

照明条件を変化させた画像の高速生成
手法に関する研究

(A Study on methods for generating images with smooth
transition of illumination)

広島大学大学院工学研究科 情報工学専攻
知的システムモデリング研究室

眞鍋 知久

概要

コンピュータグラフィックス（以下、CG）やカメラで撮影された写真において、光源位置や光源の強さなどの照明条件は、画像の印象に大きく影響する。照明条件により対象の見え方は様々に変化するため、ユーザが望む結果が得られるように、照明条件を変えて写真撮影、CG作成は行われる。CGの場合、レンダリングするための環境と3次元物体データ（3Dモデル）が存在するならば条件を変えて画像生成することができるが、高精度な画像を生成する場合には、膨大な計算時間を要する。カメラで撮影する場合は、撮影前にユーザが望む照明条件を作り出すことが必要であり、特に屋外光の場合には季節や時間、天候など様々な制約を受ける。

照明設計の手法は、大きく順問題アプローチと逆問題アプローチに分類される。順問題アプローチでは、設計者によって指定された光源の設置位置、配光特性、灯軸、色などの光源パラメータをもとに室内の輝度分布を算出し、照明効果の比較、検討が行われる。照明を扱う際には、光源から直接物体を照らす直接光だけでなく、物体に当たった直接光が反射して他の物体を照らす間接光を考慮することが重要である。たとえば、ホテルのロビーや室内などは、光源をカバーで覆うことで直接光をカットし、壁面を介した間接光によるやわらかい光で空間を照らしている。このような室内インテリアでの照明を取り扱ううえで間接光を考慮することは不可欠である。

間接光まで考慮し、写実的な画像を照明シミュレーションに基づいて算出する手法にはRadiosity法やPhoton Mapping法などがある。これらの手法は、照度や輝度値の算出精度が高い半面、膨大な計算時間を要する。一方、Image Based Rendering (IBR)は、既存の画像をもとにして新たな画像を生成する手法であり、人間が見て違和感のない自然な画像を比較的高速に生成することができる。本研究では、照明設計の事前確認やアニメーションなどへの応用を想定し、リアルな画像を時間のかかる照明シミュレーションを行わずに高速生成する手法の開発を目指す。本論文で提案する手法は、あらかじめ異なる2種類の照明条件（光源位置、光源の強さ、色など）の下で生成された画像（または照度分布）を用い、その2種類の照明条件の間にある照明条件での画像や照度分布を補間法により高速に算出する。

本論文では、第1章にて本研究を行うに至った背景について述べたのち、関連する研究、以降の章にて述べる手法の概要等について述べている。

第2章では、異なる2種類の光源位置のもとであらかじめ算出された照度分布を、特徴を考慮して補間することにより、中間の光源位置での照度分布を高速に算出する方法を提案する。特徴を考慮した補間方法にモーフィング手法があり、対象の特徴をとらえた特徴線分を変形（ワーピング）させることで、2つの対象を混ぜ合わせた画像を生成できる。この考え方を照明の変化に応用する。事前に算出された物体面上での照度分布から等しい照度

値を結んだ閉曲線(等照度線と呼ぶ)を算出し、これを特徴線分と考える。2つの光源位置での等照度線がそれぞれの光源位置でのどの等照度線に変化するかを対応づけたのち、光源移動に応じてワーピングさせることで任意の光源位置での等照度線を算出する。そして、この変形された等照度線から照度分布を算出する。この手法を“イルミネーションモーフィング”と呼ぶ。光源設置位置を変更した場合でも、特に間接光を考慮した高精度な照度分布計算に必要な計算時間に比べて、非常に短い時間でその光源位置における照度分布を算出できるため、光源位置を変更しながら効率的に照明効果を比較、検討することが可能となる。しかし、3Dモデルを形成するには詳細な3次元の位置情報が必要であるため、モデルを構築することは多くの労力を要する。3Dモデルが必要なことがイルミネーションモーフィング手法の課題の一つである。また、2つの光源位置での等照度線を互いに対応づける処理において、特にトポロジーが異なる場合(2つの光源位置間で等照度線が複数に分岐、一つに統合する、あるいは発生、消滅するなど)の対応づけを如何に行うかという課題が残された。

第3章では、イルミネーションモーフィング手法の幅広い利用を可能とするために、3Dモデルを用いず、画像情報のみから照明条件の変化した画像を高速に生成する方法を提案する。すなわち、異なる光源位置(あるいは光源の強さ、色)のもとで生成された2種類の画像から、2つの光源位置の間での任意の光源位置における画像を高速に生成する。画像中に表示されている物体面の輝度値より、等しい輝度値を結んだ閉曲線(等輝度線)を算出し、等輝度線の特徴線分と考えたイルミネーションモーフィングを行うことにより、任意の光源位置での画像を生成する。また、等輝度線を発生させる輝度値の選択の改善も行っている。イルミネーションモーフィングは画像中の輝度分布を一度等輝度線という形に変換しているため、輝度分布の特徴をよく表す適切な等輝度線を用いなければ輝度分布の特徴が失われてしまう。等輝度線の本数が多いほど輝度分布の特徴を表しやすいが、等輝度線同士の対応づけ処理が複雑になり、計算時間が多くなる。そこで人間の目の視覚特性や画像間での等輝度線の対応関係を考慮して、等輝度線を発生させる輝度値を適切に選ぶ方法を提案した。適切な等輝度線を選択することで、少ない本数でも輝度分布の特徴を適切に表し、生成される画像の精度を向上させる。さらに、カラー画像への対応についても検討を行っている。輝度情報を含む表色系を用いて画像を表し、イルミネーションモーフィングを行うことにより、生成される画像の精度向上及び処理の効率化を行った。以上のように、ユーザが容易に入手できる画像情報のみを用いることで、広範な分野への応用が期待できるとともに、イルミネーションモーフィング処理の最適化、効率化により生成される画像の精度を向上させた。しかし、トポロジーの異なる等輝度線の対応づけを如何に行うかという課題の根本的解決が残されている。

イルミネーションモーフィングでは等輝度線の対応づけを適切に行う課題が残されているため、複雑な等輝度線を持つ物体、画像には適用し難い。特に物体面上に模様や凹凸がある場合は、輝度分布にも細かな凹凸が発生するため等輝度線が形成、対応づけ難い。そこで等

輝度線同士の対応づけを必要としない新たなアプローチを第4章で提案する。IBRの一手法であるレイデータベースアプローチは、多数枚の異なる入力画像より光線データベースを構築し、任意の視点位置の画像を高速に生成する。ただし、光源位置は変更できない。レイデータベースアプローチの考え方を照明変化画像生成に応用し、照明条件の異なる2枚の入力画像の輝度値を再パラメータ化することで照明関数を構築する。そして照明条件の変化した画像を生成する際には、照明関数を参照して輝度値を取得し、画像にマッピングすることで高速に画像を生成する。照明関数は面法線に基づいて構築される。これは、物体面の輝度値は、面法線を基準にした光源方向ベクトルと視線方向ベクトルに依存するからである。このように面法線に基づいて、光源位置が異なる画像から照明関数を構築することにより、光源の移動を考慮した画像生成が可能になる。提案する手法は、イルミネーションモーフィングのように複数の画像間での等輝度線の対応づけを必要としないため、複雑な形状、トポロジーが異なる輝度分布に対しても適用できる。特に凹凸面のある物体においては、凹凸面の陰影の変化まで表現できるため、レリーフのような物体に有効な手法である。照明関数を用いた手法は、基礎的研究の段階にあり、表現方法の拡張が課題である。影が落ちている物体から照明関数を構築し、生成された画像に如何に影を表現するか、また複数の光源を同時に別方向に動かす場合の表現法などがあげられる。

目次

第1章 序論	1
1.1 コンピュータグラフィックスを用いた室内照明設計	1
1.2 写実的な画像の生成	2
1.3 大域照明モデル	2
1.4 関連研究	4
1.5 提案手法の概要	4
1.5.1 等輝度(照度)線を用いた画像生成手法	6
1.5.2 照明関数を用いた画像生成手法	7
第2章 3次元モデルを用いた等照度線の変化に基づく照明変化画像生成	8
2.1 概説	9
2.1.1 背景	9
2.1.2 関連研究	9
2.1.3 提案手法	10
2.2 提案手法の概要	12
2.3 等照度線の生成	15
2.3.1 等照度線の線分パターン生成	15
2.3.2 等照度線の線分列トレース	19
2.3.3 等照度線の補外処理	21
2.4 等照度線の対応付け	24
2.4.1 輪郭線の対応付けに関連する研究	24
2.4.2 nesting tree による等照度線間の対応付け	26
2.4.3 面積重複率による対応判定	31
2.4.4 等照度線の分岐	32
2.4.5 等照度線の発生と消滅	35
2.5 構成点間の対応付け	37

2.5.1 等照度線の類似度を用いた構成点間の対応付け手法の分類	37
2.5.2 等照度線類似度の算出	39
2.5.3 類似度に応じた構成点对の応付け手法	41
2.6 適用例	45
2.6.1 適用例モデル	45
2.6.2 適用例と他手法の結果との比較	47
2.6.3 直射光成分とテクスチャマッピングの導入	50
2.7 結言	52
第3章 画像を用いた等輝度線の変化に基づく照明変化画像生成	53
3.1 概説	54
3.1.1 背景	54
3.1.2 提案手法の特徴	56
3.2 提案手法の概要	58
3.3 画像情報からの等輝度線の算出	64
3.3.1 等輝度線の線分の作成	64
3.3.2 等輝度線の線分列トレース	65
3.3.3 等輝度線の補外処理	67
3.4 等輝度線を配置する輝度値の決定	69
3.4.1 等輝度線の配置について考慮すべき点	69
3.4.2 累積頻度分布を用いた等輝度線の輝度値サンプル法	71
3.4.3 輝度値の頻度に対する重み付け手法	73
3.5 輝度値画像への適用例	74
3.5.1 入力画像(輝度分布)と領域分割結果	74
3.5.2 等輝度線配置結果	75
3.5.3 輝度分布表示結果	78
3.6 カラー画像への拡張	83
3.6.1 照明変化時の HLS 成分の変化	83
3.6.2 カラー画像に対する照明変化画像生成の流れ	85

3.7 カラー画像の適用例	87
3.7.1 適用例 1 (光源の色が固定のケース)	87
3.7.2 適用例 2 (光源の色が変化するケース)	88
3.7.3 適用例 3 (室内画像)	89
3.8 結言	92
第 4 章 照明関数を用いた照明変化画像生成	93
4.1 概説	94
4.1.1 提案手法の位置づけ	94
4.1.2 提案手法の概要	95
4.2 提案手法	97
4.2.1 光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係性	97
4.2.2 照明関数	98
4.2.3 提案手法の概略処理の流れ	100
4.3 照明関数のパラメータ	102
4.3.1 光源からの距離 r の削減	102
4.3.2 光線と視線に関するパラメータ $(\theta_L, \theta_V, \varphi)$ の近似	103
4.3.3 光源の放射強度 $I_{q\lambda}$ の削除	105
4.3.4 近似された照明関数 $g_{\lambda,j}$	105
4.3.5 照明関数の各パラメータの算出	106
4.4 レンダリング	107
4.5 凹凸面への拡張	109
4.6 適用例	111
4.6.1 適用例 1(凸型に浮き上がる文字を持つ物体面)	112
4.6.2 適用例 2(凹凸を持つレリーフのカラー画像)	114
4.6.3 適用例 1(凸型に浮き上がる文字を持つ物体面)	117
4.6.4 適用例生成に要する処理時間	119
4.7 結言	120

第 5 章 結論	121
参考文献	123
謝辭	

第1章 序論

コンピュータグラフィックス（以下、CG）やカメラで撮影された写真において、光源位置や光源の強さなどの照明条件は、画像の印象に大きく影響する。照明条件により対象の見え方は様々に変化するため、ユーザが望む結果が得られるように、照明条件を変えて写真撮影、CG作成は行われる。CGの場合、レンダリングするための環境と3次元の物体データ(3次元モデル)が存在するならば条件を変えて試行錯誤することができるが、大域照明や相互反射光などを考慮したより精密な画像を生成する場合には、膨大な計算時間を要する。カメラで撮影する場合は、撮影前にユーザが望む照明条件を作り出すことが必要であり、特に屋外光の場合には季節や時間、天候など様々な制約を受ける。以上の問題に対して、照明条件が変化する画像を高速かつ容易に生成する方法について研究した。

1.1 コンピュータグラフィックスを用いた室内照明設計

コンピュータグラフィックス（以下、CG）による可視化技術は、室内照明設計にとって有効な技術である。照明設計の手法は、大きく順問題アプローチと逆問題アプローチに分類される。順問題アプローチでは、設計者によって指定された光源の設置位置、配光特性、灯軸、色などの光源パラメータをもとに、室内の輝度分布を算出する。逆問題アプローチでは、設計者が希望する輝度分布を実現するための最適な光源パラメータを算出する。

光源の設置位置、配光特性、灯軸、色などは重要な光源パラメータであり、順問題アプローチにおいて、これらを変更しながら室内の照明効果を比較、評価することがしばしば行なわれる。これらの光源パラメータのうち、配光特性、灯軸、色を変更する場合には、これらの光源パラメータを変更したときの画像を高速に生成する手法がすでに開発されており、室内照明効果の効率的な比較、評価が可能である。しかし、光源の設置位置を変更する場合には、室内の照明計算をやり直す必要がある。

照明を扱う際には、光源から直接物体を照らす直接光だけでなく、物体に当たった直射光が反射して他の物体を照らす間接光を考慮することが重要である。屋外照明においては、太陽からの直接光が非常に高い寄与を持つが、室内照明においては直射光よりも間接光の方が重要である場面が多い。室内における間接光は、それぞれの物体が互いの反射光によって照らし合うことから相互反射光と呼ばれる。たとえば、ホテルのロビーや室内などは、光源をカバーで覆うことで直射光をカッ

トし、壁面を介した間接光による柔らかい光で空間を照らしている。このような室内インテリアでの照明を取り扱ううえで間接光である相互反射光を考慮することは不可欠である。

1.2 写実的な画像の生成

間接光まで考慮し、より現実に近い写実的(Photorealistic)な画像は厳密な照明シミュレーションによって照度値、輝度値を算出することで生成される。照明シミュレーションに基づく(Physical Based)手法には、Radiosity 法や Photon Mapping 法などがある。これらの手法は、画像に表現される照度、輝度値の算出精度が高い反面、膨大な計算時間を要する問題がある。一方、照明シミュレーションを行わず生成される画像の見え方を重視して画像生成を行う(Appearance Based)手法も開発されている。Appearance Based 手法は、Physical Based 手法に比べて高速に画像生成できる利点があるが、厳密な照明シミュレーションに基づく手法ではないため、照明設計に用いることはできない。また近年、既存の画像をもとにして新たな画像を生成する Image Based Rendering (IBR)手法が開発されている。IBR は、人間が見て違和感のない自然な画像を比較的高速に生成することができる。IBR も Appearance Based な手法ではあるが、Physical Based 手法における照明モデルを効率よくかつ効果的に簡略化することができれば、Physical Based 手法によって生成される Photorealistic な画像に近いリアルな画像を生成することができる。

本研究では、照明設計の事前確認やアニメーションなどへの応用を想定し、リアルな画像を時間のかかる照明シミュレーションを行わずに高速生成する手法の開発を目指す。照明設計では、所望の光源位置に光源を設置し、長い計算時間のかかる照明シミュレーションを行う前の事前確認として用いることができる。照明効果を事前に確認することができるため、照明シミュレーションを行い、精度よい検討を行うべきか否かの判断に有効な手段となりうる。また、エンターテイメントとして、アニメーションなどに用いる場合、人の目が見て違和感のないレベルの画像で十分に需要を満たすことができる。

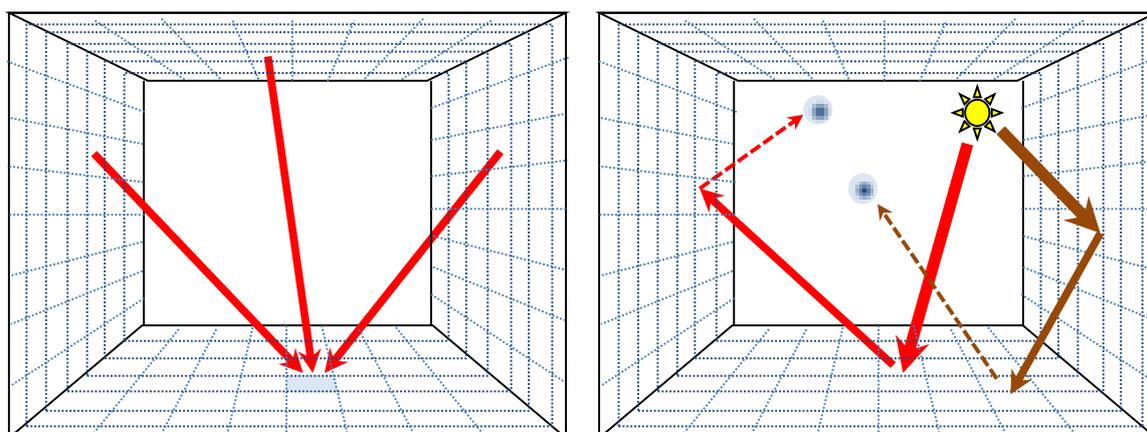
1.3 大域照明モデル

光源から直接物体を照らす直接光の影響は高速に算出されるが、実際の照明問題においては間接照明が与える影響は大きい。室内であれば壁面に反射して物体を間接的に照らす相互反射光を考慮することが重要であり、周囲の壁面も照らされる物体にとっては光源であるから、大域照明と呼ばれる。

相互反射光を計算する基礎的な方法が、Cohen らや西田らによって提案された Radiosity 法[1][2]である。相互反射光は、物体間同士の位置関係や遮蔽物の有無に基づくフォームファクタから算出される。すべての物体を微小な面(パッチ)の集合に分割し、すべてのパッチ間でのフォームファクタから Radiosity 方程式を作成し、これを解くことで相互反射光を得る(図 1.3.1(a))。相互反射光では、反射した二次反射光によって照らされた物体がさらに他の物体を照らすため、多次の相互反射が考えられる。より実際に近い照明効果を算出するには、光が減衰するまで反射計算を繰り返す必要がある。反射回数に乗じた計算時間を要する。実際にはすべてのパッチが受けとる照度値が閾値域になるまで反復を繰り返す。

また、照明シミュレーションに基づく手法として、光源から光子(フォトン)を放出し、そのフォトンの動きをトレースすることで相互反射光を算出するフォトンマッピング[48]が提案されている。フォトンマッピングは、光の粒子としての動きを模擬した手法である。光源から放出されたフォトンには、到達した物体を照らしたのち、物体面で反射して次の物体へ向かう。フォトンのエネルギーの減衰を考慮し、一つのフォトンが照らすすべての物体の照度値を求める。現実には無数のフォトンが、光源からすべての方向に放出され、室内の間接照明となる(図 1.3.1(b))。故に、光源からのフォトンの数が多くなればなるほど、算出される相互反射光はより現実に近い値となるが、比例して計算時間が増大する。

これらの手法により算出される相互反射計算は計算コストが非常に高いため、光源の設置位置を変更して、光の相互反射を考慮した室内照明効果の効率的な比較、評価を行うのは非常に困難である。



(a) Radiosity 法による相互反射光

(b) フォトンマッピングにおける光子追跡

図 1.3.1 相互反射光の算出

1.4 関連研究

順問題アプローチに属する手法として、壁面間の相互反射光を考慮して照度計算を行う Radiosity 法が Cohen らや西田らによって提案された[1][2]のち、質感の向上、計算時間の短縮、精度向上のための手法の開発がなされた。質感の向上については、拡散反射成分だけでなく鏡面反射成分も考慮に入れた Immel ら[3], Kajiya らの手法[4], ほこりや煙などの室内の微粒子による光の散乱を合わせて表現する Rushmeier らの手法[5], Radiosity 法と RayTracing 法を組み合わせた Wallace らの手法[6]が挙げられる。計算時間の短縮については、Cohen ら[7], Chao ら[8], Chen らの手法[9]が、精度の向上については、Wallace ら[10], Baum ら[11], Sillion らの手法[12]が挙げられる。これらの開発により、極めて写実的な画像を生成することが可能となった。

室内照明設計における順問題アプローチでは、光源の設置位置、配光特性、灯軸、色などの配光特性を変更しながら、室内の照明効果を比較、評価することはしばしば行なわれる。これらの光源パラメータのうち、配光特性、灯軸、色を変更したときの画像を高速に生成する手法が、土橋らにより開発された[13]。この手法では、光源の配光特性を、球面調和関数を基底関数として級数展開しておき、重みつき加算に用いる重みを変更することにより、配光特性を変更したときの画像を高速に生成することができる。しかし、相互反射環境下において光源の設置位置を変更する場合には、Radiosity 法による相互反射計算をやり直す必要があり、室内照明の効率的な比較、評価が非常に困難である。計算時間の短縮を目的とした文献[7][8][9]の手法を用いたとしても、光の相互反射計算は、非常に計算コストが高いため、照明設計に応用するには計算時間がかかりすぎる。そのため、光源設置位置を変更したときの画像を高速に生成する手法の開発が望まれている。

また、Sloan ら[40]は物体表面上での光の伝達を前計算する PRT を提案し、環境照明下のシーンのリアルタイムなレンダリングを可能にした。PRT 法は、光の伝達関数を、球面調和関数[40]や Haar Wavelet[41]といった基底関数を用いて近似することで、リアルタイムなレンダリングを可能にしている。Zhou ら[42]や Sun ら[43]は PRT を改良し、物体が移動するような動的なシーンへの適用を可能にした。また、shadow map を用いて環境照明下の動的シーンを高速にレンダリングする手法[44, 45]も提案されている。しかし、これらの手法でも光源の設置位置を変更した場合には、画像を高速生成することができない。

1.5 提案手法の概要

本研究では、照明設計の事前確認やアニメーションなどへの応用を想定し、リアルな画像を時間

のかかる照明シミュレーションを行わずに高速生成することを目的とする。本研究における画像生成手法では、あらかじめ異なる2種類の照明条件(光源位置, 光源の強さ, 色など)の下で生成された画像(または照度分布)を用い, その2種類の照明条件の間にある照明条件での画像や照度分布を補間法により高速に算出する(図1.5.1参照)。

この目的を目指す手法において最も簡単な手法は線形補間手法である。光源の設置位置を変更したときの画像を高速に得るために, いくつかの光源位置(代表光源)においてあらかじめ相互反射計算を行い, それらを単純に線形補間することにより, 中間位置に光源を設置したときの相互反射光を得る。しかし, この手法では, 光源の設置位置を変更したときの陰影, 特にハイライトや影の部分の変化が不自然になるといった問題があるため, リアルな画像を生成できるとは言えない。

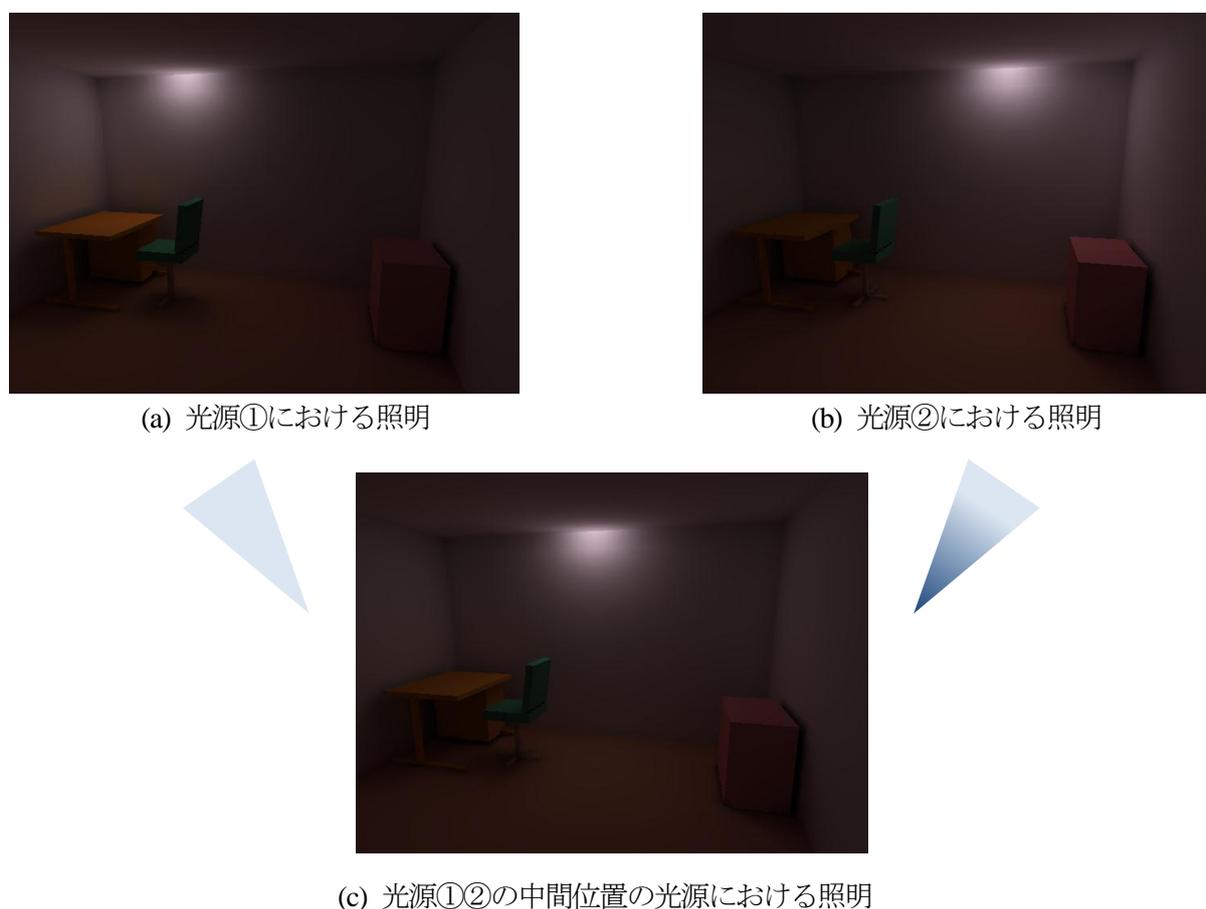


図1.5.1 相互反射光の算出

1.5.1 等輝度(照度)線を用いた画像生成手法

第2章では、異なる2種類の光源位置のもとであらかじめ算出された照度分布を、特徴を考慮して補間することにより、中間の光源位置での照度分布を高速に算出する方法を提案する。特徴を考慮した補間方法にモーフィング手法があり、対象の特徴をとらえた特徴線分を変形(ワーピング)させることで、2つの対象を混ぜ合わせた画像を生成できる。この考え方を照明の変化に応用する。事前に算出された物体面上での照度分布から等しい照度値を結んだ閉曲線(等照度線と呼ぶ)を算出し、これを特徴線分と考える。2つの光源位置での等照度線がそれぞれの光源位置でのどの等照度線に変化するかを対応づけたのち、光源移動に応じてワーピングさせることで任意の光源位置での等照度線を算出する。そして、この変形された等照度線から照度分布を算出する。この手法を“イルミネーションモーフィング”と呼ぶ。光源設置位置を変更した場合でも、特に間接光を考慮した高精度な照度分布計算に必要な計算時間に比べて、非常に短い時間でその光源位置における照度分布を算出できるため、光源位置を変更しながら効率的に照明効果を比較、検討することが可能となる。

第3章では、イルミネーションモーフィング手法の幅広い利用を可能とするために、3Dモデルを用いず、画像情報のみから照明条件の変化した画像を高速に生成する方法を提案する。すなわち、異なる光源位置(あるいは光源の強さ、色)のもとで生成された2種類の画像から、2つの光源位置の中間での任意の光源位置における画像を高速に生成する。画像中に表示されている物体面の輝度値より、等しい輝度値を結んだ閉曲線(等輝度線)を算出し、等輝度線の特徴線分と考えたイルミネーションモーフィングを行うことにより、任意の光源位置での画像を生成する。また、等輝度線を発生させる輝度値の選択の改善も行っている。イルミネーションモーフィングは画像中の輝度分布を一度等輝度線という形に変換しているため、輝度分布の特徴をよく表す適切な等輝度線を用いなければ輝度分布の特徴が失われてしまう。等輝度線の本数が多いほど輝度分布の特徴を表しやすいが、等輝度線同士の対応付け処理が複雑になり、計算時間が多くなる。そこで人間の目の視覚特性や画像間での等輝度線の対応関係を考慮して、等輝度線を発生させる輝度値を適切に選ぶ方法を提案した。適切な等輝度線を選択することで、少ない本数でも輝度分布の特徴を適切に表し、生成される画像の精度を向上させる。さらに、カラー画像への対応についても検討を行っている。輝度情報を含む表色系を用いて画像を表し、イルミネーションモーフィングを行うことにより、生成される画像の精度向上及び処理の効率化を行った。以上のように、ユーザが容易に入手できる画像情報のみを用いることで、広範な分野への応用が期待できるとともに、イルミネーションモーフィング処理

の最適化、効率化により生成される画像の精度を向上させた。

1.5.2 照明関数を用いた画像生成手法

イルミネーションモーフィングでは等輝度線の対応づけを適切に行う課題が残されているため、複雑な等輝度線を持つ物体、画像には適用し難い。特に物体面上に模様や凹凸がある場合は、輝度分布にも細かな凹凸が発生するため等輝度線が形成、対応づけ難い。そこで等輝度線同士の対応づけを必要としない新たなアプローチを第4章で提案する。IBRの一手法であるレイデータベースアプローチは、多数枚の異なる入力画像より光線データベースを構築し、任意の視点位置の画像を高速に生成する。ただし、光源位置は変更できない。レイデータベースアプローチの考え方を照明変化画像生成に応用し、照明条件の異なる2枚の入力画像の輝度値を再パラメータ化することで照明関数を構築する。そして照明条件の変化した画像を生成する際には、照明関数を参照して輝度値を取得し、画像にマッピングすることで高速に画像を生成する。照明関数は面法線に基づいて構築される。これは、物体面の輝度値は、面法線を基準にした光源方向ベクトルと視線方向ベクトルに依存するからである。このように面法線に基づいて、光源位置が異なる画像から照明関数を構築することにより、光源の移動を考慮した画像生成が可能になる。提案する手法は、イルミネーションモーフィングのように複数の画像間での等輝度線の対応づけを必要としないため、複雑な形状、トポロジーが異なる輝度分布に対しても適用できる。特に凹凸面のある物体においては、凹凸面の陰影の変化まで表現できるため、レリーフのような物体に有効な手法である。

第2章

3次元モデルを用いた等照度線の変化に基づく照明変化画像生成

2.1 概説

2.1.1 背景

コンピュータグラフィックス（以下、CG）による可視化技術は、室内照明設計にとって有効な技術である。照明設計の手法は、大きく順問題アプローチと逆問題アプローチに分類される。順問題アプローチでは、設計者によって指定された光源の設置位置、配光特性、灯軸、色などの光源パラメータをもとに、室内の輝度分布を算出する。逆問題アプローチでは、設計者が希望する輝度分布を実現するための最適な光源パラメータを算出する。

光源の設置位置、配光特性、灯軸、色などは重要な光源パラメータであり、順問題アプローチにおいて、これらを変更しながら室内の照明効果を比較、評価することがしばしば行なわれる。これらの光源パラメータのうち、配光特性、灯軸、色を変更する場合には、これらの光源パラメータを変更したときの画像を高速に生成する手法がすでに開発されており、室内照明効果の効率的な比較、評価が可能である。しかし、光の相互反射を考慮しつつ光源の設置位置を変更する場合には、Radiosity法[1][2]による相互反射計算をやり直す必要があり、室内照明効果の効率的な比較、評価が非常に困難である。そのため、光源設置位置を変更したときの画像を高速に生成する手法の開発が望まれている。

2.1.2 関連研究

順問題アプローチに属する手法として、壁面間の光の相互反射を考慮して照度計算を行なうRadiosity法がCohenらやNishitaらによって提案された[1][2]。その後、質感の向上、計算時間の短縮、精度向上のための手法の開発がなされた。質感の向上については、拡散反射成分だけでなく鏡面反射成分も考慮に入れたImmelら[3]、Kajiyaらの手法[4]、ほこりや煙などの室内の微粒子による光の散乱を合わせて表現するRushmeierらの手法[5]、Radiosity法とRayTracing法を組み合わせたWallaceらの手法[6]が挙げられる。計算時間の短縮については、Cohenら[7]、Chaoら[8]、Chenらの手法[9]が、精度の向上については、Wallaceら[10]、Baumら[11]、Sillionらの手法[12]が挙げられる。これらの開発により、極めて写実的な画像を生成することが可能となった。

室内照明設計における順問題アプローチでは、光源の設置位置、配光特性、灯軸、色などの配光特性を変更しながら、室内の照明効果を比較、評価することはしばしば行なわれる。これらの光源パラメータのうち、配光特性、灯軸、色を変更したときの画像を高速に生成する手法が、土橋らに

より開発された[13]. この手法では, 光源の配光特性を, 球面調和関数を基底関数として級数展開しておき, 重みつき加算に用いる重みを変更することにより, 配光特性を変更したときの画像を高速に生成することができる. しかし, 相互反射環境下において光源の設置位置を変更する場合には, Radiosity 法による相互反射計算をやり直す必要があり, 室内照明の効率的な比較, 評価が非常に困難である. 計算時間の短縮を目的とした文献[7][8][9]の手法を用いたとしても, 光の相互反射計算は, 非常に計算コストが高いため, 照明設計に応用するには計算時間がかかりすぎる. この問題を解決し, 光源の設置位置を変更したときの画像を高速に得るために, いくつかの光源位置においてあらかじめ相互反射計算を行ない, それらの画像を単純に線形補間することにより, 中間位置に光源を設置したときの近似画像を生成する手法が用いられてきた. しかし, この手法では, 光源の設置位置を変更したときの陰影, 特にハイライトや影の部分の変化が不自然になるといった問題がある.

2.1.3 提案手法

本章では, 複数の光源設置位置をサンプリングし, その位置に光源を設置して相互反射計算を行なって得られた照度分布から, それらの中間位置に光源を設置したときの照度分布を算出する手法を提案する. すなわち, サンプリングした光源位置における照度分布から, 等照度線を算出し, その等照度線にモーフィングを施すことにより, 中間位置に光源を設置したときの照度分布を算出する. 以下, この手法を“イルミネーションモーフィング”と呼ぶ. イルミネーションモーフィングでは, 照度計算点において, 光源を中間位置に設置したときの照度値は, 単純な線形補間では算出できないことに着目し, 等照度線の位置や形状など, 幾何的情報の補間を行なうアプローチを取ることにより, 光源位置の変化に伴う照度分布の変化に対応する.

イルミネーションモーフィングを用いることにより, サンプリングした光源位置の中間位置に実際に光源を設置し, Radiosity 法による相互反射計算を行なって得られる結果に近い照度分布を得る. 光源設置位置を変更した場合でも Radiosity 法による相互反射計算を行なうのに必要な計算時間に比べて, 非常に短い時間でその光源位置における照度分布を算出できる. そのため, 光源位置を変更しながら効率的に照明効果を比較, 評価することが可能となる.

ただし, 提案手法では, 以下の制約条件を設ける.

- ・ 2次反射以上の光の成分のみに適用する.
- ・ 直射光成分は別に計算しておき, 最後に2次反射以上の光の成分に足し合わせる.

直射光成分を含む照度分布では, 光源と照度計算点の間にある物体によって直射光が遮られる部

分が存在し、照度の不連続な部分が発生する。提案手法では、モーフィングによって得られた等照度線から、その間の照度分布を線形補間により算出するため、直射光成分が含まれていると、照度値の不連続な部分を正しく表現することができない。そのため、光源位置を変更した場合でも高速に算出することができる直射光成分は、その照度分布を別に計算する。そして、相互反射光成分である2次反射以上の光の成分に対して、イルミネーションモーフィングを行い、照度分布を高速に算出する。最終的に、直射光成分による照度分布とイルミネーションモーフィングにより算出した2次以上の反射光成分による照度分布を足し合わせることで、最終的な画像を生成する。

2.2 提案手法の概要

イルミネーションモーフィングは、サンプリングした光源位置における照度分布から、等照度線を算出し、その等照度線にモーフィングを施すことにより、中間位置に光源を設置したときの照度分布を算出する。

以下に、イルミネーションモーフィングの概略処理手順を示す（図 2.2.1 参照）。

～前処理～

Step1 複数の光源位置での照度分布の算出

光源設置位置をサンプリングし、各サンプリング位置に光源を設置したときの照度分布を Radiosity 法により算出する。ただし、直射光を除いた 2 次以上の反射光による照度分布を求める。このとき、Radiosity 法を解くために、室内モデルの被照面は細かい四角形パッチに分割され、各パッチ頂点での照度が算出される。

Step2 等照度線の算出

マーチングキューブ法を 2 次元問題に適用した手法により、パッチ頂点での照度値を用いて、多角形近似された等照度線を算出する。このとき、被照面の境界を通る等照度線は、被照面上だけでなく、被照面を含む平面を考え、等照度線を補外することに被照面外部の等照度線も求める。

Step3 等照度線の対応付け

等照度線の対応付けは、次の 2 つの処理から構成される。

連続する光源位置における 2 つのシーンでの等照度線群から等照度線の対応を求める。この処理では、まず各光源位置において等照度線の包含関係を *nesting tree*[24]を用いて表す。その *nesting tree* と照度値、面積重複率を用い、等照度線の分岐、併合も考慮して等照度線の対応を取る。

次に、対応する等照度線どうして、等照度線の構成点間の対応を取る。等照度線は、室内モデル内に存在する物体数、光源位置などの影響により、さまざまな形状をもつものが存在する。そのため、あらゆる等照度線に対して、一つの手法だけで適切な構成点の対応付けを行なうことは非常に困難である。この問題を解決するために、本論文では、いくつかの対応付け手法を用意しておき、対応関係にある等照度線の特徴に適した処理を選択して、対応付け手法を使い分ける手法を提案する。

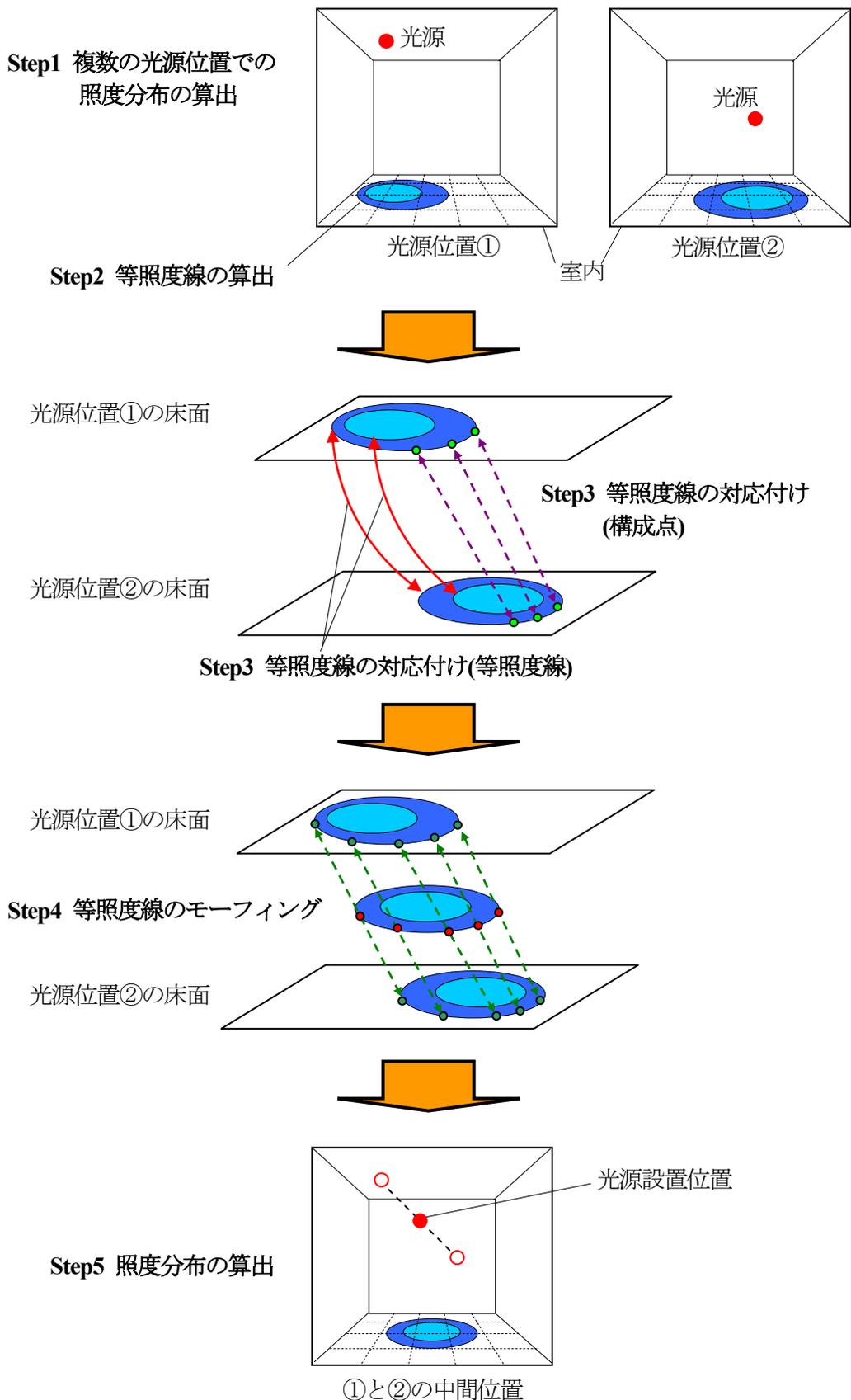


図 2.2.1 イルミネーションモーフィングの概要

～レンダリング～

Step4 等照度線のモーフィング

中間位置での光源に対する等照度線をモーフィングにより算出する。すなわち、対応付けられた等照度線どうしを線形補間することにより中間状態での等照度線を作成する。

Step5 照度分布の算出

モーフィングにより得られた等照度線から、四角形パッチ頂点における照度値を求める。そして、パッチ頂点での照度値を双一次補間することによりパッチ内部の照度値を算出する。

パッチ頂点における照度値は、その頂点を挟む等照度線上の最短点までの距離と等照度線の照度値を用いて線形補間することにより算出する。例えば、図2.2.2において、パッチ頂点 V_{ij} における照度値 I_{ij} は、パッチ頂点 V_{ij} と等照度線 C_1, C_2 への最短距離 d_1, d_2 、そして等照度線 C_1, C_2 の照度値 I_1, I_2 を用いて次式により算出される。

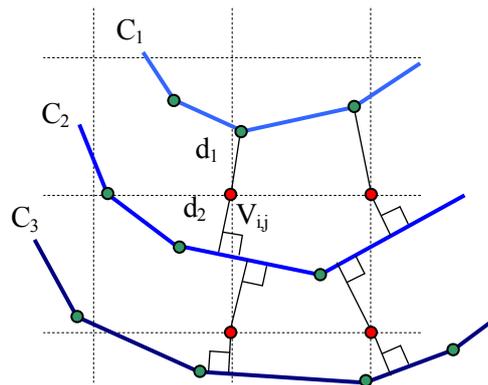


図 1.2.2 照度値の算出

$$I_{i,j} = \frac{d_2 I_1 + d_1 I_2}{d_1 + d_2} \quad (2.2.1)$$

2.3 等照度線の生成

本節では、サンプリングされた各光源位置において算出された照度分布から、等照度線を算出する手法について説明する。その際、マーチングキューブ法[14]の考え方を2次元に適用することにより、各パッチ頂点における照度値からパッチ領域内部における等照度線を決定する。パッチごとに求めた等照度線を等照度線の通過するパッチを辿りながらトレースすることにより、線分近似された閉じた等照度線を算出する。

2.3.1 等照度線の線分パターン生成

マーチングキューブ法の考え方を2次元に適用することにより、パッチ内の等照度線は、パッチ4頂点での照度値を用いて決定される。以下に処理手順を示す(図2.3.1参照)。

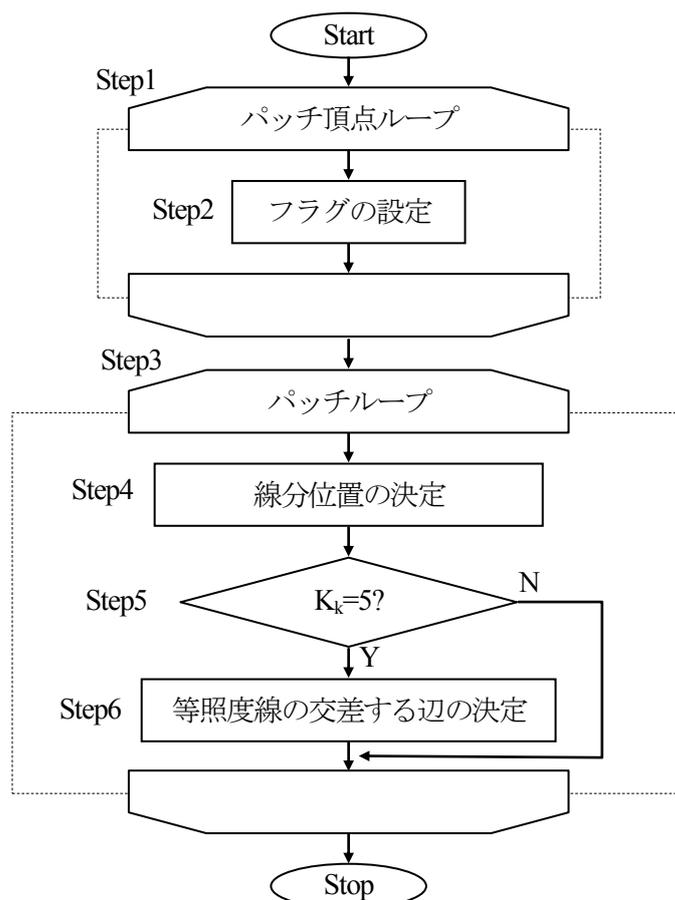
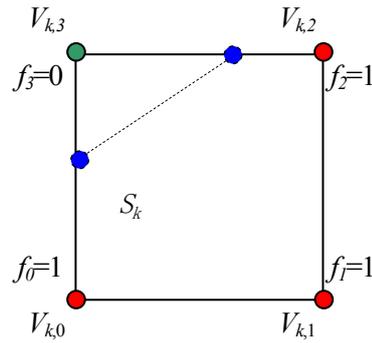


図 2.3.1 等照度線の線分位置の決定



- 等照度線の照度値 I_C より大きい照度値を持つパッチ頂点
- 等照度線の照度値 I_C より小さい照度値を持つパッチ頂点

図 2.3.2 フラグの設定

Step1 パッチ頂点ループ

パッチ頂点 V_i の個数だけ, Step2 を繰り返す.

