Osaka University Knowledge Archive

Title	物理モデルに基づいた有色画像の認識
Author(s)	眞鍋, 佳嗣
Citation	大阪大学, 1995, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3081496
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

物理モデルに基づいた有色画像の認識

眞　鍋　佳　嗣

1995年1月

大阪大学基礎工学部

序　文

人間の得ている視覚情報には，物体形状から生じる陰影情報，物体の色を示す色情報，物体の輪郭の情報などがあり，これらの情報を統合することで周囲の環境を認識している．この視覚情報を計算機に理解させようというのがコンピュータ・ビジョンである．

本論文は，有色画像の認識を光学物理モデルに基づいて行なうことを考える．まず，対象物体を不透明有色物体とし，その表面で生じる光の反射を解析する．この反射モデルを基に有色画像の認識を行なう．認識の対象として，物体表面に他の面が写り込む相互反射現象に着目する．これは光源－物体－観測者の位置関係によって生起されるものであり，我々が物体の位置関係や形状，材質を認識する際に距離情報，陰影情報と共に重要な情報の一つと考えられるためである．相互反射の解析を行なうために，主に色に着目した定性的なモデルと，物体表面における反射の反射率関数を用いた，色・強度を考慮した定量的なモデルの二つのモデルを構築する．これらのモデルを用いて有色画像中で生じている相互反射の解析を行なう．次に，相互反射を検出するために，光源を移動させることで光源－物体－カメラの位置関係を変化させ，その間に色が急変する画素を用いて相互反射を検出する方法を提案する．この手法の応用例として従来の質感認識アルゴリズムとの融合を行なう．

また，濃淡画像，RGBカラー画像より多く情報を含んだ有色画像として，画素値に分光輝度分布を持つスペクトル画像を提案する．このスペクトル画像では濃淡画像，RGBカラー画像では認識できない，波長単位での微妙な変化を認識，処理できることを示す．

目　次

第１章　総論 …… 1

1.1. コンピュータ・ビジョン …… 1

1.2. 物理モデルに基づいた画像認識（Physics-Based Vision ） …… 1

1.3. 有色画像認識 …… 2

1.4. 相互反射について …… 3

1.4.1. 濃淡画像での相互反射の研究 …… 4

1.4.2. カラー画像での相互反射の研究 …… 4

1.5. スペクトル画像 …… 4

1.6. 本研究の意義と論文の構成 …… 5

第２章　有色画像認識のための光の反射モデル …… 7

2.1. 光の反射特性 …… 7

2.1.1. 鏡面反射 …… 7

2.1.2. 拡散反射 …… 8

2.1.3. 異方性反射 …… 8

2.2. 反射率関数 …… 10

2.2.1. 鏡面反射 …… 10

2.2.1.1. Phong …… 10

2.2.1.2. Blinn (Torrance-Sparrow) …… 11

2.2.1.3. Cook-Torrance …… 12

2.2.2. 拡散反射 …… 13

2.3. 不透明非金属物体の反射モデル（Dichromatic Reflection Model） …… 13

2.3.1. 表面反射 …… 14

2.3.2. 内部反射 …… 14

2.4. 金属物体での反射 …… 14

2.5. ＲＧＢ色空間における分布の様子 …… 15

2.5.1. 内部反射 …… 16

2.5.2. 表面反射 …… 17
2.5.3. 金属反射 …… 20
2.6. 反射光の色について …… 22
2.6.1. スペクトル分布 …… 22
2.6.2. 加法混色 …… 23
2.6.3. 減法的な色の発生 …… 23
2.7. まとめ …… 24

第３章　相互反射現象 …… 26
3.1. 反射モデル …… 26
3.2. 相互反射モデル …… 26
3.2.1　相互反射 …… 27
3.3.ＲＧＢ色空間における分布 …… 31
3.3.1　有色表面反射－有色表面反射 …… 31
3.3.2　有色表面反射－内部反射物体 …… 31
3.3.3. 内部反射－内部反射 …… 34
3.4. まとめ …… 35

第４章　相互反射からの三次元情報の推定 …… 37
4.1. 反射率関数を用いた相互反射モデル …… 37
4.1.1. 拡散反射－拡散反射 …… 37
4.1.1.1.　Nayarモデル …… 37
4.1.1.2.　Drewモデル …… 38
4.1.2. 表面反射－表面反射 …… 40
4.1.2.1.　広がりを持たない表面反射のモデル（滑らかな鏡面） …… 40
4.1.2.2.　広がりを持つ表面反射のモデル …… 41
4.1.3. 表面反射－拡散反射 …… 42
4.1.3.1　表面反射面でのモデル …… 42
4.1.3.2.　拡散反射面でのモデル …… 43

4.1.4. 多重反射 …… 44
4.1.4.1. 両面が表面反射面の場合 …… 44
4.1.4.2. 両面が拡散反射面の場合 …… 45
4.1.4.3. 二面の反射の種類が違う場合 …… 46
4.1.4.4. 表面反射と拡散反射の両方を面に含む場合 …… 49
4.2. 生成問題 …… 52
4.3. 逆問題 …… 52
4.4. 実験 …… 54
4.4.1. シミュレーションによる検証 …… 54
4.4.1.1. 生成問題 …… 54
4.4.1.2. 二面間の角度推定 …… 58
4.4.2. 実験による検証 …… 58
4.4.2.1. 相互反射成分の抽出 …… 60
4.4.2.2. 相互反射による二面間の角度推定 …… 60
4.4.3. 検討 …… 60
4.5. まとめ …… 62

第5章 光源移動による相互反射検出 …… 63
5.1. 検出原理 …… 63
5.2. 光源移動による物体表面の色の変化 …… 64
5.2.1. 相互反射 …… 65
5.2.2. 表面反射 …… 66
5.3. 検出方法 …… 66
5.4. 判別方法 …… 67
5.5. 実験 …… 68
5.5.1. 処理の流れ …… 68
5.5.2. 計測装置 …… 69
5.5.3. カラー画像の入力 …… 70
5.5.4. 閾値の決定方法 …… 71

5.5.5. 実験例 …… 72
5.5.6. 検討 …… 74
5.6. 質感認識との結果の融合 …… 74
5.6.1. カラー画像処理による質感認識 …… 74
5.6.2. 質感認識との結果の融合 …… 76
5.6.3. 実験例 …… 77
5.7. まとめ …… 79

第6章 スペクトル画像による材質判別 …… 80
6.1. スペクトル画像 …… 80
6.1.1. システム構成 …… 81
6.2. データ処理 …… 82
6.2.1. 相関法 …… 83
6.2.2. 主成分分析法 …… 84
6.3. 実験 …… 84
6.3.1. 相関法による物体認識 …… 84
6.3.2. 主成分分析法による画用紙とケント紙の分離 …… 86
6.3.3. 緑色の異質同色物体の分離 …… 89
6.3.4. 検討 …… 92
6.4.まとめ …… 92

第7章 結論 …… 93

謝辞 …… 96

参考文献 …… 97

付録

第1章　総論

人間は自分の周りの環境を認識するために，音，臭い，手触り，明るさ，色など様々な情報を用いている．これらの情報から不必要なもの，信頼性の低いものを除き，本当に必要なものだけを取り出し，融合し，その情報にこれまで自分の得た知識を突き合わせることで，信頼性の高い認識を行なっている．この情報処理を，コンピュータに行なわせることは大きな夢の一つである．

近年の計算機システムの発達はめざましいものがある．この発達のおかげで私達の周りには計算機を利用した様々なシステムが存在している．また，人間と同じような知覚を持たせようとする研究が盛んに行なわれるようになった．人間を人工的に模倣する試みというのは，古くから行なわれている．アクチュエータによる手，足の機能などから，コンピュータによる視覚，聴覚，嗅覚，触覚，味覚の五感の再現，そして，学習，知識などの人工知能など様々である．この中で人間にとって最も複雑で，最も有効である視覚を計算機で再現しようというのがコンピュータ・ビジョンである．ひとえにコンピュータ・ビジョンといっても，人間と同じように，三次元情報を得ようとするもの，材質を調べようとするもの，色を調べようとするものもあれば，人間には見えないようなものを見えるようにしようというものがある．

1.1. コンピュータ・ビジョン

人間は約400ｎｍ～700ｎｍの波長の光を知覚することで視覚情報の獲得を行なっている．さらにこの可視波長帯の短波長域，中波長域，長波長域を別々に受容する細胞によって，それぞれ青色，緑色，赤色という三色として刺激され，この三色の信号の混合によって我々は様々な色を知覚できる．また，両眼立体視による三次元情報や，物体の明るさの変化や色の変化などの視覚情報を融合することによって，物体の形状，材質，位置関係などを正確に認識することができる．

一方，物体の形状，位置関係などの視覚認識で，画像処理に関する研究は今日まで様々な分野で多くの成果をあげてきた．レンジ・ファインダなどによる三次元情報処理や，Shape from Reflectionによる三次元形状復元などの研究があげられる．これらの研究では正確な数値化，数量化などの観点から言えば人間の視覚以上の性能を持つものも存在する．しかし，まだまだ未解決の問題も数多く残されている．

1.2. 物理モデルに基づいた画像認識（Physics-Based Vision）

画像の入力方法はこれまで，科学技術の発達と共に，シルエットを表す二値画像から，濃淡画像，そして人間の色知覚に近いRGBカラー画像と変化してきている．これらの画像から我々は明るさの変化，色の変化などの情報を得て，物体の境界を示すエッジの検出，物体の領域を獲得するための領域分割な

どを行なってきた．しかし，この画像が示している明るさの変化や色の変化は，実際には物理現象に基づいた変化であり，物体表面の特性を示していると考えられる．そこで，物理的なモデルを用いることにより，これらの情報を積極的に有効利用することが考えられる．これが，物理モデルに基づいた画像処理（Physics Based Vision）である．

ここでいう，物理モデルとは物体表面で生じている光などの反射特性などを基にした幾何光学的なモデルである．つまり，物理の現象論的なモデルであって，物性論は含まない．また，光の反射特性の他に熱伝導などの物理現象を扱ったものもある[Nandhakumar 94].

濃淡画像における代表的な物理モデルに基づいた画像認識としては，Shape from Reflection などがある[Tian 93][Okamoto 93].

1.3. 有色画像認識

人間の視覚をコンピュータ上に実現しようという試みが，画像処理，コンピュータビジョンである．ＣＣＤカメラを目とし，脳の役割をコンピュータにさせるわけであるが，これまでの画像処理の研究では明るさ情報のみの画像，濃淡画像あるいは二値画像を使用してのものがほとんどであり，色情報の有効な利用は少ないものであった．

近年，有色画像を扱うデバイスが普及しつつあり，それにともない，有色画像処理の応用分野も広がっている．これまで研究されてきた有色画像処理は，以下の三つに分類できるように思われる（図１-１）．

(1)濃淡画像処理の高信頼化

濃淡画像で行なわれている，エッジ抽出や領域分割に色情報を付加することでより正確な処理を行な

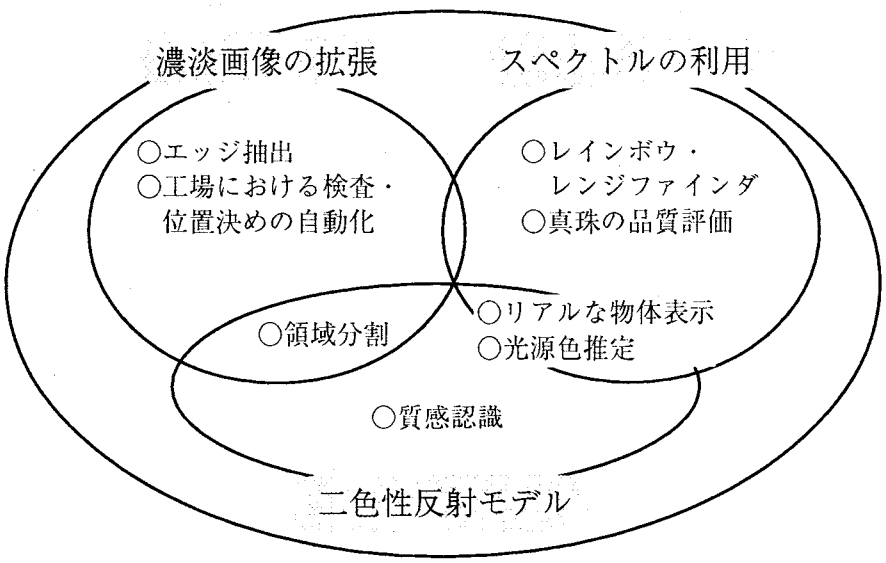


図１-１　カラー画像処理

おうというものである[Ohta 85][Ishihara 89]．具体的には，影によって生じるエッジを色情報により補償し物体のエッジのみを抽出するために使用したり，工場ラインでの部品の位置・面積検出を濃淡画像より正確に行なうことに使用したりしている．

(2)スペクトル分布を利用した応用

可視スペクトル（300nm～800nm）での分光輝度分布の差異に基づく処理は広い意味での有色画像処理に入ると思われる．

この分野での研究例としては，スペクトルパターンを使って空間をコード化し，物体の三次元形状を測定するレインボーレンジファインダ[Tajima 90]や，真珠の品質評価のために分光輝度を使用する方法などが報告されている[Nagata 92]．リモートセンシングにおけるマルチスペクトル画像の画像分類処理もこのグループに入ると思われる．

(3)二色性反射モデル（Dichromatic Reflection Model [Shafer 90]）による研究

CMUのShaferらが提案したモデルで，非金属物体の表面は光沢を表す表面（界面）反射と，物体固有の色を示す内部（拡散）反射の二つで表現し，RGBカラー信号の三次元的な性質を有効に利用したものである．RGBカラー画像における物理モデルに基づいた画像処理の一つである．現在のRGBカラー画像処理はこのモデルを利用したものが多く，物体表面で生じているハイライトの抽出や，光源色の推定，物体の質感認識などがある．このモデルに関しては第２章で詳しく述べる．

以上，有色画像処理を三種類に分類したが，これらの他に境界研究として，二色性反射モデルを利用した領域分割があげられる[Tominaga 90]．これは濃淡画像の拡張の部分を含んでいるとも考えられる．

本論文で言う有色画像とは，RGBカラー画像およびスペクトル分布を基にしたスペクトル画像を指すものとする．

1.4. 相互反射について

相互反射は光源から物体に照射された光の一部が反射して，他の物体や同一物体上の別な部分に再び照射する現象である．この反射光によって物体表面の色や明るさが変化する．人間は相互反射が生じている領域や，色の変化具合などを物体の形状や位置関係を認識する際の一つの手掛かりとして利用している．しかし，画像処理において相互反射の研究はほとんどされておらず，むしろ熱工学[Kikai]や，照明設計[Seki]の分野において古くから研究が行なわれてきた．

一方，計算機科学の枠組みの中で相互反射を扱っている研究分野として，コンピュータ・グラフィックス（CG）の分野がある．物体表面の反射特性による陰影をCGではシェーディングと呼び，CGの重要な立体感表現方法として広く用いられている．このシェーディングの実現技法に，熱工学における熱輸送の理論を応用したラジオシティ法がある[Greenberg 85]．CGにおいて初めて，効率的な相互拡散反射

の計算を扱ったものである．現在，このラジオシティ法の研究主題は鏡面反射成分の効率的な表現方法の確立である[Yokoi 88][Fujimoto 91][Yamashita 91].

また，画像処理における相互反射の研究としては，濃淡画像での研究とカラー画像での研究とに分けられる．

1.4.1. 濃淡画像での相互反射の研究

濃淡画像中で相互反射は，物体表面の明るさの変化として現われる．そのため，Shape from Shadingなど陰影から物体形状を復元する手法では，相互反射の生じている物体では明るさの変動などのために正しい結果を得ることができなかった．そこで，Nayarらは相互反射のモデルを立てることによって，正しい形状を復元することに成功した[Nayar 91]．これは計測物体の表面が光沢のないLambertian表面で，単一色のものと仮定した場合のモデルで，相互反射は無限に繰り返されるものとしている．

1.4.2. カラー画像での相互反射の研究

カラー画像で相互反射は，物体表面の明るさの変化だけではなく，色の変化としても現われる．カラー画像で相互反射を扱った研究の多くは，二色性反射モデルを用いた領域分割の結果，正しく分割できない領域を相互反射として分類するにとどまっている[Bajcsy 90]．これに対し，橋本らはカラー画像において二色性反射モデル，物質によるモデルの差異を使い，シーン中の物体表面の質感を，金属・滑らかな非金属・粗い非金属に判別する研究を行なっている[Hashimoto 91]．この研究の中で，相互反射により上記のいずれにも当てはまらない分布をするものが見い出された．この箇所に関しては相互反射の簡単なモデルを立てることによって，上記の三つの質感に加えて相互反射の起こっている領域が抽出可能になっている．この研究は積極的に相互反射を扱おうという研究の一つである．

以上，画像処理における相互反射のこれまでの研究を述べたが，まだ具体的な成果をあげている研究は少ない．

1.5. スペクトル画像

現在のカラー画像入力は，RGBカメラでの計測が主流であり，ここまでRGBカメラを前提にしてきた．これは人間の視覚が，どのような色でも三つの原刺激の加法混色で再現できるためである．しかし，実際のシーンはスペクトル分布を持つ物理光学現象であり，RGBの三色で解析するには限界がある場合がある．例えば，これまで述べてきた相互反射のように色が微妙に変化する現象の場合，RGB画像では忠実に表現できない．

また，物体の材質，光源の種類，周囲環境などによっては，異なる材質の物体であっても同じ色に見えることがある．この現象を条件等色という．このような場合，RGBカラー画像で識別することは不可能である．一方，物体はその物体固有の表面特性を持っており，材質が異なると反射スペクトル分布も

異なる．そこで，それぞれの表面のスペクトル分布を測定し，比較することで異なる材質の識別が可能となる．

1.6. 本研究の意義と論文の構成

本研究ではまず，これまであまり着目されなかった物体間で生じる相互反射に注目し，シーン中の相互反射を基に物体認識を行なうことを考える．そのために，ＲＧＢカラー画像において，光沢のないLambertian表面での相互反射のみならず，光沢のある表面での相互反射に対しても物理モデルに基づいたモデルを構築し，これを利用して物体の三次元情報の推定を試みる．また，アクティブビジョンの考え方を導入し，相互反射成分の抽出を行なう．これらの研究成果により，これまで無視されることの多かった相互反射から重要な三次元情報などを導きだす，新たな方向を与えることが期待される．

また，RGBカラー画像の次の有色画像として画素ごとにスペクトル分布強度を持つスペクトル画像を提案する．RGBカラー画像よりさらに細かな解析を与えることにより，人間の感覚計測や工業応用など今後様々な分野への応用が可能であると思われる．

本論文は７章からなり，主題は第２章から第６章に記す．

第２章では，有色画像に物理モデルを導入するために，物体表面で生じている光の反射特性について述べる．これまで様々な人が考えたビジョン向け反射モデルの整理を行なう．

第３章では，金属，非金属物体表面での反射モデルを用いて相互反射のモデル化を行なう．シーン中に複数の物体が存在する場合，物体間で相互反射が生じ，物体表面の色や，強度が変化する．逆に，物体表面の色や強度を分析することで，画像処理により相互反射が抽出できる．そこで，金属・非金属表面での相互反射現象のモデルを提案する．そして，この相互反射モデルをRGB色空間に適用し，実際に観測されるRGB分布と比較し検証する．

第４章では，相互反射から三次元情報を推定する．陰影から三次元形状を求める場合など，照明の位置などが分かっている必要がある．ところが，物体が複数存在するシーンや中が凹んでいるものを計測しようとすると物体間や面間で相互反射が生じ正しく計測できない問題点がある．物体表面がざらついていて光沢が現われないようなものについての相互反射はいくつかモデルが提案されているが，プラスティックのようなものでの相互反射はまだ解析が試みられていない．そこで光沢をもつ物体での相互反射を解析するために，モデルを構築し，それを利用して三次元情報の推定を試みる．

第５章では，光源を移動させることで物体表面間の相互反射を検出する方法を提案する．相互反射は複数の物体表面の反射の組み合わせで生じるが，物体の色や模様が既知でないかぎり，静的な状態では物体色と相互反射とを区別することは困難である．相互反射の特徴に，その生起や発生箇所が光源－物体－カメラの位置関係に大きく依存することがある．そこで，光源を動的に移動させることで，相互反射の状態を変化させ，そのときに生じる色変化を基に検出を行なう．カメラを固定し光源を左右に移動させつつ画像を取り込み，画素毎の変化をRGB色空間内で調べる．色変化の要因としては，相互反射，

表面反射，物体の影が考えられ，それぞれに色の変化および明るさの変化の差違を用いて判別する．そして，この方法を金属・非金属の混在する実シーンに適用し，その有効性を確認する．

第6章では，スペクトル画像の認識について述べる．現在のカラー画像入力は，RGBカメラでの計測が主流である．人間の視覚が，どのような色でも三つの原刺激の加法混色で再現できるためである．しかし，実際のシーンはスペクトル分布を持つ物理光学現象であり，RGBの三色で解析するには限界がある場合がある．例えば，相互反射のように色が微妙に変化する現象の場合，RGB画像では忠実に表現できない．また，カラー画像の処理方法を考えてみても，今日まで行なわれてきている二値画像，濃淡画像の処理方法が基礎となっているものが多く，カラー画像の特徴である“色”があまり重要視されていない．そのため，色に関する処理を考えた場合，その処理の正当性を検証する方法が必要となる．そこで，スペクトルデータを用いて，従来行なわれてきたカラー画像処理の検証を行なうことを考える．

最後に，第7章では結論として，物理モデルに基づいた有色画像認識に関する本研究の成果を総括する．

第２章　有色画像認識のための光の反射モデル

シーン中の物体表面の明るさ・色の変化に物理モデルを導入するには，まず実際に物体表面で入射してきた光がどのように振る舞っているのかを知る必要がある．本研究では，有色不透明物体を対象とするため，主にその物体表面で生じている反射に着目する．この章では，有色不透明物体を金属物体，非金属物体の二つに分類し，その表面で生じる反射を考察する．また，その反射光の色に関しても考察を行なう．

2.1. 光の反射特性

光が物体表面に当たったとき，光の波長や入射角，物体の材質によって，複雑に反射・吸収・屈折・透過などの現象が生じる．一般に，入射光は反射光と屈折光の二つに分かれる．反射光は入射光が進んできた媒質に戻っていく光であり，屈折光は他の媒質の中へ進んでいく光である．このそれぞれの振る舞いの中で反射に着目すると，反射は鏡面反射と拡散反射の二つに大別できる[Shikisai].

2.1.1. 鏡面反射

平滑な物体表面で生じる，正反射の法則に従う反射のことである．反射光強度は面の光学的な定数と入射角とで決定することができる．ここで，光学定数としては，透明体であれば屈折率，金属体であればその他に吸収率などがあげられる．

(1)透明体

特別な結晶を除いて屈折率は約1.5～1.6ぐらいであり，鏡面反射の特徴としては入射角が0～60°付近までは反射率が５％位なのに対して，入射角が70°を越すと急激に反射率が高くなる．

(2)金属物体

金属は光を強く吸収し，ほとんど透過させない．このような物質での鏡面反射は主に吸収率で決まる．吸収率が大きくなると反射率も大きくなる．また，入射角による依存性は少ない．

(3)着色した透明体

黒ガラスや色ガラスなどの反射率は反射，透過以外に吸収も生じるのでその影響を考える必要があるが，実際にはその影響はごく小さく無視することができ，透明体の場合と性質的にはほとんど同じである．また，反射光が加色されないこと，反射光強度の角度依存性が大きいことなどから反射特性が無色の透明体と同じであることが分かる．

2.1.2. 拡散反射

磨かれた金属・ガラス以外の一般の物体は，平行光線が入射すると反射光は正反射方向にだけではなく四方に散らばってしまう．これを拡散反射という．この場合，各方向へ拡散する全ての反射光束を加え合わせたものと，入射光束との比を全反射率という．一定の大きさの表面からでる部分反射光束が，反射光の方向に関係なく入射光束の方向，すなわち入射角の余弦に比例するような面を完全拡散反射面（Lambertian反射面）という．この完全拡散反射面に近い物体として酸化マグネシウムや硫酸バリウムなどがあげられ，全反射率は約97％である．

拡散反射の機構を図2-1に示す．表層を構成している小さな粒は屈折率の等しい部分であり，形は不定で境界面を通して他の粒と接している．物体表面に入射し表層部に入った光は，小さな粒の境界で反射，屈折し，別の粒を通り，繰り返し方向を変えているうちに表面から出ていく．多数回の屈折を繰り返すことで表面から出ていく方向が全く乱雑になり，どの方向にも同じ完全拡散になる．一般にはこれに比較的滑らかな表面での反射が加わるので，正反射方向に比較的強い光束が出る．また，表層が有色でありある波長分布の光を吸収すると，出る光は吸収された光の補色となる．

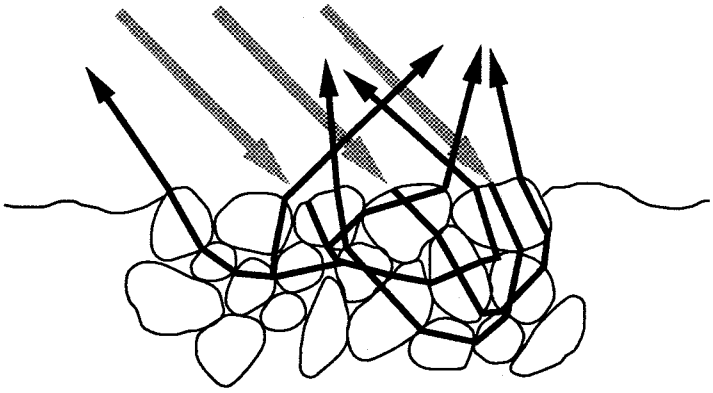
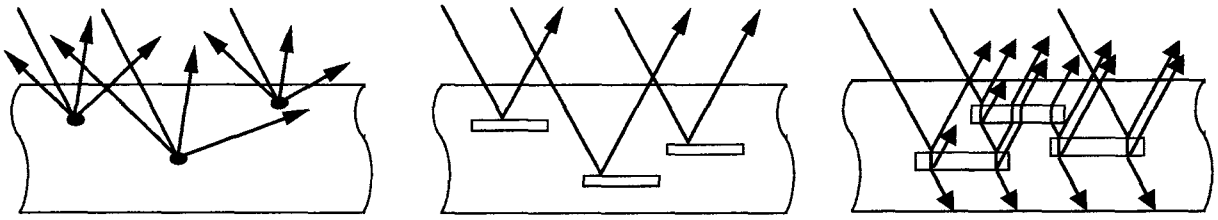


図2-1　拡散反射機構

2.1.3. 異方性反射

ここまでは，物体表面での反射は鏡面反射と拡散反射の二種類の反射だけを考えたが，最近，塗装の分野においてより複雑な反射機構を持たせることにより，反射光の色に高級感や深み感を与える塗料の開発が行なわれている．これまで，物体からの反射光が鏡面反射光を除いて拡散反射光の分布が，均等拡散に近く，かつどの方向に対しても同じ分光分布を持つことを予想していた．しかし，実際の物体には，反射光の空間分布が鏡面反射方向以外でも均等ではなかったり，照明・観測方向によって分光分布も大きく変化するものも多い．このような反射を異方性反射という．この反射特性を持つ塗料が，近年，自動車の塗装として脚光を浴びている[Matsui 94][Yamada 94].

塗装の分野において，素地を隠蔽し肉眼では全く一様な色に見える有色の塗料の色をソリッドカラーという[Yoshida 92]．このソリッドカラーは顔料面から生じる拡散反射光によって発色する（図2-2



(a) 着色顔料　　(b) アルミニウム顔料　　(c) マイカ顔料

図２-２　光学的に見た顔料の形態

(a)）．メタリックカラーとパールカラーではソリッドカラーと同様の発色メカニズムに加えて，それぞれ特異な特性によりソリッドカラーでは表現できなかった深み感や透明感のある色を作り出せる．

メタリックカラー

比較的透明な着色樹脂中にアルミ細片を分散させたもので，塗膜平均面に平行に配向する（図２-２(b)）．受光角が拡散方向から鏡面反射方向に近づくにつれて，反射率係数は急激に増加する．

パールカラー

多層構造を持つマイカ顔料からの正反射光の干渉による真珠光沢を与える（図２-２(c)）．

マイカ顔料とは雲母箔のまわりに微粒子の二酸化チタンや透明性の高い着色顔料をコーティングした素材で，そのコーティング膜厚の違いで種々の干渉色を発する光輝材である（図２-３）．マイカ顔料の他にも，人工黒鉛を顔料としマイルドな渋い輝きを出すグラファイトや，合成酸化鉄を酸化チタンでコーティングし深みのある色調が表現できるＭＩＯなどが現在開発され使用されている．

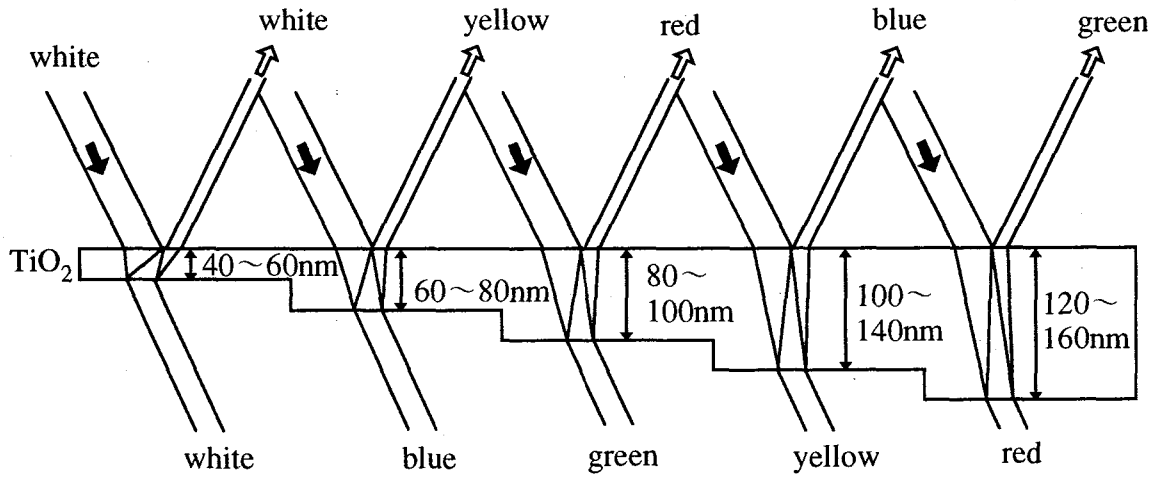


図２-３　酸化チタンの厚みと干渉色

2.2. 反射率関数[Nayar 90]

一般に，物体表面の反射特性を決定するものとして反射率関数を定義する．光源から入射し，観測者に向かって反射する光は，反射面の材質・微細構造に依存し，これらは通常，光の波長λと図2-4に示される三つのベクトルとの関数として表される．光源と表面の法線ベクトルがなす入射角ｉ，観測者に向かう視線と法線ベクトルがなす反射角ｅ，入射角と反射角がなす位相角ｇである．反射率関数 は反射面の単位面積当たり，観測者方向の単位立体角当たりに反射する反射光の入射光に対する割合である．

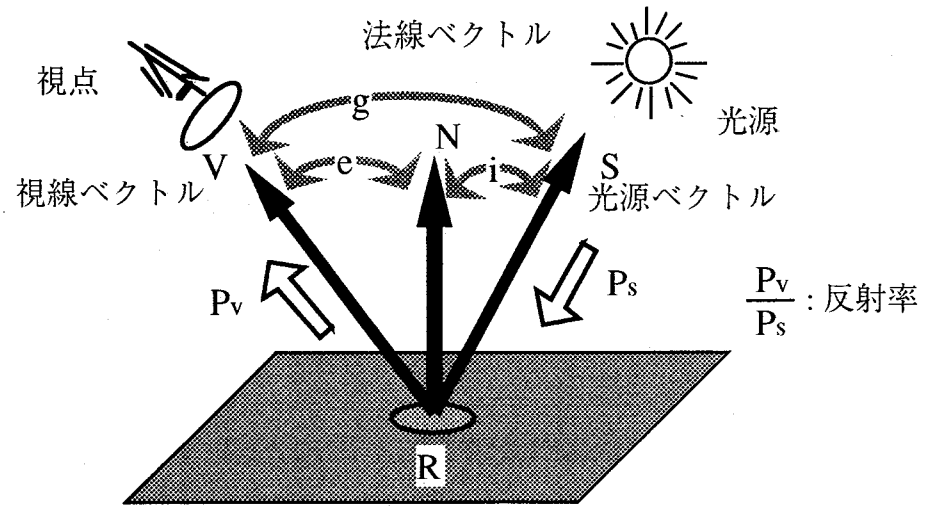


図2-4　入射角ｉ・反射角ｅ・位相角ｇの関係

2.2.1. 鏡面反射

鏡面反射の反射率関数R_iを考えてみる．

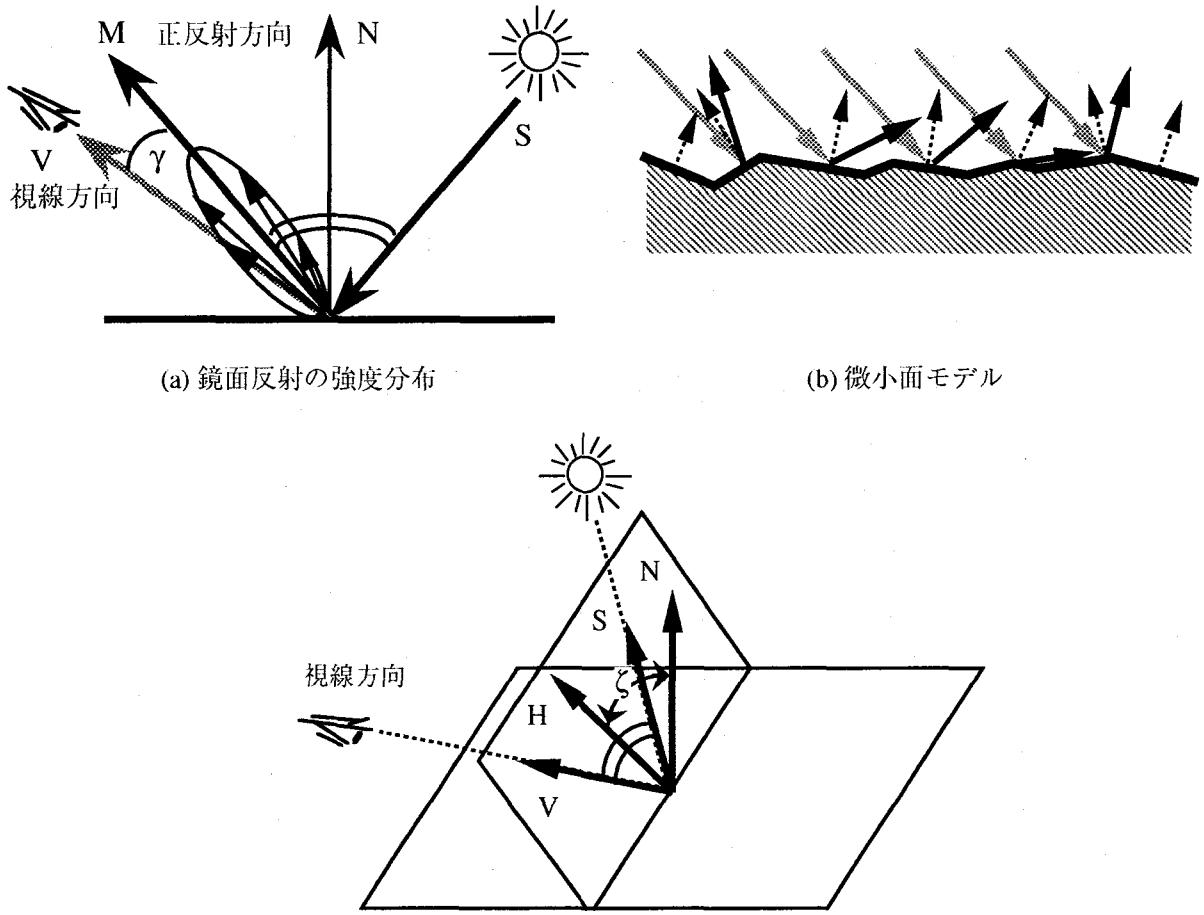
理想的な鏡面反射では，入射角と反射角が一致する方向でのみ観測されるはずである．このような理想的な物質が鏡である．しかし，実際には物体表面の微妙な凸凹などにより，入射角が一致する方向から少しずれても鏡面反射は観測される．このとき，視線方向Ｖの正反射方向Ｍからのずれ角γに従って，R_iは減少していく（図2-5 (a)）

