

CG 実写合成における画質整合

高橋信雄

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	6
第2章 本論文の構成.....	9
第3章 CG実写合成における階調特性の整合.....	11
3.1. 本章の目的.....	11
3.2. 従来手法とその問題点.....	12
3.3. 階調特性取得方法の検討.....	14
3.4. 写真から復元したカメラ応答関数と実測値の比較.....	17
3.5. 提案手法.....	18
3.5.1 カメラ応答関数の復元.....	18
3.5.2. カメラ応答関数を用いた階調変換.....	20
3.6. 結果と考察.....	21
3.7. 本章のまとめ.....	29
第4章 CG実写合成における色特性の整合.....	31
4.1. 本章の目的.....	31
4.2. 手法.....	31
4.2.1. 画像の線形化.....	32
4.2.2. カラーマッピング.....	33
4.3. 結果.....	34
4.4. 考察.....	35
4.5. 本章のまとめ.....	36
第5章 CG実写合成におけるライトアーチファクトの整合.....	37
5.1. 本章の目的.....	37
5.2. LSF取得の概要.....	38
5.3. 方法.....	39
5.4. ブルーム現象における位置依存性の検証.....	41
5.5. 結果と考察.....	42
5.6. 本章のまとめ.....	49
第6章 等方的PSFによるCG実写合成のためのブルーム効果.....	51
6.1. 本章の目的.....	51
6.2. 分割可能ではないPSFによるブルーム効果の問題点.....	52
6.3. 方法.....	52
6.4. 結果と考察.....	53
6.5. 本章のまとめ.....	59
第7章 考察.....	61
第8章 まとめと今後の展望.....	63
参考文献.....	65
研究業績.....	69
I. 学術雑誌論文.....	69
II. 国際会議.....	69
III. 国内学会・研究会・シンポジウム等.....	69

IV. 受託研究.....	70
V. 受賞.....	70
その他の研究業績.....	70
謝辞.....	72

図の目次

図 1: ACES フレームワーク[5].....	2
図 2: 他の色空間との比較[2].....	4
図 3: IDT[10].....	5
図 4: 市販されるカラーチャート.....	12
図 5: 実写画像とCG（従来手法）の階調特性の比較.....	14
図 6: 実写画像とCG（従来手法）の階調特性の比較.....	14
図 7: 輝度計により測定した階調特性.....	15
図 8: 多段階露光で撮影した写真.....	16
図 9: 多段階露光の写真から復元されたカメラ応答関数.....	17
図 10: 写真から復元されたカメラ応答関数と実測値の比較.....	18
図 11: 文献 30 によるカメラ応答関数.....	20
図 12: 実写画像.....	21
図 13: 実写画像の撮影環境.....	22
図 14: CG 画像のシーン.....	22
図 15: 画像シーケンス 2 枚のカメラ応答関数.....	23
図 16: 画像シーケンス 3 枚のカメラ応答関数.....	24
図 17: 画像シーケンス 5 枚のカメラ応答関数.....	24
図 18: 画像シーケンス 9 枚のカメラ応答関数.....	24
図 19: カラーチャート.....	25
図 20: 従来手法によるCG実写合成.....	26
図 21: 実験に使用された撮像系のカメラ応答関数.....	26
図 22: 提案手法による実写合成.....	27
図 23: 実写画像とCG（提案手法）の階調特性の比較.....	28
図 24: 実写画像とCG（提案手法）の階調特性の比較.....	29
図 25: カラーチャート(24色).....	32
図 26: CG実写合成画像 (CGにカラーマッチング処理なし).....	34
図 27: CG実写合成画像.....	35
図 28: 実写画像のブルーム.....	38
図 29: 撮像したエッジ像.....	39
図 30: エッジの撮像における機器の配置.....	39
図 31: エッジ像のプロファイルから得たESF.....	41
図 32: ESFの隣接差分から得たLSF.....	41
図 33: ESFを取得した位置.....	42
図 34: 図 33の位置 A, B, C, DにおけるESF.....	42
図 35: CGのエッジ像（ブルーム効果あり）.....	43
図 36: CGのエッジ像（ブルーム効果なし）.....	43

図 37: 理論値と実測値の比較.....	44
図 38: CG 実写合成 露出±0EV.....	45
図 39: CG 実写合成 露出+1EV.....	46
図 40: CG 実写合成 露出+2EV.....	47
図 41: ストリーク.....	48
図 42: ストリーク除去.....	48
図 43: ブルーム効果ありの CG 実写合成画像 (ストリーク除去)	49
図 44: ブルーム効果なしの CG 実写合成画像.....	49
図 45: 従来手法によるブルームの問題	51
図 46: 従来法と提案法の違い.....	52
図 47: 算出した PSF と模擬の PSF (真値) の比較.....	53
図 48: CG 実写合成 露出±0EV.....	55
図 49: CG 実写合成 露出+1EV.....	56
図 50: CG 実写合成 露出+2EV.....	57
図 51: ブルーム画像.....	58
図 52: 提案法によるブルーム画像.....	58
図 53: ブルーム効果ありの CG 実写合成画像.....	59
図 54: ブルーム効果なしの CG 実写合成画像.....	59

表の目次

表 1 : ACES 色空間の特性[2].....	3
表 2: 各色域の原色[2].....	3
表 3: 実写画像と CG (従来手法) の画素値の比較.....	13
表 4: 画像シーケンスの撮影条件.....	23
表 5: 実写画像と CG (提案手法) の画素値の比較.....	28
表 6: 実写画像におけるカラーパッチの色.....	35
表 7: CG 画像 (カラーマッチング処理なし) の色, 及び実写画像との色差.....	36
表 8: CG 画像 (カラーマッチング処理あり) の色, 及び実写画像との色差.....	36

第1章 序論

1.1 研究背景

CGと実写の画像合成においては、2次元画像平面上のCG領域と実写領域の間に発生する視覚的不整合を取り除くための様々の技術が開発されている。CG実写領域間における光学的整合性の確保には照明情報取得技術が使われる。照明情報取得技術とは、実写撮影空間の大域照明情報を高ダイナミックレンジで取得するものである。得られた照明情報をCGの照明に利用することで、CGの陰影を実写に近似することが可能となる。これにより、CG実写間の光学的整合性が確保される。また、幾何学的整合性の確保にはカメラ姿勢情報取得技術が使われる。カメラ姿勢情報取得技術には、映像解析による推定手法と、撮影時に物理センサーを利用して取得する手法がある[1]。得られた位置姿勢情報をCGカメラの挙動に利用することで、実空間と三次元CG空間におけるカメラのマッチムーブが可能となる。また、階調特性や色空間の整合については、ACEScg規格が提案されている。

ACES (Academy Color Encoding System) は2014年に映画芸術科学アカデミーにより標準化されたカラーマネジメントのインフラストラクチャで[2]、デジタル画像ファイルの交換、カラーワークフローの管理、配信およびアーカイブ用マスター作成のための世界標準規格である。制作物の色の忠実度を高いレベルで維持することにより、カラーマネジメントを標準化し、簡素化するものとされている[3]。現在のところ、CG実写間における最も有効なカラーマッチングの手段と言える。

最近のデジタルシネマカメラは、低価格モデルであっても、シーンの光に応じた画像をRawまたはLogモードで記録することが可能である。これは、撮影された画像が、撮影されたシーンの光に対して、反転可能な既知の数学的関係を持つことを意味し、特定のモニター上で単に「良く見える」ように設計された表示優先画像とは対照的なものとなる。センサーの出力は常にシーン優先となるが、従来のビデオカメラは画像に表示変換を加え、表示優先の画像に変換してから記録していた。ACESでは、このディスプレイ変換(ACES用語ではOutput TransformまたはODT)の適用を制作パイプラインの最後尾に配置することで、画像の忠実度を高めると共に、VFXやカラーグレーディングへの柔軟な対応を可能にしている。また、Rec.709、ST2084 (HDR)、DCI (シネマ) など、異なるディスプレイをターゲットにするために、個々のシーン参照画像に様々な出力変換を適用することが可能となる。異なるカメラからのシーンリファレンス記録は、当該カメラの機能に最適化された異なるカスタムエンコーディングを行う。ログカーブはカメラのダイナミックレンジを限られた記録ビット数に収め、カラー原色は無駄なコード値を最小限にするように選択されている。これらの違いは、各カメラのコンテンツを特定のディスプレイにマッピングするために、固有の表示変換が必要であることを意味している。ACESでは、可視色域を網羅するACES2065-1という色空間と、16ビット浮動小数点を用いた符号化により、この問題を回避している。その結果、どのようなカメラで撮影した画像でも、入力変換(Input Device Transforms: IDT)と呼ばれる簡単な演算で、その空間に変換することができるようになっている。ACESからは、同じ出力変換を使用して、カメラソースに関係なく、異なるディスプレイ用に画像を

レンダリングすることができる。これは CGI (Computer Generated Imagery) でも同様で、すべての画像を同じように扱うことができる[4]。
 ACES フレームワークは、次の図1 (A) から (D) の4つのモジュールで構成されている[5]。



図 1: ACES フレームワーク [5]

(A) Input Transform (Input Device Transform, IDT と呼ばれることもある) :
 入力変換は、画像ソースを ACES の作業空間 (ACES RGB 相対露光量) に変換する。一般的なカメラの IDT は予め ACES のサポートシステムに組み込まれている一方で、製作に使用されるすべてのカメラの IDT があるかは、その都度確認する必要がある。

(B) Look Transform (Look Modification Transform, LMT と呼ばれることもある) :
 このモジュールはオプションである。ルック・変換は、特定のシーンで美的効果を得るために、あるいは番組固有のルックを維持するために、グレードの一部として挿入されることがある。通常、撮影監督は撮影現場、あるいはグレーディング・スイートでこれを行う。ここでは画像を最終出力に焼き付けることができる他、単に日常業務のために、最終的なカラーグレードの基準として使用されることもある。

(C) Output Transform (Output Device Transform, ODT と呼ばれることもある) :
 出力変換は、ACES 画像を特定のディスプレイデバイスの能力内に適合するようマッピングする。ここでは、ACES 画像を劇場投影用の DCI-P3, HDR テレビ番組用の Rec.2100, HDTV やモバイルデバイス用の Rec.709 など、特定の表示デバイスの能力に適合するようマッピングする。

(D) Interchange and Archive :
 ACES 画像は、交換やアーカイブを目的として保存することができる。

ACES では ACES2065-1 を初めとする複数の色空間が定義されている (表 1) 。
 ACES フレームワークの基本はコアとなるひとつの色空間のセットを中心に展開され、反転可能な数式が指定されているため、精度や正確さを損なうことなく変換を

適用することができる。これらの色空間のうち、SMPTE 規格[6]で定義された最初の色空間 ACES2065-1 は、パイプライン全体の主要接続空間（または PCS, 参照 [7]）として機能するため最も重要であり、フレームワークへ最初に導入されたものである。これらの色空間（ADX を除く）には下記項目が共通する。

- ・ RGB モデルに基づく
- ・ シーン参照型
- ・ 有効白色点が D60 標準光源（6000K の調整色温度）
- ・ 色域が AP0 と AP1（“ACES Primaries” #0 と #1）という 2 セットの原色のいずれかで定義される
- ・ 色度が表 2 で報告され、他の色空間との比較が図 2 のとおり示されている

ここで重要なことは、ACES はシーンに応じた広色域の色空間であるため、決してディスプレイで直接見ることを想定していないということである。フレームワークでは、従来の映画製作のように、カラーパイプラインの上で、出力直前に色変換を行う必要がある。AP0 色域（図 2(a)参照）は、CIE XYZ や CIE RGB[8]と同様に、CIE 1931 標準観測者色度図全体を囲む最小の三角形と定義されており、人間の目が知覚できるすべての色刺激がこの色域で表現される。このフレームワークの選択により、今後キャプチャやディスプレイの性能が向上しても、ACES 測色で保存された資産の画像コンテンツは将来にわたって保証される。 [2]

表 1 : ACES 色空間の特性[2]

	ACES2065-1	ACEScg	ACEScc/ACESct	ACESproxy	ADX
primaries	AP0	AP1	AP1	AP1	APD
white-point	D60	D60	D60	D60	-Status-M
gamma	1.0	1.0	\log_{cc}^{ACES}	\log_{sc}^{ACES}	\log_{10}
arithmetic	floats 16b	floats 16/32b	floats 16/32b	int. 10/12b	int. 10/16b
CV ranges:	Full	Full	Full	SDL-legal	Full
legal (IRE)	[-65504.0, 65504.0]	same ¹	[-0.358447, 65504.0] ²	[64, 940] ³	[0, 65535] ⁴
±6.5 EV	[-0.0019887, 16.2917]	same ¹	[0.042584, 0.78459] ²	[101, 751] ³	— ⁵
18%, 100% grey	0.180053711, 1.	same ¹	0.4135884, 0.5579	426, 550 ³	— ⁵
Purpose	file interchange; mastering; archival	CGI; compositing	color grading	real-time video transport only	film scans
Specification	[1,48,61]	[49]	[50]/[52]	[53]	[54,62,63]

Note: ¹ ACEScg has the same full/legal ranges and 18%-grey/100%-white CVs as ACES2065-1. ² This is for ACEScc only; ACESct uses legal range [0.072906, +∞] and ±6.5 EV range [0.093867, 0.78459].
³ These are 10-bit CVs; The full range/18%-grey/100%-white 12-bit CVs are [256, 3760], 1705 and 2200.
⁴ This is for the 16-bits variant; the 10-bits has [0, 1023]. ⁵ ADX has no set CVs for certain EVs.

表 2: 各色域の原色[2]

Gamut Name	Red		Green		Blue		White-Point	
AP0	0.7347	0.2653	0.0	1.0	0.0001	-0.0770	D60	0.32168 0.33767
AP1	0.7130	0.2930	0.1650	0.8300	0.1280	0.0440	D60	0.32168 0.33767
sRGB/BT.709	0.6400	0.3200	0.3000	0.6000	0.1500	0.0600	D65	0.31270 0.32900
ROMM RGB	0.7347	0.2653	0.3000	0.6000	0.0366	0.0001	D50	0.34567 0.35850
CIE RGB	0.7347	0.2653	0.2738	0.7174	0.1666	0.0089	E	0.33333 0.3333
ARRI W.G.	0.6840	0.3130	0.2210	0.8480	0.0861	-0.1020	D65	0.31270 0.32900
DCI P3	0.6800	0.3200	0.2650	0.6900	0.1500	0.0600	DCI	0.31400 0.35105
BT.2100/2020	0.7080	0.2920	0.1700	0.7970	0.1310	0.0460	D65	0.31270 0.32900

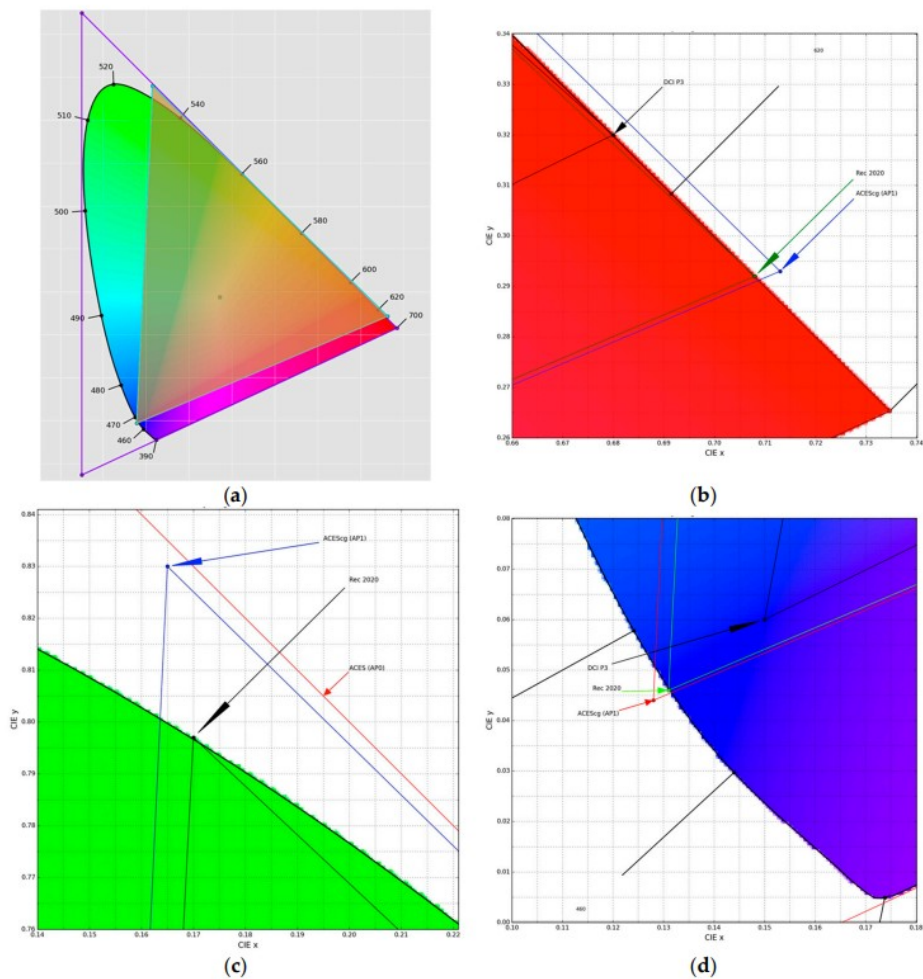


図 2: 他の色空間との比較[2]

ACES ワークフローにおける CG 実写合成では、色空間として ACEScg が用いられる。一般的な色彩学は、人間の目が光に反応する仕組みに基づいている。この人間の知覚モデルは、三刺激反応 (tristimulus response) と呼ばれる。ACES の色彩学は、このモデルに基づいている。一方、CGI (コンピュータ・ジェネレーテッド・イメージ) は、表示画像を構成する RGB (レッド、グリーン、ブルー) 成分の扱いに関して、異なる特性を持っている。CGI における RGB の基本値は、シーン内のオブジェクトから反射した光の割合のみを表している。ACES2065-1 エンコーディングの初期の研究では、既存の CGI ツールはこの広大な色空間での作業が困難で、レンダリング画像に好ましくない歪みが生じることが判明した。そこで、既存のツールがより正確な結果を得られるよう、CGI に特化した ACES 作業空間-ACEScg-が作られた。ACEScg の色域は、新たに登場したテレビ規格「UHDTV」の色空間である Rec.2020 よりわずかに広い程度であるが、それでも DCI-P3 や Rec.709 の全色を包

含している[9].

カメラ独自の色空間を ACES の共通色空間に変換するためには, Input Device Transform (IDT) が必要となる. ACES 準拠を表明しているカメラメーカーは, 自社で設計した IDT を公開している. それらの IDT を利用して変換を行うことにより, 実写画像はカメラに依存しない色空間となり, ACES ワークフローで CG 実写合成作業を行うことができるようになる. IDT はカメラの Log スペースからリニアに変換するトーンカーブの変換と, 色空間の原色をカメラの原色から ACES の原色に変換する原色変換の 2 パートから構成されている[10].

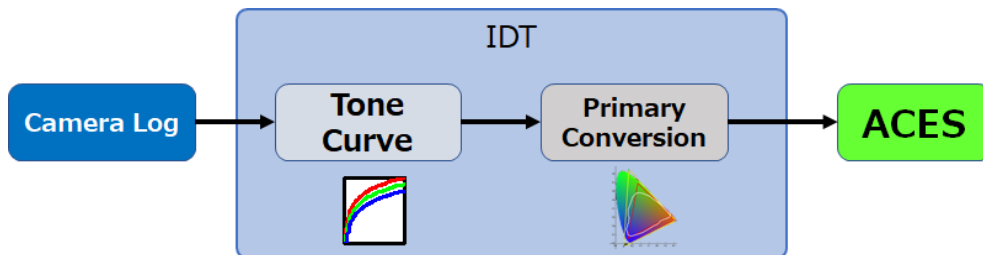


図 3: IDT[10]

Log のコードバリューをリニアに変換するトーンカーブ (通常は RGB 共通), Log の原色を ACES 原色に変換する 3x3 マトリクス, が最もシンプルな IDT の構成となる. 下記は CTL というスクリプト言語で書かれた IDT の一例である[10].

```
float normalizedLogCToRelativeExposure(float x) {
    if (x > 0.149659)
        return (pow(10,(x - 0.385537) / 0.247189) - 0.052272) / 5.555556;
    else
        return (x - 0.092809) / 5.367650;
}

void main
(
    input varying float rIn,
    input varying float gIn,
    input varying float bIn,
    input varying float aIn,
    output varying float rOut,
    output varying float gOut,
    output varying float bOut,
    output varying float aOut)
{
```

```

float r_lin = "normalizedLogCToRelativeExposure(rIn);
float g_lin = normalizedLogCToRelativeExposure(gIn);
float b_lin = normalizedLogCToRelativeExposure(bIn);

rOut = r_lin * 0.680206 + g_lin * 0.236137 + b_lin * 0.083658;
gOut = r_lin * 0.085415 + g_lin * 1.017471 + b_lin * -0.102886;
bOut = r_lin * 0.002057 + g_lin * -0.062563 + b_lin * 1.060506;
aOut = 1.0;
}

```

コード 1.1: AMPAS が提供している ARRI LogC の IDT [10]

上記スクリプトでは、最初に `normalizedLogCToRelativeExposure` 関数で Log からリニアへの変換を行い、最後に 3×3 マトリクスで ACES への変換を行っている。この構成であれば逆変換も容易なので、利便性にも優れていると言える。しかし、現実のカメラは、分光感度が理想的ではなく、誤差を持っている。また、1つの 3×3 マトリクスでは、非線形な誤差を除去することができない。また、そもそも IDT が提供されていないカメラも数多く存在する [10]。そのため、現場が使用するカメラによっては、ACES ワークフローを選択することができない。さらに、ACES ワークフローはカラーマネジメントを簡素化する一方で、画像に複数回の変換を行うため、制作パイプライン自体は煩雑となる。色空間の管理は厳密に行う必要があり、従来のワークフローと比較して、工程管理に要する時間コストは増す傾向にある。そのため、ある程度の規模を持つ制作現場でないと ACES 導入のメリットは薄い。

本研究では、実写画像をシーン優先画像に変換せず、ビデオカメラが記録する表示優先の画像をそのまま使い、階調特性、色特性を整合させる手法について提案する。これは、規模の小さい制作現場においても、CG 実写合成の階調特性、色特性を高い精度で整合させることが可能となる。また、制作パイプラインも単純化され、工程管理に要する時間コストを抑えることができる。さらに本研究では、実写画像を基に、CG のブルームを描画する手法について提案する。これにより、CG と実写のライトアーチファクトは質感が近付き、CG 実写合成の整合性を更に向上させることができる。これら提案手法では、カメラの階調特性や色特性、アーチファクトの特性を用いて CG 画像をフォトリアルに加工するため、実写を撮影したカメラにマッチした、シームレスな合成が可能となる。

1.2 研究目的

本研究の目的は CG 実写合成における画質の整合である。CG 画像と実写画像をひとつの画像に合成すると、双方の画像領域間において、画質の差異に起因する視覚的な不整合を生じる。実写画像の画質を決定する代表的な物理要因としては、コントラスト（感度、ダイナミックレンジを含む入出力特性）や色（彩度、ホワイトバ

ランス)に加え, 撮像系内部で発生するライトアーチファクト等が挙げられる. CG制作の現場では, トーンマッピングやカラーマッピング, 2D フィルタリング等を用いて, CGの画質を実写と近似するための画像処理が行われる. しかしこうした手動調整は, 作業者の視覚的判断のみに依存するため, 合成画像から画質の視覚的不整合を充分に取り除くことは難しい. そこで, 本研究では, 撮像系の画質を定量的に取得し, そのデータに基づいてCGに画像処理を施す手法の開発を目的とする. これにより, 両画像の画質は, 階調, 色, ライトアーチファクトにおいて近似し, CG実写合成画像から画質の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる.