Step2 フラグの設定

求める等照度線の照度値 I_C に対するパッチ頂点 V_i の照度値 I_{Vi} の大小関係を表すフラグ f_i を次式により設定する(図 2.3.2 参照).

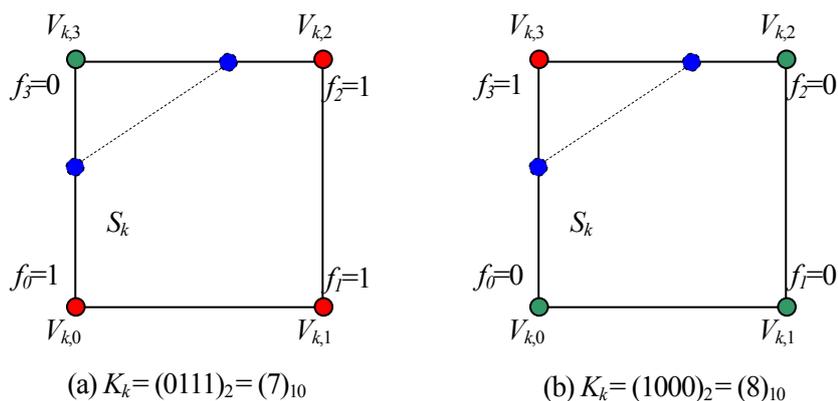
$$f_i = \begin{cases} 1 & (I_{Vi} \geq I_C) \\ 0 & (I_{Vi} < I_C) \end{cases} \quad (2.3.1)$$

Step3 パッチループ

パッチ S_k の個数だけ, Step4 を繰り返す.

Step4 等照度線が交差するパッチの辺の決定

パッチ S_k 上の頂点 $V_{k,l}$ ($l=0,1,2,3$) のフラグ $f_{k,l}$ を 1 に関して降順($f_{k,3}, f_{k,2}, f_{k,1}, f_{k,0}$) に並べ, それを 2 進数と考え, 10 進数に変換する. 変換後の値を, そのパッチに対して等照度線が交差する辺を表す値 K_k として設定する.



- 等照度線の照度値 I_c より大きい照度値を持つパッチ頂点
- 等照度線の照度値 I_c より小さい照度値を持つパッチ頂点

図 2.3.3 異なる K_k で交差する辺が同じ場合

ただし、図 2.3.3 に示すように、 K_k は異なるが、等照度線が同じ辺に交差する場合がある。提案手法では、等照度線のトレースをするときに用いるテーブル(2.3.2節参照)のサイズを小さくするために、これら2つの場合を同一のパターンとして扱い、 K_k が大きい方の数値が算出された場合には、 K_k を小さいほうの数値に再設定する。すなわち、図 2.3.3(b)のように、 $K_k=8$ が算出された場合は、 $K_k=7$ に再設定する。また、パッチの対角に位置する2つの頂点での照度値が等照度線の照度値 I_c より大きく、等照度線の交差する辺を一意に決定できない $K_k=5$ と $K_k=10$ の場合に対しても同様に処理し、 $K_k=10$ が算出された場合には、 $K_k=5$ に再設定する。以上の処理により設定された各 K_k 値に対して、等照度線の交差する辺が決定される。

また、パッチ S_k に存在する等照度線の本数 N_k を求めておく。すなわち、等照度線の交差する辺を一意に決定できない $K_k=5$ の場合は $N_k=2$ 、等照度線が存在しない $K_k=0$ の場合は $N_k=0$ 、それ以外は $N_k=1$ となる。 N_k は、等照度線のトレース(2.3.2節参照)を行なう際、パッチの等照度線をすでにトレースしたかどうかを示すフラグとして用いる。

Step5 等照度線の交差する辺が一意に決定できない場合の判定

前述したように、 $K_k=5$ の場合は、等照度線が交差する辺が一意に定まらない。 $K_k=5$ ならば、Step6へ進み、等照度線の交差する辺を決定する処理を行なう。そうでなければ次のパッチに対して Step3 のループを繰り返す。

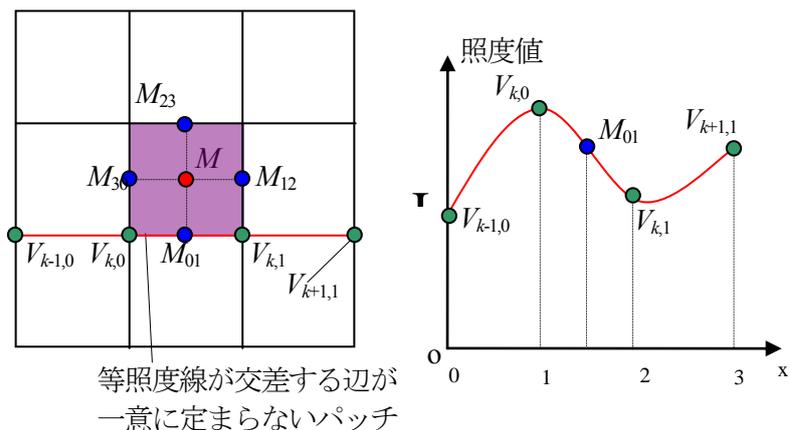


図 2.3.4 等照度線が交差する辺が一意に定まらない場合の処理

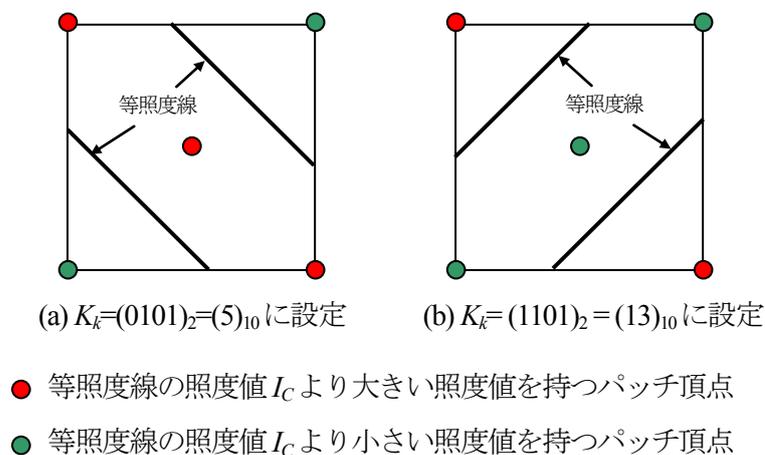


図 2.3.5 等照度線の決定

Step6 等照度線の交差する辺が一意に決定できない場合の処理

提案手法では、図 2.3.4 に示すように、隣接するパッチの頂点 $V_{k-1,0}$ と $V_{k+1,1}$ での照度値を用いて、3 次関数をあてはめ、点 $V_{k,0}$ と点 $V_{k,1}$ の中央点 M_{01} における照度値を算出する。同様にして、パッチの各辺の中央点 M_{12}, M_{23}, M_{30} での照度値を算出し、点 $M_{01}, M_{12}, M_{23}, M_{30}$ の照度値の平均値をパッチ中心点 M における照度値とする。そして、求める等照度線の照度値 I_c に対して、パッチ 4 頂点と中心点での照度値との大小関係を比較することにより、図 2.3.5 に示すように等照度線の交差する辺を決定する。このとき、これら 2 つの場合を区別するために、図 2.3.5(b) の場合において、 $K_k = (0101)_2 = (5)_{10}$ の最上位ビット $f_{k,3}$ を 0 から 1 に変換し、 $K_k = (1101)_2 = (13)_{10}$ に設定する。

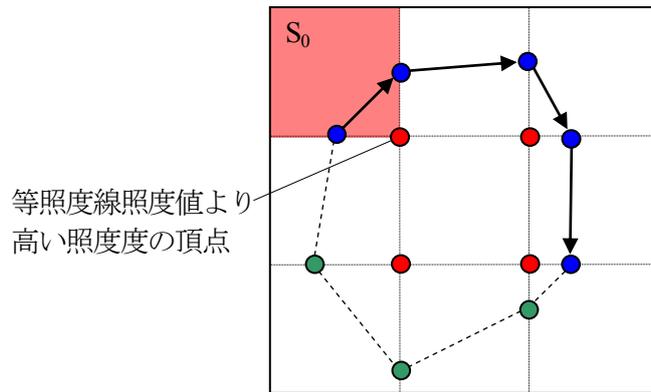


図 2.3.6 等照度線のトレース

2.3.2 等照度線の線分列トレース

提案手法では、等照度線の通過するパッチをトレースし、等照度線の構成点列を求め、線分近似した等照度線を求める。その際、パッチのフラグ K_k を用いて、等照度線をトレースする。等照度線をトレースする方向は、等照度線の照度値に対し、高い照度値を持つ領域が右側になるように設定する。

等照度線が面の境界で途切れてしまう場合には、等照度線と境界との交点から、面の境界をトレースすることにより、閉じた等照度線とする。その後、2.3.3 節において述べる手法により、面の領域外部で等照度線を補外によって求める。

以下に、図 2.3.6 に示す等照度線を例にして、処理手順を示す。

Step1 等照度線の始点の探索

パッチ S_k を通過する等照度線の線分本数を示す値 N_k を用いて、その面上においてまだトレースを行っていない等照度線が最初に存在するパッチ S_k を探索する。すなわち $N_k > 0$ ならば、そのパッチには等照度線が存在するため、Step2 へ進む。 $N_k > 0$ となる S_k が見つかるまで、パッチ番号をインクリメントしながら、探索を続ける。

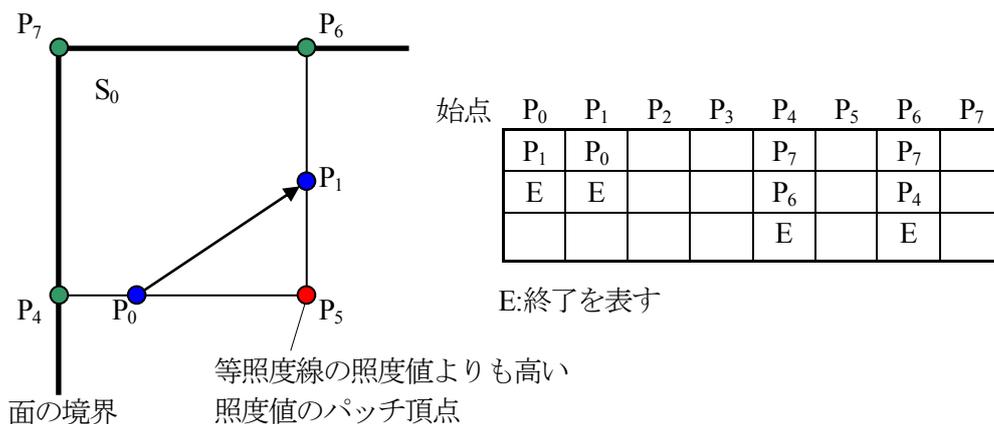


図 2.3.7 $S_0(K_0=2)$ に対応するテーブル

Step2 トレースする方向と始点の決定

トレースする等照度線の照度値 I_c と、パッチ S_k 上の頂点の照度値を比較することにより、トレースの方向を定め、等照度線の始点を決定する。図 2.3.6 に示すパッチ S_0 の場合、図 2.3.7 のように、等照度線の照度値よりも高い照度値を持つパッチ頂点 P_5 が右側になるように、 $P_0 \rightarrow P_1$ の方向をトレースする方向として定め、 P_0 をトレースの始点として決定する。

Step3 テーブルを用いた等照度線のトレースと構成点座標の算出

等照度線が交差する辺を示すテーブルを用いて、等照度線のトレース方向に従い、等照度線をトレースする。その際、パッチ頂点での照度値と等照度線の照度値 I_c を用いて、等照度線と辺が交差する座標値を線形補間により求め、その値を記憶する。図 2.3.7 に示したパッチ S_0 において、始点が P_0 の場合、その経路は $P_0 \rightarrow P_1$ となる。パッチの経路の終点に到達すると、そのパッチにおいてまだトレースを行っていない等照度線の本数を示す N_k の値を 1 デクリメントする。

Step4 パッチの移動

パッチ内での等照度線の終点から隣接するパッチへ移動し、Step3 へ戻り、処理を繰り返す。パッチの移動の際、終点から次のパッチにおけるトレースの始点が求まる。ただし、移動したパッチが、トレースを開始したパッチ S_0 であるならば、Step1 へ戻り、同じ照度値を持つ他の等照度線について探索を再開する。

2.3.3 等照度線の補外処理

面の境界へ到達した等照度線は、面の境界線に沿ってトレースされている。実際には、面領域の外部には等照度線は存在しないが、提案手法では、仮想的に面領域の外部に等照度線が続いていると仮定し、処理を行なう。面領域の外部の等照度線は、面領域の内部の照度値を用いて補外により算出する。

図2.3.8(b)に示すように、パッチ頂点 V_i, V_{i+1} におけるそれぞれの照度値 I_i, I_{i+1} と等照度線の照度値 I_c を用いて、式(2.3.2)により V_c の座標値を算出する。

$$V_c = V_i + t(V_{i+1} - V_i) \quad (1.3.2)$$

ただし、

$$t = \frac{I_c - I_i}{I_{i+1} - I_i} \quad (1.3.3)$$

である。

等照度線が面の境界に沿って設定されている部分に対して、この処理を行なうことにより、面領域の外部の仮想的な等照度線を求める。

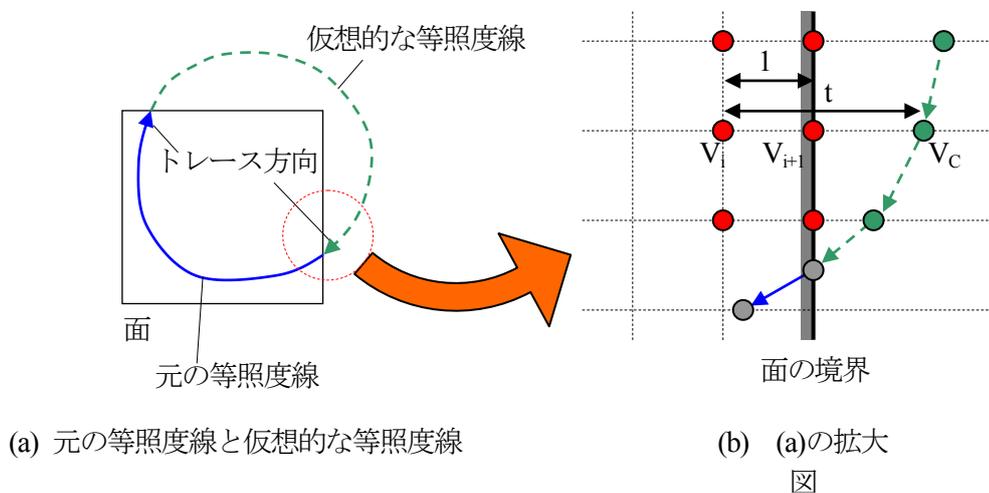


図2.3.8 等照度線の補外

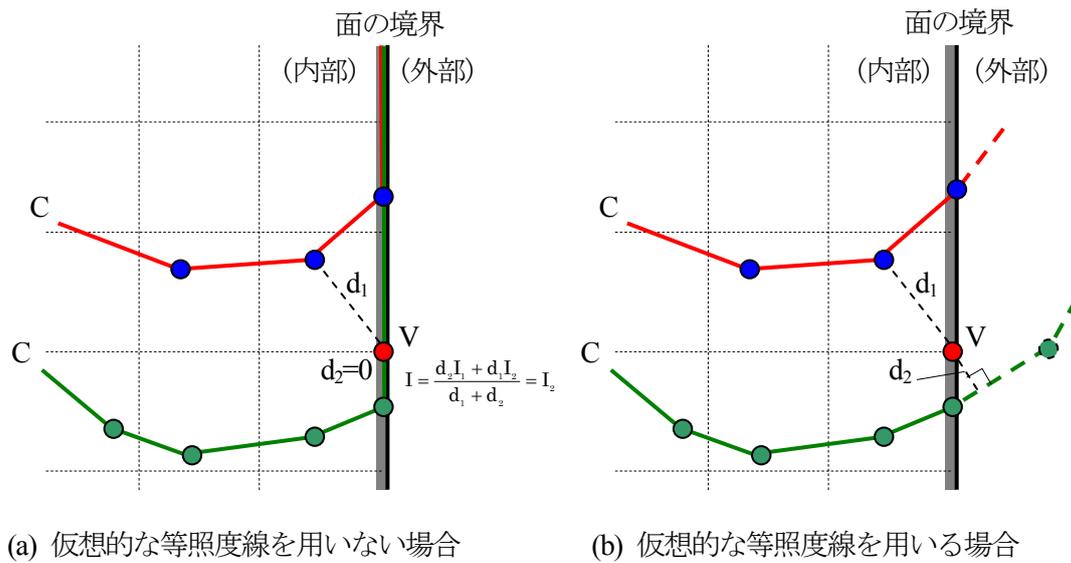
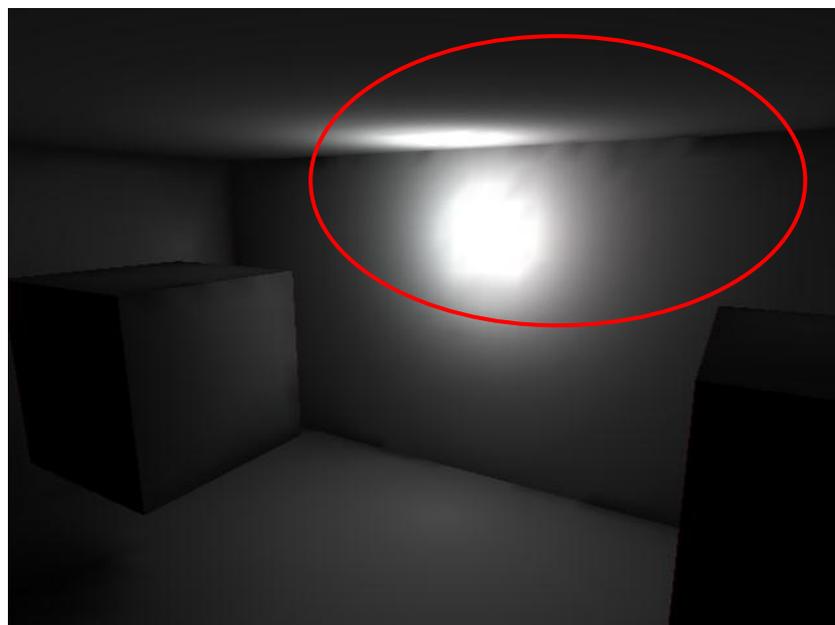


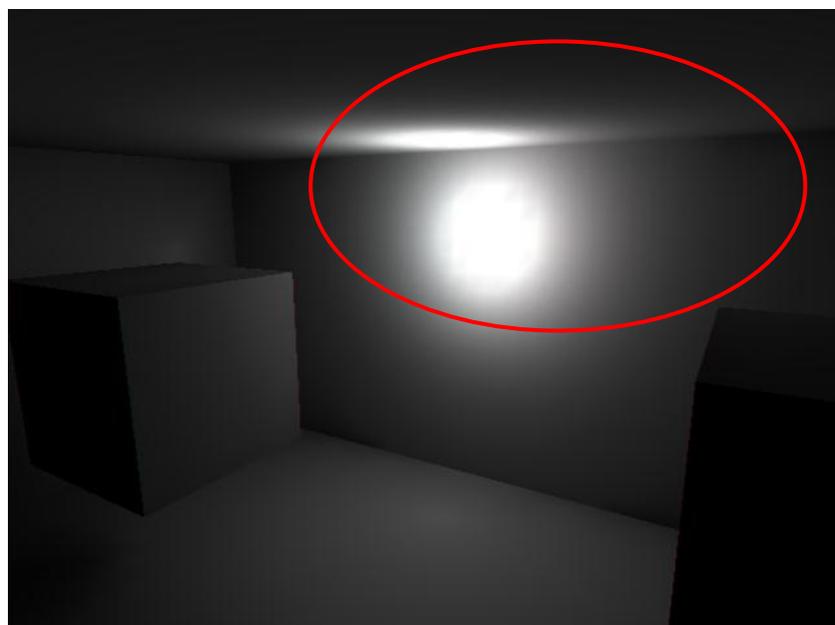
図2.3.9 面の境界部分でのパッチ頂点における照度値

補外により仮想的な等照度線を求めるのは、以下のような理由のためである。

- ① 仮想的な等照度線を用いない場合に得られる画像では、面の境界における照度分布が不自然になるという問題点がある。すなわち、図 2.3.9(a)に示すように、頂点 V での照度値をモーフィング後の等照度線から求める際、その照度値が I_2 となってしまうため、図 2.3.10(a)に示すように、壁面と天井との境界部分の明るさが不自然な分布となる。図 2.3.10(b)に示すように、仮想的な等照度線を用いることにより、この問題を解決することができる (図 2.3.10(b)参照)。
- ② 照度線が消滅、発生する場合、1 点に消滅する位置やタイミングを等照度線の幾何的情報から推定する必要がある(2.4.5節参照)。仮想的な等照度線を用いることにより、等照度線の発生あるいは消滅時に発生する不自然な照度分布を取り除くことができる。



(a) 仮想的な等照度線を用いない場合



(b) 仮想的な等照度線を用いる場合

図 2.3.10 画像の比較

2.4 等照度線の対応付け

等照度線をモーフィングするために、サンプリングされた連続する2つの光源位置間での等照度線に対応付ける必要がある。等照度線の対応付けは、大きく分けて2つの処理に分類される。一つ目は、等照度線間の対応付けである。この処理では、ある光源位置における等照度線が、次の光源位置においてどの等照度線に対応しているのかを決定する。もう一つは、構成点の対応付けである。この処理では、対応関係にある等照度線間で、一方の等照度線上の各構成点が、もう一方の等照度線上のどの構成点に対応しているのかを決定する。

本節では、二つの光源位置における等照度線同士の対応付けについて述べる。

2.4.1 輪郭線の対応付けに関連する研究

物体を断面に切断したときの輪郭線の集合から、元の物体を再構築する際に考えるべき問題は、次の4つに分類することができる。すなわち、(1)輪郭線(等照度線)の対応の問題、(2)輪郭線(等照度線)を構成する点どうしの対応問題、(3)分岐の問題、(4)輪郭線(等照度線)間の補間方法の問題である。

まず、(1)輪郭線(等照度線)の対応の問題では、各輪郭線を近似する楕円を用いる手法が Soroka ら [15]により開発された。この手法では、楕円筒の連続する切断面の重心位置や長軸、短軸といった幾何的情報が、ある誤差内で連続的に変化することを利用して対応付けを行なう。Mayer ら[16]は、隣り合う切断面間で楕円の幾何的情報(重心位置、長軸、短軸)の変化に対するコスト関数を設け、それが最小となる木、すなわち MST(Minimum Spanning Tree)を形成することにより、輪郭線の対応を求める手法を提案している。この手法では、物体全体の構造を考慮に入れた輪郭線対応付けが行なえるが、入れ子構造を考慮していないため、円環体のような物体に対しては適用することができない。また、隣り合う切断面上での輪郭線の重なりを用いた手法[17]が提案されている。手法[17]では、輪郭線ごとに対応を判定するため、入れ子構造の場合でも対応付けを行なうことができるが、面積重複率によっては、内側と外側の輪郭線が対応付けられてしまう場合があるという問題点がある。また、輪郭線の移動を考慮していないため、面積が小さく、移動量大きい輪郭線の場合は対応付けることができない。提案手法では、等照度線の包含関係を表す *nesting tree*[24]と、面積の小さい方の等照度線に対する面積重複率を用いることにより、それらの問題を考慮した対応付け処理を行なう。

(2)輪郭線(等照度線)を構成する点どうしの対応問題に関する手法は、最適化による手法と発見的な手法とに分けられる。最適化による手法では、Keppelら[18]とFuchsら[19]によりグラフ探索による手法が提案された。グラフ上のノードに2つの輪郭線の構成点を結ぶ辺を対応させ、ノード間を結ぶ線分にコスト関数を設けることにより対応付けを行なう。すなわち、文献[18]では再構成された物体の体積が最大になるように、文献[19]では再構成された物体の表面積の総和が最小になるように、構成点の対応付けを行なう。発見的な手法としては、ChristiansenとSederbergらにより、2点間の距離が短くなるように辺を選択しながら構成点の対応付けを行なう手法が提案されている[20]。手法[20]では、手法[18][19]のような最適解は得られないが、対応付けを行なう輪郭線間の形状や位置の変化が小さい場合には、最適解に準じた十分に良い結果が得られる。また、手法[18][19]に比べて計算コストが小さいことから、高速に結果を得ることができる。

等照度線は、室内モデルや光源位置により様々な形状のものが存在し、一つの手法だけでは全ての等照度線形状に対応することは非常に困難である。そこで、提案手法では、手法[20]を含むいくつかの手法から、処理を行なう等照度線の特徴に応じて選択し、使い分けることにより構成点の対応付けを行なう(2.5節参照)。

(3)輪郭線の分岐の問題に関しては、1つの輪郭線が2つに分岐する、最も単純なケースに対し、2つの切断面の間に中間的な輪郭線を挿入し、構成点を対応付ける手法がChristiansenとSederbergらにより開発された[20]。さらに複雑なケースに対応するために、分岐により発生する谷をメッシュに分割する手法が,Ekouleら[17]およびMeyerら[16]によって提案されている。提案手法では、等照度線の分岐により発生する谷は、メッシュでの分割が必要なほど複雑ではないため、手法[20]を用いて分岐を表現する。

(4)輪郭線(等照度線)間の補間方法に関しては、一般的に三角形平面パッチで表面を構成する手法が用いられている。この手法において、良い結果を得るためには、輪郭線上の構成点の設置間隔を小さくする必要があり、多くの構成点を設置しなければならない。また地形データに対して2つの輪郭線(等高線)間に存在する頂点における高さを、頂点から輪郭線までの最短距離を用いて補間する手法が開発された[21]。輪郭線間の面を補間する際に偏微分方程式を用いることにより滑らかな面を形成する手法が提案されている[22][23][25]。提案手法では、十分な数の照度値の等照度線を用いることにより、等照度線間の照度値変化を線形とみなし、手法[21]により等照度線間を補間する。

2.4.2 nesting tree による等照度線間の対応付け

室内モデルを構成する面上の等照度線は、同心円状に入れ子構造を形成する(図 2.4.1(a)). また、面上のある点において同時に複数の照度値を持つことはありえないため、異なる照度値を持つ等照度線は交差することはない。提案手法では、この性質を利用し、等照度線の照度値や面積、位置などの幾何的情報に加えて、等照度線の包含構造を表す nesting tree[24](図 2.4.1(b))を用いて、等照度線の対応判定を行なう。すなわち、nesting tree により対応する可能性のある等照度線を抽出し、等照度線の移動、面積重複率を考慮して対応判定を行なう。これにより、隣接する2つの光源位置の等照度線に対する nesting tree において、同じ構造を持つ部分どうしの対応をとることが可能となる。また、等照度線の占める面積が小さく、かつ光源位置の変化に伴う等照度線の移動量が大きい場合でも、適切な対応を取ることができる。

シーン中に存在する物体の位置や大きさ、光源が移動する経路によっては、光源位置の変化に伴い、等照度線が分岐あるいは併合する場合が生じる。さらに等照度線に分岐は、それぞれ独立した複数の等照度線に分岐する場合(図 2.4.2(a))と、凹形状を経て入れ子構造になる場合(図 2.4.2(b))とに分類される。以下、前者を外部分岐、後者を内部分岐と呼ぶ。提案手法では、両者の分岐を考慮しており、等照度線の対応をとることが可能である。外部分岐、内部分岐の判定とその処理については、2.4.4 節にて述べる。

さらに、等照度線には、光源の移動に伴い、徐々に小さくなって消滅(図 2.4.3(a)) したり、何も存在しないところから発生(図 2.4.3(b)) したりするものがある。このような場合、提案手法では、等照度線が消滅するタイミングや位置を推定し、等照度線を1点に収束させることにより、発生、消滅を表現する。等照度線が発生、消滅するタイミングと位置の推定法については、2.4.5 節にて述べる。

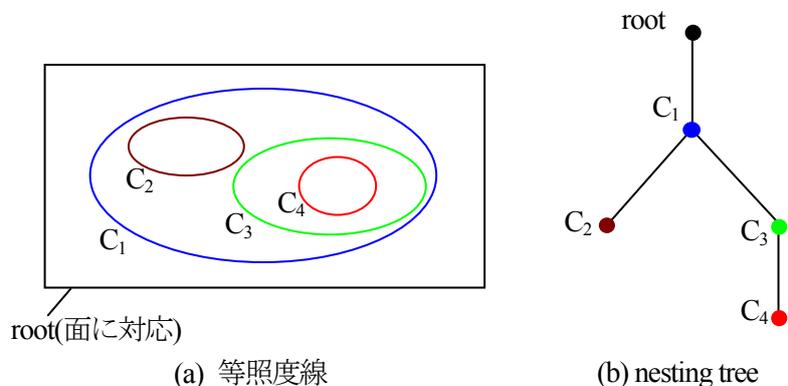


図 2.4.1 nesting tree による入れ子構造の表現

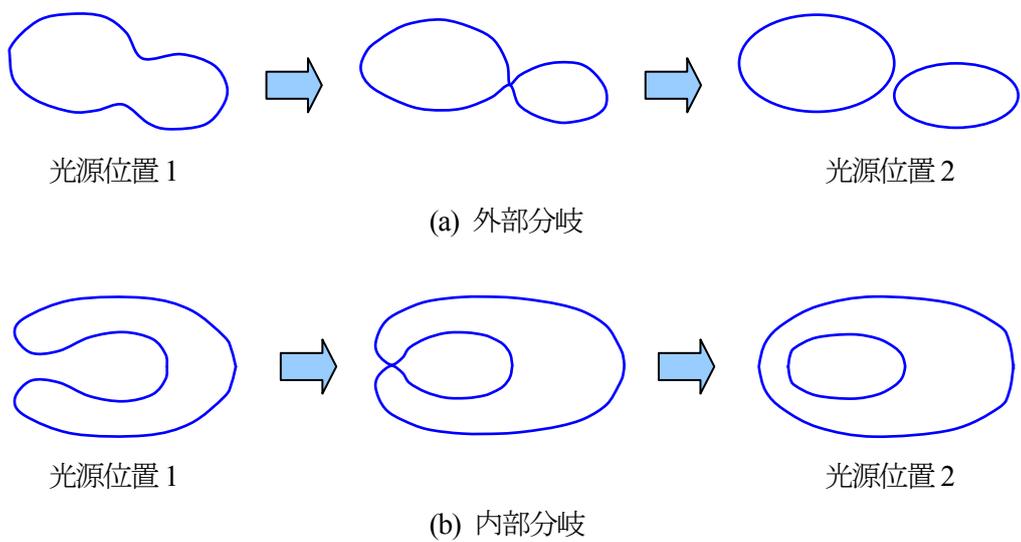


図 2.4.2 等照度線の分岐

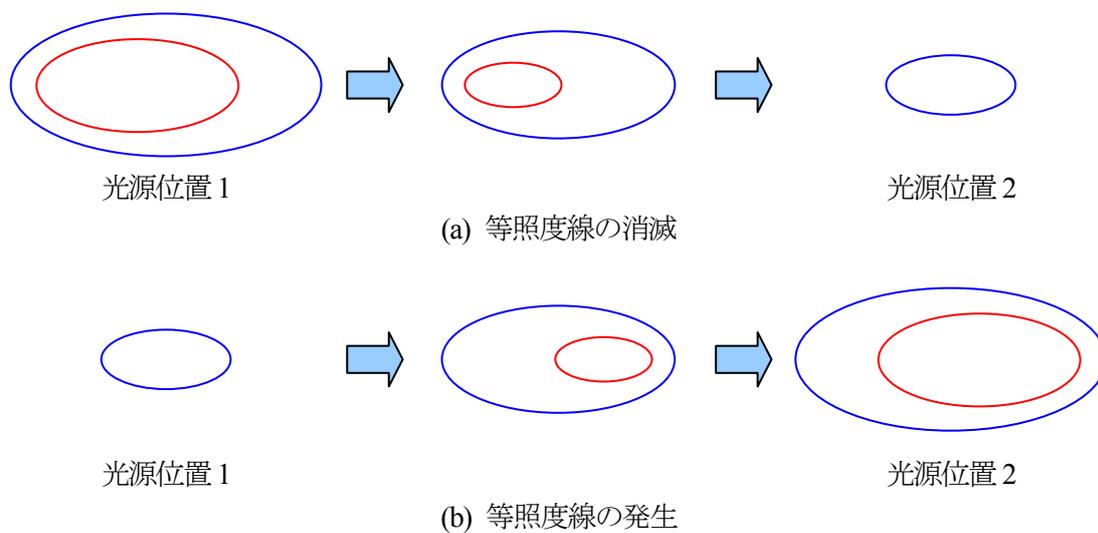


図 2.4.3 等照度線の消滅と発生

提案手法では、等照度線の包含関係を表す *nesting tree* を探索しながら、各階層において等照度線の対応付けを行なっていく。

以下に、*nesting tree* を用いた対応付け処理の全体の流れを示す。

Step1 *nesting tree* の作成

物体を構成する各面上において、各光源位置における等照度線群の包含関係を *nesting tree* を用いて表す[24]。

Step2 *nesting tree* による等照度線の抽出と対応判定

Step1 で作成した *nesting tree* に基づき、隣り合う光源位置での等照度線どうして等しい照度値をもつ等照度線を抽出し、*bounding box* の面積重複率を用いて、等照度線が対応するかどうかの判定をする。

提案手法では、*nesting tree* の root から順に対応を調べていく。そして、ある階層での等照度線の対応付けを行なう際には、その親の等照度線と対応関係にある等照度線の子と対応判定を行なう。すなわち、前述の条件を満たす等照度線すべてに対してその照度値が等しいかどうかを調べ、等しい場合には、等照度線の *bounding box* の面積重複率(2.4.3節参照)を求め、閾値判定することにより対応判定を行なう。また、前述の条件を満たす等照度線が複数本存在する場合には、等照度線が外部分岐している可能性があるため、それを考慮して、対応付けを行なう(2.4.4節参照)。

Step3 内部分岐する等照度線の対応判定および対応付け

Step2 にて対応判定を行なった結果、ある等照度線に対し、対応する等照度線が存在しない場合、あるいは対象とする等照度線の親と対応関係にある等照度線に子がなく、対応判定を行なう等照度線が存在しない場合がある。そのような場合は、内部分岐を起こしている可能性がある。

等照度線が内部分岐する場合、ある等照度線とその親とが併合し、親と対応関係にある等照度線となる。このステップでは、前ステップにおいて対応する等照度線の存在しない等照度線と、その親と対応関係にある等照度線とで内部分岐の判定(2.4.4節参照)を行なう。さらに *nesting tree* の構造によっては、2本以上の等照度線が同時に内部分岐を起こす場合がある。提案手法ではそれをも考慮に入れて対応付けを行なう(詳細は2.4.4節参照)。

Step4 等照度線が消滅するタイミング、位置の推定

Step3でも対応する等照度線の存在しない等照度線は、消滅、発生する等照度線であると判定される。そのような場合、等照度線が消滅、発生するタイミングと位置を等照度線の幾何的情報から推定し(2.4.5節参照)、1点に収束させることにより、等照度線の消滅、発生を表現する。また、消滅、発生すると判定された等照度線の子孫にあたる等照度線も、同様に消滅、発生すると判定し、そのタイミングと位置を推定する。

Step5 子の子孫の対応づけ

対応付けを行なうことにより得られた等照度線の対応関係を用いて、さらにその下層の等照度線の対応付けをおこなう。すなわち、対象とする階層において対応付けられた等照度線の子が存在しなくなるまで、それらの子に対し Step2~4 の処理を繰り返す。

以下では、図 2.4.5 に示す nesting tree を例として、その対応付け処理の流れを示す。これは、外部分岐や内部分岐が起こらない場合の例である。外部分岐や内部分岐の起こる場合は、2.4.4節にて示す。

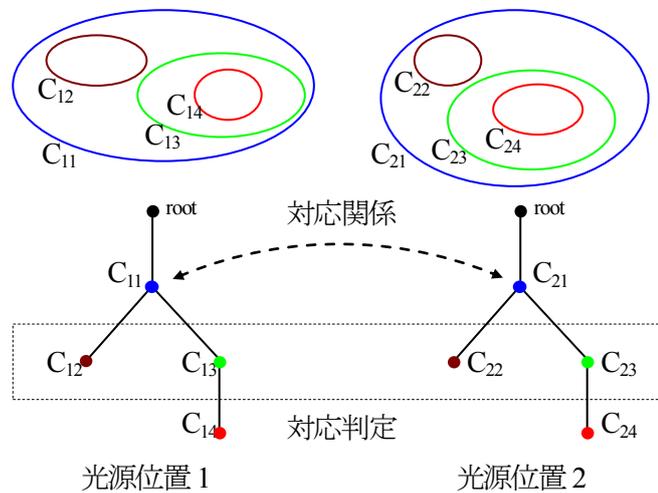


図 2.4.5 nesting tree を用いた対応付け

- Step1** 等照度線の包含関係を *nesting tree* を表現する.
- Step2** *root* の子である等照度線 C_{11} と C_{21} とで対応を調べる. すなわち, C_{11} と C_{21} の照度値が等しいかどうかを調べ, 等しければ *bounding box* の面積重複率による判定を行なう. ここで対応判定を行なう等照度線は 1 対 1 なので, 外部分岐は起こらない. この例では, 面積重複率が閾値より大きい場合を想定し, C_{11} と C_{21} は対応付けられるものとする.
- Step3~Step4** 等照度線 C_{11} と C_{21} と同じ階層においては, 対応付けられていない等照度線は存在しないので, 内部分岐および消滅, 発生は起こらない.
- Step5** 等照度線 C_{11} の子 C_{12}, C_{13} と, 等照度線 C_{21} の子 C_{22}, C_{23} とに対して対応判定を行なうため, Step2 へ進む.
- Step2** 対応を調べる等照度線が複数本対複数本であり, 等照度線が外部分岐している可能性があるため, それを考慮して対応判定を行なう. この図 2.4.5 では, 等照度線 C_{12} と C_{23} および等照度線 C_{13} と C_{22} のそれぞれの間における面積重複率が小さいため, 外部分岐は起こらず, C_{12} は C_{22} と, C_{13} は C_{23} と対応付けられる.
- Step3~4** 等照度線 C_{12}, C_{22} および C_{13}, C_{23} と同じ階層においては, 対応付けられていない等照度線は存在しないので, 内部分岐および消滅, 発生は起こらない.
- Step5** 等照度線 C_{12} と C_{22} には子がないため, 対応付け処理は行なわれない. 等照度線 C_{13} と C_{23} に対してそれぞれの子 C_{14}, C_{24} があり, それらの対応付けを行なうため Step2 へ進む.
- Step2** 等照度線 C_{14} と C_{24} とで対応判定を行なう. 対応判定を行なう等照度線が, 1 対 1 なので外部分岐は起こらない. 面積重複率による対応判定により C_{14} と C_{24} は対応付けられる.
- Step3~4** 等照度線 C_{14}, C_{24} と同じ階層においては, 対応付けられていない等照度線は存在しないので, 内部分岐および消滅, 発生は起こらない.
- Step5** 等照度線 C_{14} と C_{24} の子の階層において, 対応判定を行なう. C_{14} と C_{24} には, 子がないため対応付け処理は行なわれない. 全ての階層を巡ったので, 処理を終了する.

