハイビジョン [1] の開発も行われている。色に関しては、通常は三原色 (赤 (R), 緑 (G), 青 (B)) で色を表現しているが、6 バンドなどの多波長を用いた表現により、実物により近い色・質感を再現する技術の研究が行われている [2][3]。立体感の表現においては、点までの距離を計測するカメラ [4] や複数カメラにより計測した視差を用いる手法 [5]、また立体感を再現する方法として、電子シャッターや偏光板を眼鏡として利用して観察者に視差を与える手法、特殊なスクリーンを用いることで方向に依存しない表示が可能な三次元ディスプレイ [6] が開発されている。このように実世界により近い表現が可能になっているが、光量の幅に関して性能が不十分な場合には映像の質は良くない。そのため、以上の指針と同様に光量の幅の表現は重要であり実世界と表現能力の差に関して解決が望まれている。

実世界の光量の幅を表現できない例として、シーン中に著しく光量の差が大きい部分がある場合、強い光を受光した画像素子の近傍において正しく光量を計測できないことがある。これは、光を多く受けている画像素子の電荷容量が飽和し、飽和量以上の光量を蓄えることができないため、実際の光量を捉えられないからである。そのため、受光量に対するダイナミックレンジを向上させる研究が行われている。ま

た，計測された情報に基づき光量の再現・表示を行うが，計測と同様に，実世界に比べダイナミックレンジが不足している．表示機器の性能向上により扱える光量の幅が広がっているが，一方でダイナミックレンジの低い機器を用いて高ダイナミックレンジの情報を表示する研究も行われている．このように，入力である光量の計測，及び表示による出力と，入出力それぞれにおいてダイナミックレンジを向上させる手法が提案・実用化されていることから，実世界のダイナミックレンジへ対応するシステムの重要性がうかがい知れ，また，実世界のシーンの計測には表示や記録といった出力も同時に考慮する必要があることがわかる．しかしながら，これらを一貫して考えた研究はあまり行われていない．以上のことを踏まえると，幅広い光量の計測においては，動的なシーンへの対応，高解像度化という，適応可能なシーンからの観点のみでなく，光量情報の出力の観点をもつ必要がある．

幅広い光量を撮影する手法として，カメラの前方に空間的に感度調節が可能な素子を配置し，光量に応じて適当な制御を行う手法が提案されている．この手法は，画像素子面は通常のものを用いるため空間分解能は低下せず，また，感度の制御を実時間で行うことで動的なシーンにも対応できる．さらに，表示機器のダイナミックレンジに応じた情報の出力が可能である．そこで本論文では，計測，表示の両者を考慮したシステムとして，適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムについて論じる．

本論文の以降の構成は次のとおりである．第2章では，光量の計測，表示，及び記録のそれぞれについて，これまでに提案された高ダイナミックレンジへの対応について述べる．また，それらを踏まえ，動的なシーンへの対応，高解像度化という，適応可能なシーンからの観点のみでなく，光量情報の出力の観点について述べることで本論文で扱う“適応的な光量調節による撮影”と他の手法の差異を明確にする．第3章では，提案手法である適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムについて述べる．画像素子面の前方へ調光素子面を配置することによる光量調節の原理，及び画像面と調光素子面の間の幾何関係に関して述べる．この手法では，調光素子として，透過型液晶，反射型液晶，及びDMDが考えられ，また，レンズの構成として，単レンズ，リレーレンズが考えられる．これらの要素からシステムを計六種類に分類し，それぞれを特徴づける．これらを比較した結果として，透過型液晶及び単レンズを用いるシステムと，反射型液晶及びリレーレンズを用いる

システムのそれぞれにおける利点について述べる．第4章では，透過型液晶を用いた撮影システムを提案する．システムの特徴として，単レンズを用いた場合の光学系について述べ，また，その影響を明らかにし，それを踏まえた液晶の制御方法について述べる．実装したシステムについて説明し，システムを用いた評価実験について述べる．第5章では，反射型液晶を用いた撮影システムを提案する．リレーレンズを用いる場合の光学系と，反射型液晶の光学系について述べる．実装したシステムについて説明し，評価実験について述べる．第6章では，本論文で得られた成果を要約し，今後に残された課題について述べる．

第2章 関連研究

本章では，本論文で論じるシーンの明るさに関する概念の定義を行い，これまでに提案されてきた計測系，表示系，記録系について述べる．まず，概念の定義として，実世界の光量及びシーンとしてのダイナミックレンジについて述べる．続いて，計測，表示それぞれに関して光量との関係を明らかにし，実世界のダイナミックレンジへの対応のために提案されてきた手法を述べる．また，計算機内での情報の記録形式について述べる．それらを踏まえ，本研究の目的，他の手法との差異を述べる．

2.1 実世界の光量とダイナミックレンジ

実世界に存在する光の強さは，表 2.1 に表すように実に多岐にわたる．シーンとしてこれらの明るさを考えた場合，シーンに存在する光量の幅をダイナミックレンジといい，光量の最小値 L_{min} と最大値 L_{max} の比の対数として次式のように表される [9]．

$$DR = 20 \log \frac{L_{max}}{L_{min}} (dB) \quad (2.1)$$

表 2.1: 実世界に存在する光の例 [7][8]

例	明るさ (lux)
暗闇・夜空	～ 0.001
月明かり	0.01 ～ 1
街灯	0.1 ～ 1
蛍光灯の下	10 ～ 100
明るい店舗	500 ～ 800
曇り空	1,000 ～ 10,000
晴天	10,000 ～ 100,000

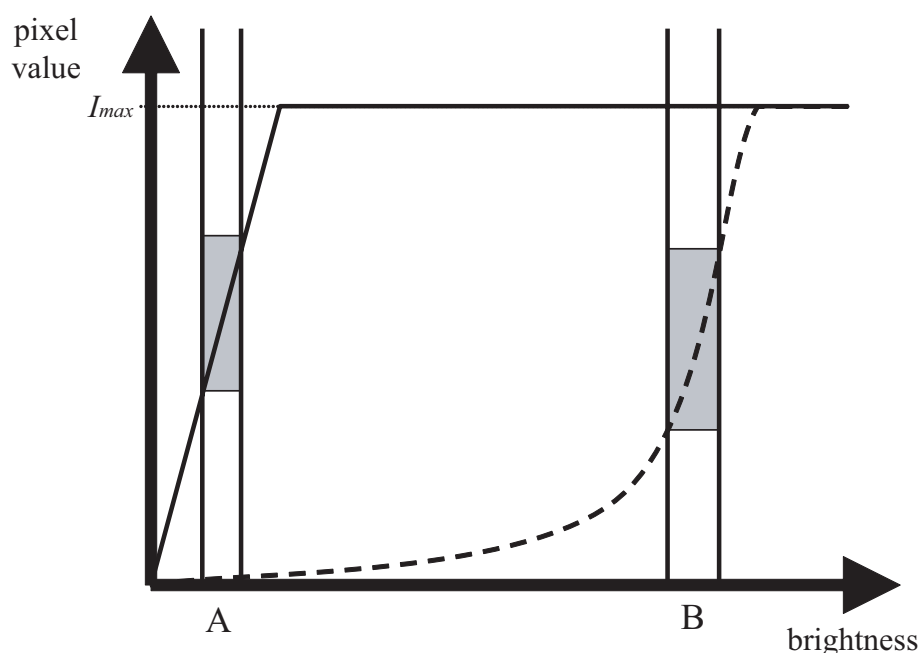


図 2.1: シーンの明るさと画素値の関係

例えば表 2.1 にあるように、教室など、蛍光灯の下では 10 dB 程度であるが、晴天を含む場合では、日中の屋外で 100 dB 程度、車載用途では 130 dB 程度、暗闇から直射日光まででは 200 dB 程度のダイナミックレンジであると言われている [10]. これらのシーンは日常的なものであるにも関わらず、含まれるダイナミックレンジは人間の目が持つダイナミックレンジ (80-100 dB 程度) と比べても大きい. 通常のデジタル素子を用いた場合には、シーンのダイナミックレンジに対して素子のダイナミックレンジが不足することがある. このことを模式的に図 2.1 に示す. 図 2.1 中、横軸はシーンの明るさを表し、縦軸は画素値を表す. 実線と破線はそれぞれ、A、B の明るさに合わせて素子の特性を調整した場合の明るさと画素値の対応を表す. 実線、破線で表される特性はそれぞれ、A、B の範囲の光量に対して画素値と光量の間で一対一な対応を得ることができる. しかし、実線で表される特性では、B の範囲の光量に対しては同一の画素値 I_{max} となり正しく対応が得られない. また、破線で表される特性では、A の範囲の光量に対しては密な対応を得ることができず、B の範囲の光量に比べ表現能力が低下する. ここで、シーンが A、B 双方の範囲の光

量を含む場合、シーンのダイナミックレンジに対して素子のダイナミックレンジが不足し、シーンを適切に表現することが難しい。そのため、デジタル素子を用いて実世界のダイナミックレンジへ対応する研究が行われている。

2.2 光量の計測

次にデジタル画像素子による光量の計測について述べる。本論文で扱うデジタル画像素子は通常、物質が発する光を受けることで電荷を蓄積し、単位時間あたりの電荷量により物質の明るさを計測する。ある一点の画像素子に注目すると、画像素子へ入射する光量 Q は物質から発せられる光量 L 、物質と画像素子間の光学特性 $o(\cdot)$ を用いて次式のように表される。

$$Q = o(L) \quad (2.2)$$

ここで光学特性 $o(\cdot)$ はレンズなどの光学素子やシャッタースピード、絞りによる影響などを表す。式 (2.2) により得られた光量 Q は、画像素子の感度特性 $c(\cdot)$ 、A/D 変換 $d(\cdot)$ によりデジタル情報である画素値 I へと変換される。

$$I = d(c(Q)) \quad (2.3)$$

ここで式 (2.2), (2.3) より、画素値 I は入射光量 L と受光特性 $r(\cdot)$ により表される。

$$I = d(c(o(L))) = r(L) \quad (2.4)$$

以上の光量計測に関するモデルを図 2.2 に示す。また、図 2.3 に受光特性の例を示す。図 2.3 に表すように、画像素子に蓄積できる電荷は有限であるため、それを超える光量が入射された場合は電荷の飽和を起し、一定以上の入射光量に対しては同様の画素値が得られる。こうして得られた画素値 I を用いて、後述の表示系による光情報の再現が可能である。多くの表示系では、再現された光は人間により観測されることを念頭に置いているため、表示系と人間の目の特性 [11][12] を考慮して、受光特性としてガンマ補正 [13] のような非線形な処理をされることが多い。また、シーンの明るさによって受光特性を調整する必要があるが、自動的に調整を行う方法と

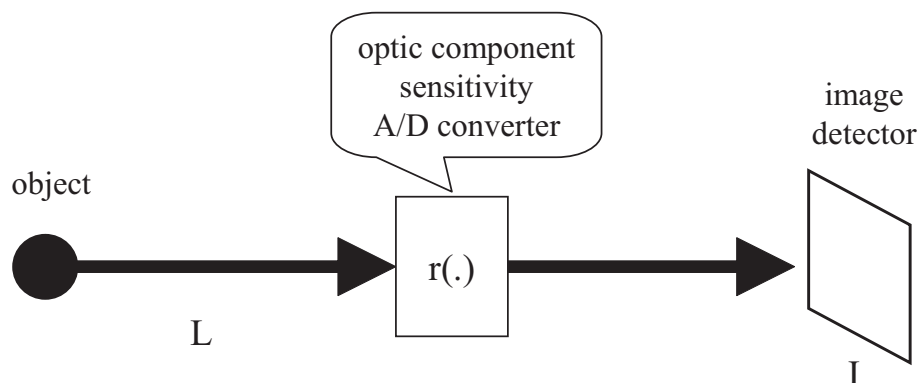


図 2.2: 計測のモデル

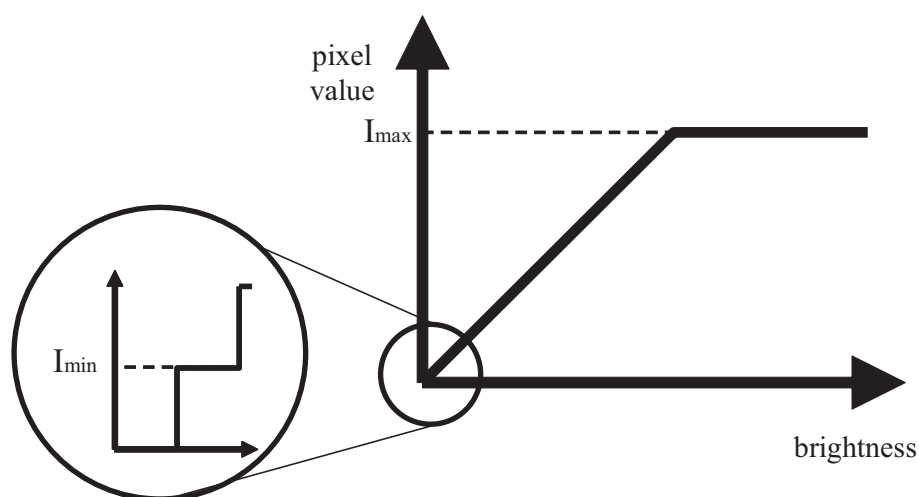


図 2.3: 受光特性の例

してオートゲインコントロール(AGC)[14]¹が広く用いられている。なお、画像素子とシーン中の点の対応は計測系の幾何的特性として射影と呼ばれ、カメラなどの計測系においては一般に三次元のシーンから二次元への射影を扱う。以降では画像面中の素子 (x, y) における画素値を $I(x, y)$ と表す。

デジタル画像素子として、CCD センサ、CMOS センサが広く用いられている [15]

¹AGC は音声機器などにも用いられる技術であり、カメラ中の画像素子全体における入射光量の統計情報に基づいてゲインを調整することで適当な画素値を得ることができる。しかし、画像素子全体において受光特性を変更するため、システムのダイナミックレンジが向上するわけではない。



図 2.4: 広い幅の光量を含むシーンの例. (a) 高感度での撮影, (b) 低感度での撮影

が、それぞれにおけるダイナミックレンジは、一般的に 60-70 dB[16] と比較的小さい。また、近年では 170 dB のダイナミックレンジを持つ製品[17]も存在するが、依然として実世界のダイナミックレンジを完全にはカバーできない。計測においてダイナミックレンジが不足した場合、例えば図 2.4 のように画像の白とび、黒つぶれが観測される。図 2.4(a) では、高感度の撮影により光量の少ない領域(室内)を適切に撮影できているものの、光量の多い領域(屋外)は明るすぎるため電荷の飽和による画像の白飛びが生じる。逆に図 2.4(b) では、低感度での撮影により光量の多い領域を撮影に撮影できているが、光量の少ない領域ではノイズと同程度の電荷しか得られず画像の黒つぶれが生じている。このように、ダイナミックレンジが不足した場合にシーン情報を損失することがある。

以上で述べたように、実世界に存在する光量の幅は広く、計測系においてはダイナミックレンジが不足しており、またそれに対する研究が行われている。計測系のダイナミックレンジを向上させる手法は、時分割撮影手法、回路構成による手法、画像素子の統合による手法、光分割撮影手法、感度適応撮影手法に大別できる。以下にそれぞれについて述べる。

回路構成による手法

画像素子に回路を組み合わせ、通常とは異なる感度特性、もしくは光量の計測方法を実現することによりカメラのダイナミックレンジを向上する。

例えば、光量に対する非線形応答の実現が提案されている[18][19][20][21][22]。これらの手法では図 2.5 のように、入射光量に対して主に $\log$ 関数などの非線

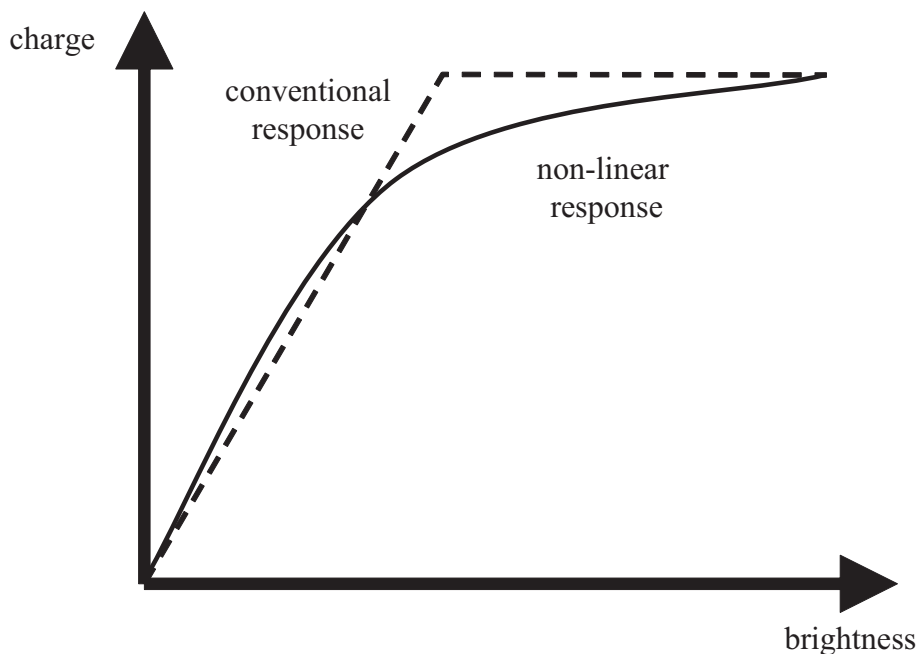


図 2.5: 非線形な応答による手法

形な応答を実現する．通常の画像素子では入射光量に比例して電荷を蓄えるが，非線形な応答により光量の許容量が大きく増幅する．また，光量が少ない場合にも，線形な応答とほぼ同様の画素値を得られるため，より幅広い光量を計測できる．しかしながらこれらの手法では，電荷の漏れなどにより画像素子の位置に固有パターンノイズが生じ，ダイナミックレンジ低下の原因となることがある．このノイズを軽減するために，画像素子ごとの校正 [23][24]，防護回路による暗電流の減少 [25] が提案されている．

また，通常の画像素子では単フレームごとに電荷を読み出すが，図 2.6 のように，単フレーム内に複数回読み出しを行う手法が提案されている．[26][27] では，読出の間隔を変えた高速な読出を複数回行い，それらの情報を統合し光量を求める．長時間の蓄積で得られる電荷は弱い光量，短時間の蓄積で得られる電荷は強い光量に対応しており，これらを合成することで高ダイナミックレンジを実現する．また，電荷の飽和などの統計的な情報を基に，短時間の蓄積，超短時間の蓄積を行うかの選択などの制御をリアルタイムに行う．この手法で

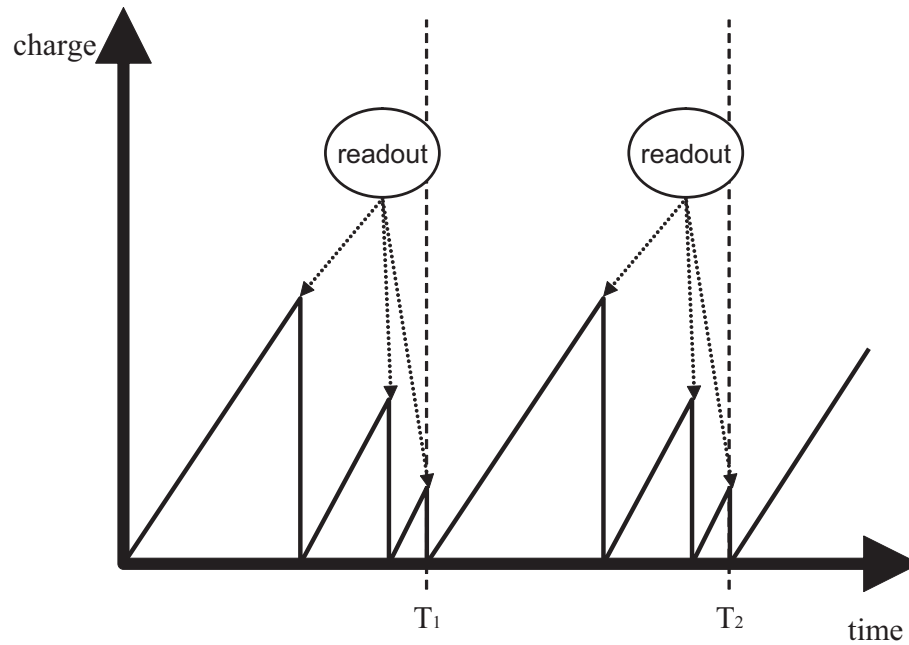


図 2.6: フレーム内複数読出による手法

はリアルタイムで複数の電荷情報を統合して出力とするため、回路が複雑になる。一方、Acosta-Serafini ら [28] は、複数回の読出においてそれぞれ異なる閾値を設け、電荷が閾値を超えている場合に電荷をリセットする手法を提案した。それぞれの読出では、電荷のリセットをしなかった場合にそのフレームにおいて電荷の飽和が生じるかを基準としてリセットを行う。シーンの光量は、最終的に蓄積された電荷とリセットのタイミングから計算される。これらの手法では、短時間で複数回の読み出しを行うため、消費電力が多くなり、また制御回路が複雑になる。

蓄積される電荷により光量を計測するのではなく、図 2.7 のように、一定の電荷が蓄積される時間を計測し、それにより光量を求める画像素子の実現されている。Qi ら [16] は、各フレームにおいて一度のみ電荷の蓄積を関知する回路により、電荷の蓄積にかかる時間から光量を計測した。また Stoppa ら [29] は、従来通りの電荷の計測と蓄積時間の計測の組合せにより、より柔軟な光量計測を提案している。一方、Brajovic ら [30] は、蓄積電荷が一定に達した時間

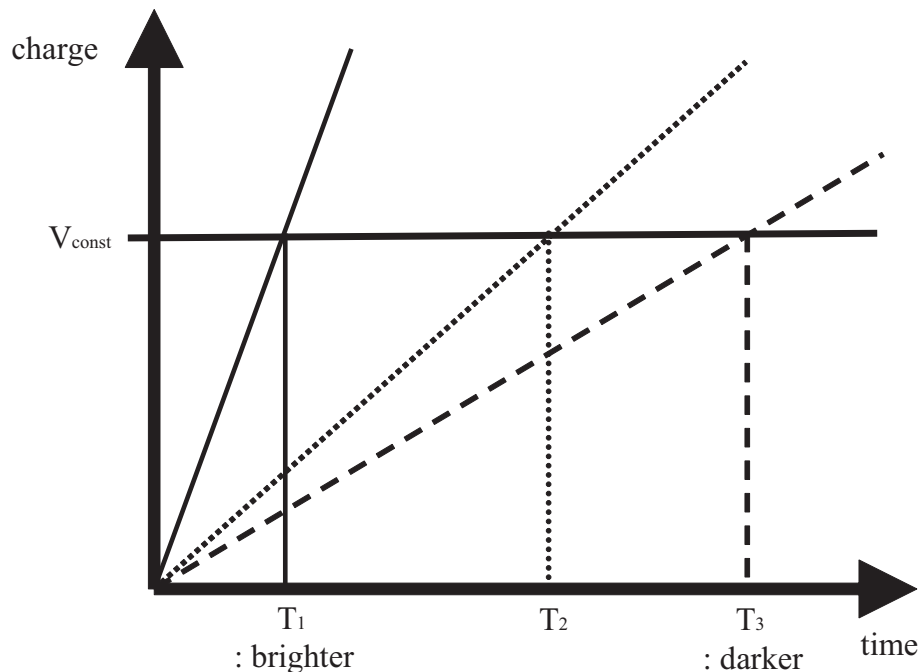


図 2.7: 蓄積時間による手法

ではなく、画像面内における光量の大きさの順序関係を求める。この手法では順序関係から光量を計測するため、電荷の飽和や黒つぶれといった現象が原理的に生じない。また、シーンにおける相対的な光量の分布と対応させることで通常のカメラと同様の画像を得ることができる。電荷蓄積の時間を計測する手法は総じて、一定以上の電荷を得られることを前提としているため、光量の少ないシーンに対しては性能が低下する。