本稿でははじめに, CG画像と実写画像の階調特性を整合させる手法について提案する. CG実写合成ではCGと実写, 双方の照明を整合させるため, 実写の光環境を記録した放射照度マップによりCGシーンをライティングする. しかし, この照明手法で双方の光環境を似せた場合でも尚, 実写画像は非線形な階調特性を持つため, シーンリニアな階調のCG画像とは整合しない.

本稿の提案手法では, 撮像系のカメラ応答関数を復元し, それをCG画像の階調変換に応用する. この変換により, CG実写合成における両画像の階調は高い精度で近似するめ, 階調特性の違いに起因する視覚的な不整合を合成画像から充分に取り除くことができる. また提案手法に必要となる撮像系のカメラ応答関数は, 多段階露光の実写画像から復元することができる. 当該手法の扱いは極めて簡便であり, 輝度計や撮影スタジオ等の特殊な機器や環境も必要としないため, 制作現場における既存の作業フローへ容易に組み込むことができる.

つぎに, CG実写合成の色特性を整合させる手法について提案する. 通常, CG画像と実写画像をひとつの画像に合成すると, 色特性の差異に起因する視覚的不整合が生じる. 一般にCG制作の現場では実写の撮影時に, グレーカード等, 単色のリファレンスを撮影し, その画素値を基準にCGの光源色を調整する. しかしこの手法は, 撮像系の持つ色特性が考慮されないため, 合成画像から視覚的な不整合を充分に取り除くことは難しい. これに対し, 本研究では, 実写の撮影時に色リファレンスとしてカラーチャートを撮影し, その画素値に基づき, CG画像にカラーマッピングを施す手法を提案する. これにより, 両画像は全色域において色が近似し, CG実写合成画像から色調の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる.

つぎに, CG実写合成のライトアーチファクトを整合させる手法について提案する. カメラ内部で発生するアーチファクトとして最も支配的な現象はブルームである. 市販されるCGソフトやレンダラーにおいても, この現象を模す機能を実装するものは数多く存在すが, これらは個々のカメラが持つ固有のブルームを考慮したもではないため, CG実写合成を行うと, そのアーチファクトに視覚的な不整合を生じる.

本稿では, CG実写合成のアーチファクトの視覚的整合性を向上させるため, 簡易測定したカメラ point spread function (PSF)^{注1)}に基づくブルーム効果の表現手法について検討した. はじめに撮像したエッジ像からカメラ固有の edge spread function (ESF)^{注2)}を取得し, そこから得られた line spread function (LSF)^{注3)}によ

り PSF を算出した。その後、CG 画像と PSF の畳み込みによりブルーム効果を加え、画質を評価した。結果として、PSF に基づくブルームはカメラで撮像した実写のブルームと画素値がほぼ一致し、当該手法が CG 実写合成の視覚的整合性を向上させるうえで有効であることがわかった。

第2章 本論文の構成

CG実写合成は1990年代、映画製作に導入されると、その後ビデオゲーム、建築の分野へと広がり、現在はVR、ARへの応用も盛んである。こうした需要拡大に伴い、CG実写合成は、個人事業者を含む、小規模事業者にまでその裾野が広がりつつある。また、計算機の進歩に伴う消費者ニーズの高度化により、CG実写合成には更なるフォトリアリスティックな表現が求められている。こうした中、照明情報取得技術や、カメラ位置姿勢推定技術については、CG分野において十分な研究・開発が成され、作業者の習熟度に依存せず、高品質な表現を可能とする制作手法が確立されている。しかし、二次元の合成技術に関する研究は未だ僅少で、フォトリアリスティックなCG実写合成を実現する決定的な手法は確立していない。そのため、現場での実作業には習熟度の高い作業者が求められるが、小規模事業者にとって、そうした人材の確保は難しいのが実態である。そこで、本研究では実写画像から得た実測値を根拠に、CG画像の画質を撮像系に近づけ、フォトリアルなCG実写合成を実現する手法を提案する。これらは、作業者の視覚的判断や習熟度に依存することなく、安定的に高品質な結果が得られるのに加え、特殊な機器や環境を必要としないため、小規模な制作現場においても充分実行可能な手法と言える。

ここであらためて本研究の目的を確認しておく。CG画像と実写画像をひとつの画像に合成すると、双方の画像領域間において、画質の差異に起因する視覚的な不整合を生じる。ここで実写画像の画質とは、階調特性、色特性、ライトアーチファクトを意味する。これら画質の差異は多くの場合、CG実写合成の結果に視覚的な不整合を生じるため、鑑賞者が合成画像から空間的な一体性を感じることは難しい。生成プロセスの異なる、CGと実写の合成画像に空間的な一体性を与えるには、画質の構成要素となる、階調特性、色特性、アーチファクトを双方の画像で統一することが必要となる。CG制作の現場では、トーンマッピングやカラーマッピング、2Dフィルタリング等を用いて、CGの画質を実写と近似するための画像処理が行われる。しかしこれらの処理は、作業者の手動調整に依存するのが一般的である。作業者は表示装置を見ながら、双方の画質が馴染むよう、視覚的判断に基づきこれを調整する。そのため、画像合成の結果には、作業者の習熟度に依存するばらつきを生じるのに加え、双方の画質から視覚的な不整合を充分に取り除くことは難しい。本研究では、実写画像から階調特性、色特性、アーチファクトの特性を取得し、そのデータに基づきCGに画像処理を施す手法を提案する。これにより、CG画像の画質は実写画像と近づくため、CG実写合成画像から画質の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる。

第3章では、CG画像と実写画像の階調特性を整合させる手法について提案する。CG画像と実写画像をひとつの画像に合成すると、両画像の階調特性の違いから、画像領域間に視覚的な不整合を生じる。そのため、一般にCG制作の現場では実写の撮影時に、18パーセントグレーカード等のリファレンスを撮影し、その画素値を

基準に CG 画像の輝度を調整する。しかしこの手法は、両画像が持つビット深度の限られた階調でしか画素値の一致が保証されないため、合成画像から視覚的な不整合を充分に取り除くことはできない。本手法では、露光量の異なる複数の実写画像から復元したカメラ応答関数を CG 画像の階調変換に応用する手法を提案する。これにより、両画像はビット深度の全域で値が近似し、階調特性の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる。

第4章では、CG 実写合成の色特性を整合させる手法について提案する。CG 画像と実写画像をひとつの画像に合成すると、双方の画像領域間において、色特性の差異に起因する視覚的な不整合が生じる。一般に CG 制作の現場では実写の撮影時に、グレーカード等、単色のリファレンスを撮影し、その画素値を基準に CG の光源色を調整する。しかしこの手法は、撮像系の持つ色特性が考慮されないため、合成画像から視覚的な不整合を充分に取り除くことは難しい。本手法では、実写の撮影時に色リファレンスとしてカラーチャートを撮影し、その画素値に基づいて、CG 画像にカラーマッピングを施す手法を提案する。これにより、両画像の色は全色域において近似し、CG 実写合成画像から色調の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる。

第5章、第6章では、CG 実写合成のライトアーチファクトを整合させる手法について提案する。本手法では、CG 実写合成の視覚的整合性を向上させるため、簡易測定したカメラ PSF に基づくライトアーチファクトの表現手法について検討する。はじめに撮像したエッジ像からカメラ固有の edge spread function (ESF) を取得し、そこから得られた線像強度分布 (line spread function : LSF) により点像強度分布 (point spread function : PSF) を算出する。その後、CG 画像と PSF の畳み込みによりレンズアーチファクトを加える。結果として、PSF の 2D フィルタに基づく CG 画像のレンズアーチファクトは、カメラで撮像した実写のレンズアーチファクトと画素値がほぼ一致し、CG 実写合成の視覚的整合性を向上させることが可能となる。

提案する手法では、実写画像をシーン優先画像に変換せず、ビデオカメラが記録する表示優先の画像をそのまま使い、階調変換、色変換を行う。これは、ACES ワークフローを導入できない、規模の小さな制作現場においても、CG 実写合成の階調整合、色整合を可能とする。また、これらの手法では、制作パイプラインも単純化されるため、工程管理に要する時間コストを抑えることができる。これらの提案手法では、撮像した実写画像を基にその階調特性や色特性、アーチファクトの特性を取得するため、どのようなカメラでも実行が可能となる。これは、小規模な現場だけでなく、大規模な ACES ワークフローによる制作においてもメリットとなる。IDT が提供されないカメラを使用する場合でも、現場は独自に IDT を開発し、画像を ACES の共通色空間に変換することができる。

本研究で提案した画質整合の手法は、階調整合、色整合、アーチファクト整合の三つとなるが、いずれも作業者の習熟度に依存しない安定的な結果が得られる。これらの手法はその手順が極めて簡便で、作業付加が小さく、特殊な機器や環境も必要としない。このため、本手法を既存の制作フローへ組み込むことは容易であり、十分な実行可能性を有する提案と言える。

第3章 CG実写合成における階調特性の整合

CG画像と実写画像をひとつの画像に合成すると、両画像の階調特性の違いから、画像領域間に視覚的な不整合を生じる。そのため、一般にCG制作の現場では実写の撮影時に、18パーセントグレーカード等のリファレンスを撮影し、その画素値を基準にCG画像の輝度を調整する。しかしこの手法は、両画像が持つビット深度の限られた階調でしか画素値の一致が保証されないため、合成画像から視覚的な不整合を充分に取り除くことはできない。

本章では、露光量の異なる複数の実写画像から復元したカメラ応答関数をCG画像の階調変換に応用する手法を提案する。これにより、両画像はビット深度の全域で値が近似し、階調特性の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる。

3.1. 本章の目的

CG実写合成ではCGと実写、双方の照明を整合させるため、実写の光環境を記録した放射照度マップによりCGシーンをライティングする。しかし、この照明手法で双方の光環境を似せた場合でも尚、実写画像は非線形な階調特性を持つため、シーンリニアな階調のCG画像とは整合しない。

一般にCG画像と実写画像は異なる階調特性を有する。CG画像を生成するレンダリングプロセスの多くは、被写体の輝度を線形変換し、画素値として画像に記録する。一方、実写画像を取得する撮像系の多くは、被写体の輝度を非線形に階調変換し、画素値として画像に記録する。こうした2種類の画像をひとつの画像に合成すると、互いの階調特性の違いにより視覚的な不整合を生じる。

合成画像においてCGと実写、両領域間の視覚的な整合性を確保するには、双方の階調特性を一致させる必要がある。そのため、CG制作の現場ではグレーカードやグレースケール等、既知の反射率を持つ撮影用リファレンスが使われる。実写画像の撮影の際に、リファレンスを撮影し、同様にCG画像の制作の際にも、同反射率のリファレンスをレンダリングする。双方の画素値が一致するよう、CG画像の輝度を調整することで階調を近づける。しかし、この手法の場合、互いの画素値が一致するのはリファレンスが持つ輝度においてのみで、それ以外の輝度領域におけるマッチングの精度は保証されない。そのため、合成画像から視覚的な不整合を充分に取り除くことは難しく、フォトリアルなCG実写合成を制作するうえでの大きな障害となっている。

本章では、撮像系のカメラ応答関数をCG画像の階調変換に応用する手法を提案する。これにより、CG実写合成における両画像の階調は高い精度で近似されるため、階調特性の違いに起因する視覚的な不整合を合成画像から充分に取り除くことができる。また提案手法に必要となる撮像系のカメラ応答関数は、多段階露光の実

写画像から復元することができる。当該手法の扱いは極めて簡便であり、輝度計や撮影スタジオ等の特殊な機器や環境も必要としないため、制作現場における既存の作業フローへ容易に組み込むことができる。

3.2. 従来手法とその問題点

前述のとおり、CG画像と実写画像ではその階調特性が異なる。CG画像の場合、その画素値は被写体の輝度と比例するが、実写画像の場合、画素値が被写体の輝度と比例することは殆どない。つまり多くの撮像素子は、輝度を画素値に変換する手順において、未知の非線形関数を有する。

フィルムカメラの場合、この非線形性は現像やスキャン、デジタル化など、画像取得までのすべての工程における非線形関数の合成として生じる。デジタルカメラの場合、撮像素子により集められる電荷は、被写体の輝度と比例するが、フィルムの反応特性の模擬や、表示装置の反応特性の補正などにより非線形性を生じる。こうしたCG画像と実写画像における階調特性の違いは、両者を合成する際、視覚的な不整合として画像に現れる。

シームレスな合成をおこなうには、両者の階調特性をそろえるための階調変換が必要となる。前章で述べたとおり、通常、こうした階調変換では、反射率が既知の撮影用リファレンスが使われる。しかしこの手法の場合、両画像の輝度はリファレンスの画素値において一致するが、それ以外の輝度領域における整合は保証されない。表3は実写画像(8bit)と前述の従来手法により階調変換したCGのグレースケールが持つ画素値(8bit)を比較したものである。

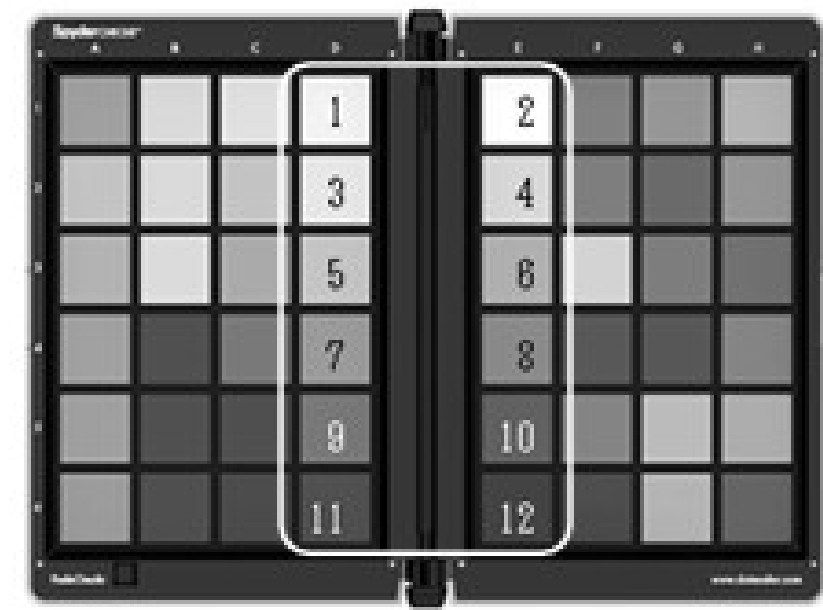


図4: 市販されるカラーチャート

(中央の12段階のグレースケールを使用)

表3にある実写画像の画素値はグレースケール（図4）をスチールカメラ（NIKON D90）で撮像し、その画像からサンプリングした値である。カメラの設定はISO-200, f/5.6, 1/2秒となる。CG画像の画素値は、同グレースケールをCGモデルで再現したものからサンプリングした。CGのライティングは平行光源を使い、画像の高輝度領域がクリッピングされない程度にライト強度を調節した。

表3: 実写画像とCG（従来手法）の画素値の比較

パッチ	名称	実写	CG (階調変換済み)
1	Card White	209	223
2	5% Gray	204	215
3	10% Gray	193	205
4	20% Gray	179	182
5	30% Gray	164	163
6	40% Gray	146	143
7	50% Gray	124	124
8	60% Gray	102	108
9	70% Gray	73	89
10	80% Gray	48	71
11	90% Gray	26	53
12	Card Black	14	35

CG画像は、パッチ7（50% Gray）の画素値が、実写画像の同パッチの画素値と一致するよう輝度をスケールすることで階調変換した。

図5は、両画像のサンプル値をグラデーションパターンにより示している。上段が実写画像のもの、下段が上述の手順で階調変換したCG画像のものとなる。この図から、両画像はパッチ7付近を除く、全ての階調において輝度の異なることがわかる。また、同サンプル値をグラフ（図6）で比較すると、暗部と明部の両方で画素値が大きく乖離していることを確認できる。この階調特性の違いは実際のCG実写合成において視覚的な不整合として画像に現れる。

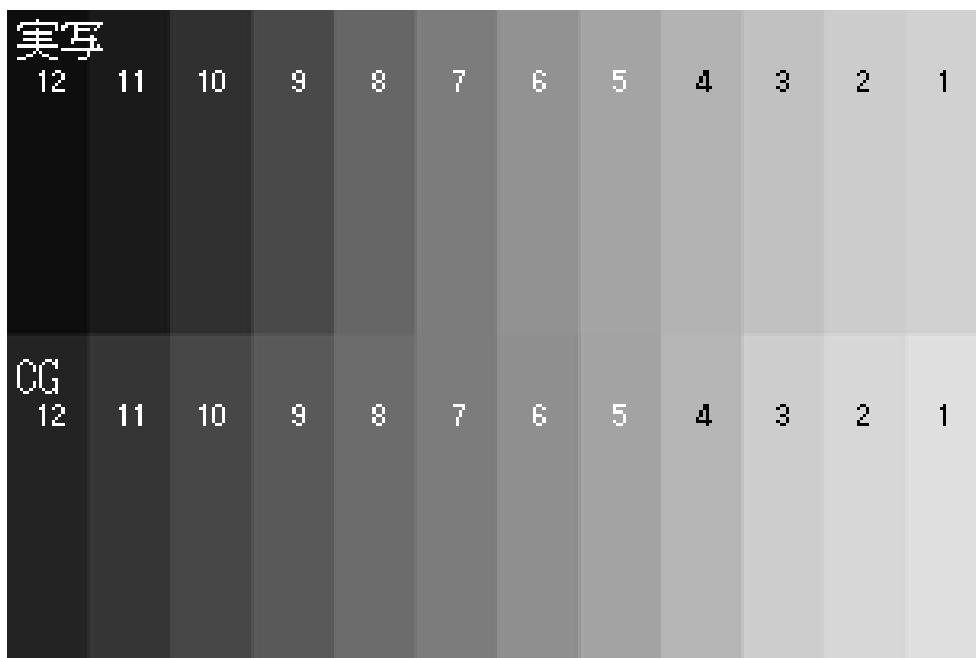


図 5: 実写画像と CG (従来手法) の階調特性の比較
 (上段: 実写 下段: 階調変換された CG)

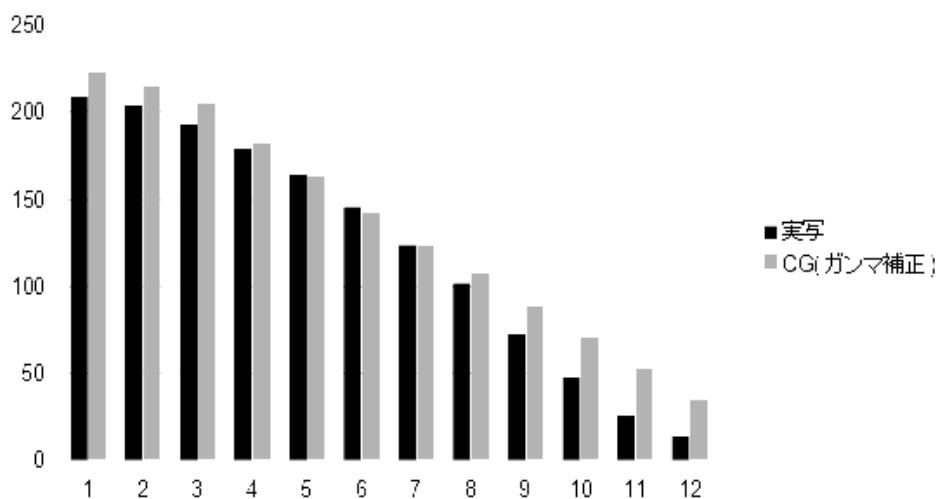


図 6: 実写画像と CG (従来手法) の階調特性の比較
 (横軸:パッチ, 縦軸:画素値)

3.3. 階調特性取得方法の検討

提案手法による CG 画像の階調変換には、撮像系の階調特性が必要となる。この階調特性は医療放射線分野において特性曲線と呼ばれ、また、コンピュータビジョ

ンの分野においてカメラ応答関数と呼ばれる。

一般に、撮像系の階調特性は輝度計を使った測定により得られる。グレーカードなどの反射板を複数の異なる照度で撮像し、同時にそれらの輝度を測定する。得られた画素値と輝度の2変量データの内挿により階調特性を得る(図7)。

この方法では測定対象となる反射板の輝度分布を均一に保つよう慎重に照度を変更しなければならない。また、一回の照度変更に対して、ひとつの2次元データセット(画素値と輝度)しか得られないため、撮像系の持つビット深度の範囲を、ニーポイントのようなディテールを含め高精度で計測する場合、その手間は相当量となる。照度変更の回数を減らす手段として、異なる反射率のパッチを複数持つグレースケール等を使用する方法がある。この場合、一回の撮影で複数の画素値を取得できる。しかしこの方法では、市販されるグレースケール等の規定反射率の精度のばらつきに起因する誤差を生じる可能性がある。また、これらふたつの方法では輝度計、照明装置、撮影スタジオなどの特殊な機器や環境が必要となる。

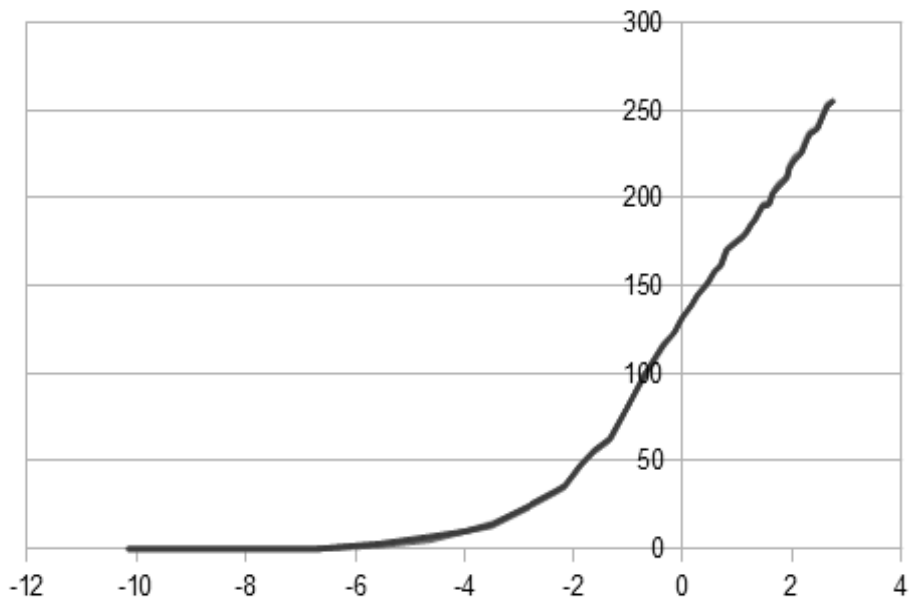


図 7: 輝度計により測定した階調特性

(横軸:EV 値, 縦軸:画素値)

撮像系の階調特性を得るには、この輝度計と反射板を用いた実測以外にも、距離法[11]、ND フィルタ法[12][13]、タイムスケール法などある。これらは医療放射線分野で X 線フィルムや X 線検出器の特性曲線の測定(センシトメトリー)に広く使われている方法であるが、デジタルカメラのような一般の撮像系のカメラ応答関数取得にも応用できる。

距離法は、距離の逆二乗則を用いて X 線量を変える方法である[14][15][16][17][18][19]。このセンシトメトリーは、医療放射線分野における強度スケールセンシト

メトリーの中でも、標準法として考えられている[20][21][22][23][24][25].しかし、装置が大きくなり、病院のような臨床の場では簡単に実行できない[24]. 撮像系のカメラ応答関数取得に応用する場合も、装置の規模が大きくなるのは同様で、照明装置や撮影スタジオ等の設備が必要となるため、簡単には実行できない.