2.4.3 面積重複率による対応判定

対応判定を行なうための等照度線の面積重複率は、等照度線の **bounding box** を用いて算出する。提案手法では、等照度線の移動を考慮した面積重複率算出法を提案する。すなわち、2つの **nesting tree** において対応判定を行なう等照度線の親にあたる等照度線を中心位置を一致させた後に面積重複率を算出する。等照度線の包含関係を表す **nesting tree** を用いることにより、面積が小さく、光源位置の変化に伴う移動量大きい等照度線の場合でも適切な対応判定を行なうことができる。

図 1.4.5 に示す等照度線 C_{12} と C_{22} の対応判定を行なう場合を例にして、処理を説明する。

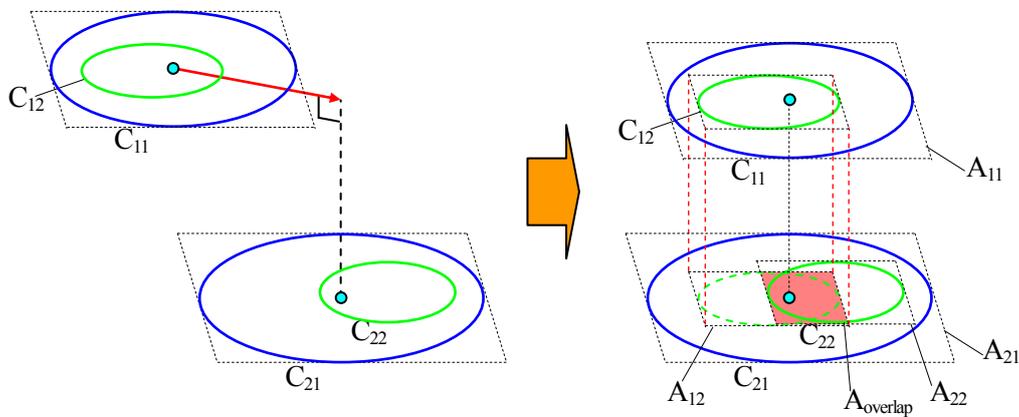


図 2.4.5 面積重複率の算出

Step1 対応判定を行なう等照度線の親の **bounding box** の中心位置を一致させる

等照度線 C_{12} の親である C_{11} の **bounding box** の中心位置が、等照度線 C_{22} の親である C_{21} の **bounding box** の中心位置と一致するように、等照度線 C_{11} と C_{12} を移動させる。ただし、等照度線 C_{11} に対する C_{12} の相対的位置関係は保たれる。

Step2 面積重複率の算出

式(2.4.1)により等照度線 C_{12} と C_{22} の面積重複率を算出する。

$$S = \frac{A_{\text{overlap}}}{\min(A_{12}, A_{22})} \quad (2.4.1)$$

ここで、 A_{overlap} は移動後の等照度線 C_{12} と C_{22} の **bounding box** の重複面積、 A_{12}, A_{22} はそれぞれ等照度線 C_{12}, C_{22} の **bounding box** の面積を表す。

文献[17]では、それぞれの bounding box の面積に対する重複面積の比を求め、その平均を面積重複率としている。この手法では、等照度線が重なりを持っている場合でも、等照度線の大きさが急激に変化する場合には、面積重複率が低下してしまう。提案手法では、nesting tree により、同じ階層にある等照度線を選択して判定を行なうことができるため、面積の小さい方のみを考慮に入れるだけでよい。

Step3 閾値による判定

算出された面積重複率 S と、閾値 S_t とを比較し、

$$S > S_t \left(\frac{A_{12}}{A_{11}} + \frac{A_{22}}{A_{21}} \right) \quad (2.4.2)$$

が成り立つとき、等照度線 C_{12} と C_{22} は対応していると判定する。ここで、閾値 S_t は、 C_{12}, C_{22} の bounding box の面積 A_{12}, A_{22} と、それぞれの親 C_{11}, C_{21} の bounding box の面積 A_{11}, A_{21} との比の和に比例して変化する。すなわち、閾値 S_t は次式で表される。

$$S_t(\gamma) = k\gamma \quad (2.4.3)$$

ここで、 $k > 0$ は定数である。(2.4.3)式を用いて閾値を設定することにより、面積比が小さくなれば閾値を下げ、重複する面積が小さい場合でも適切な対応付けを行なうことができる。

2.4.4 等照度線の分岐

等照度線の外部分岐と内部分岐それぞれについて、分岐の検出方法と対応付け処理について説明する。

外部分岐する等照度線の検出は、等照度線の対応を取るための bounding box の面積重複率を求めるときに行なう(図 2.4.6(a)参照)。すなわち、図 2.4.6(b)に示すように、等照度線 C_{12} に対し、複数の等照度線 C_{22} と C_{23} が重なる場合、それぞれの面積重複率を算出し、閾値による判定を行なう。 C_{22} と C_{23} の両方に対して対応すると判定された場合、等照度線 C_{12} は等照度線 C_{22} と C_{23} に外部分岐すると判定する。

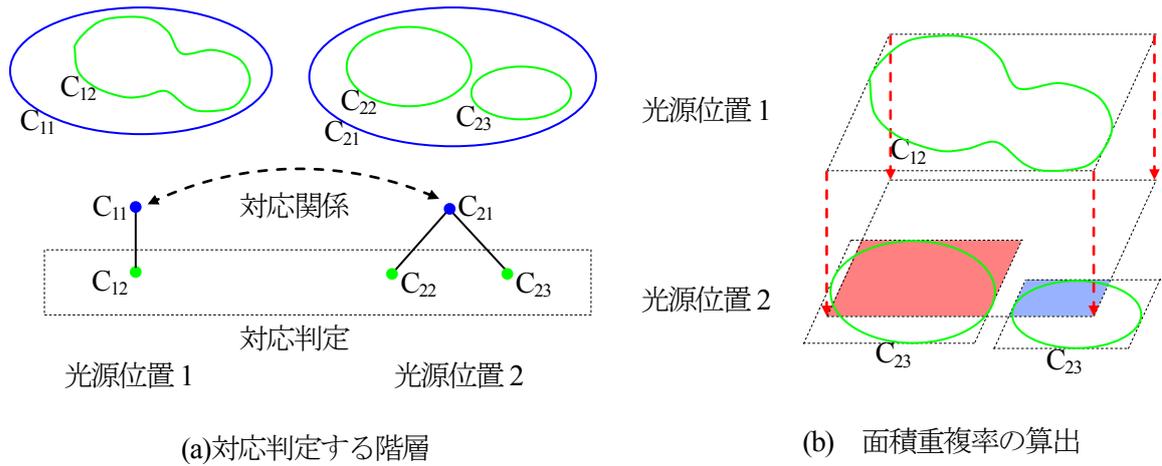


図 2.4.6 外部分岐に対する対応判定

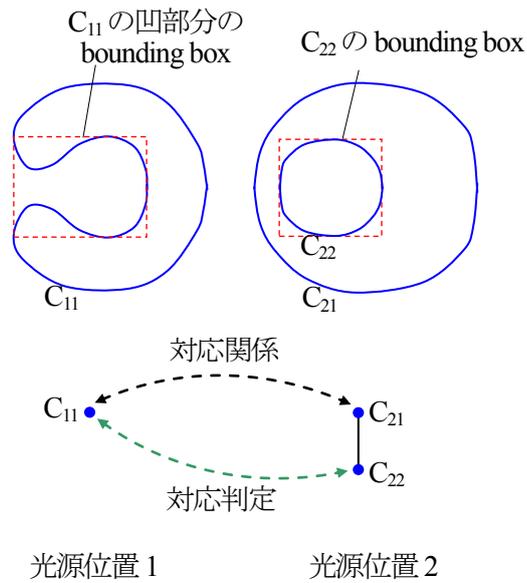


図 2.4.7 内部分岐の場合の対応判定

内部分岐の検出は、図 2.4.7 に示す等照度線 C_{11} と C_{21} の対応を調べ、対応関係にある場合に次のチェックを行なう。等照度線 C_{11} の凹部分の bounding box と等照度線 C_{21} の子にあたる等照度線 C_{22} の bounding box の面積重複率を算出し、その重複率が閾値よりも大きければ、等照度線は C_{21} と C_{22} に内部分岐を起こしたと判定し、等照度線 C_{11} を C_{21} と C_{22} の両方に対応付ける。

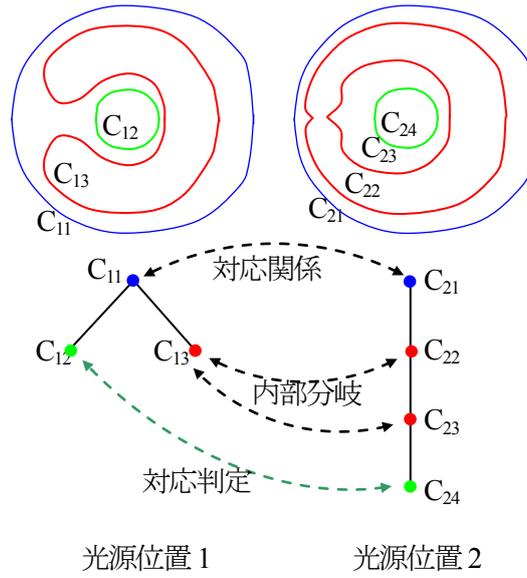


図 2.4.8 内部分岐をおこした等照度線が子をもつ場合

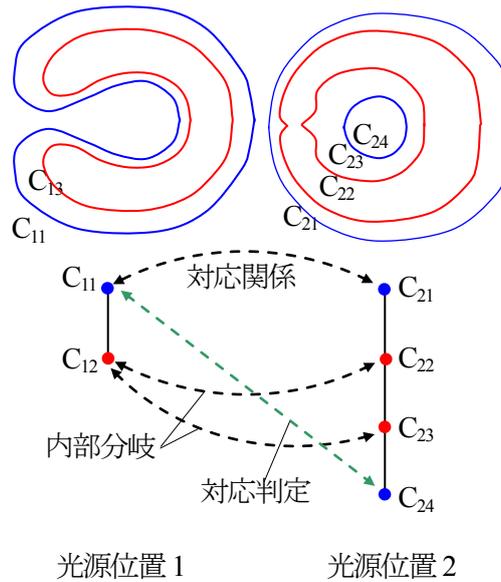


図 2.4.9 二重に内部分岐を起こす場合

nesting tree の構造によっては、図 2.4.8 に示すように、内部分岐して入れ子の内側になった等照度線が子を持つ場合がある。この場合、nesting tree の階層が異なるため、等照度線 C_{12} と C_{24} とを対応付けることができない。このような場合に対処するため、提案手法では、等照度線 C_{13} に C_{22} が対応付けられ、さらに内部分岐する等照度線として C_{23} が対応付けられた場合、等照度線 C_{23} の子である C_{24} と、 C_{13} と同じ階層にある C_{13} 以外の等照度線である C_{12} とで面積重複率による対応判定を行なう。

また、図 2.4.9 に示すように、入れ子となった 2 本の等照度線が同時に内部分岐する場合がある。この場合、提案手法では次の手順により対応判定を行なう。等照度線 C_{12} が等照度線 C_{22} と C_{23} に内部分岐したと判定された場合、等照度線 C_{23} の子である C_{24} と、 C_{12} と同じ階層にある C_{12} 以外の等照度線と面積重複率による対応判定を行なう。さらに、同一階層に他の等照度線がない場合や、対応関係を持つ等照度線が存在しなかった場合には、次に C_{12} の親である C_{11} と内部分岐の判定を行なう。すなわち、 C_{11} の凹部分の bounding box と等照度線 C_{24} の bounding box の面積重複率を算出し、それが閾値よりも大きい場合には、 C_{24} は C_{11} から内部分岐するものとして対応付けられる。さらに 3 本以上の多重となった等照度線の内部分岐が同時に発生した場合でも、同様の処理を再帰的に繰り返すことにより対応付けを行なうことができる。

2.4.5 等照度線の消滅・発生

提案手法では、対応する等照度線が存在しない場合、光源が次の光源位置に移動する間のいずれかの時点で 1 点に対応付ける。すなわち、等照度線を 1 点に収束させ、等照度線を消滅させる。その際、等照度線が消滅する位置とタイミングを設定する必要がある。提案手法では、以下に述べる手法により、等照度線が消滅する位置とタイミングを設定する。

図 2.4.10 において、等照度線 C_{12} に対応する等照度線が光源位置 2 に存在しない場合について、等照度線が消滅する位置とタイミングを設定する手法を説明する。

まず、等照度線 C_{12} の親である等照度線 C_{11} を uv 座標系における $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$ の領域にマッピングし、等照度線 C_{12} の bounding box の中心に対応する $P_1(u_1, v_1)$ を算出する。次に、等照度線 C_{21} も同様に uv 座標系にマッピングし、等照度線 C_{21} 上で点 P_1 に対応する位置 (u_1, v_1) に点 P_2 を設置する。点 P_2 を実座標に戻した後、等照度線 C_{12} を点 P_2 に対応付ける。すなわち、点 P_2 を等照度線 C_{12} の収束する位置として設定する。また、図 2.4.10 に示すように光源位置 1 から光源位置 2 まで光源位置が変化する時間間隔を 1.0 としたとき、等照度線 C_{12} の親である C_{11} の bounding box の面積に対する C_{12} の bounding box の面積比の平方根を、等照度線 C_{12} の消滅するタイミングとして設定する。すなわち、収束するタイミングを t_v とすると、 t_v は次式により与えられる。

$$t_v = \sqrt{\frac{A_{12}}{A_{11}}} \quad (2.4.4)$$

ここで、 A_{11}, A_{12} はそれぞれ等照度線 C_{11}, C_{12} の bounding box の面積である。

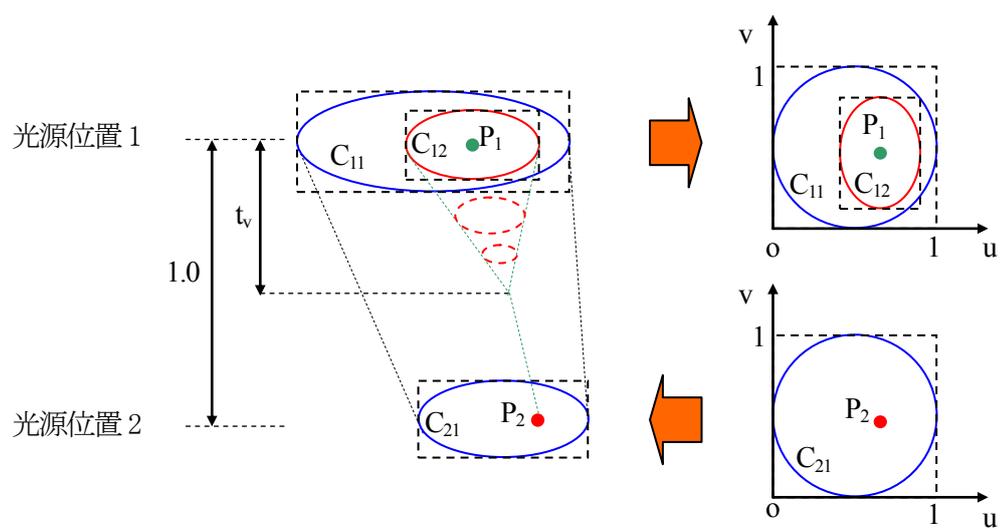


図 2.4.10 消滅位置とタイミングの設定

2.5 構成点間の対応付け

2.4節において対応関係にあると判定された等照度線間にて、一方の等照度線上の各構成点が、もう一方の等照度線上のどの構成点に対応しているのかを決定する必要がある。本節では、構成点間の対応付けについて述べる。

等照度線は、室内モデル内に存在する物体の形状や光源位置などの影響によりさまざまな形状を持つものが存在する。そのため、一つの手法だけであらゆる場合の等照度線について構成点の対応付けを行なうことは非常に困難である。この問題を解決するために、提案手法では、いくつかの代表的な構成点对応付け手法をいくつか準備しておき、対応関係にある等照度線の特徴に応じてそれらの手法を選択し処理を行なうことにより、さまざまな等照度線に対応することを可能とする方法を提案する。

2.5.1 等照度線の類似度を用いた構成点間の対応付け手法の分類

提案手法では、構成点の対応付け処理手法を選択する際、それらの手法に対する適合度を算出する。そして、適合度が最大となった対応付け処理手法を選択し、対応付け処理を行なう。等照度線の幾何的情報を用いて、対応関係にある等照度線の類似度を算出し、それらを重みつき加算することにより適合度を算出する。ただし、重みつき加算の際の重みは、構成点对応付け処理手法ごとに異なった値を用いる。すなわち、手法*i*に対する適合度 F_i は次式により算出される。

$$F_i = w_l^{(i)} R_l + w_A^{(i)} R_A + w_r^{(i)} R_r + w_\theta^{(i)} R_\theta + w_D^{(i)} R_D + w_d^{(i)} R_d \quad (2.5.1)$$

ここで、 R_k は表 2.5.1 に示す等照度線の特徴 k に対する類似度を表す。各類似度の算出法については、2.5.2節にて述べる。 $w_k^{(i)}$ は手法 i の類似度 R_k に対する重みであり、それぞれ式(2.5.2),(2.5.3)を満たす。

$$0 \leq R_l \leq 1 \quad (2.5.2)$$

$$\begin{cases} 0 \leq w_k^{(i)} \leq 1 \\ \sum_k w_k^{(i)} = 1 \end{cases} \quad (2.5.3)$$

以下に、提案手法において選択肢として用意している構成点对応付け処理手法の概略を説明する。詳しくは、2.5.3節にて説明する。

表 2.5.1 各類似度に対する特徴

類似度	等照度線の特徴
R_L	周長
R_A	面積
R_r	縦横比
R_θ	構成線分どうしのなす角度の和
R_D	最近傍点間距離
R_d	bounding box の中心位置

手法1 (等照度線の形状, 大きさともに似ている場合)

対応する等照度線の形状, 大きさがともに似ている場合に良好な構成点の対応付けを行なうことのできる手法である. 対応関係にある等照度線の凸包を求め, bounding box の中心位置を合わせたあと, 等照度線の構成点間距離の短い方の構成点どうしを順に対応付けていく [20].

手法2 (等照度線の形状は似ているが, 大きさが異なっている場合)

等照度線の大きさは異なっているが, 形状が似ている場合に良好な構成点の対応付けを行なうことができる手法である. 対応関係のある等照度線の凸包を求めた後, 等照度線を 1×1 の正方形領域に正規化する. その後の処理は手法1と同様である.

手法3 (等照度線の形状, 大きさが異なっている場合)

等照度線の形状が異なっている場合, または形状, 大きさともに異なっている場合に構成点の対応付けを行なう手法である. まず, 一方の等照度線上の各構成点に対して, もう一方の等照度線上の最も近い構成点を求め, それらの点どうしを優先的に対応付ける. そして, 対応付けられた構成点間の, 未対応の構成点に対し, 構成点の個数に応じて均等に対応付けを行なう.

等照度線の形状や2つの等照度線の位置関係によっては, 前述の3つの手法では良好な対応付けが行なえない場合が生じるかもしれない. そのような場合に対しては, それに適した新たな構成点対応付け処理手法を追加する必要がある. 提案する構成点対応付け処理手法を選択する方法では, 特徴の類似度および重みを新たに加えることにより, 比較的容易に構成点対応付け処理手法の選択肢を増やすことができる柔軟性を持つ. そのため, さらに多くの等照度線に対応できるように拡張することが比較的容易であるという特徴をもつ.

2.5.2 等照度線の類似度の算出

対応関係にある等照度線間における特徴の類似度は、等照度線の幾何的情報を用いて、それぞれ次のように算出される。

① R_L (周長), R_A (bounding box の面積), R_r (bounding box の縦横比)

対応関係にある等照度線 C_1, C_2 の周長をそれぞれ L_1, L_2 , bounding box の面積をそれぞれ A_1, A_2 , bounding box の縦横比をそれぞれ $r_1 = v_1 / u_1, r_2 = v_2 / u_2$ とする(図 2.5.1 参照). そのとき, 類似度 R_L, R_A, R_r は式(2.5.4)~(2.5.6)により算出される.

$$R_L = \frac{\min(L_1, L_2)}{\max(L_1, L_2)} \quad (2.5.4)$$

$$R_A = \frac{\min(A_1, A_2)}{\max(A_1, A_2)} \quad (2.5.5)$$

$$R_r = \frac{\min(r_1, r_2)}{\max(r_1, r_2)} \quad (2.5.6)$$

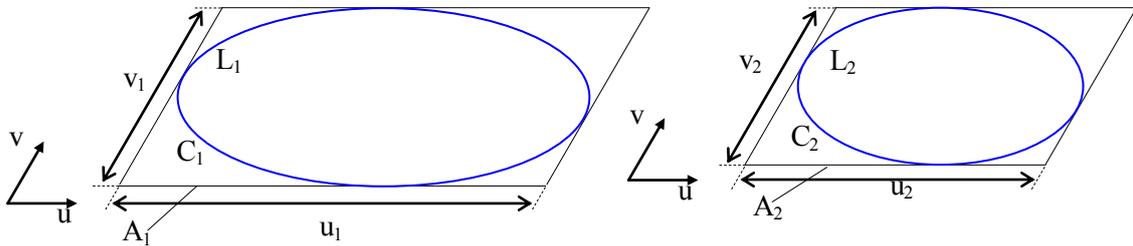


図 2.5.1 類似度 R_L, R_A, R_r の算出

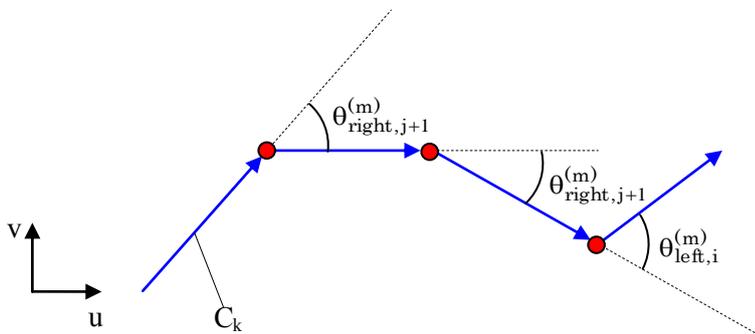


図 2.5.2 角度の総和

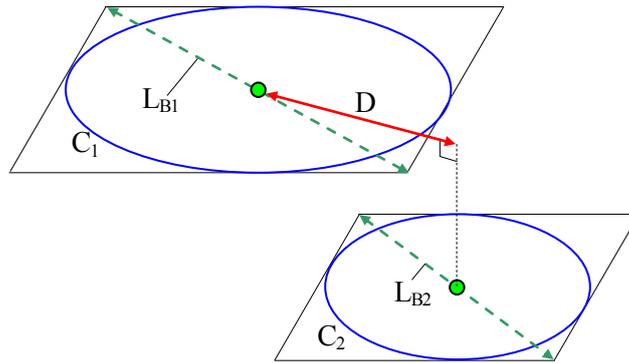


図 2.5.4 類似度 R_D の算出

④ R_D (位置)

対応関係にある等照度線 C_1 と C_2 の bounding box の対角線の長さをそれぞれ L_{B1} , L_{B2} とし、bounding box の中心位置間の距離を D とするとき、類似度 R_D は次式により算出される(図 2.5.4 参照).

$$R_D = \max\left(0, \frac{D}{(L_{B1}, L_{B2})}\right) \quad (1.5.12)$$

2.5.3 類似度に応じた構成点对の応付け手法

提案手法では、算出された適合度により、2.5.1節で述べた3つの処理手法を選択し、等照度線の構成点の対応付けを行なう。ここでは、それらの手法に関して処理手順を詳しく述べる。

手法1

この手法は、対応関係にある等照度線の形状と大きさがともに似ている場合に適用する。

Step1 凸包の算出

等照度線が凹形状をなしている場合、等照度線の凸包を算出する。その際、凹形状の部分にある構成点は、凸包を算出することにより発生した新たな辺上に移動させる(図 2.5.5 参照)。ただし、構成点間の距離の比を保ったまま移動する。

Step2 bounding box の中心位置を合わせる

対応する2つの等照度線の bounding box の中心位置を一致させる。

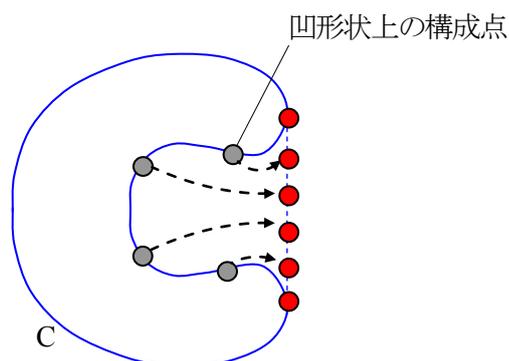


図 2.5.5 凸包の算出

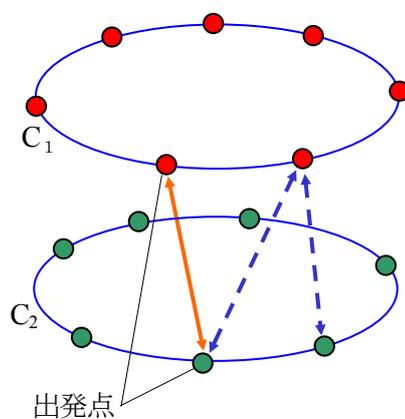


図 2.5.6 構成点の対応付け

Step3 構成点の対応付け[20]

図 2.5.6 に示すように、2つの等照度線上の構成点から、最も短い距離をなす2つの構成点を求め、それらを出発点として距離の短い方の辺を選択しながら構成点を順に対応付けを行なっていく。

Step4 凹形状を元の形状に戻す

Step1 において移動させた、等照度線の凹部分に存在する構成点をそれぞれ元の位置に移動させる。

手法2

この手法は、等照度線の大きさは異なっているが、形状が相似している場合に適用する。

Step1 凸包の算出

手法1のStep1と同様の方法により、等照度線の凸包を求める。

Step2 正規化・bounding box の中心位置を合わせる

対応関係にある等照度線を、 1×1 の正方形領域にマッピングすることにより正規化し、等照度線を bounding box の中心位置を一致させる。

Step3 構成点の対応付け

手法1のStep3と同様の方法で、構成点の対応付けを行なう。

Step4 凹形状を元の形状に戻す

Step1において移動させた、等照度線の凹部分に存在する構成点をそれぞれ元の位置に移動させる。

手法3

この手法は、対応関係にある等照度線が形状、大きさともに異なる場合に適用する。ここでは、図2.5.7を用いて説明する。

Step1 近接点どうしの対応付け

等照度線 C_1 の各構成点に対し、もう一方の等照度線 C_2 上の最近傍構成点を求める。その2点間の距離がある閾値以下の構成点どうしを対応付ける(図2.5.7(a)参照)。また、 C_2 上の各構成点に対しても、 C_1 上の最近傍構成点を算出し、同様の処理を行う。

ただし、明らかに不自然な対応を防ぐために、距離を算出する際に構成点における接線ベクトルの成す角度が 90° 以下になる場合のみ、対応付けを行なう(図2.5.8参照)。

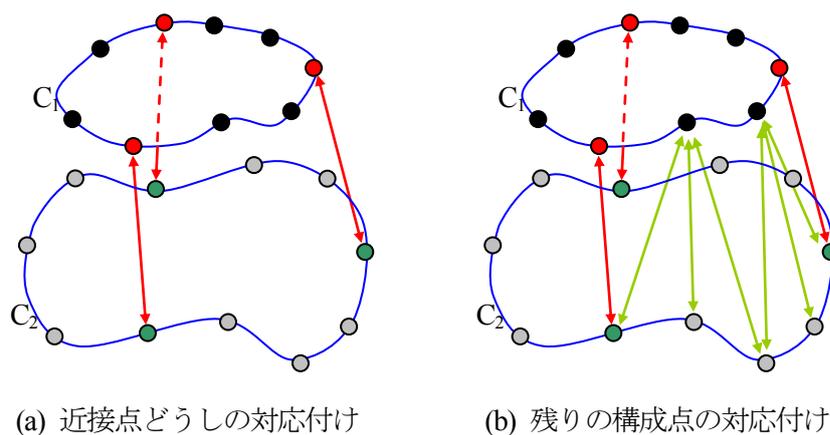


図2.5.7 手法3の構成点の対応付け

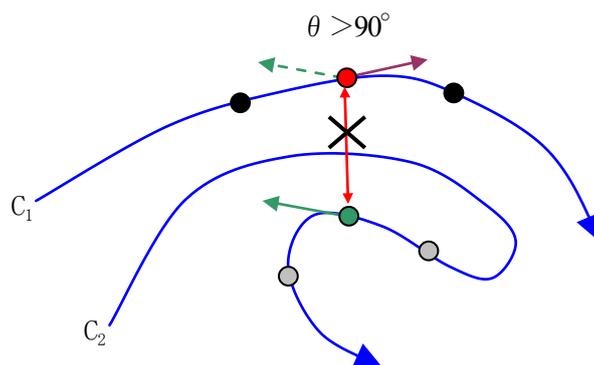


図 2.5.8 不自然な対応付けの防止

Step2 残りの構成点の対応付け

等照度線 C_1 上の対応付けされた構成点間(区間)に存在する構成点に対して, 対応付けを行なう. その際, 区間に存在する構成点の個数に応じて, 均等に対応を割り付ける(図 2.5.7(b) 参照).

ここで注意すべき点は, それぞれの手法に適した等照度線に対して構成点の対応付けを行なうということである. 例えば, 手法1を用いることで適切に対応付けられる等照度線のペアに対し, 手法3を適用した場合は, 不自然な構成点対応付けを行なってしまう. 逆の場合, および手法2と手法3に対しても同様である. また, 手法2は, 手法1に対する等照度線のペアについても適切な対応付けを行なうことができる場合もあるが, 等照度線の正規化を行なうと形状が歪むため, 手法1を用いた場合と異なる対応結果が得られる可能性がある. そのため, 等照度線の大きさがほぼ同じ場合には, 正規化を行なわないほうが, その等照度線の形状に即した対応付けを行なえるため, 好ましいと考えられる. 逆に, 手法2を用いるべき等照度線に対し, 手法1を用いた場合は, 不自然な対応関係となる. その理由は, 大きさが似ていない等照度線に, 手法1の Step3 の処理を行なった場合, 構成点の対応が偏るためである.

2.6 適用例

本節では、サンプリングした光源位置の間に光源を設置したときの画像を提案手法により生成した結果を示す。

2.6.1 節にて適用した室内モデルについて示し、2.6.2 節にて、提案手法、画像補間、そして Radiosity 法を用いて作成した画像を比較することにより提案手法の有用性を示す。2.6.3 節では、提案手法により得られた 2 次反射光以降の成分に直射光成分を加えた画像ならびに物体面にテクスチャマッピングを施した画像を示す。

2.6.1 適用モデル

適用モデルとして、直方体状の部屋に机、椅子、戸棚を置いた室内モデルを用いた(図 2.6.1 参照)。表 2.6.1 に、このモデルに関する各種パラメータを示す。

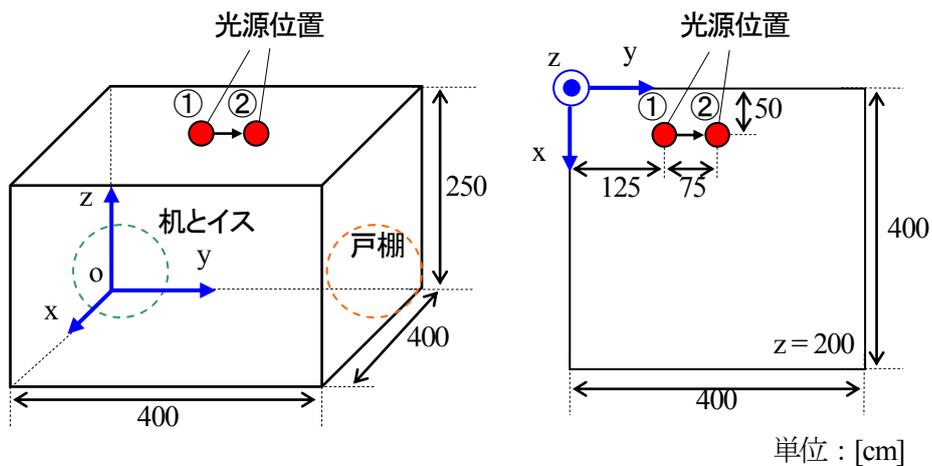
サンプリングした光源位置は図 2.6.1(a)に示すとおりである。提案手法では、点光源に対しては 2 次反射光以降の成分を扱うため、直射光成分が比較的小さい間接照明の環境下における照度分布の算出に適している。適用例では、光源の灯軸を図 2.6.2 に示すように、配光強度の強い方向が壁面に向くように設定した。光源は軸対称の配光特性を持つ白色光源であり、その配光特性 $I(\theta, \varphi)$ (図 2.6.2.(a)参照)は次式に示すものを用いた。

$$I(\theta, \varphi) = \max(I_{min}, I_{max} \cos(\pi - \theta)) \quad (2.6.1)$$

ただし、

$$I_{min} = \frac{I_{max}}{5}$$

である。



(a) 適用モデルの概観図



(b) 照度分布の例(2次反射光以降の成分のみ表示)

図 2.6.1 適用モデル

表 2.6.1 適用モデルに関する各種パラメータ

パッチ分割数	11978
パッチ頂点数	10627
パッチ分割幅[cm]	10
照度サンプリング数	35
反射光成分	10次反射光まで考慮

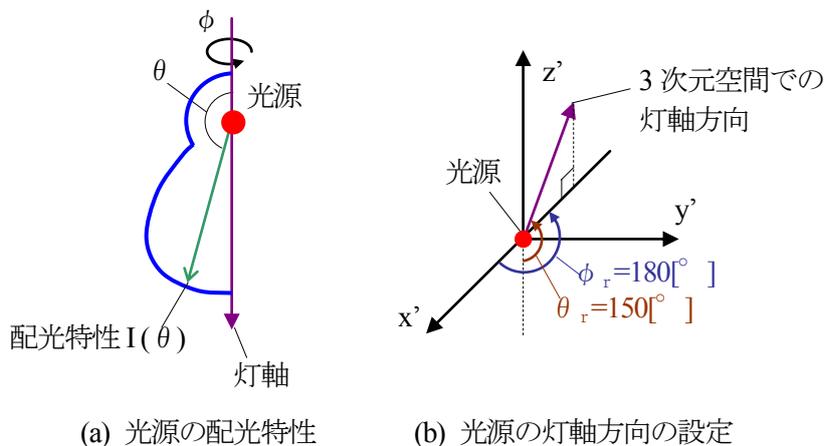


図 2.6.2 光源の配光特性と灯軸方向

2.6.2 適用例と他手法の結果との比較

光源位置①と光源位置②(図 2.6.1 参照)における照度分布をそれぞれ図 2.6.3(a)と(b)に示す。また、各光源位置での等照度線を算出した結果を図 2.6.3(c), (d)に示す。図 2.6.3(c), (d)に示す等照度線にモーフィングを施すことにより求めた、光源位置①と光源位置②の midpoint に光源を設置したときの等照度線を図 2.6.4(a)に示す。図 2.6.4(b)には、同図(a)の等照度線を用いて補間により得られた照度分布を示す。また、光源位置①と光源位置②の midpoint に光源を設置したときの画像を、光源位置①と光源位置②における画像から画像補間により求めた結果を図 2.6.5(a)に示す。図 2.6.5(b)には、光源位置①と光源位置②の midpoint に光源を設置し、Radiosity 法により相互反射光成分の計算を行なって作成した画像を示す。Radiosity 法により作成した画像(図 2.6.5(b))は、他の手法とは異なり、直接 Radiosity 方程式を解いて照度値を算出するため、これを真値画像として、提案手法による結果(図 2.6.4(b))と画像補間による結果(図 2.6.5(a))の誤差分布を算出した。これを図 2.6.6 に示す。表 2.6.1 には、それぞれの手法に対する画像生成時間を示す。

表 2.6.1 画像生成時間

手法	画像生成時間
提案手法(図 1.6.4(b))	3.81[sec]
画像補間(図 1.6.5(a))	0.12[sec]
ラジオシティ法(図 1.6.5(b))	84[min]

使用計算機 : SGI O2 R12000 270MHz

図2.6.5(a)より、画像補間により得られた画像では、壁面上部の照度分布のハイライト部分が長く伸びており、中間位置に光源を置いたときの画像と異なっている。図2.6.6(b)に示すように、この部分に大きな誤差が現れている。それに対し、提案手法により得られた画像(図2.6.4(b))では、ハイライト部分は伸びることなく、光源位置①と光源位置②の画像の中央に位置している。また、図2.6.6(a)に示した、提案手法による結果の真値画像に対する誤差分布においても、ハイライト部分に対しては大きな誤差は現れていない。以上のことから、光源位置を変更したときのハイライト部分の照度分布は、提案手法が、画像補間よりも優れている。

光源位置の変化に伴う照度値の変化が小さい領域においては、提案手法の方が画像補間により得られる結果よりも誤差が大きい箇所がある。これには次の3つの理由が考えられる。

- (1) 提案手法では照度分布を算出する際に3回の線形補間を行なう。すなわち、照度分布から等照度線を算出する際、中間の光源位置に対する等照度線を算出するモーフィング処理の際、そして等照度線から照度分布を算出する際である。それに対して、画像補間では補間回数は1回のみである。そのため提案手法では各線形補間の際に入った誤差が蓄積して、算出される照度値の悪化を招いたと考えられる。
- (2) 提案手法による結果において特に誤差が大きいのは、画像中の左側の壁面での照度分布である。この壁面では、光源位置が①から②へ変化する過程において、等照度線が消滅している。提案手法では等照度線が消滅する位置とタイミングを同時刻の近接した等照度線を用いて推定するため、そのときに生じた推定誤差が、等照度線の位置と形状に影響を与える。
- (3) 光源から離れた位置で遮蔽物が周囲に存在しない領域では、光源位置の変化に伴う照度値の変化がほぼ線形となる。このような領域に対しては、中間位置に光源を移動したときの画像作成には画像補間手法が適している。