なお、光量そのものの計測よりもシーン中の空間的な光量変化に注目し、細部を鮮明に撮影する手法 [31] や、反射鏡の位置補正を行い、天体望遠鏡による暗闇の撮影において生じるノイズを低減する手法 [32] も提案されている。

以上で述べた回路構成に関する手法は総じて、画像素子の改良によるため、通常の画像素子と同様に扱え、動的なシーンへも対応できる。また報告例として、[29] において 120 dB, [22] において 137 dB と、高いダイナミックレンジを持つ素子が多数報告されている。しかし、素子に対して機能を持つ回路が必

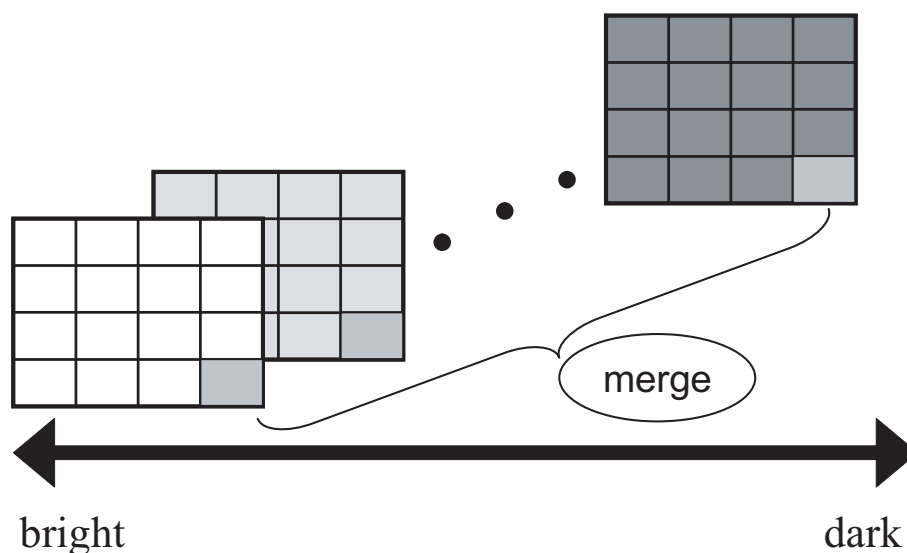


図 2.8: 時分割撮影手法

要であり、特に蓄積時間の計測による手法では、より多くの電子素子が必要であるため、画像素子の高集積が容易ではない。

時分割撮影手法

最も広く用いられている手法として、図 2.8 のように、露光時間を段階的に変えながら同一のシーンを連続的に撮影する手法が提案されている。各フレームにおいてシャッタースピードや感度を変更することで受光特性を変化させて撮影を用い、短い露光時間で撮影された画像から光量が多い部分の情報を得る、長い露光時間で撮影された画像から光量が少ない部分の情報を得ることでシーンの光量を求める。これにより、より広い範囲の光量についての情報を得ることができ、カメラのダイナミックレンジが広がる。

Madden ら [33] は、入射光量と画素値の関係が線形であるとし、露光時間を変化させて撮影した複数の画像から、シーンの光量を求めた。しかしながら、この仮定は一般的には成り立たない。Mann ら [34] は、入射光量と画素値ではなく、露光時間と入射光量が線形の関係にあることを利用し、ダイナミックレンジを向上させる手法を提案した。この手法では、二枚の画像を用いて、異なる画像間で等しい画素値をもつ画像素子の組、及び同一の画像素子における画

素値の差から受光特性を求めることでシーンの光量を復元し、高ダイナミックレンジ画像の生成を行った。また、より一般的な受光特性として、Debevec ら [35] は連続性のみを制約として受光特性を求めた。この手法では、Mann らの手法と異なり、複数 (11 枚程度) の画像から得られる制約式の解を線形に求めることにより、高速化を図っている。

以上の手法では、それぞれの受光特性において撮影した画像は少量のノイズしか含まないことを前提としている。しかし、短い露光時間での撮影においては光量が極端に少ない領域の対ノイズ比が低下するなど、ノイズの影響は無視できない。これらのノイズの影響を軽減するため、同一の受光特性で撮影された画像の平均を用いる手法 [36]、画像素子の飽和に近い画素の情報を用いない手法 [37] が提案されており、高ダイナミックレンジにおける画質の向上がなされている。また、多くの手法では画像素子から得られる画素値を処理することでダイナミックレンジを向上させているが、符号化を行う前の光量を処理に用いることで、より高いダイナミックレンジが実現できることが報告されている [38]。なお、一般に露光時間の調整によりシーンの撮影を行っているが、太陽の直視など、非常に強い光へは対応できないことがある。そのため、ND フィルタなどを用いる手法が提案されている [39]。

時分割撮影手法では、同一のシーンを複数回撮影する必要があるため、シーンは固定、もしくは動きが少ないと仮定しているが、車載カメラなど、大きな動きを含むシーンへの応用も提案されている。カメラの動きを前提とした手法として、高ダイナミックレンジのパノラマ画像を撮影する手法が提案されている [40][41]。この手法では、カメラの前方に空間的な濃度変化があるフィルタ (右方が薄く左方が濃い) を配置し、カメラとフィルタを水平方向に回転させ撮影する。カメラの回転によりシーンに動きが生じるものの、シーン中の同じ点を複数回撮影しているため、位置合わせを行うことで高ダイナミックレンジ画像が作成できる。山田ら [42] は車載カメラへの応用として、用いる画像を二枚と限定し、また露光時間を短くすることで、統合の際に動きが与える影響を小さくし見た目にも自然な画像を作成する手法を提案した。また Kang ら [43] は画像間の動きを推定し、位置合わせを行うことで動きの激しいシーンへの対応する手法を提案した。

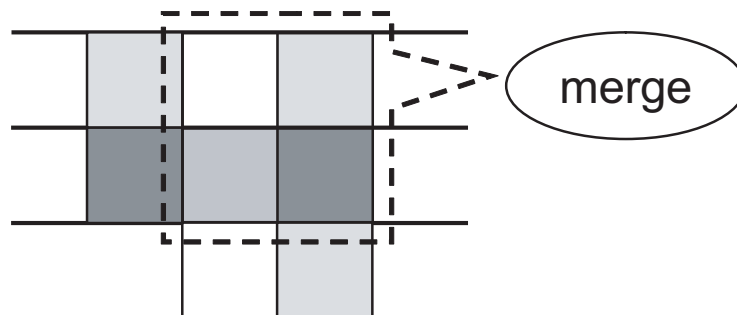


図 2.9: 画像素子の統合による手法

この手法は通常のカメラシステムを用いて比較的簡単に実行でき、そのため広く利用されている。しかし、同一のシーンに対して複数回の撮影をする必要があるため、動的なシーンへの対応と得られるダイナミックレンジはトレードオフの関係にある。

複数素子撮影手法

一つの点を受光特性の異なる複数の画像素子により計測し、高ダイナミックレンジを実現する。この手法では、図 2.9 のように、シーン中の点に対して一つの画像面上で複数の画像素子を対応させ用いる。例えば、感度の高い素子と低い素子を一単位として構成した場合、光量の少ない部分では感度の高い素子の情報を画像に反映することができ、感度の高い素子が飽和状態になるほど光量の多い部分では、感度の低い素子は飽和せずその情報を画像に反映することが可能である。

実装として、二つの画像素子を用いた撮影システムが開発されている [44]。このシステムでは、一方の画像素子に光学フィルタをかけることで受光特性を変化させ、二つの受光特性からシーンの光量を求める。また、電荷容量の異なる素子を用意し、それぞれの電荷を合計することでダイナミックレンジを向上させる画像素子も開発されている [45][46]。

これらのように、単一の素子で画像面を構成した場合では素子が飽和してしまうようなシーンでも、組合せとしては飽和状態にならずに画像を撮影できるため、ダイナミックレンジの広い画像を撮影できる。この手法では同一のシー

ンを複数回撮影する必要がないため動画にも適用できるものの、複数の素子の組み合わせを1単位として画像面を構成するため、単一の素子のみでの構成に比べ空間分解能が低下するという問題点がある。空間分解能の低下を軽減するため、カラーカメラにおいて広く用いられている Bayar 配列 [47] と同様に、周辺素子の画素値からの補間による手法が提案されている。補間の方法として、[48]では三次内挿、[49]では多項式内挿が提案されており、試作システムにおける評価 [50] が行われている。また、上述の時分割撮影手法と組み合わせ、色、光量の情報をシーンに対して密に計測する手法 [51]、前フレームにおいて得られた光量により二種類の受光特性を切り替える手法 [52] も開発されている。

光分割撮影手法

一方、画像素子としては通常のものを用いるが、他の光学素子との組合せによりダイナミックレンジの向上を実現する手法が提案されている。この手法では、ビームスプリッタを用いて分割した入射光を複数の画像面において同時に撮影し、上述の手法と同様に光量を求める。土井ら [53] はビームスプリッタにより入射光を二分し、受光特性の異なる画像面で計測された光量を基に高ダイナミックレンジを実現した。また、分光に鏡を用いる手法が提案されている [54][55]。この手法では、ピラミッド状の鏡を光軸に平行に設置し、鏡の反射により分割された入射光を受光特性の異なる複数の画像面で撮影することでダイナミックレンジの向上を実現している。

この手法の応用として、一般的なシーンの撮影のみではなく、ラインスキャンカメラによるフィルムの読み取り [56] や、アナログカメラで撮影されたネガの読み取り [57] においても利用されている。

これらの手法では同一のシーンを複数回撮影する必要がないため動画にも適用できる。また、複数の画像面を用意しそれぞれに撮影するので、空間分解能も低下させずに高ダイナミックレンジ化を実現できる。しかし、複数の画像面を必要とするため、光学系が複雑になる、全体のサイズが大きくなり昨今の小型化に対する要求と反してしまうという問題点がある。

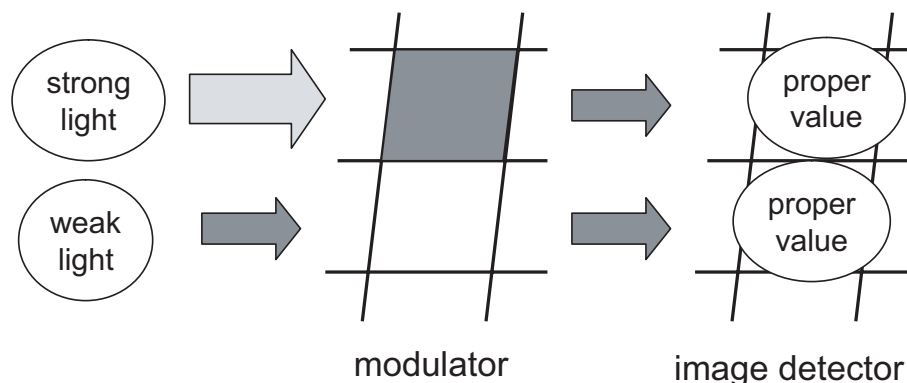


図 2.10: 適応的な感度特性による手法

感度適応撮影手法

通常のカメラでは局所的に受光特性を調整することができないが、空間的に光の減衰量を制御可能な素子を画像素子の前に配置し、入射光の強度にあわせて制御することで、光量を飽和させずに光量を計測する。受光特性を調節する機構として、透過型液晶フィルタを用いたシステム [58][59] や、DMD を用いたシステム [60] が提案されている。図 2.10 にこれらの手法のモデルを示す。強い光に対しては減衰量を大きく、弱い光に対しては減衰量を小さく制御することで、画像素子に到達する光量の幅を小さくし、一般的なカメラが持つダイナミックレンジでの計測を可能とする。この手法では、それぞれの画像面ごとに感度を変えるだけであるため、空間分解能は低下しない。また、感度は前フレームでの光量に基づいて算出されるため、激しいシーン変化には追従できないという制限はあるものの、通常のシーンであれば動画であっても適用が可能である。

2.3 光量の表示

次に光量の表示について述べる。各表示素子による表示のモデルを図 2.11 に示す。図 2.11 に示されるように、表示素子により表示される光量 O は計測によって得られた画素値 I と表示特性 $s(\cdot)$ により次式で表される。

$$O = s(I) \quad (2.5)$$

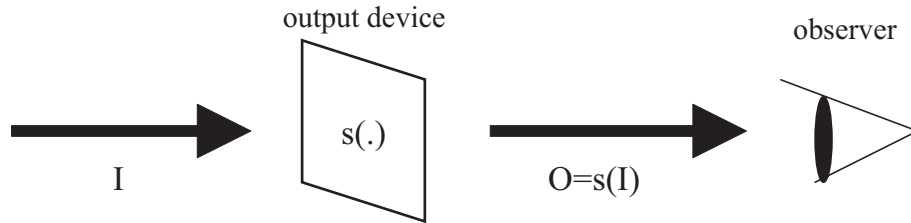


図 2.11: 表示のモデル

表示系と同様に画素値は二次元で表されるため，表示する光量も $O(x, y)$ と表す．表示系のダイナミックレンジは一般にコントラスト比として表されることが多い．ディスプレイのコントラスト比は表示できる最小の光量 L_{min} と最大の光量 L_{max} ，つまり黒を表示したときと白を表示したときの光量の比として次式で表される．

$$contrast = \frac{L_{max}}{L_{min}} \quad (2.6)$$

また，これに類似する指標として，暗所コントラスト，明所コントラストにより表示系を利用する環境における性能を表す場合もある．なお，式 (2.1)，(2.6) から分かるように，コントラストとダイナミックレンジは同様の指標を表している．

光量表示のコントラスト性能に関しても 2.1 節で述べた実世界のダイナミックレンジには及ばず，計測された光量を正しく表示できないことがある．そのため，計測系に関する研究同様，実世界のダイナミックレンジを扱うための研究がなされている．以下にそれらを系統立てて述べる．

表示機器の開発

シーンの表示に用いられる機器は，動作原理から様々なものが開発されており，コントラスト性能も様々である．以下に代表的な表示機器に関する動作原理と現状のダイナミックレンジについてまとめる．

液晶素子： 液晶素子に対して電圧を加えることで光源からの偏光状態を制御し，階調を表示する．製品としては主にディスプレイ，プロジェクタともに広く用いられている．コントラスト性能として，液晶ディスプレイでは 2,500:1 ($\simeq 68$ dB)[61]，液晶プロジェクタでは 75,000:1 ($\simeq 97$ dB)[62] を実現している．

プラズマディスプレイ：電極を設置したパネル間に電圧をかけ、それによる発光を利用して表示を行う。二枚のパネル間には希ガスが充填されており、電圧変化によるプラズマ化により蛍光を発する。コントラスト比 30,000:1 ($\simeq 90$ dB)[63] を実現している。

デジタルミラーデバイス (DMD)[64]：DMD はマイクロサイズの鏡を敷き詰めた素子であり、光の反射方向を on/off と切替可能である。この切替を短時間に繰り返すことで、光源からの光を制御し光の階調を表示する。コントラスト比 12,000:1 ($\simeq 82$ dB)[65] を実現している。

有機エレクトロルミネッセンス (EL)[66] ディスプレイ：電圧をかけることによる有機 LED の発光を利用して表示を行う。プラスチックなどの柔軟な素材を基盤に利用できるため、他の表示素子と異なり曲げることができるなどの特徴を持つ。コントラスト比 1,000,000:1 (= 120 dB)[67] を実現している。

計測系に比した場合の特徴として、表示系に用いられる機器が多様であるため、それぞれに固有な手法によりダイナミックレンジの向上が行われている。例えば、DMD では各ミラーの間隔を狭めることでコントラストの向上を果たした [64]。またプラズマディスプレイにおいては、黒表示時の明るさを低減させる駆動方式 [68]、液晶ディスプレイでは、バックライトの明るさを局所的に変更することでディスプレイとしてのコントラストを向上させる手法 [69] が提案されている。

なお、これらの素子は電圧変化により生じる発光を利用するもの (CRT、プラズマディスプレイ、有機 EL ディスプレイ) と、光源からの光の制御によるもの (液晶素子、DMD) の二種類に大別される。発光を利用するものは主としてディスプレイパネルに用いられるが、光の制御によるものはプロジェクタとしての応用も多く、液晶素子においてはディスプレイパネル、プロジェクタの両者における表示素子として広く採用されている。

投影系の組合せによる手法

機器単体としてコントラストを向上させるのではなく、既存の機器を組み合

わせることによりコントラストを向上させる手法も提案されている。例えば、上で挙げた [69] では LED の制御によりバックライトを調節しているが、液晶や DMD を用いて光源からの光の制御を行うことで同様にコントラストを向上させる手法が提案されている。DMD による反射光を用いる手法として、Pavlovych ら [70] は液晶パネル、Hoskinson ら [71] は DMD を用い、それぞれの素子への入射光へと適用することで [69] と同様にコントラストを向上させている。[72][73] では、輝度情報 (Y) と色信号 (C) に分割した光信号をそれぞれ反射型液晶を用いて表現し、それらを統合することでコントラストを向上させている。また、紙面や電子ペーパーなどの自由度を持った表面へ対して位置合わせを行い、プロジェクタを用いて投影することでコントラストを向上させる手法も提案されている [74]。

表示方法の工夫

上記の手法などにより、表示系のダイナミックレンジは年々向上しているものの、現状では一般的に計測系よりもダイナミックレンジが低く、また、実世界のダイナミックレンジよりも低い。そのため、シーンの光量を正しく計測したにも関わらず、正しく表示することが出来ないことがある。このようなシーンを限られたコントラスト性能で表示するため、様々な手法が提案されている [75]。これらの手法はトーンマッピングと呼ばれ、一般的には、無限の幅を持つ光量 L_w を例えば次式のように有限の区間 L_d に圧縮する技術である。

$$L_d = \frac{L_w}{L_w + 1} (L_w : [0, \infty), L_d : [0, 1)) \quad (2.7)$$

Durand ら [76] はシーンから大域的に求められた光量の基準値に基づく手法を提案した。一方、Reinhard ら [77] はシーン中で局所的に異なる基準値を用いる手法を提案した。なお、トーンマッピングでは主に、人間による観測の際に自然なシーンの表現を目的としているため、人間の視覚特性を考慮した手法も多く提案されている [78][79]。

また、人間のための表示という観点において、対象や環境に応じた表示を行う手法も提案されている。坂口ら [80] は運転時における視覚特性を考慮した表示を行うことで広い年齢層において視認性を向上した。プロジェクタを用いた表示においては、投影面による影響の補正として、投影面の色の補正 [81][82]、投影面の形状により起こる相互反射の補正 [83] に関する手法が提案されている。

2.4 ファイルとしての光量の表現

本研究ではシーン光量の計測、表示について述べるが、扱う情報がデジタルという点に注目すると計算機内でのデータの記録方法も考慮する必要がある。記録の方法として、符号化の方式、および符号化に用いる bit 数について述べる。一般的なカメラでは通常、CRT ディスプレイにおける表示を念頭に置き、次式のようにガンマ値 ($\gamma \simeq 2.2$) に基づいた光量の符号化がなされている。

$$L = K \cdot I^\gamma \quad (2.8)$$

ここで、 I, L はそれぞれ画素値、光量を表し、 K は一般化のための係数を示す。しかしながら、高ダイナミックレンジの情報を扱う場合、式 (2.8) による符号化では小さな値の表現において階調の表現が粗くなる。そのため、例えば浮動小数点表現のように、指数を用いた符号化がなされている。また、小型デジタルカメラなどで用いられるファイル形式では光量情報を 8 bit、256 段階で符号化を行っているが、広い範囲の光量をより正確に表現するため 16 もしくは 32 bit で符号化を行うことが多い、図 2.12 に式 (2.8) 及び浮動小数点による符号化を、(0.001, 100) の範囲に対して行った際の階調表現の様子を表す。横軸は符号化される光量の対数表示、縦軸は画素値が表現する値における相対的な量子化誤差を示す。なお、浮動小数点のとして、仮数部に 10 bit、指数部に 5 bit の計 15 bit の符号化を行っている²。

実際のファイル形式として、HDR 形式 [84] が広く利用されている。この形式では各画素ごとに RGB の三色と明るさを表す指数部をそれぞれ 8 bit で扱う。この形式では指数部に 8 bit を割り当てているため、($10^{-38}, 10^{38}$) と非常に広い範囲の光量を表現できる。しかし、実世界の光量は高々 10^{15} 程度であるため、余剰な情報を持っているといえる。またそのため、同じ bit 数を要する他の形式と比べ色表現能力が劣る。より正確に光量を表現するファイル形式として、IEEE float の情報をそのまま扱う PFM 形式 [85] や EXR 形式 [86] が提案されている。以上の形式はすべて、RGB の三色に基づいた記録形式であったが、光量と色情報を分けて扱う形式 [87] も提案されている。また、一眼レフなどのデジタルカメラでは、画像処理による画質劣化

²ここでは 16 bit の符号化を想定しているが、一般的な浮動小数点表現では正負の表現に 1 bit 用いるため、15 bit の情報で数の大きさを表す。

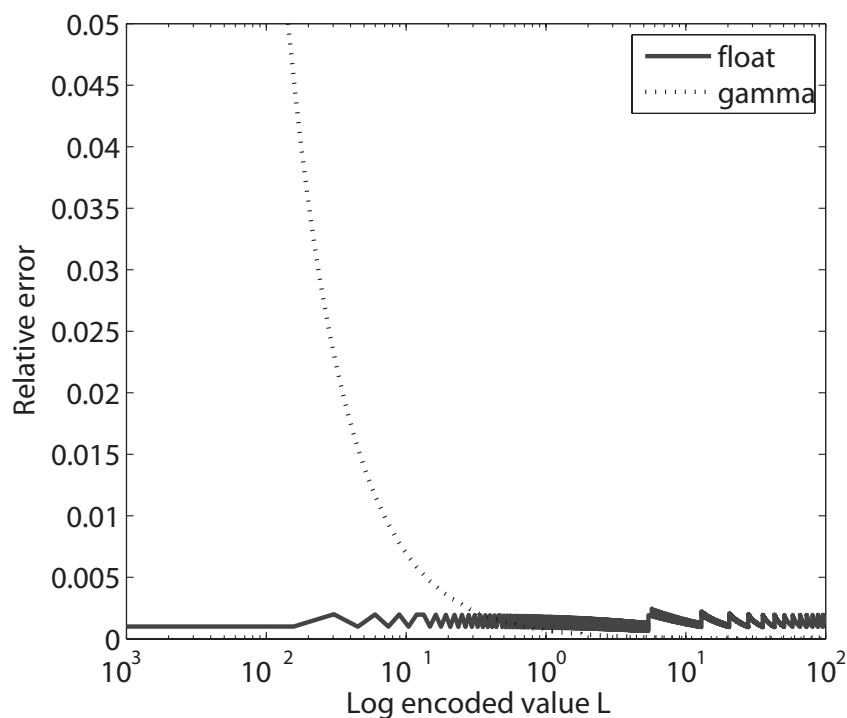


図 2.12: 符号化の形式による相対誤差の違い

を防ぐため、各画像素子において 12 bit の情報を保持し、この情報をそのまま出力する RAW 形式の利用も増えている。なお、これらの形式を扱うソフトウェアとして HDR shop[88] が広く用いられている。

8 bit のファイル形式と同様に、高ダイナミックレンジにおいても、データ圧縮を用いた形式が提案されている。静止画においては、離散ウェーブレット変換を利用することで高い圧縮率を達成する手法[89]が提案されている。また、トーンマッピングを利用した手法として、変換された値を 8 bit のファイル形式で記録し、変換に用いた倍率の情報を追加の情報として JPG 形式で記録する手法[90]が提案されている。この手法では、高ダイナミックレンジの情報を復元できるのみでなく、一般的な画像閲覧ソフトにおいても、トーンマッピングされた情報を表示できる。動画においては、静止画に比べ大容量のデータを扱うため、さらに圧縮率の高い手法が求められる。高ダイナミックレンジに対応した形式として MPEG 4 への符号化[91]が提案されている。動画の圧縮形式として従来から多数の形式が提案されているが、

[91]のように高ダイナミックレンジに対応した形式は少ない．高ダイナミックレンジを扱う場合は従来よりデータ量が多くなるため，静止画，動画のどちらにおいても効果的な圧縮方法の発展が期待されている．