2.2.1.1. Phong

Phongはこの現象を$(\cos\gamma)^n$で近似するモデルを提案した．このモデルでは鏡面反射の反射率関数R_iは次のように表される．

$$R_i = W(i)\,(V \cdot M)^n \tag{2.1}$$

ここで，ｉは入射角，W(ｉ)は正反射方向の反射率を示す．また，ｎは光沢強度の係数であり，ｎが大きくなるほどシャープな光沢を持つ．このモデルは現象面にのみ注目した実験モデルであった．ただ



(a) 鏡面反射の強度分布

(b) 微小面モデル

(c) 角ζの定義

図2-5　鏡面反射モデル

し，経験的事実に基づいたもので，必ずしも厳密な理論背景を持っておらず，金属感の表現など満足する効果が得られない．

2.2.1.2. Blinn (Torrance-Sparrow)

Torrance，Sparrowらは物体表面をミクロにみた，より精密なモデルを構築した[Torrance]．このモデルでは，物体表面は方向の異なる微小面からなり，それらの微小面は完全鏡面反射を行なうものとする（図2-5 (b)）．このとき，鏡面反射の反射率関数R_iは次のように表現される．

$$R_i = \frac{FDG}{(N \cdot V)} \tag{2.2}$$

ここで，Dは微小面の方向の分散を示す関数，Gは微小面による幾何学的減衰係数である．Fはフレネルの法則に基づく正反射率である．(2.2)式における$W(i)$がFに，$(V \cdot M)^n$がDに対応している．なお，DについてPhong モデルでは正反射方向からのずれ角g に関する関数を用いたが，Torrance - Spar-

row モデルでは，入反射ベクトルの２等分ベクトルＨと法線ベクトルＮのなす角 ζ を用いる（図２-５(c)）．微小面の分布関数として，次の正規分布関数を仮定している．

$$D(\zeta) = c_0 \exp\left(-(c_1 \cdot \zeta)^2\right) \tag{2.3}$$

但し，c_0，c_1 は定数である．また，面を微小面の集合として考えているので，反射光は様々な方向を向いている．このうち，観測者の方向に向かう光の一部は面の凹凸により遮断される．これを表現するために，次の幾何学的減衰係数Ｇが用いられる．

$$G = \min\left\{1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{(V \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot S)}{(V \cdot H)}\right\} \tag{2.4}$$

また，正反射率Ｆは通常定数とみなすことができるので，鏡面反射の反射率関数R_i は次のようになる．

$$R_i = \frac{c_i \cdot G \cdot \exp\left(-(c_1 \cdot \zeta)^2\right)}{(N \cdot V)} \tag{2.5}$$

ここで，c_1 が物体表面凸凹のざらつきを表す係数で，c_1 が大きいほど滑らかでハイライトはシャープになる．

2.2.1.3. Cook-Torrance

Cook-Torrance モデルはBlinnモデルを改良したもので，微小面の方向の分散を示す関数Ｄに正規分布ではなく，Beckmann関数（(2.6)式）を導入したものである．

$$D = \frac{\exp\left(-(\tan\delta / m)^2\right)}{m^2 \cos^4 \delta} \tag{2.6}$$

この式が有効に働くのは，反射分布が広がった状態を示すmの値が大きくなったときで，mの値が小さいときはBlinnの正規分布のモデルとそれほど差はない．

また，Blinnのモデルでは定数とみなしたフレネルの法則に基づく正反射率Ｆに，フレネルの方程式を導入し，光の入射角に依存して変化するような改良を行っている．フレネルの式は以下のように表される．

$$F = \frac{1}{2} \times \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2}\left[1 + \left(\frac{c(g+c)-1}{c(g-c)+1}\right)^2\right] \tag{2.7}$$

ここで，$c = S \cdot H$，$g^2 = n^2 + c^2 - 1$，nは屈折率である．

2.2.2. 拡散反射

拡散反射は物体内部に光が侵入し，外部に再び出るまでに減衰する割合が光の波長によって異なるために，光源色とは異なった色となる．この吸収率のスペクトル分布がその物体固有の色を決定する．また，完全拡散反射を仮定すると，その反射強度は照明距離と入射角によって決まり，反射角には依存しない．

以降，拡散反射と言う場合は完全拡散反射を意味するものとし，その反射率関数R_bは次のように表現できる．

$$R_b = C(\lambda)\, R_d \cos(i) \tag{2.8}$$

但し，$C(\lambda)$は波長に関する反射率の変化を示す関数，R_dは完全拡散反射係数である．この式は，図2-6に示すように，幾何学的には入射角 i だけによって決まり，観測者の視線方向が変化しても一定であることを示している．

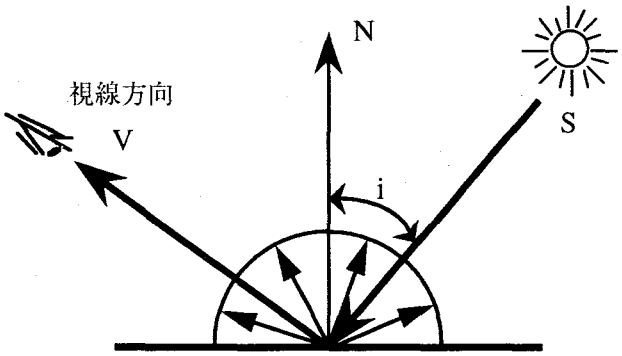


図2-6　拡散反射の強度分布

2.3. 不透明非金属物体の反射モデル（Dichromatic Reflection Model）

プラスチックやペンキのような非金属物体の表面近くの層は図2-7に示したような不均質な構造で近似できると考えられている．これは，媒質とその中に埋め込まれている色素粒子の二つの構成要素からなる．

ここで，Shafer は物体の反射光は二つの物理的に異なった経路で反射するとモデル化した[Shafer 88,90][Tominaga 92]．すなわち，入射光の一部は物体表面と空気層の境界面でただちに反射し，残りの入射光が物体内部に浸透し，外部に出るまでに媒質・色素粒子による散乱・吸収が行なわれると考えた．Shaferは前者の反射を表面反射 (Surface Reflec-tion)，後者の反射を内部反射 (Body Reflection) と呼んでいる．

そこで，二色性反射モデルに従えば非金属物体の反射率関数$R(\lambda, i, e, g)$は，次のように表面反射の反射率関数R_iと内部反射の反射率関数R_bの和として表せる．

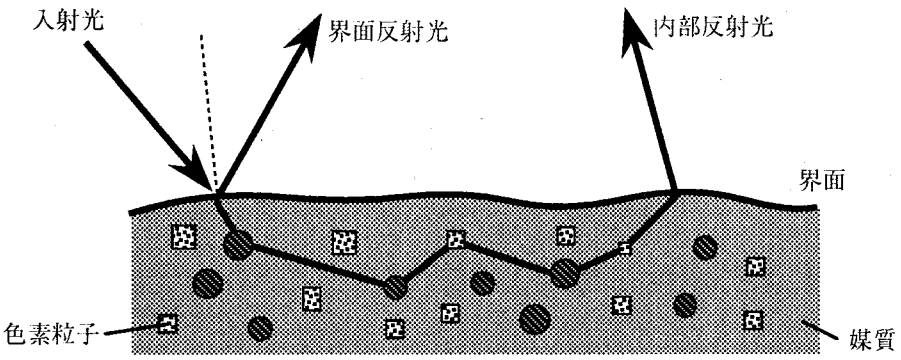


図2-7　不均質物体における光の反射過程

$$R(\lambda, i, e, g) = R_i(\lambda, i, e, g) + R_b(\lambda, i, e, g) \tag{2.9}$$

2.3.1. 表面反射

表面反射は鏡面反射の法則（フレネルの法則）に従い，入射角と反射角が一致する視角の狭い範囲でのみ観測される．また，内部で色素粒子を通した吸収・反射が生じる前に反射されるため，反射光のスペクトル分布は光源のスペクトル分布と同一であるとみなせる．すなわち，表面反射の色は光源の色と同じである．また，本論文では反射率関数としては，Blinnのモデル(2.5)式を用いることにする．

2.3.2. 内部反射

内部反射は光が外部に再び出るまでに吸収される割合が光の波長によって異なるため，光源の色とは異なった色を持つ．この吸収率のスペクトル分布がその物体固有の色を決定する．厳密には，この吸収率分布は入射角，反射角，位相角に依存するが，二色性反射モデルでは常に一定であると仮定する．また，内部反射は完全拡散反射とみなせるので，その強さは照明距離と入射角ｉによって決まり，反射角ｅに依存しない．

2.4. 金属物体での反射

プラスチックなどの不透明非金属物体が非均質な構造で近似できるのに対して，金属やガラスといった物質は均質な構造で近似できる．こうした均質物体は，内部散乱せずに，フレネル，スネルの法則に従って，反射・屈折・吸収を行なう．ここで，対象を金属物体だけに限ると，その反射特性は物体表面での反射，吸収だけを考えればよい．

光が金属物体の表面に当たったとき，表面反射だけを生じ，反射光は物質特有の色を示す．これは，非金属物体で生じる表面反射と違い，金属物体における表面反射では光の波長によって反射率が変化するからである．そこで，非金属の表面反射率関数(2.5)式に対して，金属物体の表面反射率関数R_iは光の波長に関する項$C(\lambda)$が加わり次のようになる．

$$R_i = \frac{C(\lambda)\, c_2 \cdot G \cdot \exp\left(-(c_1 \cdot \zeta)^2\right)}{(N \cdot V)} \tag{2.10}$$

以後，(2.10)式を金属物体の表面反射率関数として用いることにする．また，この反射を非金属物体の表面反射と区別するため，金属反射と呼ぶことにする．

2.5. ＲＧＢ色空間における分布の様子

ある特定の色の光源$I_0(\lambda)$が不透明な単一色物体を照らしている状態で，物体表面の反射モデルを考える．但し，他の照明や物体間の相互反射などはないものとする．観測者から見える物体上のある点の色強度Lは，表面反射成分L_iと内部反射成分L_bの和であり，光源－物体－観測者の幾何学的要素，及び，光源－物体の光の分光特性によって決まる．

$$\begin{aligned} L(\lambda, i, e, g) &= L_i(\lambda, i, e, g) + L_b(\lambda, i, e, g) \\ L(\lambda, i, e, g) &= R(\lambda, i, e, g)\, I(\lambda) \\ L_i(\lambda, i, e, g) &= R_i(\lambda, i, e, g)\, I(\lambda) \\ L_b(\lambda, i, e, g) &= R_b(\lambda, i, e, g)\, I(\lambda) \end{aligned} \tag{2.11}$$

但し，λは光の波長，ｉは光源と表面の法線ベクトルのなす入射角，ｅは観察者に向かう視線と放射ベクトルのなす反射角，ｇは入射角と反射角のなす位相角である（図２-４）．また，$I(\lambda)$は入射光の波長強度分布である．

さらに，各反射成分において強さｍと色Ｃが互いに独立だと考えると色強度Ｌは，

$$L(\lambda, i, e, g) = m_i(i, e, g)\, C_i(\lambda) + m_b(i, e, g)\, C_b(\lambda) \tag{2.12}$$

と表せる．このとき$C_i(\lambda)$は光源の色強度分布$I_0(\lambda)$に一致する．

ところで，RGBテレビカメラで画像を入力する場合，カメラが受けた光はRGBの三つの色強度に変換される．この変換は光学フィルタ及び受光素子の分光感度特性による波長に関する重み付け積分での線形変換であり，画像上での位置(x, y)が決まれば，ｉ，ｅ，ｇも決まるので，色強度ベクトル$C(x, y) = [R, G, B]$は次のようなベクトルの線形結合で表現できる．

$$\begin{aligned} C(x, y) &= m_i(x, y)\, C_i + m_b(x, y)\, C_b \\ C_i &= [R_i, G_i, B_i], \quad C_b = [R_b, G_b, B_b] \end{aligned} \tag{2.13}$$

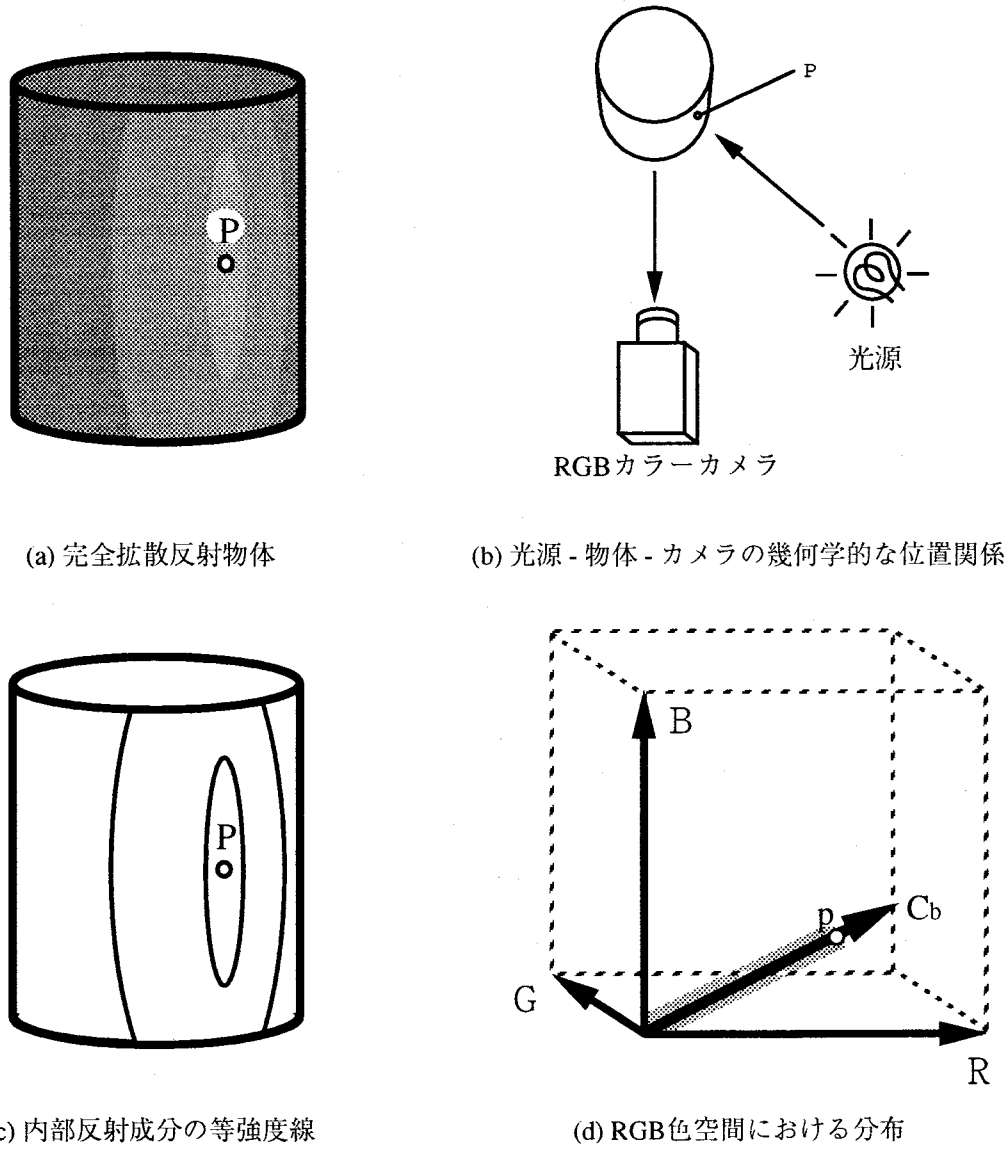
このとき，C_i は光源色に対応している．

2.5.1. 内部反射

内部反射成分による，RGB色空間における分布を考える．

内部反射のみが生じる物体，すなわち完全拡散反射物体は表面が素焼の陶器のようにざらついた質感で光沢のないものである．その観測色強度Ｌは内部反射成分L_bだけからなる．これは(2.13)式において，表面反射の重みm_iが零であることを示している．

完全拡散反射物体から構成された円筒を考える（図２-８）．(2.8)式に示したように，画像内では入射角ｉが最小になる点Ｐにおいて最も明るくなり，点Ｐから離れるにしたがって暗くなる．このとき，RGBカラーカメラでこのシーンを撮り込むと，(2.13)式より



(a) 完全拡散反射物体

(b) 光源 - 物体 - カメラの幾何学的な位置関係

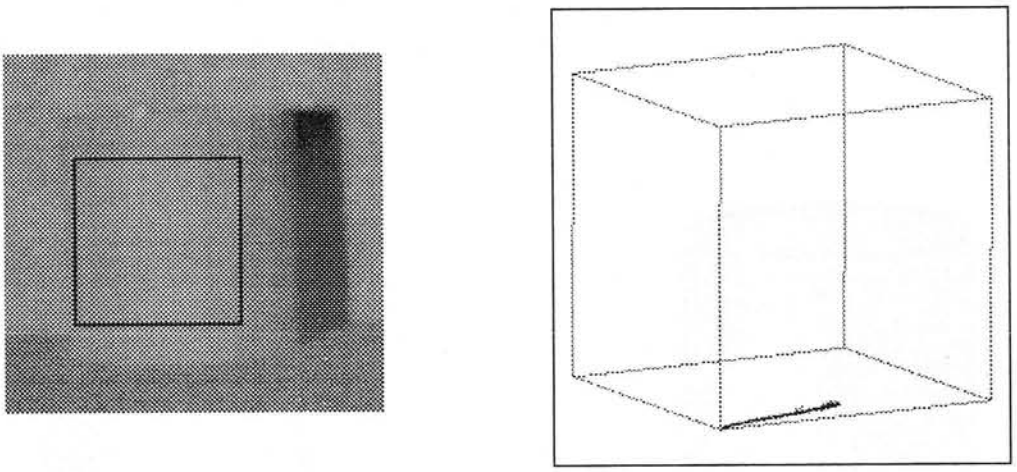
(c) 内部反射成分の等強度線

(d) RGB色空間における分布

図２-８　完全拡散反射物体の反射モデル

$$C(x, y) = m_b(x, y)\, C_b$$
$$C_b = [R_b, G_b, B_b] \tag{2.14}$$

と表現され，ある画像領域内のRGB画素値をRGB色空間内に展開すると，一本の線分上に分布することを表している（図２-８(d)）．画像中の点Ｐが色空間における点ｐに対応している．実際に計測画像と，その分布を図２-９に示す．



(a) 実シーン　　(b) RGB色空間における分布

図２-９　拡散反射物体の例

2.5.2. 表面反射

表面反射成分による，RGB色空間における分布を考える．

表面反射だけが物体表面で生じていると仮定すると，(2.13)式でm_bが零であることを示すことになる．

表面反射だけが生じる物体から構成された円筒を考える（図２-１０）．(2.5)式に示したように，入反射角が正反射関係をなす点Ｑで最も明るくなる．このとき，表面反射成分L_iは点Ｑの周辺のみで観測され，点Ｑから離れるに従って急激に減少し，視覚的にはハイライトあるいは光沢として知覚される．RGBカラーカメラでこのシーンを撮り込むと，(2.13)式より

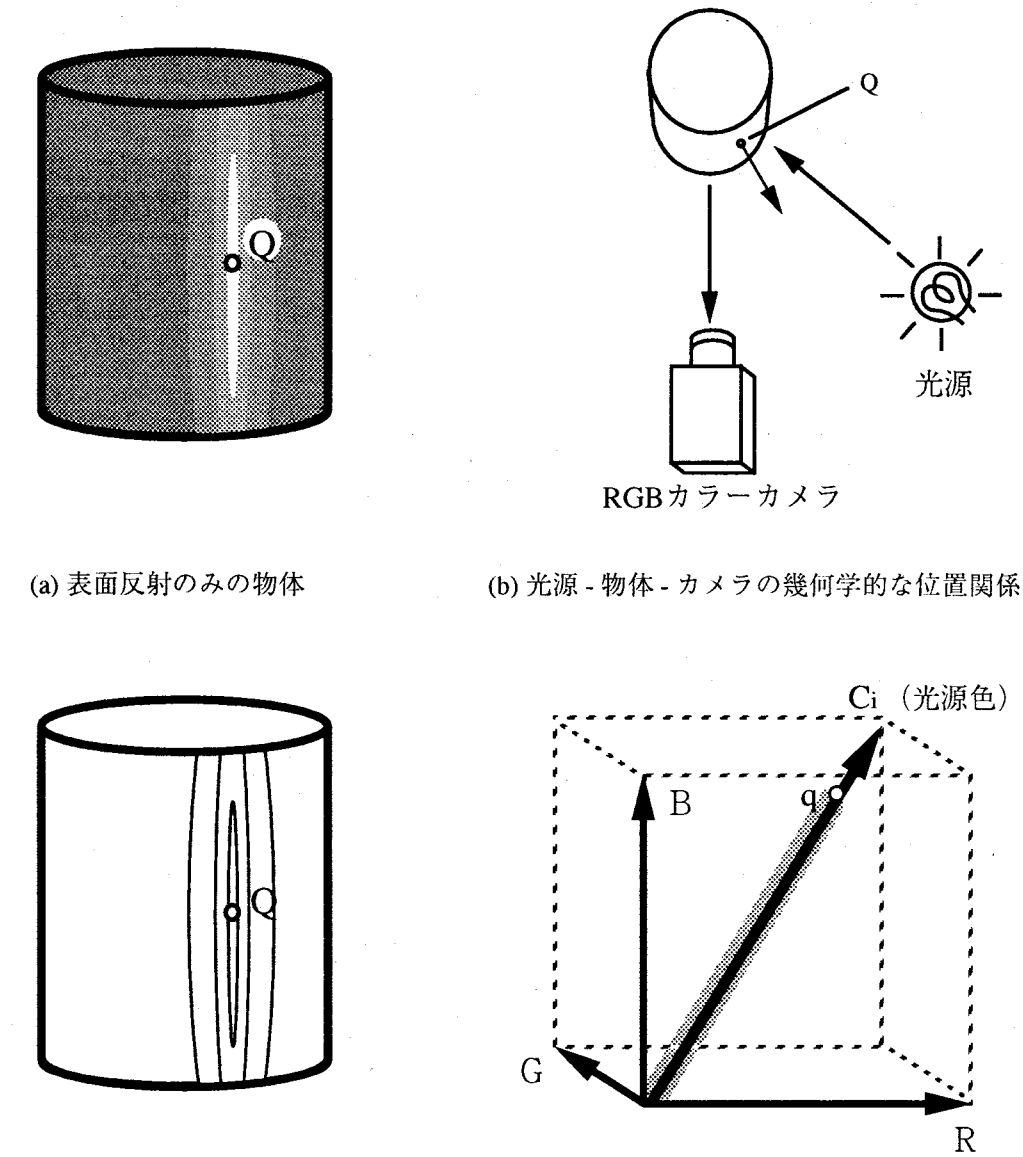
$$C(x, y) = m_i(x, y)\, C_i$$
$$C_i = [R_i, G_i, B_i] \tag{2.15}$$

と表現される．ただし，C_iは照明の色と一致している．これはある画像領域内のRGB画素値をRGB色

空間内に展開すると，一本の線分上に分布することを表している（図２-１０(d)）．画像中の点Ｑが色空間における点ｑに対応している．

ここまで，表面反射あるいは内部反射のみの物体を考えてきたが，一般的な非金属物体は表面反射と内部反射の両者が混合したものである．

一般的な光沢のある非金属物体で構成された円筒を考える（図２-１１）．内部反射成分Lbは入射角ｉが最小になる点Ｐで強度が最大に，表面反射成分L_iは入反射角が正反射関係をなす点Ｑで強度が最大になる．このとき，RGBカラーカメラでこのシーンを撮り込むと(2.13)式より



(a) 表面反射のみの物体

(b) 光源 - 物体 - カメラの幾何学的な位置関係

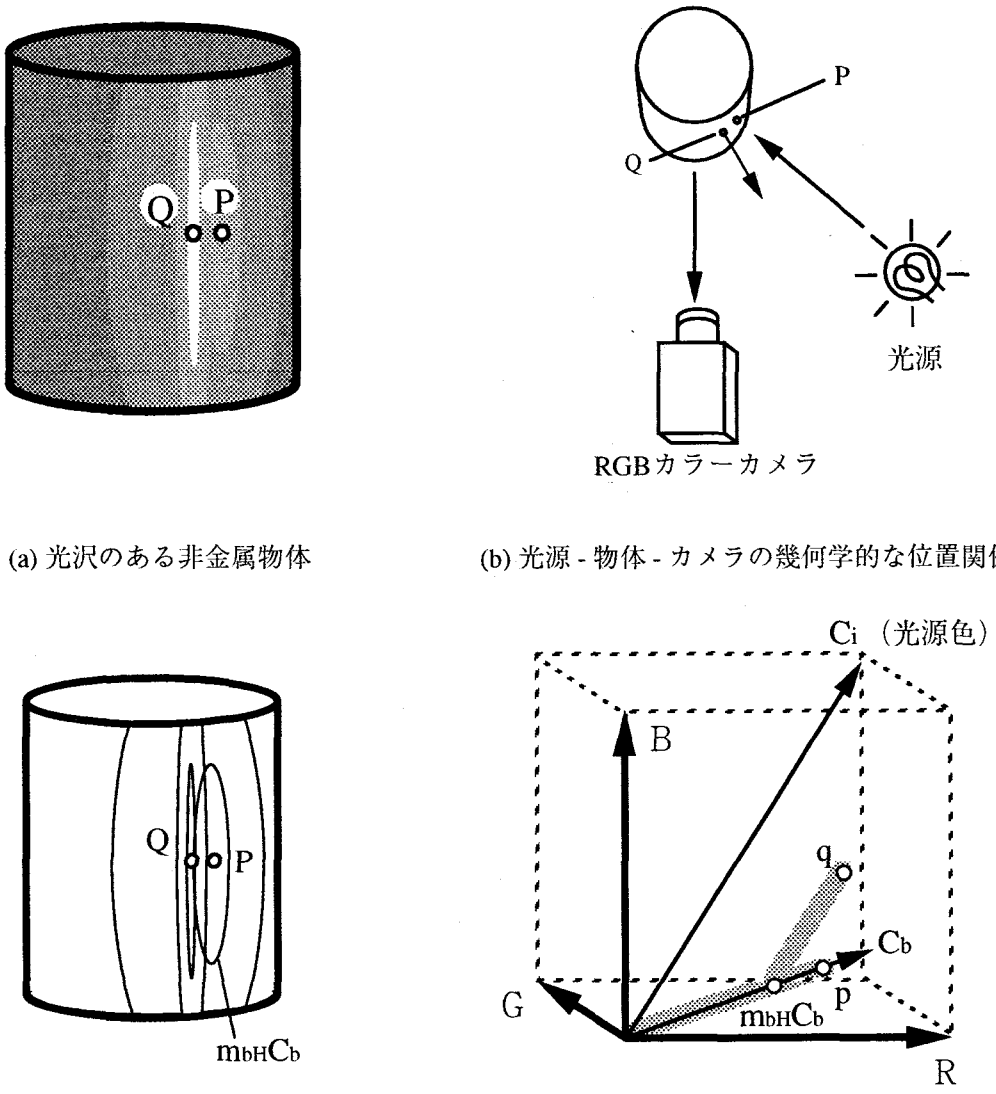
(c) 表面反射成分の等強度線

(d) RGB色空間における分布

図２-１０　表面反射物体の反射モデル

$$C(x, y) = m_i(x, y)\, C_i + m_b(x, y)\, C_b$$
$$C_i = [R_i, G_i, B_i]$$
$$C_b = [R_b, G_b, B_b] \qquad (2.16)$$

となる．但し，C_iは照明の色に一致している．(2.16)式は，色空間で二つのベクトルC_i，C_bにはさまれた平面上に分布することを示している．このときの画像領域と色空間の対応は次のようになる．画像中で，表面反射成分の影響を受けているのは点Qの周辺だけである．そのため，その他の部分の色空間での分布は完全拡散反射の物体と同じく，原点からC_bの方向に延びる線分上に分布する．そして，その線分の先端点pが画像中の点Pに対応する．一方，点Qの周辺部では，内部反射成分L_bはほとんど変化



(a) 光沢のある非金属物体

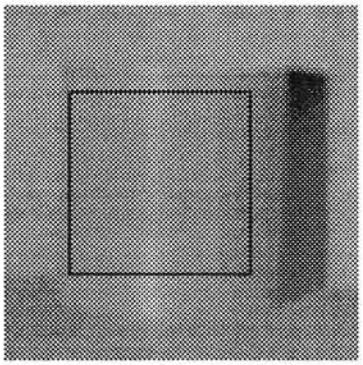
(b) 光源 - 物体 - カメラの幾何学的な位置関係

(c) 各成分の等強度線

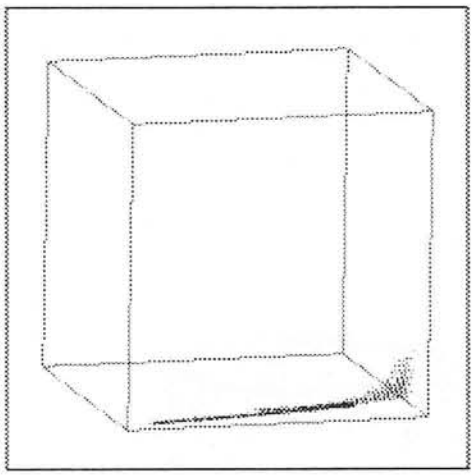
(d) RGB色空間における分布

図2-11　光沢のある非金属物体の反射モデル

せず，$m_{bH} \cdot C_b$の一定値をとる．このため，色空間内では$m_{bH} \cdot C_b$を通りC_iの方向に延びる線分上に分布する．このとき，その線分の先端点qが画像中の点Qに対応する．つまり，画像領域としては，図2-11(d)に示したようなL字形あるいはT字形の形状をした分布を持つ．実際に撮り込んだ画像と，その分布を図2-12に示す．



(a) 実シーン



(b) RGB色空間における分布

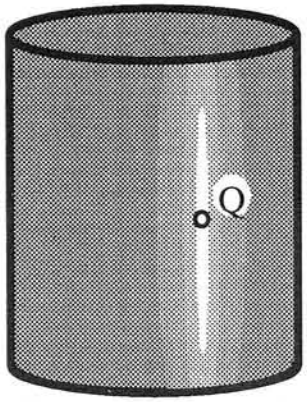
図2-12　光沢のある非金属物体の例

2.5.3. 金属反射

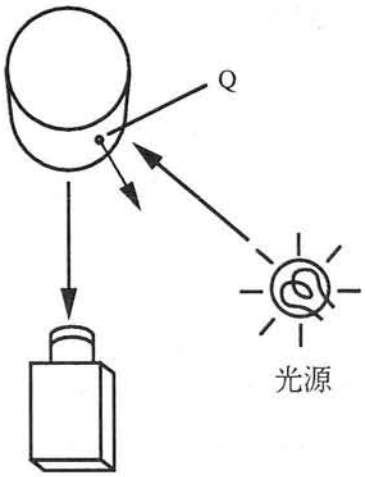
金，銅，真鍮といった有色の金属物体の観測色強度Lは表面反射成分L_iだけからなる．ここで，金属物体からなる円筒を考える（図2-13）．(2.10)式に示したように，入反射角が正反射関係をなす点Qで画像は最も明るくなる．このとき，表面反射成分L_iは点Qの周辺のみで観測され，点Qから離れるに従って急激に減少し，視覚的にはハイライトあるいは光沢として知覚される．ここで照明として白色光を用いた場合，光沢のある非金属物体上のハイライトと異なる点は，照明光の色に近いハイライト色ではなくその金属固有のハイライト色になることである．RGBカラーカメラでこのシーンを撮り込むと次のように表現される．

$$C(x, y) = m_i(x, y)\, C_i$$
$$C_i = [R_i, G_i, B_i] \qquad (2.17)$$

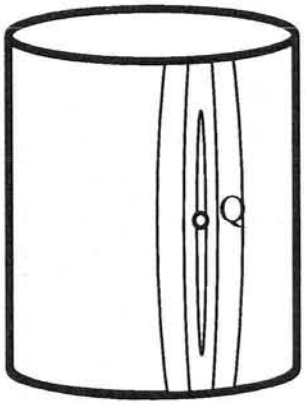
この式は，ある画像領域内のRGB画素値をRGB色空間内に展開すると，一本の線分上に分布することを表している（図2-13(d)）．図2-14に，実際に撮り込んだ画像とその分布を示す．



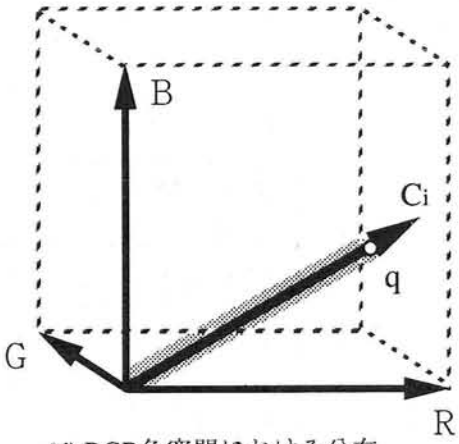
(a) 表面反射のみの物体



(b) 光源 - 物体 - カメラの幾何学的な位置関係

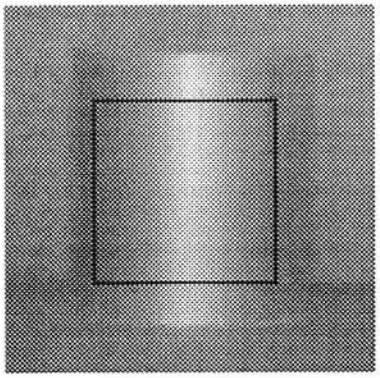


(c) 表面反射成分の等強度線

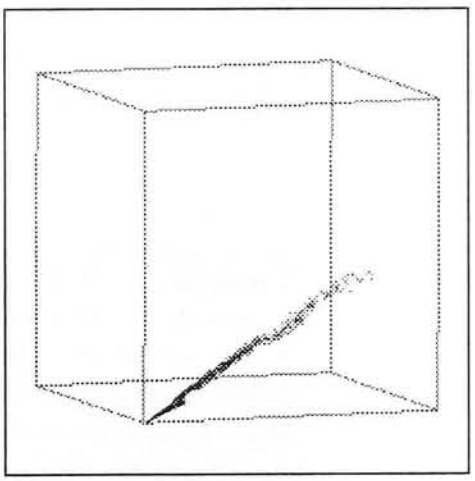


(d) RGB色空間における分布

図2-13　金属物体の反射モデル



(a) 実シーン



(b) RGB色空間における分布

図2-14　金属物体の例

2.6. 反射光の色について

私達の周りの物体にはそれぞれ固有の色があり，物体情報の１つとして私達は知覚している．しかし，物体からの反射光は，光源の色などにより様々な変化をする．ここでは色について考えてみる．

色の発生には，２つの過程が考えられる．１つは加法混色，もう１つは減法的な発生である[Zwimpfer]．これらにより，私達は様々な色を知覚している．

2.6.1. スペクトル分布

太陽光，および他のほとんどの光源の光は，種々の波長の光線で構成されており，波長別のエネルギーの量は多様である．エネルギー分布の異なる光線は目には異なる色に知覚される．図2-１５に色スペクトルを表2-1に波長と色名との関係を示す，一般に人間が感じることのできる光の波長は，400nmから700nmぐらいといわれている．このスペクトルを３等分し波長の短いほうから短波長域，中波長域，長波長域とし，その領域の光線を収束するとそれぞれ青，緑，赤の色覚を生じる．この三つの基本

表2-1　波長と色名の関係 [Shikisai]