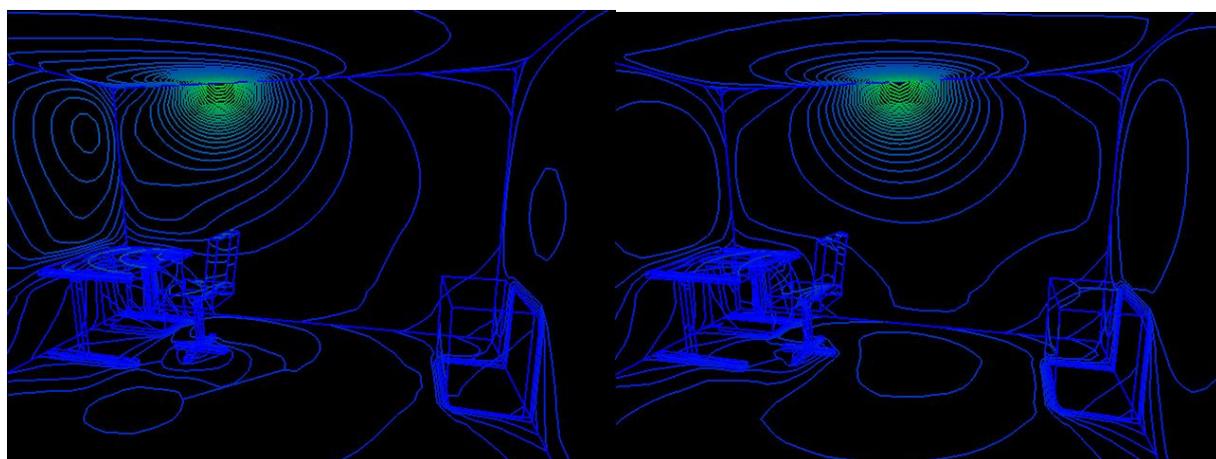
画像生成時間については、表2.6.1より、画像補間手法と比較すると計算時間は長いですが、提案手法で画像生成した場合でも実用的には十分に短い時間で画像生成が行なえる。また Radiosity 法による相互反射光計算を行なう方法に比べると、提案手法は、非常に短時間で画像生成が行なえる。

上述の議論をまとめると、提案手法は、特にハイライト部分において画像補間手法よりも精度よく画像生成することが可能であり、Radiosity 法により相互反射光計算を行なう方法に比べると非常に短い計算時間で画像生成を行なうことができる。ハイライト部分に対しては提案手法を用いて照度分布を算出し、光源の移動に対して照度値が線形に変化するような照度分布の変化に特徴のない領域については画像補間を用いる。このようなハイブリッド法を用いることで、より精度のよい画像を高速に生成することが可能である。



(a) 光源位置①における照度分布

(b) 光源位置②における照度分布



(c) 光源位置①における等照度線

(d) 光源位置②における等照度線

図 2.6.3 光源位置①と光源位置②に対する照度分布と等照度線



(a) モーフィングにより得られた等照度線

(b) 等照度線の補間により得られた照度分布

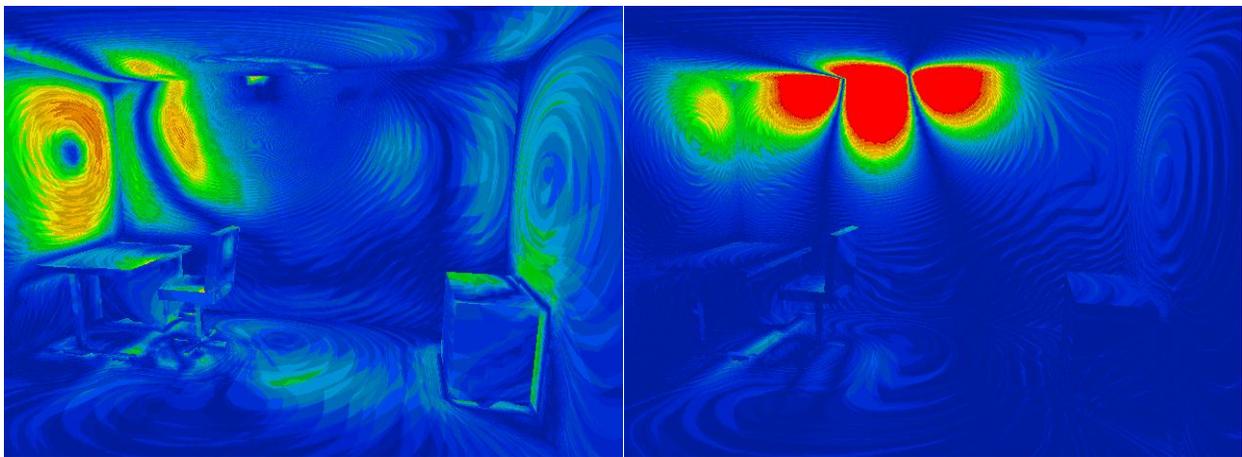
図 2.6.4 提案手法による結果



(a) 画像補間による結果

(b) ラジオシティ法による結果

図2.6.5 従来法による結果



(a) 提案手法による結果の誤差分布

(b) 画像補間による結果の誤差

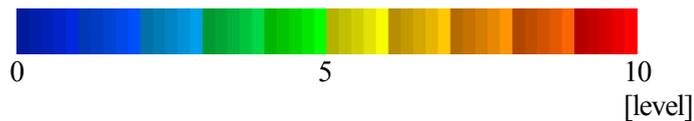


図2.6.6 各画像の輝度レベル(0~255)での絶対誤差分布

2.6.3. 直射光成分とテクスチャマッピングの導入

提案手法では、点光源を取り扱う場合には、イルミネーションモーフィングにより算出した2次反射以降の光の成分により得られた照度分布に、別計算により算出された直射光成分による照度分布を足し合わせることで、最終的な画像を生成する。光源位置①と光源位置②の midpoint に光源を設置したとき、イルミネーションモーフィングにより算出した照度分布(図2.6.4(b))に、直射光成分による照度分布を足し合わせることで生成した画像を図2.6.7(a)に示す。さらに、室内モデルの物体面に対してテクスチャマッピングを施して質感を向上した画像を図2.6.7(b)に示す。



(a) 直射光成分を考慮した結果



(b) テクスチャマッピングを施した結果

図 2.6.7 直射光およびテクスチャマッピングの導入

2.7 結言

本章では、光源設置位置をサンプリングし、それらサンプルされた位置に光源を設置したときの照度分布から、光源がそれらの中間位置に設置された時の照度分布を補間によって求める新たな手法(イルミネーションモーフィング)を提案した。各光源位置での照度分布における等照度線にモーフィング処理を施すことにより、中間位置に光源を設置したときの照度分布を高速に求めることを可能にした。提案手法における等照度線の対応付けの際に、等照度線の包含関係を表す **nesting tree** を用いることにより、等照度線の分岐、消滅、発生を考慮した適切な対応付けを行なうことを可能にした。また、等照度線の構成点の対応付けでは、等照度線の特徴に応じて手法を切り替えることにより、多種多様の等照度線を処理することを可能にした。

今後の課題として、構成点对応付け処理に用いる各種手法の実装、等照度線が消滅および発生する際の位置、タイミングの推定精度の向上が挙げられる。また、等照度線から照度分布を算出する際の、照度値の補間方法の改良が挙げられる。すなわち、等照度線間の照度補間関数を偏微分方程式[22][23][25]を解いて求めることにより、精度よい照度分布を算出することが可能となる。さらに、複雑なモデルへの適用、光源の移動範囲の2次元さらに3次元への拡張も今後の課題として挙げられる。

第3章

画像を用いた等輝度線の変化に
基づく照明変化画像生成

3.1 概説

画像モーフィングは、2つの画像間で対応付けられた特徴プリミティブを変形することにより、入力された2つの画像間で形状を滑らかに変化させる技術である。本章では、形状の変化ではなく光源移動時の輝度値の変化に着目し、光源位置の異なる2つの画像からそれぞれに等輝度線を求め、その等輝度線をワーピングすることにより、2つの光源間における輝度分布を算出し画像を生成する手法を提案する。算出された等輝度線をワーピングし、輝度分布を変形させる方法は、2章で述べた照度分布をモーフィングする方法を応用する。画像中の照明状況を変更する手法であることから、提案手法を第2章と同様にイルミネーションモーフィング手法とよぶ。ただし、2章で述べた手法は、3次元モデルの物体面上における照度分布を用いてイルミネーションモーフィングを行う手法である。本章で提案する手法は、画像情報中の輝度分布を用いてイルミネーションモーフィングを行う手法である。

3.1.1 背景

モーフィングはメタモルフォーゼ (metamorphosis : 変形) という語に由来し、例えば、コンピュータグラフィックス(以下, CG)から実写の人間へ、またはある人の顔から別の人の顔へと滑らかに変形させるといったように、実際には存在しない変形途中のフレーム (コマ) を作り出す画像処理技術である。2つの画像間のモーフィングは、メッシュの頂点、線分、曲線、あるいは点などのプリミティブにより、2つの画像間で対応した特徴を指定し、それに基づいて画像を変形することにより行われる。すなわち、画像モーフィングは、2つの画像間で対応付けられた特徴プリミティブを変形していくことにより行われる。これまでに開発された画像モーフィングは、特徴プリミティブにより次の6つの手法に分類される[27]。

(1) Mesh warping [28]

両画像をメッシュに分割し、対応するメッシュ頂点を一致させてモーフィングを行う。

(2) Field morphing [29]

特徴プリミティブとして線分のペアを用いて、モーフィングを行う。

(3) Radial basis functions [30] / thin plate splines [31]

Radial basis functions は、線分や曲面を点の集合として指定し、それらの離散点により3次元曲面を構成し、対応点と構成した曲面からの距離に関する関数を用いることにより変形を行う。また、radial basis functions と同様の手法に thin plate splines モデルを使用したものもある。

(4) Energy minimization [32]

曲線を点集合に変換し、それらの点集合の移動に対してエネルギー項を定義し、そのエネルギーの和を最小化することにより形状変形を行う。

(5) Multilevel free-form deformation [33]

Energy minimization と同様、点集合の移動に対するエネルギー最小化原理を用いるが、より高速に変形が行える。

(6) Work minimization [34]

特徴プリミティブとして点を用い、画像の輝度値を用いて自動的に特徴プリミティブの対応付けができる。

これらの画像モーフィングは、入力された2つの画像間で形状を滑らかに変化させる技術である。これに対して、提案手法は、形状の変化ではなく輝度値の変化に注目し、光源位置の異なる2つの入力画像からそれらの中間位置に光源を設置したときの画像を生成する。すなわち、画像モーフィングにおいては、形状に関する様々な特徴を画像中で抽出し、画像間で対応付けすることにより、形状を滑らかに変化させていた。これに対して、イルミネーションモーフィング手法は、輝度分布に関する特徴を抽出し、それらを画像間で対応付けすることにより輝度分布を滑らかに変化させる。このような輝度分布の滑らかな変化により光源の移動を模擬することができる。

様々な照明条件における照明効果を表現する関連研究として、入力画像に写っている周囲の環境を光源と考えて、物体のシェーディングを行う Image-Based Lighting (以下、IBL) [35] がある。IBLでは、入力画像から環境マップを取得し、その環境マップを光源として考える。環境中にある物体は環境マップを用いてシェーディングされるため、あたかもその物体が入力画像中に写っている環境中にあるような画像を生成することができる。そのため、現実世界に近いリアルな画像を生成することができる。しかし、IBL は入力画像から取得した環境マップを光源として、物体のシェーディングを行うことができるが、入力画像中の輝度分布を変化させることはできない。

IBL と同様の手法で、照明条件の異なる複数の顔画像を入力して、任意の照明条件下、任意の視点位置における顔画像を得る手法[35]が開発された。この手法では、特殊な装置(light stage)を用いて密にサンプルされた様々な光源方向における画像を取得し、それらをもとに画像の各ピクセルに対して光源方向に関する反射特性を取得する。この反射関数を用いて、任意の光源方向における各ピ

クセルの輝度値を算出し画像を生成する。また、得られたデータから肌の反射フィールドを作成することで、鏡面反射などの視点位置に依存する反射特性を考慮することができるため、任意の視点位置からの画像も生成可能である。この手法は、光源移動に伴い入力画像中の輝度分布を変化させることは可能であるが、画像を得るための装置が特殊であるとともに、得られる画像の枚数が多いため、取り扱いが困難である。

3.1.2 提案手法の特徴

提案手法は、輝度値を特徴線分として用いた画像モーフィングと、3次元モデルを用いたイルミネーションモーフィング手法の考え方を組み合わせて、画像中の輝度分布を変化させる。すなわち、2枚の異なる光源位置における画像中の輝度分布に対して等輝度線を配置し、それらをワーピングすることにより輝度分布を変化した画像を生成する手法である。

本章において、特に注目する提案手法の特徴は以下の3点である。

1. 画像情報のみを用いてイルミネーションモーフィングを行うことで、手法の有用性を高める。

1章で述べた3次元モデルを用いたイルミネーションモーフィング手法は、3次元の物体データが必要であるため、手法が適用できる状況がCGなどの3次元データを有する環境に限定される。これに対し、本章で提案する手法は、画像情報のみを用いるため、幅広い状況下で容易に手法を適用できる。

2. 等輝度線を配置する輝度値を最適に選ぶことで、光源移動時の照明の変化を効果的に表す。

提案手法は輝度分布を変化させることにより光源の移動を模擬することを目的としている。すなわち、光源の移動を人間が知覚できるように輝度分布を変化させるべきである。1章で述べたようにイルミネーションモーフィング手法は、光源の移動を人間が知覚しやすいハイライト部分や輝度分布が大幅に移動する面積の大きい部分に適している。また、等輝度（等照度）線を用いるイルミネーションモーフィング手法は、輝度分布の特徴を等輝度線によって表すため、輝度分布の特徴を最も表すような輝度値に等輝度線を配置することが重要になる。提案手法では、イルミネーションモーフィングをより効果的に適用させるため、人間が知覚や輝度分布の形状を考慮して、最適な輝度値を選出し、等輝度線を配置する。

3. カラー画像中の輝度分布に対してイルミネーションモーフィングを行い、効率的に画像を生成する。

画像中で照明条件が変化する場合、光源の移動の影響を最も受けるのは輝度成分である。提案手

法では、輝度情報を含む **HLS** 表色系を用いて、画像を表現し、輝度分布にイルミネーションモーフィングを施すことで効率よくカラー画像の照明状況を変更する。

本章では、光源移動時に画像中で最も変化する輝度分布に着目し、輝度分布に対するイルミネーションモーフィング手法について 3.2 節から 3.5 節で述べる。**HLS** 表色系で表現したカラー画像への拡張について 3.6 節で述べる。

3.2 提案手法の概要

本節では、提案手法の処理の流れについて述べる。図3.2.2は提案手法の概略処理手順である。

Step1 領域分割

光源位置の異なる2枚の入力画像を領域分割する(図3.2.1参照)。画像中で輝度が不連続となる部分は、等輝度線のトポロジーが複雑になり、その後の処理に悪影響を与えると予想される。よって、図3.2.1に示すように輝度が連続に変化する部分を領域と定義し、領域単位で等輝度線を取り扱うことにする(図3.2.2(c), (d))。

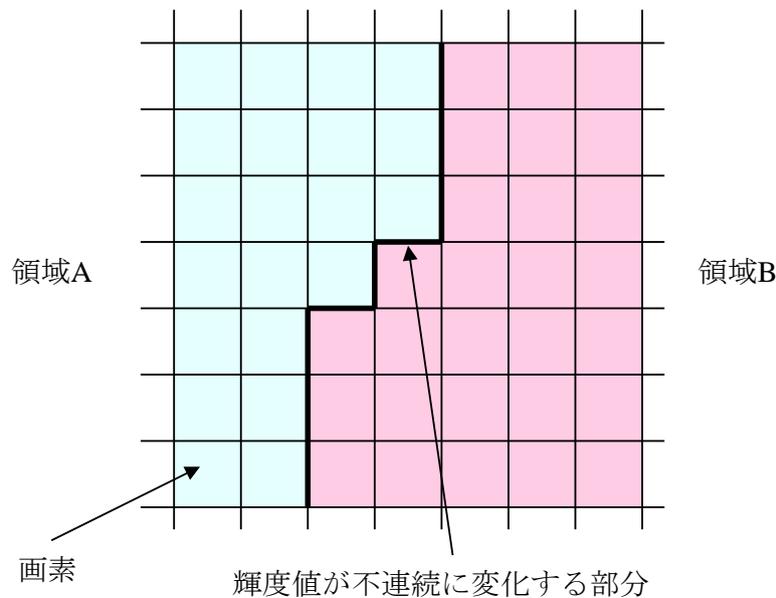


図3.2.1 領域分割

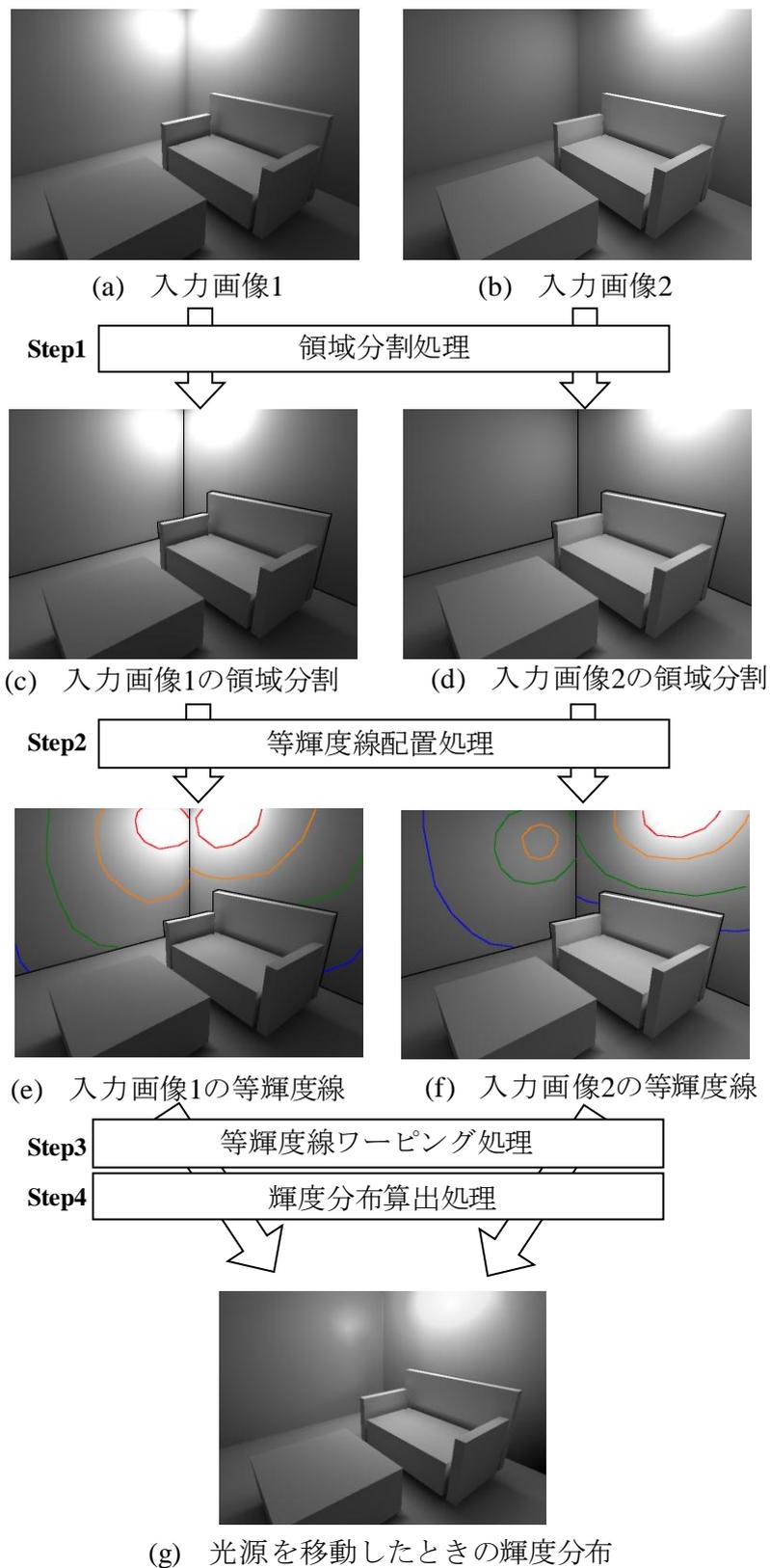


図 3.2.2 提案手法の概略処理手順

Step2 等輝度線の配置

マーチングキューブ法[14]のアルゴリズムを二次元問題に適用することにより領域ごとに等輝度線を配置する(図 3.2.2 (e), (f)).

等輝度線の配置は、大きく分けて以下の2つのステップからなる.

Step2.1 配置する等輝度線の輝度値サンプル

領域に対して配置する等輝度線の輝度値をサンプルする. 輝度値をサンプルする際, 等輝度線の対応付けや, ワーピングなどのその後の処理を考慮してサンプルする必要がある. 輝度値のサンプル方法の詳細は, 3.4 節の等輝度線の適切な配置方法において述べる.

Step2.2 等輝度線の作成

Step2.1 でサンプルした輝度値をもつ等輝度線を作成する. その際, 図 3.2.3 に示すように, 画素中心を結んだ三角形パッチを作成する. 三角形パッチごとにマーチングキューブ法[14]を適用することにより等輝度線を構成する線分を作成する. その後, 三角形パッチごとに作成された線分を隣接するパッチ間でトレースすることにより線分近似された等輝度線を作成する(図 3.2.4 参照).

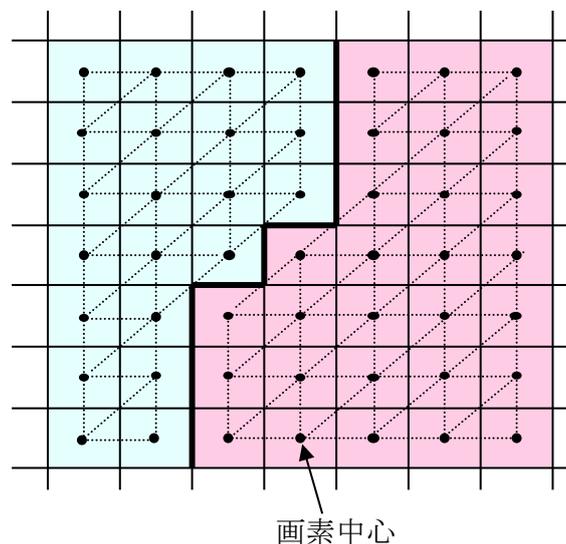


図 3.2.3 三角形パッチ分割

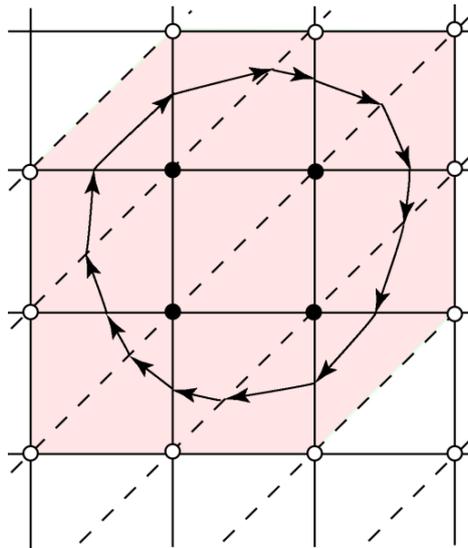


図 3.2.4 等輝度線の作成

三角形パッチ分割を用いたのは、三角形分割が領域の形状に最も近い分割を行えるためである。領域ごとに三角形分割を行った際、領域境界に隣接する領域の異なる画素中心どうしは、パッチを構成しない。すなわち、領域境界ではパッチは存在しないということになる。これは、輝度分布が急激に変化する領域境界に隣接する画素の輝度値が他の領域により干渉されるのを防ぐためである。領域境界に隣接する画素中心の輝度値は、その画素自身が属する領域内の等輝度線のみから算出され、他の領域において配置された等輝度線の影響は受けない。このことにより、領域境界における画素の輝度値が他の領域の影響を受けないため、領域境界が知覚可能となる。

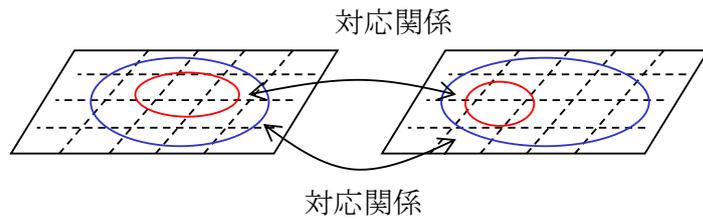
等輝度線の作成処理の詳細は、3.3節において述べる。

Step3 等輝度線のワーピング

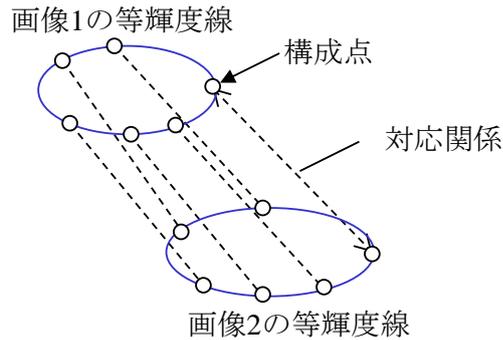
それぞれの光源位置における入力画像間で同じ輝度値をもつ等輝度線を対応付ける。その後、2つの画像間で対応付けられた等輝度線間を移動させる。等輝度線のワーピングは、以下の3つのステップからなる。

Step3.1 等輝度線間の対応付け

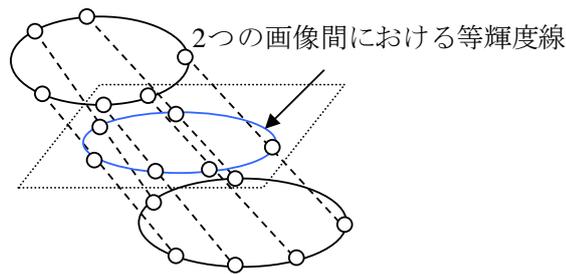
2つの入力画像において配置された等輝度線どうして輝度値が等しいものどうしを対応付ける。この処理では、まず画像において等輝度線の包含関係を *nesting tree*[24]を用いて表す。その *nesting tree* と等輝度線の輝度値、対応判定を行う等輝度線どうしが重複しあう割合を示す面積重複率を用いて等輝度線間の対応付けを行う(図 3.2.5 (a)参照)。



(a) 等輝度線間の対応付け



(b) 構成点間の対応付け



(c) 2つの画像間における等輝度線の生成

図 3.2.5 等輝度線のワーピング

Step3.2 等輝度線の構成点間の対応付け

対応する等輝度線どうしで、等輝度線の構成点間の対応をとる(図 3.2.5 (b)参照). この処理では、対応する等輝度線どうしの類似度を考慮して適切な対応付けを選択し、構成点間の対応付けを行う. 構成点間の対応付けについては、第2章、2.5節にて述べた.

Step3.3 2つの画像間における等輝度線の算出

2つの画像間における等輝度線を算出する. 対応する構成点どうしを直線で結び、それらを平面で切断することにより、2つの画像間における等輝度線を算出する(図 3.2.5 (c)参照).

Step4 輝度分布の算出

ワーピングにより得られた等輝度線から、各画素の輝度値を算出することにより輝度分布を算出する(図 3.2.2 (g)). 各画素の輝度値を算出する際、まず始めに等輝度線のラスタ化を行う。等輝度線のラスタ化をすることにより、画素の輝度値を算出する際に用いる等輝度線の探索が容易になる。また、輝度値を算出する画素と等輝度線の距離の算出が容易になる。また、等輝度線を構成する線分列のサイズは画素サイズであるため、ラスタ化することによる量子化誤差は無視することができる。その後、輝度値を算出する画素を挟む等輝度線の最短点までの距離と等輝度線の輝度値を用いて線形補間することにより画素の輝度値を算出する。例えば、図 3.2.6 (a)に示す等輝度線から画素 P の輝度値を算出する場合を考える。画素 P の輝度値 I_p は、画素 P とラスタ化された等輝度線 C_1, C_2 (図 3.2.6 (b)参照)への最短距離 d_1, d_2 、そして等輝度線 C_1, C_2 の輝度値 I_1, I_2 を用いて次式により算出される。

$$I_p = \frac{d_2 I_1 + d_1 I_2}{d_2 + d_1} \tag{3.2.1}$$

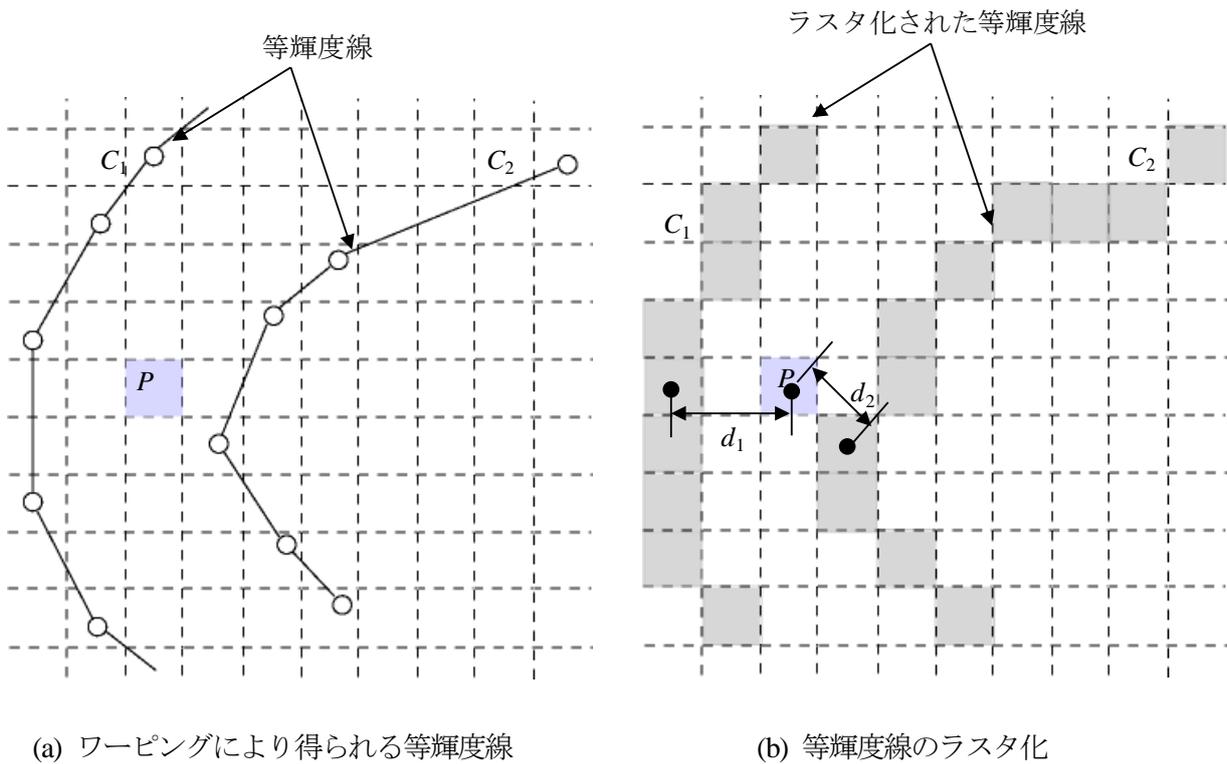


図 3.2.6 輝度分布の算出

3.3 画像情報からの等輝度線の算出

3.3.1 等輝度線の線分の作成

画素中心を結んだ三角形パッチを作成し、三角形パッチごとにマーチングキューブ法[14]の考え方を適用することにより、パッチごとの等輝度線の線分を作成する。

図3.3.1に示すようにパッチ S_k を構成する頂点 $(V_{k,1}, V_{k,2}, V_{k,3})$ には輝度値 $(I_{k,1}, I_{k,2}, I_{k,3})$ が格納されている。ここで、添字 k はパッチのインデックスであり、パッチは領域の左上から右下に向かってスキャンラインに沿ってインデックス付けされている。そのパッチ頂点に格納されている輝度値と配置する等輝度線の輝度値との大小関係を比較することにより、等輝度線が通過する辺を決定する。

各パッチ頂点における輝度値の大小関係を示すフラグを $f_{k,1}, f_{k,2}, f_{k,3}$ とし、式(3.3.1)により大小関係を決定する。そして、それぞれのフラグを降順に並べた数列を2進数と考え、これらを10進数にした値 K_k を式(3.3.2)より算出する。 K_k の値により等輝度線が交差するパッチ S_k 内の辺を決定する。

$$f_{k,j} = \begin{cases} 1 & (I_{k,j} \geq I_c) \\ 0 & (I_{k,j} < I_c) \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.3.1)$$

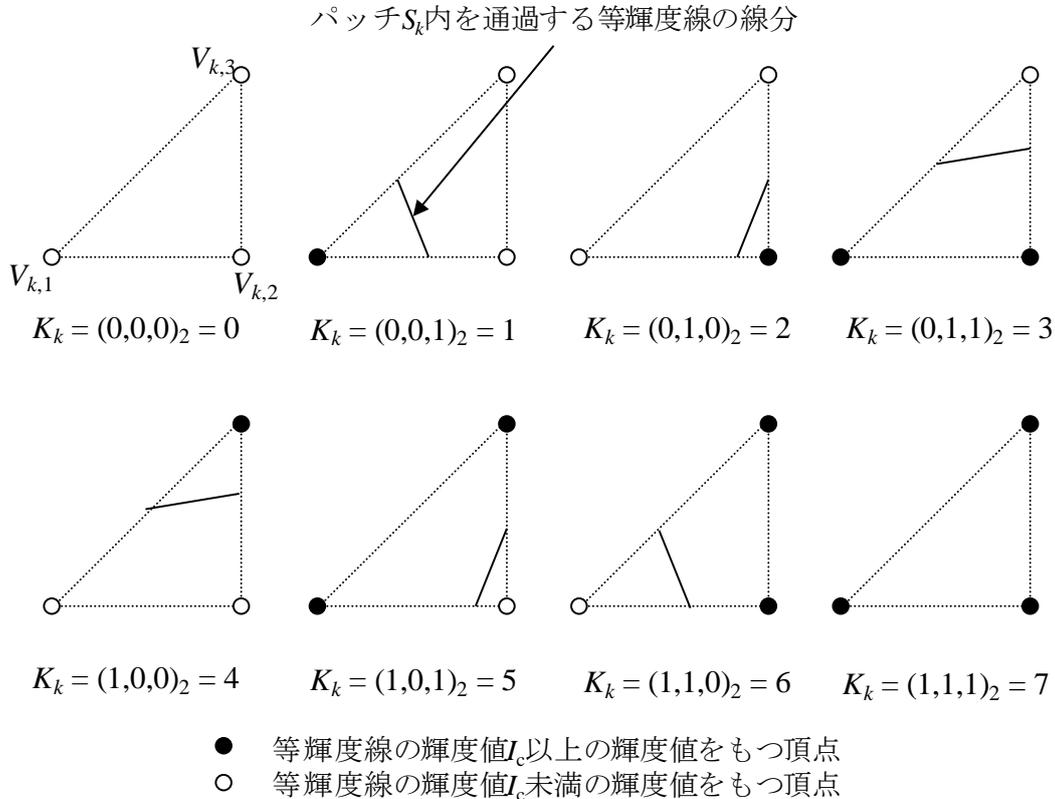


図3.3.1 等輝度線が通過する辺のパターン

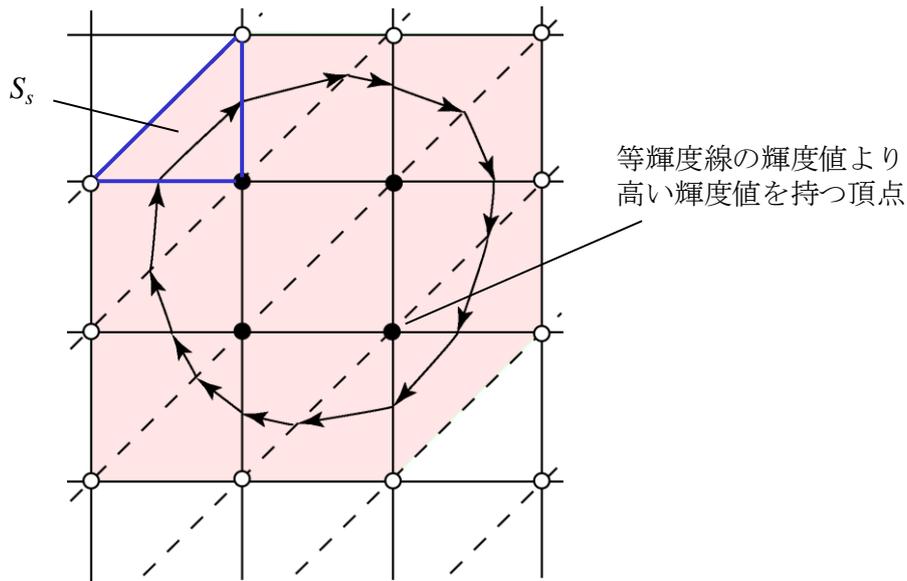


図 3.3.2 等輝度線のトレース

$$K_k = (f_{k,3}, f_{k,2}, f_{k,1})_2 = 4f_{k,3} + 2f_{k,2} + f_{k,1} \quad (3.3.2)$$

図 3.3.1 に示すように、等輝度線がパッチ内を交差する場合は全部で 6 通りある。等輝度線がパッチ内を交差する辺が決定した後、辺を構成するパッチ頂点の輝度値と等輝度線の輝度値から線形補間により、等輝度線が通過する辺上の点を決定する。これらの処理を全てのパッチに対して行うことにより、等輝度線の線分を作成する。

3.3.2 等輝度線の線分列トレース

2.3.1 節で示した方法を用いて作成した等輝度線の線分を隣接するパッチ間でトレースし、等輝度線の線分列を求め、線分近似した等輝度線を作成する。ここで、等輝度線を構成する線分列の端点を等輝度線の構成点とする。以下に、図 3.3.2 に示す等輝度線を例にして、処理手順を示す。

Step1 等輝度線の線分の有無を示すフラグ N_k の設定

パッチ S_k を通過する等輝度線の線分の有無を示すフラグ N_k を設定する。すなわち、パッチ S_k を通過する等輝度線がある場合は $N_k = 1$ 、ない場合は $N_k = 0$ とする。

Step2 トレースを開始するパッチの探索

パッチ S_k を通過する等輝度線の線分の有無を示すフラグ N_k を用いて、その領域上においてまだト

レースを行っていない等輝度線の線分が存在するパッチ S_k を探索する. すなわち $N_k=1$ ならば, そのパッチには未探索の等輝度線が存在する. このパッチをトレース開始パッチ S_s とし, **Step3** へ進む. $N_k=1$ となる S_k が見つかるまで, パッチ番号をインクリメントしながら, 探索を続ける.

Step3 トレースする方向の決定

パッチ S_k に等輝度線の線分を作成する際に算出した値 K_k を用いて, 等輝度線をトレースする方向を決定する. トレースする方向は, 等輝度線の輝度値よりも高い輝度値を持つパッチ頂点が右側にくるように決定する. 図 3.3.3 にすべての K_k における等輝度線のトレース方向を示す.

Step4 パッチの移動

パッチ内での等輝度線の線分の終点から隣接するパッチへ移動する. パッチの移動の際, 終点から次のパッチにおけるトレースの始点が求まる. ただし, 移動したパッチがトレースを開始したパッチ S_s であるならば, **Step2** へ戻り, 同じ輝度値を持つ他の等輝度線について探索を再開する. 移動したパッチがトレースを開始したパッチ S_s でないならば **Step3** へ戻り, 処理を繰り返す.