2.5 関連手法のまとめと本論文の位置づけ

以上では計測系，表示系が持つ現状のダイナミックレンジについて述べ，高ダイナミックレンジが必要とされるシーンの計測，及び計測された情報の表示，記録について述べた．ここで，光量の計測と表示をそれぞれ，システムに対する入力と出力と考える．まず，入力である計測系に関して，より一般的な指針として，動的なシーンの計測，高い空間分解能の観点でまとめる．

回路構成による手法では，画像素子への回路の追加により高ダイナミックレンジを実現するため，動的なシーンを計測できるものの，集積密度が低下し，空間分解能が低下する．時分割撮影手法では，通常のカメラを用いるため，空間分解能の低下は起こらないが，出力は定まっており，また同一シーンを複数回撮影するため，動的なシーンには対応できない．複数素子撮影手法では，動的なシーンを計測できるものの，複数の素子から得られる画素値を統合して一つの画像素子の画素値として扱うため，空間分解能が低下する．光分割撮影手法では，通常画像素子から成る画像面を複数用意して撮影を行うため，動的なシーンへ対応でき，空間分解能の低下も起こらない．適応的な感度特性による手法では，通常のカメラを用いて画像素子ごとに感度を変えるだけであるため空間分解能は低下しない．また，前フレームでの光量に基づいて感度を調節するため，通常のシーンであれば動画にも適用できるが，激しいシーン変化には追従できない．

このように，入力としての機能のみを考えた場合にはどの手法も一長一短である．そこで，表示系との組合せを考える．表示系においては，高ダイナミックレンジ画像を表示するハードウェア，ソフトウェアともに未だ一般的ではない．また，ディスプレイのコントラストを向上させることで高ダイナミックレンジに対応する動向があるものの，従来のコントラストの低い表示機器を用いて人間の視覚特性に合わせて表示を行う提案も多数なされている．このことを考慮して計測系を設計することで光量の計測から表示まで一貫した処理が可能であり，処理効率の向上が見込め

表 2.2: 計測系の比較

手法	動的なシーン	高解像度	表示系との親和性
回路構成	○	△	△
時分割撮影	×	○	△
複数素子撮影	○	×	△
光分割撮影	○	○	△
感度適応撮影	△	○	○

る．このことから，計測系においては単に高ダイナミックレンジを実現するだけでなく，表示系に対応した出力が可能であることが望ましい．

そこで，計測系に関する手法について，動的なシーンへの対応，高解像度の実現，表示系との親和性の三つの観点でまとめたものを表 2.2 に示す．先に述べた手法の内，時分割撮影手法，複数素子撮影手法，光分割撮影手法は複数の光量情報を統合して高ダイナミックレンジ画像を作成し，コントラストの低い表示機器に対してはトーンマッピングによりダイナミックレンジを低下させる処理を必要とする．回路構成による手法では，画像素子から得られる情報から直接高ダイナミックレンジ画像を得られるものの，コントラストの低い表示機器に対しては同様に，トーンマッピング処理を必要とする．このように，以上の手法はすべて高ダイナミックレンジ画像の生成を仮定しているため，トーンマッピングのために [75] に述べられている手法などが必要である．一方，感度適応撮影手法では，高ダイナミックレンジの出力を得る一連の過程において光量を調節して撮影を行うため，トーンマッピングと同様に，ダイナミックレンジの低い表示機器に対応した出力も得られる．また，シーンの情報は画像面で撮影される画像，及び光量を調節する素子の制御情報に分割されているため，[90] 同様，ファイルとして効率の良い記録も可能である．

このように，感度適応撮影手法は動的なシーンへも適用でき，かつ，昨今の高解像度化に対する要求も満たす．さらに，表示系との親和性も高く，出力が高い汎用性を持つ．また，画像素子と光量を調節する機構を組み合わせるため，回路構成による手法と組み合わせることで更なるダイナミックレンジ性能の向上が可能である．しかしながら，既存の感度適応撮影手法 [58][59][60] では光量に対して適応的に受光特性を調整するものの，光量は求めている．ダイナミックレンジの高い機器で

の表示など，幅広い光量に対応した計測への要求は依然として存在するため，光量を求める手法が必要である．

そこで本論文では，計測，表示の両者を考慮したシステムとして，適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムについて論じる．また，このように入力から出力までを一貫して扱っている研究は少なく，このことが本研究の特徴の一つである．

第3章 適応的な光量調節に基づくダイナミックレンジ撮影システム

前章で述べたように，本研究では適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムの実現を目標とする．本章ではまず，適応的な光量調節によりダイナミックレンジを向上させる原理について述べる．空間的に制御可能な素子を用いた適応的な光量の調節について述べ，次に調光機器と画像素子間の射影について述べる．その後，用いる光学素子によるシステムの分類について述べる．

3.1 適応的な光量調節に関するモデル

3.1.1 調光機器を用いた適応的な光量の調節

画像素子の前方に調光機器を配置することで，調光機器による光の減衰量を増加させると受光量が減少する．本手法ではこれを利用し，著しく光量の多い領域からの光量を減少させることにより，光量に対するダイナミックレンジを向上させる．また，画素値と調光機器による光の減衰量を用いて高ダイナミックレンジの出力を得る．ここで得られた画素値はトーンマッピングされた出力として用いることができる．

本手法で用いる光量調節のモデルを図3.1に示す．光量の減少により光量の多い領域においても画像素子が飽和しなくなるため，カメラが捉えることのできる光量が広がり，結果としてダイナミックレンジが向上する．また，調光機器は部位を指定した制御が可能のため，光量の多い領域に対して適応的にマスクをかけることができる．これは絞りを調整するなどカメラの性質を変える場合と異なり，光量が相対的に少ない領域に対しては作用しない．ここで画像素子自体のダイナミックレン

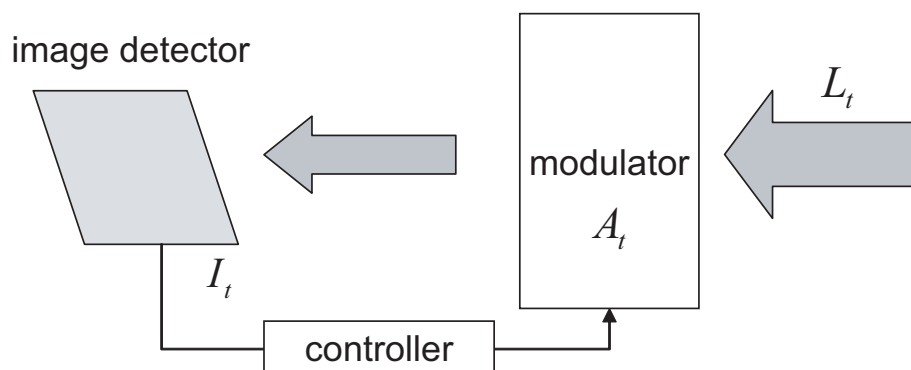


図 3.1: 適応的な感度特性のモデル

ジは変わらないため、ダイナミックレンジの低い表示機器への出力としてそのまま用いることができる。

なお、調光機器の制御を実時間で行うことができればシーンの変化に対応して光量を調節することができるため、激しい動きを含まなければ動画にも適用できる。

3.1.2 調光機器の出射効率と光量の関係

図 3.1 に示したように、本システムでは画像素子と調光機器を制御部を通じて接続する。調光機器を経た光を画像素子が捉え、その光量を基に制御部を通じて調光機器を制御する。ここで調光機器による光の減衰率を調光機器の出射効率とし A と表すと、時刻 t で画像素子が受ける光量 I_t は、システムに入射する光量 L_t と調光機器による出射効率 A_t を用いて次のように表される。

$$I_t = L_t \cdot A_t \quad (3.1)$$

時刻 t において受光素子に届く光量を I_t とすると、この情報を基にして調光機器の出射効率 A_{t+1} が求められる。システムに入射する光 L_{t+1} が調光機器の出射効率 A_{t+1} により減衰され、素子が受光する光量は I_{t+1} となる。光量を調節するための適切な出射効率 A_{t+1} は光量 I_t によって変化する。例えば受光量が多い場合には出射効率 A_{t+1} を低下させ、逆に受光量が少ない場合には出射効率 A_{t+1} を向上させ、画

像素子が得る光量が適切な値 I_{opt} になるように調節する．時刻 $t + 1$ において得られる光量を I_{opt} に調節したとすると，式 (3.1) より次式が成り立つ．

$$I_{opt} = L_{t+1} \cdot A_{t+1} \quad (3.2)$$

ここでシーン中の光量 L_t の変化が微小な時刻変化において小さいと仮定すると，上式と式 (3.1) より，出射効率 A_{t+1} は得られる光量に応じて次式により決定する．

$$A_{t+1} = \min\left(\frac{I_{opt}}{I_t + \varepsilon} A_t, 1\right) \quad (3.3)$$

A は出射効率であり $0 \leq A \leq 1$ である． ε は式の値を不定にしないための極めて小さな数である．

また，本手法では調光機器により適応的にカメラのダイナミックレンジを変更しているため，シーンの光量を求めることで2章で述べた他の手法と同様に高ダイナミックレンジ画像を作成することが可能である．上で述べたように，調光機器の出射効率を調節することで画像素子が受光する光量を適応的に調節するため，光量を調節して撮影された画像，及びその時の調光機器の出射効率から元の光量を計算することで画像の高ダイナミックレンジ化を行うことが可能である．調光機器で減衰する前の光量 L_t は式 (3.1) より次式で表される．

$$L_t = I_t / A_t \quad (3.4)$$

本手法では液晶を用いてマスクをかけることで出射効率を変化させるが，調光機器の出射効率の正確な制御，及び減衰前の光量の計算にはマスクによる光量への影響を知る必要がある．また，マスクの強さは液晶の出射効率に影響されるため，マスクによる光量への影響を知るためには液晶の制御情報と出射効率の変化の対応関係が必要である．この関係は，制御情報を段階的に変更したときに画像素子が得る光量の変化の割合を測定することで求められる．実際の計測によりこの関係を求めることで必要なデータ量は増加するものの，より正確な出射効率の制御，元の光量の計算を行うことができる．本手法では上記の手順を実際に行い，制御情報と出射効率の変化の関係を実測により求める．

3.2 幾何関係に関するモデル

光量の適切な調節，またそれらから元の光量を計算するために必要な情報として，画像素子と調光機器間の幾何関係がある．この関係は画像面と調光機器の間の射影として定まっているため，画像素子と調光機器間の位置関係，及び射影の際のレンズによる歪みを求めることで対応が求められる．本節ではまずカメラレンズの歪みについて述べ，次にカメラの幾何的情報としてシステム中の画像素子と調光機器間の位置関係について述べる．

3.2.1 カメラレンズの歪みとその補正

画像面と調光機器間の位置関係は射影として定まっている．ここで二つの面を平面とし，ある一点(ピンホール)のみによる射影を考えた場合，ピンホールカメラモデルを仮定することができる．ピンホールカメラモデルとは，最も基本的なカメラモデルであり，極めて小さな穴(ピンホール)を透過した光線のみが像面へ投影される．そのため，光源からピンホールへのベクトルのみによって投影面へ到達する光が決定され，一般のカメラに存在するレンズによる歪みなどの要素は含まれない．なお，このときの射影は透視投影と呼ばれる．しかしながら，通常のカメラではレンズによる歪みのため，ピンホールカメラモデルを仮定することは難しいことがある．そのため画像面と調光機器の対応を求める際には，この歪みを補正する必要がある．

レンズによる歪みが存在しないとした場合，観測した点はレンズ中心を通るため透視射影によって求められる．歪みが存在しない場合の画像面への投影座標を (x, y) ，歪みにより実際に投影される座標を $(\check{x}, \check{y})$ とすると，レンズの歪みは次式のように表すことができる [92]．

$$\begin{aligned}\check{x} &= x + (x - x_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots] \\ \check{y} &= y + (y - y_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots]\end{aligned}\tag{3.5}$$

なお上式で (x_0, y_0) はレンズ中心に対して垂直に入射する光の射影点の座標であり， r は (x, y) ， (x_0, y_0) 間の距離である．また上式から，レンズによる歪みはレンズ中心に垂直に入射する光の射影点から離れるほど大きくなる性質を持つことが分かる．

式 (3.5) において, r^{2i} にかかる係数 k_i をそれぞれ求めることでレンズ歪みの補正ができる. ここで, 式 (3.5) でのレンズ歪みにおける第 3 項以降を無視すると, 式 (3.5) は次のように書き換えることができる.

$$\begin{bmatrix} (x - x_0)r^2 & (x - x_0)r^4 \\ (y - y_0)r^2 & (y - y_0)r^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{x} - x \\ \check{y} - y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

第 3 項以降による影響はセンサの量子化誤差に比べて十分に小さいため [93][94], この近似による影響は小さい.

十分な数の対応点の組を与えることで, 式 (3.6) に対して最適解 k_1, k_2 が求まり, 解 k_1, k_2 を用いてレンズの歪みを補正することができる. 本研究では Zhang[95] のキャリブレーション法を用いることでレンズ歪みの係数 k_1, k_2 を求めた.

3.2.2 画像素子と調光機器間の位置関係

レンズの歪みを補正することにより, 画像面と調光機器間の射影は透視射影と考えることができる. このときのカメラの画像面と調光機器の位置関係について述べる. 図 3.2 に画像面と調光機器の位置関係に関するモデルを示す. 図 3.2 のようにこの 2 平面の関係はピンホールを射影中心とする透視投影によって表すことが出来る. このとき, この対応関係は射影関係を表すホモグラフィ行列を求めることで与えられる.

対応する 2 つの平面上の点をそれぞれ $\mathbf{x}(x, y)$, $\mathbf{u}(u, v)$ とすると, 2 点の関係はホモグラフィ行列 $\mathbf{H}$ を用いて次式のように表される.

$$s\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}} \quad (3.7)$$

なお, $\tilde{\mathbf{x}}, \tilde{\mathbf{u}}$ は同次座標を表し, $\tilde{\mathbf{x}} = [x, y, 1]^T$, $\tilde{\mathbf{u}} = [u, v, 1]^T$ となる. また, s はスケールをあわせるための変数であり, $\mathbf{H}$ は 3×3 の行列である. 上記の $\mathbf{x}, \mathbf{u}$ は平面上の点であるので, 点 $\mathbf{u}$ の平面上での座標は $\mathbf{x}$ の要素とホモグラフィ行列の要素 h_{ij} を用いて次のように表される.

$$u = \frac{h_{11}x + h_{12}y + h_{13}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}}, \quad v = \frac{h_{21}x + h_{22}y + h_{23}}{h_{31}x + h_{32}y + h_{33}} \quad (3.8)$$

$\mathbf{H}$ 行列は 2 つの平面間の 4 組以上の対応点から求めることが出来る [96].

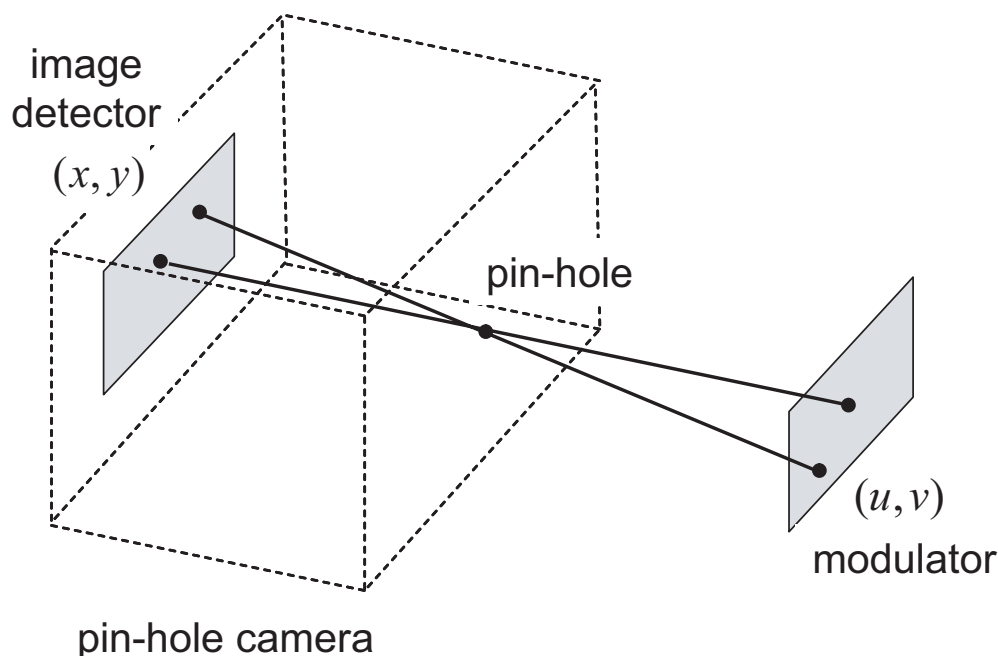


図 3.2: カメラと調光機器の位置関係

3.3 構成による分類

本手法では調光機器を用いて光量を適応的に調節するが、光量の調節に用いる調光機器の違い、及びレンズ配置の違いによりシステムを六種類に大別することができる。本節ではこれらの分類について述べる。

3.3.1 調光機器による分類

本節では光量調節に用いる素子の違いについて述べる。2.3 節で述べた表示素子のうち、液晶、DMD は光源からの光を制御することで階調を表現しており、また、これらは部位ごとに感度を変えることができる。ここで、カメラに入射する光を表示素子の光源位置に配置することで、入射光量の調節が可能である。次に液晶と DMD における階調表示の方法について述べる。

液晶は偏光状態の制御により明暗を表示する。図 3.3(a) に液晶における明暗表示のモデルを示す。なお本節では、単体の素子としての液晶と階調を表示するシステム

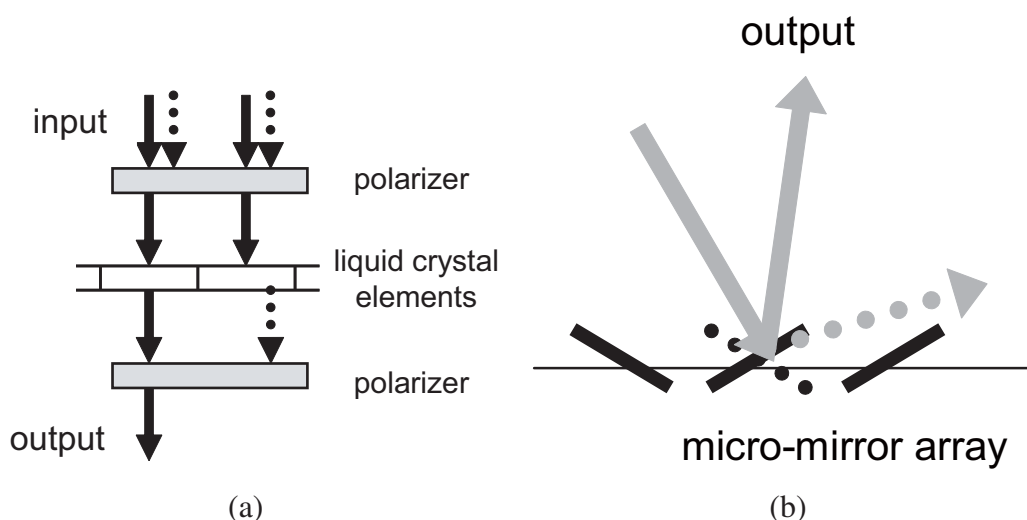


図 3.3: 調光機器のモデル. (a) 液晶, (b)DMD

としての液晶を区別するため、前者を液晶素子、後者を液晶パネルと呼ぶ。図 3.3(a) に示されるように、液晶パネルは液晶素子とそれを挟む偏光子で構成される。通常、光はあらゆる方向に振動しているが、液晶素子の前方に配置された偏光子により振動方向を制限される。表示する画素値に応じて液晶素子に電圧をかけることで入射光の偏光状態が制御され、液晶素子の後方に配置された偏光子を通過した光が出力として得られる。一方、DMD はミラーにより光の反射方向を制御し、明暗の差を生じさせることができる。DMD の動作モデルを図 3.3(b) に示す。各ミラーは on/off の二状態を持っており、その状態によって、入射光を外部へ出力するか、もしくは光吸収体に吸収させるかを制御している。各ミラーの状態を高速に切り替えることにより時分割で階調性を実現している。なお、上記の二種類の表示系に共通して、通常は入射光として均一な光を用いているが、[69] のように、シーンに応じた光量の制御も提案されている。

本手法では、これらの調光機器をカメラと組み合わせて用いる。そのため、速いシャッタースピードのカメラとの組み合わせを考える。DMD は時分割により明暗の差を生じさせているためカメラのシャッタースピードのような短い時間では十分なコントラストを発揮することはできない。特に、速いシャッタースピードが求められるシーンにおいてはこの問題が顕著に現れ、本手法のようにカメラとの組み合わせで用いる素子としては適していない。また、DMD の制御とカメラのシャッターの同

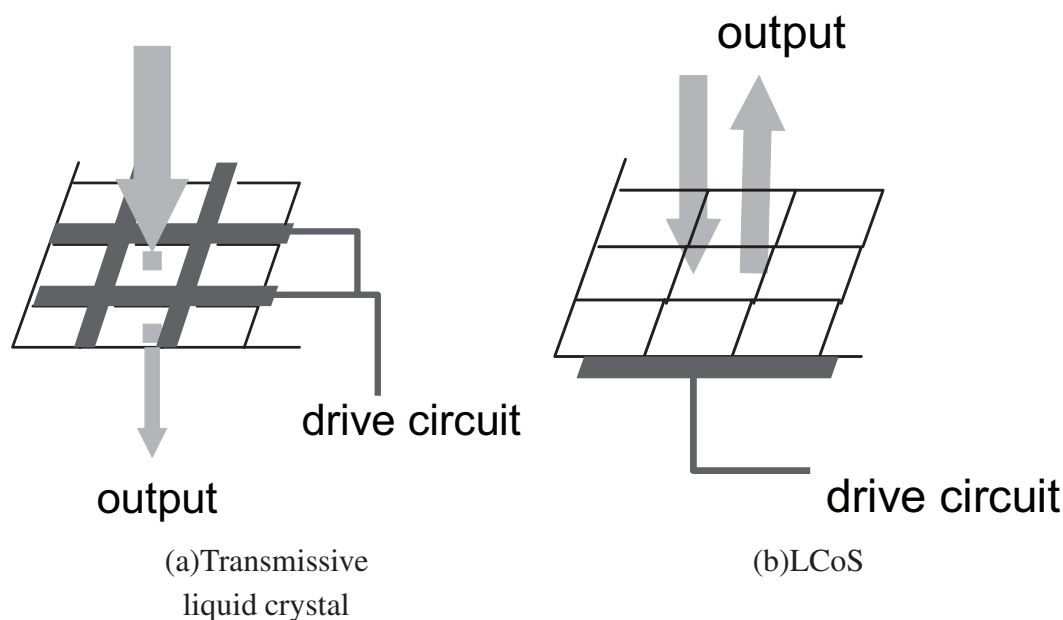


図 3.4: 液晶のモデル

期を取る必要があるため装置が複雑になってしまう。一方、液晶パネルは偏光状態の調節により明暗の差を生じさせているため、上記のような問題は起こらない。そのため、適応的な感度による手法において用いる調光機器としては液晶パネルが適している。

また、液晶パネルも液晶面の構成により、透過型液晶、反射型液晶の二種類に分類できる。以下にそれぞれについて説明する。

透過型液晶 透過型液晶とは、透明な基盤の間に液晶素子を挟んでおり、光の透過により偏光状態を調節し、階調性を実現する。透過型液晶のモデルを図 3.4(a) に示す。光の透過のため、駆動回路を液晶素子間に配置する必要があり、この駆動回路のために開口率が低下し、次に述べる反射型液晶に比べコントラスト性能が劣る。

反射型液晶 反射型液晶 [97][98] とは、半導体チップとガラス基板の間に液晶をはさんだ素子であり、LCoS(Liquid Crystal on Silicon) と呼ばれる。反射型液晶のモデルを図 3.4(b) に示す。透過型液晶と同様に、液晶素子により偏光状態を調節することで階調性を実現するが、入射光を反射させるため光路は異なる。反