波長範囲 (nm)	色名		記号
380~430	青みの紫	bluish Purple	bP
430~467	紫みの青	purplish Blue	pB
467~483	青	Blue	B
483~488	緑みの青	greenish Blue	gB
488~493	青緑	Blue Green	BG
493~498	青みの緑	bluish Green	bG
498~530	緑	Green	G
530~558	黄みの緑	yellowish Green	yG
558~569	黄緑	Yellow Green	YG
569~573	緑みの黄	greenish Yellow	gY
573~578	黄	Yellow	Y
578~586	黄みの橙	yellowish Orange	yO
586~597	橙	Orange	O
597~640	赤みの橙	reddish Orange	rO
640~780	赤	Red	R

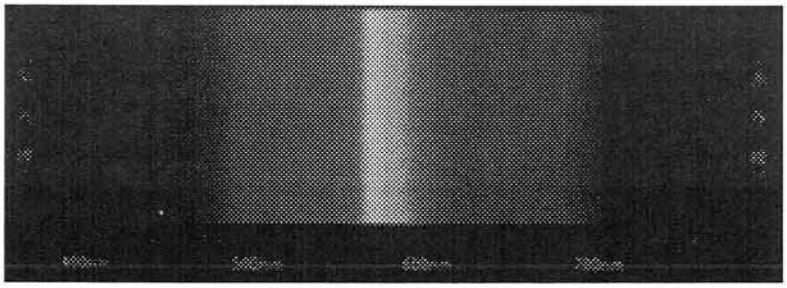


図2-１５　色スペクトル [Design]

的な色覚は加法原色と呼ばれる．

2.6.2. 加法混色

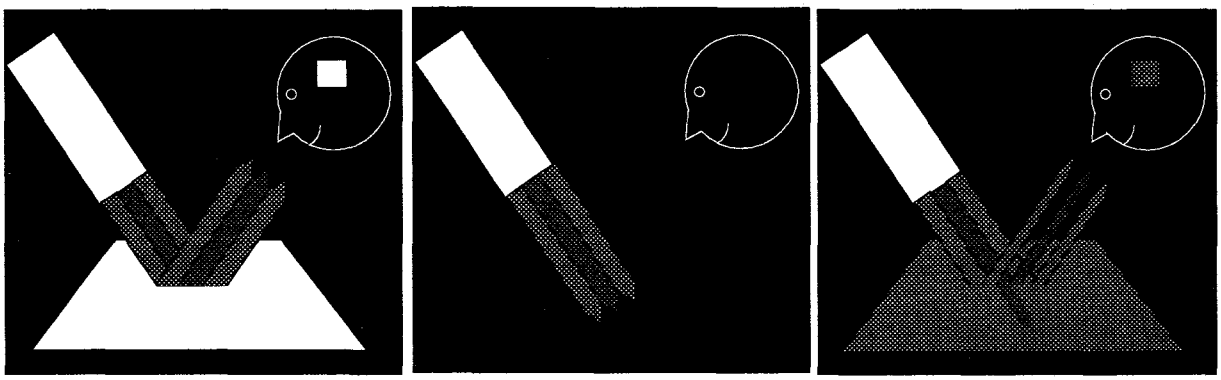
加法混色とは，スペクトル組成，すなわち色の異なる光線の合計によって新しい色を生じることを言う．代表的な方法としては，プロジェクタの光を色フィルタに通すことにより光に色を付け，違った色の光を重ねることにより新しい色を生じさせることがあげられる．

白色の光源（全波長域で光線量が一様な光源）から適当なフィルタを用いて，特定の波長域の光線を取り出すことができる．赤フィルタは長波長光だけを，緑フィルタは中波長光だけを，青フィルタは短波長光だけを透過する．この三つの加法原色を白い面上で重なるようにすると，良く知られているように，これらの光の重なった部分には白い色が生じる．また，青色光（短波長光線）と緑色光（中波長光線）の加法混合はシアン青色を生じる．このように，違う波長域の光線を重ねることにより，新しい色が生じる．また，加法混色において，白，すなわち完全なスペクトルに戻るような二色を補色と呼ぶ．例えば，青と黄が補色になる．

2.6.3. 減法的な色の発生

減法的な色の発生とは，特定のスペクトル組成をもつ光線から，ある光線部分を取り除く事である．残った光線は，別の色覚を生じる．2.6.2.で述べた，フィルタを通すという過程は減法的な色の発生（減法混色）になる．また，光を通さない物質（不透明物体）の表面の反射光の色は，物体内部での特定波長の吸収によるもので，減法混色の一種といってよい．

図2-17に無彩色（白，灰，黒）の面での白色光（全波長域でエネルギー量が一様な光）の反射の様子を示す．白では全光線を一様に反射するので，白の色覚が生じる．逆に黒では，全波長域で光線を吸収するために何も反射されず，黒にみえる．また，全波長域の光線の各部分を等量反射，等量吸収するとき灰色にみえる．このとき反射が吸収より強いならば明るい灰色に，吸収が反射より強いならば暗い灰色にみえる．



(a) 白色面での反射　　(b) 黒色面での反射　　(c) 灰色面での反射

図2-17　無彩色面での反射

次に原色（青，緑，赤）の面での反射をみる（図2-１８）．赤の面では短波長，中波長を吸収するため，長波長光線だけが反射し赤くみえる．同じように，青では短波長光線，緑では中波長光線だけを反射しそれぞれの色にみえる．また，吸収されている光線の部分が反射している光線の補色となる．例えば，赤が補色のシアン青を吸収する．

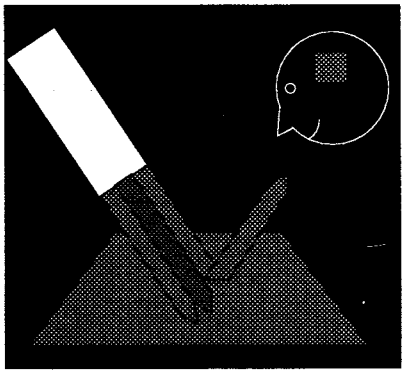


図2-１８　赤色面での反射

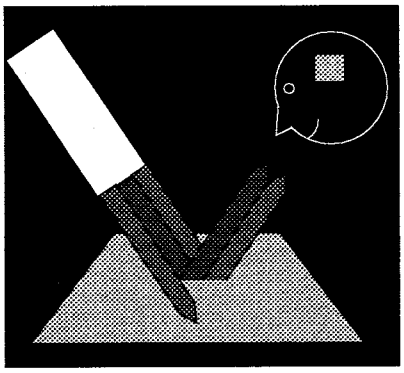


図2-１９　黄色面での反射

中性光から短波長だけを吸収し，中波長，長波長を反射する面は，黄色にみえる（図2-１９）．また，赤い面に赤い光が入射すると，この面は赤くみえる（図2-２０）．光は長波長のみを含んでいて，面は長波長光線のみを反射するので，入ってきた全ての光が面から反射されるからである．面がシアン青であれば，シアン青が反射しうる短波長，中波長を含んでいないので，面からは何の光も反射されず，黒と知覚される（図2-２１）．

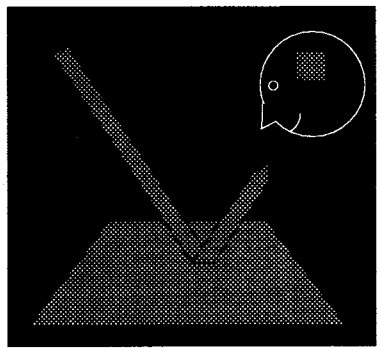


図2-２０　赤色面での赤色光の反射

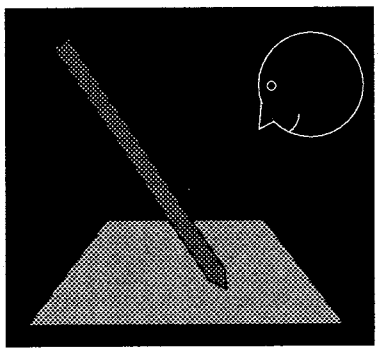


図2-２１　シアン色面での赤色光の反射

2.7. まとめ

有色画像に物理モデルを導入するために物体表面で生じている光の反射現象の考察を行なった．有色不透明物体を金属・非金属の二つに大別し，それぞれの表面で生じている反射を調べた．その結果を表2-2にまとめる．これ以外にも，拡散反射と他の反射特性を組み合わせることにより，新しい反射特性

をもつ素材が開発されている．

また，非金属物体表面で生じている鏡面反射と拡散反射をまとめたものが二色性反射モデルであり，それぞれを表面反射，内部反射として定義している．この二色性反射モデルを基に，有色画像の認識を行なう．

表2-2　反射の分類

反射光の指向性 ＼ 光の吸収	無	有
無		鏡面反射
有	拡散反射	金属反射

異方性反射

第３章　相互反射現象

コンピュータビジョンにおいて，物体の陰影を基に形状を復元するような問題の場合，物体の凹部や複数の物体が多数同時に存在するところで，近接した面の形状が正しく求まらないことが多い．これは，それぞれの物体表面で一度反射した光が，他の面を照らすことにより，陰影を変化させるためである．このような，物体表面で反射した光が再び物体に照射する現象を相互反射（interreflection）という．この相互反射は通常の反射と比較して，その生起・強弱が面の幾何学的構造や光源，観測点の配置関係に大きく影響を受ける特徴がある．このことは，相互反射が物体の三次元情報を含んでいる証拠と考えられるが，従来のコンピュータビジョンの解析では無視されることが多かった．

そこで，本論文では二つの表面間で生じている相互反射を，RGB色空間において解析し，モデル化することを目的とする．そのために，物体の材質を三つに分類し，それぞれの材質間で生じる相互反射をモデル化し，実際に生じているRGB色空間での相互反射の色の分布と比較する．

3.1. 反射モデル

２章で示したように，一般にプラスチックのような不均質物体の表面は，光沢（ハイライト）を示す表面反射(surface reflection)と，物体固有の色を示す内部反射(body reflection)の二つの異なる性質を表す反射の和でモデル化できる二色性反射モデルで表すことができる．

一方，不均質物体の反射に対して金属物体での反射は，均質な構造で近似でき，不均質物体の表面反射のように正反射方向付近に指向性を持って反射する．しかし不均質物体のハイライトとは異なり，光の波長により反射率が異なるため反射光の色は光源色ではなく金属固有の色を示す．正確には，この分光反射率分布は入反射角に依存するが，本論文では一定なものと仮定する．

本論文では，不均質物体での二色性反射モデルを基にし，金属物体を含む有色不透明物体にも対応する，有色表面反射を持つ拡張された二色性反射モデルを用いることにする．

3.2. 相互反射モデル

前章では，照明条件として暗室下で一つの照明光源のみを考え，その直接光による照明効果だけをモデル化した．しかし実際には，物体に照射された光が反射して，他の物体あるいは同じ物体の別の部分に再び照射することがある．このような現象が生じている箇所では，明度が高くなったり，色が変化して観測されたりする．この現象を相互反射という．この相互反射現象は，本来の光源とは別に，対象としている面の近傍に面光源あるいは点光源が出現し，余分に照らしているものとして説明できる．

今，光源の分光分布が波長λに関して一定となる白色光源を仮定し，その下に不透明物体A，Bが存

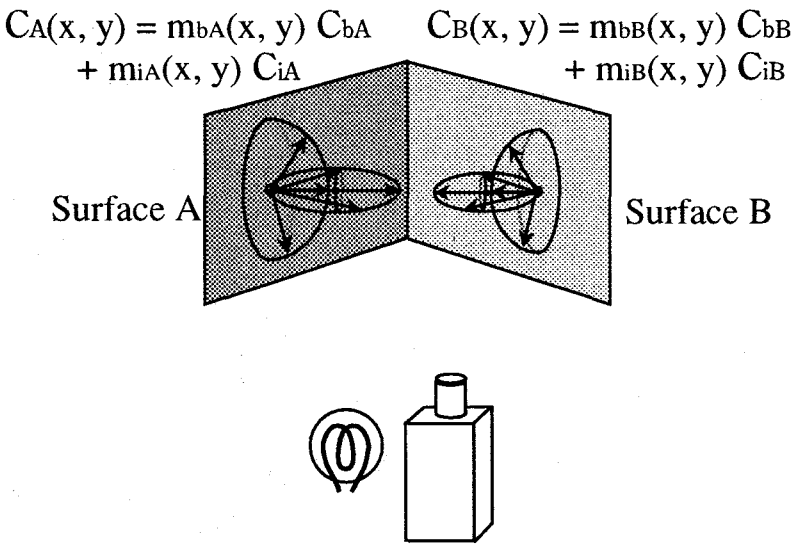


図3-1　対象シーン

在し，物体A上の領域Cに物体Bの反射光が照射されているとする（図3-1）．光源の色をC_sとし，本来の照明に対する物体A，Bの反射光の観測色強度ベクトルを

$$C_A(x,y)=m_i(x,y)\,C_{iA}(\lambda)+m_b(x,y)\,C_A(\lambda)$$
$$C_B(x,y)=m_i(x,y)\,C_{iB}(\lambda)+m_b(x,y)\,C_{bB}(\lambda) \tag{3.1}$$

とすると，領域Cでは物体Bからの反射光を受けるため，物体Aの本来の照明に対する反射光C_Aの他に，物体Bを二次光源と考えた新たな反射光C_{inter}が加わる．ただし，m_iとm_bは画素(x, y)における物体表面の表面反射成分，内部反射成分の重みを表す．このC_{inter}は面Aの色ベクトルと面Bの色ベクトルとのRGB要素毎の積となる．従って相互反射C_{inter}は

$$C_{inter}(x,y)=m_{ii}(x,y)\cdot C_{ii}+m_{ib}(x,y)\cdot C_{ib}+m_{bi}(x,y)\cdot C_{bi}+m_{bb}(x,y)\cdot C_{bb} \tag{3.2}$$

と四つの項で一般的には表すことができる．以下の節ではそれぞれの項について解析を行なう8).

3.2.1　相互反射

第一項：両面の表面反射同士による相互反射

表面反射の場合，反射光は正反射方向付近に強く反射する性質があるため，相互反射はそれぞれの面を一度ずつ反射すれば外部へと発散する．そこでこの一回の相互反射のみを考えればよい（図3-2）．

$$m_{ii}(x,y)\,C_{ii}=m(x,y)\,C_{iA}\cdot C_{iB} \tag{3.3}$$

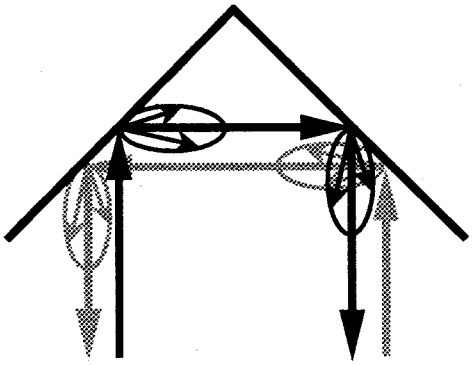


図３-２　表面反射同士の相互反射

この相互反射は両面が表面反射をもつときだけ，つまり光沢のある非金属物体同士，金属物体同士または光沢のある非金属物体と金属物体間で生じる相互反射である．

第二項：相手面で表面反射した光が観測面で内部反射する相互反射（図３-３）

この相互反射では，相手面から入射する光が観測面での反射によって相互反射となるが，観測面での反射が拡散反射のため，その一部が再び相手面に向かう．しかし，この反射光は相手面で表面反射するため再度観測面に戻ってくることはなく，表面反射－内部反射の一回の相互反射のみを考えればよい．

$$m_{ib}(x,y)\, C_{ib} = m(x,y)\, C_{iB} \cdot C_{bA} \tag{3.4}$$

第三項：相手面で内部反射した光が観測面で表面反射する相互反射（図３-４）

この項は二つの相互反射が考えられる．まず，相手面の内部反射で反射した光が観測面の表面反射で

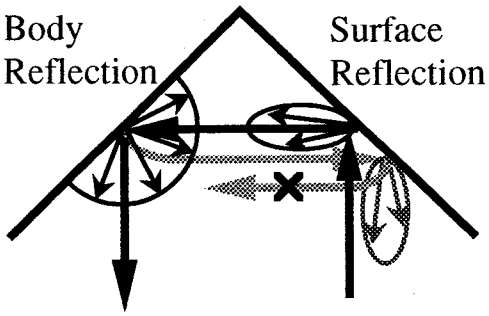
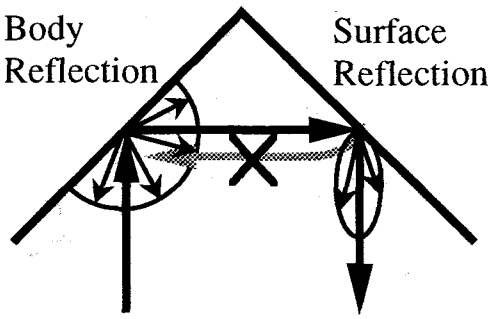
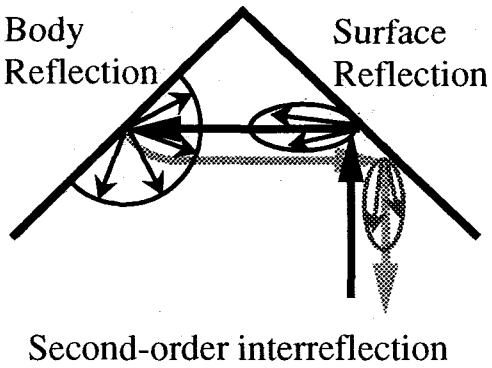


図３-３　表面反射→内部反射の相互反射



(a) 一回相互反射



(a) 二回相互反射

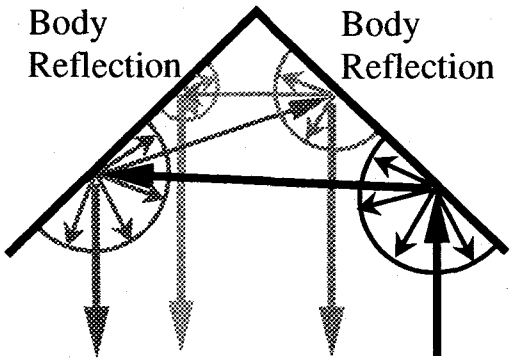
図3-4　内部反射→表面反射の相互反射

相互反射となる場合である．この場合，観測面の表面反射で相互反射を生じた光は表面反射の指向性により相手面に戻ることはない（図3-4(a)）．もう一つは，最初に観測面の表面反射で反射した光が相手面の内部反射で反射し，再度観測面の表面反射で相互反射を生じる二回の相互反射である（図3-4(b)）．

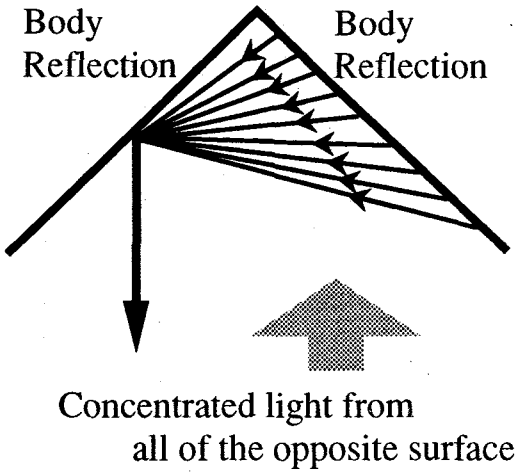
$$m_{bi}(x,y)\,C_{bi} = m_1(x,y)\,C_{bB}\cdot C_{iA} + m_2(x,y)\,C_{iA}\cdot C_{bB}\cdot C_{iA} \tag{3.5}$$

第四項：両面の内部反射同士による相互反射[Nayar, Drew]（図3-5）

内部反射の場合，反射光は視線方向によらず一定な強度で一様に反射する．そのため，内部反射同士の相互反射では，物体間で相互反射が無限に繰り返される多重反射となる（図3-5(a)）．また，相手面から観測点に入射してくる反射光は相手面全体からとなり，面積分が必要となる（図3-5(b)）．このため，相互反射色は以下のように表現される．



(a) 多重反射



(b) 面積分

図3-5　内部反射同士の相互反射

$$m_{bb}(x, y)\, C_{bb} = \sum_{n=1}^{\infty} \{ K_{1n}(x, y)\, (C_{bB}\, C_{bA})^n + K_{2n}(x, y)\, C_{bA} (C_{bB}\, C_{bA})^n \} \tag{3.6}$$

ただし，nは反射の回数，K_{1n}とK_{2n}は面積分の結果としての重みである．この相互反射は両面に内部反射を含む物体のときに生じる．また，この解析をコンピュータ・グラフィックスの分野で取り扱っているのが，Radiosity法と呼ばれる方法である[Greenberg].

以上は，それぞれの面が表面反射または内部反射だけを持つものとしてモデル化を行なった．しかし，実際にはプラスチックのように，表面反射と内部反射の両方を持つ物体が多い．その場合，(3.2)式の四項以外に，表面反射した光が両面の内部反射で多重反射するものが考えられる．この時，観測される直前の反射が内部反射か表面反射かによって色が変化する．ただ，実際には光沢のある非金属物体の場合，表面反射は入射光の色を保持するため，第四項の内部反射同士の多重反射に吸収され，金属物体の場合，内部反射を持たないので上記の様な複雑な多重反射は生じない．

3.3. R G B色空間における分布 [Manabe 92]

ここまで，相互反射を分光分布を用いてモデル化を行なってきた．しかし，実際の入力系を考えると，分光分布ではなくRGB値でモデル化する必要がある．

2.5.で，内部反射，表面反射，金属反射それぞれのRGB色空間内での分布の形状特徴を述べた．相互反射はこれら三種類の反射の組み合わせで生じるものであるから，RGB色空間内で同様の分布が生じると思われる．そこで次に，相互反射成分のRGB色空間内での分布を調べる．そのために，3.2.で分光分布を用いてモデル化した相互反射をRGB値のモデルに直す必要がある．その場合，単純に分光分布モデルをRGBモデルに直すと，相互反射がRGB値同士の積となり誤差が生じる．そのため本論文では，光源色を波長λで一定な白色光源とし，RGBの値は各RGBフィルタの波長内での分光分布がフラットであると仮定する．これにより，粗い近似ではあるが相互反射をRGB値によりモデル化することができる．また，この近似により，(3.2)～(3.6)式の相互反射モデルの反射成分の積の部分はそれぞれRGB値毎の積として書き直すことができる．これを基に相互反射のRGB色空間内での分布を調べる．ここで，$C_A \cdot C_B$はそれぞれのRGB成分同士の積を示すものとする．

3.3.1 有色表面反射ー有色表面反射

相互反射の生じている領域の観測色は，面Aの本来の色と相互反射成分の和として表現できる．(3.3) 式より面Aで相互反射の生じている領域の観測色は

$$
\begin{aligned}
C_C(x, y) &= m_{iA}(x, y)\, C_{iA} + C_{inter}(x, y) \\
&= m_{iA}(x, y)\, C_{iA} + K(x, y)\, C_{iA} \cdot C_{iB}
\end{aligned}
\tag{3.9}
$$

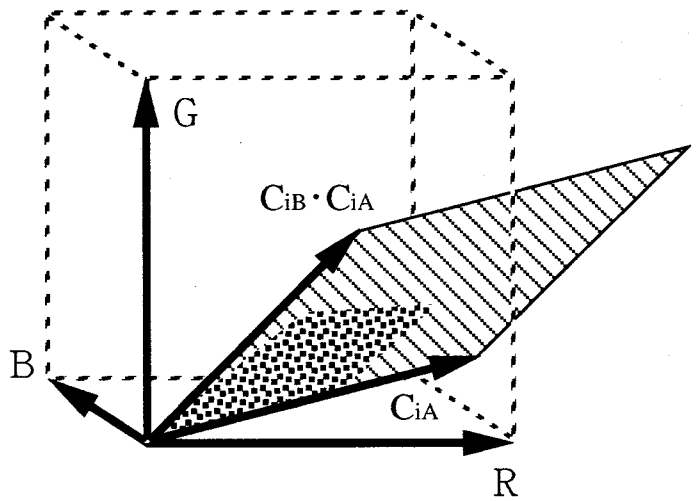
と書くことができる．これは，本来の物体色C_{iA}と相互反射色$C_{iA} \cdot C_{iB}$の２つのベクトルのなす平面上に存在することを示している（図３-６(a)）．実際に，画像中で相互反射の生じている領域のRGB画素値の分布を図３-６(b)に示す．材質は銅板と赤色の金属光沢をもつシートで，赤色金属面の観測値の分布である．

3.3.2 有色表面反射ー内部反射物体

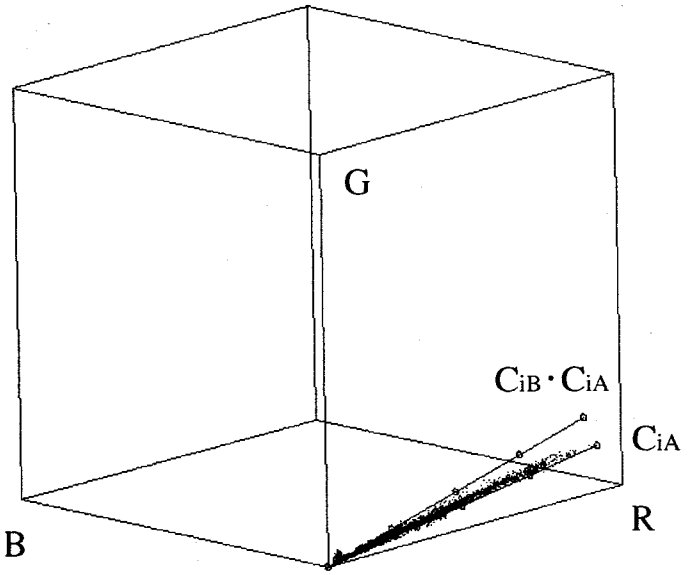
面Aを有色表面反射物体，面Bを内部反射物体とする．ここで，面Aは表面反射を仮定しているため，内部反射を含む項が，面Bは内部反射物体を仮定しているため，表面反射を含む項が存在しなくなる．

(1)有色表面反射物体

(3.5) 式より，相互反射は$C_{bB} \cdot C_{iA}$，$C_{iA} \cdot C_{bB} \cdot C_{iA}$の２つのベクトルで表現できる．このため，面Aで相互反射の生じている領域の色ベクトルは以下のようになる．



(a) 分布モデル

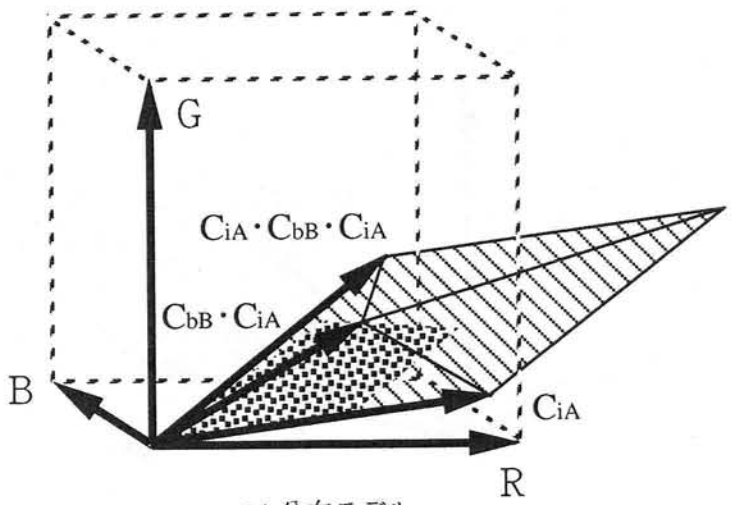


(b) 観測分布

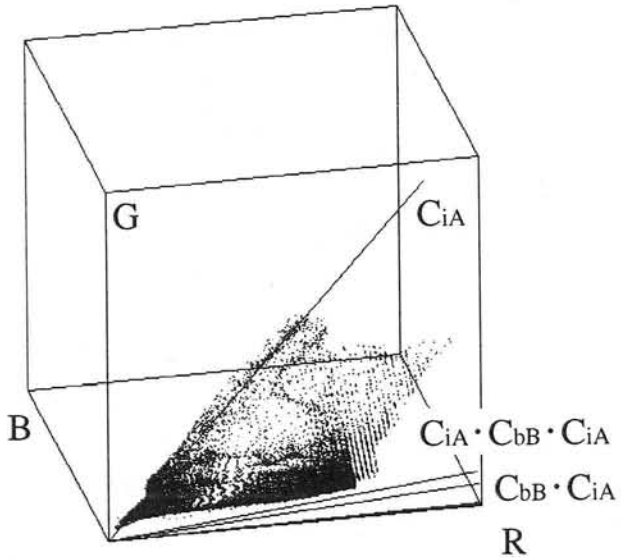
図3-6　表面反射同士の相互反射のRGB色空間分布モデル

$$
\begin{aligned}
C_C(x, y) &= m_{iA}(x, y)\, C_{iA} + C_{inter}(x, y) \\
&= m_{iA}(x, y)\, C_{iA} + K_1(x, y) C_{bB} \cdot C_{iA} + K_2(x, y) C_{iA} \cdot C_{bB} \cdot C_{iA}
\end{aligned}
\tag{3.10}
$$

これは，面A本来の色ベクトルC_{iA}と一回相互反射の色ベクトル$C_{bB} \cdot C_{iA}$そして，二回相互反射の色ベクトル$C_{iA} \cdot C_{bB} \cdot C_{iA}$の3つのベクトルによって相互反射の生じている領域の色が決まることを示しており，RGB色空間において，この三つのベクトルのなす三角錐の内部に存在すると考えられる（図3-7(a)）．実際に，画像中で相互反射の生じている領域のRGB画素値の分布を図3-7(b)に示す．実験には銅板と赤色のフェルトを使用した．



(a) 分布モデル



(b) 観測分布

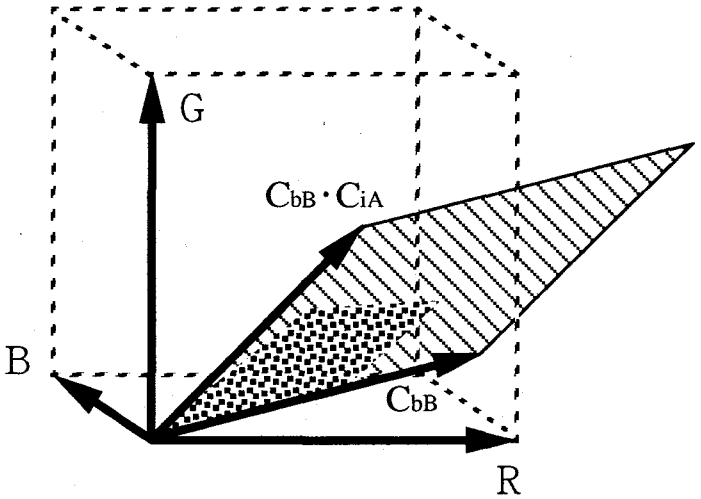
図3-7　表面反射→内部反射の相互反射のRGB色空間分布モデル

(2)内部反射面

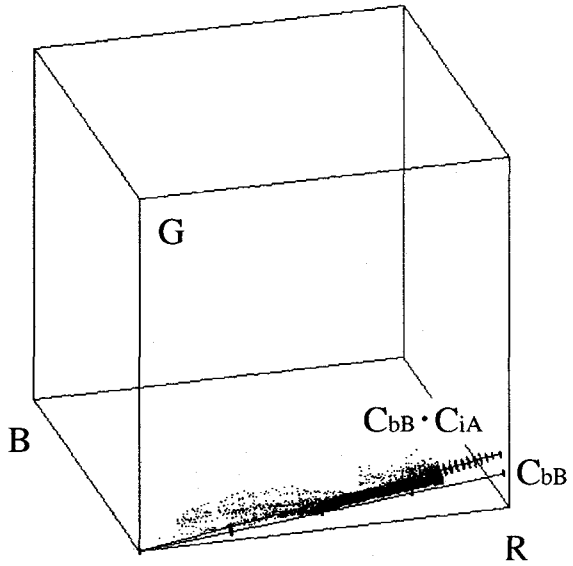
内部反射面での相互反射は，(4) 式より$C_{iA} \cdot C_{bB}$の色ベクトルにより表される．そのため，相互反射の生じている領域の色は

$$
\begin{aligned}
C_C(x, y) &= m_{bB}(x, y)\, C_{bB} + C_{inter}(x, y) \\
&= m_{bB}(x, y)\, C_{bB} + K(x, y) C_{iA} \cdot C_{bB}
\end{aligned}
\tag{3.11}
$$

となり，有色表面反射－有色表面反射での相互反射と同じように本来の色ベクトルC_{bB}と相互反射ベクトル$C_{iA} \cdot C_{bB}$の二つのベクトルのなす平面上に存在することを示している（図3-8 (a)）．実際に，画



(a) 分布モデル



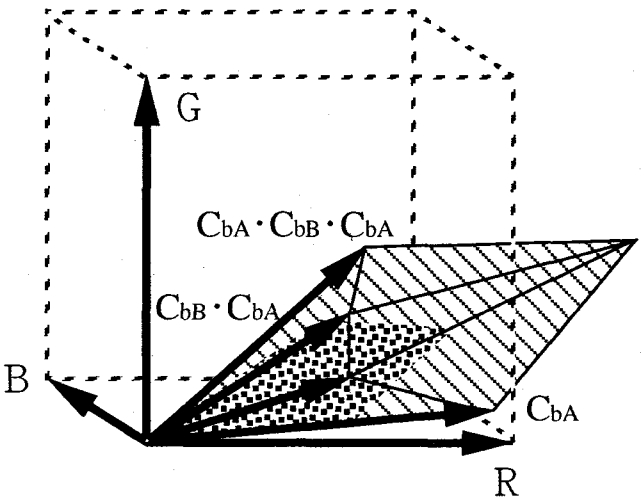
(b) 観測分布

図3-8　内部反射→表面反射の相互反射のRGB色空間分布モデル

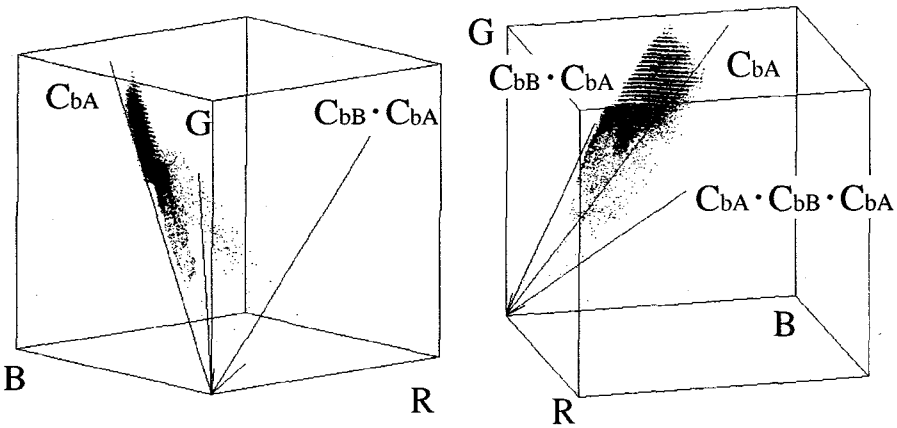
像中で相互反射の生じている領域のRGB画素値の分布を図3-8 (b)に示す.

3.3.3. 内部反射ー内部反射

両面が内部反射物体の場合の相互反射色は（3.6）式に示したように多重反射が生じ，面での反射率，面積分の結果の重みをかけた色ベクトルの和として表現される．実際には，反射率が1より小さいために有限個の和となる．このため，相互反射の色ベクトルは複数の三次元ベクトルの和で表現され（（3.12）式），内部反射同士で相互反射の生じている領域のRGB値によるRGB色空間内での分布は立体的になる（図3-9 (a)）．実際に，画像中で相互反射の生じている領域のRGB画素値の分布を図3-9 (b)に示す．この実験には赤色と青色のフェルトを使用した.