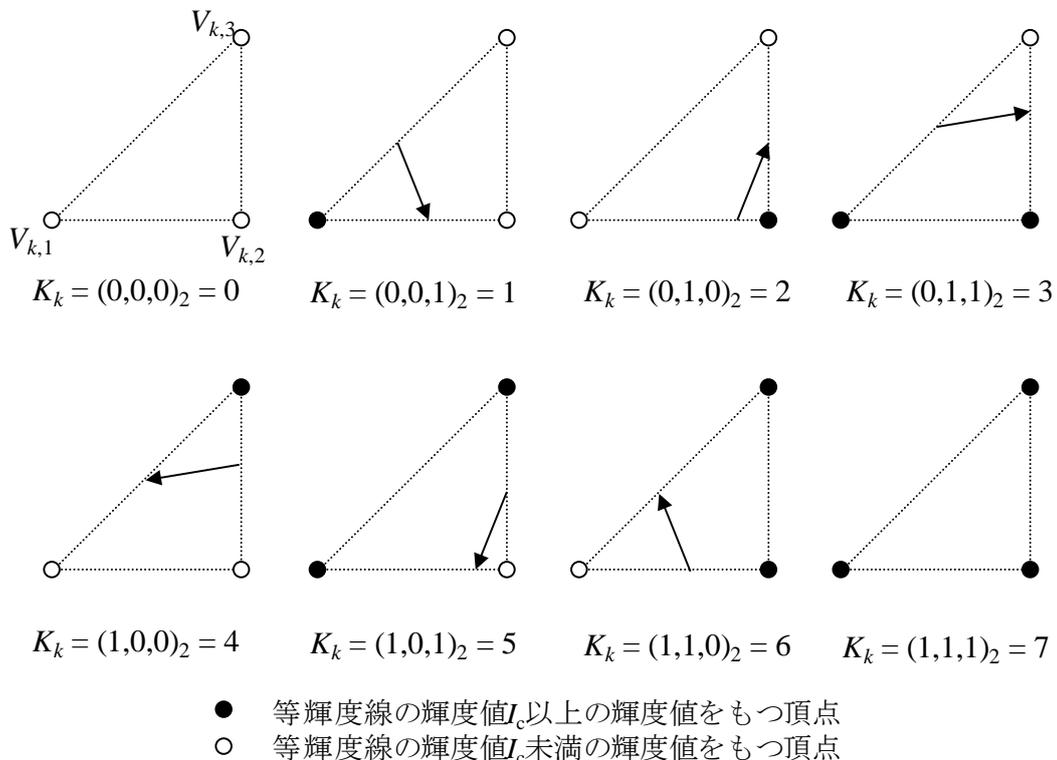


図 3.3.3 等輝度線のトレース方向

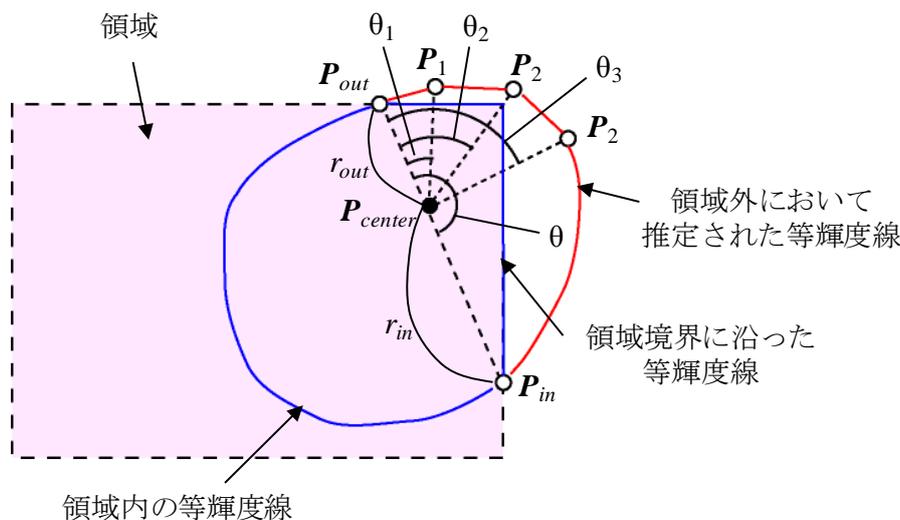


図 3.3.4 等輝度線の領域境界における形状推定

3.3.3 等輝度線の補外処理

パッチごとに等輝度線の線分列を作成し、トレースする際に等輝度線が領域の境界で途切れる場合がある。そのような場合には、領域外に等輝度線が存在すると仮定し、領域内部の形状を考慮して領域外における形状を推定する。

図 3.3.4 に示すように領域内部の等輝度線が P_{out} で領域境界に達し、 P_{in} から再び領域内部に戻る場合を考える。 $P_{out}(x_{out}, y_{out})$ において領域境界に達した場合は、輝度値の高い領域を右側に見る方向で領域境界に沿って等輝度線をトレースする。その後、 P_{in} から領域内における等輝度線のトレースを行うことにより、一部分が領域境界の形状をした、閉じた等輝度線を作成する。作成した等輝度線の内部にある画素中の最大輝度値をもつ画素の座標を P_{center} とする。最大輝度値をもつ画素が複数存在する場合は、それらの画素の平均座標を P_{center} とする。 P_{out} から P_{center} までの距離を r_{out} 、 P_{in} から P_{center} までの距離を r_{in} とする。また、 P_{out} と P_{center} を結ぶ線分と、 P_{in} と P_{center} を結ぶ線分の成す角度を θ とする。ここで、 θ は P_{out} から P_{in} へ時計回りに進む角度とする。得られた θ を n 等分することによりサンプルされた角度を $\theta_k (k=1, \dots, n-1)$ とする。

$$\theta_k = \frac{k}{n} \theta \quad (3.3.3)$$

r_{out} と r_{in} の間を θ_k に対して線形に変化させることにより、 θ_k における P_{center} からの距離 $r_k (k=1, \dots, n-1)$ を算出する。

$$r_k = \frac{k}{n} (r_{in} - r_{out}) + r_{out} \quad (3.3.4)$$

θ_k と r_k を用いて領域外における等輝度線の構成点座標 $\mathbf{P}_k(x_k, y_k)$ を算出する.

$$x_k = x_{center} + \frac{r_k}{r_{out}}(x_{out} - x_{center})\cos(\theta_k) \quad (3.3.5)$$

$$y_k = y_{center} + \frac{r_k}{r_{out}}(y_{out} - y_{center})\sin(\theta_k) \quad (3.3.6)$$

領域境界に沿った等輝度線から領域外における等輝度線へと変更を行う. 以上の処理を行うことにより, 領域外における等輝度線の形状を推定する.

3.4 等輝度線を配置する輝度値の決定

等輝度線の配置は、配置する等輝度線の輝度値サンプルと等輝度線の作成からなる(3.1 節参照). 等輝度線の輝度値サンプルは、その後の処理である等輝度線のワーピングや等輝度線からの輝度分布の算出において大きな影響を与える. そのため、その後の処理を考慮した等輝度線の輝度値サンプルを行う必要がある.

本節では、等輝度線の適切な配置方法について、3.4.1 節で等輝度線を配置する際に考慮すべき点について述べる. 3.4.2 節で累積頻度分布を用いた等輝度線の輝度値サンプル手法について述べる. 2.4.3 節で輝度値の頻度に対する等輝度線の配置手法について述べる.

3.4.1 等輝度線の配置について考慮すべき点

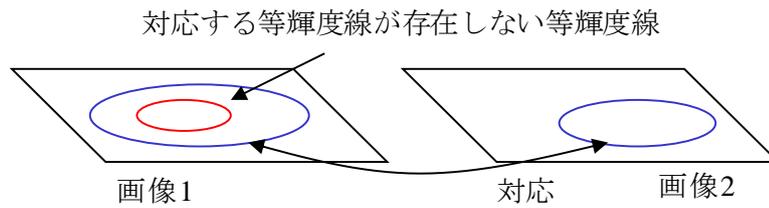
等輝度線を配置する際、その後の処理である等輝度線のワーピングや等輝度線からの輝度分布の算出を考慮して等輝度線を配置する必要がある. 等輝度線を配置する際には、以下の3つの点を考慮する.

Point 1 2つの画像間で対応付けられる等輝度線の本数ができるだけ多くなるように配置する.

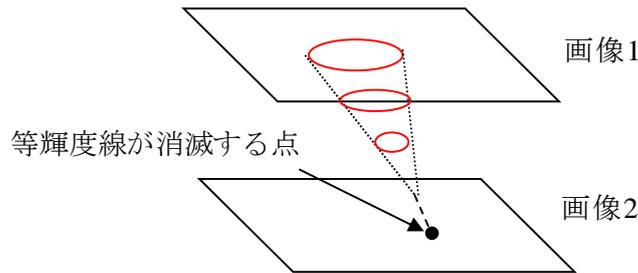
2つの画像間で対応のとれた等輝度線は光源の移動に伴って自然に移動する. このような等輝度線が多く配置されることにより、それらの等輝度線から算出される輝度分布も自然な移動を表現できる. また、2つの画像間で対応のとれない等輝度線がある場合、そのような等輝度線は2つの画像間を移動する際に消滅(発生)するものとし、特殊処理を施すことにより消滅(発生)するタイミングと位置を推定する必要がある(図 3.4.1 参照). この特殊処理により、算出される輝度分布は不自然になる危険性があるため、対応のない等輝度線は少ないことが望ましい(等輝度線の発生消滅については、第2章、2.4.5 節、等照度線の発生と消滅を参照).

Point 2 領域全体に空間的に一様に配置する.

領域全体において配置される等輝度線の間隔に粗密がある場合、等輝度線の間隔が疎な部分にある画素は間隔が密な部分に比べて等輝度線からの距離が大きくなる(図 3.4.2 参照). 各画素の輝度値は、近傍の等輝度線を用いて線形に近似する(輝度値の算出方法は、3.2 節参照). 遠く離れた等輝度線を用いると輝度分布が非線形に変化する場合に不自然な輝度分布が算出されてしまうため、空間に一様に等輝度線が配置されることが望ましい.



(a) 対応関係の無い等輝度線



(b) 対応関係が無い等輝度線に対する処理

図 3.4.1 等輝度線の消滅

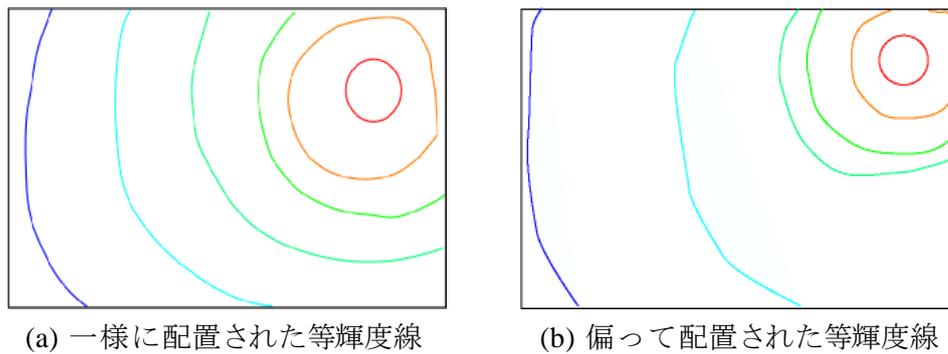


図 3.4.2 等輝度線の配置

Point 3 重要度の高い、人間の目が敏感に感知する輝度値の高い等輝度線を配置する。

輝度値の高い部分は、人間の目が敏感に反応するため微小な輝度変化にも対応できるように高い輝度値をもつ等輝度線を必要とする。一方、輝度値が低い部分は、光源移動時の輝度分布の変化が知覚しにくい。特に、輝度分布が緩やか(平坦)で変化が小さい場合には、等輝度線の間隔を広くし、遠く離れた等輝度線間から線形補間により各画素の輝度値を算出しても、視覚的な不自然さは知覚されない。同数の等輝度線を配置するならば、人間が敏感に感知するより輝度値の高い輝度値に配置する方が望ましい。

提案手法では、**Point 1** と **Point 2** を考慮するため累積頻度分布を用いた等輝度線の輝度値サンプル手法を提案する。また、**Point 3** を考慮するため輝度値の頻度に対する重み付け手法を提案する。

3.4.2 累積頻度分布を用いた等輝度線の輝度値サンプル法

3.4.1 節で述べた **Point 1** と **Point 2** を実現するために、累積頻度分布を用いて等輝度線を配置する輝度値をサンプルする。累積頻度分布の作成と、累積頻度から等輝度線を配置する輝度値をサンプルする処理手順を示す。

- Step 1** 配置を行う領域内にある画素の輝度値を 2 つの画像でまとめてヒストグラムを作成する(図 3.4.3).
- Step 2** ヒストグラムの輝度値の高い頻度から輝度値の低い頻度へと順次その頻度を累積することにより、累積頻度分布を作成する(図 3.4.4).
- Step 3** 得られた累積頻度分布の累積頻度の軸を等間隔に分割し、その累積頻度に対応する輝度値を等輝度線の輝度値とする(図 3.4.5).

配置される等輝度線によって挟まれる領域内の画素数を一定にすることにより、領域全体にわたって一様に等輝度線を配置することができる。この手法では、等間隔に配置された画素の頻度を考慮して等輝度線の輝度値をサンプルするため、配置される等輝度線によって挟まれる領域内の画素数を一定にすることができる(**Point 2** を考慮)。

2 つの画像の領域内にある画素の輝度値を合わせて 1 つの累積頻度分布を作成することにより、2 つの画像間で輝度値の重なる部分に等輝度線を多く配置することができる(**Point 1** を考慮)。図 3.4.3 において画像 1 と画像 2 の輝度値の重なる部分では、画像 1 の画素の輝度値と画像 2 の画素の輝度値の両者の頻度が累積頻度分布を作成する際に加え合わされるため、重なり部分の累積頻度曲線の傾きが大きくなる。これにより、輝度値の重なる部分での輝度値のサンプル幅が小さくなり、対応付けられる等輝度線をより多く配置することができる。

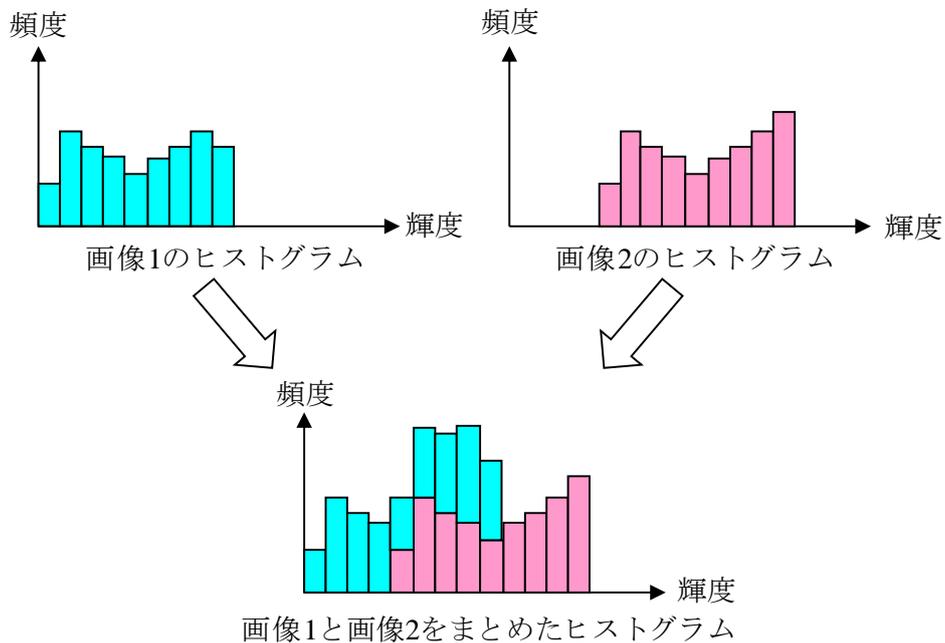


図 3.4.3 ヒストグラムの算出

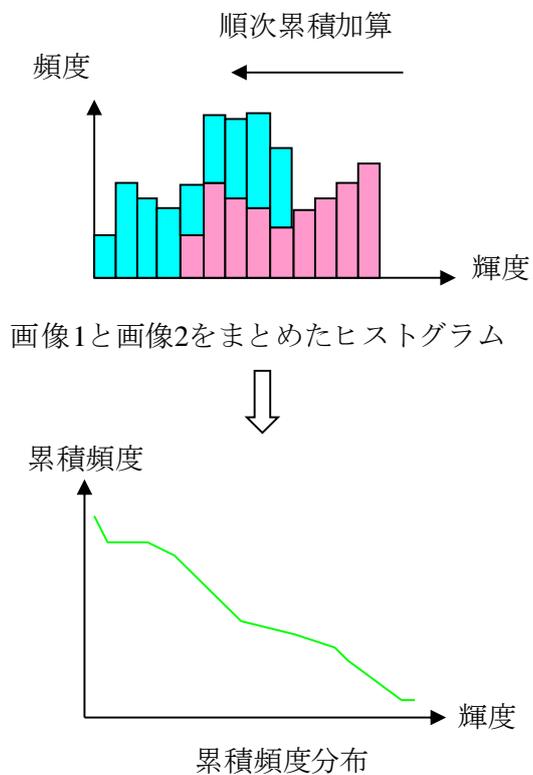


図 3.4.4 累積頻度分布の算出

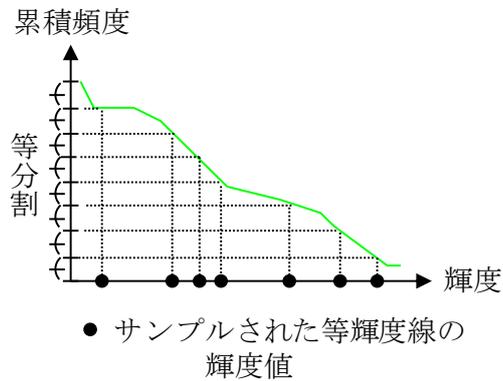


図 3.4.5 等輝度線の輝度値サンプル

3.4.3 輝度値の頻度に対する重み付け手法

インポートランスサンプリング(**Point 3**)の観点から、画像中で重要度が高い部分、すなわち、輝度値の低い部分より高い部分に等輝度線を多く配置する手法を提案する。

3.4.2 節の **Step 1** において、ヒストグラムを作成した後、ヒストグラムの頻度に対する重み付けを行う。提案手法では、最低輝度値の頻度には重み $w=1$ 、最高輝度値の頻度には重み $w=W$ となるように線形に変化する重み関数(図 3.4.6)を輝度分布に掛け合わせる。この処理により、輝度値の高い部分の累積頻度曲線の傾きが大きくなり、輝度値の高い等輝度線がより多く配置される。

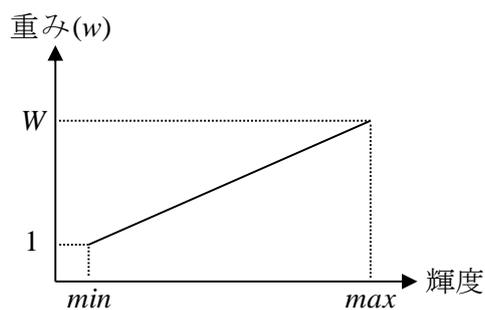


図 3.4.6 重み関数

3.5 輝度値画像への適用例

画像中の照明条件が変化する際、光源の移動により最も強く影響を受けるのは輝度成分である。提案手法は、カラー画像中の光源移動を考える際に、輝度分布に対してイルミネーションモーフィングを適用することで、効率よく光源移動時の画カラー像を生成する。故に、本節では光源移動時の輝度分布の変化に着目し、光源位置の異なる2つの輝度分布からそれらの光源間の中間位置に光源を設置したときの輝度分布を生成した適用例をもとに手法の有用性を考察する。

3.5.1節にて2枚の輝度分布(入力画像)とその領域分割結果を示す。3.5.2節では、提案手法によって得られた等輝度線表示画像を示し、3.4節で述べた等輝度線の適切な配置手法の有用性を示す。3.5.3節では、等輝度線から輝度分布を算出した輝度分布表示結果を示す。

3.5.1 入力画像(輝度分布)と領域分割結果

光源位置の異なる2枚のCG画像を作成し、その輝度分布を入力画像として用いた(図3.5.1)。提案手法では、入力画像に対して領域分割処理を行い、得られた領域に対して等輝度線を配置し、それらをワーピングすることにより2つの画像間で光源を移動したときの画像を生成する。領域分割を行った結果を図3.5.2に示す。本章では、光源の移動に伴って輝度分布が変化の様子が顕著に現れる面である領域1(図中赤色部分)と領域2(図中緑色部分)に対して等輝度線を配置し、ワーピングを行った。領域1と領域2の画像情報を表3.5.1に示す。

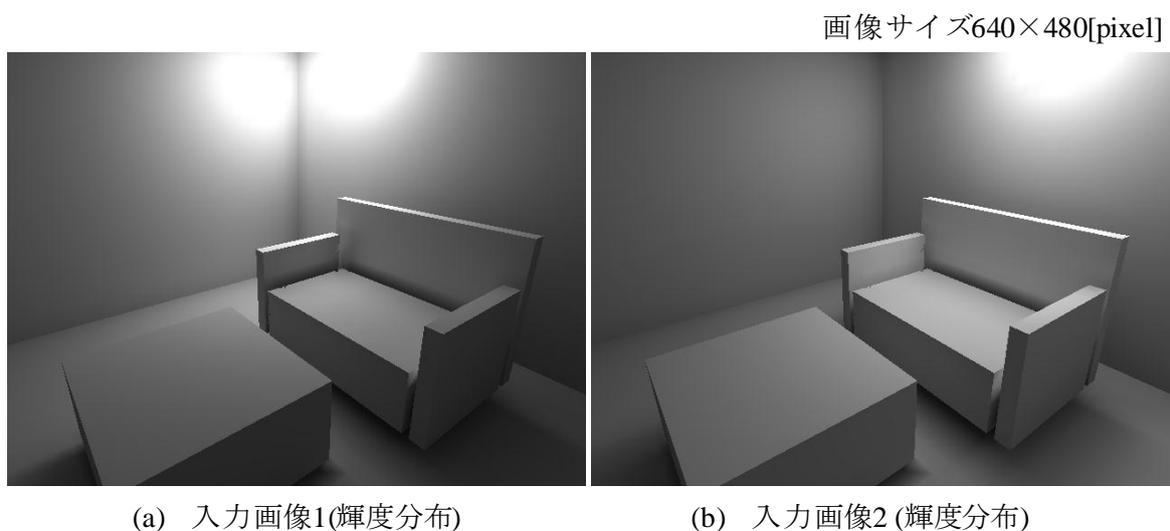


図3.5.1 入力画像

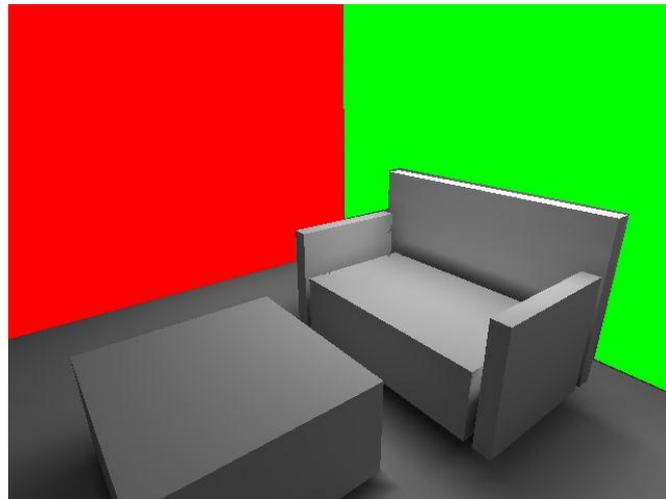


図 3.5.2 領域分割結果

表 3.5.1 各領域の画像情報

		領域 1	領域 2
画素数		88259	98732
パッチ数		175319	135958
最高輝度値	入力画像 1	255	255
	入力画像 2	127	255
最低輝度値	入力画像 1	56	33
	入力画像 2	55	49

3.5.2 等輝度線配置結果

3.4 節で述べた等輝度線の適切な配置手法を用いて、各入力画像に対して配置した等輝度線を表示した画像を図 3.5.3 に示す。また、比較のために領域内に含まれる画素の輝度値の範囲を単に一定サンプルすることにより等輝度線を配置した画像を図 3.5.4 に示す。提案手法により配置された等輝度線を 2 つの画像間でワーピングすることによって得られた等輝度線を表示した画像を図 3.5.5 (a) に、輝度値の一定サンプルにより配置された等輝度線を 2 つの画像間でワーピングすることによって得られた等輝度線を表示した画像を図 3.5.5 (b) に示す。等輝度線の輝度値のサンプル数はどちらの場合も 10 とした。輝度が高い等輝度線の配置を行うための重み関数は、最低輝度値には重み $w=1$ 、最高輝度値の頻度には重み $w=20$ となるように線形に変化する重み関数を用いた。

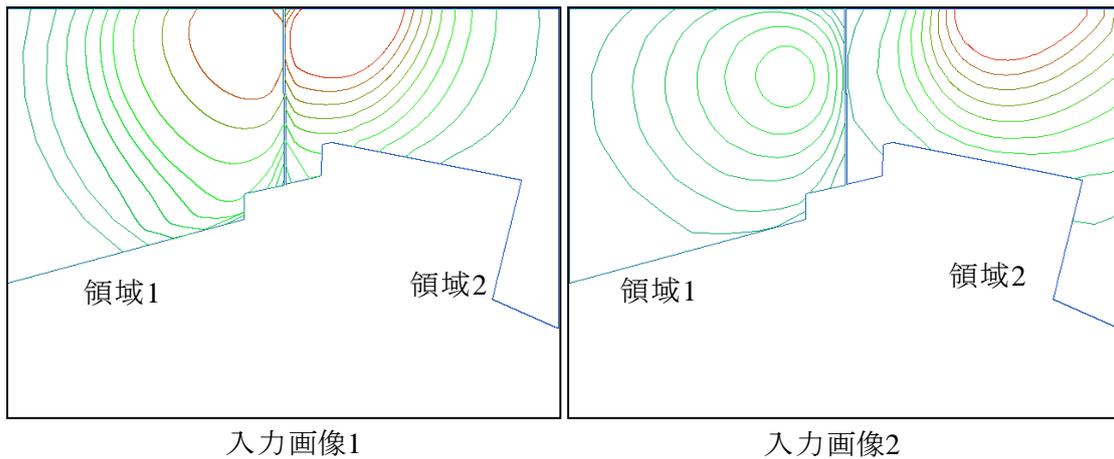


図 3.5.3 提案手法による等輝度線の配置

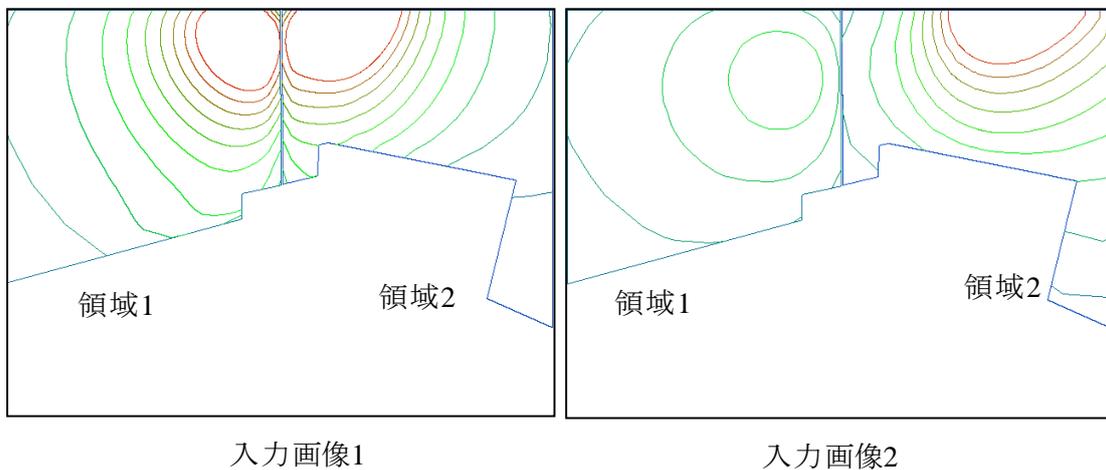


図 3.5.4 一定サンプルによる等輝度線の配置

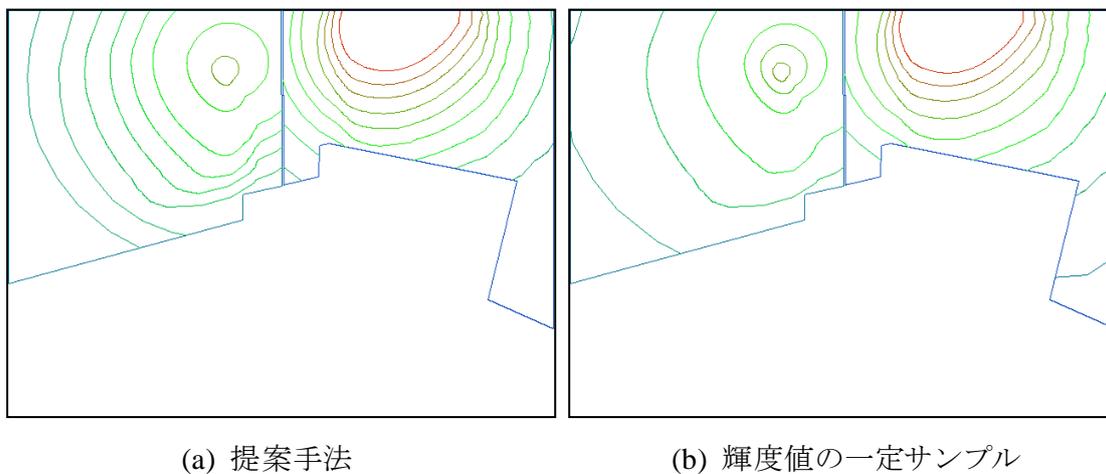


図 3.5.5 ワーピング結果

領域1の等輝度線の配置に着目する。図3.5.4より、輝度値の一定サンプルにより配置された等輝度線は入力画像1において10本であり、入力画像2において4本である。これらの等輝度線の中で対応がとれている等輝度線は4本である。一方、図3.5.3より、提案手法により配置された等輝度線は入力画像1において10本であり、入力画像2において7本である。これらの等輝度線の中で対応がとれている等輝度線は7本である。輝度値の一定サンプルに比べて提案手法の方が、対応がとれている等輝度線の本数が多く、2.4.1節で説明した等輝度線の対応が考慮されていることがわかる。入力画像2において配置された等輝度線に注目すると、提案手法は、等輝度線が領域全体にわたって配置されており、領域全体の空間的に一様な配置が考慮されていることがわかる。

領域2の等輝度線の配置に着目する。図3.5.3、図3.5.4より、どちらの手法とも画像1、画像2において配置された等輝度線は10本であり、それらすべての等輝度線の対応がとれている。等輝度線の輝度値に注目すると、最高輝度値の70パーセント以上の輝度値をもつ等輝度線の本数は、提案手法が3本、輝度値の一定サンプルが2本であり、提案手法により重要度の高い等輝度線が配置されていることがわかる。

領域全体の空間的に一様な配置に注目すると、一定サンプルの方が空間的に一様に配置されていることがわかる。これは、重要度を考慮する際に用いた重み関数の影響である。重要度の高い等輝度線が配置させることと、一様に配置させることは相反する目標である。本節で用いた適用例に発生させた等輝度線10本であり、その10本をできるだけ高輝度領域に配置させるように重み関数を選んだ結果である。重要度の高い等輝度線の配置と、一様な配置のトレードオフは、ユーザが選ぶ重み関数によって制御される。

最後に、ワーピング結果に注目する。図3.5.5より、領域1において2つの画像間で等輝度線をワーピングすることにより得られた等輝度線は、提案手法で9本、輝度値の一定サンプル手法で7本であった。提案手法において2つの画像間での等輝度線の対応が考慮されているため、ワーピングした際に自然に移動する等輝度線の数が増える。

ワーピングにより得られた等輝度線が空間的に一様に分布しているため、画素の輝度値を算出する際に、提案手法により自然な輝度分布が得られることが期待される。なお、この適用例では輝度値を一定サンプルにサンプルした方が、等輝度線を全体的に一様に配置できていたが、提案手法に偏りがあるのは、低い輝度の領域である。故に、算出される輝度分布は視覚的に違和感のない分布形状が得られると予想される。

重要度を考慮することにより領域2において輝度値が高い等輝度線が移動しており、これらの等輝度線から人間の目が敏感に反応する輝度値が高い部分に対して、自然な輝度分布が得られることがわかる。

3.5.3 輝度分布表示結果

提案手法により2つの入力画像間で光源を移動させた場合の輝度分布を図3.5.6に示す。比較のために2つの画像の輝度値を光源位置に関して線形にブレンディングすることにより得られた輝度分布を図3.5.7に示す(以下この手法を線形補間と呼ぶ)。提案手法の輝度分布において、2つの領域以外の部分は2つの入力画像の輝度値を線形補間により、輝度分布を算出している。図3.5.6, 2.5.7は図3.5.1(a)をSource画像($t=0$), 図3.5.1(b)をTarget画像($t=1$)として、中間画像($t=0.3, 0.5, 0.7$)を示している。また、ハイライト部分の変化の違いを詳細に表すため、図3.5.6, 図3.5.7をそれぞれ疑似カラーで表現し、図3.5.8, 図3.5.9にそれぞれ示す。

図3.5.6と図3.5.8より、提案手法において算出された輝度分布は特に領域2のハイライト部分において自然に表示されていることがわかる。一方、図3.5.7と図3.5.9より、線形補間により算出された輝度分布は、ハイライト部分がぼやけたように表示されており、自然な光源の移動を模擬できていないことがわかる。

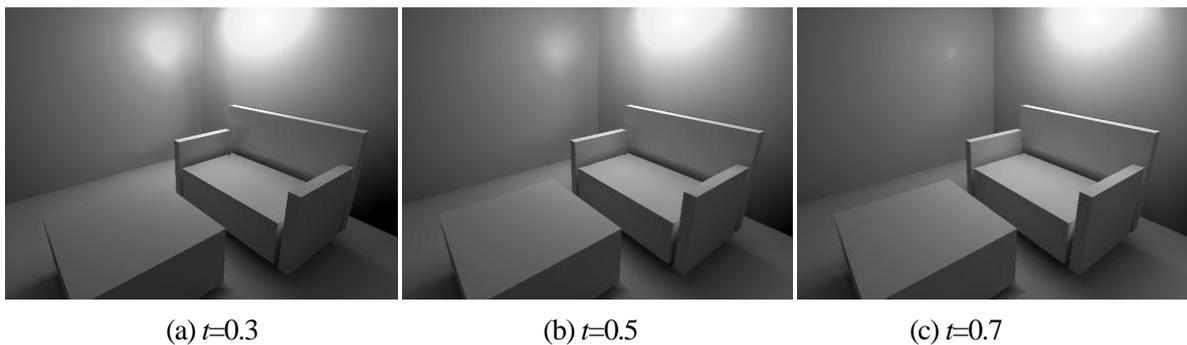


図3.5.6 提案手法による中間画像

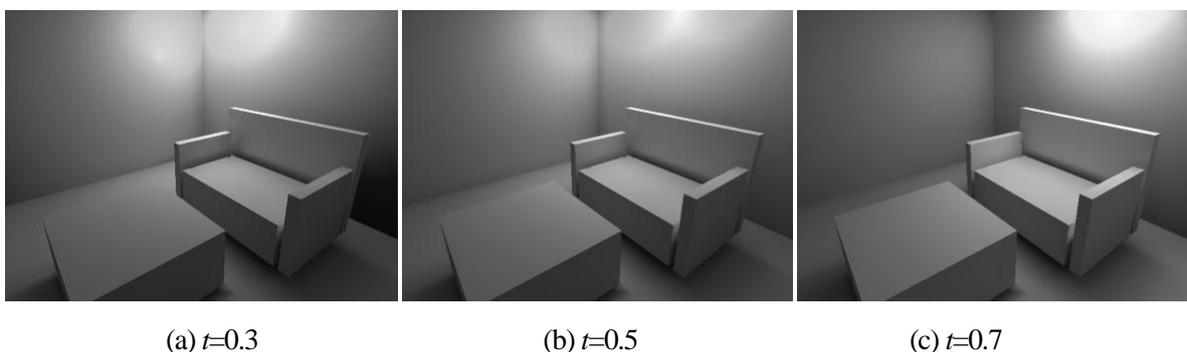


図3.5.7 線形補間による中間画像

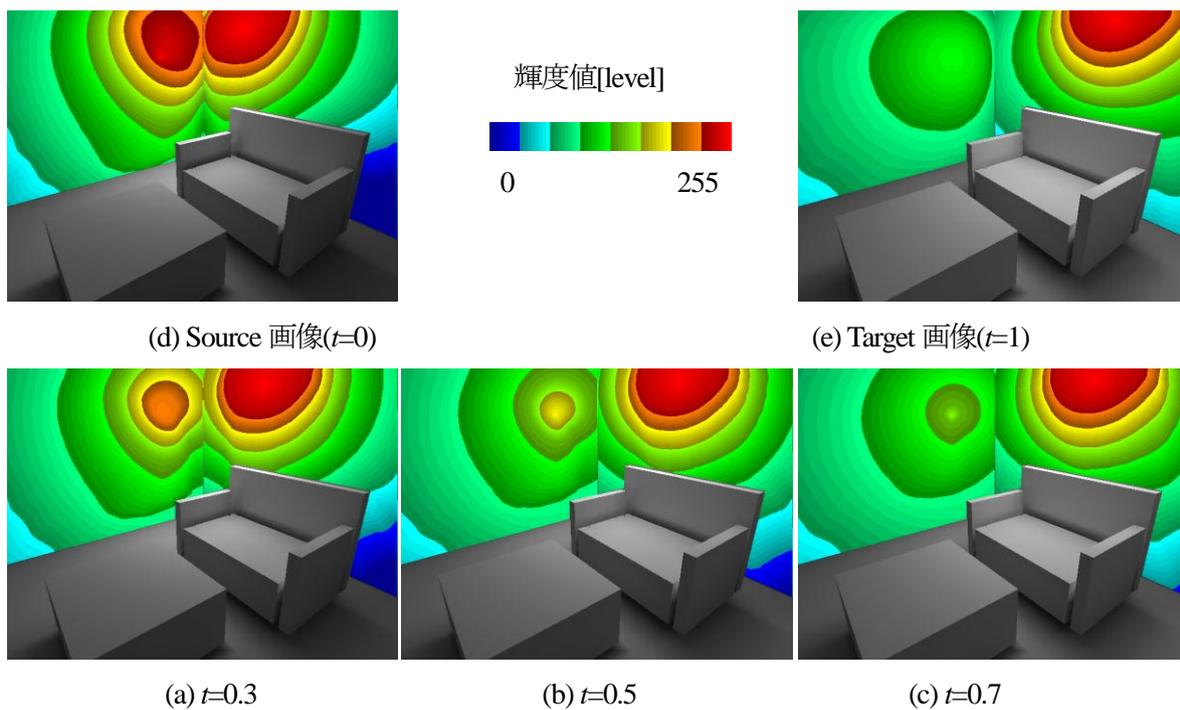


図 3.5.8 提案手法による中間画像

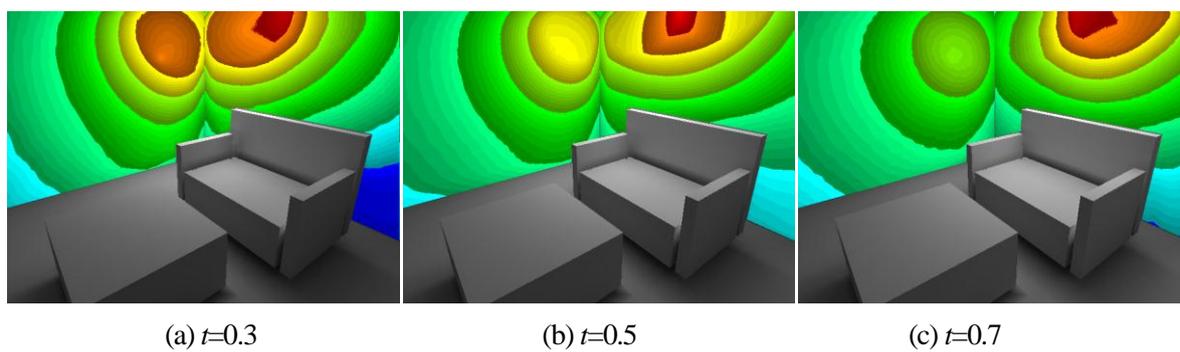


図 3.5.9 線形補間による中間画像

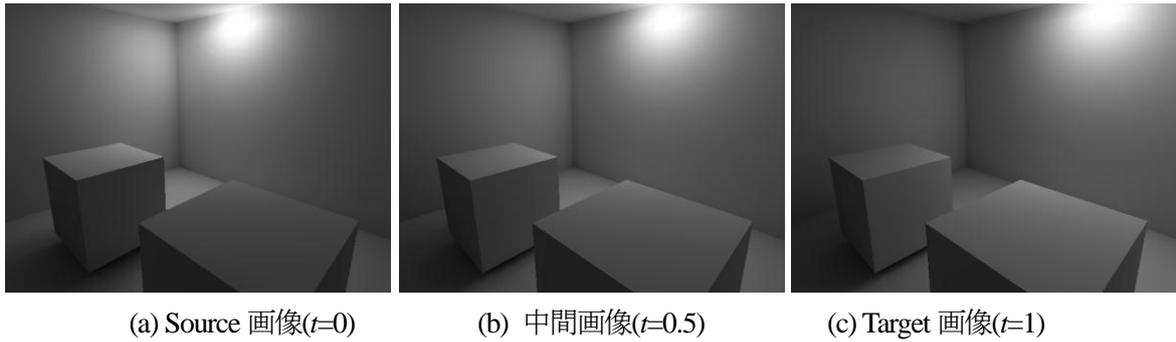


図 3.5.10 Radiosity 法による画像(真値画像)