射面の裏に駆動回路を配置する事が可能なため、より高いコントラスト比を実現できるが、入射光と反射光の分離のため、ビームスプリッタなどの光学素子が必要である。

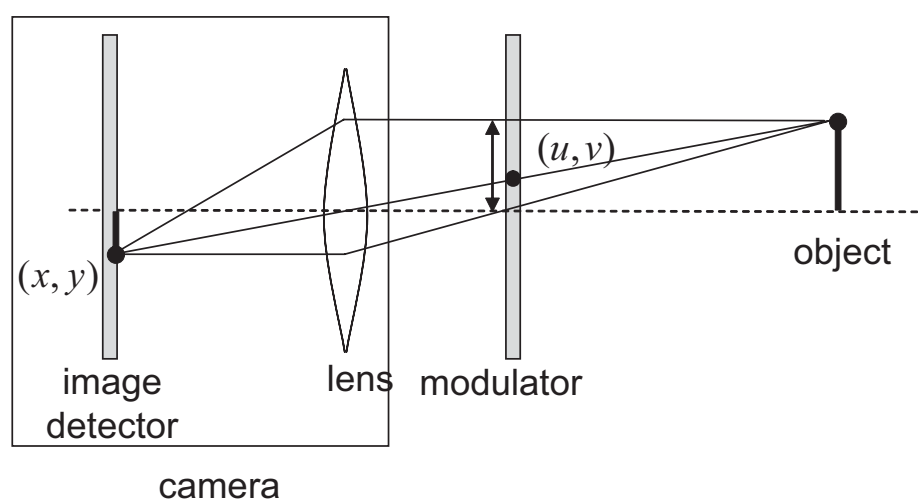
透過型液晶と反射型液晶を比較した場合、透過型液晶は液晶間に駆動回路が配線されるため素子の間隔が比較的大きくなる、また入射光の透過により色相が変化するという問題点がある。一方反射型液晶は、現段階ではコストが高い、またビームスプリッタなどの光学素子を必要とするため、系が比較的複雑になるといった問題点がある。なお、3.1 節で用いた出射効率 η は、透過型液晶ならば透過率、反射型液晶ならば反射率と同義である。

3.3.2 レンズ構成による分類

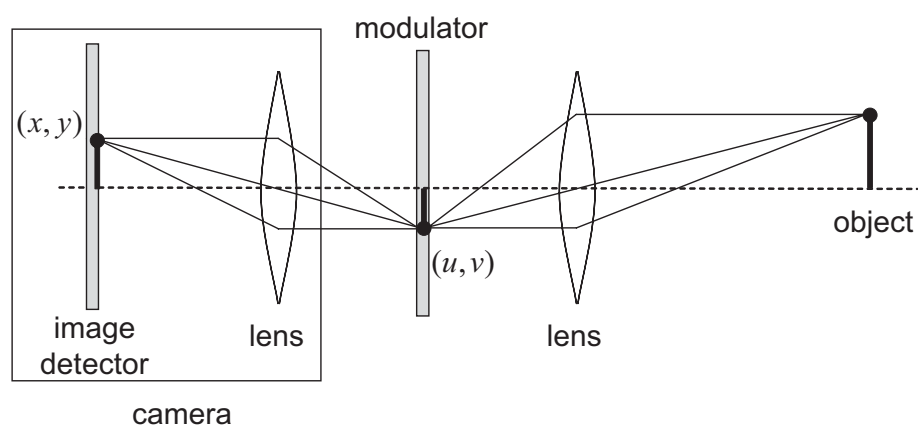
次に、レンズ配置による違いについて述べる。本手法は、図 3.1 に示したように、画像素子と調光機器から構成され、入射光は調光機器を経て画像素子で受光される。このときのレンズの配置として、単レンズ、リレーレンズが考えられる。それぞれのモデルを図 3.5 に示す。

図 3.5(a) の構成は、通常のカメラの前方に調光機器を配置した比較的簡単な系である。物質から発せられる光は調光機器を通過し、レンズにより画像面へと結像する。この構成は通常のカメラと調光機器のみで実現可能であり、実装のコストが少ないという利点がある。しかし、通常はカメラとシーンの距離が、カメラと調光機器の距離に比べ非常に大きく、シーンを撮影するためにもカメラのフォーカスを液晶面に合わせることはできない。そのため、ある画像素子へ入射する光は対応する調光素子以外を経る光も含み、また逆に、ある調光素子を経る光は対応する画像素子以外の周辺の素子へも入射する。結果として調光機器による影響は画像面上で広がりを持つ。一方、図 3.5(b) の構成では、図 3.5(a) の構成に加え、撮影対象と調光機器の間にレンズを配置する。これにより、調光機器、画像面の両方で結像が可能であるため、3.2.2 節で述べた透視射影の関係にある素子間でのみ出射効率の制御による光量調節の影響を受ける。

このように、図 3.5(b) の構成では画像素子へ入射する光量は式 (3.1) により対応する調光機器による影響を受けた光量 I_t として表されるが、図 3.5(a) の構成では、



(a)



(b)

図 3.5: 液晶とレンズの配置モデル. (a) 単レンズ, (b) リレーレンズ

表 3.1: 構成の違いによるシステムの分類

調光機器	レンズ	正確な光量調節	画素単位の調節	光学系の簡単さ
透過型液晶	単	○	×	◎
	リレー	△	○	○
反射型液晶	単	○	×	○
	リレー	○	○	△
DMD	単	×	×	○
	リレー	×	○	△

調光機器による影響は広がりを持つため、この影響を考慮する必要がある。なお、ここでは簡易に記すために透過型液晶を用いたモデルを示したが、反射型液晶を用いた場合においても同様のことが言える。

3.3.3 分類に関する考察

以上で述べた調光機器、レンズ構成を組み合わせることで本手法は六種類のシステムに分類される。この分類とそれぞれの特徴を表 3.1 に示す。透過型液晶を用いた場合、リレーレンズを用いることで光束の広がりをなくし、画像素子ごとに光量を調節することができる。しかし、液晶素子間の境界が画像素子と比べ無視できないほど大きく、画像素子に入射する光が遮られる。この影響は式 (3.1) にも影響を及ぼし、正確な光量調節が難しくなる。また、単レンズを用いる場合、上記のように画素単位での調節は困難であるものの、光学系は比較的簡単になるというメリットがある。反射型液晶を用いた場合、前節で述べたように、リレーレンズを用いることで透視射影の関係にのみ注目した光量調節が可能である。しかし、結像のためのレンズとビームスプリッタなどの光学素子を組合せるため、光学系が比較的複雑になる。また、単レンズを用いる場合、透過型液晶を用いた場合に比べ画像素子から液晶面までの距離が長くなり、光束の広がりが大きくなるという問題がある。DMD を用いた場合、反射型液晶を用いた場合と類似する特性が現れるが、動作原理が時分割なため、カメラとの組合せによる正確な光量調節が困難である。そのため、レンズの配置にかかわらず、本研究の目的には適していない。

上記の比較から、透過型液晶は光学的な扱いやすさの観点から優れており、また単レンズを用いることで、より簡単な光学系での実現が可能である。また、反射型液晶及びリレーレンズを用いる場合、光量調節の効果は広がりを持たないため、より正確な制御を実現可能である。このようにそれぞれに一長一短な特徴を持つため、本研究では、光量調節のために透過型液晶及び単レンズを用いるシステムと、反射型液晶及びリレーレンズを用いるシステムのそれぞれにおける高ダイナミックレンジの撮影を目的とする。以降ではそれぞれのシステムを実際に構築し、手法の有用性を確かめる。第4章で透過型液晶を用いたシステムについて、第5章で反射型液晶を用いたシステムについてそれぞれ述べる。

第4章 透過型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジ撮影システム

本章では透過型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジ撮影システムについて述べる．まず本システムにおいて用いるモデルについて述べ，単レンズを用いることによる光量調節の影響の広がりについて述べる．その後に実際に構築したシステムによる実験結果について述べる．

4.1 システムのモデル

本節では透過型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジ撮影システムのモデルについて述べる．透過型液晶を用いたシステムのモデルを図4.1に示す．このシステムでは液晶面を透過させることで光の減衰を行い，画像素子で受光した光量に応じて液晶の透過率を調整することで適応的な光量の調節を実現する．また3.3.3節で述べたように，単レンズを用いるため，通常のカメラと液晶パネルのみを用いた，比較的簡素な光学系で実現できる．このとき，カメラと撮影対象間の距離は一般的に液晶パネルとの距離に比べ著しく大きく両者にフォーカスを合わせることはできない．そのため，ある画像素子に入射する光束は液晶面上では広がりを持ち，マスクの影響も広がりを持つ．

ここでマスクの広がりを，広がり関数 $b(\cdot, \cdot)$ として定義する．広がり関数 $b(\cdot, \cdot)$ は液晶などの平面上で定義される関数であり，例えばガウス関数などのように，中心からの各軸への変位を変数として表される．この広がり関数 $b(\cdot, \cdot)$ を用いると，ある調光素子 (x_1, y_1) が (x_2, y_2) に及ぼす影響は $b(x_2 - x_1, y_2 - y_1) \times A(x_1, y_1)$ と表される．そのため，調光素子 (m, n) における出射効率 $\hat{A}(m, n)$ は，周辺素子 (u, v) の出射効率 $A(u, v)$ の畳み込みによって次のように表される．

$$\hat{A}(m, n) = b(m - u, n - v) * A(u, v) \quad (4.1)$$

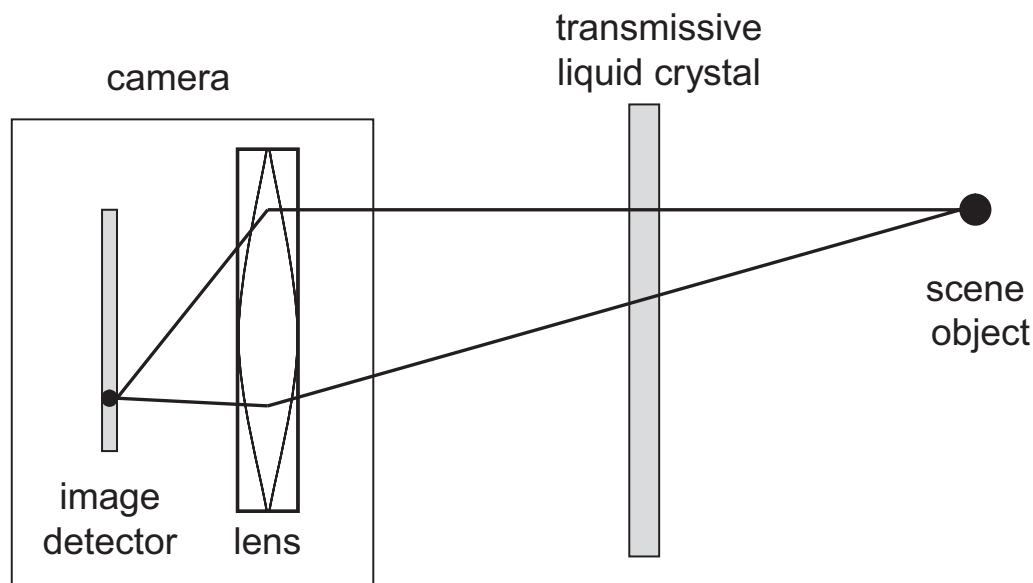


図 4.1: 透過型液晶を用いたシステムのモデル

なお、本論文では $*$ は畳み込み演算を表す。

また式 (4.1) より、液晶により減衰された光量を表す式 (3.1) はマスクの広がりを考慮すると次式のように表される。

$$\hat{I}_t = L_t \cdot \hat{A}_t \quad (4.2)$$

ここで、液晶を透過する前の光量 L は、式 (4.1) より広がり関数と液晶の出射効率を用いて次式により表される。

$$L = \frac{\hat{I}}{\hat{A}} = \frac{\hat{I}}{b * A} \quad (4.3)$$

上式より、広がり関数が求められることで、液晶を透過した光量からシーンに存在する光量を求めることが可能である。本手法では液晶により適応的にカメラのダイナミックレンジを変更しているため、シーンの光量を求めることで2章で述べた他の手法と同様に高ダイナミックレンジ画像を作成することが可能である。

式 (4.6) より、液晶素子の出射効率 A が既知であれば、広がり関数は実際の出射効率 $\hat{A}$ を用いて、次式のように畳み込みの逆演算により求められる。

$$b = \hat{A} *^{-1} A \quad (4.4)$$

なお、本論文では $*^{-1}$ は畳み込みの逆演算を表す。上式は式 (3.1), (4.2) を用いて次のように書き直すことができる。

$$b = \frac{\hat{I}}{L} *^{-1} \frac{I}{L} = \hat{I} *^{-1} I \quad (4.5)$$

この式により、広がりが存在しないと仮定したときに液晶を透過する光量 I と実際に透過する光量 $\hat{I}$ から同様に広がり関数を求めることができる。

4.2 液晶の制御方法

上記のようにマスクによる効果は広がりをもつため、ある液晶素子に対応する画像素子が得る光量を正確に調節するには対応する液晶素子の周辺でも出射効率を調節しなければならない。また、広がり関数 b が既知であるとする、式 (4.1) より $\hat{A}$ は b と A の畳み込みであるため、光量の調節に求められる出射効率 $\hat{A}$ を実現する液晶の出射効率 A は畳み込みの逆演算を用いて次式で求めることが出来る。

$$A = \hat{A} *^{-1} b \quad (4.6)$$

しかし実際に式 (4.6) より畳み込みの逆演算により得られる出射効率 A は負の値など実現不可能な数値をもつことがある。また本システムにおける目的は低ダイナミックレンジの出力であるため、すべての画像素子から均一な画素値を得るよりも、隣接する画像素子間における画素値の差が保持される方が望ましい。本手法ではこのことを考慮して、画像素子に対応する液晶素子と同様にその周囲に存在する液晶素子の出射効率も調節する方法を選択する。また光が多く入射している素子の光量調節に重きを置くため、周囲の液晶素子中で最低の出射効率に揃える。これにより液晶素子 (u, v) の出射効率 $A(u, v)$ は次の式で決定される [58]。

$$A(u, v) = \min_{-N \leq i, j \leq N} \hat{A}(u+i, v+j) \quad (4.7)$$

なお、ここで N は最小値を選択するフィルタの大きさである。

また、人間の視覚では光量を 6 bit 程度に符号化しているため [31]、得られる画素値は一定の範囲にあることが望ましい。このことを考慮して、広がりがある場合の

出射効率 A_{t+1} は式 (3.3) ではなく、次式によって求める．

$$A_{t+1} = \begin{cases} (1 - \alpha)A_t & (I_t \geq I_{sat}) \\ A_t & (I_{sat} \geq I_t \geq I_{low}) \\ (1 + \beta)A_t & (I_t < I_{low}) \end{cases} \quad (4.8)$$

この式では受光量が多すぎるか、または少なすぎる場合は出射効率を調節するが、それ以外の場合にはマスクの広がりによる影響を考慮して、出射効率の変更は行わない．ここでは、受光量が I_{sat} より多い場合に光量が多すぎるとし、 I_{low} より少ない場合に光量が少なすぎるとしている．また、 α, β は光量調節の速度を表し、 $0 < \alpha < 1, 0 < \beta$ の値をとる． α, β の値が大きいほど調節の速度は速いが、大きすぎると振動、発散する可能性がある．なお、ここでは処理計算の単純化のため $(1 - \alpha) = 1 / (1 + \beta) = 0.75$ としている．

4.3 試作システムにおける評価実験

本節では実装したシステムを用いた実験を通して手法の有効性を評価する．まず実装したシステムについて述べ、次に液晶面での広がり関数の算出、及び算出結果の精度評価について述べる．システムを用いた実験の内容、及び得られた結果について述べる．

4.3.1 試作システムの概要

実際に試作した撮影システムを図 4.2, 4.3 に示す．システムは、ビデオカメラとフィルタ、及び制御用の計算機から構成される．ビデオカメラとして SONY DCR-VX2000 を用い、透過型液晶として、XGA(1024 × 768) の解像度をもち、8 bit の情報を入力として制御を行うノート PC のディスプレイ部分を利用した．

図 4.3 のように、ノート PC のディスプレイ部分を分解し、これにより液晶面を透過した光がカメラに入射することを可能としている．なお、ディスプレイ中でおおよそ 300 × 200 ピクセルの領域をカメラが捉えている．

本システムにおいて液晶に投影する画像がどのように広がるかの例として、液晶に投影する格子模様と、それをカメラで撮影した画像を図 4.4 に示す．図 4.4(b) で格



図 4.2: 透過型液晶を用いたシステムの概観 (側面)



図 4.3: 透過型液晶を用いたシステムの概観 (前面)

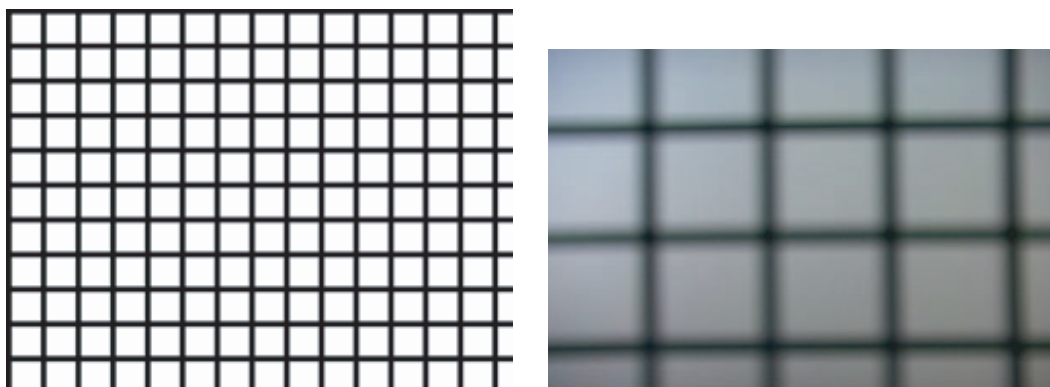


図 4.4: 液晶における格子の投影とその撮影. (a) 液晶に投影する格子模様, (b) 格子における広がりの様子

子の境界が分かりづらくなっているように、撮影した画像ではマスクの広がりの影響を受ける.

また、3.2 章で述べた幾何的キャリブレーションの結果は次のとおりである.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0.001116 & 1.616 \times 10^{-5} & 0.8824 \\ -1.555 \times 10^{-5} & 0.001294 & 0.4706 \\ -9.160 \times 10^{-8} & 6.132 \times 10^{-8} & 0.002849 \end{bmatrix}$$

$$(k_1, k_2) = (-0.2074, 0.1117)$$

3.1.2 節で述べた、液晶を制御した際の透過率の変化についての計測結果について述べる. 計測結果を図 4.5 に示す. 図中で下に位置するグラフはカメラ上部が撮影する液晶の制御情報と透過率の変化の関係を表し、上に位置するグラフはカメラ下部が撮影する液晶の透過率と変化の関係を表している. グラフの横軸は液晶の制御情報を表し、グラフの縦軸は液晶の透過率の割合を表している. 本システムでは液晶を 8 bit の情報で制御しているため、グラフの横軸は 256 段階で表されている. それぞれのグラフ中で左端の点は透過率を最大にする制御情報に対応しているため、グラフの値は 1 となっている.

図 4.5 からわかるように、液晶中での位置により制御情報に対する透過率の変化に違いがある. システムではこの結果を基にして液晶素子ごとに異なる制御を行う.

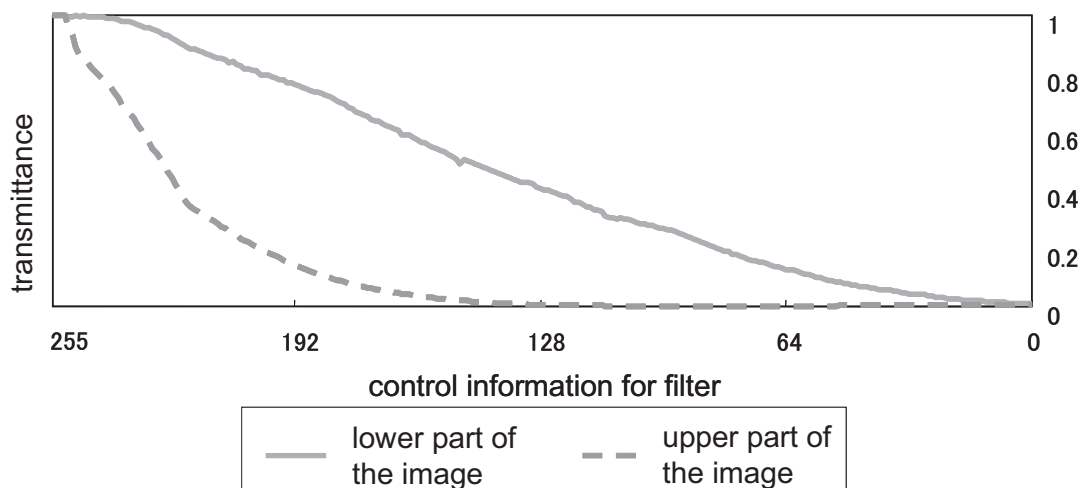


図 4.5: 透過型液晶の制御と透過率の関係

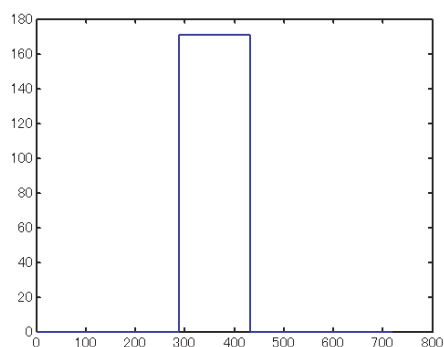


図 4.6: マスクの広がりがないと仮定した場合の影響

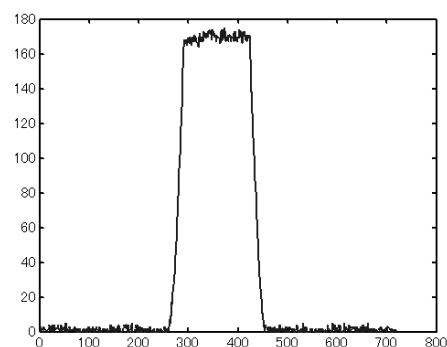


図 4.7: 観測された影響

4.3.2 広がり関数の算出

次に、4.1節で述べた広がり関数の算出結果について述べる．広がり関数を式(4.5)により算出した．マスクの広がりがないと仮定した場合に画像素子が受ける影響、実際に受ける影響をそれぞれ、図4.6, 4.7に示す．図中で横軸はカメラ中での座標、縦軸は影響の大きさを表している．

式(4.5)により算出された広がり関数の断面図を図4.8に示す．式(4.5)の計算は除算と減算を図中左側から行うため、計算の後半(図中右側)では累積誤差により値が