(a) 分布モデル



(b) 観測分布

図3-9　内部反射同士の相互反射のRGB色空間分布モデル

$$
\begin{aligned}
C_C(x, y) &= m_{bA}(x, y)\, C_{bA} + C_{inter}(x, y) \\
&= m_{bA}(x, y)\, C_{bA} + \sum_{n=1}^{\infty} \{ K_{1n}(x, y)\, (C_{bB}\, C_{bA})^n + K_{2n}(x, y)\, C_{bA} (C_{bB}\, C_{bA})^n \}
\end{aligned}
\tag{3.12}
$$

RGB色空間でのこの分布から何らかの特徴を見い出すことは，解析的には困難であることがわかる．

3.4. まとめ

本論文では，コンピュータビジョンの分野において，これまで無視されることの多かった相互反射のモデル化を行なった．

まず，物体表面で生じる光の反射を二色性反射モデルを用いることにより，物体色を示す内部反射と，光沢を示す表面反射の二つの反射で表した．このうち表面反射を有色に拡張することで金属反射も同一のモデルに含めることができた．この内部反射と，表面反射の反射特性を基に物体間で生じる相互

反射を材質別に分類し，モデル化を行なった．また，本モデルの妥当性を確認するために実際の材料のＲＧＢ色空間中での分布を調べ，モデル通りになっていることが確認した．

本論文で示した相互反射モデルは，特に複雑なシーンを対象とした画像認識や形状復元に有効であると思われる．また，相互反射の生起は材質に大きく依存するので，逆にその生起や分布を調べることによって，材質の推定などに応用することができる．

第４章　相互反射からの三次元情報の推定

第３章では，金属物体および非金属物体の物体間で起こる相互反射を簡単なモデルで示した．このモデルでは，物体間で生じる相互反射の主に色変化を扱った定性的なものであった．しかし，色変化のみでは相互反射が持っていると思われる三次元情報を得ることは難しい．そこで，色・強度共に現実の相互反射現象に近づけるために新たなモデルの構築が必要となってくる．本章では，対象物体を非金属物体に限定し，それらの表面で生じている相互反射を物体表面の反射率関数を用いることによりモデル化する．

4.1. 反射率関数を用いた相互反射モデル

(3.2)式をみると，相互反射成分は光の性質上，反射過程毎に反射光を求めその和をとればよいことが分かる．これは，一回反射の時のみではなく，無限に反射が繰り返されている場合でも成り立つ．そこで，各過程毎にモデルを構築していくことにする．その中で，両面が拡散反射の場合はNayar, Drewがモデルを構築しているので，そのモデルを紹介する．また，それ以外のモデルとして新たに構築したものを紹介する．面上の点で受ける光源の光を$m_s(x)C_s(\lambda)$とし，反射率関数は２章で述べた(2.5)，(2.6)式を使用する．

4.1.1. 拡散反射ー拡散反射

まず，両面の拡散反射による相互反射を考える．この問題については，Nayar，Drewがそれぞれの仮定のもとでモデルを構築している．

4.1.1.1.　Nayarモデル [Nayar 91]

Nayarは相互反射を生じている二面が同じ色であると仮定してモデルを構築している．この場合，それぞれの面での反射スペクトルが同じであるので吸収が起こらず，相互反射は無限に繰り返される．

図４-１に示すような凹表面X(u,v)を考える．この時，面上の点xでの反射光の輝度は

$$K(x,x')=\left[\frac{(n\cdot(-r))(n'\cdot r)\ View(x,x')}{(r\cdot r)^2}\right]$$

$$View(x,x')=\frac{(n\cdot(-r))+\left|(n\cdot(-r))\right|}{2\left|(n\cdot(-r))\right|}\cdot\frac{(n'\cdot r)+\left|(n'\cdot r)\right|}{2\left|(n'\cdot r)\right|}$$

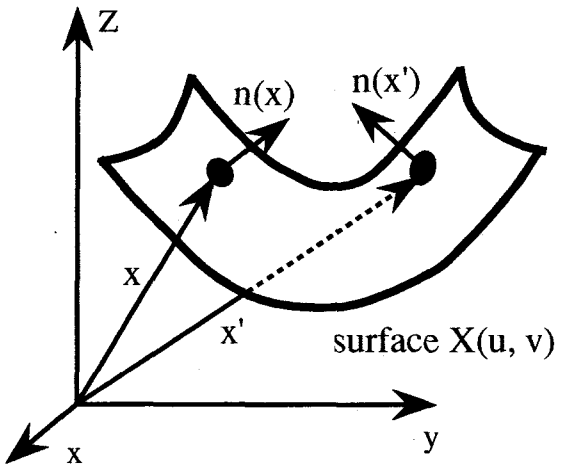


図4-1　Nayar モデルにおける三次元空間中の凹表面

$$L_s(x) = \frac{\rho(x)}{\pi} E_s(x) \tag{4.1}$$

となる．ここで，$L_s(x)$は光源からの入射光の反射輝度，r(x)は反射率関数，K(x,x')は点x，x'の構造的な要素部分である．また，n，n' は点 x，x'での面の法線ベクトル，r はx'からxへのベクトルである．

ところが，(4.1)式では点x での反射光は点x' からの 1 回相互反射のみしか計算していない．先に述べたように同色での相互反射は無限に繰り返される．これを表すために(4.1)式は(4.2)式のように級数に変形される．

$$L(x) = L_s(x) + \sum_{m=1}^{\infty} \rho^m \int K_m(x, x')L(x')dx'$$

$$K_m(x, x') = \int \frac{K(x, y)}{\pi} K_{m-1}(y, x')dy \quad (m \geq 2)$$

$$K_1(x, x') = \frac{K(x, x')}{\pi} \quad (m = 1) \tag{4.2}$$

この式で，反射率関数r(x)は定数rとみなされている．

Nayarは，面を小平面に区切ったものに離散化し，この式を用いることによって相互反射を解析し，正しい形状情報を得ることに成功している．

4.1.1.2.　Drewモデル [Drew 91]

Drewは面での反射スペクトルを加味した，一回反射の相互反射モデルを構築している．

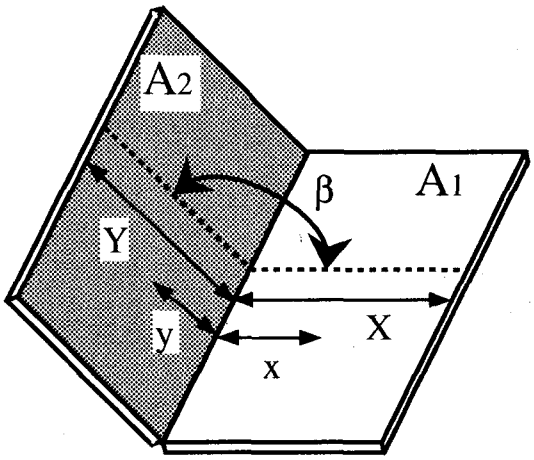


図4-2　Drew モデルにおける平面構成

図4-2に示すような二枚の平面を考える．光源のスペクトルパワー分布を$E(\lambda)$，それぞれの表面の反射関数を$S^{(1)}(\lambda)$，$S^{(2)}(\lambda)$，反射光を$I^{(1)}(\lambda)$，$I^{(2)}(\lambda)$とするとき，二枚の平面の接している近くの反射光$I_m^{(1)}(\lambda)$，$I_m^{(2)}(\lambda)$を求める．

平面のなしている角度をβとすると，微小面から他の面の微小面への位置的要素として

$$dF_{xy} = \frac{xy \sin^2 \beta}{2(x^2 + y^2 - 2xy \cos \beta)^{3/2}} dy \equiv \phi(x, y)\, dy$$

を使う．この時の$I_m^{(1)}(\lambda)$，$I_m^{(2)}(\lambda)$は，それぞれの面が微小面の集合として考えられ，積分の形で表すことができる．

$$I_m^{(1)}(x,\lambda) = S^{(1)}(\lambda)E(\lambda) + S^{(1)}(\lambda) \int_{y=0}^{Y} I_m^{(2)}(y,\lambda)\phi(x,y)\, dy \tag{4.3}$$

$$I_m^{(2)}(y,\lambda) = S^{(2)}(\lambda)E(\lambda) + S^{(2)}(\lambda) \int_{x=0}^{X} I_m^{(1)}(x,\lambda)\phi(y,x)\, dx \tag{4.4}$$

ここで，(4.3)式に(4.4)式を代入することにより次式のようになる．

$$I_m^{(1)}(x, \lambda) = S^{(1)}(\lambda)\, E(\lambda) + S^{(1)}(\lambda)\, S^{(2)}(\lambda)\, E(\lambda) \int_{y=0}^{Y} \phi(x, y)\, dy$$

$$+ S^{(1)}(\lambda)\, S^{(2)}(\lambda) \int_{y=0}^{Y} \int_{x'=0}^{X} I_m^{(1)}(x',\lambda)\, \phi(x',y)\, \phi(x, y)\, dx'\, dy \tag{4.5}$$

この式で，第一項は相互反射を含まない，光源からの光の反射光だけを示している．第二項は面間での一回反射を示している．第三項は面間での二回反射を示しているが，Drewは相互反射として明確に現われないとして，この項は無視している．そのため本来であれば無限に繰り返されるのだが，二項目以降は無視できるため，実際のモデルは(4.3)，(4.4)式としている．

4.1.2. 表面反射ー表面反射

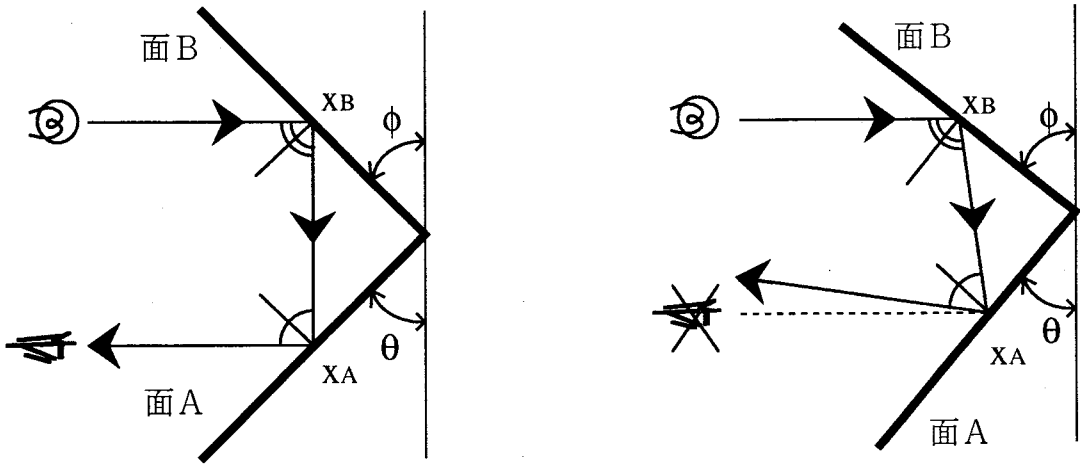
両面の表面反射における相互反射を考える．この場合，反射が反射方向に広がりを持つものと，持たないもので微妙に違ってくる．また，表面反射はその特徴上，二面間で相互反射を無限に繰り返すことがほとんどないと思われる．つまり，表面反射は二回目以降の反射は無視できるものと考えられる．

4.1.2.1. 広がりを持たない表面反射のモデル（滑らかな鏡面）

まず，分布を持たない表面反射の場合を考える．（図4-3）．

面Aで観測される反射光について考える．光源から出た光は面Aが光の向きに対して垂直な場合にしか観測されない．よって面Aで観測される反射光は光源の光が面Bで反射し，その光がさらに面Aで反射したもののみと考えられる．つまり，面Bの位置に光源があるものとし，面B－面A－カメラが正反射位置にある場合，面Aでの反射光が観測される．また，面Aで面Bの反射光が観測されるには，光源－面B－面Aが正反射位置になっている必要がある．この二つのことより，面Aで反射光が観測されるには，光源－面B－面A－カメラが正反射位置になる必要がある．

これより，面Bで反射された光の色強度L_Bを考えると，以下のようになる．



(a) $\theta+\phi=\pi/2$ の時　　(b) $\theta+\phi\neq\pi/2$ の時

図4-3　広がりを持たない表面反射

$$L_B(x_B) = R_{iB}\, m_{sB}(x_B)\, C_s(\lambda) \tag{4.6}$$

ここで，R_i は面Bでの反射率関数，m_{sB} は照明色成分の重み，C_s は照明光の波長分布を表す．面Bでの反射光は拡散しないので，距離によって減衰せず，そのまま面Aに入射する．よって面Aでの反射光は以下のようになる．

$$L_A(x_A) = R_{iA}\, R_{iB}\, m_{sB}(x_B)\, C_s(\lambda) \tag{4.7}$$

ここで，$R_{iA} = R_{iB} \cong 1$とすると上式は

$$L_A(x_A) = m_{sB}(x_B)\, C_s(\lambda) \tag{4.8}$$

と書け，光源－面B－面A－カメラが正反射位置になっていれば，光源の光がそのまま観測されることを示している．

4.1.2.2. 広がりを持つ表面反射のモデル

図4-4に示すように，面A，B上の点をx_A，x_Bとする．x_Bでの光源からの入射光に対する反射光は次のように書ける。

$$L_B(x_B) = R_{iB}\, m_{sB}(x_B)\, C_s(\lambda) \tag{4.9}$$

これにより、x_Bからの入射光に対するx_Aでの反射光は次のように書ける。

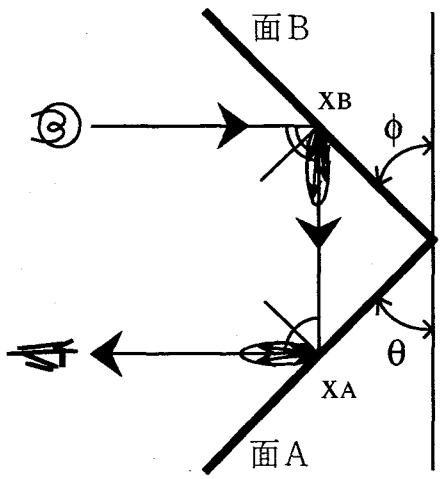


図4-4　広がり持つ表面反射での相互反射

$$dL_A(x_A) = R_{iA}\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}R_{iB}\cdot m_{sB}(x_B)\cdot C_s(\lambda)$$

$$= \frac{c_{iA}\cdot G_A\cdot \exp\left(-(c_{1A}\cdot\zeta_A)^2\right)}{(N_A\cdot V_A)}\cdot\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}$$

$$\cdot\frac{c_{iB}\cdot G_B\cdot \exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta_B)^2\right)}{(N_B\cdot V_{AB})}\cdot m_{sB}(x_B)\cdot C_s(\lambda) \tag{4.10}$$

ここで，反射率関数R_iは(2.6)式を用いている．よって、面Bからの入射光に対するx_Aでの反射光は、$m_{sB}(x_B)$は面Bで一様とすると、

$$L_A(x_A) = c_{iA}\cdot c_{iB}\cdot m_{sB}\cdot C_s(\lambda)\int G_A\cdot G_B\cdot\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}$$

$$\cdot\frac{\exp\left(-(c_{1A}\cdot\zeta_A)^2\right)}{\cos\varphi}\cdot\frac{\exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta_B)^2\right)}{\left(n_B\cdot\frac{r}{|r|}\right)}\,dx_B \tag{4.11}$$

となる。

4.1.3. 表面反射ー拡散反射

ここでは，それぞれの面の反射特性が異なる場合を考える．但し，表面反射は広がりを持つものだけを考える．これは，反射光が広がらない場合，4.1.2.1.で示したように，光の反射方向だけを考えればよく，式も簡単なものとなりモデルを構築するまでもないからである．

4.1.3.1 表面反射面でのモデル

図4-5に示すように，面A（表面反射面）上の点をx_A，面B（拡散反射面）上の点をx_Bとする．この時のx_Bでの光源からの入射光に対する反射光は次のように書ける。

$$L_B(x_B) = R_{bB}\, m_{sB}(x_B)\, C_s(\lambda)$$
$$= c_{bB}\cos\theta\, m_{sB}\, C_s(\lambda) \tag{4.12}$$

これにより、x_Bからの入射光に対するx_Aでの反射光は次のように書ける。

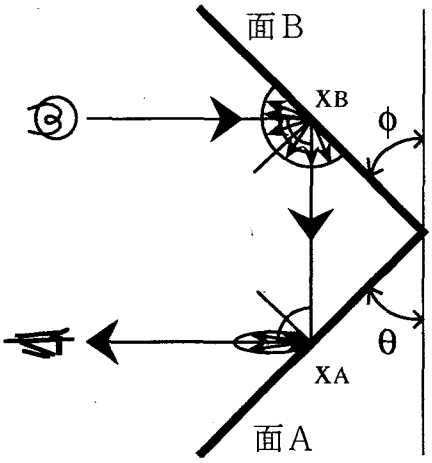


図4-5　表面反射面での相互反射

$$dL_A(x_A) = R_{iA}\cdot c_{bB}\cdot\cos\theta\cdot m_{sB}\cdot C_s(\lambda)\,\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}$$

$$= \frac{c_{iA}\cdot G_A\cdot\exp\left(-(c_{1A}\cdot\zeta_A)^2\right)}{(N_A\cdot V_A)}\cdot\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}\;c_{bB}\cos\theta\;m_{sB}(x_B)\,C_s(\lambda) \tag{4.13}$$

よって、面Bからの入射光に対するx_Aでの反射光は、$m_{sB}(x_B)$は面Bで一様とすると、

$$L_A(x_A) = \frac{c_{iA}\,c_{bB}\cdot\cos\theta\cdot m_{sB}\cdot C_s(\lambda)}{\cos\varphi}\int G_A\cdot\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}\exp\{-(c_{1A}\,\zeta_A)^2\}\,dx_B \tag{4.14}$$

となる。

4.1.3.2.　拡散反射面でのモデル

図4-6に示すように，面A（拡散反射面）上の点をx_A，面B（表面反射面）上の点をx_Bとする．この時のx_Bでの光源からの入射光に対する反射光は次のように書ける。

$$L_B(x_B) = R_{iB}\,m_{sB}(x_B)\,C_s(\lambda)$$

$$= c_{iB}\cdot G_B\,\frac{\exp(-(c_{1B}\cdot\zeta)^2)}{(n_B\cdot\frac{r}{|r|})}\,m_{sB}(x_B)\cdot C_s(\lambda) \tag{4.15}$$

これにより、x_Bからの入射光に対するx_Aでの反射光は次のように書ける。

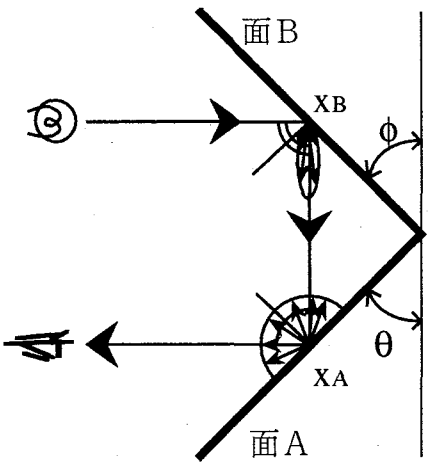


図4-6　拡散反射面での相互反射

$$dL_A(x_A) = R_{bA}\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}c_{iB}\cdot G_B\frac{\exp(-(c_{1B}\cdot\zeta)^2)}{(n_B\cdot\frac{r}{|r|})}m_{sB}(x_B)\cdot C_s(\lambda)$$

$$= c_{bA}\cdot\left(n_A\cdot\frac{(-r)}{|r|}\right)\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}c_{iB}\cdot G_B\frac{\exp(-(c_{1B}\cdot\zeta)^2)}{(n_B\cdot\frac{r}{|r|})}m_{sB}(x_B)\cdot C_s(\lambda) \tag{4.16}$$

よって、面Bからの入射光に対するx_Aでの反射光は、$m_{sB}(x_B)$は面Bで一様とすると、

$$L_A(x_A) = c_{bA}\cdot c_{iB}\cdot m_{sB}\cdot C_s(\lambda)\int G_B\frac{(n_A\cdot(-r))^2}{(r\cdot r)^2}\exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta)^2\right)dx_B \tag{4.17}$$

となる。

4.1.4. 多重反射

これまで，面間での一回反射による相互反射のモデルを構築した．しかし，先に述べたように相互反射は本質的に無限に繰り返されている部分が存在する．まず，この事について考察する．

4.1.4.1.　両面が表面反射面の場合

4.1.2.で述べたようにこの場合，二回目以降の反射の影響は考える必要がないと思われる．これは，図4-7に示すように表面反射面での光の反射方向は，ほとんど正反射方向と考えることができる．そのた

め，反射方向に広がりがあったとしても，二回目の反射光は直前に反射した面に戻っていく事はほとんどなく，これを無視しても影響はないと考えられる．

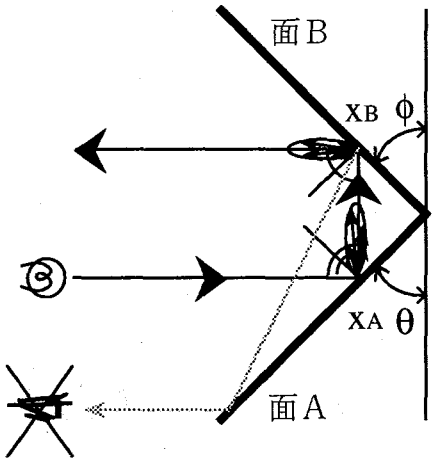


図4-7　表面反射面での多重反射

4.1.4.2.　両面が拡散反射面の場合

両面が拡散反射面であれば光源から入射した光は，面Aの反射スペクトルにより面Aの固有色になる．次に，この反射光が面Bに入射すると今度は面Bの反射スペクトルにより面Bの固有色が重畳される．つまり，反射光は面Aと面Bの反射スペクトルと光源スペクトルの三者の積となる．ここで，面Aと面Bの色が違う場合，スペクトル分布のずれにより積の値は低いものとなる．この様子を図4-8に示す．これにより，色の異なる面の場合，面間での相互反射は考える必要がないと思われる．

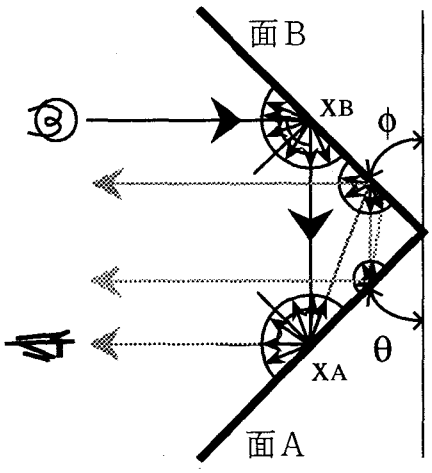


図4-8　拡散反射面での多重反射

4.1.4.3. 二面の反射の種類が違う場合

まず，表面反射面の方を観測した場合の多重反射の影響を考えてみる．図4-9に示す構造を考えると面Aで表面反射した光が面Bで拡散反射する．この光が再び面Aで反射して面Bに戻ってくるのは，面Bでの一度目の反射に関して正反射方向の場所だけである．ところが，この条件を満たす面B上の場所というのは面の間の角度が90°以上の場合存在せず，90°以下の場合に考慮する必要があるが，三回の反射及び，拡散反射した後の光の強さは距離の二乗に反比例するため値が小さく，三回目以降の反射の影響はないと考えられる．

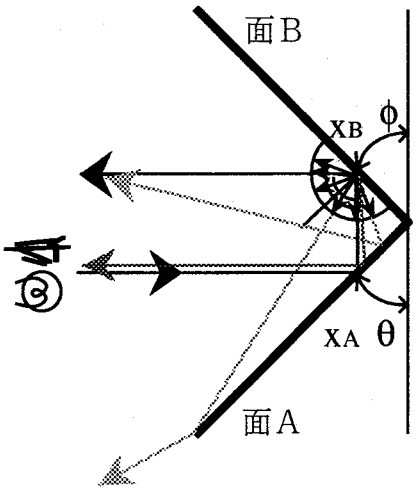


図4-9　二面の反射特性が異なる場合（表面反射面）

面A（表面反射面）上の点をx_A，面B（拡散反射面）上の点をx_Bとする．x_Aでの光源からの入射光に対する反射光は以下の様になる．

$$L_{As}(x_A) = R_{iA}\, m_{sA}(x_A)\, C_s(\lambda)$$

$$= c_{iA}\cdot G_A \frac{\exp\left(-(c_{1A}\cdot\zeta)^2\right)}{(N\cdot V)} m_{sA}(x_A)\cdot C_s(\lambda) \tag{4.18}$$

この反射光に対して点x_Bで反射する光は

$$dL_B(x_B) = R_{bB} \frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2} c_{iA}\cdot G_A \frac{\exp\left(-(c_{1A}\cdot\zeta)^2\right)}{(N\cdot V)} m_{sA}\cdot C_s(\lambda)$$

$$= c_{bB}\cdot\left(n_B\cdot\frac{r}{|r|}\right)\cdot\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2} c_{iA}\cdot G_A \frac{\exp\left(-(c_{1A}\cdot\zeta)^2\right)}{\left(n_A\cdot\frac{(-r)}{|r|}\right)} m_{sA}\cdot C_s(\lambda) \tag{4.19}$$

となる．よって，点x_Bでの面Aからの入射光に対する反射光は

$$L_B(x_B) = c_{bB} \cdot c_{iA} \cdot m_{sA} \cdot C_s(\lambda) \int G_A \cdot \frac{(n_B \cdot r)^2}{(r \cdot r)^2} \exp\left(-(c_{1A} \cdot \zeta)^2\right) dx_A \tag{4.20}$$

となる．次に，この光が面Aに入射する場合を考えているので，このx_Bでの反射光をx_Aで反射しているとするとその反射光は以下のようになる．

$$dL_A(x_A) = R_{iA}^{'} \frac{(n_A \cdot (-r_1))(n_B \cdot r_1)}{(r_1 \cdot r_1)^2} \cdot c_{bB} \cdot c_{iA} \cdot m_{sA} \cdot C_s(\lambda)$$

$$\cdot \int G_A \cdot \frac{(n_B \cdot r)^2}{(r \cdot r)^2} \exp\left(-(c_{1A} \cdot \zeta)^2\right) dx_A \tag{4.21}$$

これより，x_Aでの反射光は，

$$L_A(x_A) = \frac{c_{bB} \cdot c_{iA}{}^2 \cdot m_{sA} \cdot C_s(\lambda)}{\cos\theta} \int G_A^{'} \frac{(n_A \cdot (-r_1))(n_B \cdot r_1)}{(r_1 \cdot r_1)^2}$$

$$\cdot \exp\left(-(c_{1A} \cdot \zeta_1)^2\right) \cdot \int G_A \cdot \frac{(n_B \cdot r)^2}{(r \cdot r)^2} \exp\left(-(c_{1A} \cdot \zeta)^2\right) dx_A \, dx_B \tag{4.22}$$

となる．

次に拡散反射面の方を観測した場合の多重反射の影響を考えてみる．図４-１０に示す構造で考えると，面Aと面Bで正反射位置になっている箇所で多重反射すると考えられる．しかし，本研究ではこれを二回反射までとした．これは，拡散反射した後の光の強さは距離の二乗に反比例することと，拡散反射面での反射率が小さいため，三回目以降の反射の影響はないと考えられるためである．

面A（拡散反射面）上の点をx_A，面B（表面反射面）上の点をx_Bとする．x_Aでの光源からの入射光に対する反射光は以下の様になる．

$$L_{As}(x_A) = R_{bA} \, m_{sA}(x_A) \, C_s(\lambda) \tag{4.23}$$

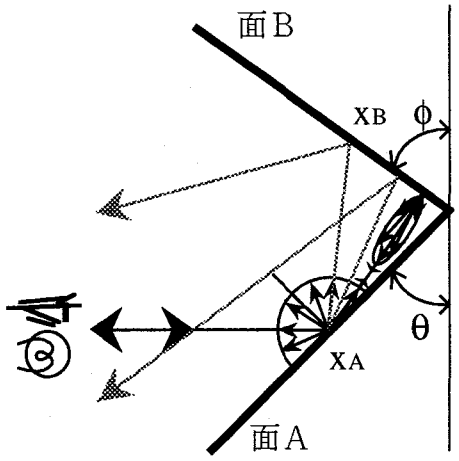


図4-10　二面の反射特性が異なる場合（拡散反射面）

このx_Aからの入射光に対するx_Bでの反射光は，

$$dL_B(x_B) = R_{iB}\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}c_{bA}\cdot\cos\theta\cdot m_{sA}(x_A)\cdot C_s(\lambda) \tag{4.24}$$

となり，面Aからの入射光に対するx_Bでの反射光は，

$$L_B(x_B) = c_{iB}\cdot c_{bA}\cdot\cos\theta\cdot m_{sA}\cdot C_s(\lambda)\int G_B\frac{\exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta_B)^2\right)}{(N\cdot V)}\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}dx_A \tag{4.25}$$

となる．次に，この光が面Aに入射する場合を考えているので，このx_Bでの反射光をx_Aで反射しているとするとその反射光は以下のようになる．

$$dL_A(x_A) = R'_{bA}\frac{(n_A\cdot(-r_1))(n_B\cdot r_1)}{(r_1\cdot r_1)^2}c_{iB}\cdot c_{bA}\cdot\cos\theta\cdot m_{sA}\cdot C_s(\lambda)$$

$$\int G_B\frac{\exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta_B)^2\right)}{\left(n_B\cdot\frac{r_1}{|r_1|}\right)}\frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}dx_A \tag{4.26}$$

これより，x_Aでの反射光は，

$$L_A(x_A) = c_{iB} \cdot c_{bA}{}^2 \cdot \cos\theta \cdot m_{sA} \cdot C_s(\lambda) \int \left(n_A \cdot \frac{(-r_1)}{|r_1|} \right) \frac{(n_A \cdot (-r_1))(n_B \cdot r_1)}{(r_1 \cdot r_1)^2}$$

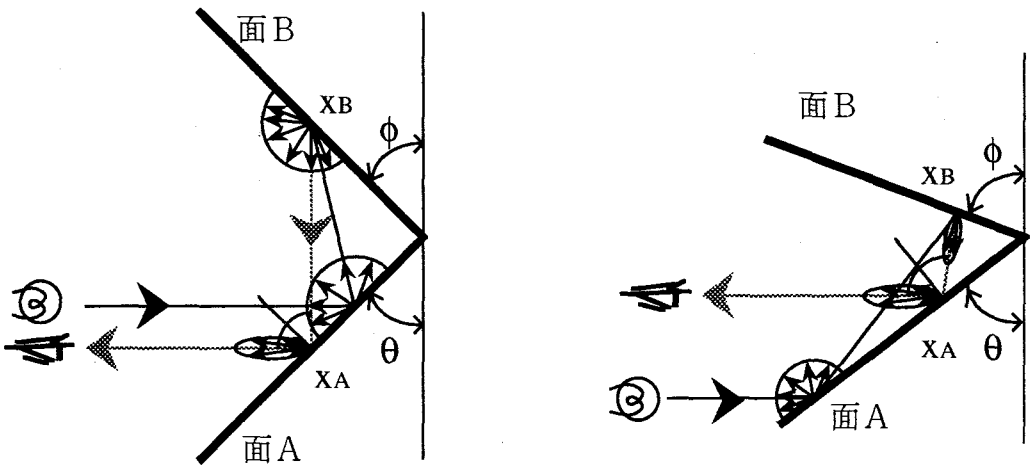
$$\cdot \int G_B \frac{\exp\left(-(c_{1B} \cdot \zeta_B)^2\right)}{\left(n_B \cdot \frac{r_1}{|r_1|} \right)} \frac{(n_A \cdot (-r))(n_B \cdot r)}{(r \cdot r)^2} \, dx_A \, dx_B \tag{4.27}$$

となる．

4.1.4.4. 表面反射と拡散反射の両方を面に含む場合

私達の周りにある物体のほとんどは，表面反射と拡散反射の両方を含むものである．それぞれの反射の違いによって材質の違い，表面の質感の違いを私達は感じている．この場合，図4-１１に示すように光源からの入射光の反射と面Bから再び戻ってきた光の反射が違う場合が生じる．つまり，一回目が拡散反射で，二回目が表面反射，もしくはその逆の場合である．ところで，今まで述べてきたように表面反射が二度続く場合や，拡散反射が二度続く場合は，三回目以降の反射は無視できる．そのため，表面反射と拡散反射を面に含む場合，三回目の反射を考える必要が生じるのは拡散反射（面A）-表面反射（面B）-表面反射（面A）の一つだけであると考えられる．

面A上の点をx_A，面Ｂ（表面反射面）上の点をx_Bとする．まず，光源からの光が面Aで拡散反射する．このとき，x_Aでの光源に対する反射光の拡散反射成分は以下の様になる．



(a) 拡散反射－拡散反射－表面反射　　(b) 拡散反射－表面反射－表面反射

図4-１１　両方の反射を持つ面での多重反射

$$L_{As}(x_A) = R_{bA}\, m_{sA}(x_A)\, C_s(\lambda) \tag{4.28}$$

このx_Aからの入射光に対するx_Bでの反射光は,

$$dL_B(x_B) = R_{iB} \frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2} c_{bA}\cdot\cos\theta\cdot m_{sA}(x_A)\cdot C_s(\lambda) \tag{4.29}$$

となり，面Aからの入射光に対するx_Bでの反射光は,

$$L_B(x_B) = c_{iB}\cdot c_{bA}\cdot\cos\theta\cdot m_{sA}\cdot C_s(\lambda) \int G_B \frac{\exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta_B)^2\right)}{(N\cdot V)} \frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}\, dx_A \tag{4.30}$$

となる．次に，この光が面Aに入射する場合を考えているので，このx_Bでの反射光をx_Aで反射しているとするとその反射光は以下のようになる．

$$dL_A(x_A) = R_{iA} \frac{(n_A\cdot(-r_1))(n_B\cdot r_1)}{(r_1\cdot r_1)^2} c_{iB}\cdot c_{bA}\cdot\cos\theta\cdot m_{sA}\cdot C_s(\lambda)$$

$$\int G_B \frac{\exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta_B)^2\right)}{\left(n_B\cdot\frac{r_1}{|r_1|}\right)} \frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}\, dx_A \tag{4.31}$$

これより，x_Aでの反射光は,

$$L_A(x_A) = c_{iA}\cdot c_{iB}\cdot c_{bA}\cdot m_{sA}\cdot C_s(\lambda) \int G_A \frac{(n_A\cdot(-r_1))(n_B\cdot r_1)}{(r_1\cdot r_1)^2} \exp\left(-(c_{1A}\cdot\zeta_A)^2\right)$$

$$\cdot \int G_B \frac{\exp\left(-(c_{1B}\cdot\zeta_B)^2\right)}{\left(n_B\cdot\frac{r_1}{|r_1|}\right)} \frac{(n_A\cdot(-r))(n_B\cdot r)}{(r\cdot r)^2}\, dx_A\, dx_B \tag{4.32}$$

となる．

以上の反射の性質をまとめたものを表4-1に示す．この表で，Sは表面反射，Lは拡散反射を示している．右端の欄は本モデルにおける利用を示しており，○は相互反射の生成に使用，×は未使用である．なお，○*は面間の角度に依存しているもので，光源-面B-面A-カメラの配置が正反射位置になっている場合，つまり面間の角度が90°のとき反射光が観測される．

表4-1　相互反射の生成状態

面Aでの反射のタイプ →	面Bでの反射のタイプ →	面Aでの反射のタイプ	面における反射光の観測状況	反射光の色	利用
		S	界面反射成分 正反射方向付近でしか観測されない	光源	○
		L	拡散反射成分 物体の固有色として観測される	A	○
	S	S	光源－面B－面A－カメラが 正反射位置のとき観測される	光源	○*
	S	L	面Aの固有色になる相互反射成分	A	○
	L	S	面Bの固有色になる相互反射成分	B	○
	L	L	面ABの色が違う場合無視できる	AB	×
S	S	S	面Bでの反射光が面Aに戻ることは ほとんどないので無視できる	光源	×
S	S	L	〃　　〃	A	×
S	L	S	観測される反射光の色は面Bの 固有色となる	B	○
S	L	L	拡散反射が二度続くので面ABの 色が違う場合無視できる	AB	×
L	S	S	観測される反射光の色は面Aの 固有色となる	A	△
L	S	L	観測される反射光の色は面Aの 固有色となる	A	△
L	L	S	拡散反射が二度続くので面ABの 色が違う場合無視できる	AB	×
L	L	L	拡散反射が二度続くので面ABの 色が違う場合無視できる	ABA	×