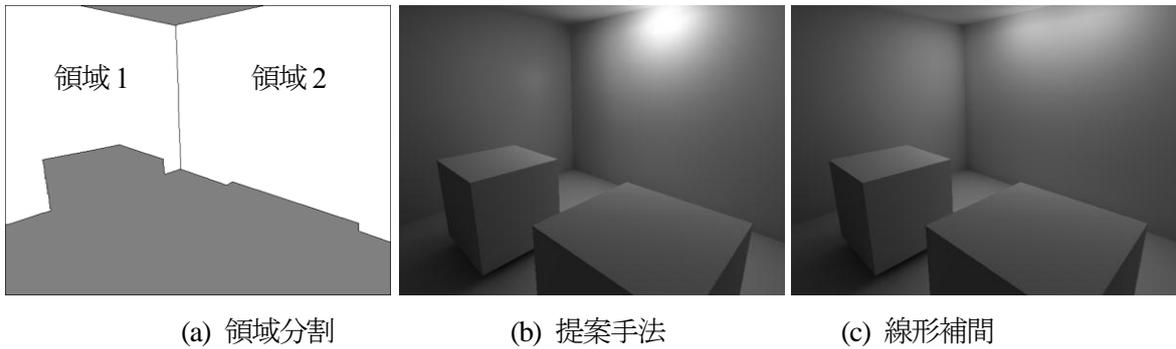


図 3.5.11 各手法による中間画像

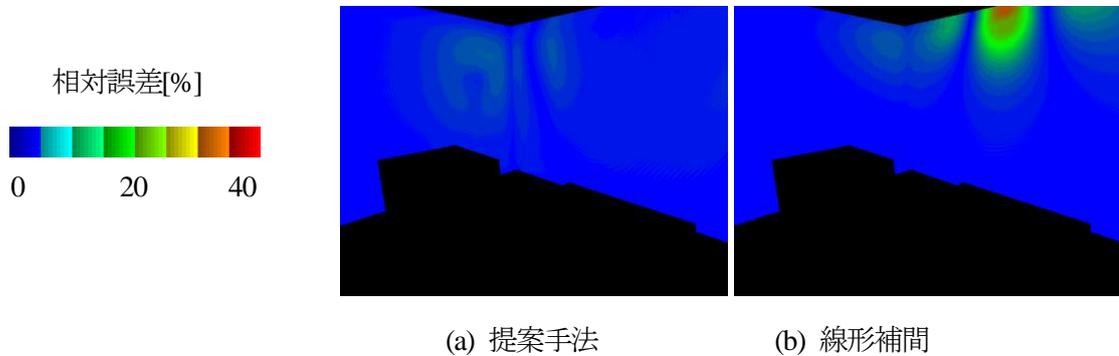


図 3.5.12 各手法と真値画像の相対誤差分布

図 3.5.10 に示すモデルを用いて、提案手法と線形補間の定量的評価を示す。図 3.5.10 は Radiosity 法によって算出された画像である。Radiosity 法は、相互反射光の方程式を直接解いて輝度値を算出するため、これを真値画像とする。図 3.5.11(b)は提案手法により生成した中間画像である。図 3.5.11(a)に示す領域に対してイルミネーションモーフィングを適用し、それ以外の領域は線形補間により輝度値を算出した。図 3.5.11(c)は線形補間により算出された輝度分布である。

図 3.5.12 に真値画像(Radiosity 法による)に対する、提案手法と線形補間の相対誤差の分布を示す。

図3.5.12に示すように、光源のハイライト部分における相対誤差の差は明確であり、線形補間では表現できない光源のハイライトの移動を提案手法が表現できている。

次に、図3.5.12における相対誤差の最大値、平均値、分散値を図3.5.13に示す。また、画像中に含まれる任意の誤差以下のピクセル数の累積頻度分布を図3.5.14に示す。図3.5.13より、領域1において、提案手法は線形補間よりもわずかに誤差が多くなっている。提案手法は線形補間よりも誤差を含むピクセル数が多いため、分散が大きい。しかし、いずれの手法ともすべてのピクセルが10%以内の誤差に収まっている。一方、領域2においては、線形補間の各誤差が非常に大きく、5%のピクセルが誤差10%以下に収まっていない。これは線形補間では光源のハイライト部分を表現できず、提案手法がハイライト部分を表現できているために生じた誤差である。これらの評価より、提案手法は、光源のハイライトを含む画像中において、より真値画像に近い画像が作成できていることが分かる。

領域1で提案手法の誤差が大きくなる理由について考察する。図3.5.15(a)は図3.5.10(b)の等輝度線の分布である。提案手法により算出された等輝度線を図3.5.15(b)に示す。領域1において、ハイライトの中心がずれている。また、輝度の分布も全体的に小さい。これは、等輝度線の発生消滅における発生消滅位置とタイミングの推定の問題である。光源が壁面から遠ざかる場合、等輝度線の消滅が起こる。提案手法では、等輝度線の消滅位置とタイミングを1章で示した等照度線を用いた手法と同様に推定している(第2章, 2.3.4節参照)。この方法は線形な推定であり必ずしも正しい消滅位置とタイミングを示すものではない。2枚の画像中の光源位置が異なっているほど、位置とタイミングは正しく推定されない。

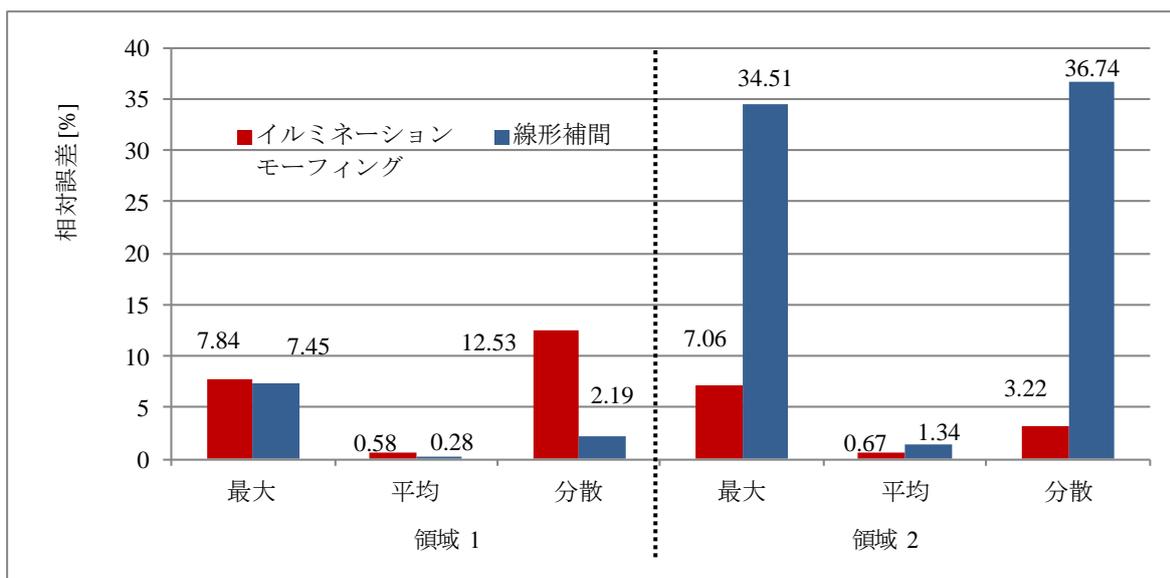
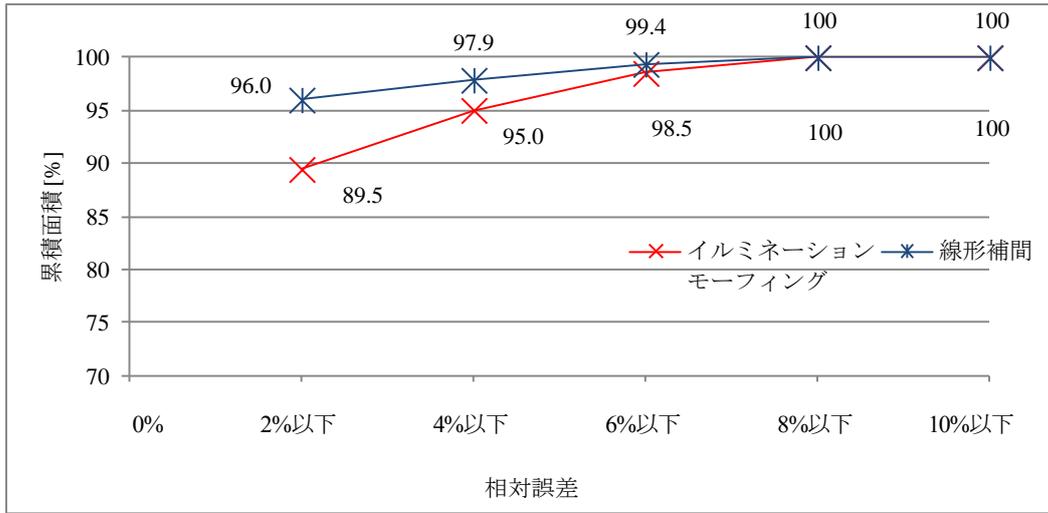
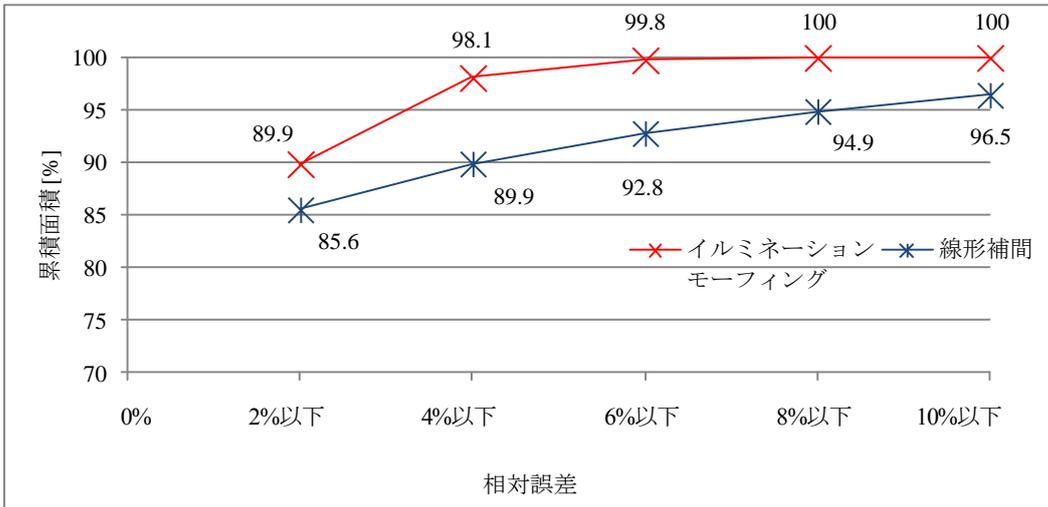


図3.5.13 各手法の定量評価

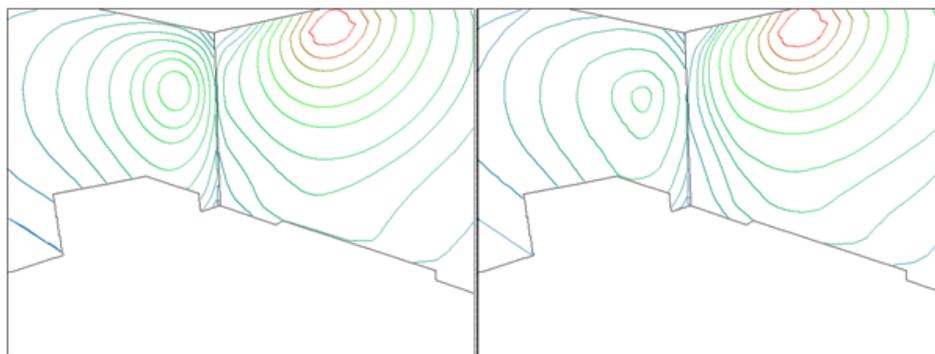


(a) 領域1



(b) 領域2

図 3.5.14 各領域における相対誤差の分布



(a) 真値画像(Radiosity)

(b) 提案手法

図 3.5.15 配置される等輝度線

3.6 カラー画像への適用

本節では、イルミネーションモーフィング手法のカラー画像への適用について述べる。カラー画像への適用に当たり、カラー画像は輝度成分を含む表色系へと変換する。提案手法では、輝度情報 L を含む HLS 表色系を用いる。

3.6.1 照明変化時の HLS 成分の変化

白色光源に対し、輝度分布 L にイルミネーションモーフィングを適用する。輝度分布以外のパラメータは色を表す色度であり、色度は2つの入力画像間において光源の位置が移動する場合、線形に補間する。輝度に対してのみ、イルミネーションモーフィングを適用することで、 RGB 表色系における三成分ごとに手法を適用するよりも、高速に画像が生成できる。

色合いを持つ(モノトーンでない)光源が移動する際に、彩度 S もまた変化する。彩度 S は色度を表すパラメータの一つである。白色の環境光源化において、赤色の光源が移動するような場合には、両光源の色合い(彩度)が混ざり合って変化する(図 3.6.1 参照)。明るい光源化において赤い光源によって照らされた物体は高い彩度を持ち、暗い光源下において同じ強度の赤い光源により照らされた物体は、より低い彩度を持つ。このような場合には、輝度 L と同様に、彩度 S の分布も線形な補間では表現できない。

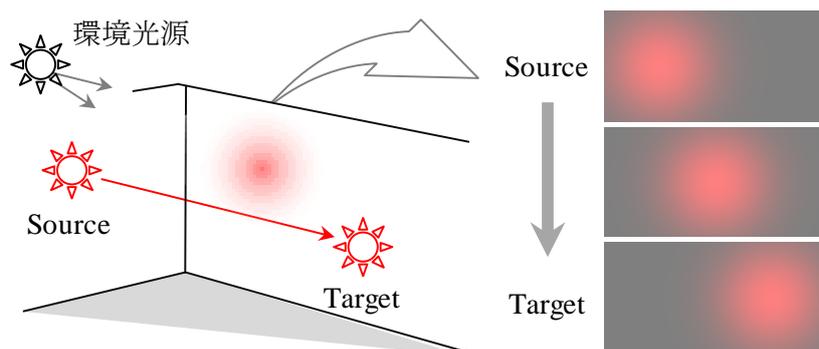


図 3.6.1 複数の光源(環境光源と移動する光源)を含む状況下での照明変化

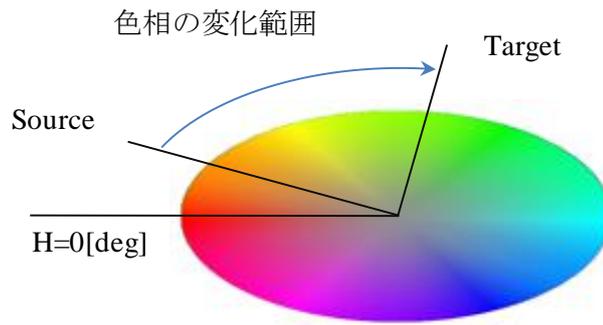


図 3.6.2 色相環上を変化する色相 H

	Source	中間光源	Target
RGB			
L			
S			
H	20[deg]	60[deg]	100[deg]

図 3.6.3 光源移動に対する各色成分 L, S, H の変化

移動する光源の色が変化する場合に、色度を表すもう一つのパラメータである色相 H が変化する。色相 H は、図 3.6.1 に示すように色相環に基づいて変化する。2つの入力画像(Source, Target 画像)間で光源の色が線形に変化する場合、色相 H もまた線形に変化する。図 3.6.2 に示すように、光源の色がオレンジ(色相環上で 20[deg.])から緑(100[deg.])に変化するとき、色相は色相環上の角度を線形に補間することで算出される。

図 3.6.3 に光源移動に対する HLS 各成分の変化について示す。図 3.6.3 は、平らな面に対して光源が面上を左から右に、その色を変化させながら移動したケースを想定している。 L, S 成分は分布形

状をグレースケールで表現し、色相は対応する色(色相環上の角度)を示している。L, S成分の分布はハイライト成分が円状に表現され、分布は光源の移動に合わせて、左から右へ形状を保ったまま移動する。しかし、色相Hの分布は面上で一定であり、光源の移動にあわせて線形に変化する光源の色と同様に、線形に角度のみが変化する。

3.6.2 カラー画像に対する照明変化画像生成の流れ

3.6.1節で示した照明変化に対するHLS各成分の変化を考慮して、提案手法は複数の光源を持つ環境下において、L, S成分にイルミネーションモーフィングを適用し、色相情報は面上で均一であるとして、角度情報のみを用いて線形に補間する。図3.6.4にカラー画像に対する提案手法の概略処理の流れを示す。

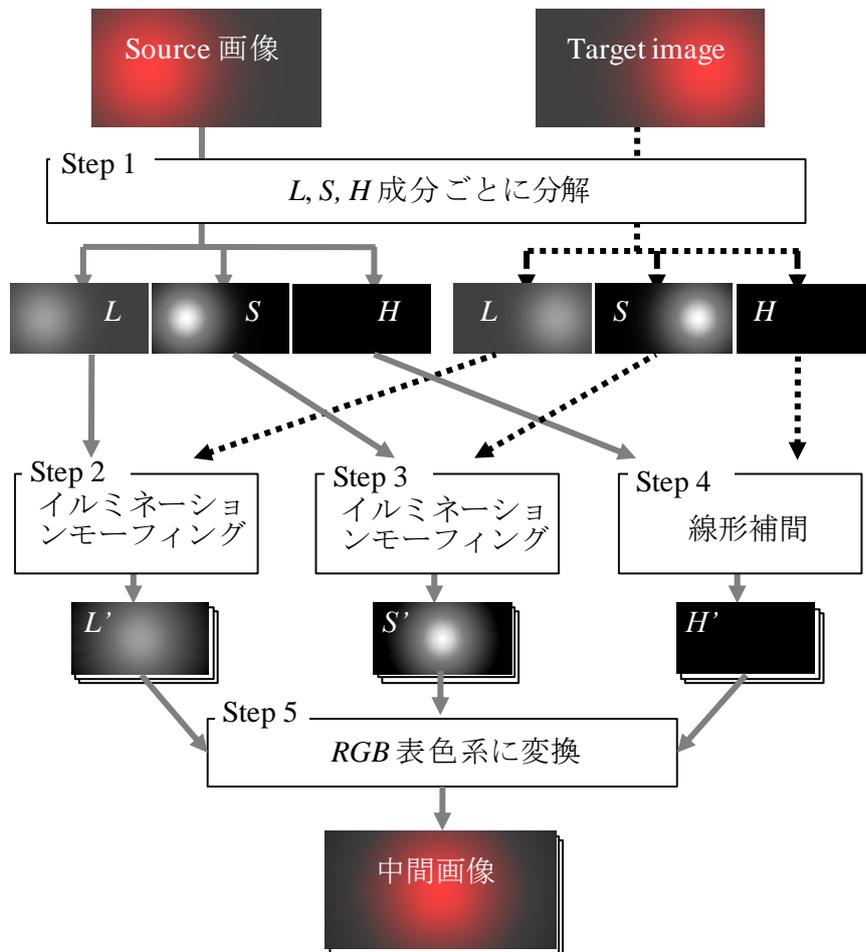


図 3.6.4 カラー画像の照明条件を変化させる処理の流れ

- Step1** 入力画像を *RGB* 表色系から *HLS* 表色系へ変換する.
- Step2** 任意の光源位置における輝度分布 L' をイルミネーションモーフィングにより算出する.
- Step3** 任意の光源位置における彩度分布 S' をイルミネーションモーフィングにより算出する.
- Step4** 任意の光源位置における色相 H' を線形補間により算出する.
- Step5** $H'L'S'$ から *RGB* 表色系で表現された中間画像に変換する.

3.7 カラー画像に対する適用例

本節では、3.6節で述べた提案手法をカラー画像に適用した結果について述べる。

3.7.1 適用例 1 (光源の色が固定のケース)

図 3.7.1 は壁面上を光源が左から右へと移動する一連の画像を提案手法により作成した結果である。この適用例は、暗い環境光(位置固定)を配置した空間内を、赤色の光源が壁に水平に移動したものである。光源色は赤(色相 $H=0[\text{deg.}]$)で固定してある。入力画像として、Source($t=0$)画像と Target($t=1$)画像を用い、提案手法により、 $t=0.3, 0.5, 0.7$ における画像を示した。L, S 成分は分布形状をグレースケールで表現した。L, S 成分の分布は同心円状の形状を保ったまま、光源の移動に合わせて滑らかに変化している。算出された中間位置での L, S 成分の分布より算出されたカラー画像 (RGB 表色系)においても、照明の分布が自然に変化できている。

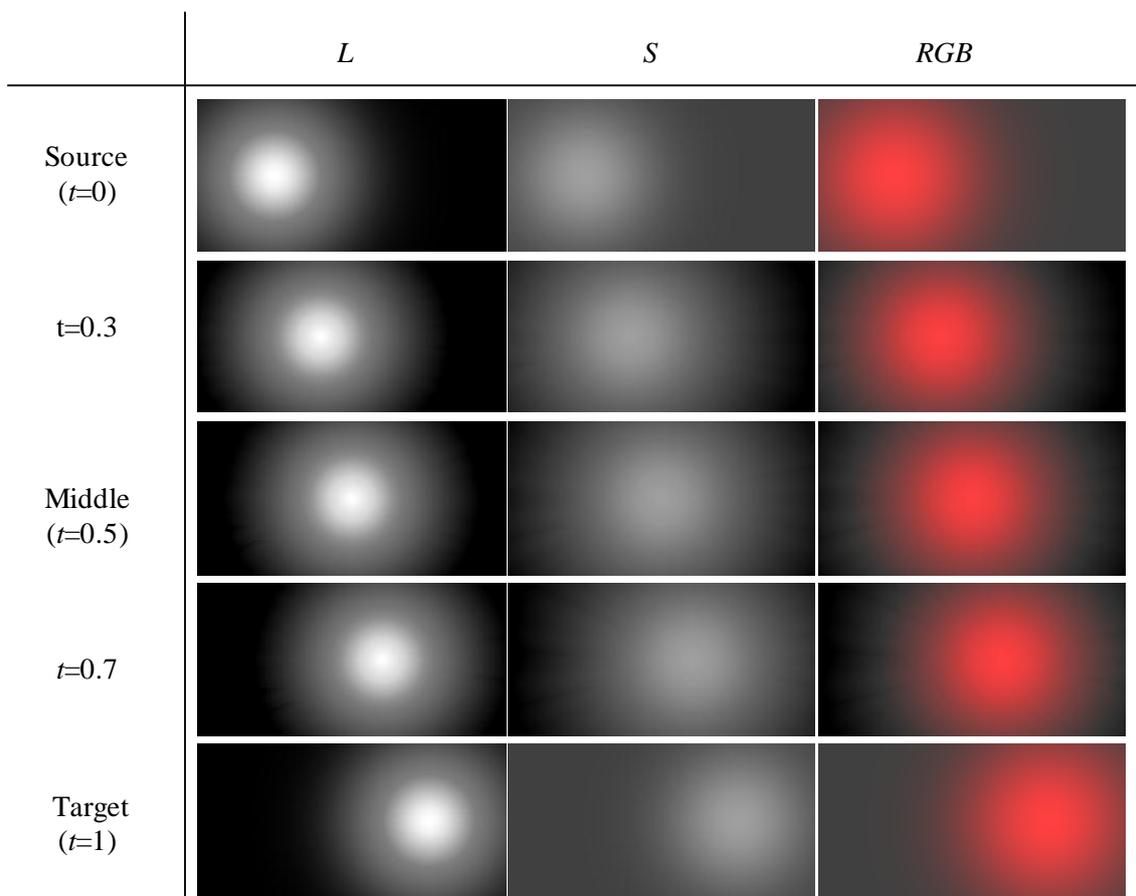


図 3.7.1 赤色光源の移動に対する提案手法の適用結果

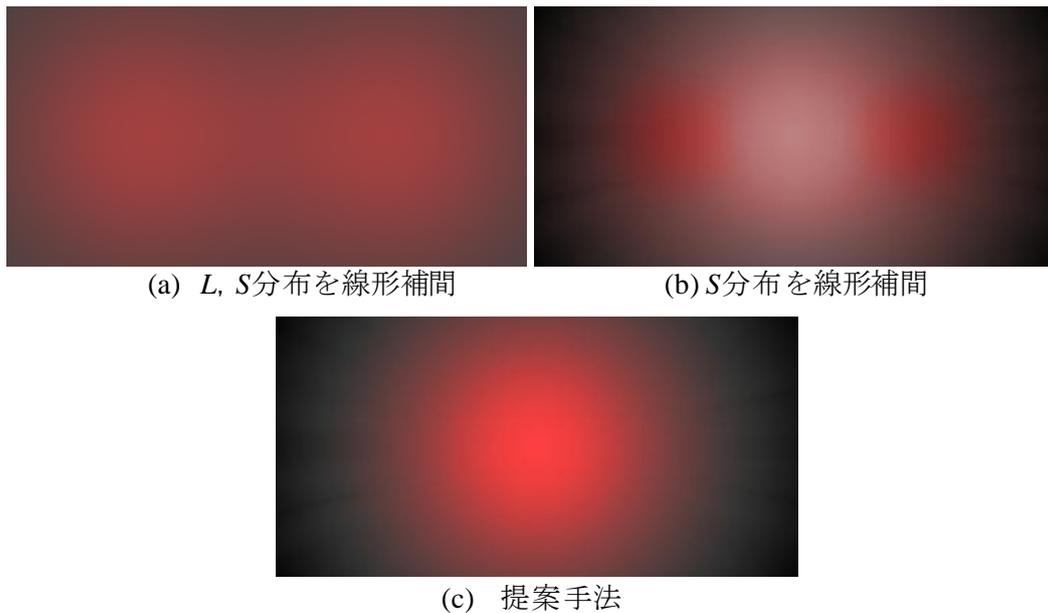


図 3.7.2 各手法の結果比較

比較のために、 $t=0.5$ において、2つの入力画像を線形に補間して生成した線形補間の画像を図 3.7.2(a)に示す。2つの入力画像において壁面左右に存在したハイライトがそのままブレンドされ、輝度値(彩度値)の低下した2つのハイライトが存在する不自然な照明が得られている。図 3.7.2 (b)に輝度分布 L にのみイルミネーションモーフィングを適用し、彩度分布 S を線形補間した場合の結果を示す。輝度分布は光源の移動に追従して変化しているが、彩度分布が線形補間により不自然な形で算出されたため、二つの赤い円状の領域が画像中に不自然に生成されている。輝度分布 L と彩度分布 S に対してイルミネーションモーフィングを適用することで、自然な光源の移動を表現した照明が得られる(図 3.7.2(c))

3.7.2 適用例 2 (光源の色が変化するケース)

図 3.7.3 に、入力画像間で光源の色が変化するケースについて示す。オレンジ(色相 $H=20[\text{deg.}]$)の光源が壁面左側に存在する Source 画像と、緑(色相 $H=100[\text{deg.}]$)の光源が壁面右側に存在する Target 画像を、入力画像(図 3.7.3(a)(e))として用いた。Source, Target 画像間で光源の色が線形に変化しながら、壁面上を左から右へと移動したときの中間画像を図 3.7.3(b)(c)(d)にそれぞれ示す。提案手法に基づき、輝度分布 L と彩度分布 S に対してイルミネーションモーフィングを適用し、色相 H の値は、入力画像間で $20[\text{deg.}]$ から $100[\text{deg.}]$ まで線形に変化させた。図 3.7.3 に示すように、光源の色に対応して壁面上の照明の色も自然に変化している様子がわかる。

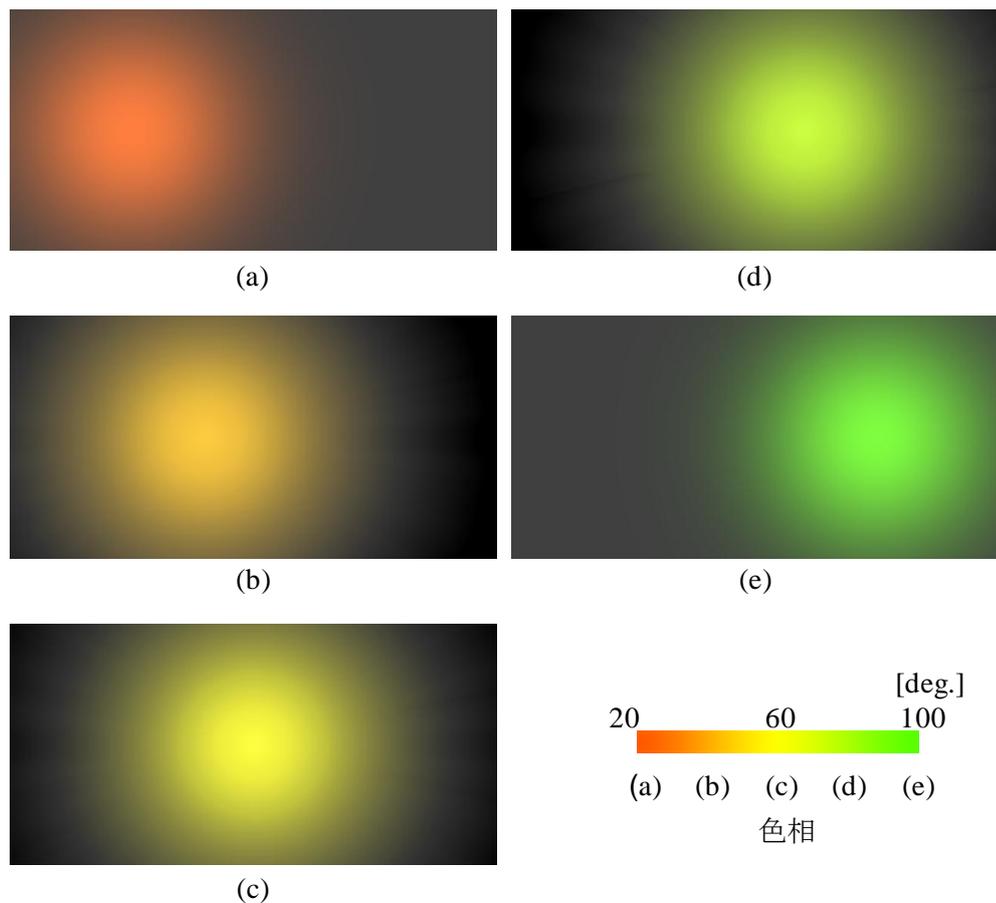


図 3.7.3 光源色が変化する場合の適用例

3.7.3 適用例 3 (室内画像)

室内画像の壁面に対して提案手法を適用した結果を図 3.7.4 に示す. 赤色の光源で照らされた室内の画像(図 3.7.4(a))を $\text{Source}(t=0)$ 画像, 異なる位置にある黄色の光源で照らされた室内の画像(図 3.7.4(e))を $\text{Target}(t=1)$ 画像として用いた. 提案手法を画像中の 2 つの壁面(図 3.7.4(f)参照)に適用し, それ以外の領域は線形補間により画像を生成した. 図 3.7.4(b)(c)(d)に, $t=0.3, 0.5, 0.7$ における生成画像を示す. 光源の移動に伴う壁面の照明分布の変化と, 光源の色変化に伴う壁面の照明の色の変化が自然に表現できている.

光源色を色相環上に沿って赤から黄, 緑, シアン, 青, 紫と変化させた一連の画像を作成し, アニメーションを作成した. 本論文中には, アニメーション中の一部分を一連の静止画の流れとして図 3.7.5 に示す. 入力画像として用いたのは, 節目にある 6 種類の光源の色で照らされた 6 枚の入力画像のみである. 6 枚の入力画像から, 光源の位置, 色を変えながら照明を変化させていく室内のアニメーションが作成できている.

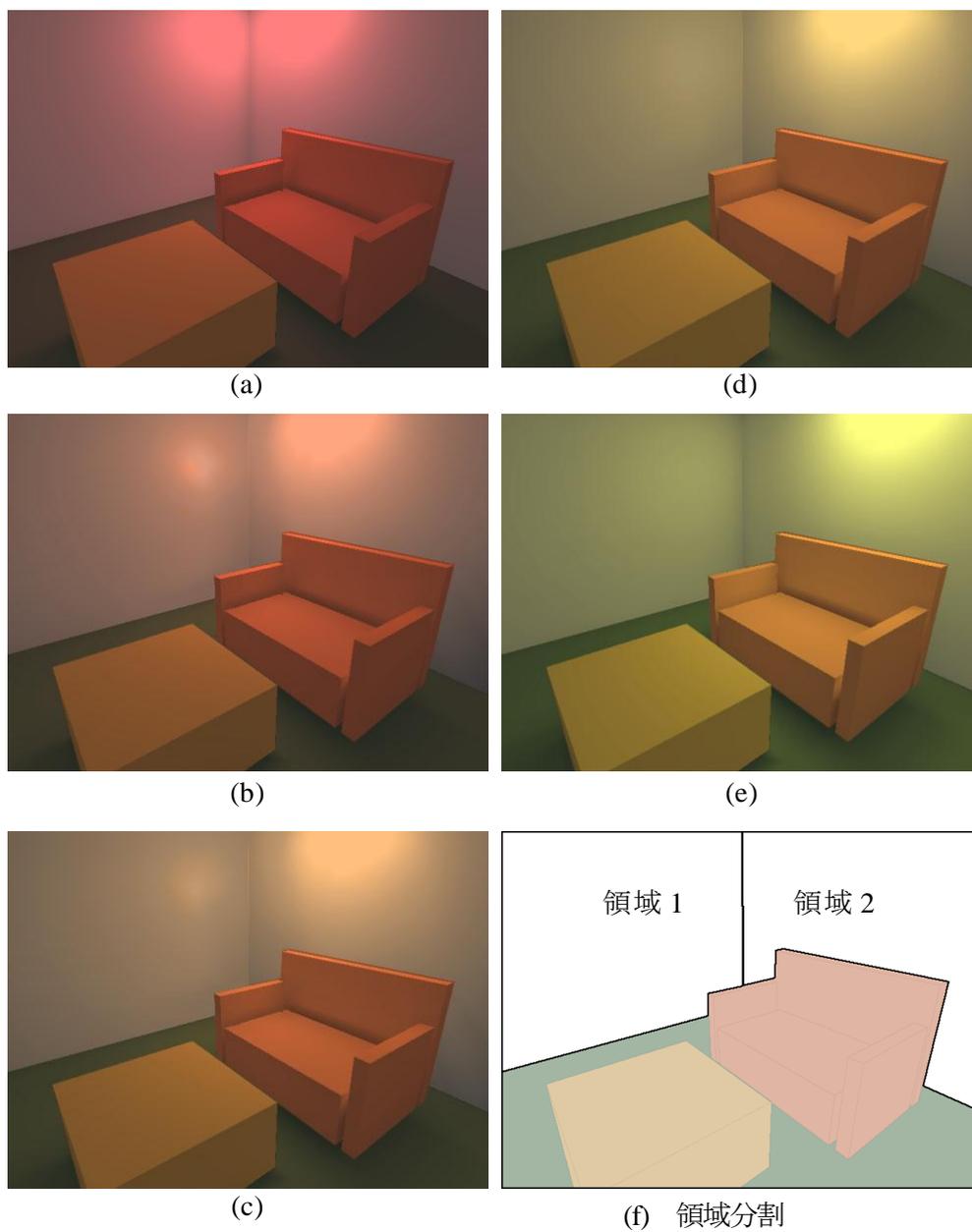


図 3.7.4 室内画像への適用例

入力画像

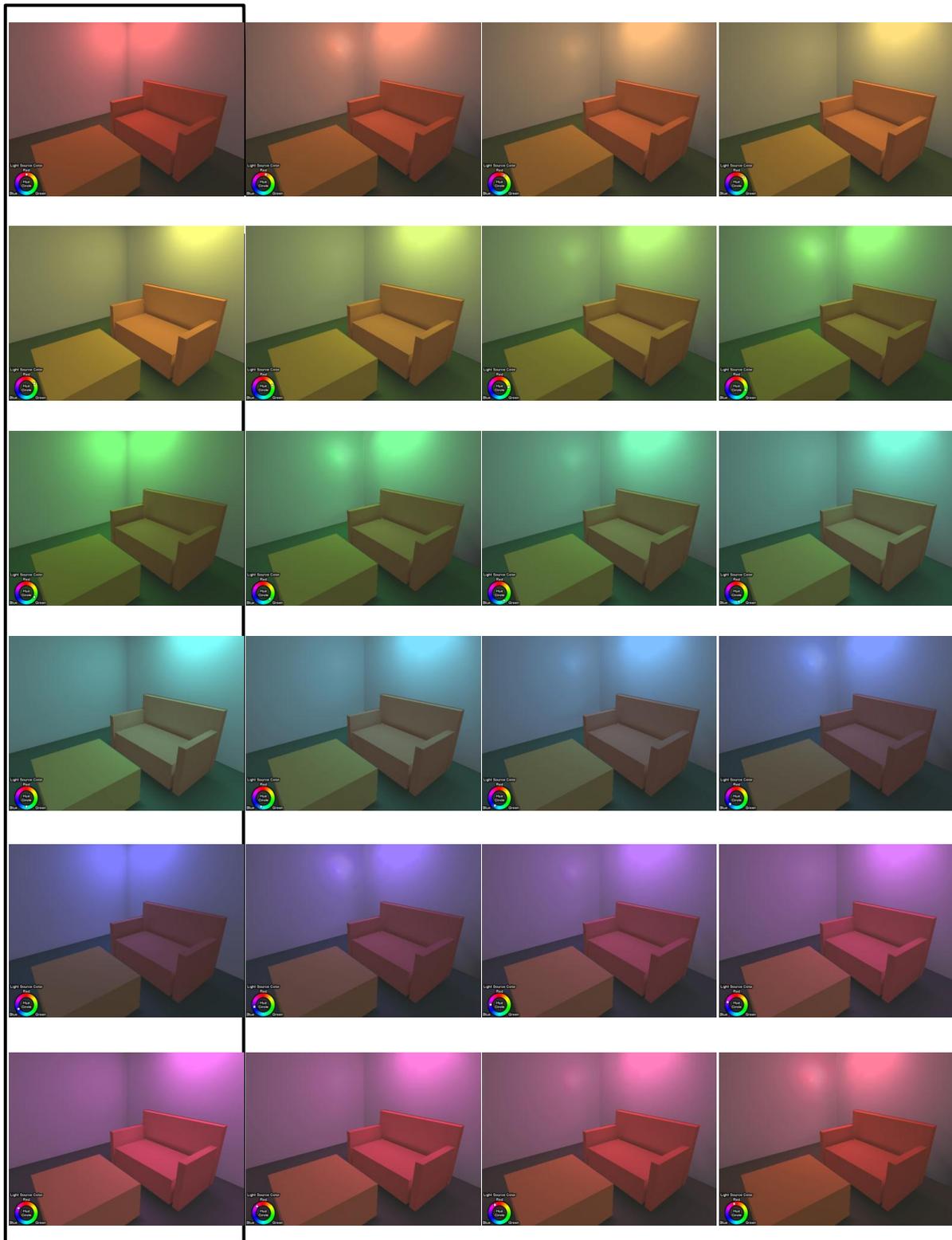


図 3.7.5 室内画像への適用例(6枚の入力画像を用いたアニメーション)

3.8 結言

本章では2枚の入力画像のみを用いて、画像中で照明条件(光源位置, 色)を変化させる手法を提案した。提案手法は、特徴線分をワーピングさせることで任意の形状の画像を生成する画像モーフィングと、2章で論じた等照度線を用いた手法の考え方を組み合わせることにより、画像中の照明状況を変化させる手法である。

本章では、提案手法の主要な点として以下の3つについて述べた。

1. 画像情報のみを用いてイルミネーションモーフィングを行うことで、手法の有用性を高める。
2. 等輝度線を配置する輝度値を最適に選ぶことで、光源移動時の照明の変化を効果的に表す。
3. カラー画像中の輝度分布に対してイルミネーションモーフィングを行い、効率的に画像を生成する。

今後の課題として、等輝度線の形状が複雑になる輝度分布に対する対応が考えられる。特に、2枚の画像中で等輝度線のトポロジーが異なる画像においては、画像間の等輝度線の対応付けが困難である。等輝度線の分岐・統合、発生・消滅など、トポロジーが変化する等輝度線に対していかに等輝度線を対応づけるかが重要であるとともに、分岐や発生が生じるタイミングを推定する方法が提案手法によって生成される画像の精度に影響する。

第4章

照明関数を用いた照明変化画像生成

4.1 概説

本章では Image based rendering (IBR)の考え方を照明変化に応用し、新たなアプローチで照明条件が変化したときの画像を高速に生成する手法を提案する。提案手法では、照明条件の異なる2枚の入力画像の輝度値を再パラメータ化することで照明関数テーブルを構築する。そして、テーブルから2枚の画像間で照明条件の変化した画像を高速に生成する。

4.1.1 提案手法の位置づけ

提案手法は、照明条件が変化した際の画像を高速に生成するための新しいアプローチである。第2章でも述べたように、照明条件を変化させたときの画像を高速に生成するための研究は、数多く行われている。それらの研究は、以下のように分類され、発展してきた。

1. 3次元モデルを用いた手法

3次元モデル上においてモデルの各頂点における輝度(照度)を高速に算出したのち、レンダリングによって画像を生成する手法である。

土橋ら[13]は、光源の配光特性を変化させた画像を高速に生成する手法を提案している。この手法では、基底関数を用いて配光特性を表現し、面上の輝度値を基底関数ごとに前計算して求めておく。そして、前計算された面上の輝度値を積み付き加算することで任意の配光特性での画像を生成できる。ただし、この手法では光源位置は変更できない。

Salon ら[40]は物体表面上での光の伝達を前計算する PRT を提案し、環境照明下のシーンのリアルタイムなレンダリングを可能にした。PRT 法は、光の伝達関数を、球面調和関数[40]や Haar Wavelet[41]といった基底関数を用いて近似することで、リアルタイムなレンダリングを可能にしている。Zhou ら[42]や Sun ら[43]は PRT を改良し、物体が移動するような動的なシーンへの適用を可能にした。また、shadow map を用いて環境照明下の動的シーンを高速にレンダリングする手法[44, 45]も提案されている。

第1章で論じた、面上の照度分布をモーフィングさせることで光源の移動を表現する手法も、3次元モデルを必要とする。この手法では、物体表面上の照度値を等照度線で表現し、光源の移動に応じて等照度線をモーフィングすることで、光源移動時の画像を高速に生成した。