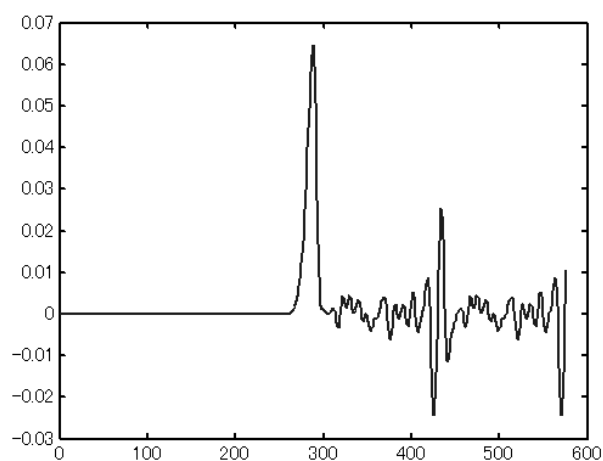


図 4.8: 算出された広がり関数

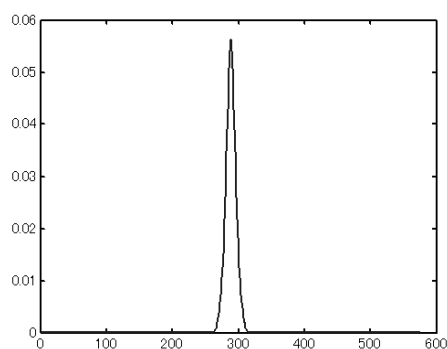


図 4.9: 誤差を除いた広がり関数の断面図

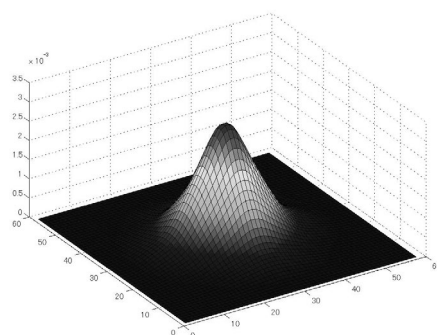


図 4.10: 広がり関数

振動してしまう．そのため誤差の影響が少ない範囲，最も左に位置するピークまでを算出結果として採用し，これをもとに広がり関数の全体像を推定した．図 4.8 から誤差を取り除いた広がり関数を図 4.9, 4.10 に示す．図 4.10 は広がり関数を 3 次元的に表現したものを拡大したものである．図 4.9, 4.10 から，液晶上の 1 素子でマスクをかけた場合にカメラ側で半径約 40 ピクセル周囲に影響を及ぼし，その影響はマスクをかけた点との距離が大きくなるにつれて小さくなることが分かる．

また算出結果の評価のために，求めた広がり関数を用いてマスクによる影響を復元した．広がり関数を用いて復元した影響を図 4.11 に示す．両者の類似度を確認す

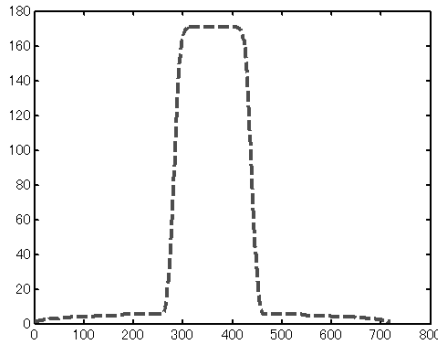


図 4.11: 復元された効果

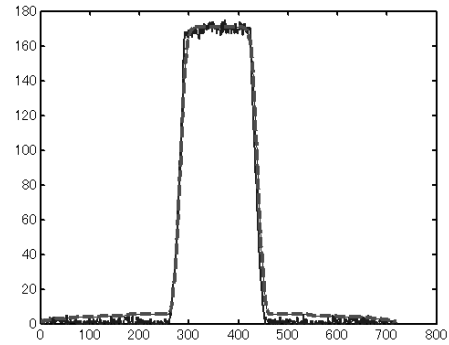


図 4.12: 観測値と復元値

るため、図 4.7, 4.11 を同時に表示した図を図 4.12 に示す。図 4.12 から実際に観測した値と算出された広がり関数から復元された値の類似度が高いことがわかり、広がり関数の算出が妥当であったことがわかる。

実験結果より本手法によって算出された広がり関数の妥当性は示されたが、広がり関数は一般的にガウス分布によって近似されることが多い。そこで、実データから算出した広がり関数と、ガウス分布により近似された広がり関数の精度を、それぞれの広がり関数によって推定した元の光量を真値と比較することで評価する。

実験として、図 4.13(a) の液晶を用いて部分的にマスクをかけて撮影した画像から元の光量を推定して真値との誤差を計算した。なお、構築したシステムにおいては透過型液晶の一部をカメラが捉えているため、図 4.13(a) の破線領域を透過して図 4.13(b) の画像が得られている。図 4.15(a), 図 4.16(a) はそれぞれ、実データから算出された広がり関数、ガウス分布により近似された広がり関数を用いて光量を推定した結果である。それぞれの精度を比較するため、真値としてマスクをかけずに撮影した画像 (図 4.14(a)) を用いる。図 4.14(b), 図 4.15(b), 図 4.16(b) はそれぞれ、図 4.13(b) 中央の破線上における画素値のグラフであり、グラフの横軸はカメラ中の x 座標、縦軸は光量を表している。これらの図、グラフから、マスクの強度が極端に変わるような領域では本手法においても誤差はあるものの、ガウス分布の近似により推定された光量は大きく外れた値をとることがわかる。

また、図 4.13(b) 中の 3 本の破線上で、それぞれの広がり関数を誤差によって比較した。なお、誤差としては平均二乗誤差 (RMS) と標準偏差を求めた。実験により求

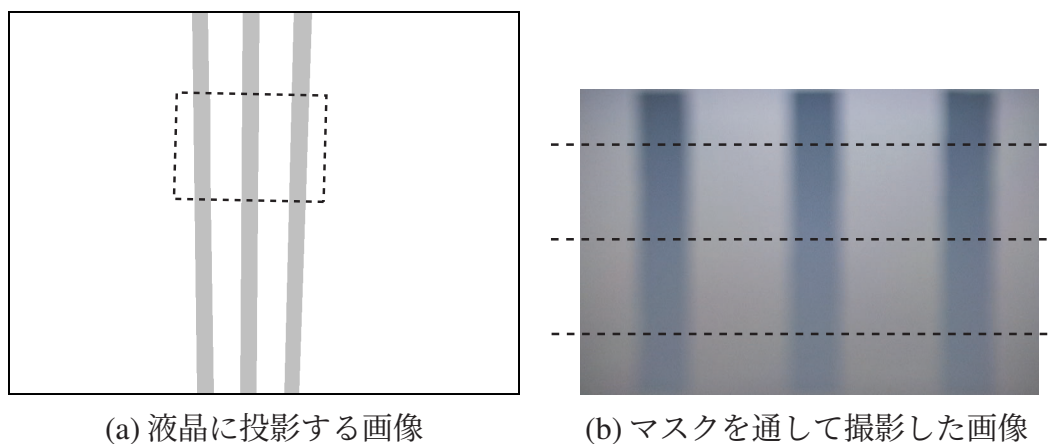


図 4.13: 評価のために作成したマスク画像

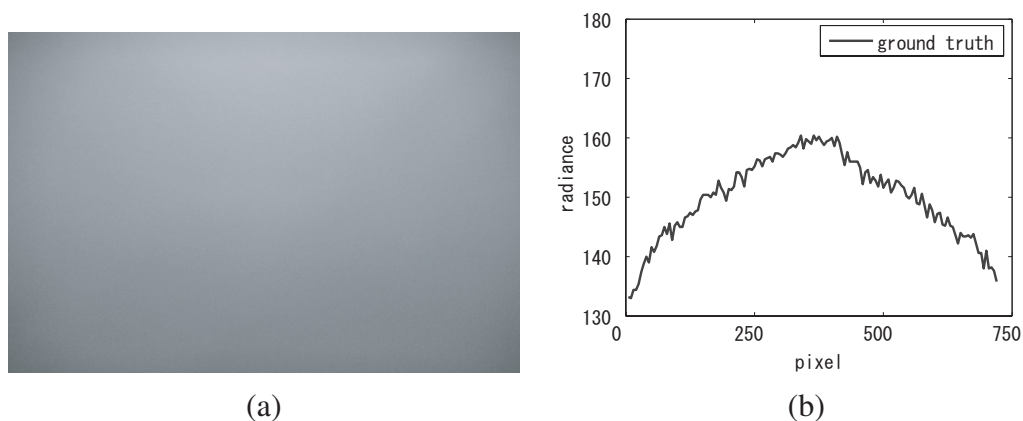


図 4.14: 光量の真値. (a) 撮影された画像, (b) 図 4.13(b) 中央の破線上における画素値

表 4.1: 広がり関数の精度比較

ライン	実データからの算出		ガウス分布による近似	
	RMS	標準偏差	RMS	標準偏差
上部	6.63	4.89	12.7	10.6
中央部	4.33	2.87	6.60	4.92
下部	3.65	2.25	4.37	2.88

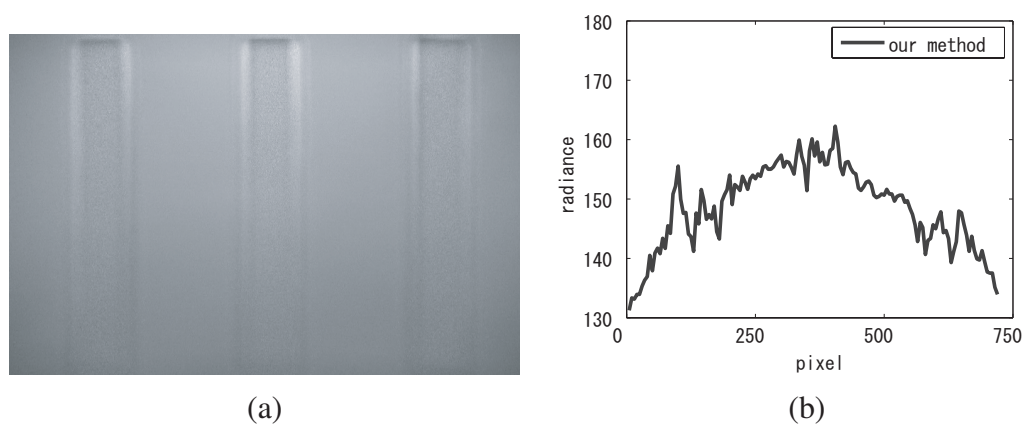


図 4.15: 算出した広がり関数により復元された光量. (a) 復元された画像, (b) 図 4.13(b) 中央の破線上における画素値

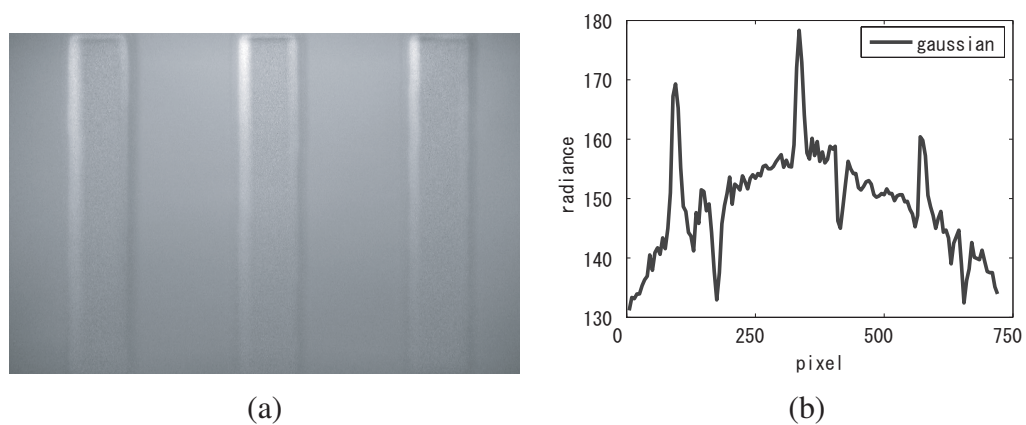


図 4.16: ガウシアンにより復元された光量 (a) 復元された画像, (b) 図 4.13(b) 中央の破線上における画素値

められた誤差を表4.1に示す。表4.1から、誤差を計算した3本の破線上すべてにおいて、実データから算出した広がり関数が、ガウス分布により近似した広がり関数よりも誤差が小さいことがわかる。

以上より、提案手法によって算出した広がり関数が、より高い精度で元の光量を推定できることが確かめられた。マスクの強さが急激に変化する境界部分においては、広がり関数がシステムの広がりをどの程度正確に表現しているかによって推定される光量が大きく変わるため、広がり関数の精度は重要である。本手法では実データから直接広がり関数を算出しているため、より高い精度で広がりを表現できたと考えられる。

Nayarら[58]は、ガウシアンによって畳み込まれたピルボックス関数によって広がり関数を表現しているが、その根拠や有効性は明確ではなかった。それに対し、本研究では実際に構築したシステムにおける広がり関数を実データから算出し、その妥当性と有効性を確認した。

4.3.3 高ダイナミックレンジの撮影

ここでは、実装したシステムを用いて適応的ダイナミックレンジを実験した結果について述べる。まず液晶の制御による光量の適応的な調節について述べる。

液晶の制御による光量の調節に関する実験は日中に室内から窓の外を撮影することで行った。図4.17に液晶による光量の調節をしていない状態で撮影した画像を示す。日中であることから、窓を撮影している部分は太陽光の影響により画像素子が飽和状態にある。次に液晶よりカメラが捉える光量を調節して撮影した画像を図4.19に示す。また、そのときシーンの光量の調節に用いられたマスク画像を図4.18に示す。図4.19から、本手法に従い液晶の透過率を変更することで、光量が調節され画像素子の飽和が生じていないことが確認できる。また液晶の制御による光量調節の結果、光量の多い窓の外も風景が鮮明に確認できるよう撮影できている。通常のカメラではダイナミックレンジの不足から、光量の少ない室内などの領域、光量の多い屋外などの領域を同時に撮影できないが、こうして撮影された画像では、ダイナミックレンジの低い出力機器である紙面においても、それらの情報を同時に確認で



図 4.17: 光量調節前の画像

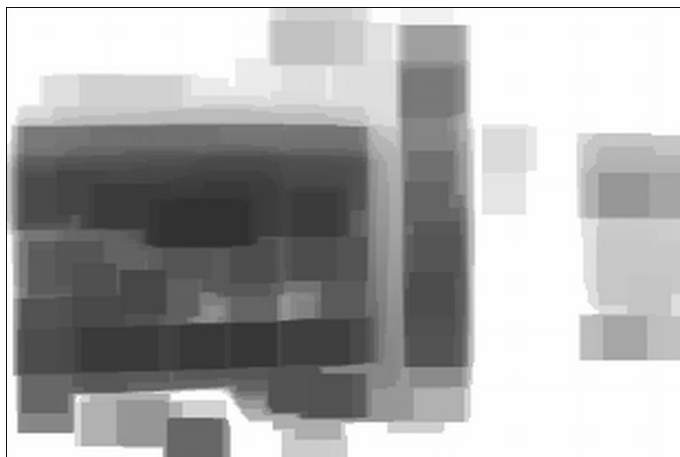


図 4.18: 光量を調節するフィルタ

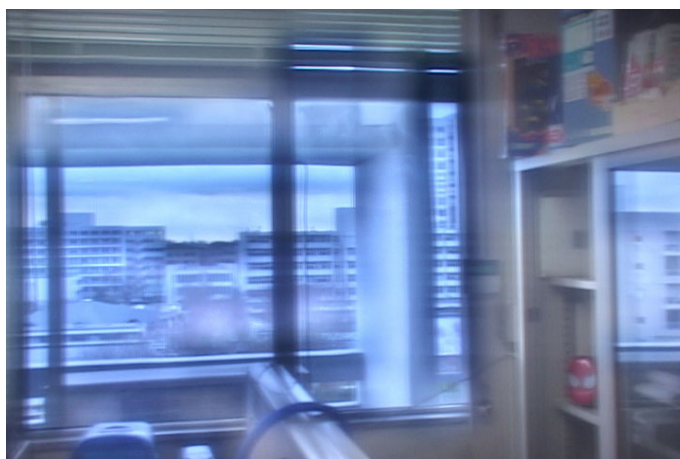


図 4.19: 光量を調節した画像

きる。そのため、本システムは高ダイナミックレンジを要するシーンに適応しており、また、出力との親和性がより高い表現ができたといえる。

次に、高ダイナミックレンジの情報を実際に復元することでダイナミックレンジの向上を確認する。光量の復元は、算出した広がり関数に基づいて行う。液晶による適応的な光量調節の結果、及びそのときに用いた液晶の制御情報(図4.18, 4.19)からシーンの光量を計算する。この計算は式(4.3)により行う。図4.18, 4.19からシーンの光量を計算すると最大の画素値は1674となり、通常のカメラに比べ約7倍の幅の光量を表現している。そのため、システムとしてのダイナミックレンジは約16 dB 向上し、少なくとも11 bit の情報を持てることが明らかになった。11 bit の情報が持つ光量を強調して紙面で表現するため、得られたシーンを複数の画像に分けて表示する。それぞれの画像では光量にある倍率をかけ、その値がしきい値を超えた場合はしきい値に抑えて表現する。図4.20に図4.18, 4.19から計算した光量を表現した画像群を示す。なお、図4.20左上に位置する画像の倍率がもっとも高く、右下に位置する画像の倍率がもっとも低い。

図4.20にあるように、この画像は様々な露光により同じシーンを撮影した複数枚の画像と同等の情報をもっていることがわかる。図4.20左段の画像では、露光時間を長くして撮影した画像と同等の情報を持っているため光量の少ない領域、例えば画像中で右側に位置する棚の内部などを確認することができる。また右段の画像では、露光時間の短い画像と同等の情報をもっているため光量の多い窓の外の風景画確認できる。結果として表現できる明暗の範囲が広がっているため、適応的な光量調整による高ダイナミックレンジ化の実現が確認できる。



図 4.20: 透過型液晶を用いたシステムによる高ダイナミックレンジ画像

第5章 反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジ撮影システム

本章では反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジ撮影システムについて述べる。まずシステムのモデルについて述べ、その後に実際に構築したシステムによる実験結果について述べる。

5.1 システムのモデル

本節では反射型液晶を用いたシステムについて述べる。反射型液晶を用いたシステムのモデルを図5.1に示す。このシステムでは各画像素子で受光した光量に応じて液晶の反射率を調整することで適応的な光量の調節を実現する。また、3.3.2節で述べたように、対物側に配置されたレンズにより液晶面上にフォーカスを合わせることが可能なため、液晶による光量調節の効果は広がりを持たない。そのため液晶の出射効率と光量の関係は式(3.1)によって表すことができる。また、反射型液晶により光を反射することで光の減衰を行うため、光路の分割のためにビームスプリッタを用いる。ここで、各レンズと液晶面の間にビームスプリッタが存在するため、レンズはビームスプリッタを超えて結像を行う必要がある。

原理としては同じであるが実用性を考えた場合、撮影するシーンなど用途に応じて容易にレンズを取り替えたいという要求がある。しかしながら、上記のモデルでは対物レンズは少なくともビームスプリッタの大きさ以上のバックフォーカスの長さが必要であり、用途ごとにそのようなレンズを設計することは現実的ではない。ここでは、リレーレンズを組み込むことにより上記の制約を解決し、撮像システムの汎用性を向上させる。リレーレンズとは光学系内のある点から他の点に、実像を伝達するレンズ系であり、またこの際に像の大きさを変更することもできる。図5.2に

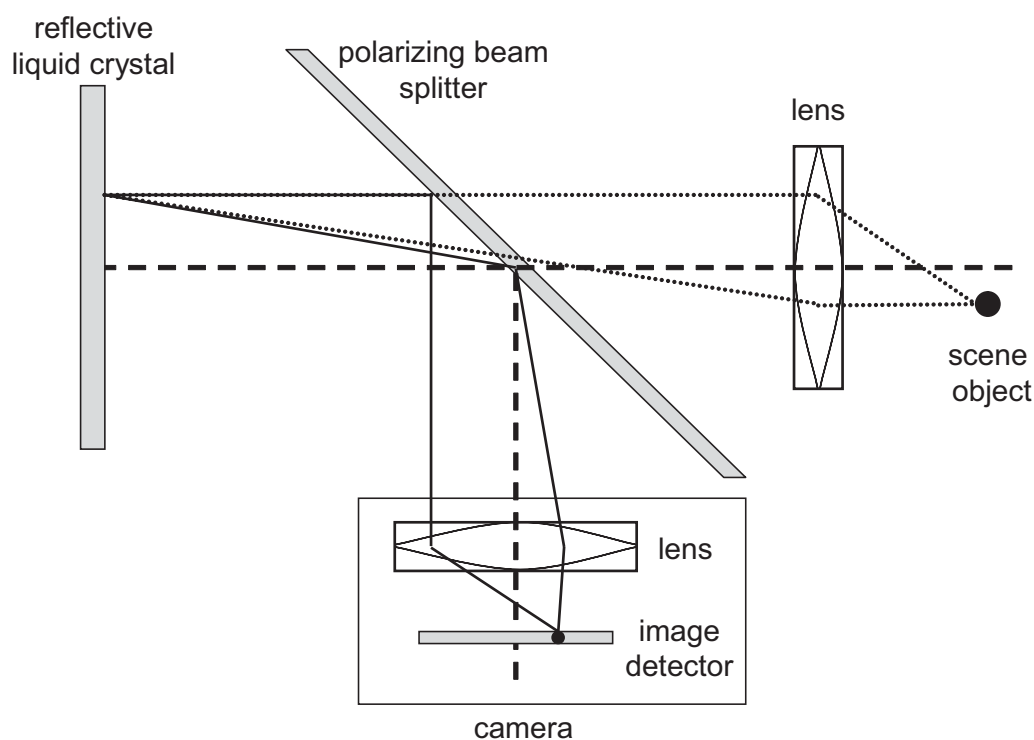


図 5.1: 反射型液晶を用いたシステムのモデル

リレーレンズを用いたモデルを示す。図 5.2 のモデルでは 2 枚のレンズを組み合わせてリレーレンズを構成し、図 5.2 において左右のレンズ、及び左方のレンズと下方のレンズをそれぞれ組みにしている。図中右端に配置した対物レンズにより結ばれる像を 2 組のリレーレンズにより伝達することで液晶により減衰された光が画像素子に入射する。

これにより、図中右端に配置したレンズ以外を一つのシステム、一つのカメラと考えると、システム外にあるレンズで集光された光が液晶により適応的に光量を調節され画像面で結像する、適応的ダイナミックレンジ撮影システムが実現されているといえる。また、結像面までの距離さえ同じであればどのようなレンズであっても対物レンズとして使用可能であり、魚眼レンズや望遠レンズなど用途に合わせて自由に変更できる。このことはシステムの汎用性を考えたときに重要である。以降ではリレーレンズを用いたモデルについて述べる。

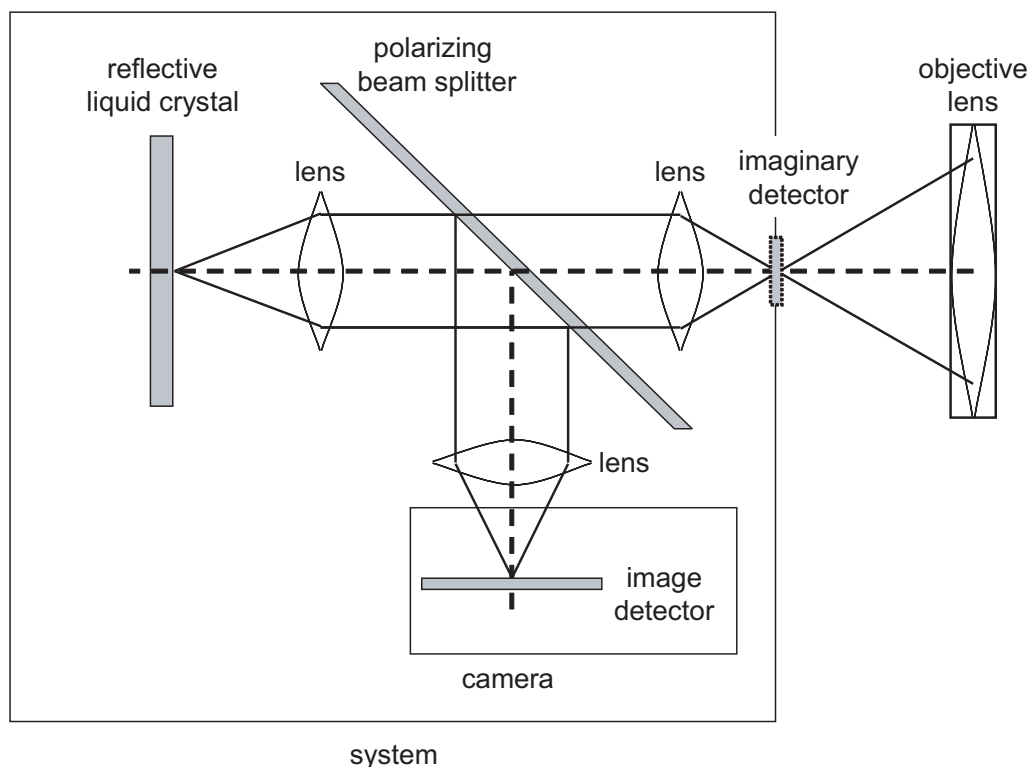


図 5.2: 反射型液晶, リレーレンズを用いたシステムのモデル

5.2 システムの光学特性

リレーレンズを用いたモデルでは、通常のカメラに比べ多くのレンズを必要とし、図 5.1 に比べ構成が煩雑になる。本システムでは対物レンズと液晶面の間、液晶面と画像面の間にあるレンズをリレーレンズとして用いる。リレーレンズは、通常複数のレンズの組み合わせで用いられるが、レンズ間の充填物質やレンズ間の距離も定められている。しかし、図 5.2 に示されているように、リレーレンズ間には大気とビームスプリッタが存在し、レンズ間の距離もビームスプリッタの影響を受ける。そのため、各光学素子が互いに受ける影響を考慮した設計を行う必要がある。