ND フィルタ法はフィルタの濃度を変化させることで露光量を変化させ、得られた画素値の分布曲線をつなぎ合わせることで階調特性を得る. このセンシトメトリーは、距離を全く変えられない環境においても採用できる方法である[25]. 従って、撮影スタジオ等の設備は必要としない. しかし、ND フィルタ法による測定では、フィルタの既定濃度のばらつきに起因する誤差を生じる可能性がある[13]. また、露光量の段階がフィルタの濃度に依存するため、カメラ応答関数の復元に必要十分な数のデータを得ることは難しい.

タイムスケール法は撮影時間を変化させて、相対露光量を決定する方法である[26]. X線フィルムを使わないDRシステムの場合、相反則不軌が起こらないため、このセンシトメトリーは精度よく行えることが分かっている[27]. 一般の撮像系においても、フィルムを使わないデジタルカメラであれば、同様に実行可能な方法である. しかし、露光量の段階が機器の持つ露光時間設定の仕様に依存するため、カメラ応答関数の取得に必要十分な数のデータを得ることは難しい.

文献[28]による方法では、露出量の異なる複数の写真(図8)からカメラ応答関数を復元する. この方法は手間が少なく、輝度計や照明装置などの特殊な機器も必要としない. また、階調特性を高精度に復元できる.

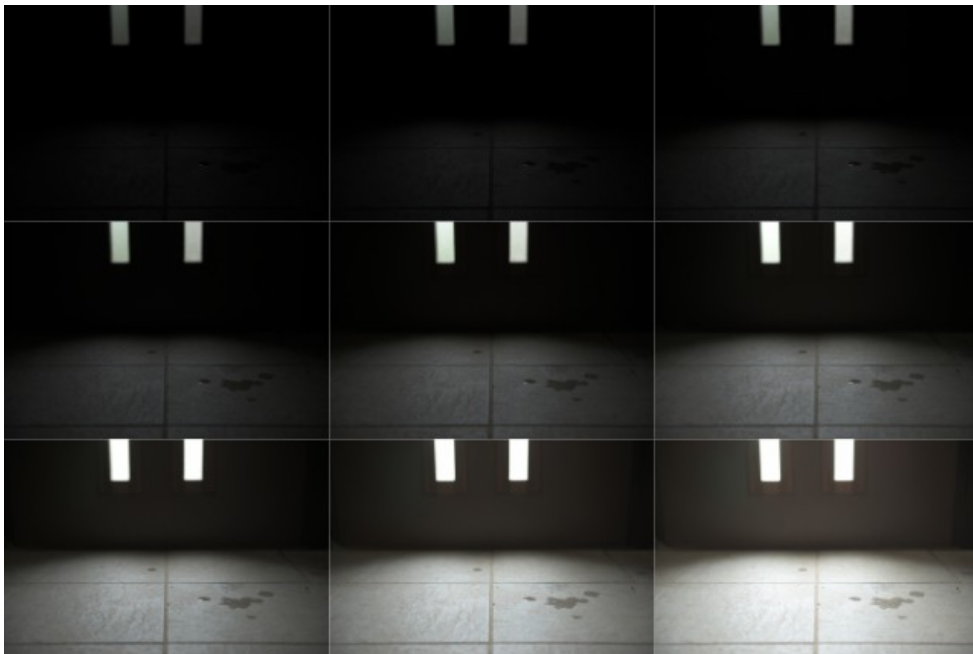


図 8: 多段階露光で撮影した写真

(露出の異なる複数の画像から撮像系のカメラ応答関数を復元する.)

3.4. 写真から復元したカメラ応答関数と実測値の比較

図9は文献[28]の方法により、多段階露光の写真から復元した撮像系のカメラ応答関数である。

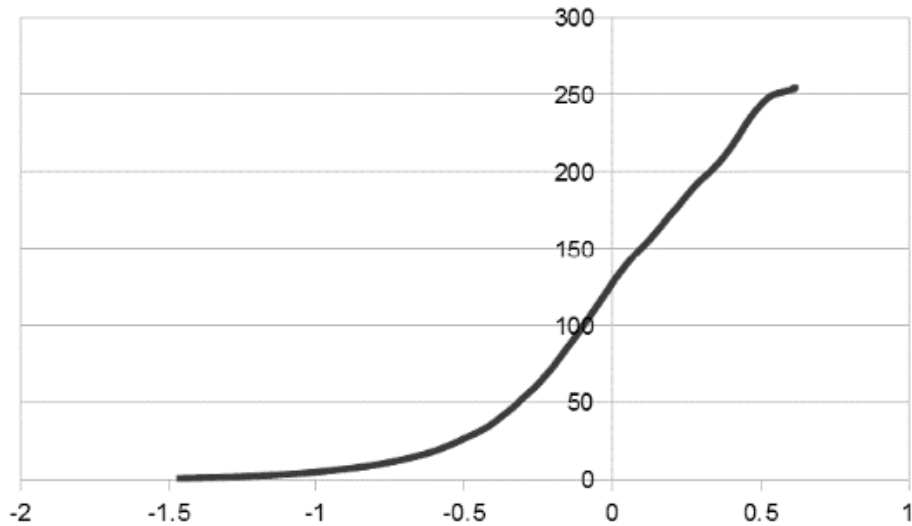


図9: 多段階露光の写真から復元されたカメラ応答関数

(横軸:EV 値, 縦軸:画素値)

写真から復元されたカメラ応答関数と前章で述べた輝度計による実測値をグラフで比較した。横軸をEV値(露光量), 縦軸を画素値とする片対数グラフに両者をプロットしたところ, ふたつの線はほぼ重なり, 良い近似がえられた(図10)。ここで, 輝度計の実測により得られた値は輝度(Lv)であり, 写真から復元されたカメラ応答関数は相対値である。両者を直接は比較できないため, 実測値の横軸をスケールし, 両者の直線部分が重なるようカーブを調整した。

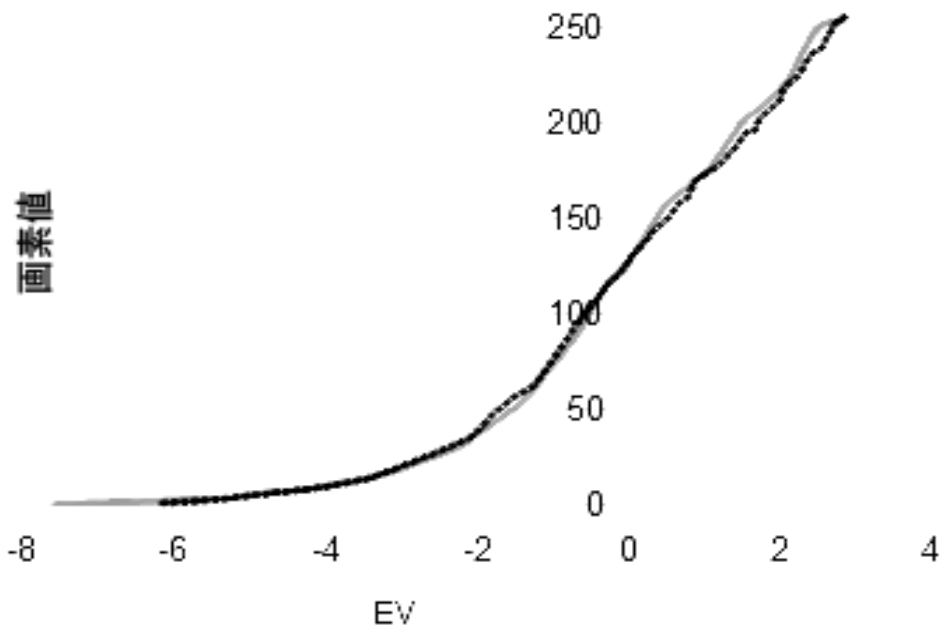


図 10: 写真から復元されたカメラ応答関数と実測値の比較
(実線: 写真から復元されたカメラ応答関数, 破線: 実測値)

3.5. 提案手法

提案手法でははじめに, 多段階露光による複数の写真から, R, G, B, 3チャンネル平均 (被写体がグレーの場合, 1チャンネルで可) のカメラ応答関数を復元する. 次に, 得られたカメラ応答関数でCG画像を階調変換し, 実写画像の階調特性を近似する. 本章では, 提案手法の具体的な手順について述べる.

3.5.1 カメラ応答関数の復元

文献[28]によるカメラ応答関数の復元は, 写真からハイダイナミックレンジ輝度マップを復元する過程において行われる. 露出量の異なる複数の写真(図8)を用いて, 露光量と画素値の相互性を仮定し, 撮像プロセスにおけるカメラ応答関数を復元する. この方法は良く知られており, 文献18で詳しく説明されているので簡単に述べる.

このアルゴリズムの入力となるのは, 同じ視点から,異なる既知の露光時間 Δt_j で撮像された複数のデジタル写真である. これら複数の写真を撮像する時, シーンが静的で, 光の変化も微小であれば, 各写真の画素 i における撮像素子の照度 E_i は一定であると仮定できる. i を画素の空間的なインデックス, j を露光時間 Δt_j のインデックス, その画素における輝度値を Z_{ij} とすると, 撮像素子における露光量と画素値の対応関係は次のようになる.

$$Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j) \quad (1)$$

関数 $g = \ln f^{-1}$ と定義すると、次のような一組の方程式が得られる。

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (2)$$

この一組の方程式における、 Z_{ij} と Δt_j は既知であり、照度 E_i と関数 g は未知である。また、 g は滑らかで単調だと仮定する。アルゴリズムの目的は、最小二乗誤差で、式(2)から生じる一組の方程式を最もよく満たす関数 g と照度 E_i を復元することである。 Z_{min} と Z_{max} を最小と最大の画素値（整数）、 N を画素数、 p を写真の数とすると、これは次の二次目的関数を最小化する $g(z)$ の($Z_{min}+1$ から Z_{max} の領域における)値と $\ln E_i$ の N 個の値を見つける問題として定式化される。

$$z := Z_{ij}$$

$$o = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^p \left\{ \omega(Z_{ij}) \left[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j \right] \right\}^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} \left[\omega(z) g''(z) \right]^2 \quad (3)$$

ここで、滑らかさとフィッティングの項を強調する重み付け関数 $\omega(z)$ は次のようになる。

$$\omega(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{for } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & \text{for } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases} \quad (4)$$

スカラー λ は平滑化項を重みづけしており、予想されるノイズの量に応じて適切に選択される必要がある。 o を最小化することは簡単な線形最小二乗問題となる。また、過決定された一次方程式系は、特異値分解(SVD)法を用いて解くことができる[28]

この文献[28]による方法は、実写画像のビット深度が持つ全ての範囲において詳細にカメラ応答関数を復元できる。また、輝度計や照明装置などの特殊な機器を必要としないため手間が少ない。さらに、カラーチャート等の撮影用リファレンスも使用しないため、結果がそれらの規定反射率の精度に依存することもない。

コンピュータビジョンの分野では、カラーチャート等を使わない手段として、文献[29]による方法も提案されている。この手法では、露光量の異なる2枚の写真からカメラ応答関数を復元する。双方の写真から同じ照度を持つ画素のペアを探し、その画素値からカメラ応答関数を構成するデータセット（画素値・露光量）を得る。その際、同一照度のペアはヒストグラム指定法を使って決定されるため、被写体の動きに起因する誤差が小さいという特徴がある。しかし、ここで得られるデータセット（画素値・露光量）は高輝度の領域においてその数が少なく、カメラ応答関数としての精度は低い（図11）。またこの他の、撮影用リファレンスを使用しない手段としては、文献[30]による方法がある。この文献では、文献[28]によるカメラ応答関数の復元方法をベースとして、安定性を増すための提案がなされている[30]。しかし、文献[28]の手法を使用した場合でも、画像シーケンスの枚数が充分であり、且つ各画像に充分な明暗差があれば、平滑化項を重みづけするスカラー λ を0にしたとしても、カメラ応答関数の復元は安定することから、本研究では当該分野において最も信頼性の高い文献[28]の手法をカメラ応答関数の取得に使用することとした。

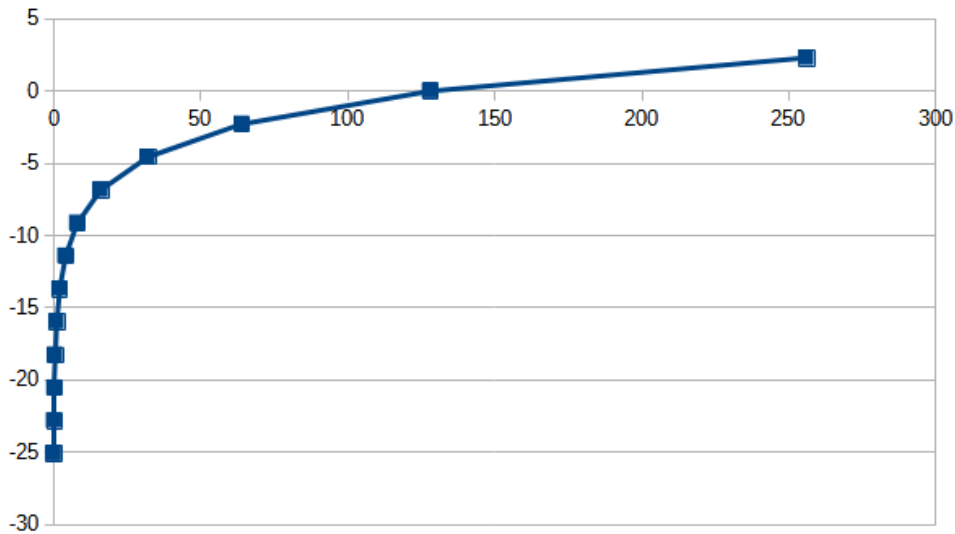


図 11: 文献 30 によるカメラ応答関数

(カメラ : Nikon D810, 感度 : ISO-100, 露光時間 : 秒 1/2 と 1 秒, 横軸 : 画素値, 縦軸 : EV 値)

3.5.2. カメラ応答関数を用いた階調変換

CGの階調変換には, 画素値と露光量の対応関係を表す式(2)を応用する. g は単調と仮定すると可逆であり, 式(2)は次のように書き換えることができる.

$$Z_{ij} = g^{-1}(\ln E_i + \ln \Delta t_j) \quad (5)$$

CGの画素値は実空間の照度と同様にシーンリニアであるから, 式(5)を用いてCGの階調を実写と整合させるには, CGの画素値を E_i として扱い, 関数 g^{-1} に与えればよい. しかし, CGの画素値は照度 E_i とスケールが異なるため関数 g^{-1} に直接与えることはできない. CGの画素値を照度 E_i として扱うためには適切な補正が必要となる. この補正係数を得るため, 実写画像とCG画像の両者には, 輝度の基準となる反射板等を配置する必要がある. この反射板は撮影用の18パーセントグレーカード等を使うのが便利である. 実写画像の撮像の際, 既知の反射率を持つ反射板をシーンに配置し, 同様に, CG画像の生成の際も, 仮想の同反射率の反射板をシーンに配置し, それを実写と同じ光環境でレンダリングする. これらの, 実空間と仮想空間に配置された反射板の画素値から補正係数を求める.

CG画像に写る反射板の画素値を h_i , 補正係数を c , 照度を

$$E = mc^2 \quad (6)$$

と定義すると, 撮像素子における露光量と画素値の対応関係を表す式(1)は次のように置き換えられる.

$$Z_{ij} = f(ch_i \Delta t_j) \quad (7)$$

関数 $g = \ln f^{-1}$ の定義より, 式(7)は次のようになる.

$$g(z_{ij}) = \ln c + \ln h_i + \ln \Delta t_j \quad (8)$$

ここで、 z_{ij} は実写画像に写る反射板の画素値、 h_i はCG画像に描かれた仮想の反射板の画素値、 Δt_j は既知と仮定すると、補正係数 c は式(8)から、次のように求められる。

$$\ln c = g(z_{ij}) - \ln h_i \Delta t_j \quad (9)$$

補正係数 c が得られれば、式(6)により合成の素材となるCG画像の画素値 h_i を照度 E_i に変換することができる。CG画像の全画素における照度が得られたら、式(5)を用いてそれらを画素値 Z_{ij} に変換することで、CG画像の階調を実写画像に近づけることができる。

3.6. 結果と考察

従来手法（先述の撮影用リファレンスの画素値を基準にCG画像の階調を調整する手法）と提案手法の双方で、CG画像と実写画像の合成を行い、結果となる両画像を比較した。合成の素材は8bit sRGBの実写画像(図12)と32bit シーンリニアのCG画像で階調変換後は実写画像と同じ8bitとなる。階調特性を視覚的に比較できるように、実写画像とCG画像の双方に、同反射率のカラーチャート(図19)を配置した(図13, 14)。CG画像のライティングは平行光源を使い、画像の高輝度領域がクリッピングされない程度にライト強度を調節した。また、実写画像のホワイトバランスは光源の色温度に調整した。本実験はレンダリング後のCG画像の階調変化にのみ着目するため、実写の光環境を模するための放射照度マップ等は使用していない。



図 12: 実写画像

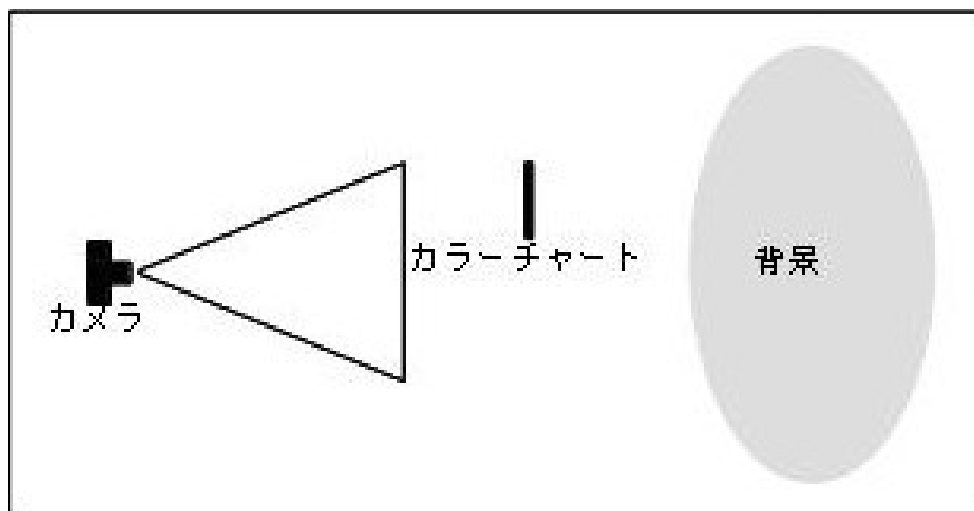


図 13: 実写画像の撮影環境

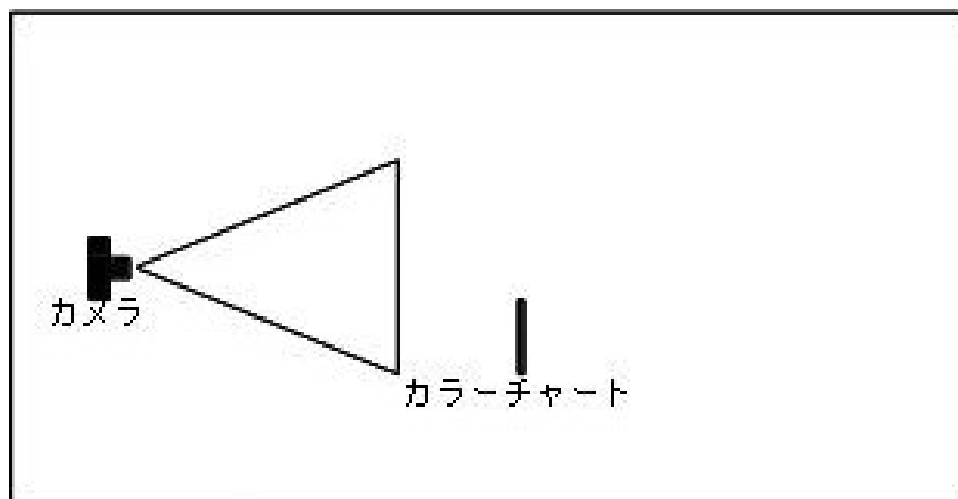


図 14: CG画像のシーン

実験では、カメラ応答関数の取得のため、露光量の異なる写真を複数枚撮影する。作業効率を考慮すると、画像シーケンスの枚数はできる限り少ないことが望ましい。しかし文献[28]による手法では、画像シーケンスの枚数の減少に伴いカメラ応答関数のノイズは増加することが知られている。そのため、枚数の異なる4つのパターンからカーブを復元し、それらの形状から、精度が確保できる最小の枚数を確認した。復元の際のスカラー λ は0となる。撮像系はNIKON D810を使用し、撮影の感度はISO-100、露光時間は1/125秒から2秒までとした。表4にそれぞれの画像シーケンスの撮影条件を示す。