2. 画像情報のみを用いた手法

3次元モデルを必要とするということは、ユーザにとって重い制約条件である。また、レンダリングを行う手法であるからコンピュータグラフィックス(以下、CG)にしか適用できないという制約がある。3次元モデルを必要とせず、画像の情報のみを用いて、画像中の照明条件を変更する手法を第2章にて述べた。この手法では画像を領域に分割し、各領域に等輝度線を配置する。光源の移動に応じて等輝度線をワーピングすることで、画像中の輝度分布を変化させた。しかし、異なる画像間で等輝度線同士を適切に対応付けることが要求され、特にトポロジーの異なる等輝度線に対応付けが困難である問題が残された。

以上の経緯から、等輝度線を用いた照明変化手法のように、2つの画像間での対応付けを必要としない、新たなアプローチにより画像中の照明条件を変更する方法を提案する。

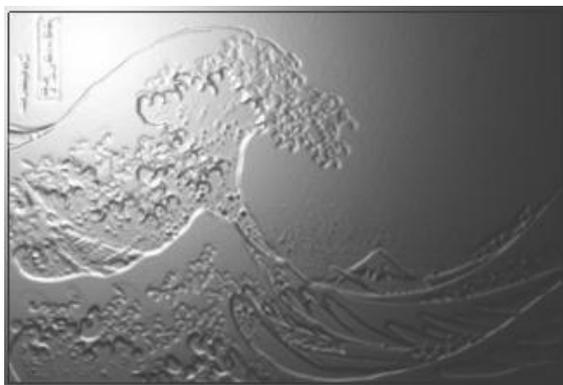
4.1.2 提案手法の概要

画像中の情報をもとに、新たな画像を生成する手法はIBRの考え方である。IBRでは、複数の視点で撮影された画像を入力として用い、任意視点の画像を生成するなど3次元的な表現を可能とするレンダリング技法である。IBRの一手法であるレイデータベースアプローチ(光線空間法)は、3次元モデルデータを用いず、多数枚の異なる視点位置での画像を入力とする。Lumigraph[38]、Light Field rendering[39]に代表されるレイデータベースアプローチでは、入力画像より光線データベースを構築し、任意の視点位置の画像を、データベースを用いて高速に生成する。これらの手法は、視点位置を変更できるが光源位置は固定されている。

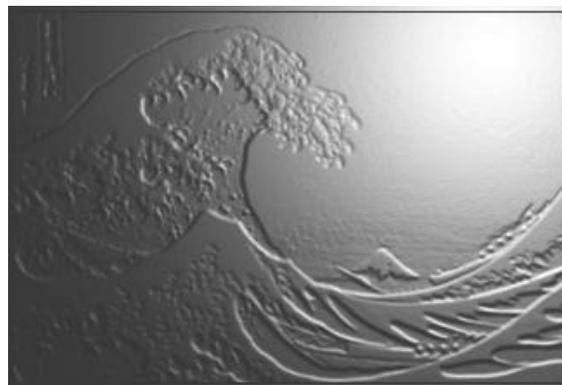
IBRの考え方を照明変化に応用し、提案手法では、照明条件の異なる2枚の入力画像の輝度値を再パラメータ化することで照明関数テーブルを構築する。照明条件の変化した画像を生成する際には、照明関数テーブルを参照して輝度値を取得し、画像にマッピングすることで高速に照明変化画像を生成する。

照明関数は面法線に基づいて構築される。面法線は、レンジファインダ等を用いて奥行き情報(デプス)を得ることで算出可能である。提案手法では、照明条件の異なる2枚の入力画像と同一視点位置におけるデプス情報から、2枚の入力画像間で照明条件を変化させた画像を高速に生成する。図4.1.1は2枚の入力画像(a)(b)間の中間位置での画像を提案手法(c)と画素ごとに輝度値を線形補間することにより作成した画像(d)である。画素ごとの線形補間では画像中のハイライト部分が表現され

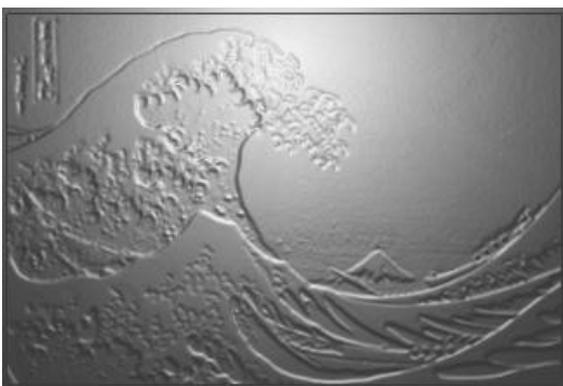
ず、凹凸面の陰影も適切に表現されていない。これに対し、提案手法では光線方向の変化に伴い、ハイライト部分が移動し、凹凸部分の陰影が変化していることがわかる。



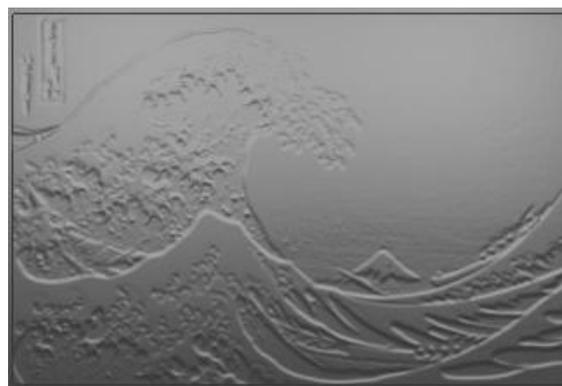
(a) 入力画像1



(b) 入力画像2



(c) 提案手法による中間画像



(d) 線形補間による中間画像

図4.1.1 提案手法による適用結果

4.2 提案手法

4.2.1 光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係性

2枚の画像から中間の画像を生成する最も簡単な方法は、2枚の画像における各画素の輝度値を線形な重みでブレンドする手法(線形補間)である。しかし、図4.1.1(d)に示すように、線形補間により算出される画像は、光源が移動したことによる画像中の照明の変化を表現することはできない。

画像中に映っている物体面における輝度値は、物体面上の着目点における面法線ベクトル、光線ベクトル、視線ベクトルの3つの関係に依存する。物体面が完全拡散反射面であると仮定して、物体面上の着目点における光線ベクトルと面法線ベクトルの関係を考える。図4.2.1は、線形補間における、光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係を示している。左右の図が入力画像である。入力画像を生成した2つの光源位置の中央に光源位置を設定したときの生成画像が中央の画像である。図4.2.1に示すように、線形補間では中央の画像の任意の画素の輝度値を計算する際、入力画像の同じ画素における輝度値同士をブレンドする。すなわち、画素に映っている物体面上の着目点は同じ場所 P の輝度を参照していることになる。しかし、このとき P 点における光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係は、中央の画像を生成するときと、入力画像を生成したときで異なっている。結果、参照された輝度値は、光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係上からは、全く無関係な場所の輝度値を参照していることになる。

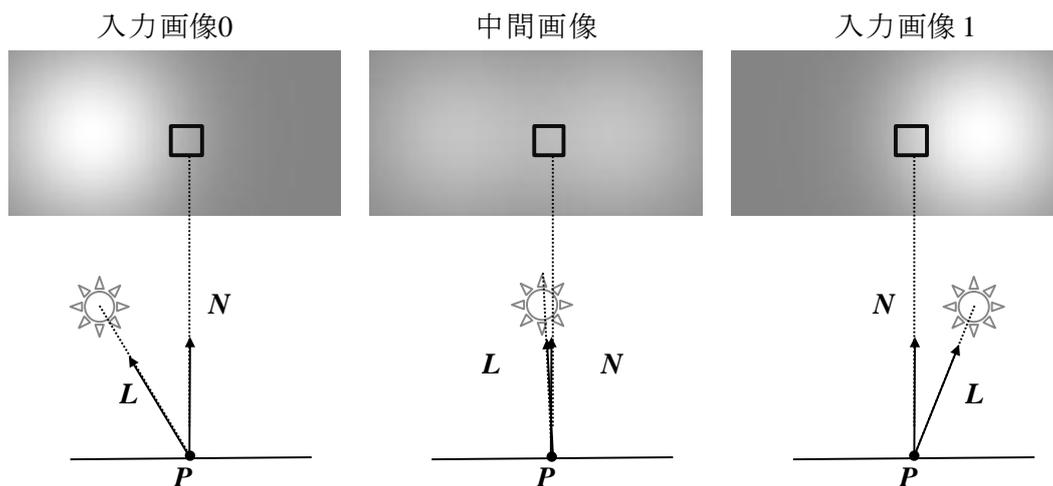
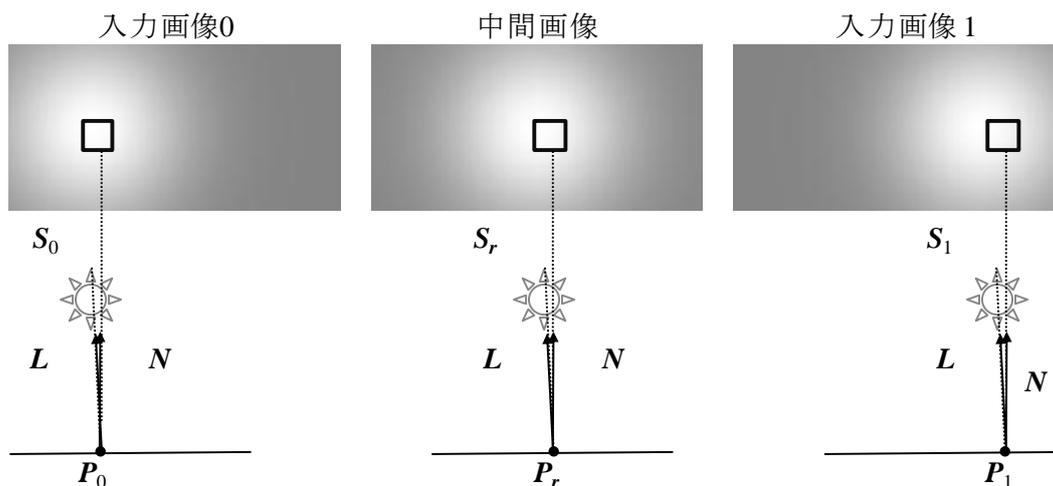


図 4.2.1 線形補間における光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係性

図4.2.2 提案手法における光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係性

提案手法では、線形補間における光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係性のずれに着目し、両者の関係を重視した補間方法を提案する。すなわち、図4.2.2に示すように、入力画像から補間に用いる輝度値を選択する際、画像上の画素の位置関係 P_r ではなく、画素に映っている物体面上の光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係が同じ画素 P_0, P_1 を選択する。これらの画素の輝度値を補間することで、光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係に基づく、すなわち、光源の移動を考慮した補間が可能になる。

本節では、提案手法の概念を示すために完全拡散反射面を仮定し、光線ベクトル L と面法線ベクトル N の関係を示したが、提案手法では、鏡面反射面も考慮し、視線ベクトル V を加えた3つのベクトルの関係に基づいて画像を補間する手法を提案する。

4.2.2 照明関数

提案手法は、光線ベクトル L 、面法線ベクトル N 、視線ベクトル V の関係に着目し、画像を補間する際には、3つのベクトルの関係が同じになる物体面上の点が映り込んでいる画素の輝度値を選択する。

画像中の画素の輝度値は、画素空間座標 (u, v) によって表されている。提案手法では画素の輝度値を、面法線ベクトル N を基準にした光線ベクトル L と視線ベクトル V の関係に基づいた新たなパラメータ空間に変換し、テーブルとして記憶する。このパラメータ空間を照明関数(Lighting Function)と呼ぶ。

提案手法では、画像が撮影された環境を以下のように想定する。

- ・光源は点光源である。
- ・物体面は一様に同じ反射特性を持つ。
- ・物体面は、等方性拡散反射成分と鏡面反射成分で構成される。
- ・間接照明、大域照明は考慮しない。

上記の制約下において、物体面上の輝度分布は、

$$L_\lambda = g_\lambda(\theta_L, \theta_V, \varphi, r, I_\lambda) \quad (4.2.1)$$

で表される。ここで、各パラメータは、

g_λ : 照明関数

θ_L : 面法線ベクトル N に対する光線ベクトル L のなす角度

θ_V : 面法線ベクトル N に対する視線ベクトル V のなす角度

φ : 光線ベクトル L と視線ベクトル V のなす角度

r : 光源位置 S から物体面上の計算点 P までの距離

I_λ : 光源の放射強度

である(図 4.2.3 参照)。

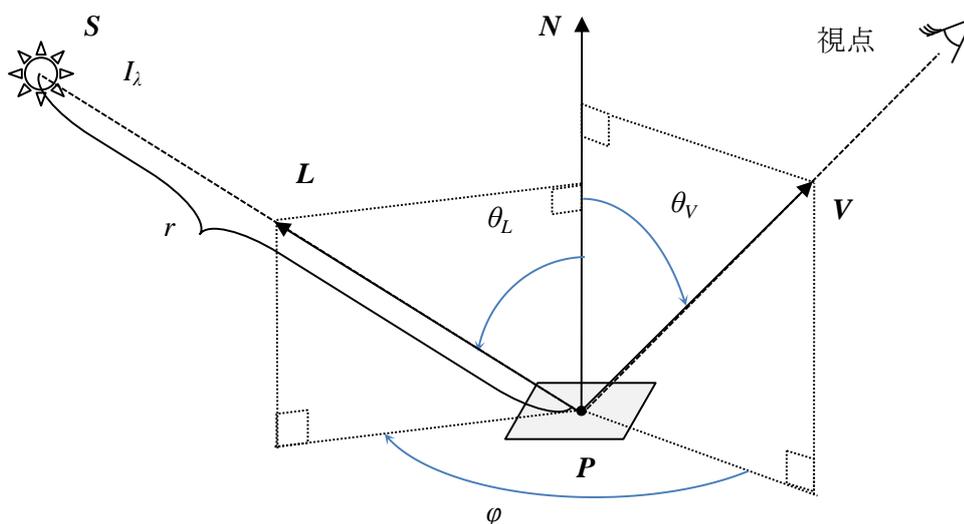


図 4.2.3 照明関数の各パラメータ

式(4.2.1)に示される照明関数は5次のパラメータを持つ。画像から照明関数を生成する際には、各画素(u, v)に映る物体面をパラメータ($\theta_L, \theta_V, \varphi, r, l_2$)で表し、その輝度値を、5次のパラメータで表された照明関数のテーブルに登録する。照明関数のパラメータが多いとテーブルのサイズが膨大になる一方、テーブルの各所に登録されるデータ数が少なくなり、データが登録されないテーブルの場所も増えてしまう。登録できるデータ数は入力画像枚数とその画素数に依存するため、テーブルの次元数は少ない方が望ましい。

提案手法では、画像中に映る物体の反射特性に応じて、近似を用いてパラメータを削減する。パラメータの削減については、4.3節にて述べる。

4.2.3 提案手法の概略処理の流れ

提案手法の概略処理手順を図4.2.4に示す。図4.2.4では、物体面を等方性拡散反射成分と鏡面反射成分で構成されていると仮定し、照明関数のテーブルは、法線ベクトル \mathbf{N} に基づく光線ベクトル \mathbf{L} と視線ベクトル \mathbf{V} のハーフベクトル \mathbf{H} (θ_H, φ_H)で表されているものとする(パラメータ削減については4.3節参照)。

前処理

・画像情報を用いた照明関数テーブルの構築

入力画像中の各画素(u, v)に映る物体面の輝度値を、照明関数テーブル(θ_H, φ_H)に登録する。複数個の画素の輝度値が登録されたテーブルの要素は、登録された輝度値の平均値を登録する。輝度値が登録されなかった照明関数テーブルの要素(データ欠損)については、周囲のテーブル要素から補間によって要素のデータを補う。テーブルに輝度値が登録される量は、テーブルの各パラメータの分割数と画像中に映る物体の大きさ(画素数)に依存する。照明関数のデータ欠損を最小に抑えるように、画像に映る物体の大きさに応じて照明関数のテーブルの大きさ(各パラメータの分割数)を決める。

照明関数テーブルの構築処理は、前処理として1度だけ行われる。画素空間座標(u, v)から、照明関数パラメータ(θ_H, φ_H)への変換は4.3.5節で述べる。

レンダリング

画像を生成する任意の光源位置が決まると、入力画像の光源位置と任意画像の光源位置に基づ

いて、照明関数テーブル同士を補間する。任意の光源位置での画像の各画素に対し、画素座標(u, v)に対応する照明関数パラメータ(θ_H, φ_H)をインデックスとして、照明関数テーブルから輝度値を参照し、画素にマッピングすることで高速に画像が生成される。

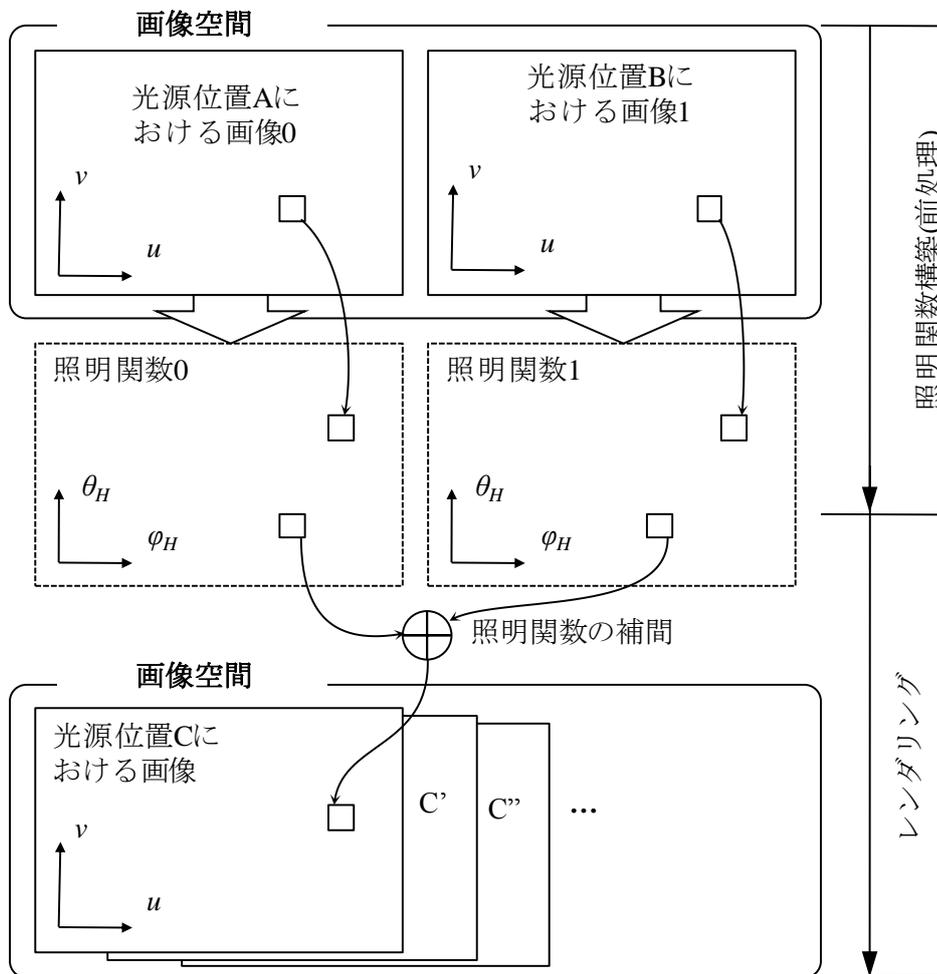


図 4.2.4 提案手法の概略処理手順

4.3 照明関数のパラメータ

照明関数は5次のパラメータを持つ。5次のパラメータで表された照明関数のテーブルを用いると、テーブルの各所に登録されるデータ数が少なくなるため、テーブルの次元数は少ない方が望ましい。本節では、画像中に映る物体の反射特性に応じて、近似を用いてパラメータを削減する方法について述べる。

画像が撮影された環境、特に画素に映る物体の反射特性によって、近似できる照明関数のパラメータは異なる。本節では、照明関数パラメータを構成するために、以下のような撮影環境、物体の反射特性を想定する。

- 光源は点光源である。
- 物体面は一様に同じ反射特性を持つ。
- 物体面は、等方性拡散反射成分と鏡面反射成分で構成される。
- 間接照明、大域照明は考慮しない。

上記の制約下において、照明関数パラメータは、

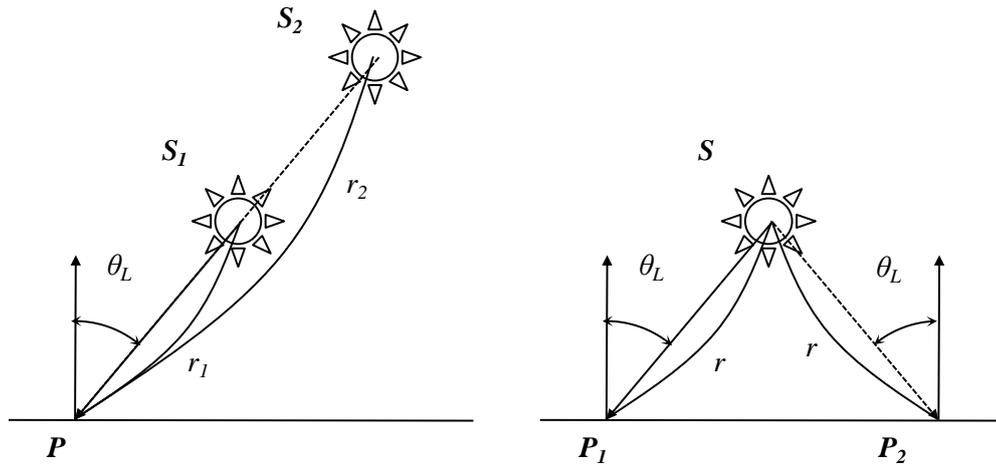
$$L_\lambda = g_\lambda(\theta_H, \varphi_H) \quad (4.3.1)$$

の形に近似される。ここで、 (θ_H, φ_H) は法線ベクトル \mathbf{N} に基づく光線ベクトル \mathbf{L} と視線ベクトル \mathbf{V} のハーフベクトルである。

この制約(撮影環境、物体の反射特性)を、提案手法の扱う照明関数パラメータの基本とする。

4.3.1 光源からの距離 r の削減

位置が固定された光源と凹凸のない平らな面の関係において、光源位置 \mathbf{S} と計算点 \mathbf{P} 間の距離 r は、計算点 \mathbf{P} からの光源方向 (θ_L, φ) により一意に決まるので、距離 r は照明関数のパラメータから削除できる。距離 r が異なるのは図4.3.1(a)に示すように光源位置 \mathbf{S} が異なる場合である。図4.3.1(b)のように光源位置 \mathbf{S} に対して対称な位置の計算点 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ は、距離 r が等しく方位角 φ が異なる。すなわち、平らな面においては、距離 r は光源方向 (θ_L, φ) にて表すことができる。ただし、凹凸のある面を考慮する際には距離 r が影響する。これについては4.5節にて述べる。



(a) 光源位置が異なるケース (b) 等距離になるケース

図 4.3.1 光源位置 S と光源方向 (θ_L, φ) , 距離 r の関係

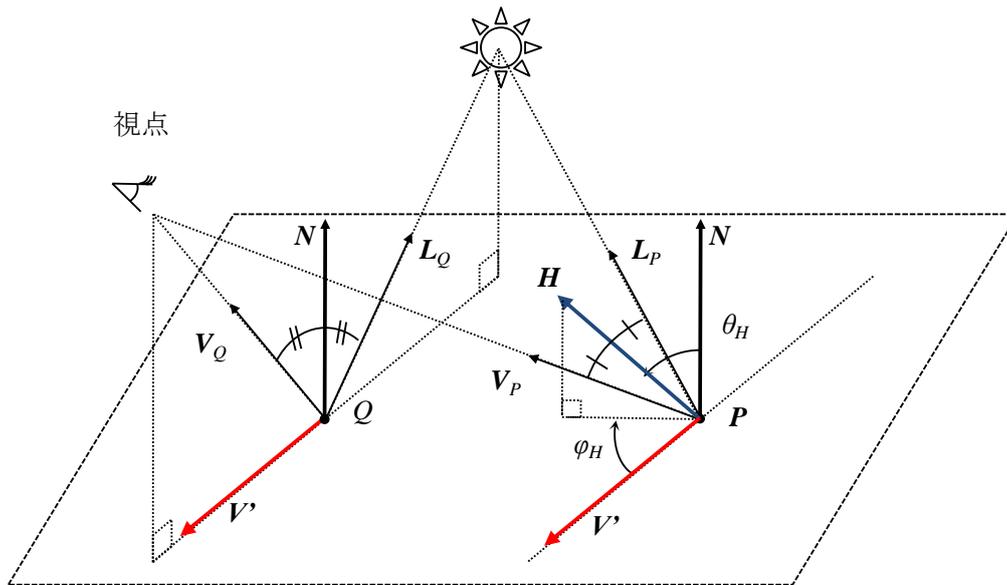


図 4.3.2 光線ベクトル L_P と視線ベクトル V_P のハーフベクトル H (θ_H, φ_H)

4.3.2 光線と視線に関するパラメータ $(\theta_L, \theta_V, \varphi)$ の近似

光線ベクトル L と視線ベクトル V に関するパラメータ $(\theta_L, \theta_V, \varphi)$ は、 V と L の 2 等分ベクトル (Half vector) H で近似する。ハーフベクトルは、Blinn[44] の反射モデルにおいて、鏡面反射光成分の近似に用いられている。図 4.3.2 に物体面上における光線ベクトル L と視線ベクトル V , ハーフベクトル

ル $\mathbf{H}(\theta_H, \varphi_H)$ の関係を示す。 P は物体面上の計算点(着目点), Q は物体面上の照明のハイライト中心を表す。ハーフベクトル $\mathbf{H}(\theta_H, \varphi_H)$ の天頂角 θ_H は面法線ベクトル \mathbf{N} からの角度である。方位角 φ_H はハイライト中心 Q における視線ベクトル \mathbf{V}_Q の物体面への正射影 \mathbf{V}' を基準にする。物体面上を光源が移動する際、輝度分布は光源位置に追従して動き、視点位置から見た輝度分布の位置と向きは正射影ベクトル \mathbf{V}' に依存している(図 4.3.3)。故に、照明関数の方位角 φ_H を \mathbf{V}' 基準にする。なお、近似された照明関数において、面の裏側方向への反射強度は 0 とする。

パラメータ $(\theta_L, \theta_V, \varphi)$ をハーフベクトル $\mathbf{H}(\theta_H, \varphi_H)$ で近似することによる影響は、主に照明関数の反射強度の低い部分に現れる(図 4.3.4)。これは、照明関数 g_λ に含まれる拡散反射光の成分が近似の影響を受け、図 4.3.4(b)(c)のように視線方向に依存した分布に変化するためである。近似を行わなければ、図 4.3.4(a)に示す分布となる。

光源移動時には、鏡面反射光成分の方が拡散反射光成分よりも視覚的に強い影響を持つ。提案手法は、光源移動時の画像生成を目指しており、人の目が敏感に反応するハイライト部分の表示に主眼を置くため、鏡面反射光成分を表現することを重視する手法を選択した。拡散反射光の近似の影響が、視覚的にどのように表れるかは 4.6 節、適用例を参照されたい。

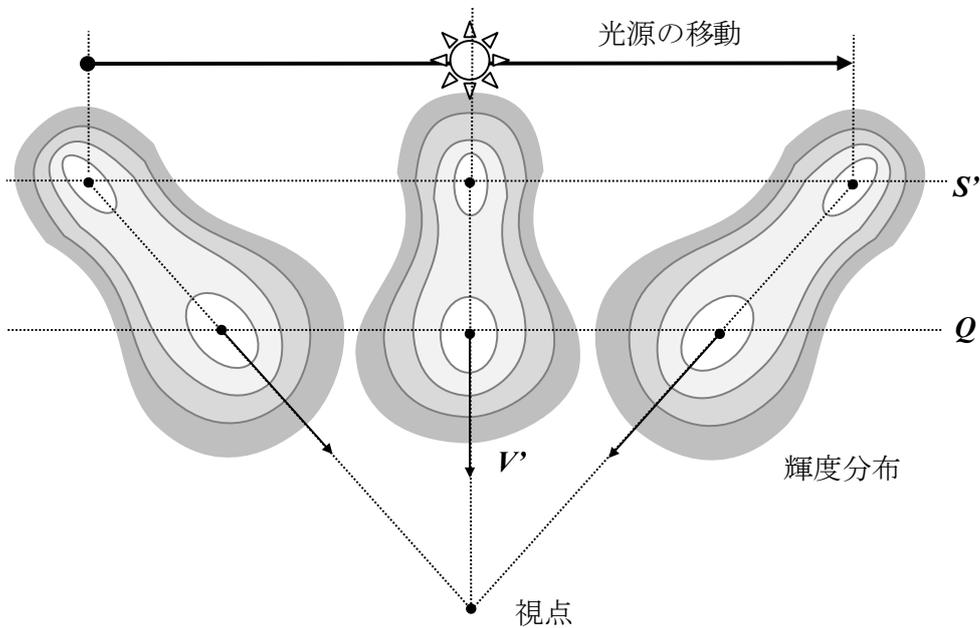


図 4.3.3 光源の移動に伴う面上の輝度分布の移動

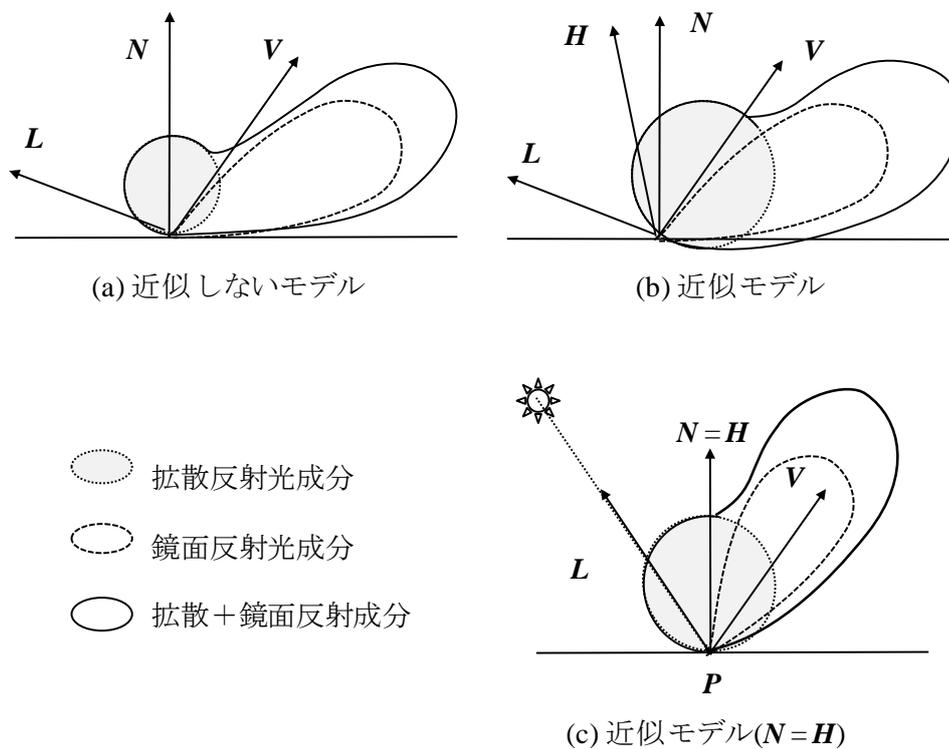


図 4.3.4 ハーフベクトル \mathbf{H} (θ_H, φ_H) による近似の影響

4.3.3 光源の放射強度 $I_{q\lambda}$ の削除

光源の放射強度 I_λ ごとに、照明関数テーブルは構築される。提案手法では、入力画像ごとに照明関数を算出し、照度関数同士を補間することで任意の放射強度 I_λ での照度関数を算出する。

4.3.4 近似された照明関数 $g_{\lambda,j}$

4.3.1 から 4.3.3 節に述べた 3 つのパラメータの近似と削除により、照明関数は次式によって表される。 j は入力画像の番号である。

$$L_\lambda = g_{\lambda,j}(\theta_H, \varphi_H) \quad (4.3.2)$$

4.3.5 照明関数の各パラメータの算出

本節では、照明関数の各パラメータの算出方法について述べる。

ハーフベクトル \mathbf{H} (θ_H, φ_H) は、光線ベクトル \mathbf{L} と視線ベクトル \mathbf{V} 、物体面上の計算点 \mathbf{P} から算出される。

$$\mathbf{L} = \mathbf{S} - \mathbf{P}, \quad (4.3.3)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{O} - \mathbf{P}, \quad (4.3.4)$$

ここで、 \mathbf{O} は視点位置、 \mathbf{S} は光源位置である。カメラ座標系を用いることで、 \mathbf{O} は座標系の原点となる。画素に映る物体の面上の座標である \mathbf{P} は、カメラ座標系における画素の座標 (u, v) とそのデプス(奥行き情報)から算出できる。デプスは、レンジファインダやステレオカメラにより取得することができる。面法線ベクトル \mathbf{N} は、計算点 \mathbf{P} 周辺の点での空間座標(デプス)から算出できる。光源位置 \mathbf{S} は画像中のハイライト位置から推定する[47]。

ハーフベクトル \mathbf{H} とそのパラメータ (θ_H, φ_H) は、以下の式で算出される。

$$\mathbf{H}(\theta_H, \varphi_H) = \frac{\mathbf{L} + \mathbf{V}}{\|\mathbf{L} + \mathbf{V}\|}, \quad (4.3.5)$$

$$\theta_H = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{H}}{\|\mathbf{N} \cdot \mathbf{H}\|} \right), \quad (4.3.6)$$

$$\varphi_H = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{V}_Q' \cdot \mathbf{H}'}{\|\mathbf{V}_Q' \cdot \mathbf{H}'\|} \right), \quad (4.3.7)$$

ここで、 \mathbf{H}' はハーフベクトル \mathbf{H} の正射影ベクトル、 \mathbf{V}' はハイライト中心への視線ベクトル \mathbf{V}_Q の物体面への正射影 \mathbf{V}' ベクトルである(図 4.3.2 参照)。

4.4 レンダリング

本節では、前処理として入力画像から照明関数テーブルを算出した後、任意の光源位置における画像を高速にレンダリングする手法について述べる。

照明条件(光源位置 \mathbf{S} , 放射強度 I_λ)の異なる2枚の画像(入力画像 0,1 とする)からそれぞれに照明関数のテーブルは作成される。レンダリング時には、照明条件に応じて2つの照明関数テーブルを式(3.4.1)により補間し、任意の照明条件下での照明関数テーブルを得る。補間された照明関数テーブルから輝度値を参照し、画像にマッピングすることで任意の照明条件下での画像が生成される。

$$g_\lambda = w_0(\mathbf{S}, I_\lambda)g_{\lambda,0}(\theta_H, \varphi_H) + w_1(\mathbf{S}, I_\lambda)g_{\lambda,1}(\theta_H, \varphi_H) \quad (4.4.1)$$

入力画像 0, 1 の照明関数 $g_{\lambda,0}$, $g_{\lambda,1}$ をブレンドする重み関数 w_0 , w_1 は照明条件, すなわち光源位置 \mathbf{S} と放射強度 I_λ に依存する。

提案手法では、入力画像 0, 1 における光源位置 \mathbf{S}_0 , \mathbf{S}_1 を結ぶ直線上を光源が移動するとし、任意の時刻 t での光源位置 \mathbf{S}_t と放射強度 $I_{\lambda,t}$ を線形補間により求める(図 4.4.1)。従って、時刻 t における照明関数は、入力画像 0, 1 の照明関数の線形補間により算出する。

$$g_\lambda = (1-t)g_{\lambda,0}(\theta_H, \varphi_H) + tg_{\lambda,1}(\theta_H, \varphi_H) \quad (4.4.2)$$

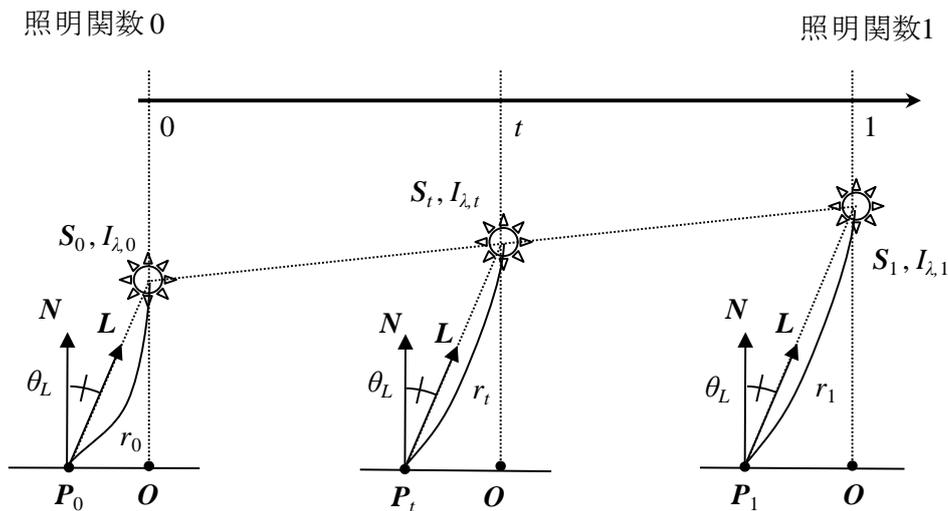


図 4.4.1 光源位置 \mathbf{S} と光源放射強度 I_λ に基づく照明関数の重み付き補間

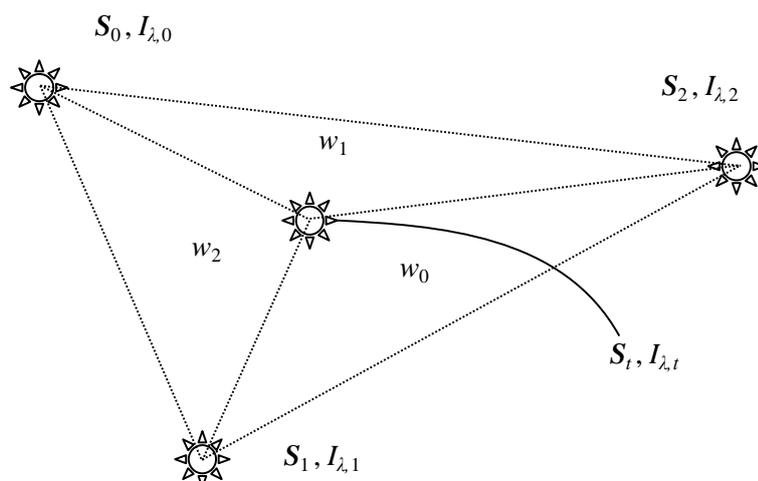


図 4.4.2 3つの入力画像(光源)を用いた補間での重み関数

ただし、式(4.4.1)は近似式である。厳密には、照明関数は光源位置 S と計算点 P の距離 r に依存し、その関係は非線形であるが、入力画像間での光源の移動距離は短いとして、局所的に線形補間(線形近似)した。

提案手法は、入力画像の枚数が増えるほど、照明関数テーブルの各要素に登録されるデータ数が増えるため、任意光源位置に手生成される画像の精度が向上する。3枚以上の入力画像を用いることで、任意の光源は3つの画像における光源位置が作る三角形上に自由に配置できるようになる。このとき、式(4.4.1)における重み関数 w_j (j は入力画像番号)は、任意光源を中心とした3つの光源位置がそれぞれに作る面積に依存して算出される(図 4.4.2)。

4.5 凹凸面への拡張

物体面が平らでなく凹凸を持っている面に対しても提案手法により照明条件を変更した画像が高速に生成できる。提案手法で取り扱う凹凸を持つ面は、面法線が一様でない面であり、一般にマップマッピングで表現できる面の凹凸を対象にする。

1. 照明関数テーブルの構築

面法線が一様でないとき、照明関数は面全体での平均法線 \mathbf{N}' を用いて構築される。これは、光源と計算点の距離 r ごとに異なる輝度値が同じテーブルに記憶されるのを避けるためである。図4.5.1に示すように、凹凸を持つ面においては、同じ光源方向 $\mathbf{L}(\theta_L, \varphi)$ を持つ計算点 P_1, P_2 でも、距離 r と輝度値が異なる。これはハーフベクトル $\mathbf{H}(\theta_H, \varphi_H)$ でも同様である。

画像中の輝度値は、平均法線 \mathbf{N}' と物体上の着目点における局所的な面法線 \mathbf{N}_i がほぼ等しい場合に、照明関数テーブルに登録される。着目点と視点、光源との位置によっては、局所的な面法線 \mathbf{N}_i と平均法線 \mathbf{N}' の微細な差は輝度分布上にほとんど差が出ない。また、厳密に2種類の法線が一致していると判断すれば、照明関数に登録されるデータ数が極端に少なくなる。故に、局所的な面法線 \mathbf{N}_i がどの程度平均法線 \mathbf{N}' と類似している場合に照明関数に登録するかは、閾値を持って判断し、表現する物体面の大きさ、輝度値(照明の明るさ)などから適切に選ぶ必要がある。3.7節で示す適用例では、照明関数テーブルのデータ欠損率をもとに、2種類の法線の差が数[deg.]以下のものを登録している。