ここでは光学設計として、光学素子の最適な配置をシミュレーションにより求める。このシミュレーションでは、レンズに用いる材質、曲率など各種パラメータを与えた場合にどのような光学特性が得られるかを計算する。求めたいパラメータを変数とする評価関数を設定し、最適解を求めることでパラメータを得る。

5.3 試作システムにおける評価実験

本節では反射型液晶を用いた適応的ダイナミックレンジカメラの実装、及び実験によるシステムの有効性の評価について述べる．まず実装したシステムとその構成について述べ、次に用いた液晶の制御情報と反射率の変化の関係を計測した結果、及び適応的ダイナミックレンジカメラの実験結果について述べる．

5.3.1 試作システムの概要

ここでは実装したシステムについて述べる．カメラシステムを図 5.3 に示す．なお、ここでは前節のモデルのうち図 5.2 で述べたリレーレンズを用いたモデルを構築した．システムではカメラとして PointGreyResearch Flea を用い、反射型液晶として Brillian Z86D-3 を利用している．また本システムではモデルと異なり、偏光特性のないビームスプリッタを偏光フィルタと組み合わせて用いる．用いた反射型液晶は 800×600 の解像度をもち、そのうちおよそ 500×400 ピクセルの領域を解像度 XGA(1024×768) のカメラで撮影し、カメラの出力として 8 bit の情報を得ている．実際の撮影では図 5.4 のように治具を用意し、持ち運びが可能であるなど、利便性に留意した．なお、処理の速度として光量調節における速度を計測したところ、約 12 fps のフレームレートを実現した (CPU:Pentium4 3.2 GHz, メモリ:2GB の計算機を使用)．

3.2 章で述べた幾何的キャリブレーションを校正後のシステムにおいて行った結果は次のとおりである．

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -9.891 \times 10^{-4} & -2.628 \times 10^{-5} & -0.2823 \\ 2.818 \times 10^{-5} & 9.564 \times 10^{-4} & -0.9593 \\ 2.851 \times 10^{-9} & -1.015 \times 10^{-7} & -1.955 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$(k_1, k_2) = (-0.2213, 0.3954)$$

液晶の制御と反射率の変化の関係

ここでは 3.1.2 節で述べた、液晶を制御した際の反射率の変化についての計測結果について述べる．計測結果を図 5.5 に示す．グラフ中では画像面上部と画像面下部で

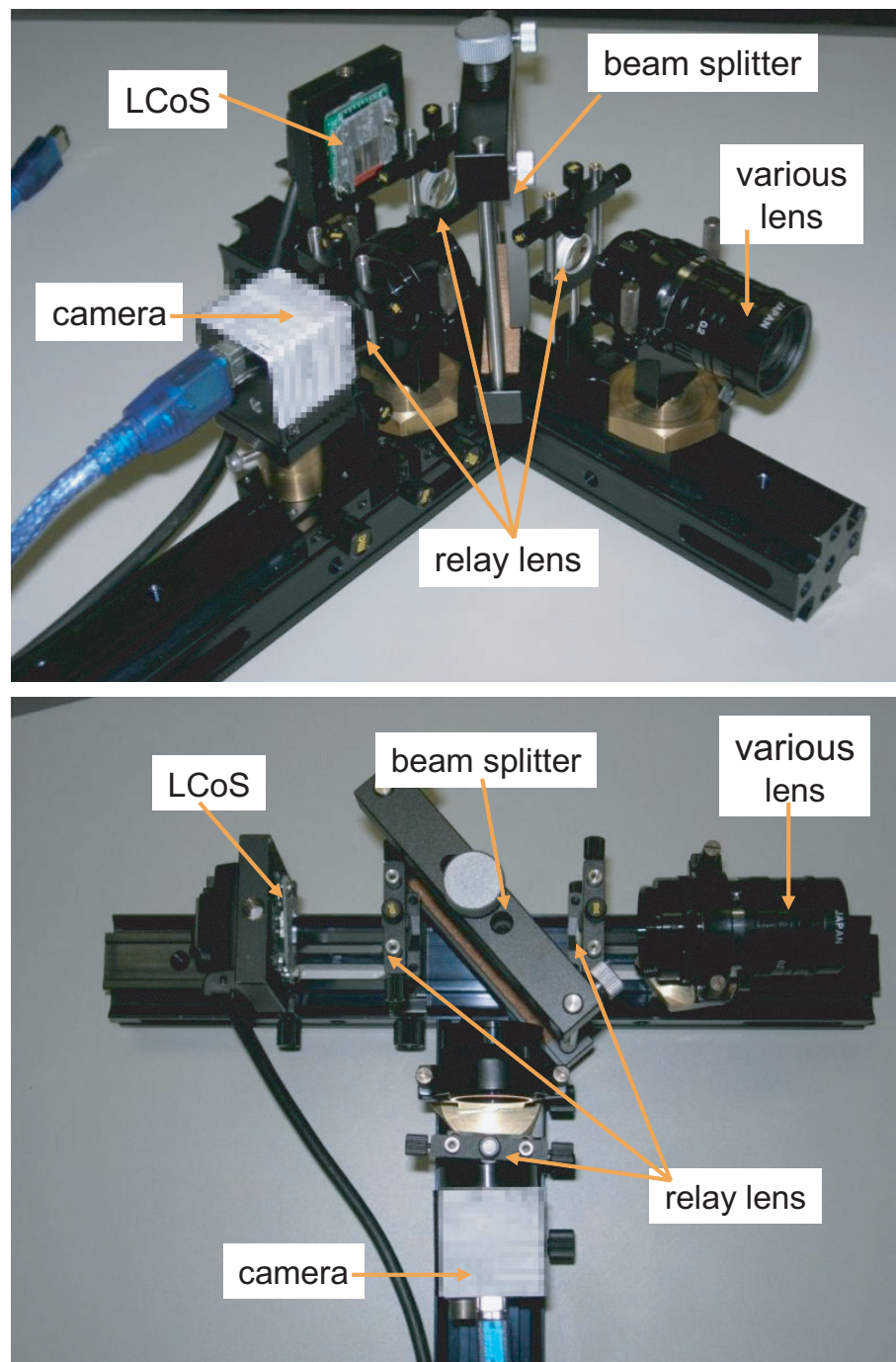


図 5.3: 反射型液晶を用いたシステムの光学素子の配置

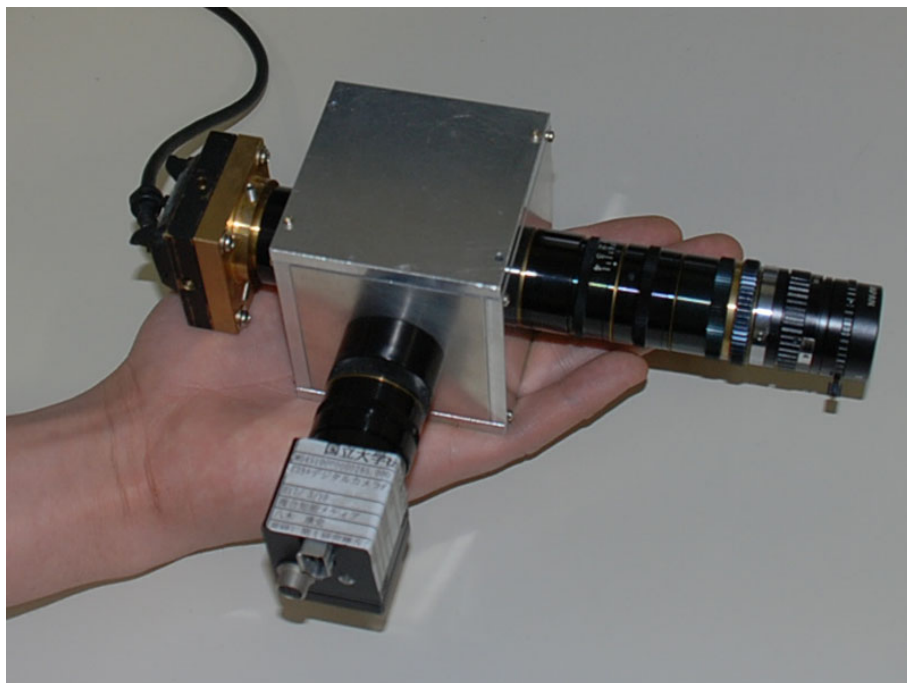


図 5.4: 反射型液晶を用いたシステムの概観

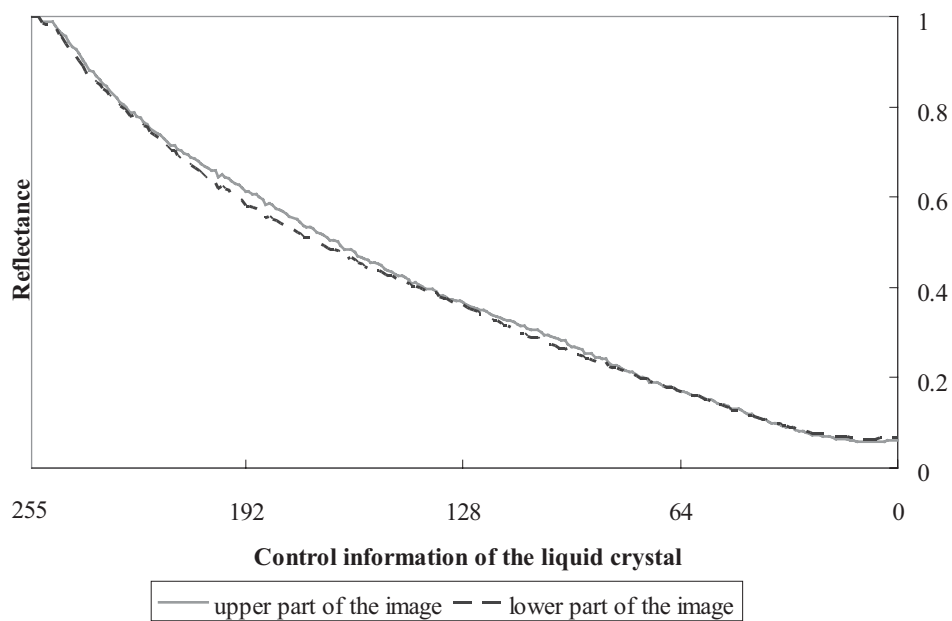


図 5.5: 反射型液晶の制御と反射率の関係

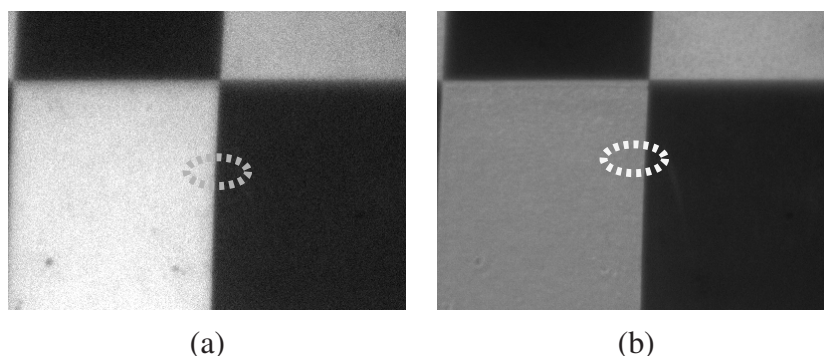


図 5.6: 光量変化の大きいシーンでの光量抑制

計測した液晶の制御情報と反射率の変化の関係を表している．グラフの横軸は液晶の制御情報を表し，本システムでは液晶を 8 bit の情報で制御しているため 256 段階になっている．グラフの縦軸は液晶の反射率の割合を表している．それぞれのグラフ中で左端の点は反射率を最大にする制御情報に対応しているため，グラフの値は 1 となっている．

図 5.5 からわかるように，液晶中での位置による反射率の変化に違いはほぼ見られない．ここで液晶の反射率と制御の関係が素子全体で同様であるとする処理の高速化が見込める．システムではこの結果を基にして液晶の制御を行う．

前述のように試作システムではカメラの画像素子に比べ液晶素子の数が少ないため，画素ごとに厳密に独立して光量を制御することはできない．例として，光量を制御せずに撮影した画像(図 5.6(a))と光量制御後の画像(図 5.6(b))中，破線で示した領域内の横軸方向での画素値の変化を図 5.7 に示す．図 5.7 中で横軸は画像中の横座標，縦軸は画素値を表しており，実線が図 5.6(a)，点線が図 5.6(b)の数値を表している．前述のように適切な光量 I_{opt} を 128 と設定しているため，実線のうち左部は光量を抑制される．また，図 5.6(a) は液晶の出射効率を最大にして撮影されたものなので実線のうち右部の光量は増幅されない．実線と点線を比較すると，左部は 128 付近，右部は実線とほぼ同程度の画素値となっているが，境界部分では実線においても I_{opt} 以下であるにも関わらず光量の抑制が見られる．このように，液晶面と画像面間の素子数の違いによる影響は主に光量の多い領域と少ない領域の境界において現れる．

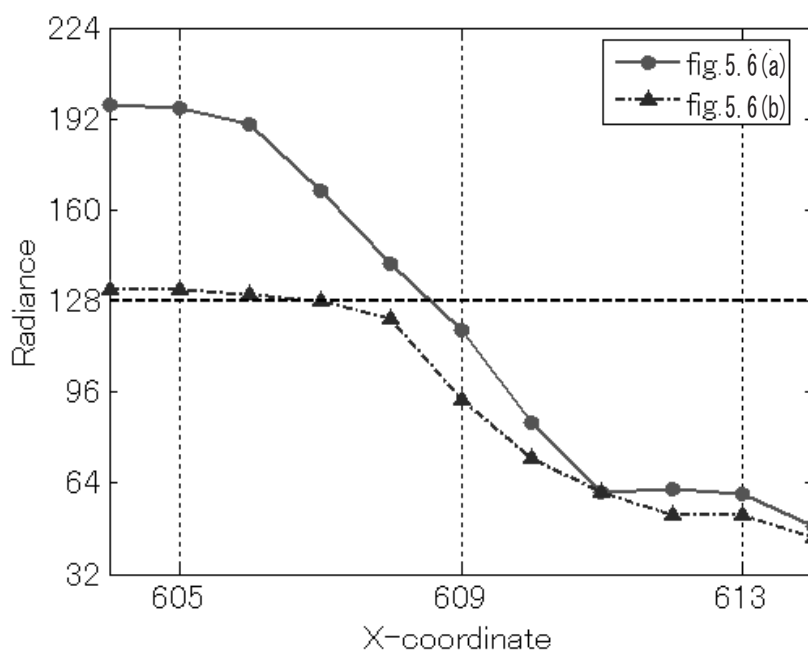


図 5.7: 境界部における光量調節の影響

システムのダイナミックレンジ

ここでは、反射型液晶を用いたシステムのダイナミックレンジの評価について述べる。ダイナミックレンジの評価のために、入射光量に対するシステムの出力を計測した。実験では、カメラに入射する光量を段階的に変化させ、画像素子の飽和が起これないように液晶の出射効率を制御して撮影を行い、入射光量に対するカメラの出力を計測した。また、通常のカメラとの比較のため、液晶の出射効率を固定して同様の実験を行った。なお、ここではカメラのシャッタースピードを制御することで入射光量の段階的な制御を行ったが、カメラのシャッタースピードは0.1ms以下の精度で調節可能であり、例えば0~2msの区間で140点と、横軸方向に密な計測を行った。

計測結果をグラフにしたものをそれぞれ図 5.8 に示す。グラフの横軸は、カメラのシャッタースピードであり、入射光量に比例している。また、縦軸はカメラの出力である画素値の対数を表している。なお、図 5.8(a) では、光量変化とともに液晶の出射効率の変化を示している。

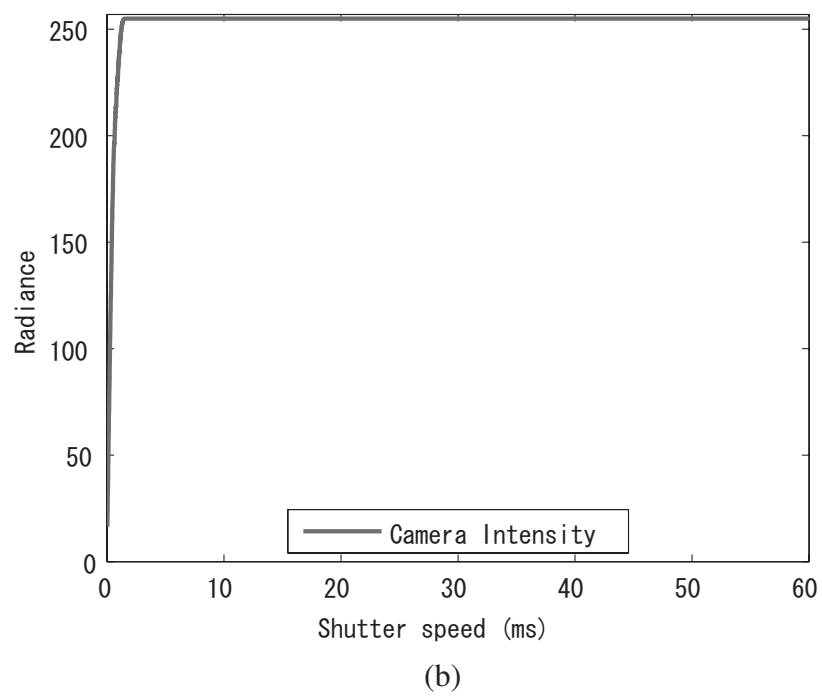
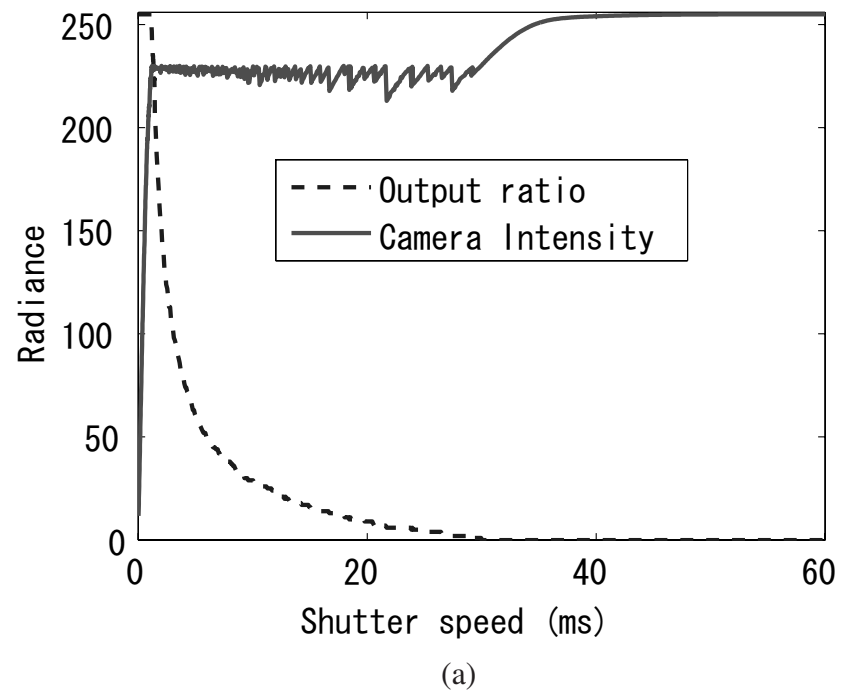


図 5.8: 入射光量に対するカメラの出力. (a) 出射効率の制御あり, (b) 出射効率の制御なし.

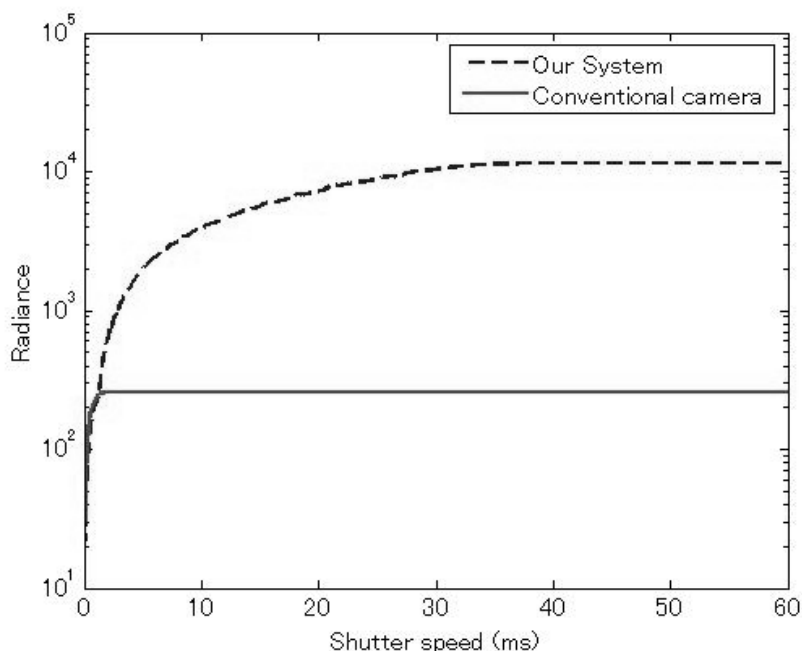


図 5.9: ダイナミックレンジの比較

これらの結果を基に、それぞれのシステムの入力と出力の関係をグラフにしたものを図 5.9 に示す。グラフの横軸はシステムの入射光量を表しており、縦軸はシステムとして出力する光量を表している。

図 5.8, 5.9 より、明らかに本システムの方が広い範囲の入射光に対応できることがわかる。また、図 5.9 における出力の最大値においては、45.2 倍の差があった。つまり、従来のカメラに比べ $\lceil \log_2(45.2) \rceil = 6$ bit の情報を余分に持つことができることが明らかになった。また、カメラで撮影される情報は 8 bit であるため、合計して 14 bit の情報を持つことができる。また、システムとしてのダイナミックレンジは約 33 dB 向上する。これらのことより、本システムによる通常のカメラのダイナミックレンジの向上を確認した。