4.2. 生成問題

ここまで，相互反射のモデルを構築してきた．これにより相互反射の解析が出来ると思われる．まず，ここでは構築したモデルを使って相互反射を計算機生成することについて考えてみる．

モデル式では面上での積分が中心の処理になる．これを積和によって表すために，面を微小面に区切る（図4-１２）．このとき，図のように二つの面が接している所からもう片方の面の端に向かって１，２，３，‥‥と番号を付けていく．そしてそれぞれの微小面の中心での法線をn_i，n_j，反射率をc_{ii}，c_{ij}，c_{bi}，c_{bj}とする．これにより，積分を積和として扱えることになり，相互反射を計算機上に生成することが出来る．

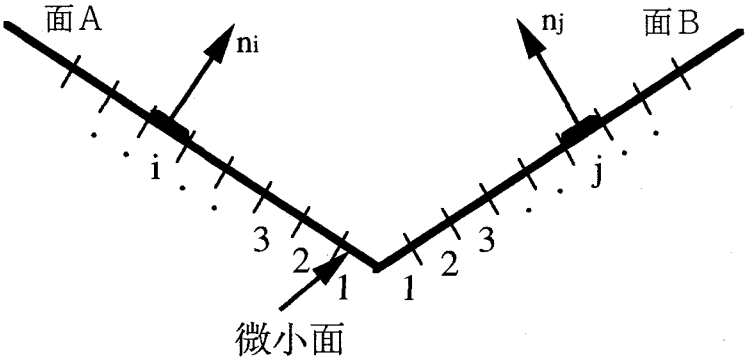


図4-１２　微小面による平面のモデル化

4.3. 逆問題

次に，実際にカメラの入力画像から相互反射を解析する方法をここでは考えてみる．

まず，測定環境としては周囲光のない場所で，光源は平行光源とし，カメラと光源の位置は一致していると仮定する．また，観測物体としては表面反射，拡散反射の両方の反射特性をもつ色の違う２枚の平面を考える．

両面の拡散反射による相互反射は，図4-１３に示すように全ての方向に一様に反射するので，面全体

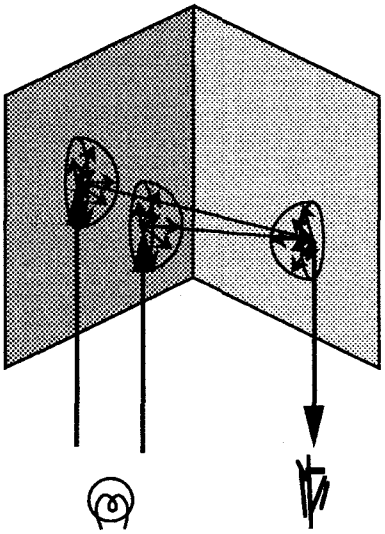


図4-１３　拡散反射による反射方向

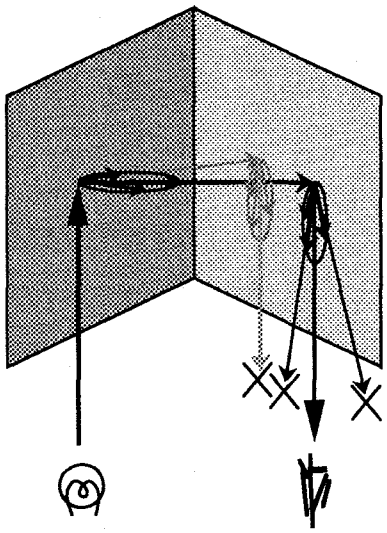
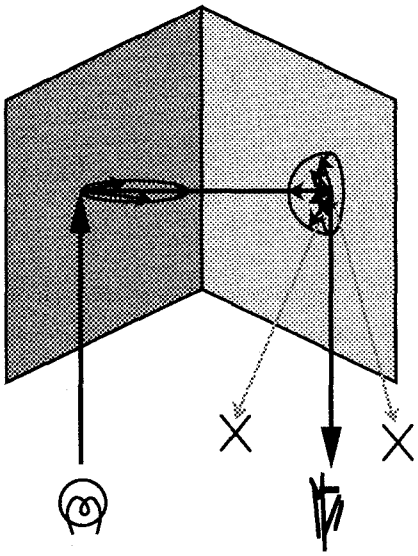


図4-14　表面反射による反射方向

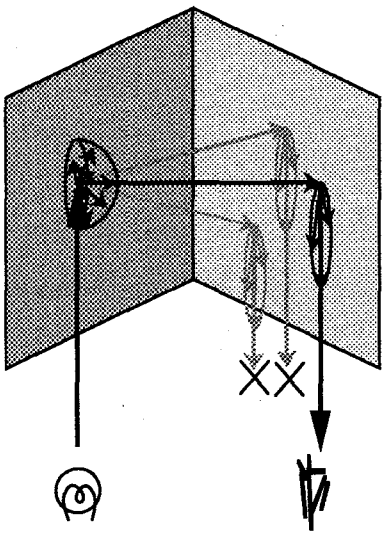
での反射を考える必要がある．しかし，4.1.4.2.で述べたようにそれぞれの面の色が違う場合，二面間での相互反射は無視できるので，それぞれの面での拡散反射のために面全体の反射を考える必要はない．

次に両面の表面反射での相互反射を考える（図4-14）．表面反射は正反射方向に広がりがあるため，光源－面B－面A－カメラが正反射位置より少しずれた所でも観測される．しかし，このずれた位置での観測値というのは正反射方向からのずれにより小さくなっているうえ，両面での反射によってさらに小さくなってしまう．実際には無視できない場合もありうるが，本研究では正反射方向での広がりは小さく無視できるものとする．

最後に拡散反射面，表面反射面間での相互反射を考える（図4-15）．まず，表面反射－拡散反射の場合であるが，表面反射ではやはり正反射方向に小さく広がりをもつと仮定する．このため，拡散反射



(a) 拡散反射面の観測時



(b) 表面反射面の観測時

図4-15　拡散反射－表面反射での反射方向

して全ての方向に一様に反射するが，カメラで観測できるのは入射光のうち正反射方向に反射した表面反射のみである．また，拡散反射－表面反射でも拡散反射であらゆる方向に一様に反射した光のうち，表面反射によってカメラで観測できるものは，同じように正反射方向での広がりが小さいと仮定するならば，正反射方向でしか観測されないと考えられる．

以上のことから，カメラで観測される光は，両面に対して垂直な平面のみで全て解析できるといえる（図4-16）．但し，入射ベクトルはこの平面に平行であるとする．よって，実画像での相互反射の解析としては，光源の光が対象面で反射するときの入射方向と正反射方向を含む平面で切ったときの直線に対してモデルを適用すればよい．

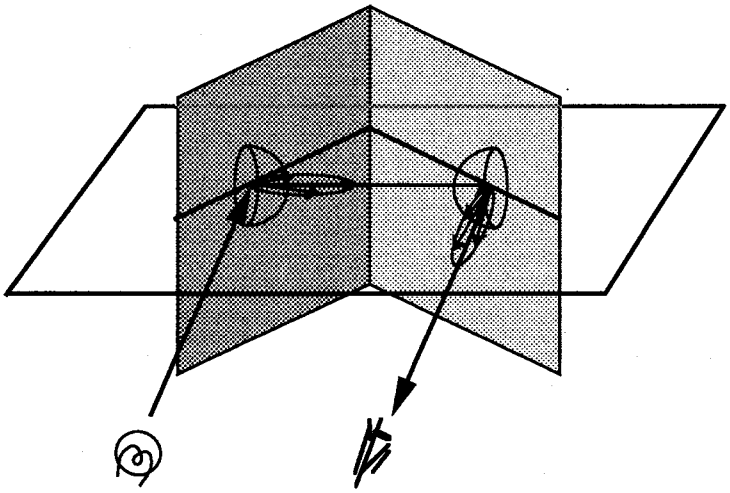


図4-16　相互反射の解析断面

4.4. 実験

ここまで，有色不透明非金属物体間で生じる相互反射を，物体表面で生じる表面反射と内部（拡散）反射の反射率関数を用いてモデル化を行なった．

これらのモデルを用いてシミュレーションおよび実際に相互反射の生じている画像から相互反射の解析を試みる．

4.4.1. シミュレーションによる検証

ここでは，4.1.で構築した相互反射のモデル使って相互反射のシミュレーションを行なう．4.3.の逆問題で述べたように，実画像の画像中のある直線上のデータから実際に起こっている相互反射を解析できるとするので，シミュレーションでも面間での相互反射を考えずに線間での相互反射の解析を試みる．

4.4.1.1. 生成問題

相互反射を計算機上に生成するためには，いくつかの定数を与えてやる必要がある．第一に，面の反射率である．これは拡散反射での完全拡散反射率，波長毎の反射率と，表面反射での正反射方向への反

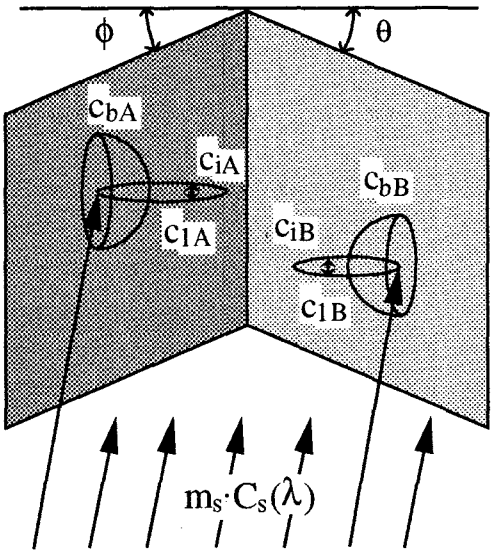
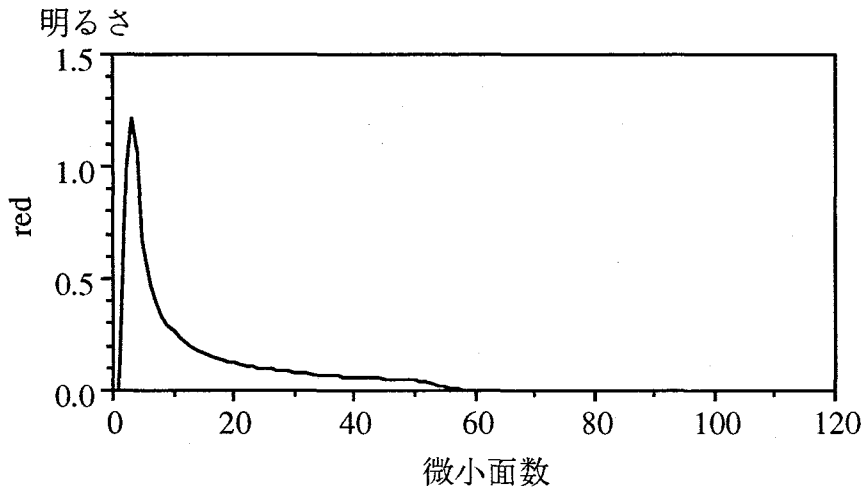


図4-17　シミュレーションにおける未知数

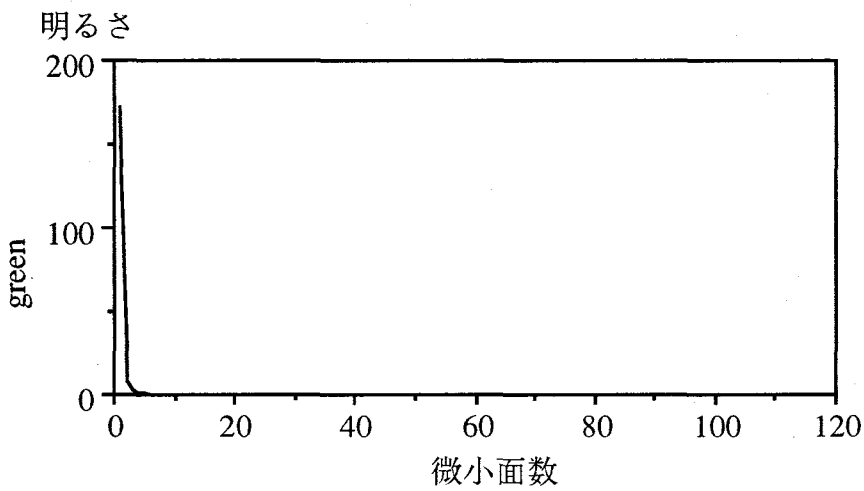
射率，つまり鏡面反射率と正反射方向への広がりを表す係数が必要となる．また，光源の光の強さ，二面のそれぞれの角度が必要となる（図4-17）．これらの数値を任意に与えることにより，その状態の相互反射を生成できることになる．本研究では無限遠方上に光源とカメラを仮定しているので，光源からの光は平行光源で，面で受けるこの光の強さは一定であるとできる．よって，シミュレーションでは面で受ける光の強さを与えることにした．また，拡散反射における波長毎の反射率は，実際にカメラから入力された画像では，色は波長毎に示されるのではなく，R，G，Bの三つの色の重みで示されるため，ここでも波長毎の反射率の代わりにR，G，Bにおける反射率を与えた．表4-2に与えたパラメータを，図4-18に生成結果（R，G，B別），図4-19に生成結果（反射過程別）を示す．このグラフの横軸は図4-12に示した面Aでの微小面のならびで，1～100までである．縦軸は相互反射成分の明るさを示している．

表4-2　シミュレーションにおける各パラメータ

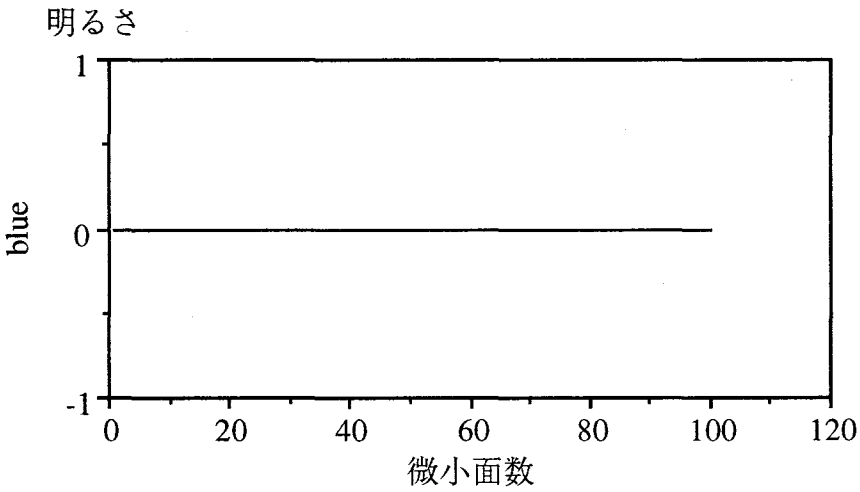
光源の強さ			128		
面A	表面反射 鏡面反射率 拡散度 拡散反射 完全拡散反射率 rgbの比率 面の角度	 $c_{iA} = 1.0$ $c_{1A} = 50$ $c_{bA} = 0.7$ 1.0 : 0.0 : 0.0 40°	面B	表面反射 鏡面反射率 拡散度 拡散反射 完全拡散反射率 rgbの比率 面の角度	 $c_{iB} = 1.0$ $c_{1B} = 60$ $c_{bB} = 0.6$ 1.0 : 0.0 : 0.0 60°



(a) R成分

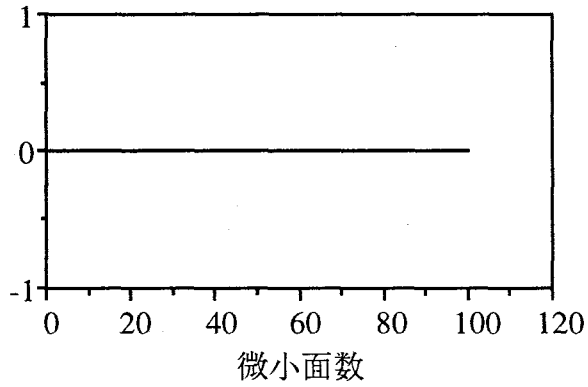


(b) G成分

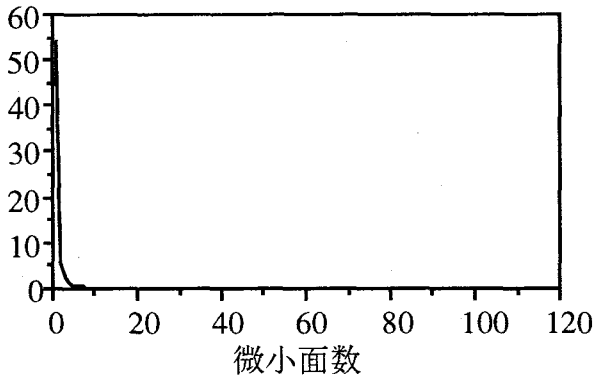


(c) B成分

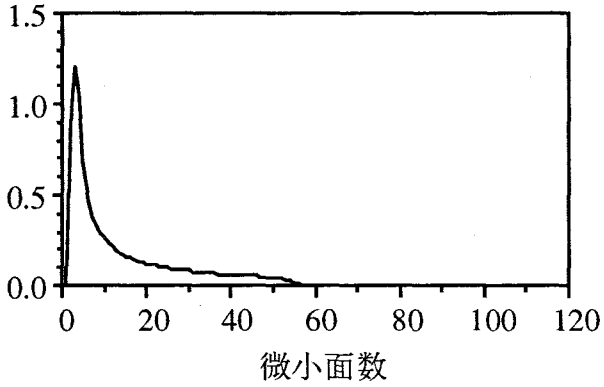
図4-18　シミュレーションによる相互反射の生成



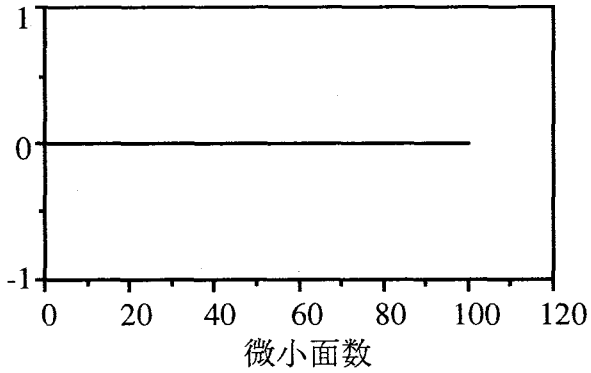
(a) 表面反射－表面反射



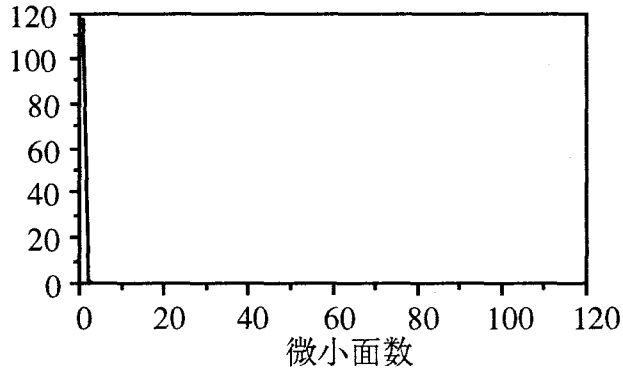
(b) 拡散反射－表面反射



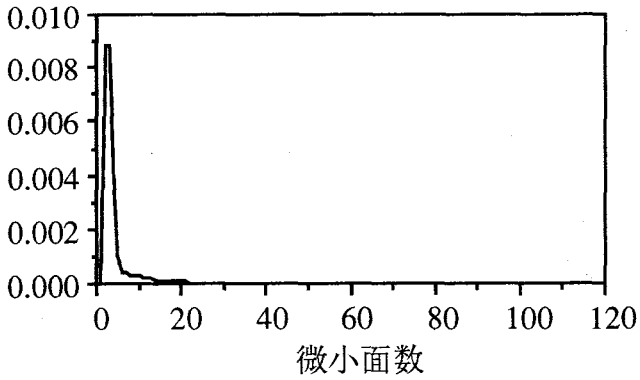
(c) 表面反射－拡散反射



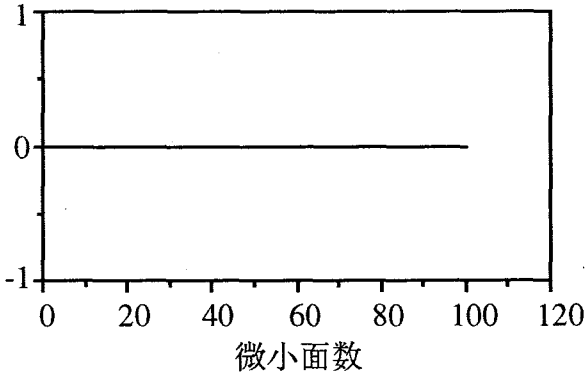
(d) 表面反射－表面反射－拡散反射



(e) 表面反射－拡散反射－表面反射



(f) 拡散反射－表面反射－拡散反射



(g) 拡散反射－表面反射－表面反射

図４-１９　反射過程による相互反射の生成

4.4.1.2. 二面間の角度推定

4.4.1.1.で相互反射を計算機上に生成した．この値を元にして次に，面の成している角度を推定することを行なう．

角度推定の際，必要なパラメータとしては反射率，光源からの光の強さである．これらを元にして4.4.1.1.で生成した相互反射の値を解析して，面の成している角度を推定する．この処理の流れを図4-20に示す．また，1番目の微小面での相互反射成分の誤差を図4-21に示す．誤差が0の所，または一番誤差が小さいところが正しい面の角度と推定される．

この実験の結果，計算機によって生成された値に対しては面のなす角を正しく推定できることが分かった．

4.4.2. 実験による検証

次に実際にカメラより画像を入力したものに対してモデルを適用して相互反射を解析することを行なう．実験対象としては紙片を用いた．相互反射を解析するには4.4.1と同じように，面の角度，面の反射率，光源の強さなどが必要となる．ここで使用した反射率，光源の強さなどは，対象物体と同じ材料を

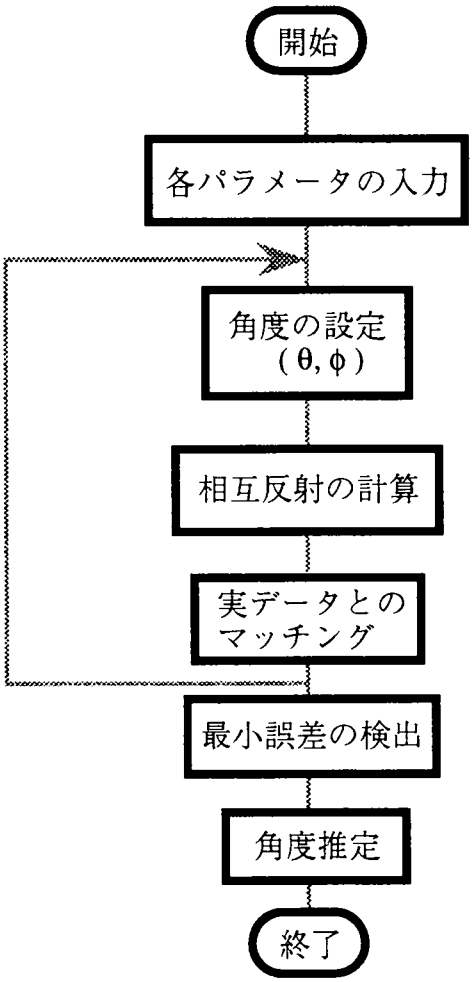
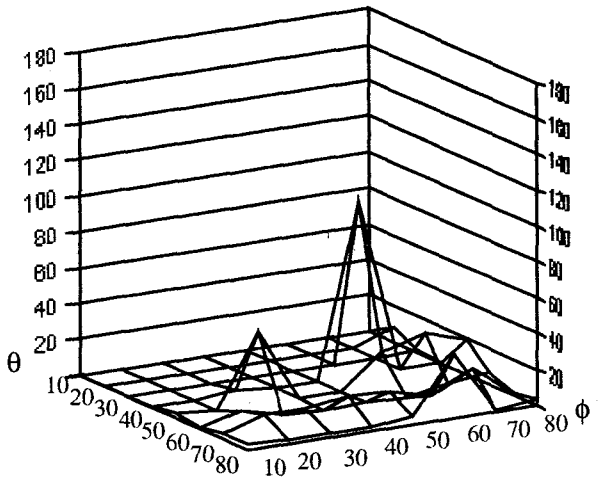
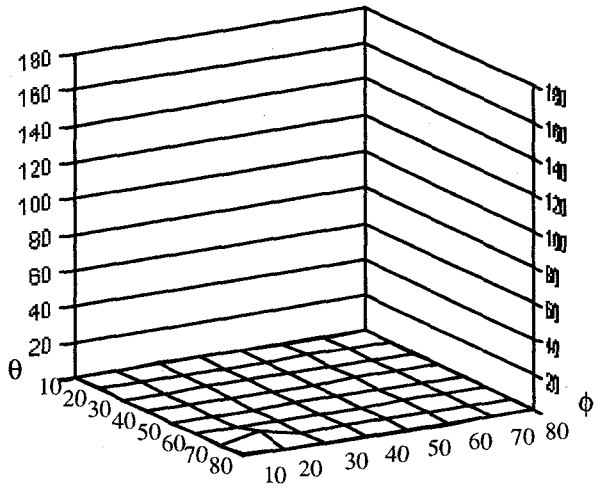


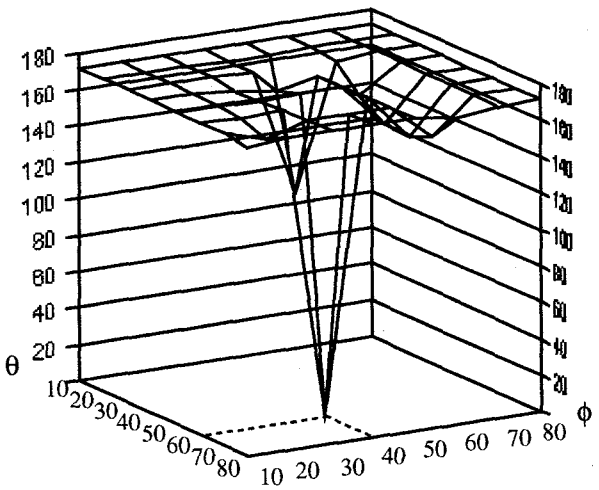
図4-20　角度推定の処理の流れ



(a) r 成分での誤差



(b) g 成分での誤差



(c) b 成分での誤差

図4-21　シミュレーションによる角度推定

表4-3　反射パラメータ

光源の強さ			940		
面A	表面反射 鏡面反射率 拡散度 拡散反射 完全拡散反射率 rgbの比率 面の角度	 $c_{iA} = 0.02$ $c_{1A} = 5.2$ $c_{bA} = 0.19$ 0.08 : 1.00 : 0.52 60°	面B	表面反射 鏡面反射率 拡散度 拡散反射 完全拡散反射率 rgbの比率 面の角度	 $c_{iB} = 0.03$ $c_{1B} = 5.6$ $c_{bB} = 0.24$ 1.00 : 0.10 : 0.19 40°

円筒に巻付け，それをカメラでとった画像から経験的に求めた．表4-3にその値を示す．この各パラメータを決定する時の条件として，相互反射を解析する物体を観測する状態と同じにする必要がある．

4.4.2.1. 相互反射成分の抽出

表4-3に示した値を用いて，カメラから入力した画像から相互反射成分を抽出する．カメラから入力した画像には光源の光を直接反射した光と，相互反射による光が混ざっている．この相互反射による光を抽出するために，直接反射した光を求め，画像から差し引いてやる．この直接反射した光には面での拡散反射に因るものと表面反射に因るものとが考えられる．しかし，表面反射に因る光はこの実験で用いた紙では正反射方向への広がりは小さいため，入射角がよほど小さくないかぎりカメラで観測されることはない．よって，直接反射した光というのは面での拡散反射に因るものと考えることができる．今，面がなしている角度は分かっているので，面での拡散反射は容易に計算でき，相互反射成分の抽出も簡単である．図4-22にカメラから入力した画像とその相互反射の抽出結果を示す．

4.4.2.2. 相互反射による二面間の角度推定

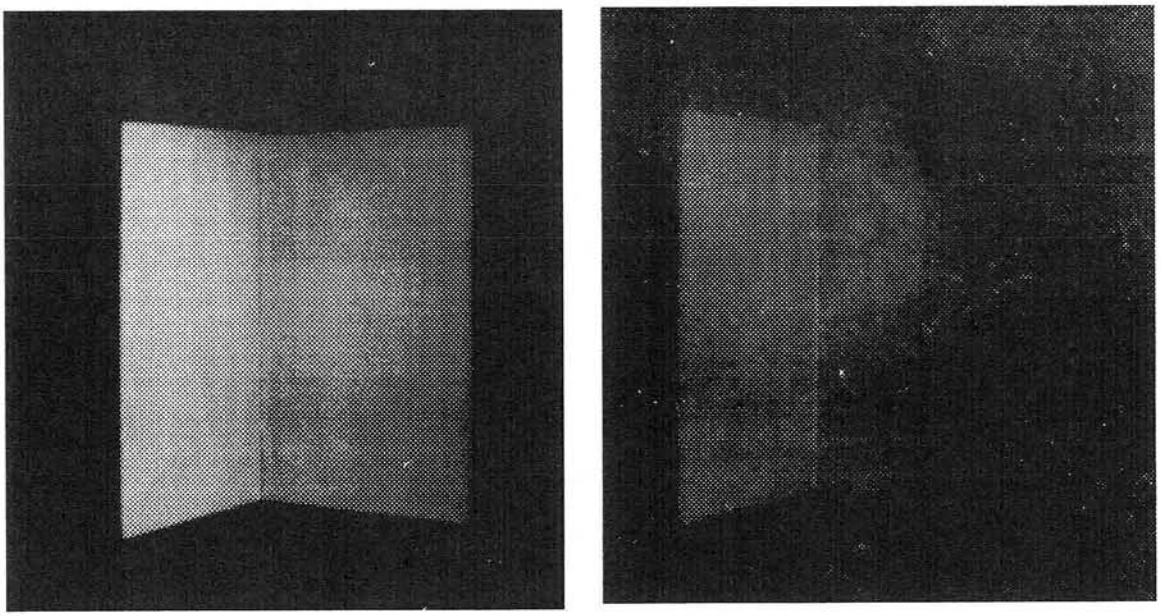
カメラにより入力した画像に対して相互反射の解析を行ない，二面のなしている角度を推定する．

画像中で，光源の入射角と反射角を含む平面で切られる断面が直線になるところを探し，その直線上の画素値に対してモデル式を適用し，角度を推定する．処理の流れとしては図4-20と同じである．

この実験を行なう前に，表4-3に示した値を用いてシミュレーションを行なってみた．ところがこの値と，4.2.1.で求めた相互反射抽出結果と比べて大きく食い違っており実際には正しい角度推定が出来なかった（図4-23）．

4.4.3. 検討

まず，シミュレーションによる二面のなす角度の推定について検討する．図4-21に示したグラフをみると誤差がr，g，b全てで0になっているのは一箇所だけである．このように，相互反射をモデル



(a) 入力画像　　(b) 相互反射抽出結果

図4-22　相互反射抽出（40°，60°）

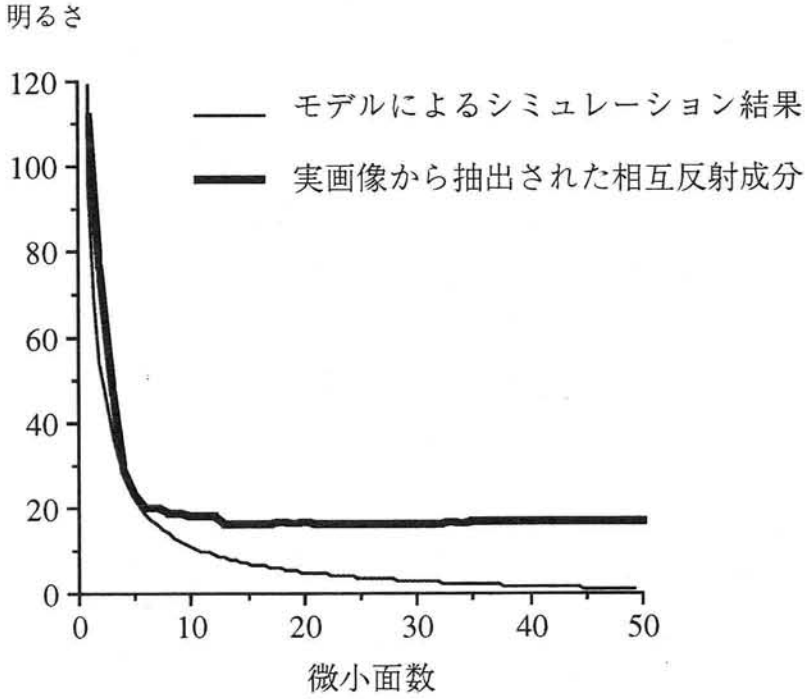


図4-23　シミュレーションと実画像の相互反射の差

によって解析することによって面の角度が推定できるものと思われる．但し，このシミュレーションの場合，反射率，光源の強さは既知であるために誤差が0になる箇所がでてきたものと思われる．実画像では反射率，光源の強さとも正確には分かっておらず，また実験環境の変化によってもこれらの値は変化し，実際には誤差が一番小さくなった場所を面の角度とする必要があると思われる．

次に，実際の画像を用いた実験では，4.4.2.2.で述べたように実画像における相互反射による面の角度の推定は良好とは言えなかった．これは，表4-3に示した値を用いてのシミュレーション結果と比べて，抽出された相互反射成分の値が比較的大きくなっているためである．この原因としては，与えた面の反射率，光源の強さが正確ではなかったことが考えられる．これについては反射率の計測法を改善する必要があると思われる．また，モデル式で表面反射に対する距離の項を拡散反射と同じ距離の二乗に反比例する形を用いた．しかしこれは，拡散反射の様に全ての方向に一様に反射する時に有効なものであって，表面反射の様に一定方向にだけ強く反射するものには実際には適用出来ない．このために正しい値が推定できなかったということが考えられる．

また，本章で求めた非金属物体表面で生じる相互反射現象のモデルは，カラー画像入力系と同じRGBの形にした．しかし，実際の相互反射現象は光学現象であり，波長毎の積によって求められるものである．そのため，物体色のRGB値の積から相互反射成分を求めると，誤差が大きくなってしまうと考えられ，実験においてシミュレーション結果と実画像から求めた相互反射成分の値が大きく異なっていた原因の一つであると思われる．

4.5. まとめ

シーン中で近接した物体間で生じる相互反射現象から，三次元情報を推定することを目的に相互反射現象のモデル化を行った．３章では相互反射の色変化に着目して定性的にモデル化したが，色変化だけでは三次元情報を推定することは難しく，２章で示した表面反射，内部（拡散）反射の反射率関数を基に相互反射による強度変化も含めた定量的なモデル化を行った．

シミュレーションおよび実際の画像を用いた実験によってこのモデルの妥当性を検証した．シミュレーションでは相互反射現象の生成および生成されたデータからの三次元情報の推定が正しく行われたが，実際の画像を基に検証を行ったところモデルによる値と実データの値が異なっていた．この原因としては，

1.表面反射率関数の複雑さ，表面反射の反射光の距離による減衰のモデル化が不十分
2.生成における微小面分割による量子化誤差
3.ＲＧＢ三原色による波長分布の粗いモデル化

などが考えられる．

本モデルでの相互反射成分の解析は正しく行なうことができなかった．しかし，光の反射モデルという物理モデルの導入による画像認識として考えた場合，新たな方向性を示すことができたと思われる．