図12, 13, 14, 15はそれぞれ、2枚, 3枚, 5枚, 9枚の画像シーケンス4組から得られたカメラ応答関数を片対数グラフにプロットしたものである。それらのカーブを比較したところ、撮影枚数9枚 (EVの間隔1F-Stop) のものはノイズが少なく良好な結果であった。それ以外のものについては、全てノイズが視認されたため、

カメラ応答関数の取得には、少なくとも9枚（EVの間隔1F-Stop）程度の画像を必要とすることが確認された。

表 4: 画像シーケンスの撮影条件

枚数	EVの間隔	露光時間
2枚	8F-Stop	1/125秒, 2秒
3枚	4F-Stop	1/125秒, 1/8秒, 2秒
5枚	2F-Stop	1/125秒, 1/30秒, 1/8秒, 1/2秒, 2秒
9枚	1F-Stop	1/125秒, 1/60秒, 1/30秒, 1/15秒, 1/8秒, 1/4秒, 1/2秒, 1秒, 2秒

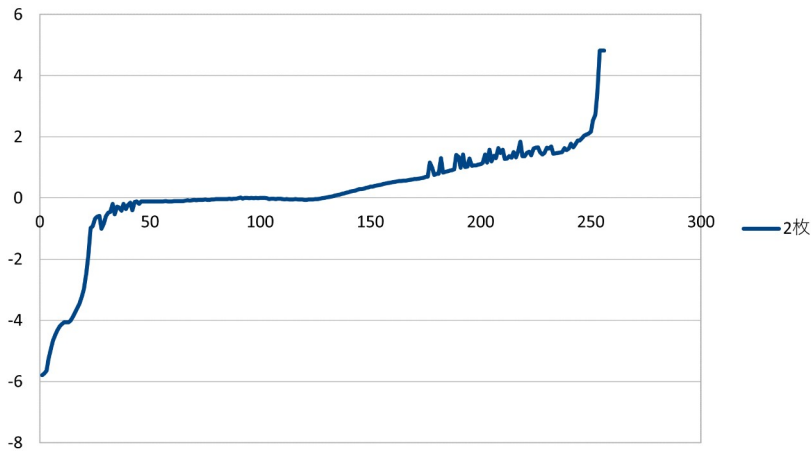


図 15: 画像シーケンス2枚のカメラ応答関数
(横軸: 画素値, 縦軸: EV 値)

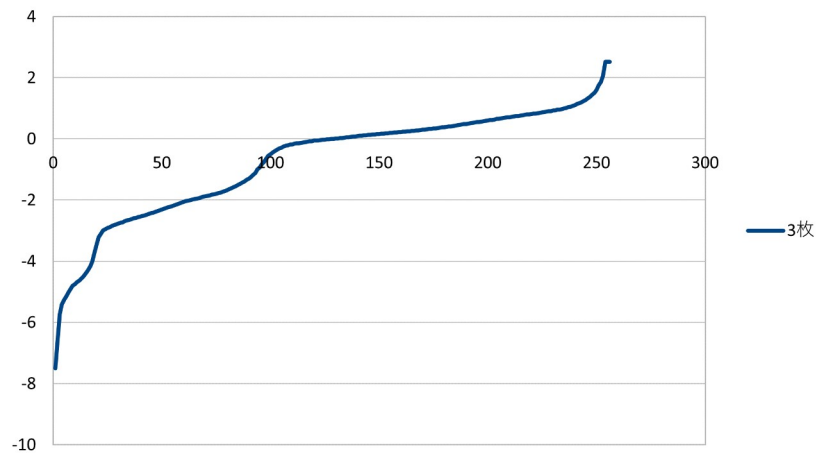


図 16: 画像シーケンス 3 枚のカメラ応答関数
(横軸: 画素値, 縦軸: EV 値)

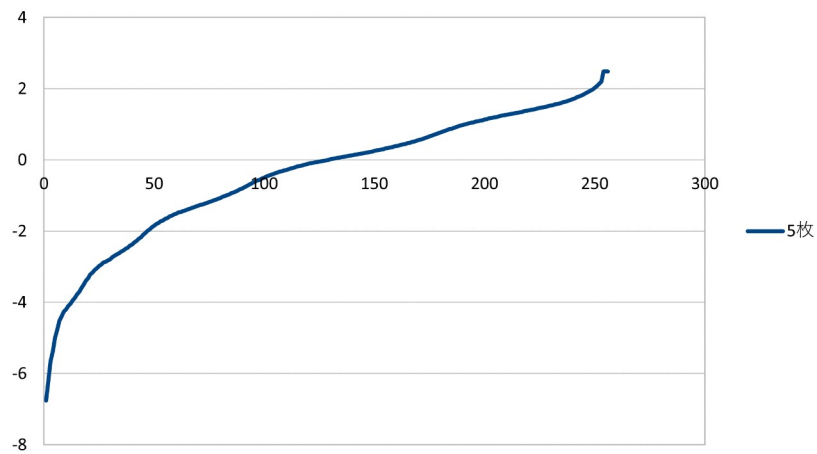


図 17: 画像シーケンス 5 枚のカメラ応答関数
(横軸: 画素値, 縦軸: EV 値)

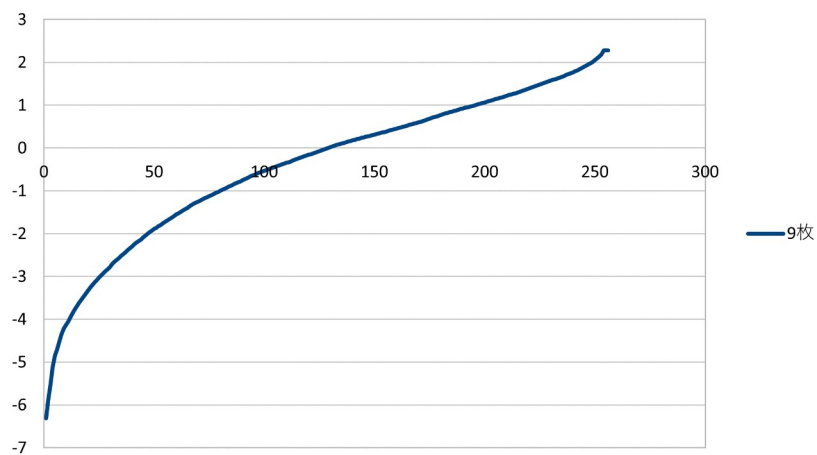


図 18: 画像シーケンス 9 枚のカメラ応答関数
(横軸: 画素値, 縦軸: EV 値)

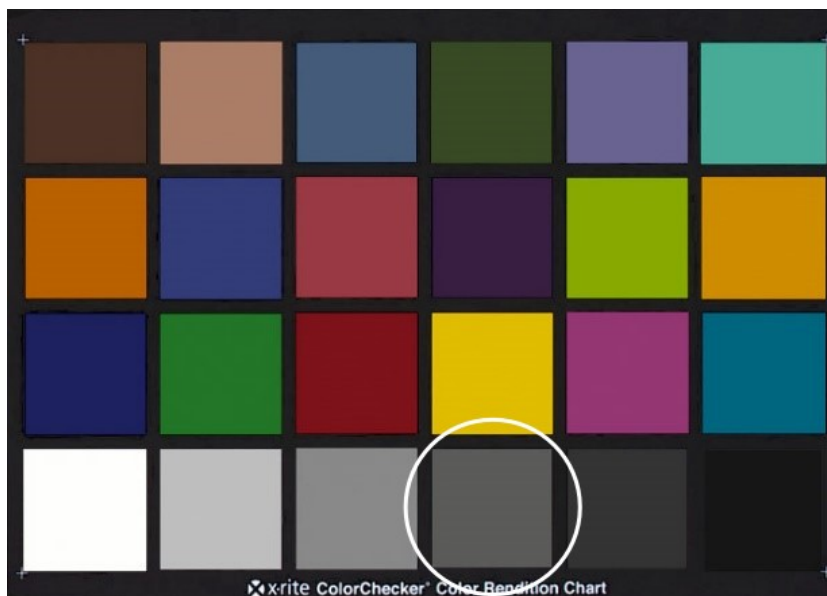


図 19: カラーチャート

(円内のグレーのパッチを輝度調整の基準とした)

従来手法、提案手法ともに、CG 画像の階調変換では、図 16 のグレーのパッチ (R122, G122, B121) を輝度調整の基準とした。

従来手法では、32bit シーンリニアな CG 画像に対して 1/2.2 のガンマ補正と輝度のスケールリングを加えることで、基準パッチの画素値が、実写画像における同パッチの画素値 (G249) と一致するよう調整した。図 20 は従来手法による画像合成の結果である。

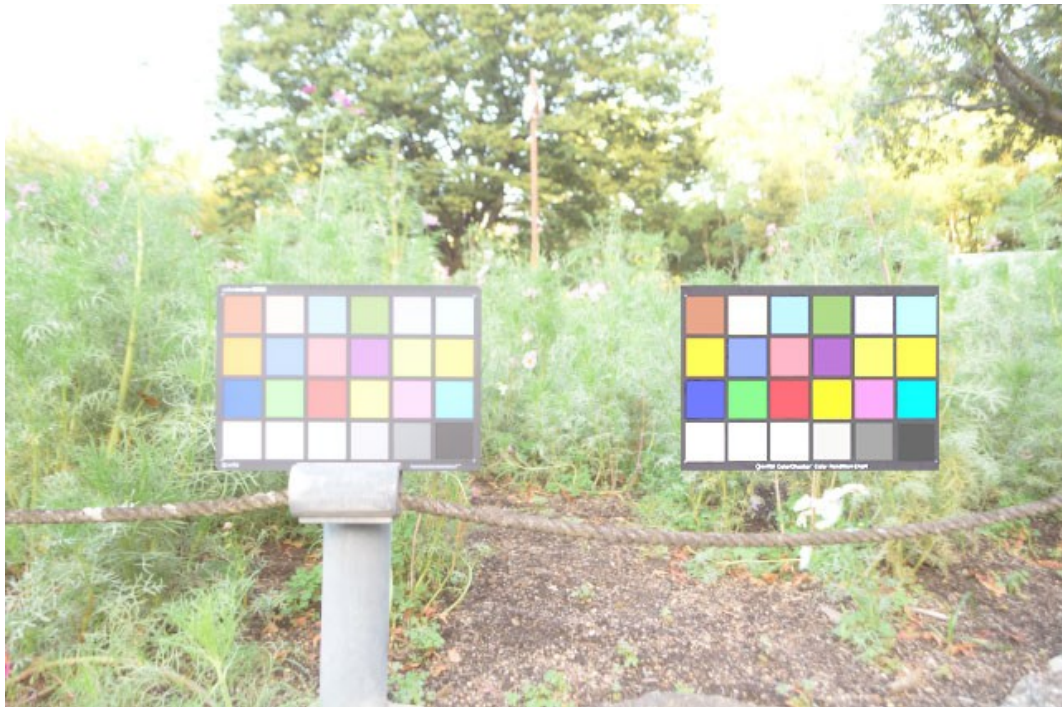


図 20: 従来手法による CG 実写合成

(左のカラーチャート：実写，右のカラーチャート：CG)

提案手法では、9枚（EV 間隔 1F=Stop）の実写画像から、カメラ応答関数（図 21）を復元した後、CG 画像における当該パッチの画素値が、実写画における同パッチの画素値（G249）と一致するよう、補正係数を求めた。次に、得られたカメラ応答関数と補正係数を用いて、シーンリニアな 32bitCG 画像を 8bitCG 画像へ階調変換した。

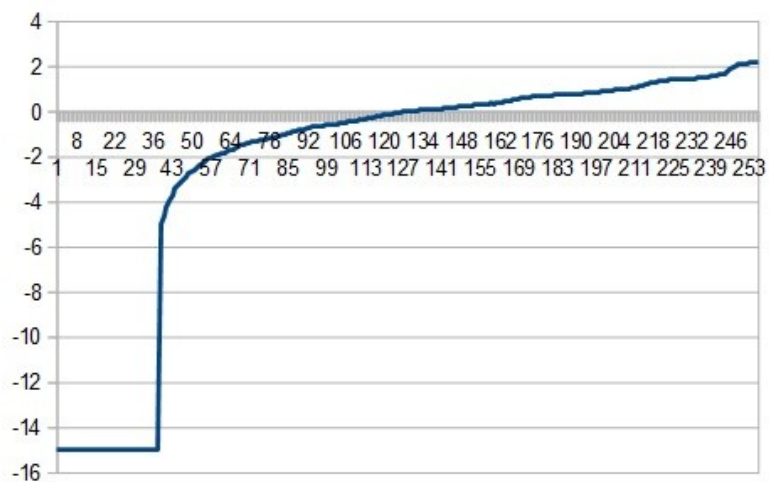


図 21: 実験に使用された撮像系のカメラ応答関数

(横軸:画素値, 縦軸: EV 値)

図 22 は提案手法による画像合成の結果である。



図 22: 提案手法による実写合成

(左のカラーチャート：実写，右のカラーチャート：CG)

両画像（図 20，図 22）を比較すると，従来手法では基準パッチを除く多くのパッチにおいてCGの階調が実写と一致せず，視覚的な不整合を生じている．それに対して提案手法では，CG画像のほぼ全ての階調において明るさが実写と近似し，合成画像の視覚的整合性は確保されていることが確認された．

次に，提案手法による階調変換の精度を定量的に評価した．表 5 は実写画像の画素値と提案手法で得られたCG画像の画素値を比較したものである．これらふたつの二乗平均平方根誤差（RMSE）は 1.35 となった．また，表 3 は実写画像の画素値と従来手法により得られたCG画像の画素値であるが，そのRMSEは 14.35 となり，提案手法が従来手法と比較して誤差の少ないことが確認された．

図 23 は，実写画像と提案手法により階調変換したCG画像のサンプル値をグラデーションパターンにより比較したものである．上段のパターンが実写画像のもの，下段のパターンが提案手法により階調変換したCG画像のものとなる．両画像は全ての階調において輝度が近づき，その境界は視認できない．また，図 24 のグラフからも，両画像の画素値には，グレースケールの全パッチにおいてよい近似が確認された．

表 5: 実写画像と CG（提案手法）の画素値の比較

パッチ	名称	実写	CG(応答関数)
1	Card White	209	207
2	5% Gray	204	201
3	10% Gray	193	194
4	20% Gray	179	178
5	30% Gray	164	164
6	40% Gray	146	145
7	50% Gray	124	124
8	60% Gray	102	104
9	70% Gray	73	73
10	80% Gray	48	48
11	90% Gray	26	27
12	Card Bkack	14	13

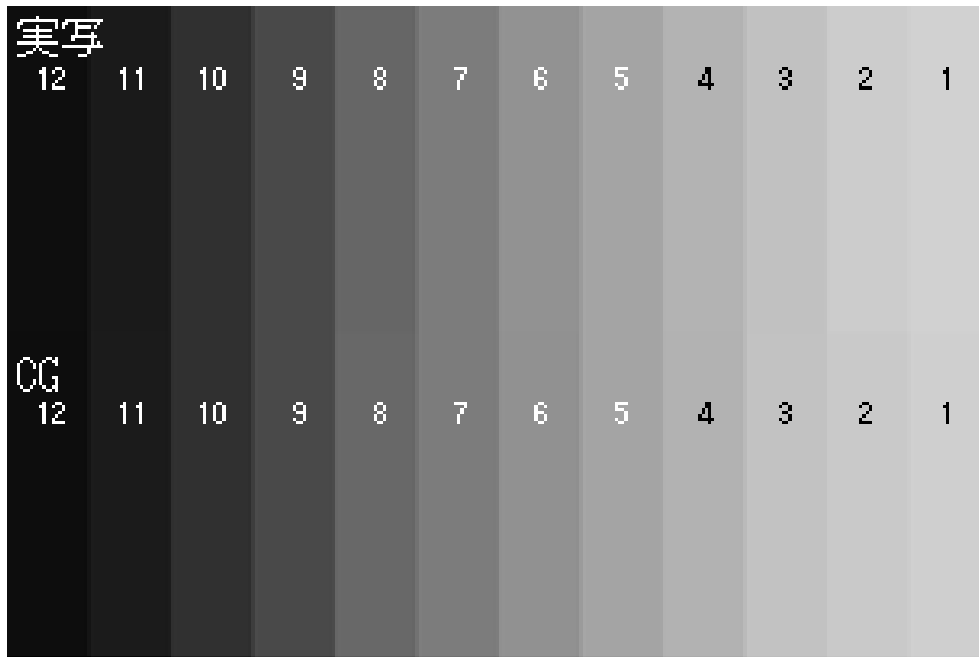


図 23: 実写画像と CG（提案手法）の階調特性の比較

(上段：実写 下段：CG)

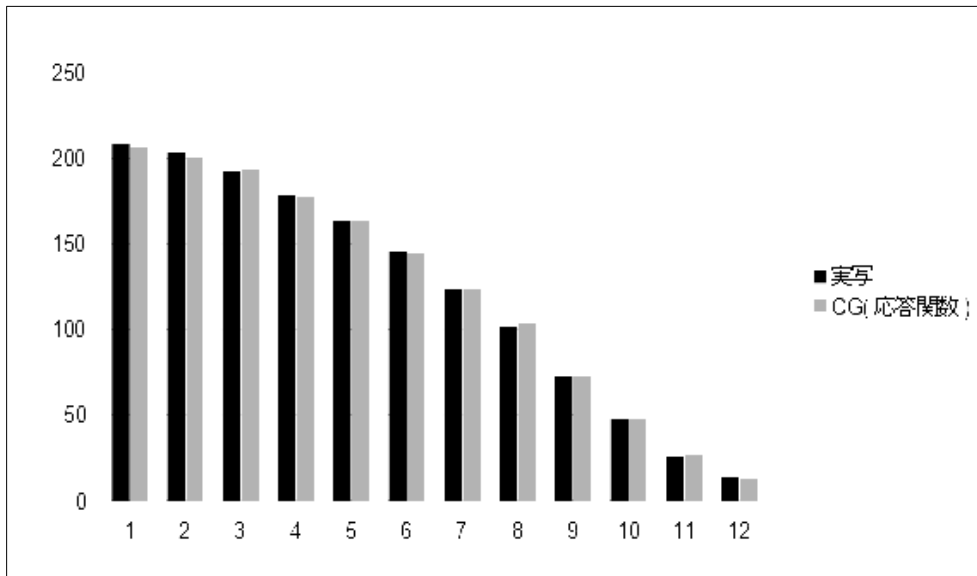


図 24: 実写画像と CG (提案手法) の階調特性の比較

3.7. 本章のまとめ

実験から、提案手法が CG 画像と実写画像の階調特性の近似に有効であることが確認された。これにより、両画像の輝度は、全ての階調において概ね一致し、シームレスな画像合成が可能となる。

本研究では撮像系のカメラ応答関数取得について、距離法、ND フィルタ法、タイムスケール法等の応用を検討したが、いずれも精度の問題があるか、あるいは多くの手間や時間、機器や環境を要するという欠点があった。これに対し採用した方法では手間や時間がかからず、特殊な機器や環境も必要としない。また、復元されたカメラ応答関数は正確で、階調変換の結果も実写画像の階調を高い精度で近似することが確認された。

このカメラ応答関数は、その復元に用いた写真と同じイメージプロセスにより得られた実写画像であれば、あらゆる露光時間で階調を近似することができる。つまり、本手法を CG 制作の現場に導入する場合、カメラ応答関数はひとつの撮像系に対して、使用頻度の高い設定のものをいくつか用意しておけば、あらゆるシャッタースピードの実写画像に対応することが可能となる。

本手法は、CG 画像のビット深度を超えない範囲であれば、あらゆるビット深度の実写画像に対応することができる。また、階調変換はビット深度の深い CG 画像の側に対してのみ行われるため、実写画像の劣化は発生しない。

現在、CG 制作の現場での階調変換は、グレーカードにより単一のリファレンスで調整するケースと、カラーチャートにより複数のリファレンスで調整するケースとが見受けられる。こうした手法の場合、階調変換に使用する輝度の基準の数は限られているため、基準以外の領域の輝度については作業者の視覚的判断に基づき内挿や外挿がなされている。本手法で使用するカメラ応答関数には、内挿や外挿の領域が存在しない。そのため、例えば極端に明るいシーンや暗いシーンにおいても、正

確な階調変換が可能となる。また本手法は、カメラ応答関数取得における作業負荷が小さく、特殊な機器や環境も必要としないため、制作現場において既存の制作フローへ組み込むことは容易であり、画像合成において効率的に階調の近似を実現する手段であると考えられる。

第4章 CG実写合成における色特性の整合

CG画像と実写画像をひとつの画像に合成すると、色特性の差異に起因する視覚的不整合が生じる。本研究では、実写の撮影時に色リファレンスとしてカラーチャートを撮影し、その画素値に基づき、CG画像にカラーマッピングを施す手法を提案する。これにより、両画像は全色域において色が近似し、CG実写合成画像から色調の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる。

4.1. 本章の目的

CG画像と実写画像をひとつの画像に合成すると、色特性の差異に起因する視覚的不整合が生じる。一般にCG制作の現場では実写の撮影時に、グレーカード等、単色のリファレンスを撮影し、その画素値を基準にCGの光源色を調整する。しかしこの手法は、撮像系の持つ色特性が考慮されないため、合成画像から視覚的な不整合を充分に取り除くことは難しい。本研究では、実写の撮影時に色リファレンスとしてカラーチャート(図25)を撮影し、その画素値に基づき、CG画像にカラーマッピングを施す手法を提案する。これにより、両画像は全色域において色が近似し、CG実写合成画像から色調の差異に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことが可能となる。

4.2. 手法

提案手法では、CG画像と実写画像の色を整合させるため、色リファレンスとしてカラーチャート(図25)を用いる。色情報が既知のカラーチャートを、CGシーンと実写シーンの双方に配置し、CG画像をカラーマッピングすることで、その色特性を実写画像と近似させる。また、本手法ではカラーマッピングの前処理として、実写画像の階調特性の線形化を行う。そのため処理後の両画像は、現在の制作現場での一般的な画像・映像編集作業へ、容易に組み込むことができる。以下、線形化、カラーマッピングについて順に述べる。



図 25: カラーチャート(24色)

4.2.1. 画像の線形化

カメラ応答関数はカメラ色空間を線形化し、実写画像から階調特性を除去することができる。CGプロダクション等で画像間のカラーマネージメントをする際、最初に行われるのは、写真からカメラ応答関数 γ の影響を取り除く線形化のプロセスである[31]。これにより、写真の画素値は露光量と比例することになる。カメラ応答関数の取得には、距離法、NDフィルタ法、タイムスケール法等、様々な手法があるが、本研究では最も簡便な手法として、文献[29](M.D. Grossberg)の手法を使用した。この手法では露出の異なる2枚の写真から、カメラ応答関数を復元するため、他の手法と比較して実行が容易である。以下、その手順について述べる。