5.3.2 光学シミュレーションを用いた光学素子の位置合わせ

システムの光学的特性として、各光学素子の配置を光学シミュレーションを用いて求めた。画像面上での収差の二乗平均平方根 (RMS) を目的関数とし、これを最小

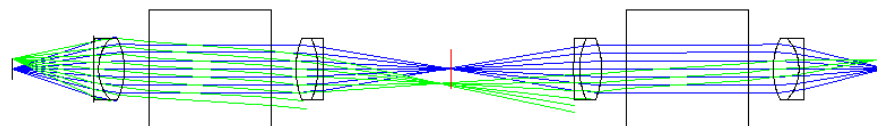


図 5.10: レンズの初期配置

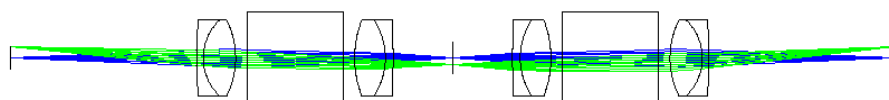


図 5.11: 校正後のレンズ配置

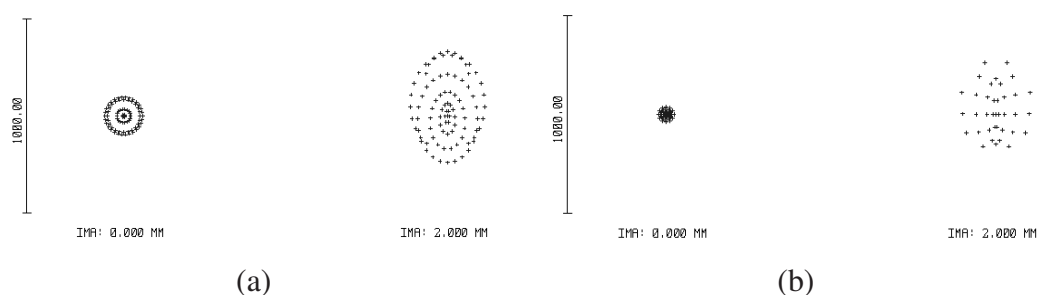


図 5.12: 初期配置における収差. (a) 画像面における集光, (b) 液晶面における集光

化することで、レンズと液晶面、画像面間の距離に関して最適な配置を求めた。なお、レンズの初期配置として、各面から焦点距離の長さだけ離れた配置を用いた。図 5.10, 5.11 にレンズの初期配置と最適化後の配置を示す。なお、本研究ではシミュレーションソフト zemax[99] を用いた。図中では、左方に集光した光が右方の画像面へ結像する際の、光軸上、及び集光面の端における光束を表している。また光路の見やすさのため、反射型液晶、ビームスプリッタによる反射を図中右方向へと変換している。図 5.10 では、光軸上においては適切な集光が確認できるが、ケラレなどにより、光軸から離れた箇所においては集光状態が著しく悪い。一方、図 5.11 では、最適化により光軸上のみでなく、素子の端部においても適切な集光が確認できる。

次に、画像面、液晶面での収差を図 5.12, 5.13 に示す。それぞれ初期配置、最適化後の配置における収差を表している。図より、初期配置においては光軸上と集光の端において大きく収差の違いが見られるが、最適化により、その程度は抑えられて

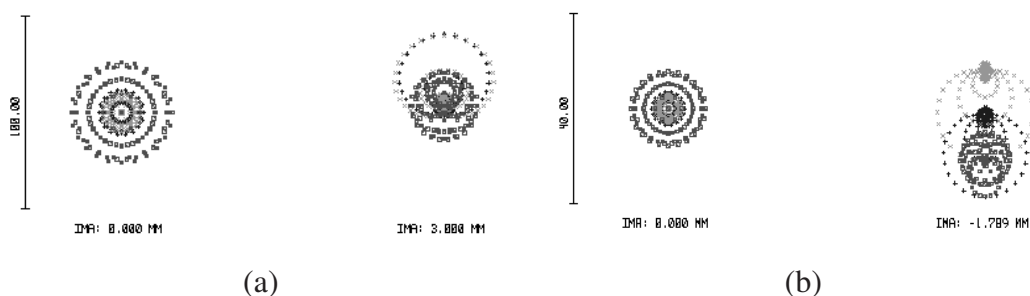


図 5.13: 最適な配置における収差. (a) 画像面における集光, (b) 液晶面における集光

表 5.1: 計測系の比較

	液晶面での収差		画像面での収差	
	光軸	端部	光軸	端部
初期配置	20.5	145.6	68.0	237.9
最適な配置	4.2	9.0	13.8	15.0

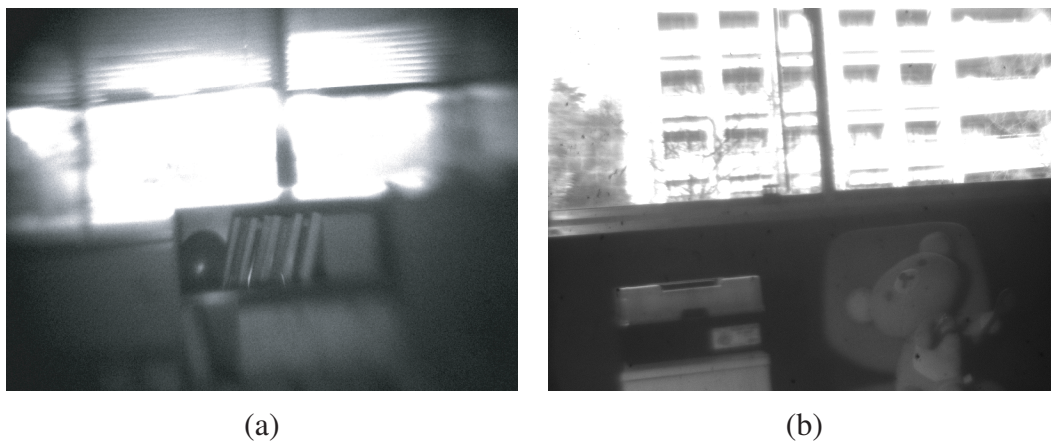


図 5.14: 最適化による収差の向上. (a) 最適化前, (b) 最適化後

いることが分かる. これらの収差の大きさを表 5.1 にまとめる. 結果より, 最適化による収差性能の著しい向上が確認できる.

また, 最適化の前後での結像の違いを実際の撮影画像を用いて確認した. 図 5.14(a)(b) にそれぞれを示す. 結果として, 図 5.14(a) においては, 中心部に撮影されている棚

の内部に比べ、周辺部で画像のぼけが確認できるが、図 5.14(b)においては、室内の物体、及び屋外の建物と、中心部、周辺部それぞれにおいて収差が改善されていることがわかる。

5.3.3 高ダイナミックレンジの撮影

ここでは、実装したシステムを用いた高ダイナミックレンジを必要とするシーンの撮影結果について述べる。対象として、静的なシーン、動的なシーンの両者を撮影し、評価を行った。

静的シーンにおける撮影

ここでは、静的なシーンにおける撮影結果について述べる。まず液晶の制御による光量の適応的な調節について述べる。液晶の制御による光量の調節に関する実験は 4.3.3 節と同様に日中に室内から窓の外を撮影することで行った。図 5.15(a)(b)にそれぞれ、撮影画像、光量調節のために液晶に表示する画像を示す。図 5.15 上段は液晶による光量の調節をしていない状態の画像であり、窓の外などにおいて、太陽光の影響により画像素子が飽和状態にあることがわかる。また、この段階では光量調節をしていないため、液晶の画像にはシーンの情報がまったくない。本手法では図 5.15 上段のように画像素子の飽和が生じている画像からシーンに最適なマスク画像を得るには、1) 画像の撮影、2) 撮影された画像を基にした液晶の制御という手順を繰り返す必要がある。経過段階の撮影画像、液晶画像を図 5.15 中段に、最終的に得られた画像を図 5.15 下段に示す。なお、図 5.15 上段を撮影してから図 5.15 下段の画像を取得するには上記の手順を 7 回繰り返した。本手法に従いフィルタの出射効率を制御することで、特に光の強い部分を除き、画像素子が飽和しないよう光量が調節されていることが確認できる。特に強い光として、このシーンでは屋外の建物バルコニー部にある手すりにおいて、図 5.15(c) 中でも画像素子の飽和、及び周辺素子への光の漏れが見られる。これは金属の手すりの鏡面反射により、直射日光のような強い光が入射しているためと考えられ、試作システムでの限界と考えられる。

次に元の光量を算出することで高ダイナミックレンジ画像を作成した。元のシーン光量は、光量を調節して撮影した画像とそのときの液晶の出射効率(図 5.15 下段)

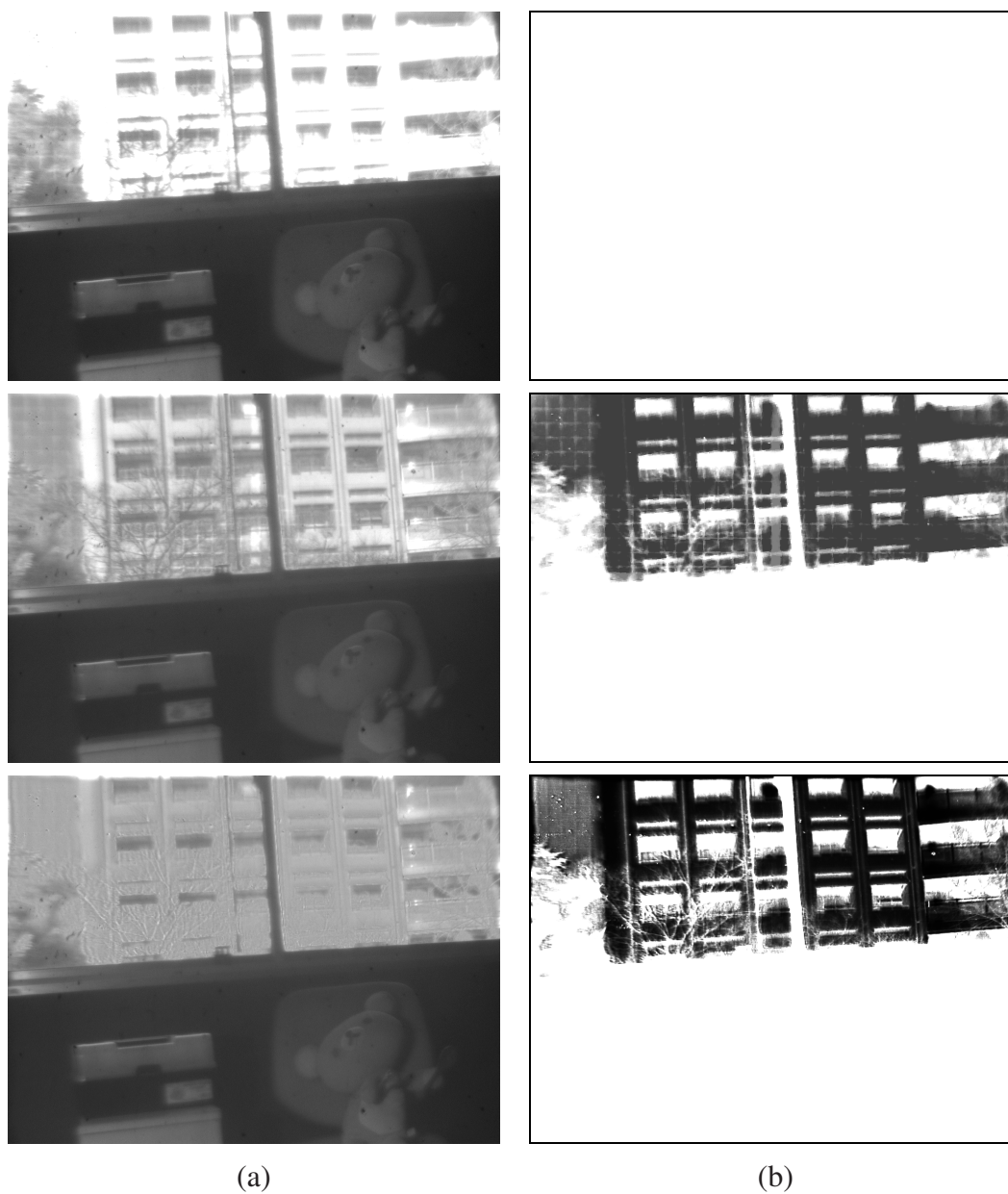


図 5.15: 反射型液晶を用いた光量の調節. (a) 撮影された画像, (b) 光量を調節するマスク

から式(4.3)により算出した. 5.3.1 節で述べたように, 本システムでは, 14 bit の情報をもてる. 14 bit の情報を紙面で表現するため, 得られたシーンの光量をもつ情報を複数の画像に分けて表示する. それぞれの画像では光量にある倍率をかけ, そ

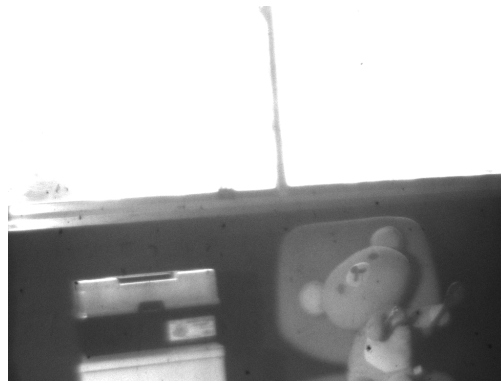
の値がしきい値を超えた場合はしきい値に抑えて表現する。

作成した高ダイナミックレンジ画像のうち、光量の少ない部分の情報、多い部分の情報をそれぞれ図 5.16(a), (b) に示す。これらの画像は異なる露光により同じシーンを撮影した画像と同等の情報を持っていることがわかる。図 5.16(a) では、露光時間を長くして撮影した画像と同等の情報を持っているため、光量の少ない領域、例えば画像中では部屋の内部の情報として箱やぬいぐるみの形状が詳しく確認できる。また、図 5.16(b) の画像では露光時間を短くして撮影した画像と同等の情報を持っているため、光量の多い領域、屋外の建物の窓などを確認できる。また、得られたシーン光量を一枚の画像で表現する方法として、log スケールで表現したものを図 5.16(c) に示す。図では窓の外、部屋の中の情報を同時に確認できるため、システムで表現できる明暗の範囲が広がっているといえ、適応的ダイナミックレンジカメラが実現できていることがわかる。

動的シーンにおける撮影

また、2 章で述べたように、本手法は原理的には動きのあるシーンに対しても適用できる。動きのあるシーンの例として、システムを動かしながら屋外を撮影した結果を図 5.17 に示す。なお、シーンの動きを撮影するため、システムを手で保持して動かした。図 5.17 上段では、建物と森の間で光量の差が大きく、建物の領域において画像素子の飽和が生じている。本手法に従って光量調節を行うことで、画像素子の飽和を生じず撮影が可能であるが、図 5.17 三段目のように、光量調整ができない場合がある。これは、前フレームに得られる画素値により光量が調節されるため、シーンに速い動きが存在する場合は、適切な光量調節が困難なためである。

図 5.18 に動きのあるシーンから得られる高ダイナミックレンジ画像を示す。図 5.18(a) から順に、図 5.17 一段目、二段目と対応している。また、ここでは高ダイナミックレンジ画像を紙面で表すため、[77] の手法を用いた。図 5.18(a) では、光量の少ない森の様子は確認できるものの、光量が調節されていないため建物の様子が確認できない。また先に述べたように、図 5.17 三段目では、シーンに速い動きが存在するため適切な光量調節が行われていなかった。この影響は図 5.18(c) において通常のカメラにおける動きによるブレのように撮影される。一方、図 5.18(b)(d) では、森



(a)



(b)



(c)

図 5.16: 提案システムによる高ダイナミックレンジ画像. (a) 暗い領域の表示, (b) 明るい領域の表示, (c) $\log$ スケールでの表示

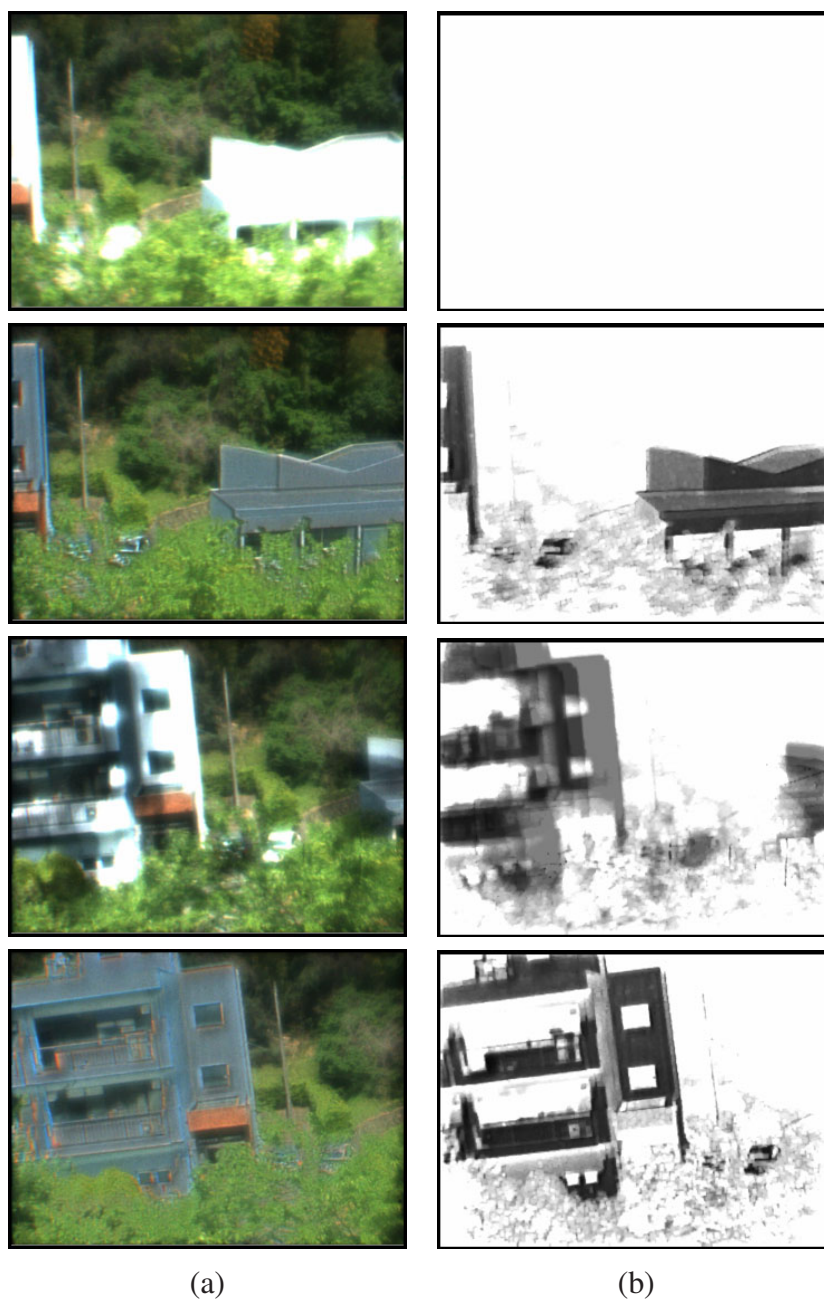


図 5.17: 動きのあるシーンの撮影結果. (a) 撮影画像, (b) 液晶による光量調節

の様子に加え、建物の形状など光量の多い領域の様子も確認でき、広い幅の光量を表現できていることから、高ダイナミックレンジ撮影システムが実現できているこ

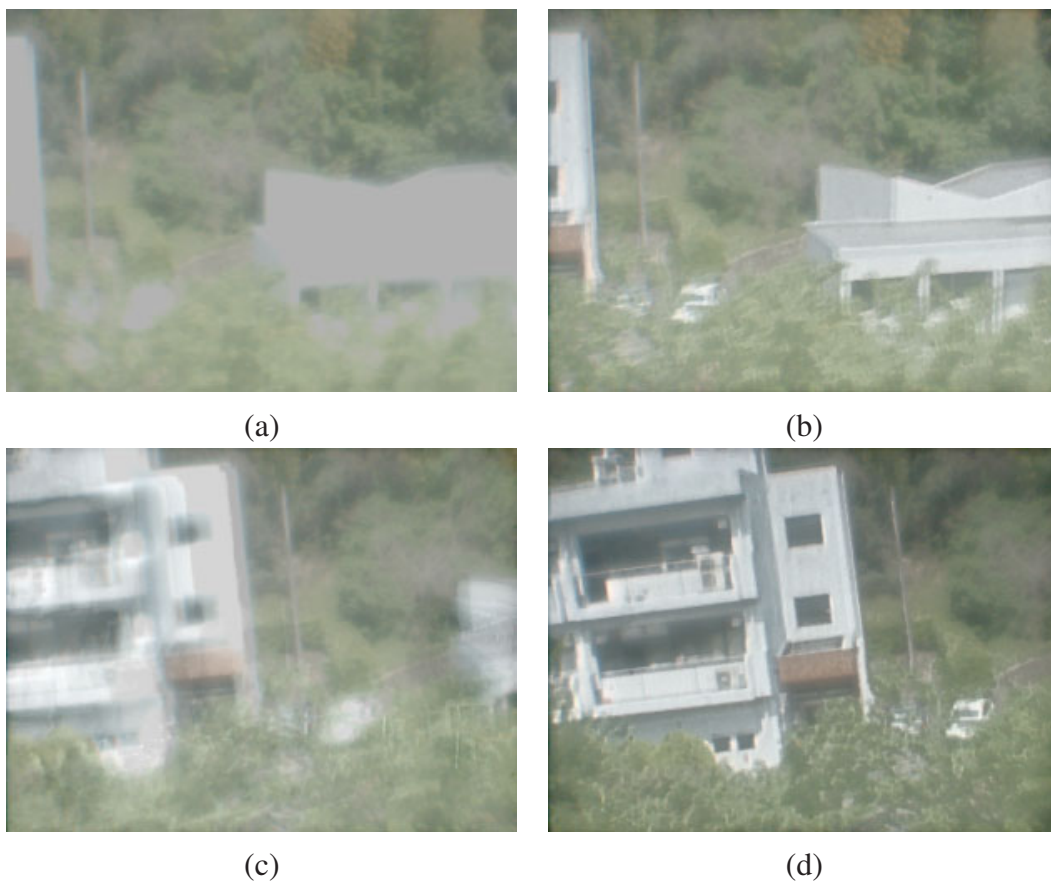


図 5.18: 動きのあるシーンの高ダイナミックレンジ画像

とがわかる.