第５章 光源移動による相互反射検出

コンピュータビジョンの研究分野で相互反射を積極的に扱った研究は少なく，４章で示したShape from Shadingによる形状復元問題に相互反射を考慮したNayarらの研究があげられる[Nayar 91]．しかし，相互反射による濃淡変化のみを扱い，カラー画像による色変化までは扱っていない．カラー画像においては，Shaferら[Shafer 88, 90]の提案したプラスチックのような不均質物体を対象に，反射モデルとして二色性反射モデル(Dichromatic Reflection Model)で相互反射を扱った研究がいくつか報告されている[Bajcsy 90][Jang 91]．しかし，多くはこのモデルを利用した領域分割の過程において，副次的に相互反射を検出するにとどまっている．これに対し，橋本ら[Hashimoto 91]，富永ら[Tominaga 93a]は相互反射の色空間モデルを構築しカラー画像において解析している．橋本らは二色性反射モデル，物質によるモデルの差異を用いてシーン中の物体表面の質感の判別を目的としているが，この中で簡単な相互反射モデルを用いて相互反射領域の抽出を行っている．また，富永らは不均質物体表面で生じる相互反射を分光分布モデルを用いて解析，抽出を行っている．しかし，これらの方法は計算が複雑で容易に物体表面で生じている相互反射を検出することは難しい．

そこで，金属，非金属物体の混在するシーンにおいて，相互反射の検出を簡単に行なうために，光源を移動させて画像を取り込み，その画像間の画素毎の色の変化を用いて相互反射を検出する方法を提案する．また，この方法は，相互反射と同時にハイライトを示す鏡面反射成分も検出できることを示す．

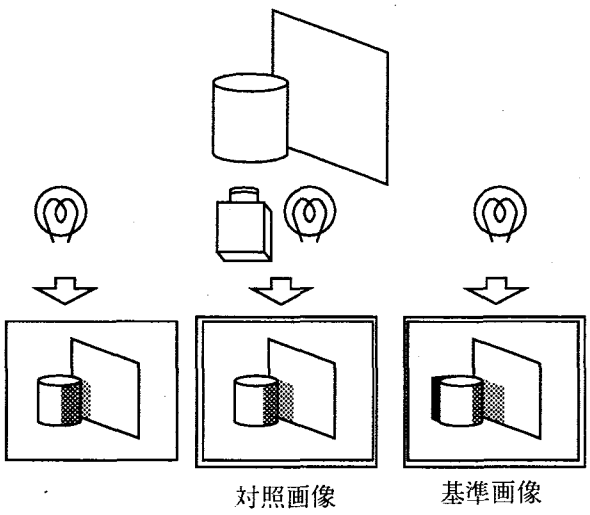
5.1. 検出原理

相互反射は光源からの直接光の一次反射に重畳されてカメラに入射するため，物体上での反射特性が既知でないかぎり，静的な観測画像から相互反射と一次反射とを分離することはできない．一次反射のうち内部反射は拡散反射と考えるので光源位置やカメラ位置の微小な変化では大きく変化しない．それに対し，表面反射は光源－物体面－カメラが正反射の位置関係にあるかどうかに強く依存する．一方，相互反射は複数の面の幾何学関係によるので，一次反射以上に光源位置やカメラ位置の微小変化に敏感である．そこで，光学系を微小移動させることで，相互反射のみを強く変化させれば相互反射の検出が行なえる可能性がある．

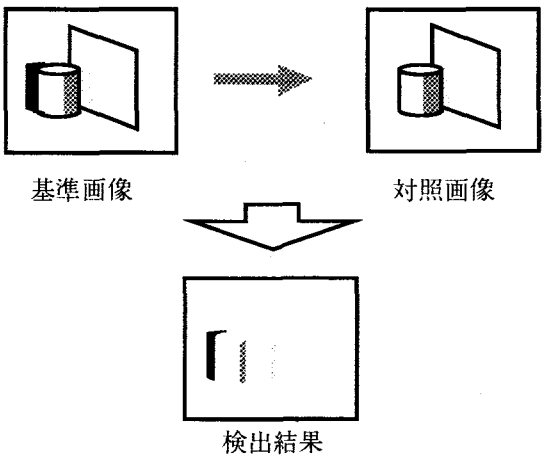
位置関係を変化させるには，カメラを移動させる方法か光源を移動させる方法の二つが考えられる．Leeらはカメラを移動させ取り込んだカラー画像を用いて，表面反射成分の検出を行っている[Lee]．しかし，この方法では視点を移動させるため，物体上の対象点を画像間で対応付けないといけないという問題点がある．そこで，本論文では光源を移動させて相互反射を変化させる方法を用いることにする．光源が移動することで物体表面への入射角が変化し，物体表面での内部反射，表面反射，金属反射の三

種類の反射全てがそれぞれの特性に応じて変化する．しかし、この方法は視点を固定しているため，光源の移動によって画像中の物体の像の輝度や色は変化しても像が変形しない利点がある．

図5-1に原理図を示す．カメラを中心に置き，光源を右－中央－左と移動させる．このとき取り込んだ複数の画像のうちの二枚の画像を利用して相互反射を検出する．以下，検出の基になる画像を基準画像，基準画像からの変化を調べる画像を対照画像と呼ぶことにする．また，基準画像中の画素のRGB値をベクトルとする色ベクトルを基準画素ベクトル，対照画像中の画素値の色ベクトルを対照画素ベクトルと呼ぶ．



(a) 原理図

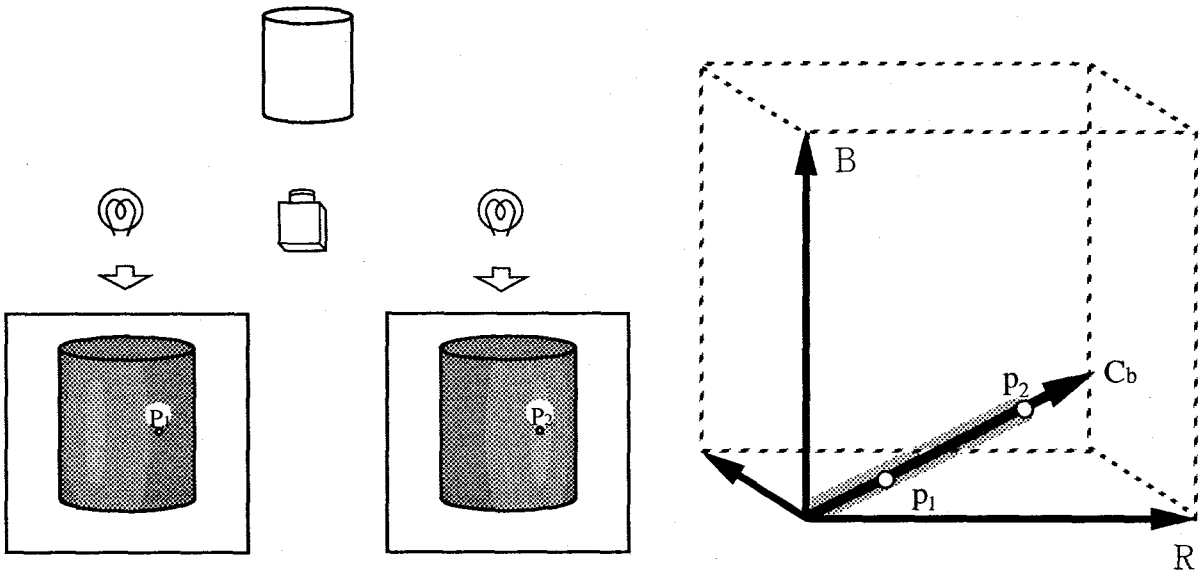


(b) 基準画像と対照画像

図5-1　光源移動による相互反射の検出

5.2. .光源移動による物体表面の色の変化

光源を移動させることにより，物体表面で生じている反射光の強度が変化するが，内部反射，金属反射の反射光強度の変化は，(2.14)，(2.17)式の重み係数mの変化によるもので，明るさの変化だけで色の



(a) 計測画像　　(b) RGB色空間における変化

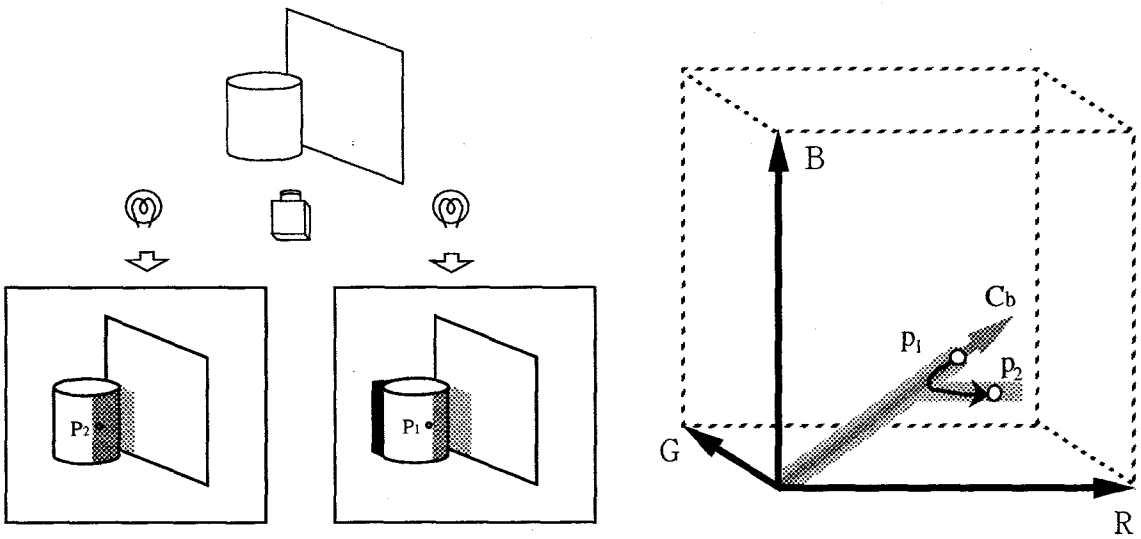
図5-2　光源移動による内部反射・金属反射成分の強度変化

変化はない．このため，図5-2に示すように，RGB色空間内においてベクトルの変化は大きさのみで，方向は変化しない．

ところが，相互反射，および表面反射が生じた場合は変化の様子が異なる．

5.2.1. 相互反射

物体上で相互反射が生じている領域の画素値の集合をRGB色空間で観測する．相互反射が生じていなければ，内部反射が物体固有の色で拡散反射し，RGB色空間では短い直線状の分布となる．図5-3に



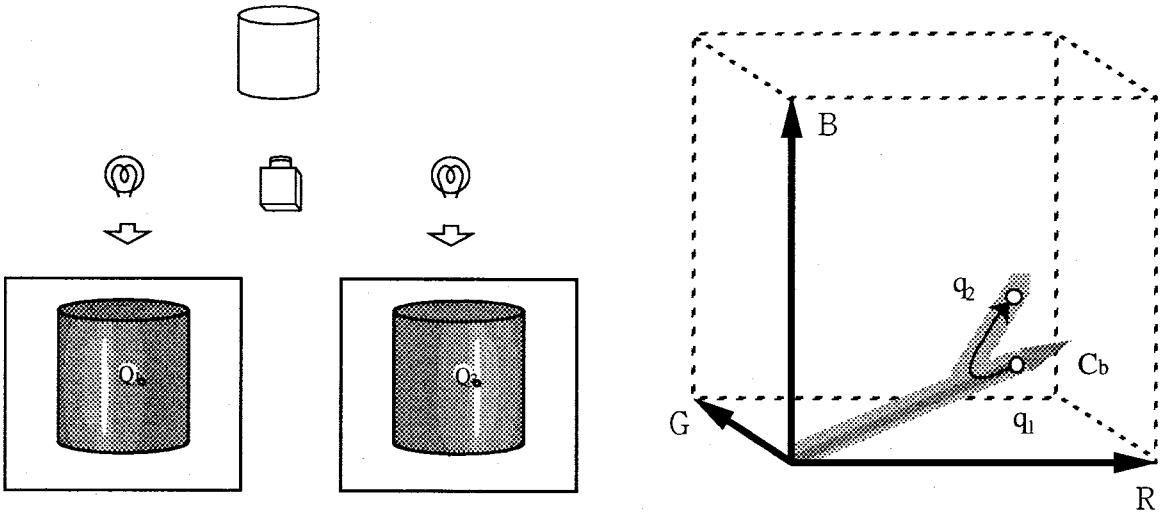
(a) 計測画像　　(b) RGB色空間における変化

図5-3　光源移動による相互反射成分の強度変化

示すように，光源が移動し相互反射が新たに生じると，この直線状の分布は相互反射の相手方の面の色の影響を受け，面状または立体的に分布が変化する．相互反射の色は二つの面の色のRGB値毎の積として考えられるため，内部反射の線状集合に対して，相手の面の色の方向に変化する．この様子を画像中の一画素で観測すると，図5-3(b)のようなRGB色空間での色ベクトルの方向，大きさの変化となる．

5.2.2. 表面反射

次に，不均質物体の表面で表面反射が生じる場合を考える．物体上で表面反射が生じている領域の画素値の集合をRGB色空間で観測すると，内部反射成分の線状集合に枝のように付随した分布となる（図2-11(d)）．そのため，光源が移動することにより表面反射が新たに生じたとき，観測画素は分布の幹の部分から枝の部分へと移動する（図5-4(b)）．また，逆に光源の移動によって表面反射が消滅すると，観測画素は分布の枝の部分から内部反射成分の線状集合に移動する．



(a) 計測画像　　(b) RGB色空間における変化

図5-4　光源移動による表面反射成分の強度変化

5.3. 検出方法

5.2.で述べたモデルでは，内部反射，金属反射による色ベクトルはRGB色空間においてそれぞれ原点から物体色に延びた線状の上に存在する．光源が移動することにより新たに生じる表面反射，相互反射は，色ベクトルのこの直線からのずれとして現われる．そこで，基準画像と対照画像の間で画素の色ベクトルの変化から検出が行なえる．しかし，実際には画像入力系のばらつきなどの加算的ノイズなどの影響で内部反射，金属反射は理想的な線状分布ではなく，ある一定の太さをもった円柱内に分布すると考えられる．このため，単純に色ベクトルの変化量から検出することは難しく，基準画像の画素$P_a(x,y)$の画素値がなす直線に，対照画像中の同じ位置の画素$P_b(x,y)$が足を降ろす距離dを考える（図5-5）．

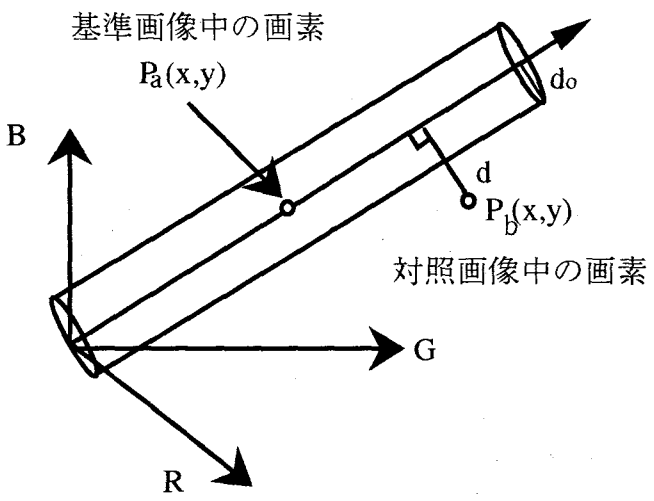
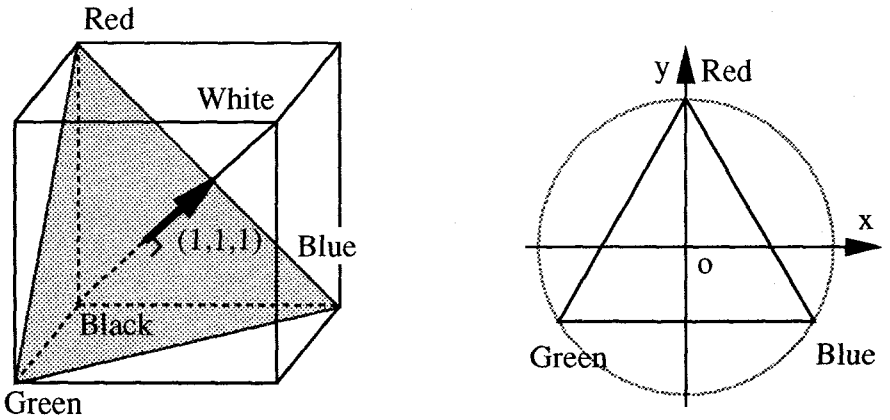


図5-5　基準画素ベクトルからの距離による検出

dがある閾値以上ならば，この画素を光源が移動することによって何らかの変化が生じた画素として検出する．この検出閾値d_0には暗室状態で画像を取り込み，本来一定値になるはずの画素値のちらばりの標準偏差σを基準に用いることにする．

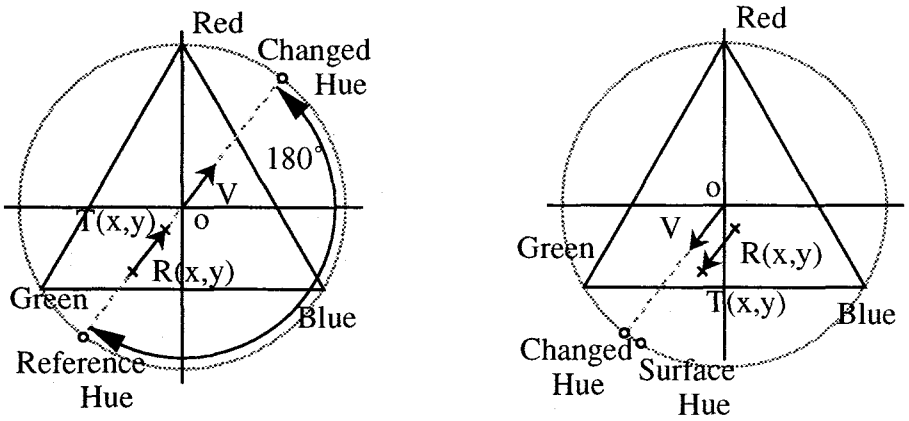
5.4. 判別方法

5.3.の閾値処理で変化画素は検出できるが，それが相互反射，表面反射いずれの影響で変化したのかは分からない．そこで，図5-6 (a)に示す，RGB色空間で(1,1,1)の法線ベクトルを持つ色度面に基準画像，対照画像の画素を写影しこの平面内での変化を利用して，相互反射，表面反射の判別を行なう[Qing 90]．この色度面は図5-6 (b)に示すように，黒を表す(0,0,0)から白を表す(1,1,1)への無彩色の軸と交わる点を原点とし，y軸正に赤(1,0,0)をとる．このとき，基準画像，対照画像の画素の投影点をR(x,y)，T(x,y)とし，R(x,y)からT(x,y)へのベクトルをVとする．



(a) ＲＧＢ色空間　　(b) 色度平面

図5-6　色度平面



(a) 表面反射による色相の変化　　(b) 相互反射による色相の変化

図5-7　色度平面における変化

まず，表面反射により変化が生じたものを判別する．

表面反射は内部反射成分の円柱状の分布に対し，光源色の方向に向かう枝のように分布する．ここで光源を白色光源と限定すると，物体色に対し白色方向に変化することになる（図5-7(a)）．この場合，変化ベクトルVは白を示す色度座標から，物体色の色度座標を引いたベクトルとなる．つまり，変化ベクトルの方向は物体色の補色となり，色相環でみると，物体色に対して180°変化した色となる．

つまり，基準画像，対象画像の画素の色度平面への写影点から変化ベクトルを求め，この変化ベクトルと基準画像の画素からそれぞれの色相角H_V，H_Rを計算する．そしてH_R，H_Vの値の差を調べ，180°近く変化していれば表面反射による変化として判別する．

次に，相互反射による変化の場合，色の変化は二次光源となっている相手の面の色となる．そのため，変化ベクトルの方向も相手の面の色に向いている．

そこで，変化ベクトルVから求めた色相が，相手の面の色相に近い場合この画素を相互反射による変化画素として判別する（図5-7(b)）．

5.5. 実験

5.5.1. 処理の流れ

光源移動による相互反射検出の処理の流れを図5-8に示す．まず，光源を移動させつつ対象シーンをカラー画像として入力する．次に，基準画素ベクトルから変化画素を検出する．基準画像での画素値の明るさが一定値以下のものを背景として除去し，最後に，基準画素ベクトルからの変化ベクトルを求め，その変化方向から相互反射・表面反射の判別を行なう．

対象となる物体，撮影環境の条件を以下に述べる．

(1)　対象シーン中の物体の表面は有色で不透明な材質から構成されている．

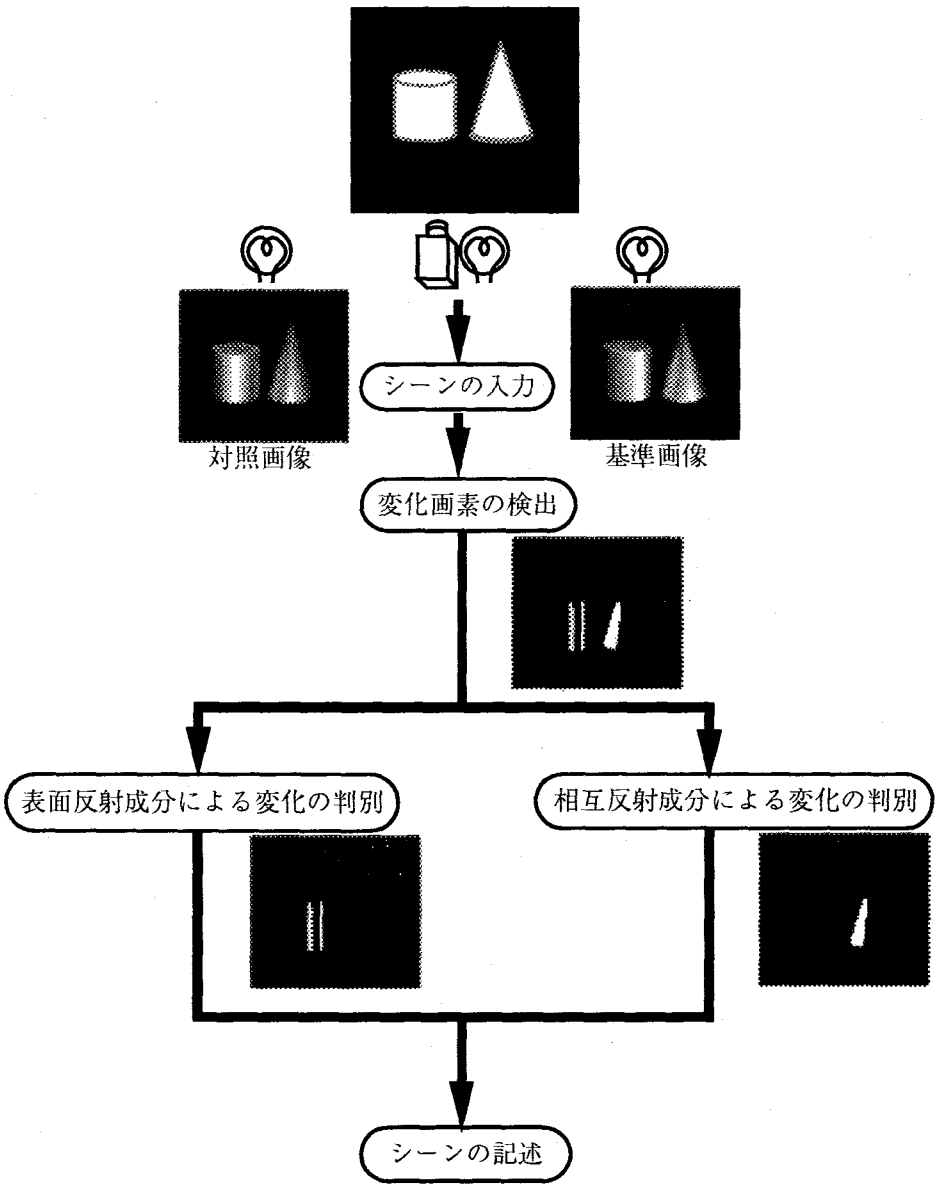


図5-8　相互反射検出処理の流れ

(2)　照明は白色光源とみなせる単一光源を用いる．

(3)　撮影は暗室条件のもとで行なう．

5.5.2. 計測装置

図5-9に用いたカラー画像処理システムの構成を示す．画像入力装置として，1/63～1/3580000秒の間で任意のスピードに設定できる電子シャッター機能を備え，768×493画素をもつ白黒CCDカメラを用いた．この白黒カメラでRGBカラー画像を撮像するために，RGBダイクロイック・フィルタ及び赤外線カットフィルタを利用した．照明光源には，ハロゲンビデオライト（色温度3200°K）をカメラに対して右，上，左の三箇所に設置した．カメラからの白黒映像信号は画像入力装置でサイズ512×480画素，8ビット256階調にディジタル変換される．

5.5.3. カラー画像の入力

対象物体が光沢のない拡散反射面の場合，8ビット程度のダイナミックレンジでも，視覚情報をほとんど飽和・欠落させることなく入力することができるが，光沢のある物体や金属物体を対象とする場合，光沢部分で信号が飽和してしまうことが多い．信号が飽和すると正しい色が再現できなくなり，また逆に光沢部分での信号の飽和を防ごうとすると，金属物体の暗い部分で信号のS/N比が悪化する．

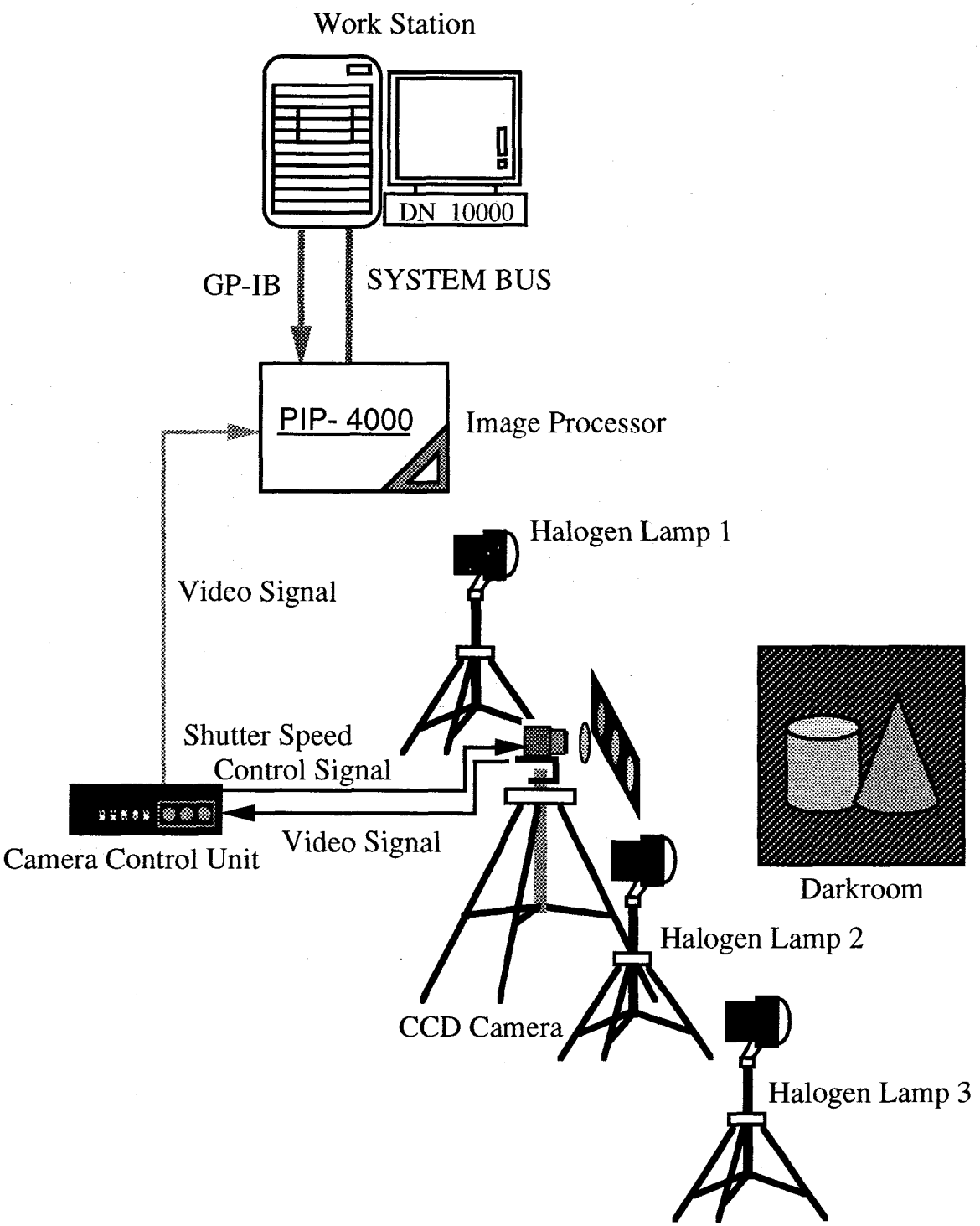
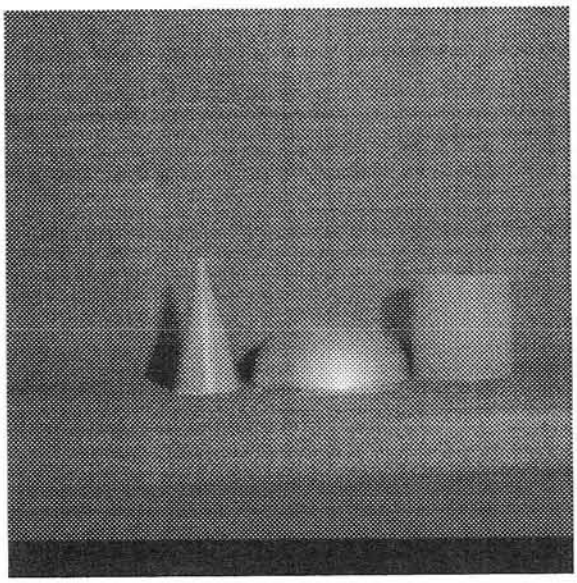


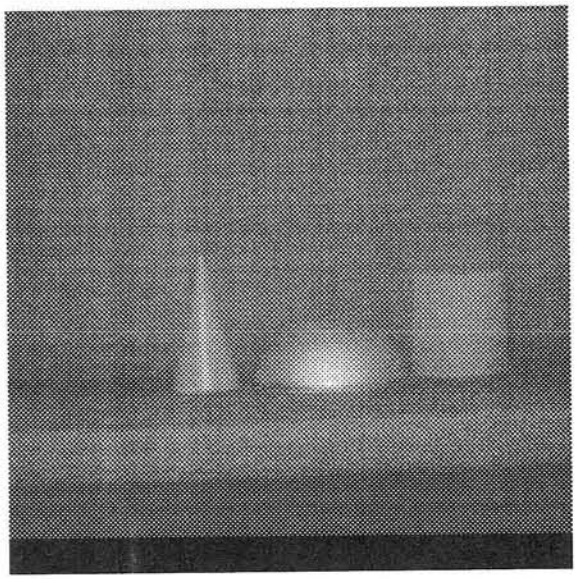
図5-9　計測装置

この入力信号のダイナミックレンジを拡げ飽和や欠落を防ぐために，CCDカメラの可変シャッタースピードにより感度を変化させつつ撮像した画像を複数枚入力した．これを一枚に合成し処理画像として用いた[Kawada 88][Suekuni 90].