[1]露光時間 t_1 , t_2 の写真を撮像する。

[2]露光レシオ $k=t_2/t_1$ を得る。

(2枚の写真における同画素の露光量を E_1 , E_2 としたとき、 $E_2/t_2=E_1/t_1$ となるため、 $k=E_2/E_1$ と同様になる。)

[3]露光量の異なる2枚の写真における一組の画素値のペアを p_1 , p_2 とすると、露出率 k と逆応答関数 i の関係は次式で与えられる。

$$\frac{i(p_1)}{i(p_2)} = \frac{E_2}{E_1} = k \quad (10)$$

p_2 が p_1 より大きいと仮定すると、 p_1 を p_2 に変換する画素値マッピング関数 ω が得られる。

この ω 、 p_1 、 p_2 の関係は次式のように表される。

$$p_2 = \omega(p_1) \quad (11)$$

よって次式が得られる。

$$\frac{i(\omega(p_1))}{i(p_1)} = k \quad (12)$$

撮像した2枚の画像のうち、一方の画像において画素値が0から p_1 の範囲となる画素の数は、もう一方の画像において画素値が0から p_2 の範囲となる画素の数とほぼ同じになる[29]。

それぞれの画像において、画素値が0から p_1 までの画素数の総和と、画素値が0から p_2 までの画素数の総和を求める関数を θ_1 、 θ_2 とすると、 $\theta_2(p_2) = \theta_1(p_1)$ となり、式11より、 $\theta_2(\omega(p_1)) = \theta_1(p_1)$ が得られる。この式から、任意の画素値 p に対応する画素値マッピング関数は次式で与えられる。

$$\omega(p) = \theta_2^{-1}(\theta_1(p)) \quad (13)$$

この画素値マッピング関数 ω はヒストグラムスペサフィケーション法により得られる。 ω が得られれば、ふたつの画像から被写体の照度が一致する画素値のペアを見つけることができる。文献2によると、画像のヒストグラムに空のビン（画素数が0となる画素値）がある場合、画素値マッピング関数は正確に計算されない。そのため、本研究では、各画素が持つ3チャンネルの値の合計 p を計算に使用することとした。 p の範囲を0から766とすると、関数 ω により $(p/766, \omega(p/766))$ と $(\omega(p/766), p/766)$ の関係が得られる。

i の性質から、 $i(0)=0$ 、 $i(1)=1$ となり、これを式12に代入することで、次に示す逆関数 i を算出することができる[29]。

$$(1,1), (\omega^{-1}(1), 1/k), (\omega^{-2}(1), 1/k^2), \dots, (\omega^{-n}(1), 1/k^n), (0,0)$$

4.2.2. カラーマッピング

CG画像の色特性を実写画像の異なる色特性へ変換するには、未知のカラーマッピング関数を見つける必要がある。これを関数 $t: R^3 \rightarrow R^3$ とする。この未知の関数 t を直接求めることは難しいが、近似関数を求めることは可能である。これを関数 $m: R^3 \rightarrow R^3$ とする。提案手法ではこの未知の関数 m を関数 t と近似するため、RBF[32]を使用することとした。

本手法では色のリファレンスとして、市販の24色カラーチャート（図25）を使う。

RBFには良く知られた基底関数がいくつか存在するが、当該カラーチャートでそれらのRBFを試した結果、多重二乗 (Multiquadric) RBFが、最も良くデータを近似することが分かったため、それを提案手法に使用することとした。基底関数は次式で与えられる。

$$\phi(r) = \sqrt{(\epsilon * r)^2 + 1} \quad (14)$$

RBFは次式を使用した。

$$m(X) = p(X) + \sum_{i=0}^N \lambda_i \phi(\|X - X_i\|) \quad (15)$$

4.3. 結果

図26, 27にCG実写合成の結果を示す。図26はカラーマッチング処理をしていないもの、図27は提案手法でカラーマッチング処理をしているものとなる。実写画像のカラーチャートは24色のカラーパッチを持つ。その各カラーパッチの右上を遮蔽するように、CGのカラーパッチが合成されている。



図26: CG実写合成画像 (CGにカラーマッチング処理なし)



図 27: CG 実写合成画像
(CG にカラーマッチング処理あり)

4.4. 考察

カラーマッチング処理をしていない CG 実写合成画像と、カラーマッチング処理をしている CG 実写合成画像を比較し、提案手法の有用性を視覚的に評価した。図 26 のカラーマッチング処理をしていない CG 実写合成画像では、多くのカラーパッチにおいて、CG と実写の色差が大きく、画像領域間に視覚的な不整合を生じていることが確認された。それに対して、図 27 のカラーマッチング処理をしている CG 実写合成画像では、多くのカラーパッチにおいて、CG と実写の色差が小さく、画像領域間の視覚的な不整合は充分に取り除かれていることが確認された。

次に、提案手法による色整合の精度を定量的に評価した。表 6, 7, 8 はカラーチャートのパッチの中から、彩度の高いもの（図 25 の No.13 から 18）を選び、その Lab 値と色差を示したものである。表 6 は“写真画像”，表 7 は“カラーマッチングなしの CG 画像”，表 8 は“カラーマッチングありの CG 画像”となる。ふたつの CG 画像が持つ、実写画像との色差の二乗平均平方根誤差（RMSE）は、カラーマッチング処理のない CG 画像で 20.04，カラーマッチング処理のある CG 画像で 3.98 となり、カラーマッチング処理のある CG 画像の色調は、実写画像の色調に近いことが確認された。

表 6: 実写画像におけるカラーパッチの色

No.	L*	a*	b*
13	12.2	15.6	-38.9
14	33.1	-28.7	23.4
15	23.3	40.2	27.5
16	56.5	1.9	58.3

17	31.3	41.5	-12.8
18	36.6	-11.9	-26.8

表 7: CG 画像（カラーマッチング処理なし）の色，及び実写画像との色差

No.	L*	a*	b*	色差
13	8.4	14.4	-34.8	5.717517
14	21.5	-19.9	15	16.80952
15	13	26.8	10.8	23.76005
16	35.5	-0.8	40.7	27.53271
17	18.6	25.2	-16	20.90981
18	20.1	-8.6	-19.6	18.30246

表 8: CG 画像（カラーマッチング処理あり）の色，及び実写画像との色差

No.	L*	a*	b*	色差
13	8	15.6	-38.9	4.2
14	30	-30.7	26.9	5.085273
15	21.2	42.5	31.4	4.990992
16	55.6	2.9	59.6	1.870829
17	28.1	44.5	-13.1	4.39659
18	35	-12	-25.7	1.944222

4.5. 本章のまとめ

実験から，提案手法が CG 画像と実写画像の色特性の近似に有効であることが確認された．これにより，両画像の色は，全ての色域において概ね一致し，シームレスな画像合成が可能となる．本研究では撮像系のカメラ応答関数取得について，文献 2 の手法を使用した．カメラ応答関数の取得については，これ以外にも距離法，ND フィルタ法，タイムスケール法等が存在するが，いずれも多くの手間や時間，あるいは特殊な機器や環境が必要となる．これに対し，本手法に用いたカメラ応答関数の取得方法は簡便で，小規模な制作現場でも実行が可能である．

本研究における提案手法は，CG 実写合成画像から，色特性に起因する視覚的な不整合を充分に取り除くことができる．また，その作業負荷は小さく，特殊な機器や環境も必要としない．さらに，本手法によるカラーマッチングは，リニアワークフローとの親和性も高いため，現場において既存の制作工程へ組み込むことは容易であり，効率的でシームレスな CG 実写合成を可能とする，現実的な手段のひとつであると考えられる．

第5章 CG実写合成におけるライトアーチファクトの整合

本章では、CG実写合成の視覚的整合性を向上させるため、簡易測定したカメラ point spread function (PSF)^{注1)}に基づくブルーム効果の表現手法について検討した。

はじめに撮像したエッジ像からカメラ固有の edge spread function (ESF)^{注2)}を取得し、そこから得られた line spread function (LSF)^{注3)}により PSF を算出した。その後、CG画像と PSF の畳み込みによりブルーム効果を加え、画質を評価した。結果として、PSF に基づくブルームはカメラで撮像した実写のブルームと画素値がほぼ一致し、当該手法が CG 実写合成の視覚的整合性を向上させるうえで有効であることがわかった。

5.1. 本章の目的

ブルームとは、撮像系へ入射する強い光がレンズの内部で散乱し、本来の画像領域から周辺へあふれ出すライトアーチファクトのことである(図28)。CG制作の現場では、CG画像と実写画像を合成する際、両者の画質を整合させるため、実写のブルームを模してCGに付加するテクニックが使われている。これはCG・実写の両画像領域をシームレスに繋ぐうえで有効な手段といえるが、作業には相応の習熟度が要求される。

撮像系はシステムごとにそれぞれ固有のブルームを持っている。それに対して、CGにおけるブルームは、

$$f(x,y)=\left(1-\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{d}\right)^4 \quad (16)$$

のブルームフィルタや[33]、複数のガウシアン和によるフィルタ、或いは市販されるポストエフェクト専用のソフトウェアにより表現される。しかしいずれの手段にせよ、CG実写合成の際、実写のブルームを模す調整は作業者の判断に依存するため、合成画像から視覚的な不整合を充分に取り除くことは難しく、画質には作業者ごとのばらつきを生じることになる。そこで、本研究では、作業者の視覚的判断に依存せず、定量的な画像情報に基づいてCGにブルーム効果を加え、CG実写合成の視覚的整合性を向上させる方法を検討する。具体的には、カメラ固有の point spread function(PSF)^{注1)}を簡易測定することにより、入射とブルームの関係を定量的に調べ、それをCGのブルーム効果に応用できると考えた。本研究では、診療放射線分野における医療画像の解像特性評価に広く使われるエッジ法[34][35]を応用してカメラの line spread function (LSF)^{注3)}を取得した。以下、診療放射線分野における LSF 取得の概要につづき、本研究の提案法、結果を順に述べる。



図 28: 実写画像のブルーム

5.2. LSF 取得の概要

PSF を正確に求める事は技術的に難しいため[36]，本研究では LSF を求め，そこから PSF を算出する．LSF は modulation transfer function (MTF)^{注4)}を測定する過程で得られる．MTF は診療放射線分野において，放射線画像の解像特性を定量的に評価するために広く用いられており[37][38][39]，その測定手順については当該分野において手法が確立されている．

診療放射線分野の MTF 測定は，代表的なものとしてスリット法，エッジ法，および矩形波チャート法が挙げられるが[37][40]，そのうち，測定の過程において LSF が得られるのはスリット法とエッジ法のふたつとなる．スリット法は最も知られた MTF 測定方法で，開口幅 $10\mu\text{m}$ 程度の金属スリットを撮影することで，デルタ関数を模した信号をシステムに入力し LSF を得る[41][37]．エッジ法は，エッジデバイス^{注5)}を撮影することで，ステップ信号をシステムに入力し LSF を得る[37]．以下，International Electrotechnical Commission (IEC) によって採用されたエッジ法[42]を基本に，診療放射線分野における LSF 取得の手順を示す．

- i. エッジを約 $1.5\sim 3.0^\circ$ 傾けて撮影し，エッジを横切る方向の複数ラインのプロファイルを合成することによりサンプリング間隔の細かい合成プロファイルを得る[43][44][45][46]．
- ii. 必要に応じて合成プロファイルを線形化（有効露光量変換）し，edge spread function(ESF)^{注2)}を得る[43]．
- iii. ESF を微分することにより LSF を得る[43][44]．

スリット法は，スリットと X 線源の正確な配置が必要となり，更に測定デバイスも非常に高価なため[37]，CG 制作の現場において簡単には応用できない．それに対してエッジ法は撮影方法が簡単で，測定デバイスも安価なため，本研究の提案手法に応用することとした．

5.3. 方法

X線検出器の detective quantum efficiency (DQE)^{注6)}測定法を規格化した IEC 62220-1 (以後, IEC 規格と呼ぶ) では, MTF 測定においてエッジ法を推奨している. 本研究では IEC 規格のエッジ法を参考に LSF を取得し, その LSF から算出した PSF で CG 画像にブルーム効果を付加した. IEC 規格は, 光学系を持たない X 線検出器を対象とするが, 提案手法では, 光学系を有する一般的な可視光の撮像系を対象とする. 以下, 方法について述べる.

提案手法でははじめに, ESF を取得するためのエッジ像を撮影した (図 29). IEC 規格では放射線を遮蔽するために, エッジとしてタングステン・プレートが推奨されるが, 本研究では可視光線を扱うため, 入手性の良いアルミニウムを使用し, 色は黒とした. また, ブルームの表現は, 診療放射線分野の MTF 測定と異なり, ESF に高い解像度を必要としないため, 合成プロファイルは使用しないこととした. 図 30 にエッジの撮像における機器の幾何学的配置を示す.

提案手法により取得する PSF は等方性を有することが前提となる. カメラ PSF が異方性を生じる主たる要因は絞り羽根の回折による光芒である. そのため, エッジ像の取得はカメラの絞りを開放で行うこととした. また, ブルームは強い入射に起因する現象で, ダイナミックレンジの狭い通常のカメラによる写真では, 画素値に必要な精度を確保できない. そのため, 撮影は HDR 画像^[13]で行うこととした.

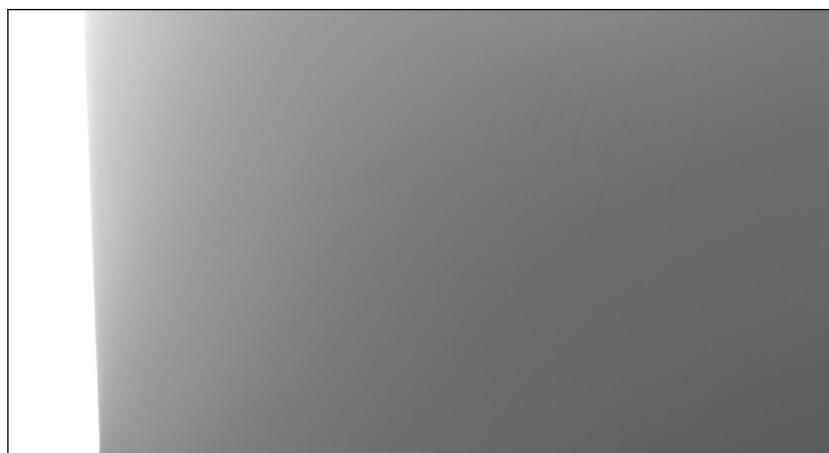


図 29: 撮像したエッジ像

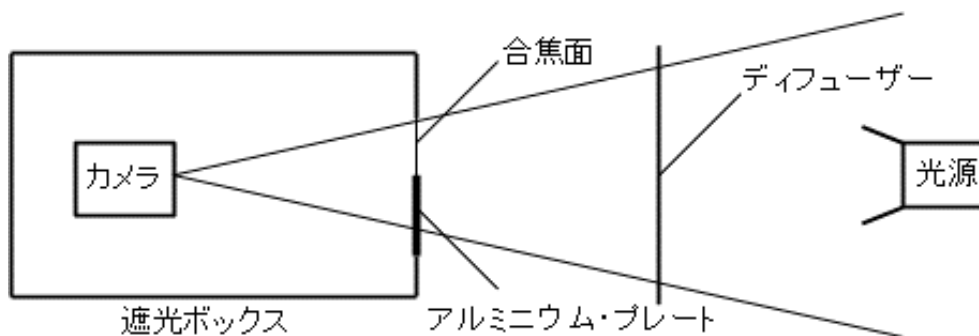


図 30: エッジの撮像における機器の配置

ESFの階調特性は線形であることが求められるが、HDR画像はこの要件を満たすため、エッジプロファイル^{注7)}をそのままESFとして使用することができる(図31)。このESFに対して隣接差分による微分をすることでLSFを取得する。

一般に、エッジ法によって増強されたLSFのノイズは、直接線(高線量)側のLSF裾野において顕著である[44]。つまり可視光の場合、LSFのノイズは、直接光(高輝度)側のLSF裾野において顕著になる(図32)。しかし、等方的なPSFを仮定すると、LSFは左右対称となるため[47]、ノイズの少ないLSF頂点の低輝度側(図32右側)のみを計算に使用した。また、このLSFによるPSF算出には次式を使用した[48][49][50][51]。

$$PSF(x, y) = LSF_x(x) \cdot LSF_y(y) \quad (17)$$

ここで、 x と y は画像の横方向と縦方向の位置、 $PSF(x, y)$ はPSF、 $LSF_x(x)$ と $LSF_y(y)$ は、それぞれ x 方向と y 方向における独立なLSFである。また、提案手法ではPSFに等方性の条件を仮定するため、LSFはひとつの関数(式(18)の LSF)として扱うことが可能となり、次式が成り立つ[48]。

$$LSF_x = LSF_y (= LSF) \quad (18)$$

次に、CGのエッジ画像と、算出したPSFとの重畳積分により、CG画像にブルーム効果を付加した。このブルーム付きCG画像 $g(x, y)$ は、原画像であるCG画像 $f(x, y)$ とフィルタである $PSF(x, y)$ を用いて次式のように表される。

$$g(x, y) = f(x, y) ** PSF(x, y) \quad (19)$$

ここで、**は2次元の重畳積分である。

式(17)はPSFが分割可能であることを条件とするが、実際の画像系においてPSFが分割可能であることは稀である。理想的なPSFは円形であるが、分割可能の条件を満たさないPSFを式(17)で求めた場合、その形状は円形にならない。しかし、一般に画像系の空間分解能評価等では、PSFの形状に関する要求精度が低く、PSFを近似的に式(17)で扱うことが多い[48][52]。本研究においても、重要となるのは、CG画像とPSFの畳み込み積分の結果が、実写画像全体のブルームを総合的に近似することである。PSFの形状がそれぞれの画素に与える個別の効果について、その要求精度は高くないと考え、PSFを近似的に式(17)で扱うこととした。

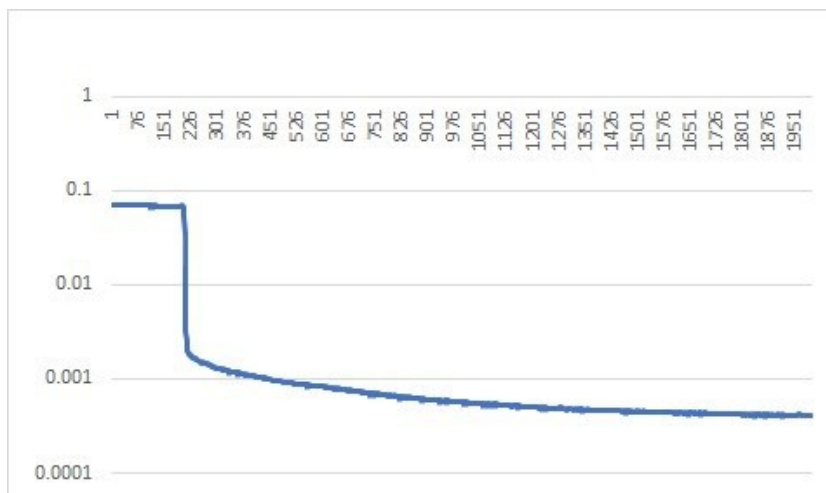


図 31: エッジ像のプロファイルから得た ESF
(横軸：距離(ピクセル) 縦軸：相対輝度)

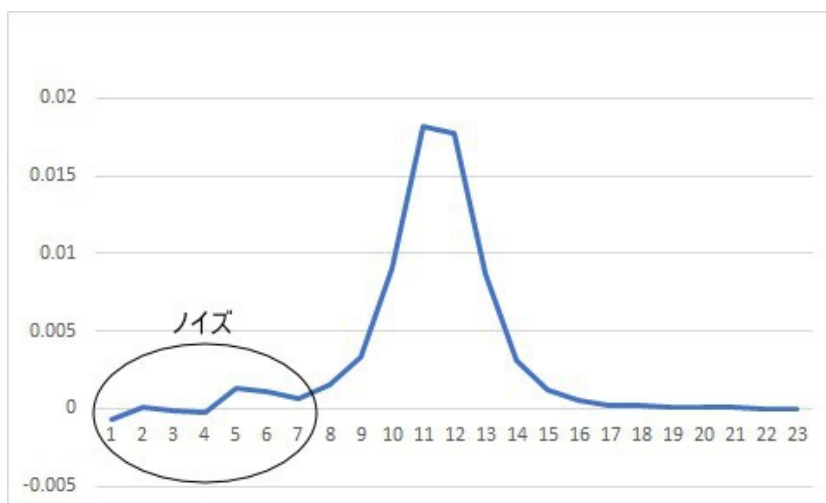


図 32: ESF の隣接差分から得た LSF
(横軸：距離(ピクセル) 縦軸：相対輝度)

5.4. ブルーム現象における位置依存性の検証

提案手法ではエッジ像を用いて、系を代表する単一の EFS を取得し、そこから算出した PSF を、画像平面上にあるすべての画素に適用する。つまり本手法は、PSF が画像全体に対して一様となる、シフトインバリエントの系を前提としている。この妥当性について確認するため、ブルームの位置依存性について検証した。

この検証では、拡散光の上部をプレートで遮蔽したエッジ像を撮影し、横 1000 ピクセルの HDR 画像を生成した。この HDR 画像を用いて、画像中心からの距離が異なる複数の ESF (メリジオナル方向：同心円方向) を取得し、グラフで比較した。ESF はエッジ像の中心から上へ延ばした線を、100 ピクセルのピッチで画像外側 (図 33 左方向) へスライドさせてゆき、計 4 か所で取得した (図 33)。尚、画像の縁に近い領域については、光学系が持つ有効径の限界により正確な ESF が取得できないため、比較対象から除外した。

図 34 は図 33 の縦線 A, B, C, D で示す位置の ESF を片対数グラフにプロットしたもので、横軸が距離、縦軸が画素の相対輝度を示す。各 EFS にカメラの周辺光量低下の補正を加えて比較したところ、4 つの ESF はその全ての範囲で値が概ね一致し、ブルームの位置依存性は低いことが確認された。

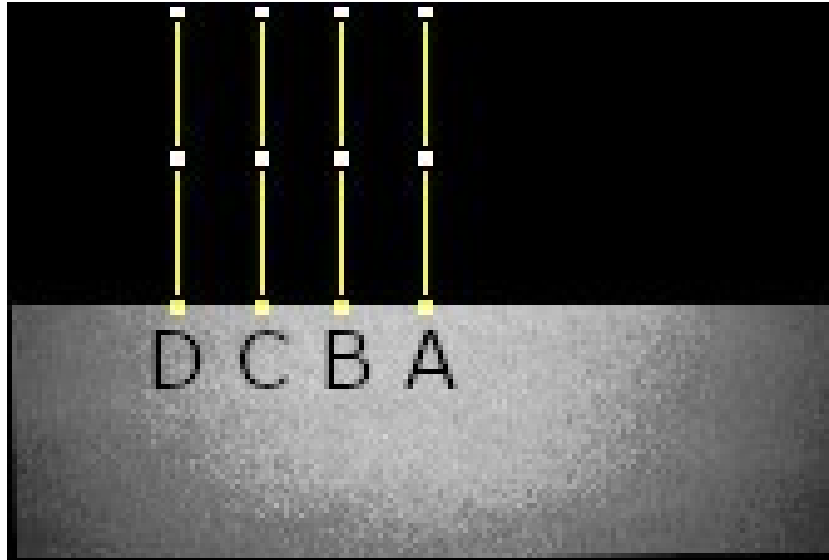


図 33: ESF を取得した位置

(A: x=500(ピクセル), B: x=400(ピクセル), C: x=300(ピクセル), D: x=200(ピクセル))