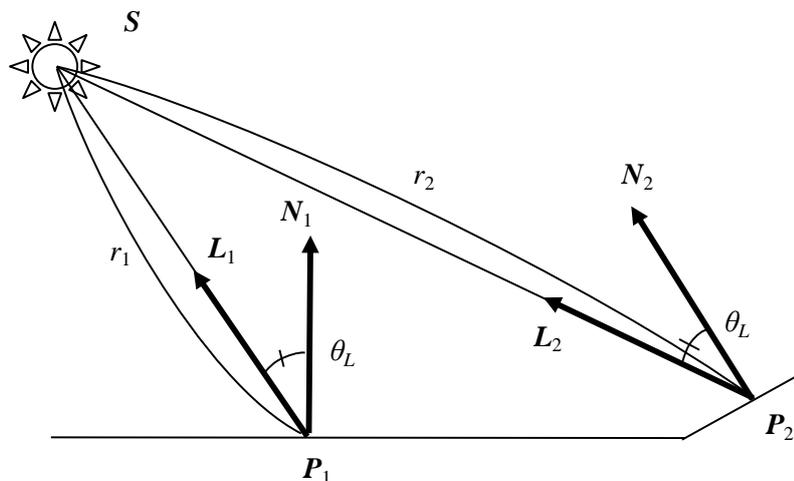


図4.5.1 凹凸面において光線方向 θ_L が等しく距離 r が異なる例

2. 照明関数テーブルから画素へのマッピング

任意の光源位置での画像のレンダリングには、凹凸面での計算点における局所的な法線 \mathbf{N}_i を用いて照明関数テーブルから輝度値を取得する。このとき、計算点 \mathbf{P} から光源 \mathbf{S} までの距離 r に応じて、輝度値を補正する必要がある。図4.4.2を例に、凹凸面での輝度値の補正法について示す。計算点 $\mathbf{P}_a, \mathbf{P}_0$ において、光線方向 $\mathbf{L}_a, \mathbf{L}_0$ は局所法線 $\mathbf{N}_a, \mathbf{N}_0$ に対して等角度($\theta_{La} = \theta_{L0}$)であるが、光源までの距離 r_a, r_0 が異なる。照明関数テーブルは平均法線 \mathbf{N}' に基づいて構築されているため、テーブルには \mathbf{P}_0 における輝度値と同じ値が記録されている。そこで、 \mathbf{P}_a での照明関数値 $g_\lambda(\mathbf{P}_a)$ を距離に関する補正係数 $w_r(r)$ を用いて補正する。

$$L_\lambda(\mathbf{P}_a) = w_r\left(\frac{r_a}{r_0}\right) g_\lambda(\mathbf{P}_a) \quad (4.5.1)$$

距離 r_0, r_a を用いた補正係数 $w_r(r)$ は、図4.4.2に示すように平均法線 \mathbf{N}' と光線 $\mathbf{L}_a, \mathbf{L}_0$ のなす角 $\theta'_{La}, \theta_{L0}$ より次式で算出できる。

$$w_r\left(\frac{r_a}{r_0}\right) = \left(\frac{\frac{1}{r_a}}{\frac{1}{r_0}}\right)^\beta = \left(\frac{r_0}{r_a}\right)^\beta = \left(\frac{\cos(\theta'_{La})}{\cos(\theta_{L0})}\right)^\beta \quad (4.5.2)$$

ここで、 β は距離 r の乗数を表し、 $1 \leq \beta \leq 2$ である。 $\beta = 2$ のとき、拡散反射面における点光源から計算点の距離の逆二乗則に相当する。

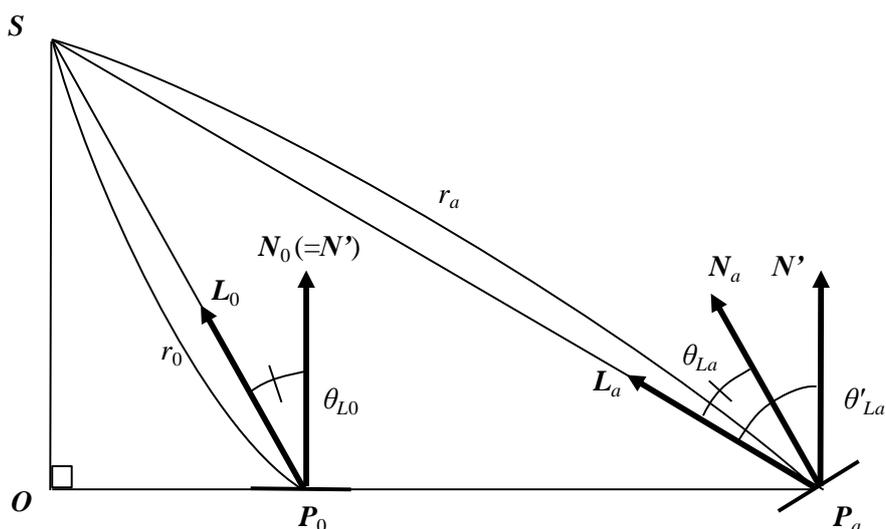


図4.5.2 凹凸面 \mathbf{P}_a における輝度値から平らな面 \mathbf{P}_0 の輝度値への変換

4.6 適用例

提案手法は基礎的検証の段階にあるため、理想的な環境下での画像を用いて適用例を作成した。

1. CG を入力画像とする

ノイズを含まない理想的な画像に対して適用例を作成するため、入力画像としてレンダリングされたCGを用いた。

2. デプス情報、光源位置情報が正確に入手できている

CGを用いたことで、デプス情報、光源情報が正確に取得できているという仮定の下で検証できる。

3. 照明関数テーブルを作成するのに十分な大きさの面が映っている

面上に凹凸を持つが基本的に一枚の大きな面で構成される物体が映っている画像を入力画像として用いた。また、より広範囲をカバーする照明関数を作成するため、作成する画像よりも大きな解像度の入力画像を用いた。

以上の理由から、提案手法の適用例として、面上に凹凸を持つ一枚の大きな面で構成されるレリーフを撮影した(CGで作成した)画像を適用例に選んだ(図4.6.1参照)。入力画像を作成した際の光源は点光源を使用し、それぞれレリーフの正面左、正面右側に配置することで、面に対して水平に光源が移動するシーンを取り扱う。また、以降の節で示す適用例はすべて、作成する画像よりも大きな解像度の入力画像を用い、入力画像の中央部分を適用結果としてレンダリングした。

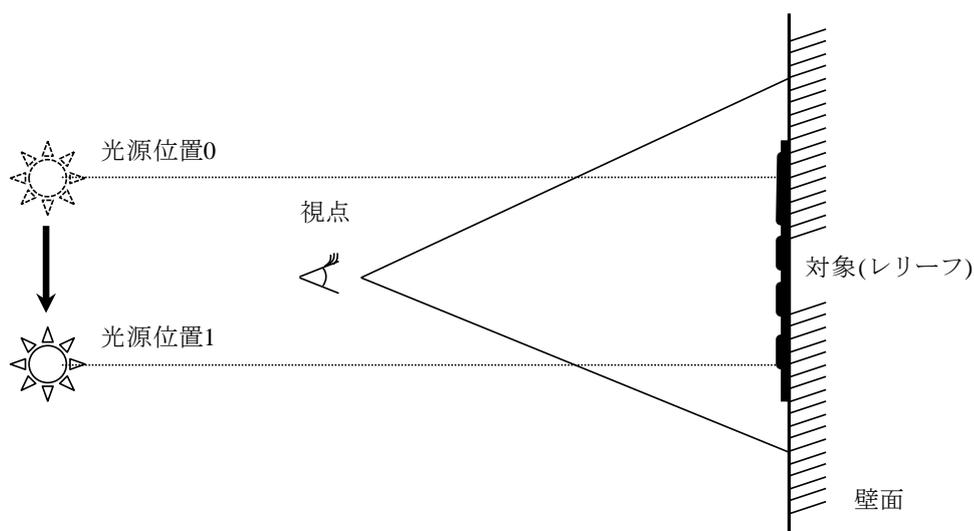


図4.6.1 入力画像モデル

4.6.1 適用例 1(凸型に浮き上がる文字を持つ物体面)

適用例 1 は平らな壁面上に凹凸として文字を浮き上がらせたモデルを用い、提案手法を適用した結果である。入力画像として CG で作成した画像(1000×1000[pixels])を図 4.6.2 に示す。入力画像 0, 1 の時刻を $t = \{0,1\}$ としたときの時刻 $t = \{0.1,0.3,0.5,0.7,0.9\}$ における光源位置での画像を図 4.6.3(a)から(e)にそれぞれ示す。生成した各画像は、入力画像の一部、主に文字が表示される部分(560×160[pixels])をレンダリングした。

図 4.6.3 より、滑らかに光源が移動している一連の画像が生成できている。図 4.6.3 の中央部分にある文字「it」部分に着目すると、光源位置が変わることによって、浮き出た文字に当たる光の角度、方向が変化し、文字の照明効果が変わっていく様子をはっきりと生成されている。時刻 $t = 0.1$ において左側から当てられた光により、文字の左側のエッジは照らされ、右側のエッジは影になっている。時刻が進むにつれエッジの陰影は光源位置に応じて変化し、 $t = 0.9$ において右側から光が当たる場合には、文字の左右のエッジの明るさ、影はきちんと逆転している。このエッジにおける陰影の表現が、提案手法が凹凸面に対応できるという明確な成果である。



(a) 入力画像 0

(b) 入力画像 1

図 4.6.2 適用例 1, 凹凸文字の入力画像



(a) $t = 0.1$



(b) $t = 0.3$



(c) $t = 0.5$



(d) $t = 0.7$



(e) $t = 0.9$

図4.6.3 適用例1, 適用結果



(a) 提案手法

(b) 線形補間

図 4.6.4 適用例 1, 結果画像比較

図 4.6.4 に提案手法と線形補間の適用結果の比較を示す。線形補間は、2 枚の画像における各画素の輝度値を線形な重みでブレンドした画像である。図 4.6.4 は双方の結果が最も顕著に表れる画像中央部にある文字「it」部分を切り出している。上述したように、提案手法は浮き上がっている文字のエッジ部分の陰影が自然に表現できており、光源から照らされている様子がはっきりわかる。一方、線形補間手法は全体にぼけた形で表現されており、全体的に輝度値が低い。そのため、光源がレリーフを照らしているようには見えない。このような結果が得られるのは 4.2.1 節で述べたように、提案手法は、補間時に選択される入力画像の画素を、光線、視線に基づき選択しているためである。線形補間は、光線方向を無視して 2 枚の入力画像の同じ位置の画素を用いて補間する。そのため、光源位置が異なる画像同士をブレンドすると、画素間で高低差の大きい輝度値同士を補間して、全体的にぼけた暗い画像が生成されてしまう。

4.6.2 適用例 2(凹凸を持つレリーフのカラー画像)

適用例 2 はレリーフで表現したモナリザの画像を CG で作成し、提案手法を適用した結果である。入力画像として CG で作成した画像を図 4.6.5 に示す。実際にはレリーフ外の壁面まで含む大きな画像(1000×1000[pixels])を生成しているが、図 4.6.5 では壁面部分を切り取ったレリーフ部分(320×480[pixels])のみ表示している。また、モチーフとしたモナリザは絵画であるので、顔や手の部分が浮き出るようにプログラムで簡易的に法線ベクトルを変化させて、レリーフ化している。

入力画像 0, 1 の時刻を $t = \{0, 1\}$ とし、入力画像間で等間隔に 6 か所、画像をレンダリングした。時刻 $t = \{0.14, 0.28, 0.42, 0.57, 0.71, 0.85\}$ における光源位置での画像を図 4.6.6(a)から(f)にそれぞれ示す。生成した各画像は、レリーフ部分のみレンダリングしている。



(a) 入力画像0

(b) 入力画像1

図4.6.5 適用例2, レリーフの入力画像

光源がレリーフ左上から右上に向かって移動するに従って、レリーフの陰影も変化していく。また、この適用例が示す提案手法の優位性の一つは、カラー画像に対して適用した結果であるということも挙げられる。第1章にて述べた等照度線を用いる手法では、RGBの成分ごとに等照度線を生じさせてモーフィングし、成分を合成してカラー画像を表現していた。第3章にて述べた等輝度線を用いた画像に対する手法では、RGB表色系からHLS表色系に変換し、輝度(あるいは彩度)成分に等輝度線を生じさせてワーピングすることで、カラー画像生成の効率化を図っていた。本章で述べた照明関数を用いる手法は、画像のカラー、グレースケールを問わず同じ手法で画像を高速に生成できる。照明関数テーブルに登録する際の3次元のパラメータの形に制限はないので、XYZ, YCbCr, Lab表色系など別の表色系に対しても適用できる汎用性がある。

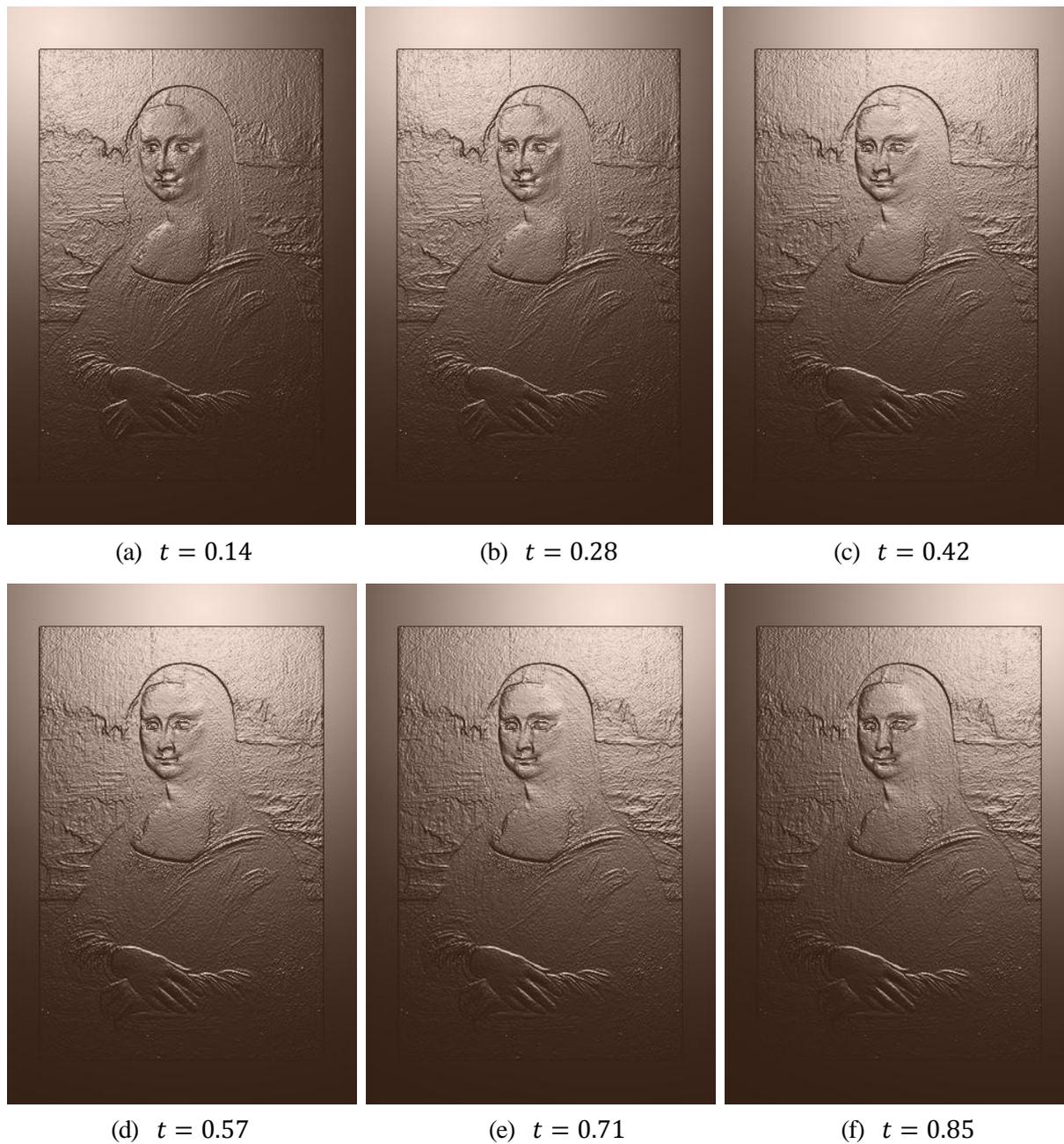


図4.6.6 適用例2, 適用結果

4.6.3 適用例3(光源の色が変化するレリーフ画像)

適用例3はレリーフで表現した富岳三十六計の画像をCGで作成し、提案手法を適用した結果である。入力画像としてCGで作成した画像を図4.6.7に示す。レリーフ外の壁面まで含む大きな画像(1000×1000[pixels])を生成しているが、壁面部分を切り取ったレリーフ部分(480×350[pixels])のみ表示している。モチーフは絵画であるので、波の部分が浮き出るようにプログラムで簡易的に法線ベクトルを変化させて、レリーフ化した。また、この適用例では光源の色(放射強度 I_λ)も変化させている。

白色の光源下で作成した入力画像0と黄色の光源下で作成した入力画像1の時刻をそれぞれ $t = \{0,1\}$ とする。時刻 $t = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$ における光源位置での画像を図4.6.8(a)から(d)にそれぞれ示す。生成した各画像は、レリーフ部分のみレンダリングしている。

光源の移動に伴い、白色から黄色に光源色に変化していく様子がレンダリングできている。すなわち、画像作成時の光源の放射強度が異なる場合でも、提案手法により光源色の変化まで考慮した画像生成できている。また、適用例1, 2と同様に光源位置変化に対して、レリーフ凹凸部分での陰影が自然な形で変化しており、光源が移動している様子が明確に画像に現れている。

3つの適用例の中で、適用例3が最も光源のハイライト部分の形状がはっきり映っている。レリーフ左上にあった白い光源が、黄色に変化しながらレリーフ右上に移動していく過程で、レリーフ上のハイライトは同心円状を保ったまま、光源に合わせて水平に移動している。提案手法は、照明関数のパラメータ削減のために、光線、視線ベクトルに関するパラメータ($\theta_L, \theta_V, \varphi$)をハーフベクトル \mathbf{H} で近似している。その影響は、拡散反射光成分に表れる(4.3.2節参照)。適用例3に示されるように、拡散反射光成分が近似されていることによる光源の不自然な変化は視覚的には見られず、3.4.2節で論じたように光源の移動に伴う理想的な輝度分布の変化が実現できていると言える。

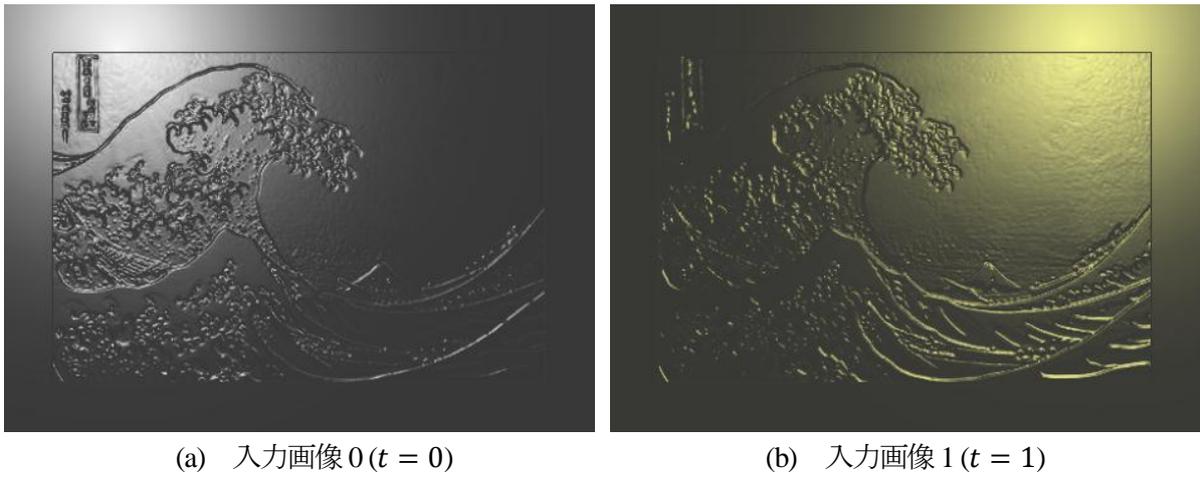


図4.6.7 適用例3, レリーフの入力画像

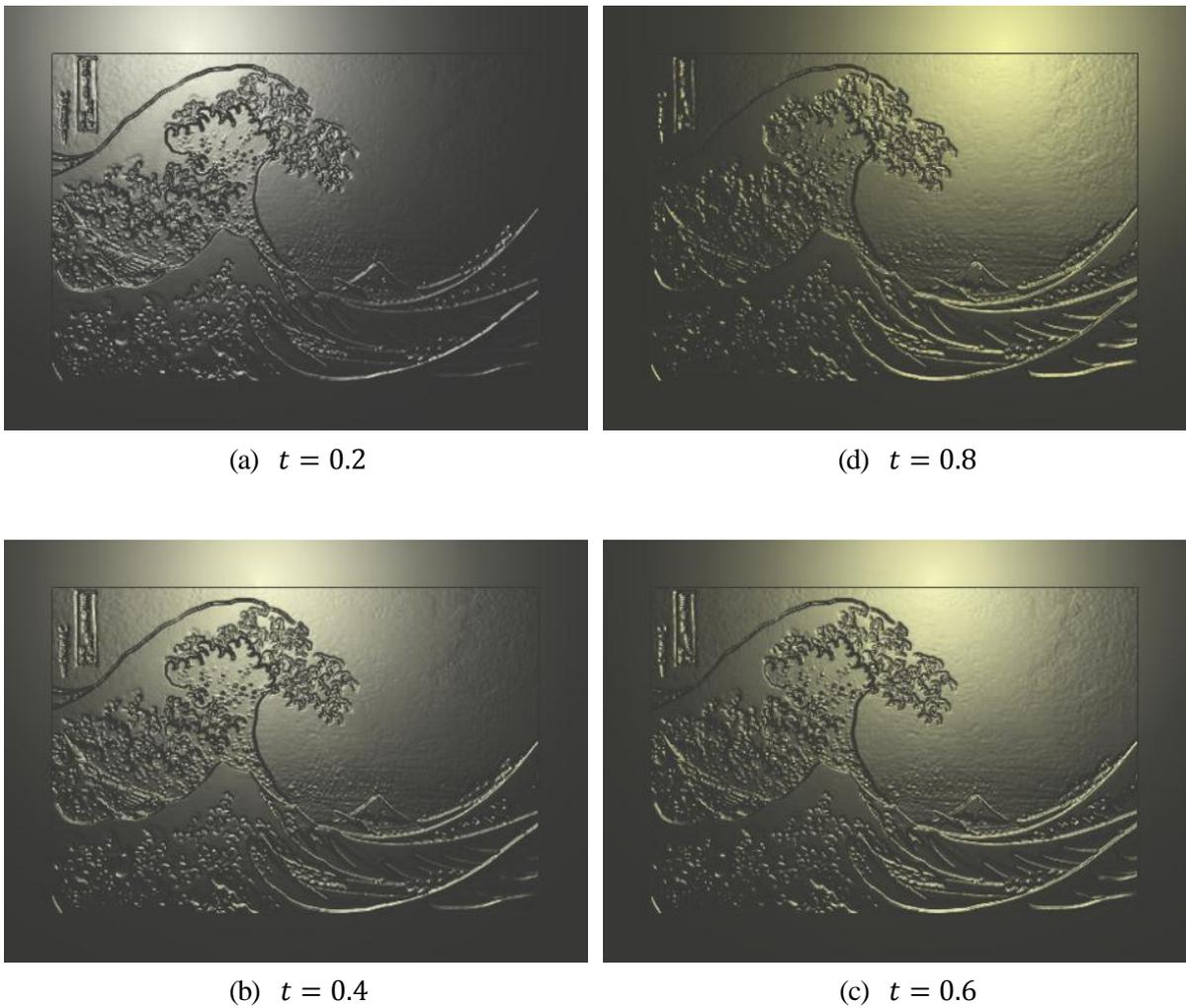


図4.6.8 適用例3, 適用結果

4.6.4 適用例生成に要する処理時間

適用例1から3について、入力画像、レンダリング画像の画像サイズを表4.6.1にまとめる。また、前処理として照明関数テーブルの作成に要する時間、任意光源位置を決定後に画像をレンダリングするために要する時間を同表4.6.1に示す。使用計算機はIntel® Core™2 Quad 2.82[GHz]/CPU, 3.25[GB]/メモリである。

表4.6.1 画像サイズと処理時間

適用例	画像サイズ [pixels]		処理時間[sec.]	
	入力	レンダリング	前処理	レンダリング
1	1000×1000 (図 4.6.2)	560×160 (図 4.6.3)	2.64	0.16
2	1000×1000 (図 4.6.4)	320×480 (図 4.6.6)	2.64	0.26
3	1000×1000 (図 4.6.7)	480×350 (図 4.6.8)	2.66	0.29

前処理は、一度のみ実行すればよく、各適用例で約 2.6[sec.]で算出できている。前処理に要する時間は、照明関数テーブルに登録する画素数と画像枚数に依存する。本節で用いた適用例はすべて1000×1000[pixels]であり、そのすべての画素を照明関数に登録した。照明関数テーブルに画素の輝度値を登録後、輝度値が登録されなかったテーブル要素(データ欠損)は周囲の画素から輝度値を補間する。適用例3のみわずかに時間が異なるのは、適用例3においてデータ欠損が他の適用例よりも多かったためである。データ欠損が多い理由は、適用例3は適用例2よりも、凹凸面の数が多く、また凹凸の深さも大きいため、4.5節で述べた凹凸面における輝度値登録の閾値判定において、テーブルから除外された画素が多かったためである。

レンダリングに要する時間は、各適用例とも0.3[sec.]以下であり、リアルタイムとまでは言えないが、十分にインタラクティブに画像が高速生成できている。レンダリング時間は、生成画像の画素サイズに大きく依存するため、画像面積が多い適用例の方が処理時間を要する。また、凹凸面にマッピングする際には、照明関数テーブルから取得した輝度値の補正が必要なため、凹凸面の数が多いほど計算時間が長くなる。

4.7 結言

本節では、照明関数を用いた新たなアプローチにより、照明条件の異なる画像を高速に生成できる手法を提案した。提案手法は、照明条件の異なる2枚の入力画像の輝度値を再パラメータ化することで照明関数テーブルを構築し、テーブルから2枚の画像間で照明条件の変化した画像を高速に生成できる。

提案手法は基礎的研究の段階にある。この手法をさらに有益なものにするために、次のような提案手法の拡張が考えられる。

1. 遮蔽物、およびそれにより生じる影の考慮

提案手法は、光源から物体面への光を遮る遮蔽物を考慮していない。遮蔽物により生じる影は、物体面上の輝度値を大きく減少させるため、照明関数は遮蔽物の影を考慮して構築する必要がある。また、面上に影を表現する方法が必要である。

2. 複数の光源で照らされた画像への対応

提案手法はシーン中で移動する光源を対象に照明関数を作成し、画像中の光源の移動を模擬している。シーン中に移動しない光源が存在した場合、この光源によって照射されたシーン中で移動しない輝度成分まで同時に移動させてしまう。移動しない光源により与えられる輝度値は2枚の画像で共通であるので、2枚の画像の輝度値の差分をとり、輝度値差分に対して提案手法を適用することで、移動しない光源を含む複数光源環境下にも適用できると考える。

第5章 結論

コンピュータグラフィックス（以下、CG）やカメラで撮影された写真は、光源位置や光源の強さなどの照明条件により対象物の見え方が様々に変化するため、ユーザが望む結果が得られるように照明条件を変えて作成、撮影される。レンダリングするための環境、3次元モデルが存在するCGの場合、大域照明や相互反射光などを考慮したより精密な画像を生成する場合には、膨大な計算時間を要する。カメラで撮影する場合は、撮影前にユーザが望む照明条件を作り出すことが必要である。これらの問題に対して、本論文では、照明条件が変化する画像を高速かつ容易に生成する3つの方法について提案した。

第2章にて、3次元モデルを有するCG画像について、計算コストの高い照明シミュレーションを行わずに、照明条件の変化した画像をレンダリングするイルミネーションモーフィング手法を提案した。特徴線分を用いたモーフィング手法の考え方を応用し、サンプルされた位置に光源を設置したときの照度分布から求めた等照度線にモーフィング処理を施すことにより、中間位置に光源を設置したときの照度分布を高速に求めることを可能にした。ただし、再レンダリングによって画像を生成するために、3次元の物体モデル(3Dモデル)を必要とする。3Dモデルの生成は容易ではないため、ユーザが手軽に手法を用いるには大きな障害である。

イルミネーションモーフィング手法の大きな課題である3Dモデルを用いず、画像情報のみから照明条件の変化した画像をレンダリングする手法を、第3章にて提案した。画像中の輝度分布の特徴を等輝度線によって表し、等輝度線をワーピングすることで光源位置の変化する画像を高速に生成することを可能とした。しかし、異なる画像間で等輝度線同士を適切に対応付けることが要求される。2枚の画像間で正しく対応つけられない等輝度線は、誤った位置、形に変形し、結果不自然な輝度分布を形成してしまう。また、特にトポロジーの異なる等輝度線を如何に対応つけるかという課題が残された。トポロジーが異なる場合、等輝度線は分岐、統合したと判断されるが、正しく対応付けられなかったものは発生、消滅したとみなされ、突然に輝度値が急激に変化する事態を招く。発生、消滅する場合には、そのタイミングや位置が重要であるが、入力画像の情報からは得ることができず、推定するしかないという課題もある。これらのトポロジーの違う等輝度線に適切に対応できるかが、生成される画像の精度に大きく依存する。

イルミネーションモーフィングでは、2枚の入力画像(2つの照度分布)間にて照明条件を変更させることが可能となった。ただし、これらの入力情報のみを用いる手法のため、2つの照明が算出された照明環境下の間においてのみ自由に照明条件が変えられる。たとえば、光源位置であれば2つ

の照明条件での光源位置を結んだ直線上の任意の点に限定される。3 つ以上の光源を配置し、光源間を結ぶ平面上の任意の位置での照明を得られるようにするには、光源のうち2つにイルミネーションモーフィングを適用し、その結果と次の光源間で再度イルミネーションモーフィングを行うことにより、実現が期待される。ただし、複数回のイルミネーションモーフィングを行うことによる算出照度(輝度)値の誤差の低減について検討する必要がある。

第4章において、イルミネーションモーフィングの課題である対応づけを必要としない新たなアプローチにより、照明条件の変化した画像をレンダリングする手法を提案した。画像の輝度情報を記憶する照明関数を構築し、照明関数に登録された輝度値を任意の光源位置での画像に適切にマッピングすることで、任意の照明条件における画像を高速かつ容易に生成することを可能とした。計算点における光源、視点方向情報を考慮し、照明関数は、面法線に基づく光源、視線方向ベクトルによって構築される。これにより、光源の移動をはじめとする照明条件の変更に対応した画像の高速生成が可能である。また、複数の画像間における特徴の対応づけを必要としないため、イルミネーションモーフィング手法では適用困難だった複雑な形状、トポロジーを持つ輝度分布にも適用できる、有用性の高い手法となった。この手法は基礎的検証の段階にあるため、さらなる手法の拡張が望まれる。一つは、光源から物体面への光を遮る遮蔽物を考慮していないことである。遮蔽物により生じる影は、物体面上の輝度値を大きく減少させるため、照明関数は遮蔽物の影を考慮して構築する必要がある。面上に影を表現する方法も必要になる。二つ目は、複数の光源で照らされた画像への適用である。提案手法はシーン中で移動する光源を対象に照明関数を作成し、画像中の光源の移動を模擬している。シーン中に移動しない光源が存在した場合、この光源によって照射されたシーン中で移動しない輝度成分まで同時に移動させてしまう。移動しない光源により与えられる輝度値は2枚の画像で共通であるので、2枚の画像の輝度値の差分をとり、輝度値差分に対して提案手法を適用することで、移動しない光源を含む複数光源環境下にも適用できると考える。

照明関数を用いた手法においても、用いた複数枚の入力画像が算出された照明環境下の間においてのみ自由に照明条件が変えられる。ただしこの手法は特定の条件においては、入力画像が1枚のみであっても、照明関数を構築し、新たな照明条件での画像生成が可能である。4章で示した適用例のように大きな一枚の面を対象とし、かつ面に対して平行に移動する光源に対しては、入力画像が一枚であっても光源位置を水平方向にのみ自由に変更できる。

参考文献

- [1] Choen, M. F. and Greenberg, D. P., "A Radiosity Solution for Complex Environment," *Computer Graphics* 19(3), pp. 32-40, 1985.
- [2] Nishita T. and Nakamae, E., "Continuous Tone Representation of Three Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection," *Computer Graphics* 19(3), pp. 23-30, 1985.
- [3] Immel, D. S., Choen, M. F. and Greenberg, D. P., "A Radiosity Method for Non-Diffuse Environments," *Computer Graphics* 20(4), pp. 133-142, 1986.
- [4] Kajiya, J. T., "The Rendering Equation," *Computer Graphics* 20(4), pp. 143-150, 1986.
- [5] Rushmeier, H. E. and Torrance, K. E., "The Zonal Method for Calculating Light Intensities in the Presence of a Participating Medium," *Computer Graphics* 21(4), pp. 293-302, 1987.
- [6] Wallace, J. R., Choen, M. F. and Greenberg, D. P., "A Two-pass Solution to the Rendering Equation: A Synthesis of Ray Tracing and Radiosity Methods," *Computer Graphics* 21(4), pp. 311-320, 1987.
- [7] Choen, M. F., Chen, S. E. and Greenberg, D. P., "A Progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation," *Computer Graphics* 22(4), pp. 93-101, 1988.
- [8] Chao, M., Peng Q. and Liang, Y., "A New Radiosity Approach by Procedural Refinements for Realistic Image Synthesis," *Computer Graphics* 22(4), pp. 93-101, 1988.
- [9] Chon, S. E., "Incremental Radiosity: An Extension of Progressive Radiosity to an Interactive Image Synthesis System," *Computer Graphics* 24(4), pp. 135-144, 1990.
- [10] Wallace, J.R., Elmquist, K. A. and Haines, E. A., "A Ray Tracing Algorithm for Progressive Radiosity," *Computer Graphics* 23(3), pp. 315-324, 1989.
- [11] Baum, D. R., Rushmeier, H. E. and Winget, J. M., "Improving Radiosity Solutions Through the use of Analytical Determined Form-Factors," *Computer Graphics* 23(3), pp. 325-334, 1989.
- [12] Sillion, F. X., Arvo, J. R., Westin, S. H. and Greenberg, D. P., "Global Illumination Solution for General Reflectance Distributions," *Computer Graphics* 25(4), pp. 187-196, 1991.
- [13] Dobashi, Y., Kaneda, K., Nakatani, H. and Yamashita, H., "A Quick Rendering Method Using Basis Functions for Interactive Lighting Design," *Computer Graphics Forum* 14(3), pp. C299-240, 1995.
- [14] Lorensen, W. E. and Cline, H. E. "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *Computer Graphics* 21(4), pp. C163-169, 1987.

- [15] Soroka, B. I., "Generalized Cones from Serial Sections," *Computer Graphics and Image Processing* 15(2), pp. C154-166, 1981.
- [16] Meyers, D., Skinner, S. and Sloan, K., "Surfaces from Contours," *ACM Transactions on Graphics* 11(3), pp. 228-258, 1992.
- [17] Ekoule, A. B. et al., "A Triangulation from Arbitrary Shaped Multiple Plana Contours," *ACM Transactions on Graphics* 10(2), pp. 182-199, 1991.
- [18] Keppel. E., "Approximating Complex Surfaces by Triangulation of Contour Lines," *IBM Journal of Research and Development* 19(1), pp. 2-11, 1975.
- [19] Fuchs, H. et al., "Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours," *Communications of the ACM* 20(10), pp. 693-702, 1997.
- [20] Christiansen, H. N. and Sederberg, T. W., "Conversion of Complex Contour Line Definition into Polygonal Element Mosaics," *Computer Graphics* 12(3), pp. 187-192, 1972.
- [21] Kaneda, K., Kato, F., Nakamae, E. and Nishita, T., "Three Dimensional Terrain Modeling and Display for Environment Assessment," *Computer Graphics* 23(3), pp. 207-214, 1989.
- [22] Bloor, M. and Wilson, M., "Local Control of Surfaces Generated Using Partial Differential Equations," *Computer Graphics* 18(2), pp. 161-169, 1988.
- [23] 柴 建雲, 三好 孝治, 中前 栄八郎, "偏微分方程式を用いた高等線地図の補間と滑らかな面の再構成," *情報処理学会論文誌* 41(3), pp. 733-741, 2000.
- [24] Shinagawa, Y., et al., "ASurface Coding Based on Morse Theory," *IEEE Computer Graphics and Application* 11(9), pp. 66-78, 1991.
- [25] Komatsu, K., Shinaga, Y., Kunii, T. and Ueda, M., "Terrain Shape Reconstruction from Contour Based on Shrinking Deformation," *Trans. IEICE, D-II* 79(6), pp. 1072-1079, 1996.
- [26] 照明学会編, "ライティングハンドブック," オーム社, 1987.
- [27] G. Wolberg, "Image morphing: a survey", *The Visual Computer*, 14, pp. 360-372, 1998.
- [28] G. Wolberg, "Digital image warping," *IEEE Computer Society Press*, 1990.
- [29] T. beier and S. Neely, "Feature-based image metamorphosis," *Computer Graphics*, 26(2), pp. 35-42, 1992.
- [30] D. Ruprecht, H. Muller, "Image warping with scattered data interpolation," *IEEE Computer Graphics and Application*, 15, pp. 37-43, 1995.
- [31] P. Litwinowicz, L. Williams, "Animating images with drawings," *Computer Graphics*, pp. 449-456, 1994.
- [32] S. Lee, K. Y. Chwa, J. Hahn, and S. Y. Shin, "Image morphing using deformation techniques,"

- The Journal of Visualization and Computer Animation*, 7(1), pp. 3-23, 1996.
- [33] S. Lee, K. Y. Chwa, S. Y. Shin, and G. Wolberg, "Image metamorphosis using snakes and free-form deformations," *Computer Graphics*, pp. 439-448, 1995.
- [34] P. Gao, T. W. Sederberg, "A work minimization approach to image morphing," *The Visual Computer*, 14, pp. 390-400, 1998.
- [35] P. Debevec, "Image-Based Lighting," *Computer Graphics and Application*, 22(3), pp. 26-34, 2002.
- [36] P. Debevec, et al., "Acquiring the Reflectance Field of a Human Face," *SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings*, pp. 145-156, 2000.
- [37] W. E. Lorensen, and H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *Computer Graphics*, 21(4), pp.163-169(1987).
- [38] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. Cohen, M, "The Lumigraph," *Proc. SIGGRAPH, '96, ACM*, pp. 43-54, 1996.
- [39] M. Levoy and P. Hanrahan, "Light Field Rendering," *Proc. SIGGRAPH, '96, ACM*, pp. 31-42, 1996.
- [40] P. P. Sloan, J. Kautz, and J. Snyder, "Precompute Radiance Transfer for Real-time Rendering in Dynamic, Low-frequency Lighting Environments," *ACM Trans. on Graphics*, 21(3), pp. 527-536, 2002.
- [41] R. Ng, R. Ramamoorthi, and P. Hanrahan, "All-Frequency Shadows using Non-Linear Wavelet Lighting Approximation," *ACM Trans. on Graphics*, 22(3), pp. 376-381, 2003.
- [42] K. Zhou, Y. Hu, S. Liu, B. Guo, and H. Y. Shum, "Precomputed Shadow Fields," *ACM Trans. on Graphics*, 24(3), pp. 1196-1201, 2005.
- [43] W. Sun and A. Mukherjee, "Generalized Wavelet Product Integral for Rendering Dynamic Glossy Objects," *ACM Trans. on Graphics*, 25(3), pp. 477-487, 2006.
- [44] T. Annen, Z. Dong, T. Mertens, P. Bekaert, H. P. Seidel, and J. Kautz, "Real-time, All-Frequency Shadows in Dynamic scenes," *ACM Trans. on Graphics*, 27(3), Article 34, 2008.
- [45] T. Ritschel, T. Grosch, M. H. Kim, H. P. Seidel, C. Dachsbacher, and J. Kautz, "Imprefect Shadow Maps for Efficient Computation of In direct Illumination," *ACM Trans. on Graphics*, 27(5), Article 129, 2008.
- [46] J. Blinn, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," *Computer Graphics*, 11(2), pp. 192-198, July 1997.
- [47] K. Hara, K. Nishino, and K. Ikeuchi, "Light Source Position and Reflectance Estimation from a

Single View without The Distant Illumination Assumption,” *IEEE Trans. on PAMI*, 27(4), pp. 493-505, 2005.

- [48] H. W. Jensen, “Global Illumination using Photon Maps,” *Rendering Techniques '96*, Eds. X. Pueyo and P. Schröder. Springer-Verlag, pp. 21-30, 1996.

謝辞

本研究の遂行にあたり、終始暖かい御指導、御検討、御助言をいただきました金田 和文先生、玉木 徹先生、Bisser Raytchev 先生に深く感謝いたします。副査として御指導、御助言をいただきました原田 耕一先生、平嶋 宗先生に深く感謝いたします。ゼミにおいて議論していただいた知的システムモデリング研究室の学生の皆さんに深く感謝致します。最後に、研究生生活を物心両面から御支援してくださった両親に心より感謝いたします。