第6章 結論

本論文では、実世界の光量の計測・再現という課題の中で、空間分解能、色の表現などと同様に解決が望まれている問題である光量の幅に着目し、入力である光量の計測、及び出力である光量の表示の両者を考慮したシステムとして、液晶を用いた適応的な光量の調節、及び元の光量の計算による高ダイナミックレンジ撮影システムについて論じた。また、提案手法に基づいた撮影システムとして、光量調節に透過型液晶及び単レンズを用いたシステムと、反射型液晶及びリレーレンズを用いたシステムをそれぞれ構築し、特性の検証・評価実験を通して手法の有効性を確認した。本論文では以上の成果を5つの章に分けて論じた。

第1章では、実世界を対象とした撮影・再現に関する課題として光量計測の重要性を示した。計測・表示のそれぞれについて課題を示し、その両者を考慮したシステムの重要性を論じた。また、それにより本研究の目的と位置づけを明らかにした。

第2章では、本論文で論じる実世界の光量、及びシーンのダイナミックレンジに関する概念の定義を行い、実世界のダイナミックレンジへの対応としてこれまでに提案されてきた手法の調査・分類を行い、計測系、表示系、記録系の分類の中でそれぞれの差異を述べ、特徴付けた。本研究では計測から表示までを考慮したシステムを目指すため、動的なシーンへの対応、空間分解能の向上といったシーンの計測に対する観点のみでなく、ダイナミックレンジの低い機器への表示、高ダイナミックレンジの情報をの記録といった出力を含めた観点から比較・考察を行った。結果として、動的なシーンを空間分解能の低下なく撮影可能であり、また、出力の多様性を持つ手法として、適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムの構築を行うことを述べた。

第3章では、提案手法である、適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムについて述べた。空間的に出射効率を制御可能な素子を用いた適応的な光量調節の原理を示し、光量調節のための出射効率の制御法、及び撮影された情報

からのシーン光量の復元方法について述べた。また、出射効率の制御・光量の復元に必要な情報として、画像素子での受光量への調光素子による影響の求め方について述べた。次に、ピンホールカメラモデルにおける透視投影について説明し、レンズにおける歪みの影響について述べた。また、調光機器と画像素子間の射影関係について述べることでシステムにおける幾何関係を明らかにした。

システムの構成として、透過型液晶、反射型液晶、DMDの三種類を調光素子として考え、それぞれの動作原理からカメラとの組合せに適しているかを述べた。また、撮影対象とシステムの大きさを考え、レンズ構成による調光素子面での結像の有無の違い、及びそれによる光量調節への影響に関して述べた。これらの調光素子、レンズ配置によりシステムの構成を種類に分類し、それぞれを特徴づけ、考察を行った。考察の結果として、透過型液晶及び単レンズを用いる構成では光学系の簡単さから構築コストが少ない、反射型液晶及びリレーレンズを用いる構成では画像素子単位での正確な光量調節が可能であることを示した。これにより、それぞれのシステムに於いて異なる利点が存在し、実際に構築する価値があることを明らかにした。

第4章では、透過型液晶を用いた適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムについて述べた。このシステムの特徴として、単レンズを用いることによる光量調節の影響の広がりについて述べ、これを広がり関数としてモデル化し、液晶の制御方法、及び光量復元の方法を示した。評価のためにシステムを試作し、システムの特性として、液晶の制御と光量調節の関係を計測し、実測値を用いて広がり関数の推定を行った。文献[58]では根拠や有効性が明確でなかった広がり関数が用いられていたが、本手法により推定した広がり関数と比較することで、実測値に基づく推定方法の有効性を確認し、実際に高ダイナミックレンジを必要とするシーンの計測を行った。評価のためのシーンとして、室内と屋外が同時に視野に含まれるシーンを撮影し、光量復元の結果から、ダイナミックレンジの高いシーンの撮影が可能であること、また、計測結果を紙面に表現することで、ダイナミックレンジの低い表示系への応用が行えることを確認した。

第5章では、反射型液晶を用いた適応的な光量調節による高ダイナミックレンジ撮影システムについて述べた。リレーレンズを用いた場合の基本的な光学系の配置を示し、さらに、システムの汎用性を向上させる配置としてリレーレンズを用いた光学系を示した。また、その系における光学設計の重要性について述べた。ここで

提案したシステムを試作し、評価実験を行った。まず、撮像に関する評価として、光学設計による画質の向上を、実際に撮影した画像からも確認した。液晶の制御と光量調節の関係として、透過型液晶を用いたシステムと同様に、液晶の制御情報と反射率の関係の計測結果を示した。また、カメラと液晶機器の空間分解能の違いにより生じる光量調節への影響について述べ、それが顕著に現れる状況で実際に計測を行うことにより影響の大きさを確かめた。システムのダイナミックレンジ性能として、画像素子へ入射する光量を密に変更し、光量調節を行う場合と、行わない場合のそれぞれで入射光量に対する出力を比較することで提案手法による高ダイナミックレンジへの適応を確認した。実際に高ダイナミックレンジを必要とするシーンとして、第4章と同様に、室内と屋外が同時に視野に含まれるシーンを撮影し、光量復元の結果から、高ダイナミックレンジ撮影システムの実現を確認した。反射型液晶を用いたシステムにおいては、実用性に配慮して片手で保持できる大きさで構築され、また、素子ごとの反射率の差が小さいことを利用した処理の高速化を行った。より実用的なシーンにおける評価として、屋外において動きのあるシーンの撮影を行い、フレーム間で激しい動きのないシーンに対しては対応可能であることを確認した。

本研究においては、透過型液晶を用いたシステム、反射型液晶を用いたシステムの両者を実際に構築し評価を行った。両者を比較した場合、透過型液晶を用いたシステムでは、単レンズを用いるため構築が比較的簡単であるが、光量調節の影響が広がりを持つ。この広がりをシステムの特長として求めることにより、畳み込みによる計算が必要であり計算量が多くなるものの、より正確な光量復元が可能である。なお、光量調節においては最小値フィルタを用いることで広がりによる影響に対応でき、広がり関数を求めることなく、ダイナミックレンジの低い表示系への出力を実現できる。また、制御情報と透過率の関係が液晶素子の位置により異なるため、制御の際には位置による関係の違いを考慮する必要がある。一方、反射型液晶を用いたシステムでは、リレーレンズを用いて液晶面での結像を行うため光量調節による影響の広がりはないものの、光学系が複雑になり、また、システムとしてのサイズも大きくなる傾向がある。液晶素子の位置による光の入射角の差は比較的小さく、制御情報と反射率の関係は液晶素子ごとでほぼ変わらないため、この関係をすべての素子で同一であると仮定して処理の高速化を図れる。画素単位での光量調節が可

能であるため、例えば動的なシーンなど、様々な用途に対応した光量調節を実現可能である。また、各液晶の特徴として、透過型液晶は低コストである、反射型液晶はコントラスト性能が高いという利点を持つ。

以上をまとめると、透過型液晶を用いたシステムは、光量調節の影響が広がりを持つため、人間への表示に適したシステムであり、より安価な実装が可能であると考えられる。一方、反射型液晶を用いたシステムは、より高いダイナミックレンジ性能を持ち、用途に応じた光量調節が可能であるため、屋外における監視のような、特定の用途を想定したシステムとして適していると考えられる。本手法の実用化の際にはこのことを考慮し、目的に合わせたシステムの設計が必要である。

今後に残されている課題について述べる。提案手法では実世界の表現に関して、光量を主眼に置き液晶の制御を行ったが、他の観点についても考慮する必要がある。具体的には、光量のみから液晶の出射効率を計算したが、各色成分に対する出射効率を計測し、それに基づいた処理を行うことでより正確な光量調節、及び光量情報の計測が可能であると考えられる。また、反射型液晶を用いたシステムの小型・軽量化が考えられる。図5.2で示したようにシステムを一つのカメラとしてとらえた場合、通常のカメラに比べて構成が複雑なためサイズが大きくなってしまう。そのため、FOP(Fiber Optic Plate)を用いるなど、効率的な光学設計によりシステム全体の小型化を行うことでシステムの実用性が向上すると思われる。システムの実用においては、上述の大きさの他に、運用するシーンを考慮した設計が必要であると考えられる。例えば、屋外における全方位定点監視システムにおいては、日光の影響のため高ダイナミックレンジが必要であるが、最も強い光源の位置はさほど変わらず、またカメラ自体が動く場合に比べてシーンの動きも少ない。そのため、求められる光量調節の速度は比較的緩やかになると考えられ、システムの構成、光量調節アルゴリズムを調整することで、通常のカメラを用いた場合には対応できなかった問題に対して有用性が示せると考える。

謝辞

博士後期課程への進学を勧めてくださり、また進学後も本研究全般にわたり、素晴らしい研究環境の下、御指導、御助言と格別の御配慮を頂きました大阪大学産業科学研究科 複合知能メディア研究分野 八木康史 教授に謹んで深謝の意を捧げます。

研究内容ばかりでなく、研究に対する心構えに関しても御指導頂き、所属の変わった後も暖かく見守っていただきました大阪電気通信大学情報通信工学部 情報工学科 越後富夫 教授に篤く御礼申し上げます。

研究全般にわたる様々な助言、熱心なご指導を頂き、また本論文をまとめる上でも、丁寧な御指導を頂きました大阪大学産業科学研究科 複合知能メディア研究分野 向川康博 准教授に衷心より感謝の意を表します。

研究の場のみでなく公私にわたり御世話になり、日頃から励ましをいただきました大阪大学産業科学研究科 複合知能メディア研究分野 佐川立昌 助教に深く御礼申し上げます。

研究内容や研究を論文にまとめる上での構成など、多くの場面において常日頃から議論を通じて懇切丁寧なご指導を頂きました大阪大学産業科学研究科 複合知能メディア研究分野 榎原靖 助教に心より御礼申し上げます。

貴重な時間を割いていただき、本論文の副査をして頂き、本論文をまとめる上で多数の有益なご指摘を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科 コンピュータサイエンス専攻 井上克郎 教授、情報システム工学専攻 竹村治雄 教授に心より感謝いたします。

日常から多くの御助言、ご協力を頂き、また研究発表の際に分かりやすい発表について熱心に御指導いただきました大阪大学産業科学研究所 複合知能メディア 近藤一晃 氏に深く感謝申し上げます。

研究初期において級友として公私にわたり広く御世話になりました三菱電機株式会社 大澤奈々穂 氏、ソニーエリクソンモバイルコミュニケーションズ株式会社 小嶋裕一郎 氏に深く感謝申し上げます。

研究のみでなく日常生活においても御世話になりました大阪大学産業科学研究所の皆様方に感謝申し上げます.

参考文献

- [1] 安藤, 金澤, 濱崎: “地球博スーパーハイビジョンシアター”, 映像情報メディア学会誌, **4**, 59, pp. 502–505 (2005).
- [2] M. Yamaguchi, M. Murakami, T. Uchiyama, K. Ohsawa and N. Ohya: “Natural vision: Visual telecommunication based on multispectral technology”, Proc. International Display Workshops, pp. 1115–1118 (2000).
- [3] 山口: “ナチュラルビジョンの医療応用”, Medical Imaging Technology, **20**, 2, pp. 105–110 (2002).
- [4] KONICA MINOLTA: “非接触 3 次元デジタイザ KONICA MINOLTA RANGE 7”, <http://konicaminolta.jp/instruments/products/3d/range7/index.html>.
- [5] 服部: “3 次元情報復元装置及びその方法”, 特開平 2002-163639A.
- [6] HOLOGRAFIKA: “Real 3d displays”, <http://www.holografika.com/>.
- [7] 竹村: “CCD カメラ技術入門”, コロナ社 (1997).
- [8] 森: “光と照明 - 光工学の理論の実際”, 日本理工出版会 (1995).
- [9] A. j. P. Theuwissen: “Solid-State Imaging With Charge-Coupled Devices”, Kluwer Academic Print on Demand (1995).
- [10] 須川: “広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサ技術” (2006).
- [11] S. Daly: “The Visible Differences Predictor: an Algorithm for the Assessment of Image Fidelity”, chapter Digital Images and Human Vision, MA: MIT Press (1993).

- [12] J. Lubin: “A Visual Discrimination Model for Imaging System Design and Evaluation”, chapter Vision Models for Target Detection and Recognition, World Scientific Pub. Co. Inc. (1995).
- [13] C. A. Poynton: “Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces”, Morgan Kaufmann Pub (2003).
- [14] H. Ikeda, T. Ohshima, M. Tsunotani, S. Seki and T. Kimura: “Auto gain control transimpedance amplifier with low noise and wideinput dynamic range for 10 gbps optical communication systems”, Gallium Arsenide Integrated Circuit (GaAs IC) Symposium, pp. 193–196 (2000).
- [15] 米本: “CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用: 原理, 構造, 動作方式, 諸特性からシステム概要まで”, CQ 出版 (2003).
- [16] X. Qi, X. Guo and J. G. Harris: “A time-to-first spike CMOS imager”, Proc. the International Symposium on Circuits and Systems, Vol. 4, pp. 824–827 (2004).
- [17] アドバンスソリューションズ株式会社: “170dB ハイダイナミックレンジカメラの概要”, <http://www.asi.co.jp/hdrc/index.html>.
- [18] 高田, 石田, 中村, 草鹿, 岩本, 野村, 鮫島, 西田, 宮武: “対数変換 ccd ラインセンサ”, テレビジョン学会誌, **49**, 2, pp. 169–175 (1995).
- [19] X. Jin, J. Chen and Y. Qiu: “A novel wide-dynamic-range logarithmic-response bipolar junction photogate transistor for CMOS imagers”, Chinese Optics Letters, **1**, 8, pp. 468–471 (2003).
- [20] G. Meszatos, C. Li, I. Pobelov and T. Wandlowski: “Current measurements in a wide dynamic range : Applications in electrochemical nanotechnology”, Nanotechnology, **18**, 42 (2007).
- [21] H. Y. Cheng, B. Choubey and S. Collins: “A logarithmic CMOS image sensor with adjustable photo-response”, The Mediterranean Journal of Electronics and Communications, **3**, 2, pp. 40–46 (2007).

- [22] B. Choubey, H. Y. Cheng and S. Collins: “A wide dynamic range CMOS image sensor with an adjustable logarithmic response”, Proc. SPIE and IST Electronic Imaging, Vol. 6816, pp. 1–8 (2008).
- [23] M. Loose, K. Meier and J. Schemmel: “A self-calibrating single-chip CMOS camera with local logarithmic response”, IEEE Journal Solid-State Circuits, **36**, 4, pp. 586–591 (2001).
- [24] G. Storm, R. Henderson, J. E. D. Hurwitz, D. Renshaw, K. Findlater and M. Purcell: “Extended dynamic range from a combined linear-logarithmic CMOS image sensor”, IEEE Journal Solid-State Circuits, **9**, 9, pp. 2095–2106 (2006).
- [25] B. Choubey and S. Collins: “Wide dynamic range CMOS pixels with reduced dark current”, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, **56**, 1, pp. 53–60 (2007).
- [26] J. Park, M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki, Y. Wakamori and Y. Ohta: “A 142 db dynamic range CMOS image sensor with multiple exposure time signals”, Proc. Asian Solid-State Circuits Conference, pp. 85–88 (2005).
- [27] 川人: “広ダイナミックイメージセンサ”, 特願平 2004-363666 (2004).
- [28] P. M. Acosta-Serafini, I. Masaki and C. G. Sodini: “A 1/3 VGA linear wide dynamic range CMOS image sensor implemented in a predictive multiple sampling algorithm with overlapping integration intervals”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, **39**, 9, pp. 1487–1496 (2004).
- [29] D. Stoppa, M. Vatteroni, D. Covi, A. Baschirotto, A. Sartori and A. Simoni: “A 120-db dynamic range CMOS image sensor with programmable power responsivity”, IEEE Journal of Solid-State, **42**, 7, pp. 1555–1563 (2007).
- [30] V. Brajovic and T. Kanade: “A VLSI sorting image sensor: global massively parallel intensity-to-time processing for low-latency adaptive vision”, IEEE trans. Robotics and Automation, **15**, 1, pp. 67–75 (1999).

- [31] V. Brajovic: “Brightness perception, dynamic range and noise: a unifying model for adaptive image sensors”, Proc. CVPR, Vol. 2, pp. 189–196 (2004).
- [32] F. Malbet, J. W. Yu and M. Shao: “High dynamic range imaging using a deformable mirror for space colonography”, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **107**, pp. 386–398 (1995).
- [33] B. C. Madden: “Extended intensity range imaging”, Technical Report MS-CIS-93-96, University of Pennsylvania (1993).
- [34] S. Mann and R. W. Picard: “On being undigital with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures”, Proc. IS&T, pp. 442–448 (1995).
- [35] P. Debevec and J. Malik: “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs”, Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 369–378 (1997).
- [36] T. Mitsunaga and S. K. Nayar: “Radiometric self calibration”, Proc. CVPR, Vol. 1, pp. 374–380 (1999).
- [37] A. O. Akyuz and E. Reinhard: “Noise reduction in high dynamic range imaging”, Journal of Visual and Communication and Image Representation, **18**, 5, pp. 366–376 (2007).
- [38] G. Joffre, W. Puech, F. Comby and J. Joffre: “High dynamic range images from digital cameras raw data”, Proc. ACM SIGGRAPH (2005).
- [39] J. Stumpfel, A. Jones, A. Wenger, C. Tchou, T. Hawkins and P. Debevec: “Direct hdr capture of the sun and sky”, Proc. ACM SIGGRAPH, p. 50 (2004).
- [40] Y. Y. Schechner and S. K. Nayar: “Generalized mosaicing”, Proc. ICCV, Vol. 1, pp. 17–24 (2001).
- [41] M. Aggarwal and N. Ahuja: “High dynamic range panoramic imaging”, Proc. ICCV, Vol. 1, pp. 2–9 (2001).

- [42] 山田, 中野, 山本: “広ダイナミックレンジ視覚センサ”, 豊田中央研究所 R&D レビュー, **30**, 2, pp. 35–44 (1995).
- [43] S. B. Kang, M. Uyttendaele, S. Winder and R. Szeliski: “High dynamic range video”, *ACM Trans. Graph.*, **22**, 3, pp. 319–325 (2004).
- [44] M. Konishi, M. Tsugita, M. Inuiya and K. Masukane: “Video camera, imaging method using video camera, method of operating video camera, image processing apparatus and method, and solid-state electronic imaging device”, US patent 5420635 (1995).
- [45] R. J. Handy: “High dynamic range ccd detectorimager”, US patent 4623928 (1986).
- [46] R. A. Street: “High dynamic range segmented pixel sensor array”, US patent 5789737 (1998).
- [47] B. E. Bayer: “Color imaging array”, U. S. Patent 3971065 (1976).
- [48] S. K. Nayar and T. Mitsunaga: “High dynamic range imaging: Spatially varying pixel exposures”, *Proc. CVPR*, Vol. 1, pp. 472–479 (2000).
- [49] S. K. Nayar and G. Narasimhan: “Assorted pixels: Multi-sampled imaging with structural models”, *Proc. ECCV*, Vol. 4, pp. 636–652 (2002).
- [50] 光永: “SVE 方式広ダイナミックレンジ撮影技術”, 情処学 CVIM 研報, No. 147, pp. 155–162 (2005).
- [51] 斉藤: “撮像装置”, 特開平 8-37628 (1996).
- [52] R. Oi and K. Aizawa: “Wide dynamic range imaging by sensitivity adjustable cmos image sensor”, *Proc. ICIP*, Vol. 2, pp. 583–586 (2003).
- [53] 土井, 原, 見坊, 芝: “イメージセンサ”, 特開平 8-223491 (1996).
- [54] M. Aggarwal and N. Ahuja: “Split aperture imaging for high dynamic range”, *Proc. ICCV*, Vol. 2, pp. 10–17 (2001).

- [55] M. Aggarwal and N. Ahuja: “Split aperture imaging for high dynamic range”, IEEE International journal on Computer Vision, **58**, 11, pp. 7–17 (2004).
- [56] 斉藤: “電子的撮像装置”, 特開平 7-254965 (1995).
- [57] 木村: “撮像装置”, 特開平 10-69011 (1998).
- [58] S. K. Nayar and V. Branzoi: “Adaptive dynamic range imaging: Optical control of pixel exposures over space and time”, Proc. ICCV, Vol. 2, pp. 1168–1175 (2003).
- [59] C. Gao, N. Ahuja and H. Hua: “Active aperture control and sensor modulation for flexible imaging”, Proc. CVPR, pp. 1–8 (2007).
- [60] S. K. Nayar, V. Branzoi and T. Boulton: “Programmable imaging using a Digital Micromirror Array”, Proc. CVPR, Vol. 1, pp. 436–443 (2004).
- [61] シャープ株式会社: “液晶テレビアクオス T シリーズ”, <http://www.sharp.co.jp/aquos/THX/spec.html>.
- [62] セイコーエプソン株式会社: “液晶プロジェクタードリーミオ”, <http://www.epson.jp/products/dreamio/pdf/index.htm>.
- [63] パナソニック株式会社: “プラズマテレビ Viera”, <http://panasonic.jp/viera/products/pzr900/index.html>.
- [64] D. Dudley, W. Duncan and J. Slaughter: “Emerging digital micromirror device (DMD) applications” (2003). White paper.
- [65] Texas Instruments: “DLP projector high image quality”, http://www.dlp.com/projectors/superior_readability.aspx.
- [66] C. W. Tang and S. A. Vanslyke: “Organic electroluminescent diodes”, Applied Physics Letters, **51**, 12, pp. 913–915 (1987).
- [67] ソニー株式会社: “有機 EL テレビ XEL-1”, <http://www.sony.jp/products/Consumer/oel/index.html>.

- [68] S. Shen, W. Qian, J. Sub and C. Liu: “High-contrast ratio driving method for plasma display panel”, 電子情報通信学会技術研究報告, 電子ディスプレイ, 第 100 巻, pp. 453–456 (2000).
- [69] H. Seetzen, L. A. Whitehead and G. Ward: “A high dynamic range display using low and high resolution modulators”, Proc. Society for Information Display, pp. 1450–1453 (2003).
- [70] A. Pavlovych and W. Stuerzlinger: “A high-dynamic range projection system”, Proc SPIE, Vol. 5969 (2005).
- [71] R. Hoskinson and B. Stoeber: “High-dynamic range image projection using an auxiliary MEMS mirror array”, Optics Express, **16**, 10, pp. 7361–7368 (2008).
- [72] 金澤: “Yc 分離型映像信号変換装置及びそれを用いた映像表示装置”, 特開平 2007-310045 (2007).
- [73] Y. Kusakabe, M. Kanazawa, Y. Nojiri, M. Furuta and M. Yoshimura: “A yc-separation-type projector: High dynamic range with double modulation”, Journal of the SID, **16**, 2, pp. 383–391 (2008).
- [74] O. Bimber and D. Iwai: “Superimposing dynamic range”, Proceedings of SIGGRAPH Asia (2008).
- [75] K. Devlin, A. Chalmers, A. Wilkie and W. Purgathofer: “Star: Tone reproduction and physically based spectral rendering”, STARs, Eurographics, pp. 101–123 (2002).
- [76] F. Durand and J. Dorsey: “Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images”, Proc. the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 257–266 (2002).
- [77] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda: “Photographic tone reproduction for digital images”, Proc. ACM Siggraph, Vol. 21, pp. 267–276 (2002).

- [78] M. Ashikhmin: “A tone mapping algorithm for high contrast images”, Proc. Eurographics workshop on Rendering, pp. 145–156 (2002).
- [79] R. Mantiuk, K. Myszkowski and H. Seidel: “Predicting visible differences in high dynamic range images - model and its calibration”, Proc. Human Vision and Electronic Imaging X, IS&T/SPIE’s 17th Annual Symposium on Electronic Imaging, pp. 204–214 (2005).
- [80] 坂口, 樋口, 中野, 山本: “運転環境に応じた車載ディスプレイの表示法”, 電磁情報通信学会技術研究報告 EID, 電子ディスプレイ, No. 519, pp. 89–94 (1998).
- [81] D. Wang, I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: “Radiometric compensation in a projector-camera system based on the properties of human vision system”, Proc. IEEE Workshop on Projector-Camera Systems (2005).
- [82] アッシュダウン, 岡部, 佐藤: “人間の視覚特性を考慮した投影画像の光学的補正”, 電子情報通信学会論文誌, **8**, 90-D, pp. 2115–2125 (2007).
- [83] Y. Mukaigawa, T. Kakinuma and Y. Ohta: “Analytical compensation of inter-reflection for pattern projector”, Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp. 265–268 (2006).
- [84] G. Ward: “Real Pixels”, chapter Graphics Gems 2, pp. 80–83, Academic Press (1991).
- [85] “Netpbm: Pfm format discription”, <http://netpbm.sourceforge.net/doc/pfm.html>.
- [86] R. Bogart, F. Kainz and D. Hess: “OpenEXR image file format” (2003).
- [87] G. W. Larson: “LogLuv encoding for full-gamut, high-dynamic range images”, Journal of Graphics Tools, **3**, 1, pp. 15–31 (1998).
- [88] “Hdr shop”, <http://www.hdrshop.com/>.

- [89] R. Xu, S. M. Pattanaik and C. E. Hughes: “High-dynamic-range still-image encoding in JPEG 2000”, IEEE Computer Graphics and Applications, **25**, 6, pp. 57–64 (2005).
- [90] G. Ward and M. Simmons: “Subband encoding of high dynamic range imagery”, Proc. Applied Perception in Graphics and Visualization, Vol. 73, pp. 83–90 (2004).
- [91] R. Mantiuk, G. Krawczyk and K. M. and H.P. Seidel: “Perception-motivated high dynamic range video encoding”, Proc. SIGGRAPH, pp. 733–741 (2004).
- [92] D. Brown: “Close-range camera calibration”, Photogrammetric Engineering, **37**, pp. 855–866 (1971).
- [93] R. Tsai: “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses”, IEEE J. Robotics and Automation, **RA-3**, 4, pp. 323–344 (1987).
- [94] G. Wei and S. Ma: “Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments”, IEEE Trans. PAMI, **16**, 5, pp. 469–480 (1994).
- [95] Z. Zhang: “A flexible new technique for camera calibration”, IEEE Trans. PAMI, **22**, 11, pp. 1330–1334 (2000).
- [96] 清水, 太田, 金谷: “信頼性評価を備えた最適な射影変換の計算プログラム”, 情報学 CVIM 研報, No. 111, pp. 33–40 (1998).
- [97] 遠藤: “液晶パネル (LCoS) の最新技術”, 映像情報メディア学会誌, **60**, 9, pp. 1356–1359 (2006).
- [98] 佐藤: “反射型液晶パネル対応プロジェクター光学系”, 日本光学会誌, **35**, 6, pp. 318–323 (2006).
- [99] “ZEMAX: Software for optical system design”, <http://www.zemax.com/>.