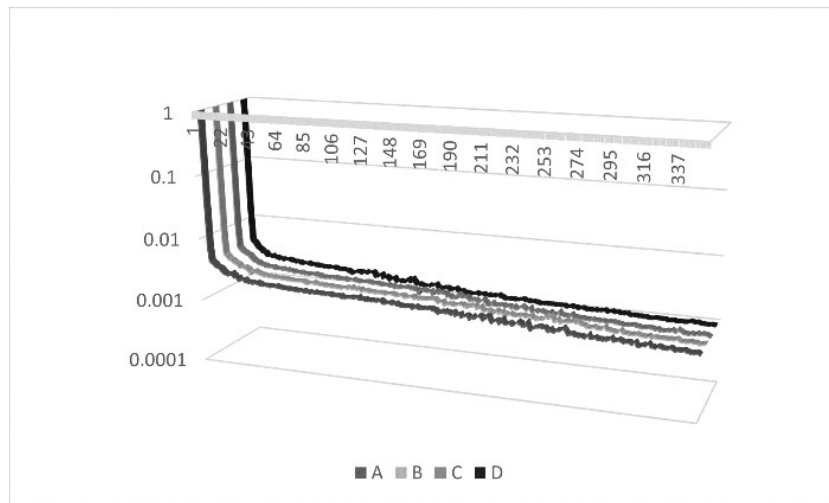


図 34: 図 33 の位置 A, B, C, D における ESF

(手前から奥へ A, B, C, D の順 横軸: 距離(ピクセル) 縦軸: 相対輝度)

5.5. 結果と考察

図 35 の画像は、図 36 の CG 画像に対して、提案手法によりブルーム効果を付加したものである。

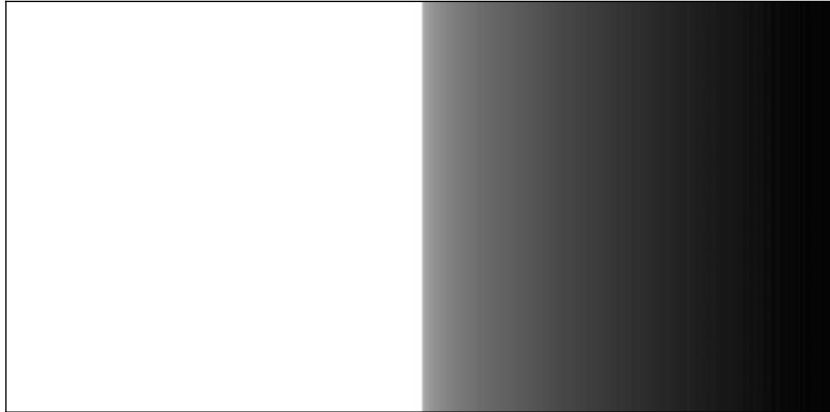


図 35: CGのエッジ像（ブルーム効果あり）



図 36: CGのエッジ像（ブルーム効果なし）

本研究では、提案手法の妥当性を確認するため下記の検証を行った。はじめに、本手法によるCGのブルームと実写のブルームを比較し、その違いから本手法によるブルームの復元精度を確認した。続いて、本手法を適用したCG実写合成画像と、適用しないCG実写合成画像を比較することで、本手法の有用性を視覚的に確認した。以下、それぞれの方法と結果について順に述べる。

図37は実写画像に発生したブルームのエッジプロファイル（実測値）と、提案手法によりCG画像に付加したブルームのエッジプロファイル（理論値）をグラフにプロットしたもので、横軸が距離、縦軸が画素の相対輝度を示す。この検証では、実写とCGのブルームを比較するため、双方の画像から同じ条件でプロファイルを取得する必要がある。実写画像における、ブルームのプロファイル取得方法は、本手法におけるESFの取得方法と同様となる。具体的には、光源を黒いアルミニウム・プレートで遮蔽し、それを暗所で撮影した。得られた実写画像に発生するブルームのプロファイルが図37の実測値となる。一方、CG画像においては、実写のエッジデバイスを模した黒い板（反射率0）をシーンに配置し、実写撮影の暗所を模するため、逆光以外のライト強度を0とした。このCG画像に対して、本手法によりブルーム効果を付加し、得られたプロファイルが図37の理論値となる。ここで、実写画像、CG画像、PSFは、いずれも32ビット浮動小数点型の画像となる。上記の手順で得られた理論値と実測値を比較したところ、両者の相対輝度は概ね一致し、良い近似

が得られた (図 37) .

続いて、CG 実写合成画像に提案手法を適用したものと、本手法を適用しないものを比較することで、その有用性を視覚的に評価した。ここで使用する CG 実写合成画像は、本手法の実用性評価も考慮し、CG 制作の実務を想定したシーン構成とした。具体的には、強い逆光を持つ空間 (窓のある室内) を撮影した実写画像と、CG で描画したオブジェクト (黒い円) をアルファ合成することで検証用の画像を作成した。

この検証ではブルーム効果についてのみ注目をするため、CG オブジェクトの反射率を低く設定し、CG のシェーディングがブルーム領域の輝度に与える影響を抑えることとした。合成の素材となる CG 画像と実写画像 (HDR 画像) は 32 ビット浮動小数点型となる。この CG 実写合成画像に対して、本手法によりブルーム効果を付加したものと、ブルーム効果を付加しないものを比較することで、本手法の CG 実写合成における視覚的整合性向上の効果について確認した。尚、この検証では、実写の露光時間に対する本手法の柔軟性を示すため、ブルーム効果ありとブルーム効果なしの両画像を 3 段階 ($\pm 0\text{EV}$, $+1\text{EV}$, $+2\text{EV}$) の露出において比較した。

図 38 上段, 39 上段, 40 上段はブルーム効果を付加しない CG 実写合成画像である。いずれの露出においても、CG オブジェクト (黒い円) と背景となる実写画像は画質が異なり、視覚的な不整合を生じている。

図 38 下段, 39 下段, 40 下段は、同合成画像の CG 領域に対して提案手法によりブルーム効果を付加したものである。いずれの露出においても、CG オブジェクト (黒い円) と背景となる実写は画質が近づき、両者の視覚的な整合性は確保されている。

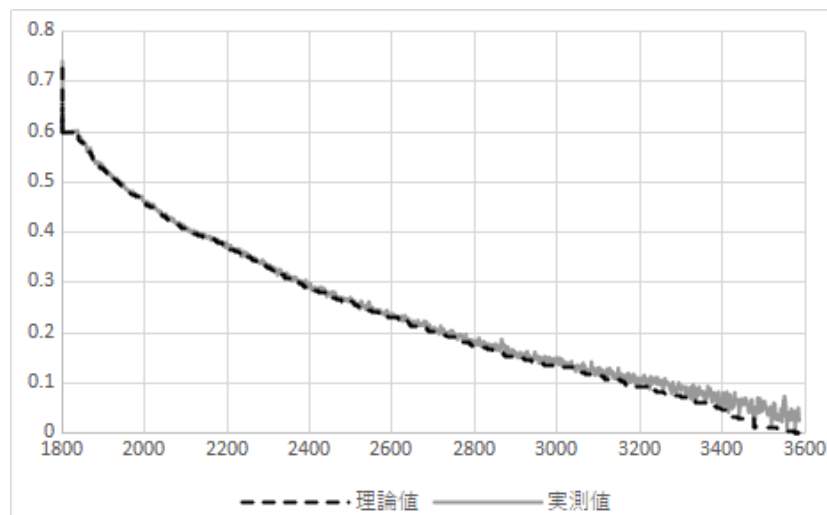


図 37: 理論値と実測値の比較

(理論値: ブルーム効果付き CG 画像のエッジプロファイル 実測値: 実写画像のエッジプロファイル)

(横軸: 距離 縦軸: 相対輝度)

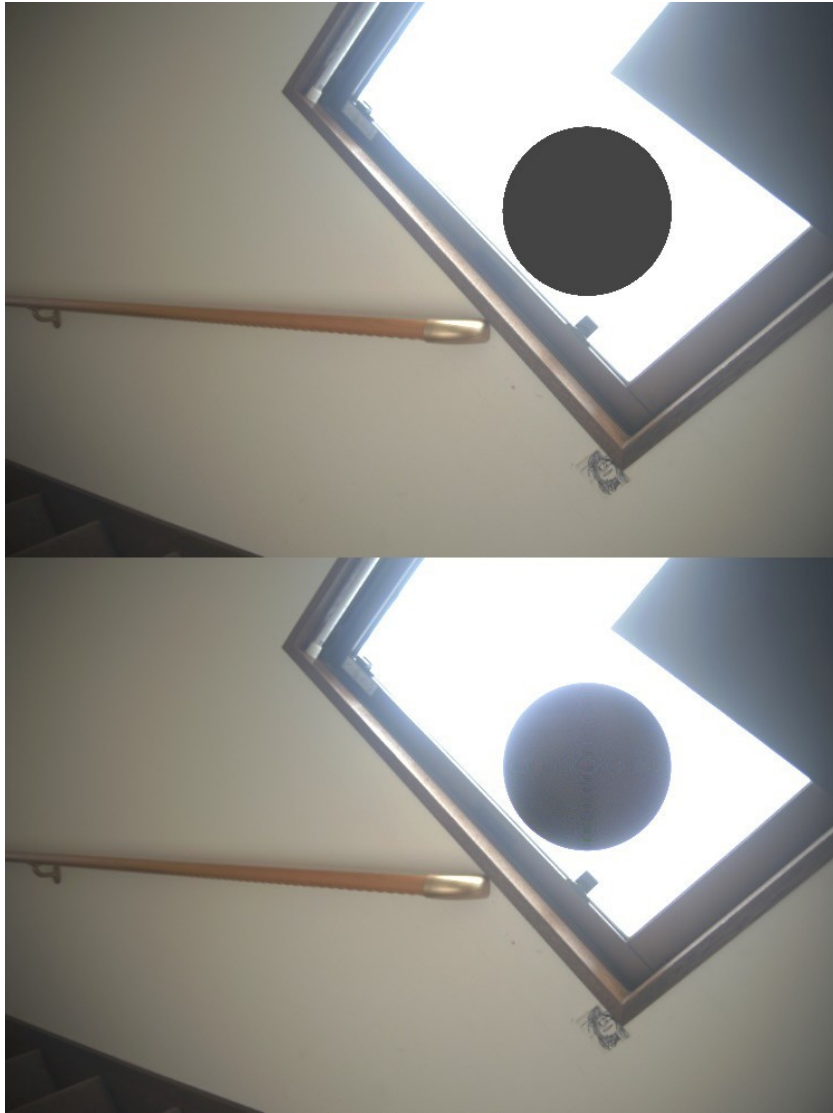


図 38: CG 実写合成 露出 $\pm 0EV$
(上段: ブルーム効果なし 下段: ブルーム効果あり)

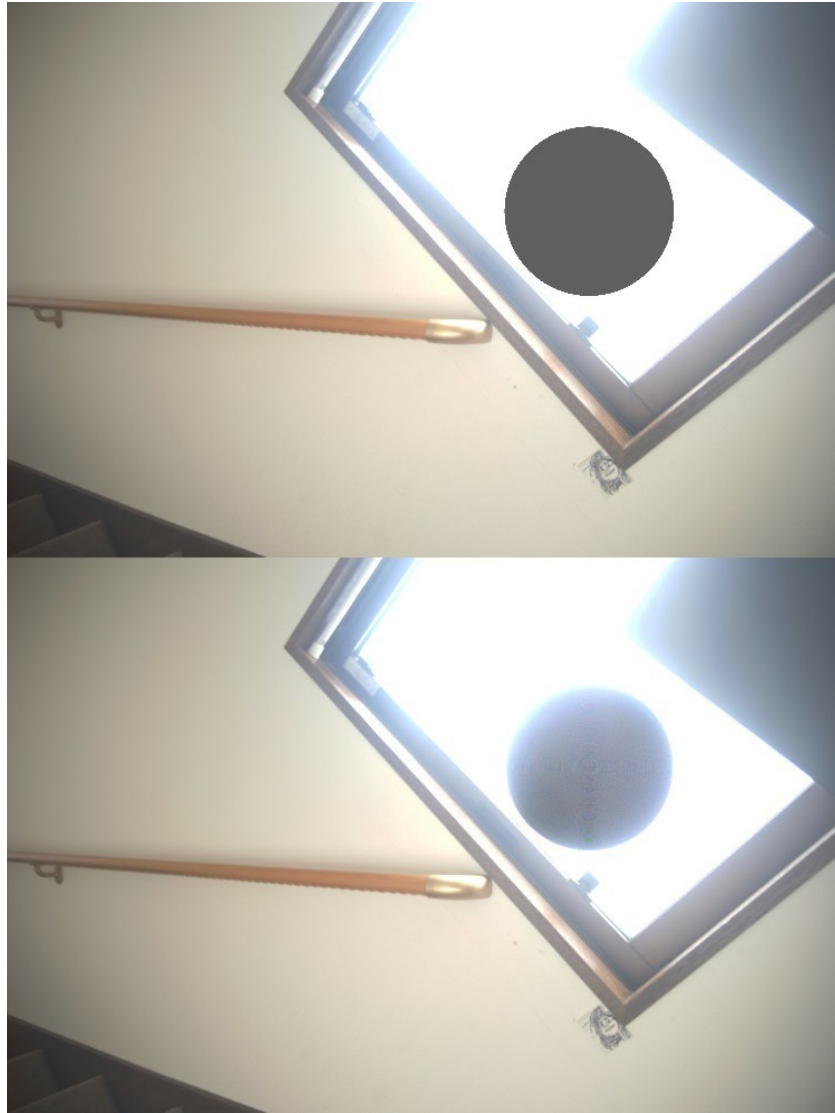


図 39: CG 実写合成 露出+1EV
(上段:ブルーム効果なし 下段:ブルーム効果あり)

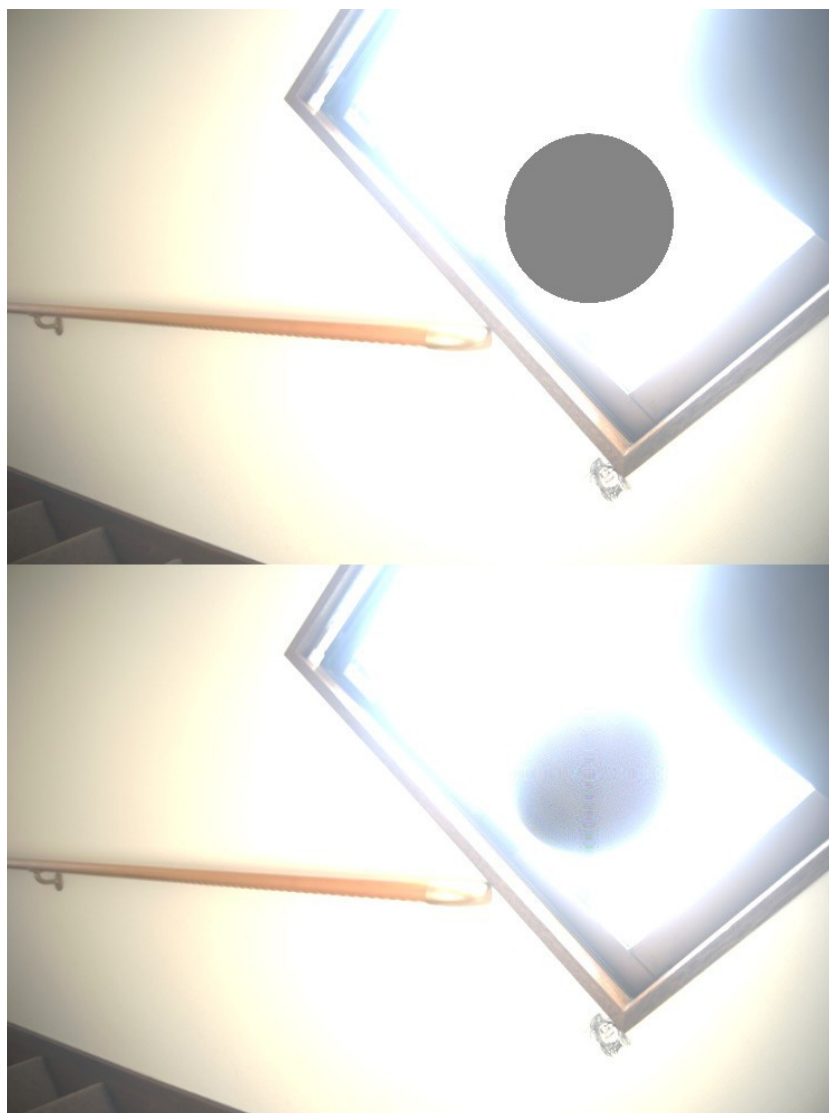


図 40: CG 実写合成 露出+2EV
(上段：ブルーム効果なし 下段：ブルーム効果あり)

最後に、本手法の適用可能範囲について考察する。

前述のとおり、分割可能の条件を満たさない PSF を式(17)により求めた場合、その形状は円形にならない。そのため、縦方向、あるいは横方向に長い低輝度領域を持つ画像（図 41 左側）を本手法により処理した場合、ブルームには図 41 右側のような暗いストリークを生じることがある。これはフィルタの形状に起因する問題で、根本的な解決は難しい。しかし、ブルーム画像に簡単な画像処理を施すことで、このストリークを抑えることは可能である。

この処理では、はじめに PSF を 0° 以上、 90° 未満の範囲で等間隔に回転させ、角度の異なるフィルタを複数用意する。つぎにそれら複数のフィルタを使い、本手法でそれぞれのブルーム画像を取得する（図 42 上段）。得られた全ての画像を比較明合成することにより、ブルーム領域に発生したストリークを抑えることができる。

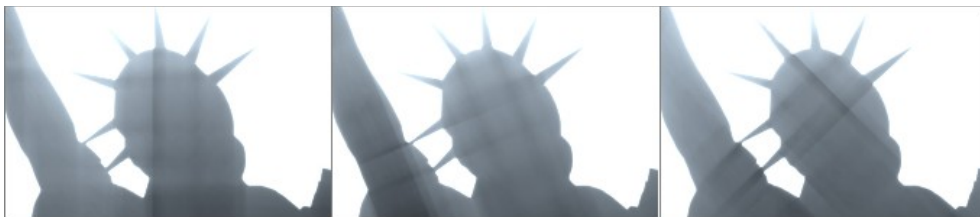
(図 42 下段) . この処理による効果の度合は、用意するブルーム画像の数に依存するが、多くの場合、10 から 40 程度の画像を合成することで、ストリークを概ね除去することができる。

図 43 に、本手法でブルーム効果を付加した CG 実写合成画像を示す。画像内の背景は実写で、手前の植物は CG となる。ブルーム領域のストリークは、比較明合成により除去されている。尚、図 44 はブルーム効果を付加しない CG 実写合成画像となる。



図 41: ストリーク

左：原画像 右：ブルーム画像（縦横に暗いストリークが発生）



比較明合成

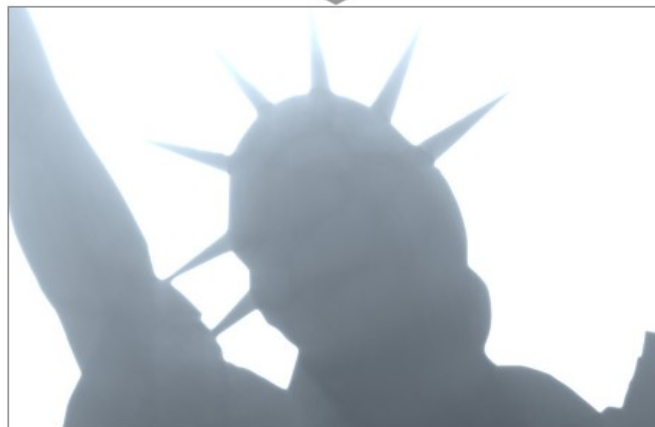


図 42: ストリーク除去

上段：等角度の間隔で回転させた PSF から得た複数のブルーム画像
下段：比較明合成により、ブルーム領域のストリークを除去した画像



図 43: ブルーム効果ありの CG 実写合成画像（ストリーク除去）



図 44: ブルーム効果なしの CG 実写合成画像

5.6. 本章のまとめ

市販される撮像系や光学系の設計情報は一般に公開されないため、光学的な条件からブルームを推定することは難しい。そのため、現在の CG 制作の現場において、CG 実写合成のブルーム効果は、作業者の視覚的判断により調整され、合成画像の画質には作業者の習熟度に起因するばらつきを生じている。提案手法は、定量データに基づきブルーム効果を画像に付加するため、一定水準の効果を安定的に得ることができる。また、その手順は極めて簡便で、特殊な機器や環境を必要としない。そのため、CG プロダクション等の制作現場において、本手法を既存の制作フローへ組み込むことは容易である。

提案手法で得られる PSF は、その復元に用いる写真と同じイメージプロセスにより得られた実写画像であれば、あらゆる露光時間でブルームを近似することができる。つまり、本手法を CG 制作の現場に導入する場合、PSF はひとつの撮像系に対して、使用頻度の高い設定のものをいくつか用意しておけば、あらゆる露光時間の実写画像に対応することが可能となる。

作業者の習熟度に依存せず、安定的にフォトリアルなブルーム効果を得られる本手法は、CG 実写合成の画質整合を向上させるうえで、有効な手段のひとつであると考えられる。

注

- 1 点像強度分布.
- 2 エッジ像強度分布.
- 3 線像強度分布.
- 4 変調伝達関数.
- 5 診療放射線分野において、撮影用 X 線装置の検査や不変性試験で使用される、プレート型の精度管理用ファントム.
- 6 検出量子効率.
- 7 エッジを横切る線分の経路に沿って等間隔に配置された点から取った強度値の集合.