この方法を用いて入力した基準画像，対照画像を図５-１０に示す．基準画像はカメラに対して右側から照明したものであり，対照画像はカメラの上から照明したものである．この時の入射角の違いは約22度である．対象物体は，右からフェルトの円筒，真鍮のボール，光沢のある紙の円錐である．



(a) 基準画像



(b) 対照画像

図５-１０　入力画像

5.5.4. 閾値の決定方法

入力された基準画像と対照画像から，相互反射，表面反射を検出・判別する．

まず，5.3.で述べたように，対照画像中の画素から基準画素ベクトルのなす直線までの距離を算出する．図５-１０の基準画像，対照画像から検出された画素を図５-１１に示す．この時の検出のための閾値は，99.94%の信頼度を持つように入力系のノイズレベルσの４倍の値（約4.96）を用いた．相互反射の生じている画素，および表面反射の生じている画素が検出されていることが分かる．

次に，背景および物体の影の部分で誤って検出されているノイズ画素を除去する．これは，背景や影の部分では入力画像の画素値が小さく，量子化誤差等の影響で画素値が正確にあるベクトル方向を示していないためと考えられる．基準画像での画素の明るさが一定値以下のものを除去する．

次に，表面反射，相互反射の判別を行なう．変化ベクトルの方向，つまり色相の変化が，補色関係に当たる約180°の変化をしているものを表面反射による変化，対象面の色の方向を示しているものを相互反射として推定する．しかし，実際にはノイズによって正確にその方向には変化せず，このため，変化方向の値を中心に角度で±15%の値を経験的に判別域とした．相互反射を判別するには物体色が必要

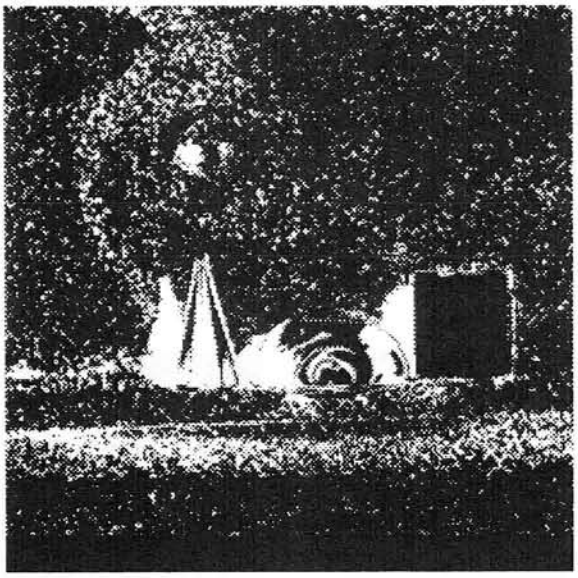


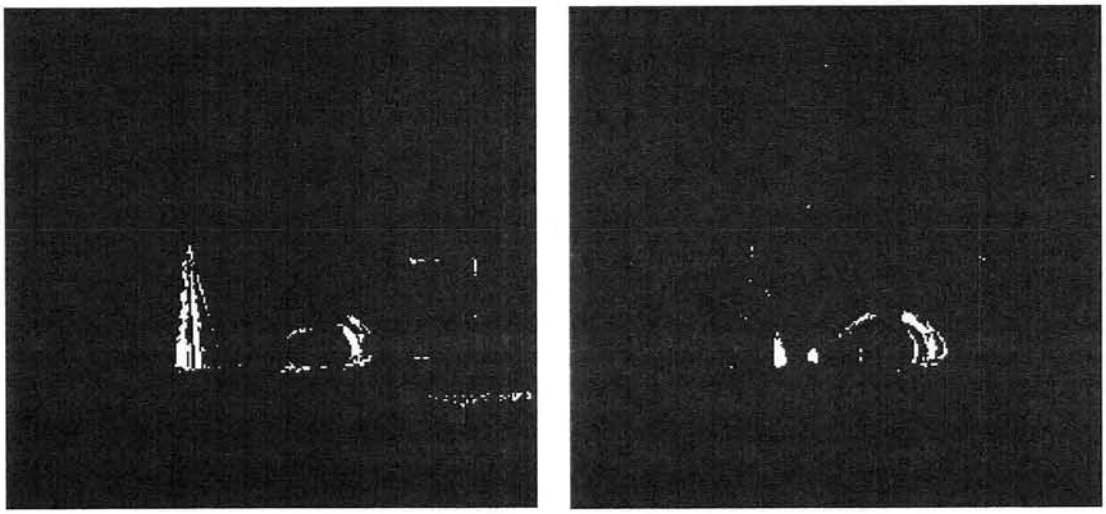
図5-11　検出結果

となるが，実験では物体領域を指定し，その領域の平均値を物体色として用いた．

5.5.5. 実験例

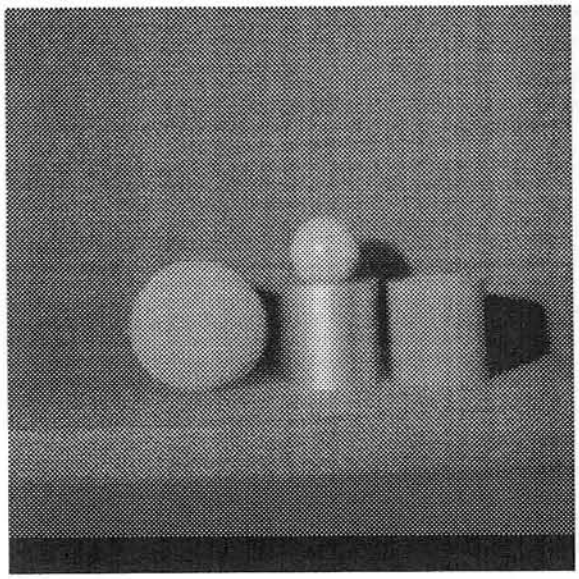
以上述べてきた処理による表面反射成分，相互反射成分の分離結果を図5-12に示す．(a)が表面反射成分，(b)が相互反射成分を示している．中央の真鍮のボールで生じている相互反射が一部誤って表面反射として判別されているが，左側の紙の円錐上の表面反射，真鍮のボールと紙の円錐に生じている相互反射が概ね良好に判別されている．

また，図5-13を入力画像とした場合の実験結果を示す．金属物体（金塗装面），光沢のある非金属

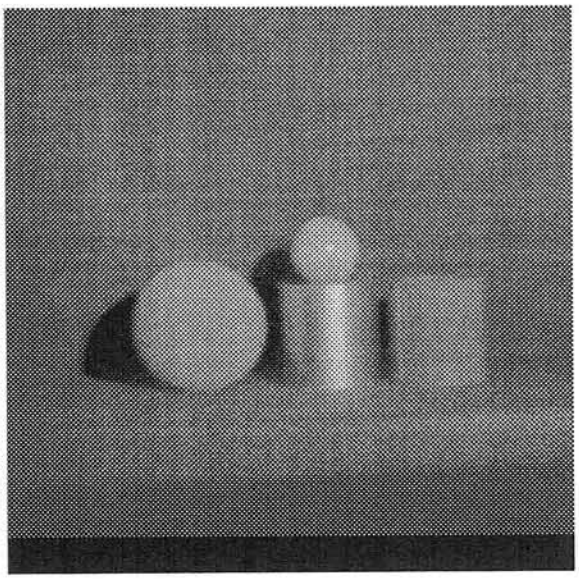


(a) 表面反射成分　　(b) 相互反射成分

図5-12　判別結果



(a) 基準画像



(b) 対照画像

図5-13　入力画像（2）

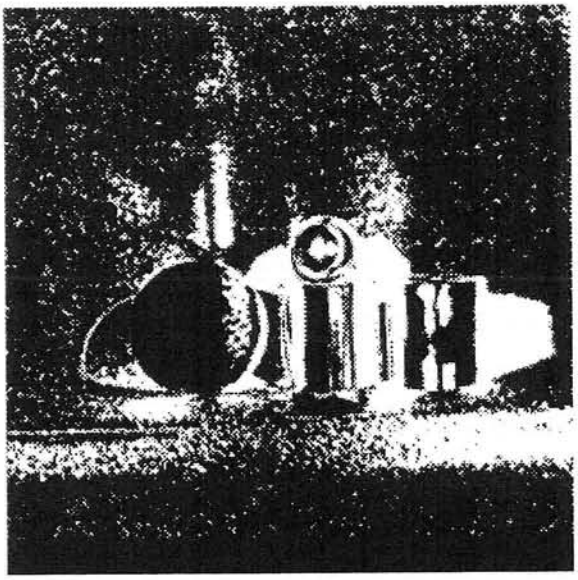
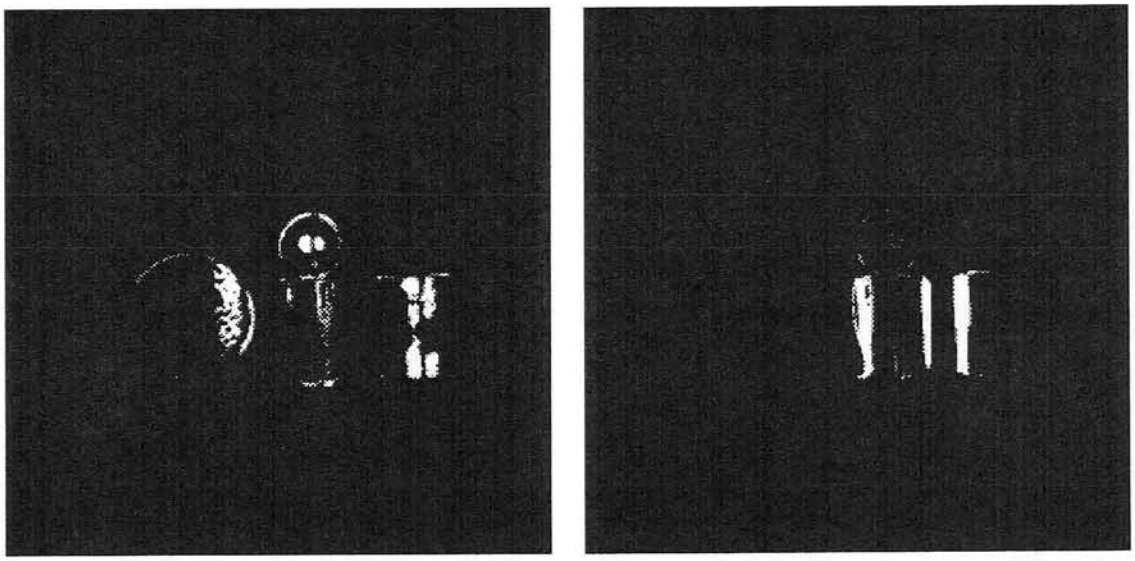


図5-14　検出結果

物体（プラスチック），拡散反射物体（スポンジ）のシーンで，左から照明したものを基準画像，右から照明されたものを対照画像として入力した．シーン右側ののプラスチックの円筒および，中央のプラスチックの球でハイライトが生じている．また，金塗装円筒とプラスチック円筒で相互反射が生じている．これらの入力画像から変化画素を検出した結果を図5-14に，表面反射，相互反射の判別を行った結果を図5-15に示す．



(a) 表面反射成分　　(b) 相互反射成分

図5-15　判別結果

5.5.6. 検討

まず，図5-10の実験では，金属物体表面で相互反射が生じている領域がおおむね検出，判別されている．ただ，少しではあるが，金属光沢の生じているかなり明るい領域で，変化画素として誤検出されている．これは，ダイナミックレンジの拡大処理の際，ノイズによる方向のずれも拡大してしまったためと思われる．

次に，図5-13の実験では，相互反射，表面反射とも変化画素が正しく検出，判別されている．プラスチック面での表面反射が上下に分離して検出されているが，これは光源－物体－カメラの位置関係によって表面反射が中央部で弱くなったためと思われる．そのため，表面反射の弱くなっている物体中央で，変化画素として検出されなかったり，検出されても表面反射として判別できなかったりしている．

両方の実験で共通して言えることとしては，拡散反射物体表面で生じる相互反射による変化は微小であることが確認され，本研究で示した方法は理論どおりほぼ正しく，変化しない画素として検出されている．どちらの実験においてもおおむね良好な検出，判別結果が得られた．

5.6. 質感認識との結果の融合

光源移動法による相互反射，表面反射の検出法の応用を考える．ここでは，応用の一つとして，従来提案されているカラー画像処理による質感認識手法に融合させ，正しく質感認識されなかった結果を，本光源移動法によって検出した相互反射，表面反射によって補正することを考える．

5.6.1. カラー画像処理による質感認識 [Hashimoto 91]

橋本らは，カラー画像処理による，シーン中の物体を，第2章で示したようなカラー反射特性に関し

て，金属物体（M-type），拡散反射物体（R-type），光沢のある非金属物体（S-type）の三種類に分類し，さらに，相互反射の検出を行なう質感認識アルゴリズムを提案した．このアルゴリズムによる質感判別と相互反射の検出処理の流れを図５-１６に示す．まず，シーンをカラー画像(16bit)として入力し，色相ヒストグラムを用いた領域分割を行なう．次に，領域分割された各領域に関してRGB色空間における分布形状，分布方向などの特徴量を計算し，その値を基に質感判別，相互反射検出を行なう．

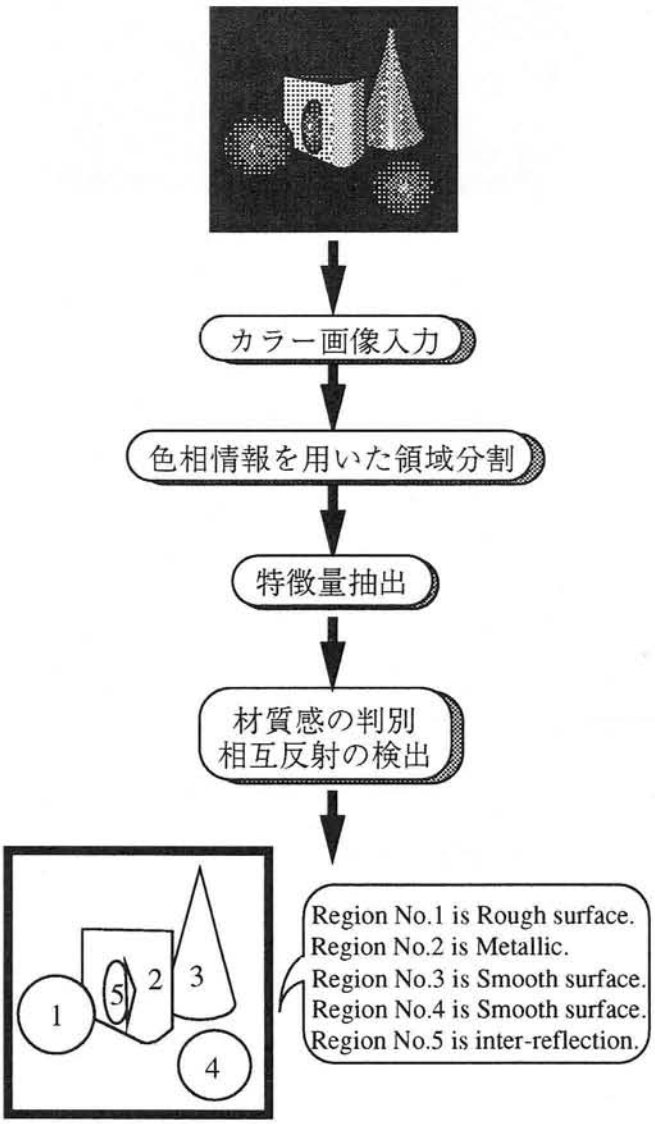
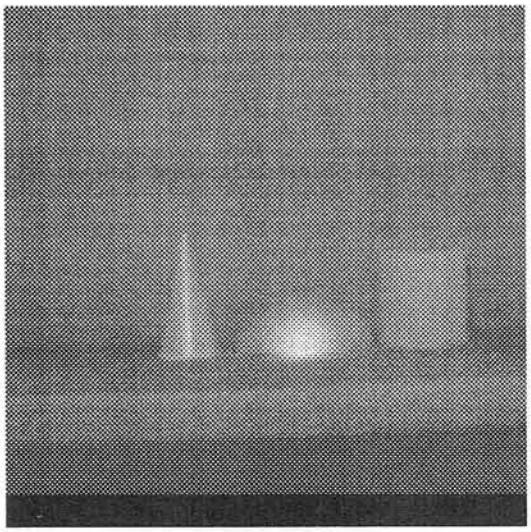
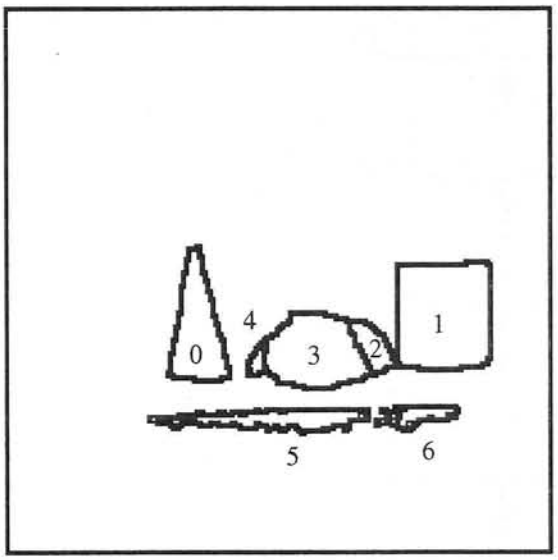


図５-１６　材質感判別・相互反射検出処理の流れ

認識処理を行なう際の対象物体，測定環境は本研究とほとんど同様である．そこで，光源を移動させて撮り込んだ三枚の画像のうち，中央の光源を使用して撮像した画像を入力画像として，質感認識処理に用いることにする．その処理結果を図５-１７に示す．(a)が図５-１０に示した，シーン中央に金属物体（真鍮），右に拡散反射物体（フェルト），左に光沢のある非金属物体（上質普通紙）を置いた入力



(a) 入力画像




```
=== Reflection Type ===

REGION[  0] is INTER REFLECTION.
  Inter-reflection is
       on REGION[  3]. ( 3.17 )
  Inter-reflection pair is
       REGION[  6]. ( 3.17 )
REGION[  1] is ROUGH.
REGION[  2] is INTER REFLECTION.
  Inter-reflection is
       on REGION[  3]. ( 9.09 )
  Inter-reflection pair is
       REGION[  1]. ( 9.09 )
REGION[  3] is METALLIC.
REGION[  4] is UNKNOWN.
REGION[  5] is UNKNOWN.
  REGION[  5] may be part
       of REGION[  6].( 0.74 )
REGION[  6] is SMOOTH.
```

(b) 質感認識結果

図5-17　カラー画像処理による質感認識

画像，(b)に認識結果からのシーンの記述を示す．

図5-17(b)の結果をみると二箇所の誤認識がある．画像左の円錐がS-type（光沢のある非金属物体）としてではなく，相互反射として認識されていることと，金属物体の左側面で生じている相互反射が判別されていないことである．この誤認識を，光源移動による手法を融合することで訂正する方法を考える．

5.6.2. 質感認識との結果の融合

本光源移動法による相互反射，表面反射の検出結果は画素単位である．それに対し質感認識アルゴリ

ズムでは領域単位となる．そこで，質感認識で求められた各領域内で前述の相互反射，表面反射の検出画素の割合を求め，その値を基に質感認識の結果を補正する．

具体的に，金属物体，拡散反射物体，光沢のある非金属物体，それから相互反射の四つに分けて考える．

(1) 金属物体

光源移動法によって，金属物体表面で検出される変化画素は相互反射のみである．しかし，実際には，5.5.5.での実験で示したように金属光沢の周辺部や，相互反射領域の一部などで，表面反射として検出されることがある．そのため，光源移動法で金属物体として認識することは難しく，金属物体の認識では質感認識の結果を優先する．

(2) 拡散反射物体

光源移動法では，拡散反射物体の領域に表面反射，相互反射どちらの変化画素もほとんど現われない．そのため，質感認識での各領域中の相互反射，表面反射の検出画素の割合が低いものを拡散反射物体として認識する．

(3) 光沢のある非金属物体

光沢のある非金属物体の場合は，物体表面で表面反射，及び相互反射がよく観測される．但し，相互反射が強く観測される場合，質感認識の領域分割においても別領域として分割される．そのため，質感認識での各領域中の表面反射による検出画素の割合が高く，相互反射の検出画素の割合が低いものを光沢のある非金属物体として認識する．

(4) 相互反射

質感認識において領域分割が色相によって行なわれているため，相互反射の生じている箇所が領域として分割されている場合，色の変化が比較的大きくなっていると考えられる．そのため，光源移動法においても相互反射として検出されている可能性が高い．そこで，質感認識での各領域中で相互反射の検出画素の割合が高いものを相互反射領域として認識する．

以上の認識補正処理の流れを図５-１８に示す．

5.6.3. 実験例

図５-１８の処理の流れに沿って実験を行なう．

まず，図５-１７に示した認識結果を，光源移動法の結果を用いて補正する．質感認識には図５-１０(b)に示した，中央から照明した画像を用い，光源移動法による検出には，5.5.5.と同じく，右から照明した画像を基準画像，中央から照明した画像を対照画像として用いた．図５-１２の光源移動法の結果を

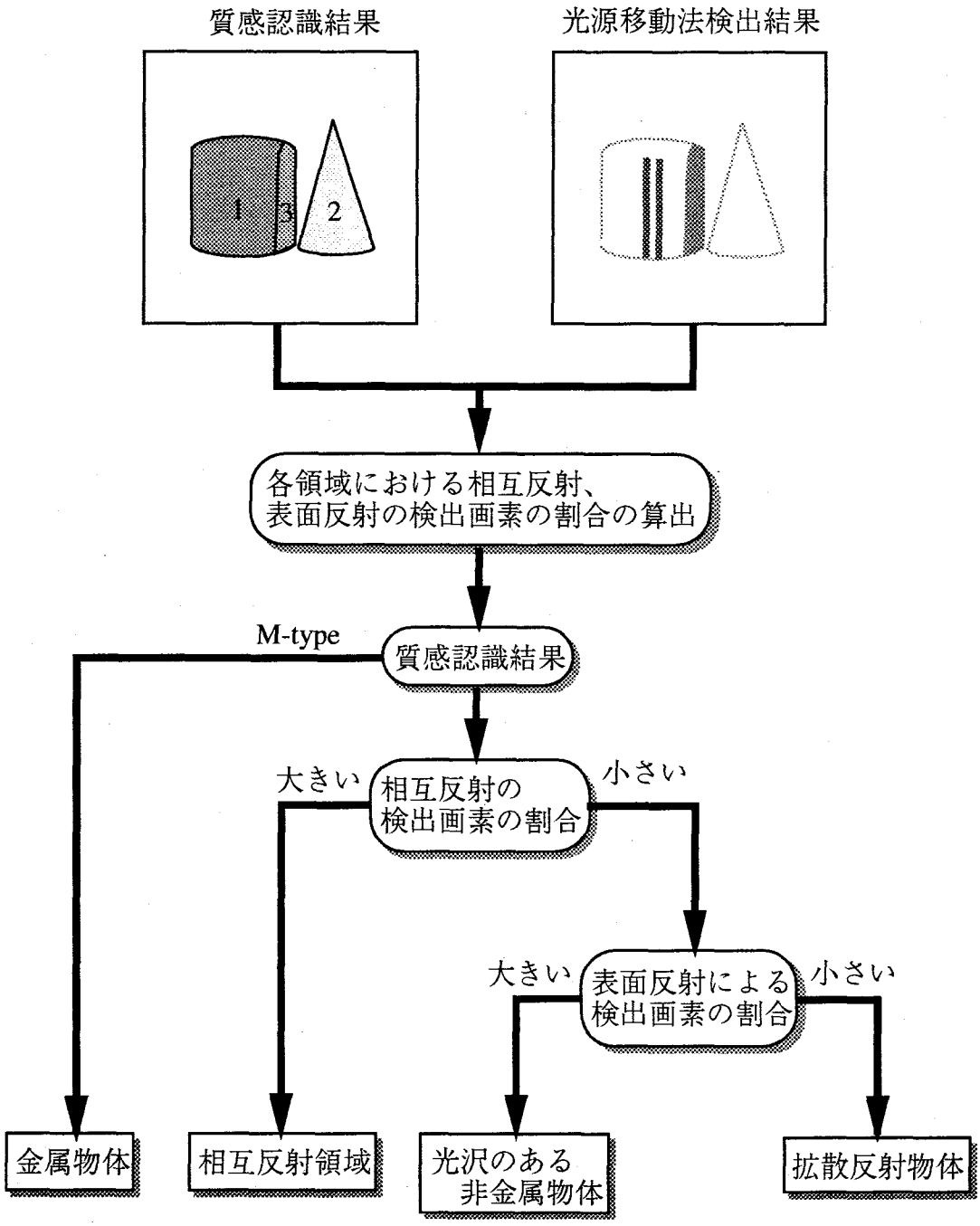
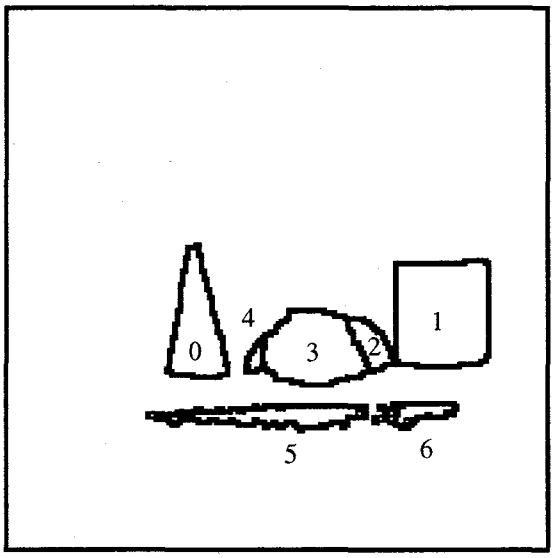


図5-18　質感認識結果の補正処理の流れ

用いて，図5-17(b)の認識結果を補正した結果を図5-19に示す．

まず，図5-17(b)と補正結果（図5-19）を比較すると，画像左側の光沢ある非金属物体を，相互反射として認識されていたのが正しく補正されている．また，金属物体左側の相互反射領域も相互反射として認識されている．

この結果より，光源移動法による相互反射，表面反射の検出結果を用いて，質感認識結果が正しく補正されていることが分かる．




```
=== Reflection Type ===

REGION[  0] is SMOOTH.
REGION[  1] is ROUGH.
REGION[  2] is INTER REFLECTION.
REGION[  3] is METALLIC.
REGION[  4] is INTER REFLECTION.
REGION[  5] is ROUGH.
REGION[  6] is ROUGH.
```

図5-19　質感認識の補正結果

5.7. まとめ

金属物体，拡散反射物体，光沢のある非金属物体の三種類の物体を対象としたカラー画像を用い，光源を移動させることによる物体間で生じる相互反射の変化を検出する新しい手法を提案した．

相互反射現象は影響し合っているそれぞれの面の反射特性によって複雑な構造をもち，解析を行なうには積分方程式を解いたり，コンピュータグラフィックスのラジオシティ法などでは複雑な数値演算を必要とし，簡単に相互反射を扱うことは非常に困難である．しかし，物体表面で生じている相互反射による色変化のみを考えると，定量的な抽出は難しいが，有無の検出だけであれば容易に行なえる．

まず，不均質物体表面での反射を二色性反射モデルとし，金属物体を含む有色不透明物体に拡張した．そのモデルをもとにRGB色空間における各反射成分および相互反射の存在範囲が特定できた．これにより，色変化による検出の可能性を示した．

ここで光源を移動させることで色変化を積極的に発生させる方法を提案し，RGB色空間における色変化をもとに検出，判別する方法を述べた．光源を移動させて取り込んだ，基準画像，対照画像の二枚の画像間で画素毎に変化を調べることにより検出を行ない，色の変化方向をもとに相互反射，表面反射を判別する方法を提案した．以上の方法を実際のシーンに適用し，相互反射・表面反射の生じている画素の検出を行ない，その有効性を示した．

第６章 スペクトル画像による材質判別

前章まで，有色画像としてRGBのカラー画像を用いてきた．しかし，実際のシーンはスペクトル分布を持つ物理光学現象である．そこで，連続的なスペクトル分布を画素値としてもつ，スペクトル画像を考える．このようなスペクトル画像は，リモートセンシングの分野で資源調査などに使われている．しかし室内環境では，狭帯域フィルタを用いた波長分解による画像計測が利用されているだけで，連続的なスペクトルをもつ画像の研究はほとんど行なわれていない．

まず，色の物理的表現である分光輝度を画素値として持つ，スペクトル画像の入力装置を開発し，物体・表面の認識，材質判別などの新たな手法を提案する．また，画像入力時に濃淡画像，RGBカラー画像またはフィルタによる特定波長の測定などから最適な画像入力方法を選択するための基準画像として提案する．

このスペクトル画像の応用として，同色で材質の異なる物体の判別を考える．材質が異なっても色が同じ物体の場合，RGBではその差を明確にとらえることは困難であり，判別することは難しい．しかし，スペクトル分布を観測すると，異なる材質であればスペクトル分布が個々に特徴的な差異を持つことが把握できる．この原理を用いて物体の判別をスペクトル画像で行なう．

6.1. スペクトル画像

これまでの視覚センサを利用しての物体認識は，二値画像，濃淡画像を用いて行なわれてきた．また色情報を加えるために，RGBカラーカメラを用いたシステムが開発されている．ところが，同色だが異なる材質の対象が混ざっている場合を考えると，RGBカラー画像処理では材質を基に個々の対象を判別することは難しい．

そこで，分光に関する詳しいデータを得る方法としてスペクトル分布を画像として入力することを考える．まずこれまでに報告されているスペクトル分布の応用例を示す．

(1)リモートセンシング [Remote 81]

スペクトル画像の利用が古くから行なわれている分野である．LANDSATの画像では，450nm～690nmまでの可視波長帯と760nm～の赤外線波長帯を７バンドに分け測定を行ない，マルチスペクトル画像の撮影を行なう．各バンドでの特性を活かし，大気汚染や水質汚濁の調査，土地利用の調査などが行なわれている．しかし，連続的なスペクトルデータが得られないため，微妙な色変化などは検出できない．

(2)真珠の品質検査 [Nagata 92]

高度に自動化されている工業ラインの中にも人間の勘や感覚を頼りにした官能検査が組み込まれてい

ることがある．こうした感覚量を少しでも数値化し，客観的に検査計測しようとする感覚計測は大きな課題である。この研究では，真珠の品質評価にスペクトルデータを用い，真珠の色の微妙な変化をスペクトルで計測し，ニューラルネットワークを使うことで，分類できることが示されている．

(3)物体表面の同定[Tominaga 91]

ロボットビジョンにおける色の検出において，スペクトルを応用している研究である．まず，物体表面光学特性の光沢部から照明のスペクトル分布を推定し，それを基に物体色の再現および違う方向から測定された同一物体上のスペクトルから物体の同定を行なっている．

また，この照明色の推定アルゴリズムの応用として，物体間で生じている相互反射の解析を行っている[Tominaga 93a].

これらの他にも，CGにおいて三次元物体をリアルに表示するために，スペクトル分布を用いた方法[Tominaga 93b]や顕微鏡画像の処理に分光情報を利用する方法[Kawata 86]など提案されている．またスペクトル分布ではないが，工業応用として特徴のよく表れる特定波長だけを測定するために狭帯域フィルタを用いて画像入力し，処理を行なったりすることがある．

しかし，リモートセンシングでのマルチ・スペクトル画像や，帯域フィルタを用いた画像は，特定波長のみもしくはある広い幅を持った波長帯での計測を基にしており，連続的なスペクトル分布を利用した処理は行なわれていない．

逆に，真珠の品質検査や物体表面の同定では連続したスペクトル分布を利用してはいるが，点計測であり画像データとはなっておらず，測定点毎に独立で測定点同士の位置関係はほとんど無視されている．

本研究ではそれぞれの利点を活かすためにスペクトル画像を提案する[Manabe 94a,b]．また，このスペクトル画像は，濃淡画像，カラー画像，帯域フィルタを用いた画像等の最適な入力画像および，帯域フィルタの場合の最適波長を選択する基準画像として利用できるものと考えられる．

現在，スペクトル分布を測定するための物理計測器である分光輝度計は点測定が基本である．そのため，画像として測定するには測定点をスキャニングして複数点測定し，その計測データを画素値とする方法が考えられる．

6.1.1. システム構成

図6-1に本論文で行なう測定方法を示す．分光輝度計を縦横に等間隔に動かし測定を行ない，その計測データを基にスペクトル画像を作製する．スペクトル画像は画素値に可視波長帯（380nm～760nm）での各波長での強度をもつ．そのため，画素位置を表すx，y及び各画素位置での波長強度の三次元となる．実際の入力システムを図6-2に示す．写真右側がスペクトル分布を測定する分光輝度計である．また，測定点をx，y方向にスキャンさせるために，装置左側の二台のステップモーターを用いて鏡の向き

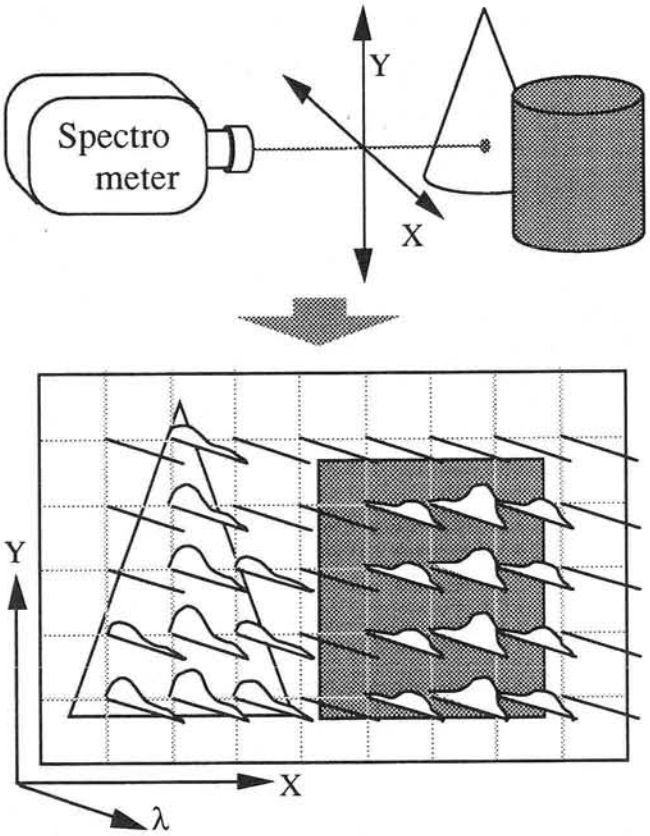


図6-1　スペクトル画像

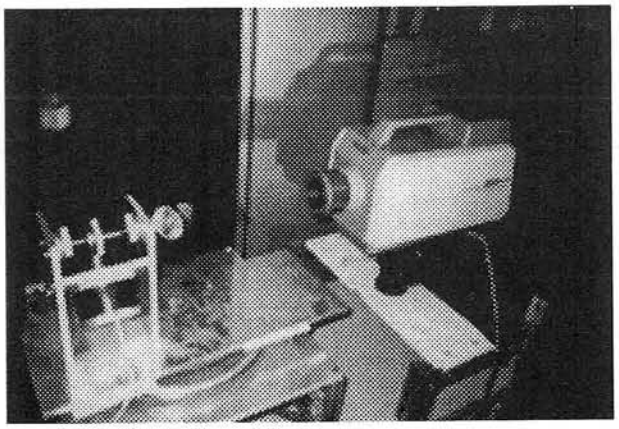


図6-2　入力システム

を制御している．

6.2. データ処理

得られたスペクトル画像から物体を認識する方法を述べる．

濃淡画像，カラー画像では物体を認識するために濃淡値や色の情報を有効に用い，エッジ検出や領域分割などの処理を行っている．スペクトル画像では，濃淡値や色情報に相当する各波長帯での分光強度

を用いる方法を考える．

6.2.1. 相関法

スペクトル画像では縦横の位置関係が明確なため，それぞれ隣接している画素同士での関係を調べることができる．そこで，本研究では物体認識の初期段階として隣接している画素同士の相関を求める方法をまず行なう．

物体表面が一様な色を持つ光沢のない物体の場合，陰影によって明るさの変化は生じるが，色の変化は生じない．つまり，スペクトル分布の強度は変化するが形状は変化せず，物体に固有なスペクトル分布を示す．そのため，同一物体上の異なる点でのスペクトル分布は強度だけの違いになり，相関が高くなる．一方，異なる色の物体ではそれぞれのスペクトル分布も異なる．そのため，相関を調べるとこの場合は低くなる．

隣接する画素値を$C_A(\lambda)$，$C_B(\lambda)$とする．λは可視波長帯（$\lambda_0 \sim \lambda_1$）を示すものとする．このとき，それぞれの平均値をC_A，C_B，標準偏差をσ_A，σ_B，共分散をσ_{AB}すると

$$\overline{C_A} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} C_A(\lambda)\, d\lambda$$

$$\overline{C_B} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} C_B(\lambda)\, d\lambda$$

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \{ C_A(\lambda) - \overline{C_A} \}^2\, d\lambda$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \{ C_B(\lambda) - \overline{C_B} \}^2\, d\lambda$$

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \{ C_A(\lambda) - \overline{C_A} \}\{ C_B(\lambda) - \overline{C_B} \}\, d\lambda \tag{6.1}$$

となる．しかし，実際の計測ではλ_0からλ_1の可視波長帯をn個の帯域に分割してn次元のデータとして入力されるため，

$$\overline{C_A} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} C_{Ak}$$

$$\overline{C_B} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} C_{Bk}$$

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} (C_{Ak} - \overline{C_A})^2$$

$$\sigma_B^2 = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(C_{Bk} - \overline{C_B})^2$$

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\{C_{Ak} - \overline{C_A}\}\{C_{Bk} - \overline{C_B}\} \tag{6.2}$$

と和の形で表現され，これを用いて隣接する画素A，B間の相関係数R_{AB}は，

$$R_{AB} = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \times \sigma_B} \tag{6.3}$$

と計算できる．この相関係数R_{AB}の値が1に近いならばこの２点は同一物体上の一様な色の面上にあると考えられる．また，-1に近いほど異なる物体，または異なる色の面であると考えられる．

6.2.2. 主成分分析法

6.2.1.で述べた隣接画素の相関を用いる方法は，領域のエッジを基にした分割である．これに対しここでは，物体領域を基に分割を行なうために主成分分析を導入する．

観測信号はｎ点の波長帯でサンプリングされ，ｎ次元の縦ベクトルC_i（i=1,2,…,m）で表される．ここでmは観測点の数，つまり画素数である．この観測信号をm×ｎの行列$C=[C_1,C_2,\cdots,C_m]^T$にまとめ，ｎ×ｎの分散・共分散行列Vを求める．さらにこの行列Vの固有値λ_i（i=1,2,…,k），固有ベクトルa_i（i=1,2,…,k）を求める．ここで，固有値λ_iは大きな値のものから順に並べるものとし，固有値の数ｋはシーン中に存在している物体の個数によって決まる．このとき，主成分は

$$S_{im} = a_i^T C_m \tag{6.4}$$

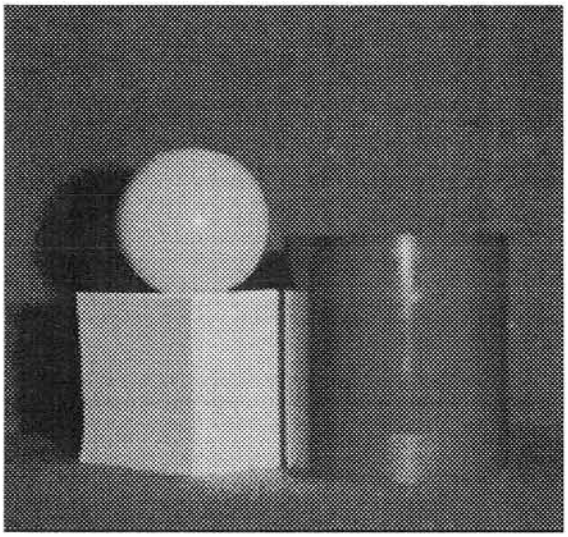
と表現できる．ここで，主成分S_{im}はm番目の観測点の第ｉ主成分を意味する．実際にはこの値からさらに主成分の平均値を差分したものを主成分得点とする．この主成分得点によって，画像中の領域分割を行なう．

6.3. 実験

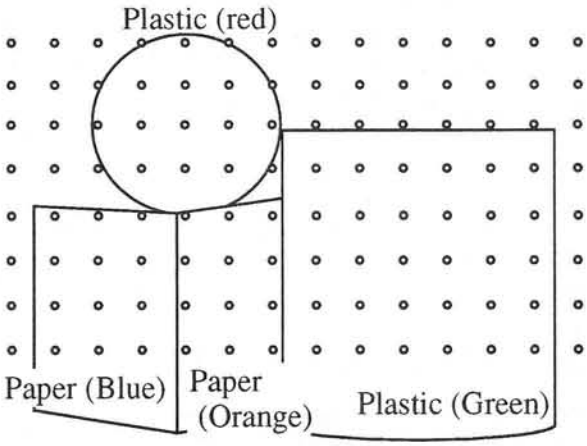
6.2.で示した，相関法と主成分分析法の二つの処理方法を用いて実際にスペクトル画像の認識を行なう．