第6章 等方的 PSF による CG 実写合成のためのブルーム効果

本章では、CG 実写合成の視覚的整合性を向上させるため、簡易測定したカメラ等方的 point spread function (PSF) 注1)に基づくブルーム効果の表現手法について検討した。はじめに撮像したエッジ像からカメラ固有の edge spread function (ESF) 注2)を取得し、そこから得られた optical transfer function (OTF) 注3)により PSF を算出した。その後、CG 画像と PSF の畳み込みによりブルーム効果を加え、画質を評価した。結果として、等方的 PSF に基づくブルームはカメラで撮像した実写のブルームと画素値がほぼ一致し、当該手法が CG 実写合成の視覚的整合性を向上させるうえで有効であることがわかった。

6.1. 本章の目的

前章では CG 写合成の視覚的整合性を向上させる手法について提案をしている。当該手法では、カメラ固有の point spread function(PSF)^{注1)}を簡易測定することにより、入射とブルーム現象の関係を定量的に調べ、それを CG のブルーム効果に応用する(以後、従来手法と呼ぶ)。従来手法は、PSF の取得が容易で、特殊な機器や環境も必要としないため、CG プロダクション等の現場の制作フローへ容易に組み込むことができる。しかし分割可能ではない系の PSF を当該手法で求めた場合、その形状は円にならない、そのため、結果となるブルームには図 45 で示すような暗いストリークが縦横に発生することがある。



図 45: 従来手法によるブルームの問題

左：原画像 右：ブルーム画像（縦横に暗いストリークが生じている）

本章では、ESF の微分で得た LSF をフーリエ変換することで 1 次元 OTF (Optical Transfer Function) 注3)を算出し、その OTF を 2 次元に変換してから逆フーリエ変換することで PSF を得る手法を検討する。これにより、PSF は分割可能の条件を満たさない場合でも円形となり、どのような画像においてもストリークのない適正なブルームを得られるようになる。

従来手法では、診療放射線分野における医療画像の解像特性評価に広く使われるエッジ法[34][35]を応用してカメラの line spread function (LSF) 注4)を取得して

いる。以下、従来手法の問題点、本章における提案手法、結果を順に述べる。

6.2. 分割可能ではないPSFによるブルーム効果の問題点

式(17)はPSFが分割可能であることを条件とするが、実際の画像系においてPSFが分割可能であることは稀である。理想的なPSFは円形であるが、分割可能の条件を満たさないPSFを式(17)で求めた場合、その形状は円形にならない。そのため、縦方向、あるいは横方向に長い低輝度領域を持つ画像（図45左側）を当該手法により処理した場合、ブルームには図45右側のような暗いストリークを生じることがある。これはフィルタの形状に起因する問題で、式(17)を使った場合、その根本的な解決は難しい。本章における提案手法では、円形の正確なPSFを取得するため、OTF（Optical Transfer Function）をPSFの計算に使用した。

6.3. 方法

前章におけるPSFの算出方法は、分割可能なLSFにのみ使用可能で、それ以外のLSFの場合、PSFは正しく計算されず等方性を持たない。提案手法では、より正確なPSFを取得するため、OTF（Optical Transfer Function）をPSFの計算に使用した。図46に従来手法と本手法の違いを示す。

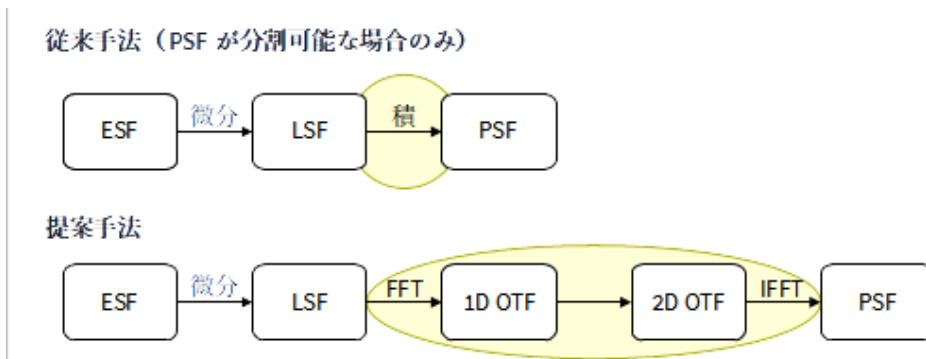


図 46: 従来法と提案法の違い

提案手法では、ESFの微分で得たLSFを1次元フーリエ変換することでOTFを算出し、そのOTFを2次元に変換した後、逆フーリエ変換することでPSFを得る。

OTFは空間周波数領域において、像の劣化を表現する複素関数で、次式で表される。

$$OTF(r,s) = MTF(r,s)e^{-iPTF(r,s)} \quad (20)$$

ここで r,s は、像面のUV座標系における、それぞれの方向の空間周波数となる。また、MTFはOTFの絶対値、PTF (phase transfer function) ^{注6)}は位相成分となる。

提案手法では、エッジ像の撮像からLSFの取得までを従来手法と同様に行う。得られたLSFのフーリエ変換により1次元OTFを得る。1次元OTFは、LSFのフーリエ変換として定義され、次式で示される。

$$OTF(r) = \int_{-\infty}^{\infty} LSF(u) e^{i2\pi ru} du \quad (21)$$

LSF から 1 次元の OTF が得られたら、それを 2 次元 OTF に変換し、逆フーリエ変換をする。2 次元 OTF は、LSF のフーリエ変換として定義され、次式で示される。

$$OTF(r, s) = \iint_{-\infty}^{+\infty} PSF(u, v) e^{i2\pi(ru+sv)} dudv \quad (22)$$

最後に、CG 画像と算出した PSF との重畳積分 (式(19)) により、CG 画像にブルーム効果を付加する。

6.4. 結果と考察

提案手法の妥当性を確認するため下記の検証を行った。はじめに、本手法によって復元された PSF の精度について確認した。続いて、従来法との比較を行った。更に、本手法を適用した CG 実写合成画像と、適用しない CG 実写合成画像を比較することで、本手法の有用性を視覚的に確認した。以下、それぞれの方法と結果について順に述べる。

はじめに、式(21)、(22)により算出された PSF の復元精度について確認した。検証では、始めに PSF の模擬データを作った。次に、その PSF の模擬データから、計算機のシミュレーションで EFS を生成した。その EFS の微分で得られた LSF をフーリエ変換することで 1 次元 OTF を求め、それを 2 次元に変換した後に、逆フーリエ変換で PSF を求めた。PSF の模擬データと算出した PSF をグラフ (図 47) にプロットし、比較したところ、両者は概ね一致し、良い近似が得られた。

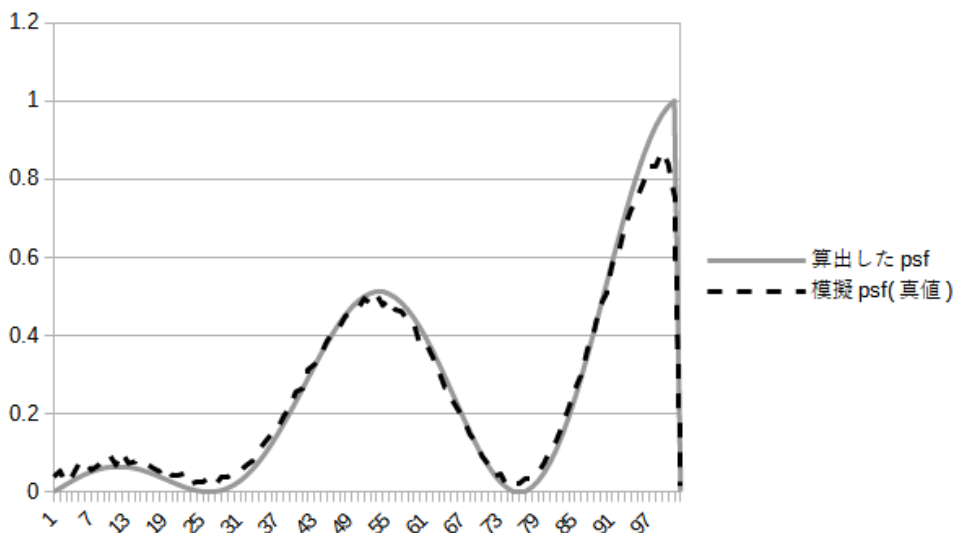


図 47: 算出した PSF と模擬の PSF (真値) の比較
(横軸：距離(ピクセル) 縦軸：相対輝度)

続いて、CG 実写合成画像に提案手法を適用したものと、本手法を適用しないもの

を比較することで、その有用性を視覚的に評価した。ここで使用する CG 実写合成画像は、本手法の実用性評価も考慮し、CG 制作の実務を想定したシーン構成とした。具体的には、前章と同様に、強い逆光を持つ空間（窓のある室内）を撮影した実写画像と、CG で描画したオブジェクト（黒い円）をアルファ合成することで検証用の画像を作成した。この検証ではブルーム効果についてのみ注目をするため、CG オブジェクトの反射率を低く設定し、CG のシェーディングがブルーム領域の輝度に与える影響を抑えることとした。合成の素材となる CG 画像と実写画像（HDR 画像）は 32 ビット浮動小数点型となる。この CG 実写合成画像に対して、本手法によりブルーム効果を付加したものと、ブルーム効果を付加しないものを比較することで、本手法の CG 実写合成における視覚的整合性向上の効果について確認した。尚、この検証では、実写の露光時間に対する本手法の柔軟性を示すため、ブルーム効果ありとブルーム効果なしの両画像を 3 段階（±0EV, +1EV, +2EV）の露出において比較した。

図 48 上段、49 上段、50 上段はブルーム効果を付加しない CG 実写合成画像である。いずれの露出においても、CG オブジェクト（黒い円）と背景となる実写画像は画質が異なり、視覚的な不整合を生じている。

図 48 下段、49 下段、50 下段は、同合成画像の CG 領域に対して提案手法によりブルーム効果を付加したものである。いずれの露出においても、CG オブジェクト（黒い円）と背景となる実写は画質が近づき、両者の視覚的な整合性は確保されている。

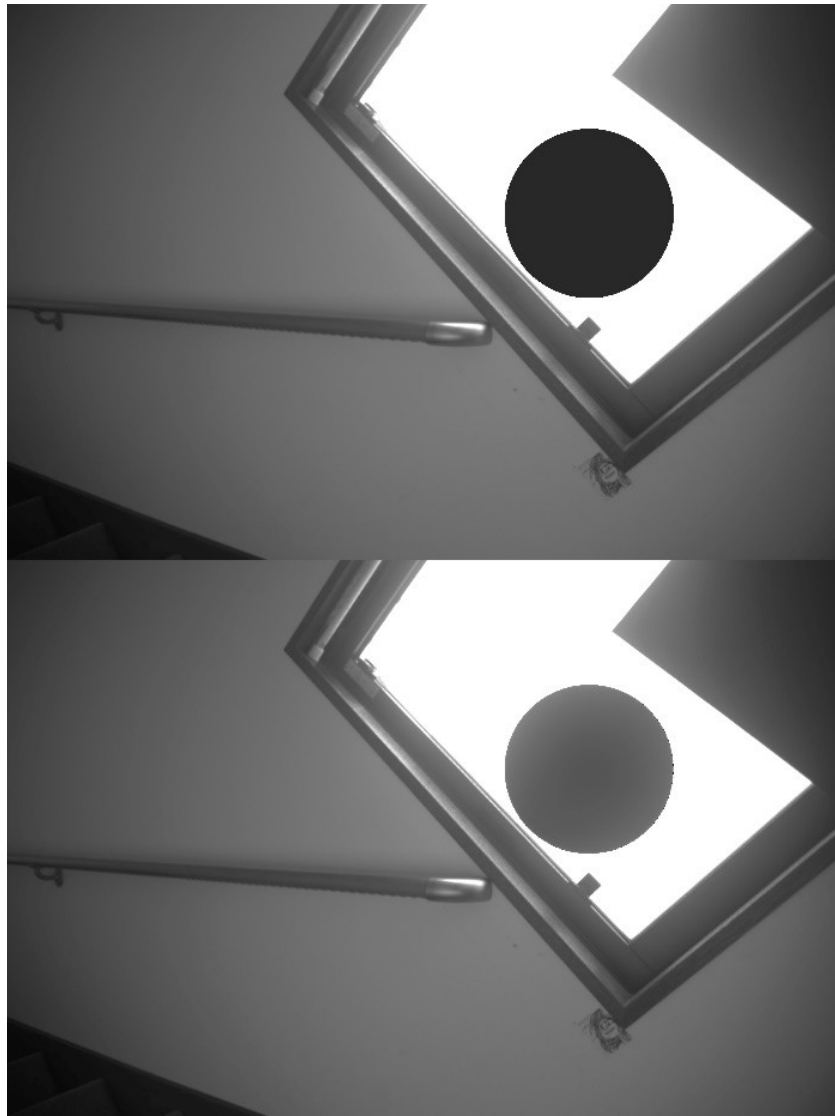


図 48: CG 実写合成 露出 $\pm 0EV$
(上段: ブルーム効果なし 下段: ブルーム効果あり)

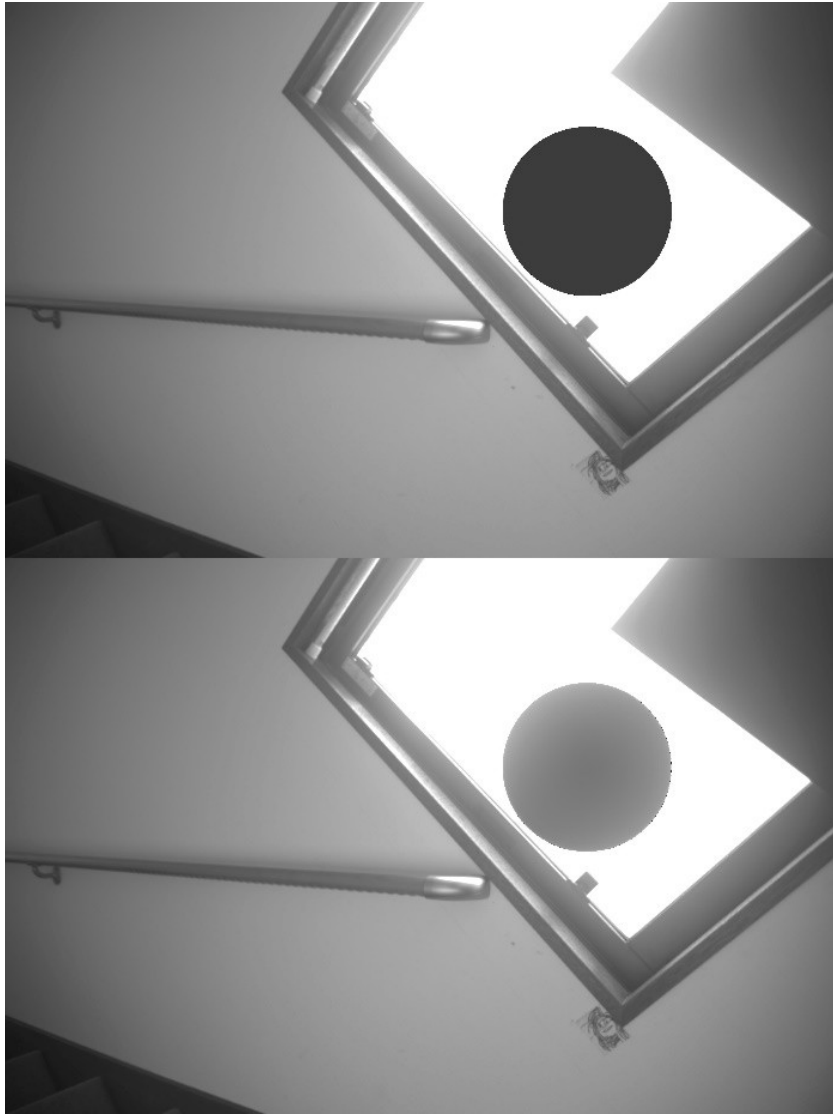


図 49: CG 実写合成 露出+1EV
(上段: ブルーム効果なし 下段: ブルーム効果あり)

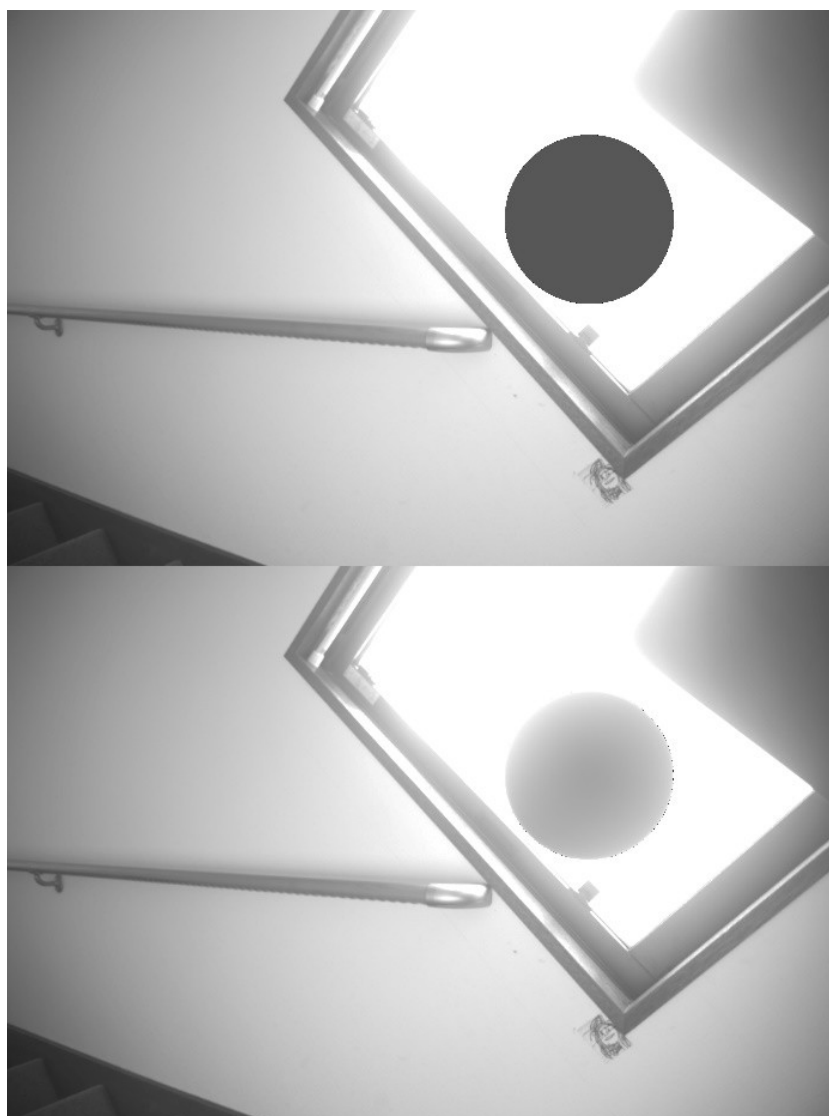


図 50: CG 実写合成 露出+2EV
(上段：ブルーム効果なし 下段：ブルーム効果あり)

最後に、提案手法と従来手法の比較を行う。

前述のとおり、分割可能の条件を満たさない PSF を式(17)により求めた場合、その形状は円形にならない。そのため、縦方向、あるいは横方向に長い低輝度領域を持つ画像（図 45 左側）を本手法により処理した場合、ブルームには図 45 右側のような暗いストリークを生じることがある。これはフィルタの形状に起因する問題で、根本的な解決は難しい。しかし、本手法による PSF 算出は、分割可能の制約がないため、どのような LSF からでも円形の PSF を算出することができる。

図 51, 52 に、本手法のブルーム効果と、従来手法のブルーム効果を示す。図 51 は従来手法によるもので、縦横に多くの暗いストリークが発生している。これに対して図 52 は本手法によるもので、ストリークや輝度のムラがないことを確認できる。図 53 に、本手法でブルーム効果を付加した CG 実写合成画像を示す。画像内の背景は実写で、手前の植物は CG となる。尚、図 54 はブルーム効果を付加しない CG 実

写合成画像となる。



図 51: ブルーム画像
(縦横に暗いストリークが発生)



図 52: 提案法によるブルーム画像
(ストリークや輝度のムラが発生しない)



図 53: ブルーム効果ありの CG 実写合成画像



図 54: ブルーム効果なしの CG 実写合成画像

6.5. 本章のまとめ

市販される撮像系や光学系の設計情報は一般に公開されないため、光学的な条件からブルームを推定することは難しい。そのため、現在の CG 制作の現場において、CG 実写合成のブルーム効果は、作業者の視覚的判断により調整され、合成画像の画質には作業者の習熟度に起因するばらつきを生じている。提案手法は、定量データに基づきブルーム効果を画像に付加するため、一定水準の効果を安定的に得ることができる。また、その手順は極めて簡便で、特殊な機器や環境を必要としない。そのため、CG プロダクション等の制作現場において、本手法を既存の制作フローへ組み込むことは容易である。

提案手法で得られる PSF は、その復元に用いる写真と同じイメージプロセスによ

り得られた実写画像であれば、あらゆる露光時間でブルームを近似することができる。つまり、本手法をCG制作の現場に導入する場合、PSFはひとつの撮像系に対して、使用頻度の高い設定のものをいくつか用意しておけば、あらゆる露光時間の実写画像に対応することが可能となる。

作業者の習熟度に依存せず、安定的にフォトリアルなブルーム効果を得られる本手法は、CG実写合成の画質整合を向上させるうえで、有効な手段のひとつであると考ええる。

第7章 考察

前述の提案手法により、CG画像と実写画像は階調特性、色特性、解像特性の何れにおいても画質が近づき、画像合成の視覚的整合性は確保させることが確認された。

第3章における階調特性の整合では、提案手法による階調変換の精度を定量的に評価した。表5は実写画像の画素値と提案手法で得られたCG画像の画素値を比較したものである。これらふたつの二乗平均平方根誤差（RMSE）は1.35となった。また、表3は実写画像の画素値と従来手法により得られたCG画像の画素値であるが、そのRMSEは14.35となり、提案手法が従来手法と比較して誤差の少ないことが確認された。

図23は、実写画像と提案手法により階調変換したCG画像のサンプル値をグラデーションパターンにより比較したものである。上段のパターンが実写画像のもの、下段のパターンが提案手法により階調変換したCG画像のものとなる。両画像は全ての階調において輝度が近づき、その境界はほとんど視認できないものとする。また、図24のグラフからも、両画像の画素値には、グレースケールの全パッチにおいてのよい近似が確認された。

第4章における色特性の整合では、カラーマッチング処理をしていないCG実写合成画像と、カラーマッチング処理をしているCG実写合成画像を比較し、提案手法の有用性を視覚的に評価した。図26のカラーマッチング処理をしていないCG実写合成画像では、多くのカラーパッチにおいて、CGと実写の色差が大きく、画像領域間に視覚的な不整合を生じていることが確認された。それに対して、図27のカラーマッチング処理をしているCG実写合成画像では、多くのカラーパッチにおいて、CGと実写の色差が小さく、画像領域間の視覚的な不整合は充分に取り除かれていることが確認された。

またここでは、提案手法による色整合の精度を定量的に評価した。表6, 7, 8はカラーチャートのパッチの中から、彩度の高いもの（図25のNo.13から18）を選び、そのLab値と色差を示したものである。表6は“写真画像”，表7は“カラーマッチングなしのCG画像”，表8は“カラーマッチングありのCG画像”となる。ふたつのCG画像が持つ、実写画像との色差の二乗平均平方根誤差（RMSE）は、カラーマッチング処理のないCG画像で20.04、カラーマッチング処理のあるCG画像で3.98となり、カラーマッチング処理のあるCG画像の色調は、実写画像の色調に近いことが確認された。

第5章、第6章におけるアーチファクトの整合では、ブルーム効果をCG画像に付加し、実写画像との整合性を向上する手法について提案した。ここでは、CG実写合成画像に提案手法を適用したものと、提案手法を適用しないものを比較することで、その有用性を視覚的に評価した。ここで使用するCG実写合成画像は、本手法の実用性評価も考慮し、CG制作の実務を想定したシーン構成とした。具体的には、強い逆光を持つ空間（窓のある室内）を撮影した実写画像と、CGで描画したオブジェクト（黒い円）をアルファ合成することで検証用の画像を作成した。この検証ではブルーム効果についてのみ注目をするため、CGオブジェクトの反射率を低く設定し、CGのシェーディングがブルーム領域の輝度に与える影響を抑えることとした。合成

の素材となる CG 画像と実写画像（HDR 画像）は 32 ビット浮動小数点型となる。この CG 実写合成画像に対して、本手法によりブルーム効果を付加したものと、ブルーム効果を付加しないものを比較することで、本手法の CG 実写合成における視覚的整合性向上の効果について確認した。尚、この検証では、実写の露光時間に対する本手法の柔軟性を示すため、ブルーム効果ありとブルーム効果なしの両画像を 3 段階（±0EV, +1EV, +2EV）の露出において比較した。

図 38 上段, 39 上段, 40 上段はブルーム効果を付加しない CG 実写合成画像である。いずれの露出においても、CG オブジェクト（黒い円）と背景となる実写画像は画質が異なり、視覚的な不整合を生じている。図 38 下段, 39 下段, 40 下段は、同合成画像の CG 領域に対して提案手法によりブルーム効果を付加したものである。いずれの露出においても、CG オブジェクト（黒い円）と背景となる実写は画質が近づき、両者の視覚的な整合性は確保されている。

第8章 まとめと今後の展望

階調特性の整合では、当該実験から、提案手法がCG画像と実写画像の階調特性の近似に有効であることが確認された。これにより、両画像の輝度は、全ての階調において概ね一致し、シームレスな画像合成が可能となる。当該研究では撮像系のカメラ応答関数取得について、距離法、NDフィルタ法、タイムスケール法等の応用を検討したが、いずれも精度の問題、あるいは多くの手間や時間、機器や環境を要するという欠点があった。これに対し採用した方法では手間や時間がかからず、特殊な機器や環境も必要としない。また、復元されたカメラ応答関数は正確で、階調変換の結果も実写画像の階調を高い精度で近似することが確認された。

提案手法をCG制作の現場に導入する場合、カメラ応答関数はひとつの撮像系に対して、使用頻度の高い設定のものをいくつか用意しておけば、あらゆるシャッタースピードの実写画像に対応することが可能となる。また、当該手法は、CG画像のビット深度を超えない範囲であれば、あらゆるビット深度の実写画像に対応することができる。さらに、階調変換はビット深度の深いCG画像の側に対してのみ行われるため、実写画像の劣化は発生しない。

現在、CG制作の現場での階調変換は、グレーカードにより単一のリファレンスで調整するケースと、カラーチャートにより複数のリファレンスで調整するケースとが見受けられる。こうした手法の場合、階調変換に使用する輝度の基準の数は限られているため、基準以外の領域の輝度については作業者の視覚的判断に基づき内挿や外挿がなされている。本手法で使用するカメラ応答関数には、内挿や外挿の領域が存在しない。そのため、例えば極端に明るいシーンや暗いシーンにおいても、正確な階調変換が可能となる。

色特性の整合では、24色のカラーチャートを使い実験を行った。カラーマッチング処理をしていないCG実写合成画像と、カラーマッチング処理をしているCG実写合成画像を比較した。その結果、カラーマッチング処理をしていないCG実写合成画像では、多くのカラーパッチにおいて、CGと実写の色差が大きく、画像領域間に視覚的な不整合を生じていることが確認された。それに対して、当該手法によりカラーマッチング処理をしているCG実写合成画像では、多くのカラーパッチにおいて、CGと実写の色差が小さく、画像領域間の視覚的な不整合は充分に取り除かれていることが確認された。

ライトアーチファクトの整合では、当該実験から、両者の画質は十分に近似することが確認された。市販される撮像系や光学系の設計情報は一般に公開されないため、光学的な条件からブルームを推定することは難しい。現在、一般的なCG実写合成作業におけるライトアーチファクトの整合は、作業者の視覚的な判断に依存しており、合成画像の画質には作業者の習熟度に起因するばらつきを生じている。提案手法は、定量データに基づきブルームを画像に付加するため、一定水準の効果を安定的に得ることができる。また、提案手法で得られるPSFは、その復元に用いる写真と同じイメージプロセスにより得られた実写画像であれば、あらゆる露光時間でブルームを近似することができる。つまり、本手法をCG制作の現場に導入する

場合、PSFはひとつの撮像系に対して、使用頻度の高い設定のものをいくつか用意しておけば、あらゆる露光時間の実写画像に対応することが可能となる。

ACESは、制作物の色の忠実度を高いレベルで維持することにより、カラーマネジメントを標準化し、簡素化することができる。ACESワークフローではカメラ独自の色空間をACESの共通色空間に変換するためのIDTが必要となる。しかし、現実のカメラは、分光感度が理想的ではなく、IDTで変換した画像は誤差を持っている。また、ひとつの3x3マトリクスでは、非線形な誤差を除去することはできない。さらに、そもそもIDTが提供されていないカメラも数多く存在するため、現場がACESワークフローを選択できないことも多々ある。ACESワークフローはカラーマネジメントを簡素化する一方で、画像に複数回の変換を行うため、その制作パイプライン自体は煩雑となる。色空間の管理は厳密で、従来のワークフローと比較した場合、工程管理に要する時間コストは増す傾向にある。そのため、ある程度の規模を持つ制作現場でないとACES導入のメリットは薄い。

提案手法では、実写画像をシーン優先画像に変換せず、ビデオカメラが記録する表示優先の画像をそのまま使い、階調変換、色変換を行う。これは、ACESワークフローを導入できない、規模の小さい制作現場においても、CG実写合成の階調整合、色整合を可能とする。また、これらの手法では、制作パイプラインも単純化されるため、工程管理に要する時間コストを抑えることができる。さらに本研究では、実写画像を基に、CGのブルームを描画する手法について提案した。これにより、CGと実写のアーチファクトは質感が近付き、CG実写合成の整合性を更に向上させることができる。これらの提案手法では、撮像した実写画像を基にその階調特性や色特性、アーチファクトの特性を取得するため、どのようなカメラでも実行が可能となる。これは、大規模なACESワークフローによる制作においてもメリットとなる。IDTが提供されないカメラを使用する場合でも、現場は独自にIDTを開発し、画像をACESの共通色空間に変換することができる。

本研究で提案した画質整合の手法は、階調整合、色整合、アーチファクト整合の三つとなるが、いずれも作業者の習熟度に依存しない安定的な結果が得られる。これらの手法はその手順が極めて簡便で作業付加が小さく、特殊な機器や環境も必要としない。このため、本手法を既存の制作フローへ組み込むことは容易であり、制作規模に関わらず、CG実写合成の画質整合を向上させるうえでの有効な手段になりえると考える。

参考文献

- [1] ミツ峰 秀樹, 高度化する映像表現技術の動向, 2015
<https://www.nhk.or.jp/str/publica/rd/149/2.html>
- [2] Walter Arrighetti, Walter Arrighetti, "The Academy Color Encoding System (ACES): A Professional Color-Management Framework for Production, Post-Production and Archival of Still and Motion Pictures", J. Imaging Volume 3 Issue 4, 2017, 2017
- [3] Home Page - ACES Central, <https://acescentral.com/>
- [4] The Academy Color Encoding System — Overview (ACES Overview Summary 081318), 2018
- [5] ACES Project Quick Start Guide Cinematographers (DP 101519-01 for proofing), 2019
- [6] SMPTE. Academy Color Encoding Specification (ACES); Standard ST 2065-1:2012; SMPTE: White Plains, NY, USA, 2012
- [7] Michael S. Tooms, Colour Reproduction in Electronic Imaging Systems: Photography, Television, Cinematography, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2016
- [8] Erik Reinhard, Erum Arif Khan, Ahmet Oguz Akyuz, Garrett Johnson, Color Imaging: Fundamentals and Applications, A.K. Peters Ltd., Natick, MA, USA, 2008
- [9] ACES Project Checklist Digital Imaging Technicians, ACES DIT Quick Start Guide 081318
- [10] TVLogic, Camera Profile(IDT), ,
<http://ismini.tvlogic.tv/jp/wlp/cameraprofileidt.html>
- [11] 吉田彰, 小橋利美, 大川義弘, 三上泰隆, 平木祥夫, 東義晴, 山田俊治, 杉田勝彦, "ブートストラップセンシトメトリー用ステップウェッジの開発", 岡山大学医療技術短期大学部紀要, 1 巻 (1991), 19-27
- [12] 藤田 広志, 大西 義隆, 坂本 清, 滝川 厚, 堀田 勝平, 村上 進, 杜下 淳次, 山下一也, "デジタルラジオグラフィの画像評価: 1. 特性曲線", 日本放射線技術学会雑誌, 46 巻 (1990) 9 号, 1579-1592
- [13] 藤田 広志, 滝川 厚, 福西 康修, 村上 進, 杜下 淳次, 山下一也, デジタルラジオグラフィの画像評価: 2. MTF, 日本放射線技術学会雑誌, 47 巻 (1991) 4 号
- [14] 東田善治, 土井邦雄, 小寺吉衛他, 特性曲線の測定法 増感紙フィルム系 INTENSITY SCALE センシトメトリー, INNERVISION, 3, 11(1988), 26-30
- [15] 山内秀一, 大塚昭義, 橋田昌弘, 特性曲線の測定精度 距離法の精度, INNERVISION, 3, 11 (1988), 47-49
- [16] A. G. Haus, K. Rossmann, X-Ray Sensitometer for Screen-Film Combinations Used in Medical Radiology, Radiology, Vol. 94, No. 3(1970), 673-678
- [17] 山下一也, 山本 義憲, 粟井 一夫, 大竹 英則, 岡田 弘治, 田中 俊夫, 西島 昭彦, 山口 和也, 増感紙フィルムシステムの X 線センシトメトリーについて, 日本放射線技術学会雑誌/40 巻 (1984) 1 号, 59-78

- [18] 上田 克彦, 杜下 淳次, 藤川 津義, 大塚 昭義, 藤田 広志, 山内 秀一, 橋田 昌弘, 西原 貞光, 金井 一美, 中西 敬, コンピューテッドラジオグラフィの特性曲線の測定 (I), 医用画像情報学会雑誌/5 巻 (1988) 2 号, 52-59
- [19] 金井 一美, 大塚 昭義, 杜下 淳次, 山内 秀一, 上田 克彦, 西原 貞光, 田中 貞人, 中西 敬, DSA システムの特性曲線 : 測定法の比較, 日本放射線技術学会雑誌/44 巻 (1988) 10 号, 1492-1496
- [20] 藤田広志, 放射線受光系の特性曲線 デジタルラジオグラフィ, INNERVISION, 3, 11(1988), 3-15
- [21] 吉田彰, 特性曲線の測定法 増感紙-フィルム系 プートストラップ法, INNERVISION, 3, 11 (1988), 30-33
- [22] L. K. Wagner, A. G. Haus, G. T. Barnes, J. A. Bencomo , S. R. Amtey, Comparison Of Methods Used To Measure The Characteristic Curve Of Radiographic Screen/Film Systems, Proceedings of the SPIE, Volume 233, (1980), 7-10
- [23] A Yoshida, Y Hiraki, Y Ohkawa, T Yamada, K Hashimoto, K Aono, Modified Inverse Square Sensitometry for the Determination of the Characteristic Curve of Radiographic screen/film Systems, Acta Med Okayama Feb;40(1) (1986), 33-8
- [24] 杜下 淳次, 藤田 広志, 藤川 津義, 西原 貞光, 大塚 昭義, 上田 克彦, 山内 秀一, 橋田 昌弘, 輝尽性蛍光体を用いたデジタルラジオグラフィの解像特性 III レーザープリンタの MTF の測定, 医用画像情報学会雑誌/6 巻 (1989) 3 号, 153-162
- [25] 杜下 淳次, 藤田 広志, 西原 貞光, 山内 秀一, 大塚 昭義, 上田 克彦, 金井 一美, 藤川 津義, CRT イメージングカメラの MTF の測定, 医用画像情報学会雑誌/8 巻 (1991) 3 号, 77-85
- [26] 佐々木 恒平, 真田 哲也, 八重樫 祐司, Computed Radiography の解像特性評価における presampling MTF の簡易測定法の開発, 北海道科学大学研究紀要, 第 42 号 (2016)
- [27] Hiroshi Fujita, Junji Morishita, Katsuhiko Ueda, Du Yih Tsai, Akiyoshi Ohtsuka, Tsuyoshi Fujikawa, Resolution properties of a computed radiographic system, Proceedings Volume 1090, Medical Imaging III: Image Formation, (1989), 263-275
- [28] P. E. Debevec, Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs, Proc. ACM SIGGRAPH 97 (1997)
- [29] M.D. Grossberg; S.K. Nayar, "Determining the camera response from images: what is knowable?", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Volume: 25, Issue: 11, Nov. 2003), 1455-1467
- [30] Hyuk-Ju Kwon, Sung-Hak Lee, Geun-Young Lee, Kyu-Ik Sohng, Radiance map construction based on spatial and intensity correlations between LE and SE images for HDR imaging, Journal of Visual Communication and Image Representation, 38, (2016), 695-703.,
- [31] SJ Kim, H Lin, Zheng Lu, Sabine Susstrunk, Stephen Lin, M Brown, "A New In-Camera Imaging Model for Color Computer Vision and Its Application", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine

- Intelligence(Volume 34 Issue 12 December 2012), 2289–2302
- [32] Martin D. Buhmann, "Radial Basis Functions: Theory and Implementations", Cambridge University Press, Jul 3, 2003 - Mathematics -
- [33] Matt Pharr, Greg Humphreys, "Physically Based Rendering: From Theory to Implementation", Amsterdam: Elsevier, (2004)
- [34] 本田 道隆, "エッジ傾斜の有理化近似を用いたプリサンプルド MTF の計測手法", 日本放射線技術学会雑誌, 70, 4, pp. 346-358(2014)
- [35] 東出 了, 市川 勝弘, 國友 博史, 澤田 道人, "エッジ法による presampled MTF の簡便な解析方法の提案と検証", 日本放射線技術学会雑誌, 64, 4, pp. 417-425(2008)
- [36] 杉山 直樹, 飯沼 一浩, "仮想 Burger ファントムの開発", 国際医療福祉大学紀要 第 10 巻, 10, pp. 7-18(Feb. 2005)
- [37] 東出 了, "デジタル X 線画像における解像特性評価(基礎講座)", 画像通信, 35, 2, pp. 53-59(2012)
- [38] 吉田 彰, "放射線画像の物理的画質—基礎的概念と理論—", 人間と科学: 県立広島大学保健福祉学部誌, 14, 1, pp. 1-22(Mar.2014)
- [39] 阿部 宏, 倉橋 正行, 内田 勝, 横山 三吉, 畑川 政勝, "フーリエ変換による MTF 測定法の信頼性", 放射線像研究, 11, 1, pp. 11-15(1981)
- [40] 東出 了, 市川 勝弘, 國友 博史, 大橋 一也, 川野 誠, "角度計測誤差が presampled MTF へ及ぼす影響の検証と角度計測の最適手法の提案", 日本放射線技術学会雑誌, 65, 2, pp. 245-253(2009)
- [41] 杉山 直樹, 飯沼 一浩, "仮想 Burger ファントムの開発", 国際医療福祉大学紀要 第 10 巻, 10, pp. 7-18(Feb. 2005)
- [42] IEC 62220-1, Medical electrical equipment – Characteristics of digital X-ray imaging devices – Part 1: Determination of the detective quantum efficiency, IEC, 2003
- [43] 東出 了, 市川 勝弘, 國友 博史, 澤田 道人, "エッジ法による presampled MTF の簡便な解析方法の提案と検証", 日本放射線技術学会雑誌, 64, 4, pp. 417-425(2008)
- [44] Higashide Ryo, Ichikawa Katsuhiko, Kunitomo Hiroshi, Ohashi Kazuya, "Application of a variable filter for presampled modulation transfer function analysis with the edge method", Radiological Physics and Technology, 8, 2, pp. 320-330(July 2015)
- [45] Buhr E, Günther-Kohfahl S, Neitzel U, "Accuracy of a simple method for deriving the presampled modulation transfer function of a digital radiographic system from an edge image", Med Phys, 30, 9, pp. 2323-2331(Sep. 2003)
- [46] 松本政雄, "デジタル時代の医用画像情報技術セミナー. V イメージ評価 2: 11. 表計算ソフト Excel を用いたエッジ法によるプリサンプルド MTF の実践的測定法", Innervision, 19, 1, pp. 37-43(2004)
- [47] 佐々木 恒平・真田 哲也・八重樫 祐司, "Computed Radiography の解像特性評価における presampling MTF の簡易測定法の開発", 北海道科学大学研究紀要第 42 号, pp. 117-122(Dec. 2016)

- [48] 大久保 真樹, 和田 真一, 小林 悌二, 李 鎔範, 蔡 篤儀, “CT 画像系における line spread function(LSF)および slicesensitivity profile(SSP)と point spread function(PSF)の関連”, 医学物理, 24, 3, pp. 115-122(2004)
- [49] Masaki Okubo, Shinichi Wada, Masatoshi Saito, “Validation of the blurring of a small object on CT images calculated on the basis of three-dimensional spatial resolution”, Igaku Butsuri, 25, 3, pp. 132-40(2005)
- [50] E. W. Marchand, “Derivation of the Point Spread Function from the Line Spread Function”, Journal of the Optical Society of America, 54, 7, pp. 915-919(1964)
- [51] E. W. Marchand, “From Line to Point Spread Function: The General Case”, Journal of the Optical Society of America, 55, 4, pp. 352-354(1965)
- [52] 三宅 洋一, “画像解析の基礎と応用 (II)画像関数とスプレッドファンクション”, 日本印刷学会誌 1991 年 28 卷 2 号, p. 145-149

研究業績

I. 学術雑誌論文

- [1] 高橋信雄, 浦田真由, 遠藤守, 安田孝美
CG 実写合成における階調変換
図学研究, 通巻第 166 号, pp.3-12, (2021.9)
- [2] 高橋信雄, 浦田真由, 遠藤守, 安田孝美
CG 実写合成におけるブルーム効果
図学研究, 通巻第 168 号 (2022.9 採録決定)

II. 国際会議

- [1] Nobuo Takahashi,
“Hamayuri”,
SIGGRAPH Asia 2013 Computer Animation Festival,
Article No.: 75, p.1, (2013.11)
- [2] Nobuo Takahashi,
“Asia Symphony”,
SIGGRAPH Asia 2015 Computer Animation Festival,
PROGRAM GUIDE, p.12, (2015.11)
- [3] Nobuo Takahashi, Mayu Urata, Mamoru Endo, Takami Yasuda,
“Tone Mapping of CG Images Using Camera Response Functions”,
2021 4th International Conference on Computer Graphics
and Virtuality (ICCGV 2021), p.37, (2021.11)

III. 国内学会・研究会・シンポジウム等

- [1] 高橋信雄, 茂登山清文, 安田孝美:
“CG 実写合成における階調特性の整合”,
日本図学会 2014 年度春季大会, p.3, (2014.4)
- [2] 高橋信雄, 茂登山清文, 安田孝美:
“視覚解像度に基づく CG 実写合成のための画像変換”,
映像表現&コンピュータグラフィックス
映像表現・芸術科学フォーラム 2014,

映像情報メディア学会技術報告 = ITE technical report
第 38 巻 16 号, pp.71-74,(2014.3)

[3] 高橋信雄, 浦田真由, 遠藤守, 安田孝美:
“カメラの PSF に基づく CG のブルーム効果”,
画像電子学会第 294 回研究会, 映情学技報,
vol.44, no.22, AIT2020-166, pp.17-20, (2020.9)

[4] 高橋信雄, 浦田真由, 遠藤守, 安田孝美:
“カメラの PSF に基づく CG のパープルフリッジ効果”,
情報処理学会研究報告, 2020-CG-179 号, pp.1-4, (2020.9)

[5] 高橋信雄, 金 京柱, 浦田真由, 遠藤守, 安田孝美:
“CG 実写合成におけるカラーマッピング”,
日本図学会 2021 年度大会,
大会学術講演論文集 2021 年度, pp.101-104, (2021.11)

[6] 高橋信雄, 浦田真由, 遠藤守, 安田孝美:
“撮像系の PSF に基づく CG 画像のブルーム効果”,
2022 年情報文化学会九州支部大会, p.3, (2022.2)

IV. 受託研究

[1] 高橋信雄,
“メディアアート作品の制作”,
スマートエンジニア株式会社, (2017.10-2019.9)

V. 受賞

[1] NICOGRAPH 全天周コンテンツコンテスト 2016
“共徳丸 (kyotokumaru)”,
動画・実写 優秀賞, (2016.11)

その他の研究業績

[1] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2014
アートセッション オーガナイザー, (2014)

[2] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2015
アートセッション オーガナイザー, (2015)

[3] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2016
アートセッション オーガナイザー, (2016)

[4] 平成 29 年度文化庁メディア芸術祭愛知展
キュレーター, (2017)

[5] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2017
アートセッション オーガナイザー, (2017)

[6] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2018
アートセッション オーガナイザー, (2018)

[7] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2019
アートセッション オーガナイザー, (2019)

[8] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2020
アートセッション オーガナイザー, (2020)

[9] 可視化情報学会 可視化情報シンポジウム 2021
アートセッション オーガナイザー, (2021)

謝辞

本論文は筆者が名古屋大学大学院情報科学研究科社会システム情報学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものである。名古屋大学大学院情報学研究科社会情報学専攻教授 安田孝美先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。同専攻教授 秋庭史典先生、並びに、同専攻准教授 遠藤守先生には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。同専攻准教授 浦田真由先生、並びに、名古屋芸術大学芸術学部芸術学科教授 茂登山清文先生には有益なご助言を戴いた。ここに感謝の意を表す。