6.3.1. 相関法による物体認識

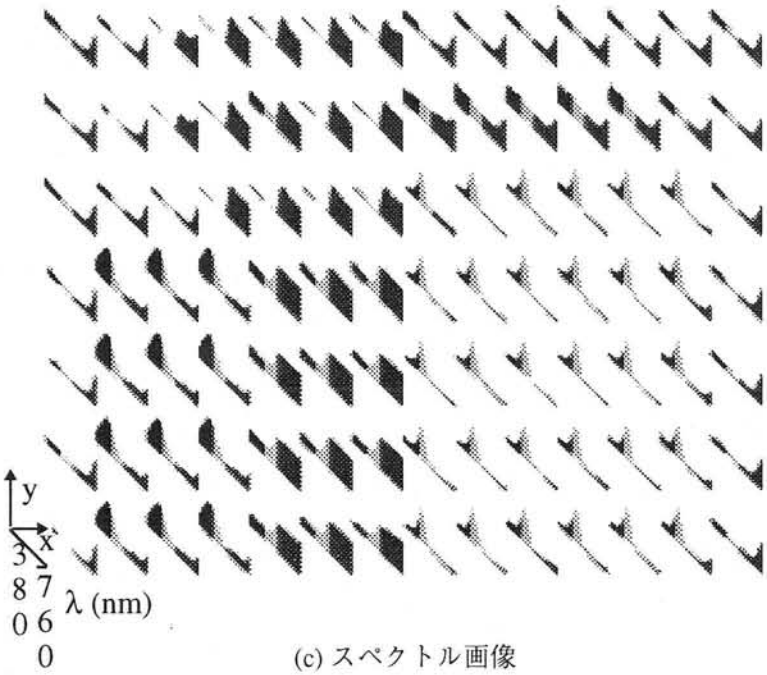
図６-３に実際の測定例を示す．図６-３(a)に測定シーンを示す．シーン左に水色と橙色の紙の立方体，その上に赤色のプラスチックの球，そして右側に緑色のプラスチックの円筒が配置してある．(b)は測定点を，(c)は得られたスペクトル画像を示している．画素間隔は対象物体付近で約１cmであり，分光



(a) 対象シーン



(b) 測定点



(c) スペクトル画像

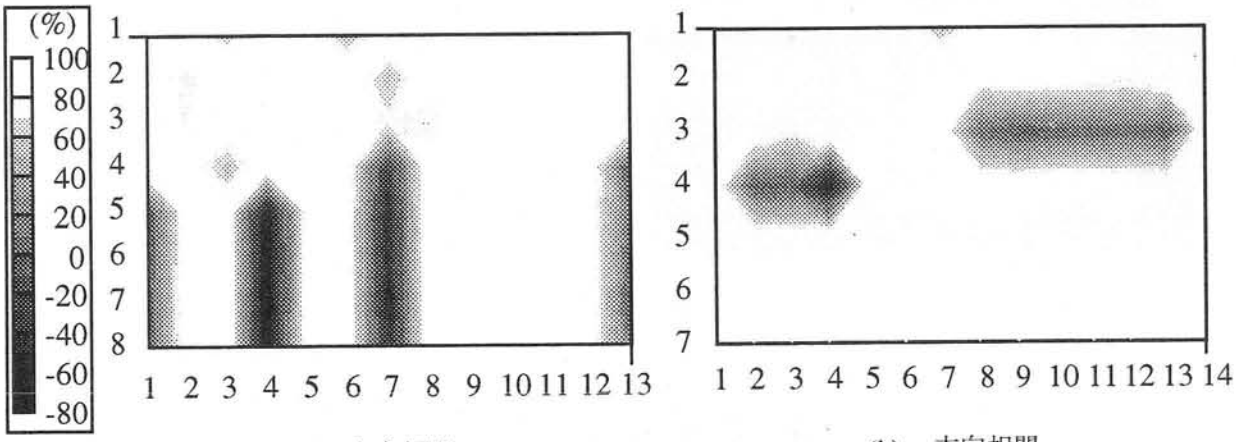
図6-3　スペクトル画像測定結果

輝度計から対象物体までの距離は約1m，測定角は0.2°で，物体表面での測定面は直径約0.3cmの円となる．また，照明光源は色温度3200°Kのハロゲンライトで，可視波長帯では長波長になるにつれ分光強度が強くなる．そのため，測定スペクトルは可視波長帯全域で一定の反射率を持つ標準白色板を用いて較正を行っている．それぞれの表面の色でスペクトル分布が異なっていることが分かる．

このスペクトル画像に(6.3)式の相関による面の連続性判定を適用した例を表6-1に示す．使用したスペクトルデータは図6-3(c)の一番下の行のデータである．列番号は行中の左からの位置を示す番号であり，相関係数はそれぞれ隣接する画素間での相関の程度を示している．また，横方向，及び縦方向に

表6-1　相関係数計算結果

列	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
相関係数	0.01	0.99	0.99	0.54	0.99	0.98	0.24	0.99	0.99	0.99	0.99	0.90	0.01	



(a) x方向相関　　(b) y方向相関

図6-4　相関係数マップ

相関係数を計算した結果を図6-4に示す．(a)が横方向，(b)が縦方向の相関係数の値を濃度で表したものである．同図では，濃くなっているものほど相関係数が低くなっていることを表す．

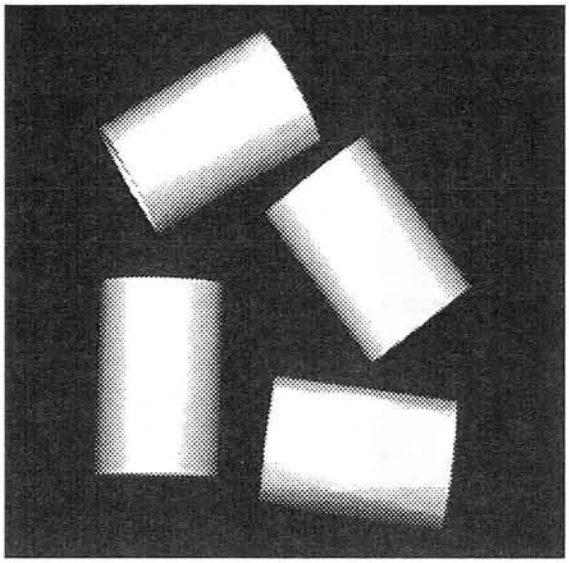
表6-1及び図6-4の結果を考察する．まず表6-1では，0と1，3と4，6と7，12と13の4箇所が相関係数の低くなっている場所であり，それぞれ物体または色が変化している箇所と一致している．またそれぞれ同じ物体，面上の計測点同士は相関係数が1に近く，高い相関を示している．ただし，3と4の間で他の変化箇所より高い相関が得られている．これは，図6-3(a)の測定対象シーンからも分かるように，物体間で相互反射が生じているために，他の面のスペクトルの影響が出ているためと思われる．

また，図6-4では，物体の色の変化している箇所で相関係数が低くなっており，エッジの部分と重なっている．このことから，隣接画素間の相関を計算することによって，スペクトル画像の領域分割が可能であることが分かる．

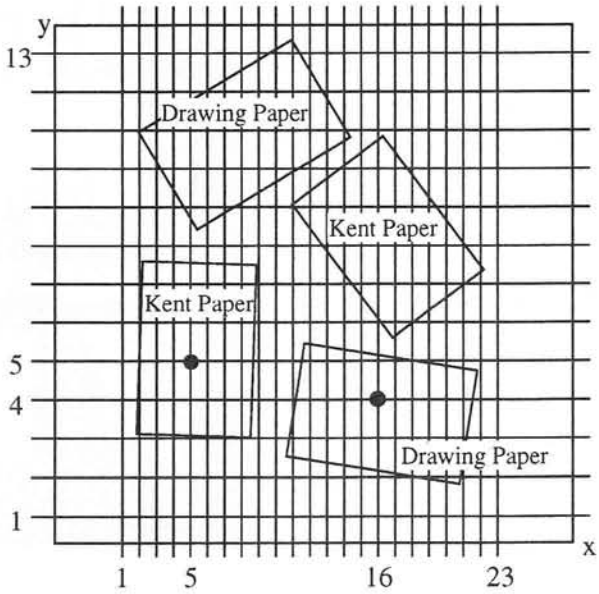
6.3.2. 主成分分析法による画用紙とケント紙の分離

本研究で用いているスペクトル画像は，可視波長帯380nmから760nmを5nm間隔で測定したものである．そのため，各画素毎に77次元ものデータをもっており，これを主成分分析を使うことによって，有意な次元数に縮約することにする．

対象シーンを図6-5(a)に示す．四つの白色円筒のうち，左上と右下が画用紙，右上と左下がケント



(a) 対象シーン



(b) 測定点

図6-5　ケント紙と画用紙の対象シーン

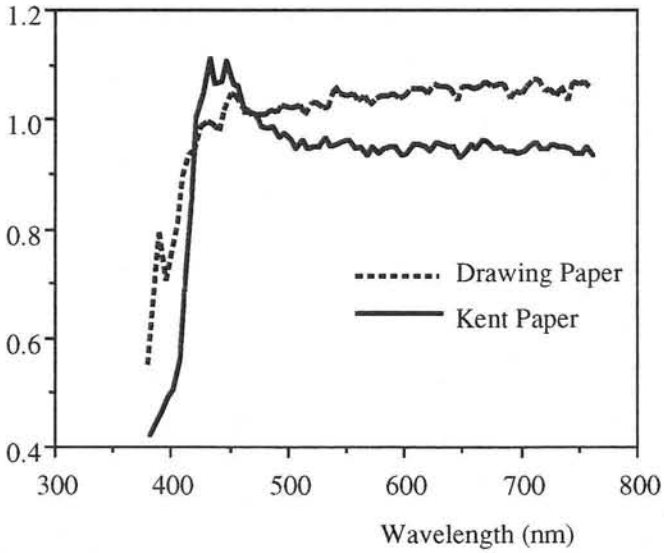


図6-6　ケント紙と画用紙のスペクトル分布

紙である．このようなシーンの場合，濃淡画像，カラー画像ではこれら二つの材質の判別は困難である．このシーンに対して横２３点，縦１３点でスペクトル画像を入力した．このときの測定点を図6-5(b)に示す．また，図6-6に画用紙の領域である(x, y) = (16, 4)とケント紙の領域である(x, y) = (5, 5)のスペクトル分布を示す．あまり大きな差異は存在しないが，青色を示す450nm付近の波長でケント紙のスペクトル分布が強くなっている．これは，色をより白く見せるために素材の中に混ぜられている蛍光物質によるものと考えられる．

この画像に対して前節で示した主成分分析を行なった結果が図6-7である．黒が背景，白が画用紙，

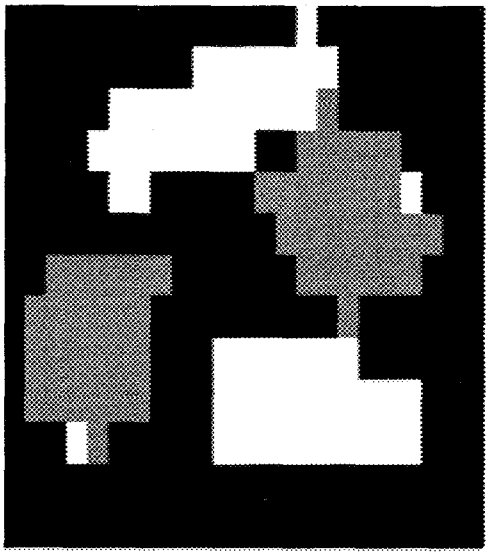


図6-7　主成分分析による領域分割結果

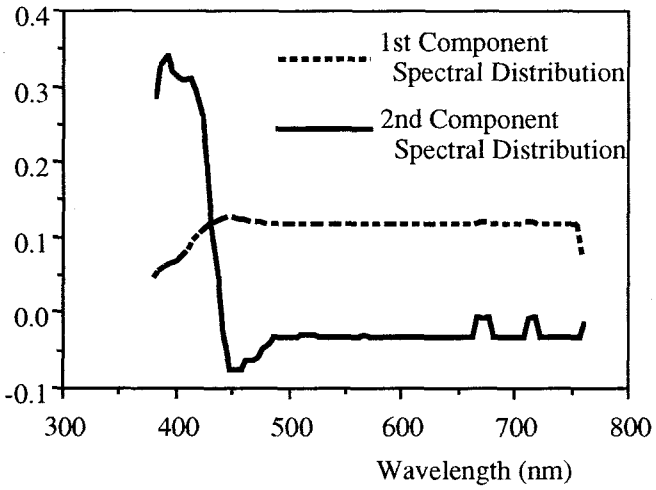


図6-8　成分スペクトル分布

灰色がケント紙を示している．また，このときの第一主成分は背景と物体の分離に，第二主成分は画用紙とケント紙の分離に利用されている．それぞれの成分スペクトル分布を図6-8に示す．このときの，主成分得点による分割に用いたそれぞれの閾値には経験的に最適な値を選び，第一主成分に-0.2，第二主成分に-0.095を用いた．

まず，図6-7に示した判別結果については，ケント紙の一部が画用紙として判別されている．これは，物体表面の陰影によって観測波長帯全体で分光強度が弱く，センサのS/Nの関係でケント紙の450nm付近の分光強度が強くなるスペクトル分布の特徴が顕著に現われなかったためと思われる．

また，判別には第二主成分まで用いた．通常，主成分を示す固有値，固有ベクトルの数は分析を行なうデータ中に含まれる成分の数によって決まる．つまり，この実験では背景，画用紙，ケント紙の三つの成分からなるため，それぞれを適切に射影する軸としては二つ求めればよい．しかし，実際にはノイ

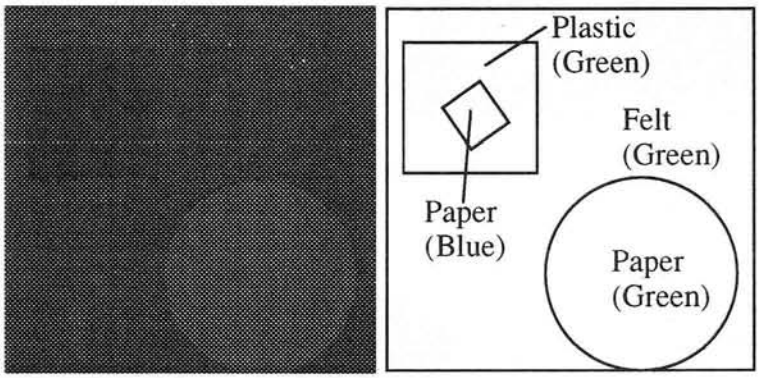
ズなどの影響によって二つ以上の固有値が求まる．本論文では，シーン中の物体数が既知と仮定したため，第二主成分までを利用した．また，第二主成分までの累積寄与率は９５％以上であった．

6.3.1. 緑色の異質同色物体の分離

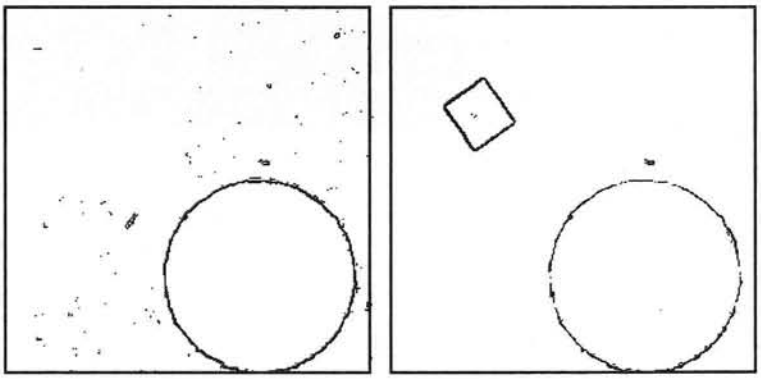
画像処理を行なうとき，濃淡画像，カラー画像などから，最適な画像入力方法を，対象とする物体の特性などを基に選択する必要がある．また，狭帯域フィルタを用いる場合，適切な波長帯を選択しなければならないが，これらは従来経験的に行なわれてきた．一方，スペクトル画像は物理的光学情報を全て含んでおり，画像の入力方法などを選択するための基準画像として利用できる．

緑色のフェルト，プラスチック，紙および青色の紙を取り込んだ画像を図６-９(a)に示す．(b)は濃淡画像からエッジを検出したものである．円形の緑の紙の領域だけが明るさの違いから検出できているが，他の領域は検出できていない．(c)は色相からエッジを検出したものである．青色の紙の領域と緑の紙の領域が検出できている．しかし，緑色のフェルトとプラスチックの領域の分割はできていない．

この二つの領域のスペクトル分布を測定したものを図６-１０に示す．それぞれの領域で，緑色を示す500nm付近のスペクトル分布が強くなっていることは同様であるが，650nm以上での分布強度はフェル



(a) 対象シーン



(b) 濃淡値を基にしたエッジ検出　　(c) 色相を基にしたエッジ検出

図６-９　緑色の異種同色物体

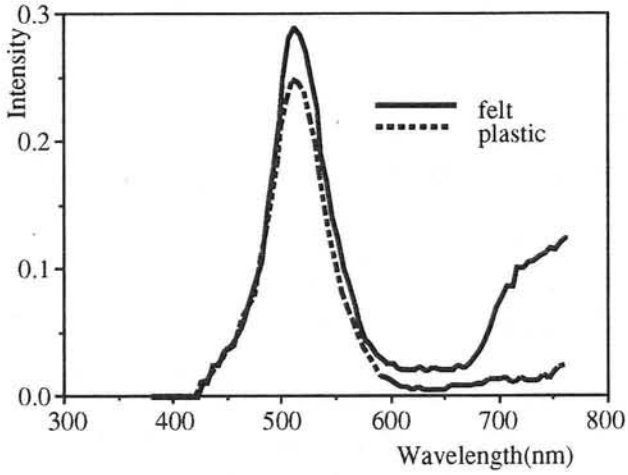
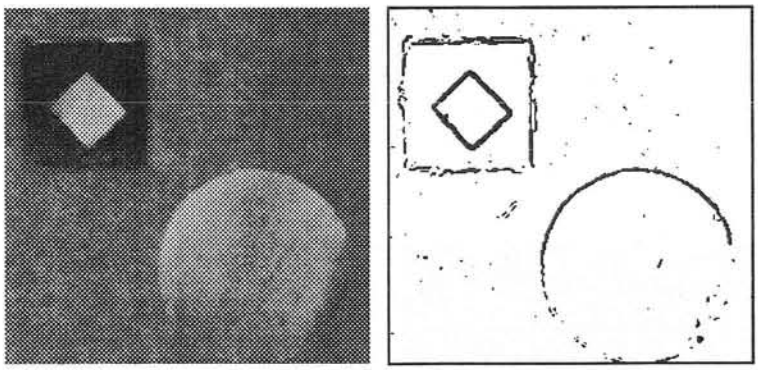
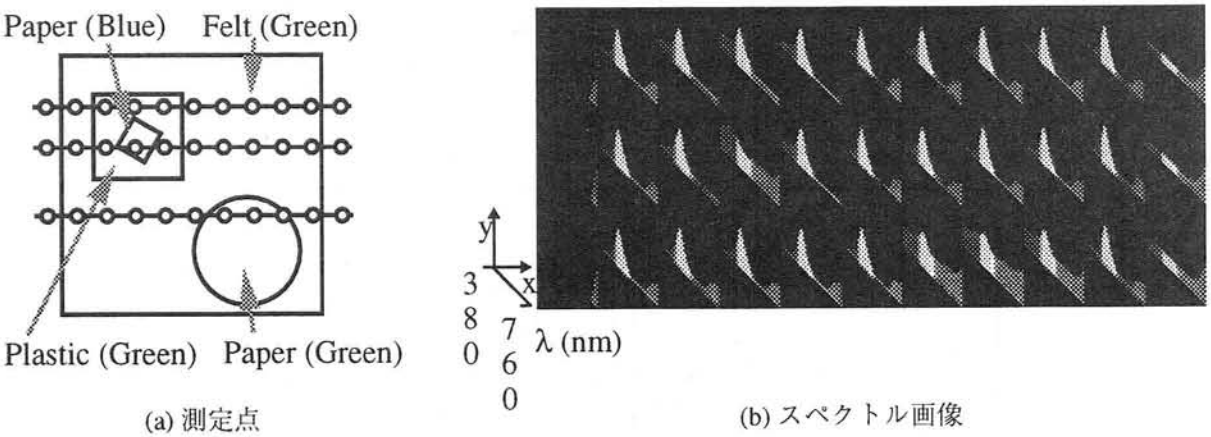


図6-10　フェルトとプラスチックのスペクトル分布



(a) 入力画像　　(b) 濃淡値を基にしたエッジ検出

図6-11　狭帯域フィルタ（λ_{max} = 700nm）を用いたエッジ検出



(a) 測定点　　(b) スペクトル画像

図6-12　スペクトル画像

トの方が強く，この波長帯を利用することで領域が分割できるものと思われる．

700nmに最大透過率を持つ狭帯域フィルタで撮影した画像を図6-11(a)に示す．(b)はエッジ検出の結果である．濃淡画像，カラー画像では検出できなかったプラスチック領域の検出できていることが分かる．

表6-2　相関係数計算結果

列番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
相関係数	0.262	0.790	0.970	0.977	0.735	0.992	0.998	0.994	0.996	0.325	
	0.233	0.843	0.023	0.072	0.737	0.991	0.999	0.998	0.999	0.353	
	0.253	0.998	0.999	0.998	0.999	0.841	0.988	0.928	0.872	0.279	

さらに，図6-9(a)の入力画像に対して，スペクトル画像を用いる．図6-12(a)に測定点を，(b)に得られたスペクトル画像を示す．それぞれの材質でスペクトルの形状が違っていることが分かる．

このスペクトル画像に，まず6.2.1.で示した相関による領域分割手法を用いる．その結果を表6-2に示す．同表の下線の引いてある数値が，ちょうど物体の変わっているところに対応している．フェルトープラスチック，フェルト－紙の場合，同じ緑色のために相関係数が比較的高くなっている．しかし，閾値を0.9に設定することで，分離が可能であることが分かる．

次に6.2.2.で示した主成分分析による領域分割を行なう．今回用いた入力画像には五つの領域があるため，第三主成分まで求めれば十分である．

この結果を図6-13に示す．それぞれの領域に分割できていることが分かる．

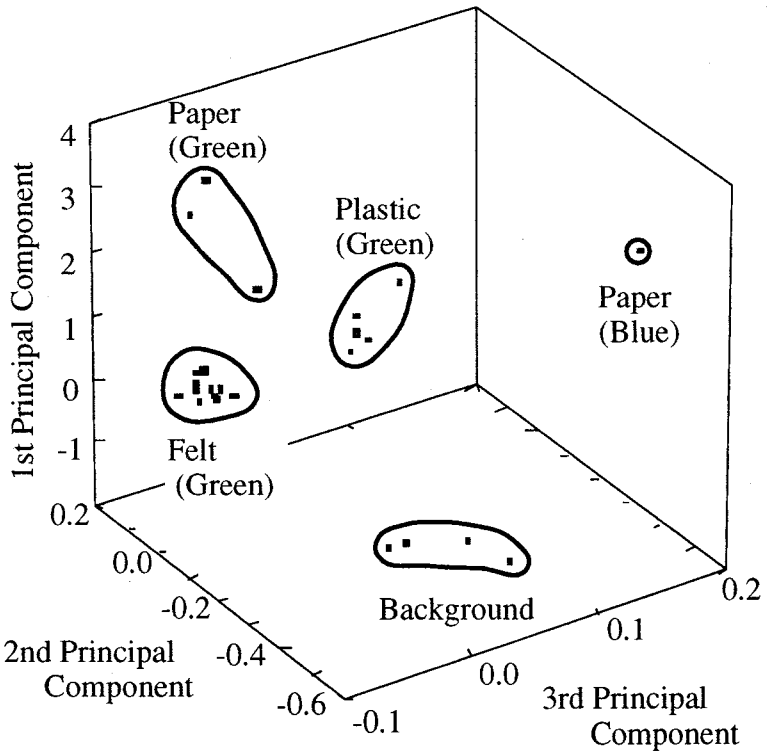


図6-13　主成分分析結果

6.3.3. 検討

以上の結果を表6-3にまとめる．濃淡画像では明るさの違うもの，カラー画像では明るさ・色の違うものの領域分割が可能である．しかし，明るさ・色がほとんど変わらないような対象に関しては分割が不可能になる．また，帯域フィルタを用いた場合，適切な透過波長を選択できれば領域分割が可能になる．しかし，適切な透過波長を選ぶことができないと，分割は難しくなる．これに対し，スペクトル画像では分光強度情報，色情報，濃淡情報すべてを含んでいるため，ほとんどの対象に対して領域分割が可能である．また，スペクトル画像の情報を用いることで，適切な画像入力方法の選択が可能となる．

表6-3　各画像による分別能力

材質の区別＼画像の種類	濃淡画像	RGB カラー画像	狭帯域 フィルタ画像	スペクトル 画像
紙(緑) フェルト(緑)	○	○	△	○
紙(青) プラスチック(緑)	×	○	○	○
フェルト(緑) プラスチック(緑)	×	×	○	○

6.4.まとめ

従来，リモート・センシングの分野のみで用いられているマルチスペクトル画像を，室内の物体を対象に物体認識を行なうため，今回，分光輝度計を用いたスペクトル画像の計測システムを提案し，実際に画像を計測しその表示方法および測定結果を示した．

得られたスペクトル画像のセグメンテーションを行なうための処理として，隣接している画素間での相関を調べ，その相関係数から物体領域を抽出できる可能性を示すことができた．また，物体認識を行なう際の入力方法の適切な選択を行なうための基準画像として利用できる可能性を示した．さらに，主成分分析の統計処理を用いることにより，より高度な認識が行なえることが分かった．

第７章　結論

今日，画像認識の分野において，二値画像，濃淡画像，ＲＧＢカラー画像など様々な種類の画像がその目的に合わせて用いられている．しかし，これらの画像を用いた認識処理が画像から得られる情報をうまく使い切っているとは言い難い．特にカラー画像の場合，持っている色情報を単なる明暗情報の派生としか扱っていないことが多い．これらの情報を有効に使うためにいくつかの方法が考えられるが，物理モデルの導入もその一つである．本論文は，カラー画像の持つ色情報と，それぞれの物体が持つ光の反射現象という物理特性に主眼を置き研究してきた成果をまとめたものである．

第１章では，本研究の指針を明らかにするために，その背景となる画像認識について，物理モデルおよび有色画像の観点から述べた．また，その研究対象として物体間で生じる相互反射現象をあげ，これまで行われてきた画像処理における相互反射現象の処理の問題点を明らかにした．さらに，有色画像としてＲＧＢ画像では不足している情報を補うためにスペクトル画像の提案を行った．

第２章では，有色画像の認識に物理モデルを導入するために，物体表面で生じている光の反射現象について述べた．本研究で対象とした不透明有色物体である，金属物体・非金属物体の表面で生じる光の反射について，反射光の色・強度についてこれまで提案されてきたモデルをまとめた．特に，有色画像の認識のために二色性反射モデルを導入し，表面反射・内部反射の反射率関数およびRGB色空間での分布特徴を示した．また，色についての考察を行った．

第３章では，第２章で導入した二色性反射モデルを基に，これまでのコンピュータ・ビジョンの分野で無視されていた相互反射の定性的なモデル化を行なった．このモデルは主に相互反射現象による物体表面での色変化を扱ったものである．ここでは，二色性反射モデルでは無色であった表面反射を，有色の反射に拡張することによって非金属物体だけではなく金属物体にも同一のモデルを適用できるようにした．このモデルの妥当性を検証するために実際にカラー画像を入力し，RGB色空間中での分布を調べモデルの通りになっていることを確認した．

第４章では，物体間で生じる相互反射現象から三次元情報を推定することを目的にモデル化を行なった．第３章で示した相互反射モデルは，主に相互反射による色現象に着目した定性的なものであり，それらのモデルから三次元情報を推定することは難しい．そこで，定量的に相互反射現象をモデル化するために，第２章で示した表面反射・拡散反射の反射率関数を導入し，各反射成分間での相互反射のモデル化を行なった．このモデルの妥当性をシミュレーションおよび実際のカラー画像を用いて行なったが，満足のいく結果は得られなかった．しかし，第３章および第４章で示した相互反射モデルは，特に複雑なシーンを対象とした画像認識や形状復元に有効であると思われ，新たな画像認識の方向性を示すことができたと思われる．

第５章では，相互反射の解析にアクティブビジョンの考えを導入し，第３，４章で示したような複雑

なモデルを用いることなく，相互反射成分の抽出が容易に行なえることを示した．光源を移動させることにより光源－物体－カメラの位置関係を変化させ，そのときの照明条件の変化により相互反射の発生条件を変える．この変化をRGB色空間での分布の変化として捉えることにより相互反射の抽出を行なった．さらに，光源移動による色変化を扱っているため，相互反射だけではなく表面反射の抽出も同時に行なえた．また，この結果を他の処理結果と融合した一例として質感認識結果の補正を行ない，その有効性を示した．

第６章では，新たな画像としてスペクトル画像を提案した．これまで，スペクトル画像はリモートセンシング分野で利用されてきたが，室内環境での利用はほとんどない．一方で，相互反射現象や条件等色物体などRGBカラー画像でも解析の難しい対象がある．これらは，微妙な波長単位での光学現象であり，RGBフィルタを通すことによりこの微妙な変化を示す情報が失われてしまう．これらの情報を活かすためにスペクトル画像の導入を行なった．現在，一度に可視波長域全体のスペクトル分布を入力できる画像入力装置が存在しないので，分光輝度計を用いたスペクトル画像の入力システムを提案し，実際に画像の計測を行なった．このスペクトル画像を用いて条件等色物体の分離を行ない有効性を示した．また，スペクトル画像は波長毎の強度を持っているため，明るさ，色，特定波長での強度などの情報をすべて含んでおり，物体認識を行なう際の適切な入力方法の選択を行なう基準画像として利用できる可能性を示した．

以上，各論をまとめたが，本研究の意義は，有色画像に含まれる情報を有効に用いるため，幾何工学の物理モデルを導入し，これまで濃淡画像の延長でしかなかった有色画像から，より高度な認識処理が行なえることを示していることである．また，より詳細な，精密な認識を行なうための有色画像として，スペクトル画像を提案したことである．

まず，物理モデルの導入については，本論文で提案した手法は単独では活用が難しく，また第４章で示した相互反射のモデルによる三次元情報の推定や，第５章で示した光源移動による相互反射成分の抽出はその結果だけではそれほど重要な情報ではないかも知れない．しかし，Shape from Reflectin などの物体表面の明るさの変化から形状を求めるような手法や，第５章で示したような質感認識手法との併用によりそれらの結果をより高精度に，より正確にすると思われる．今後，このような物理モデルとの相補的な手法がより高度な認識処理を行なう際，必要になると思われる．また，コンピュータ・グラフィックスのような画像の生成の分野においても，より正確な現実に則した生成を行なうために，物理モデルを導入した画像認識の結果が重要になると思われる．

次に，濃淡画像，RGBカラー画像に続く画像としてスペクトル画像を提案した．これは，第３章，第４章の相互反射の解析でRGBカラー画像での解析に限界を感じたのが発端であった．単純な対象での基礎実験しか行なっていないが，工業応用など幅広い活用が考えられる．また，機械では分からない人間の感じることのできる微妙な変化を分光分布で捉えることにより，官能検査など現在脚光を浴びている感性工学分野への応用も可能であると思われる．

今後，有色画像認識の対象として，異方性反射物体のような入射角および反射角の変化によって色が

変化するようなものが考えられる．現在，塗装分野および測光・測色の分野で注目されている対象であるが，本論文で示したような物理モデルの導入や，スペクトル画像が重要な鍵を握っていると思われる．また，通常の画像認識においても，本論文が少しでも寄与できれば幸いである．

謝　辞

本研究を行なう機会を与えてくださり，日頃から研究の方針，内容について細やかなご助言，ご指導を賜わりました大阪大学基礎工学部井口征士教授に心から感謝いたします．また，国内はもとより，国際会議での発表の機会を与えていただいたことは，本研究を行なう上で得難い経験となりました．重ねてお礼申し上げます．

本研究をまとめるにあたって，御厚情あふるるご指導，数々の有益なご教示を賜わりました辻三郎教授，谷内田正彦教授に深く感謝の意を表します．佐藤宏介助教授には，研究を始めた当初より，終始研究全般にわたる具体的なご指導，ご助言を賜わりました．また，本論文の作成にあたり事細かな検討を加えていただきました．ここに慎んで深謝の意を表します．

大阪大学基礎工学部在学以来，修士課程，博士課程と授業などを通して，学生生活ならびに研究活動に様々なご指導，ご鞭撻を賜わりました大阪大学基礎工学部白江公輔教授（現，摂南大学），坂和愛幸教授（現，近畿大学），須田信英教授，田村坦之教授，笠井健教授，木村英紀教授に厚くお礼申し上げます．

加藤博一助手には，研究にあたって数々の有益なご教示，ご討議を頂きました．また，コンピュータをはじめ実験装置などの研究環境をいろいろと整えていただきました．深く感謝いたします．

井口研究室における研究生活では，沼田卓久教授，才脇直樹助手に様々なご理解ご協力を賜わりました．ここに深謝いたします．最後になりましたが，その他，日頃から各方面で研究にご協力頂いた井口研究室の方々に深くお礼申し上げます．

参考文献

[Bajcsy 90] R.Bajcsy, S.W.Lee, A.Leonardis：“ Color Image Segmentation with Detection of Highlights and Local Illunimation Induced by Interreflections”, Proc. of ICPR, pp.785-790, (1990)

[Design] 中田満雄，北畠耀，細野尚志：“デザインの色彩”，日本色研事業株式会社，(1983)

[Drew 91] B.V.Funt, M.S.Drew, J.Ho：“ Color Constancy from Mutual Reflection”, Int. J. Computer Vision, Vol.6, No.1, pp.5-24, (1991)

[Fujimoto 91] 藤本彰：“ＣＧによる照明シミュレーションの沿革と今後の動向”，PIXEL, No.106, pp.133-141, (1991)

[Greenberg 85] M.F.Cohen, D.P.Greenberg：“ The Hemi-Cube; A Radiosity Solution for Complex Environment”, Computer Graphics, Vol.19, No.3, pp.31-40, (1985)

[Hashimoto 91] 橋本理，加藤博一，森脇耕介，佐藤宏介，井口征士：“カラー画像を用いた材質感の判別と相互反射の検出”，信学論，J75-D-II, 6, pp.727-735, (1991)

[Ishihara 89] 石原英，米田聡：“ カラー視覚装置の開発 ”，OMRON TECHNICS, Vol.29, No.3, pp.9-16, (1989)

[Jang 91] Y.Jang：“ Identification of Interreflection in Color Images Using a Physics-Based Reflection Model ”, Proc. of CVPR, pp.632-637, (1991)

[Kawata 88] 河田聡，埜田友也，南茂夫：“ 画像計測における横軸(X-Y座標)と縦軸(光強度)の変換手法 ”，インターフェース，No.137, pp.172-191, (1988)

[Kawata 88] 河田聡：“分光学を応用した顕微鏡画像処理”，O plus E, No.85, pp.87-94, (1988)

[Kikai] 日本機械学会：“伝熱工学資料”，第６章　熱放射

[Lee 92] S.W.Lee, R.Bajcsy：“ Detection of Specularity Using Color and Multiple Views”, Proc. of ECCV, pp.99-114, (1992)

[Manabe 92] 眞鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士：“相互反射による色変化についての考察”，第35回自動制御連合講演会，4003, pp.555-556, (1992)

[Manabe 94a] 眞鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士：“連続スペクトル画像による物体認識についての考察”，画像の認識・理解シンポジウム，Vol.I, pp.209-216, (1994)

[Manabe 94b] Y.Manabe, K.Sato, S.Inokuchi：“An Object Recognition through Continuous Spectral Images”, Proc. of 12th ICPR, Vol.I, PA4.33, pp.858-860, (1994)

[Matsui 94] 松井美智子，桑野浩一，戸知俊彦，佐竹いずみ：“塗膜のシルキー感，金属感の評価尺度”，日本色彩学会誌，Vol.18，No.1，pp.80-81，(1994)

[Nagata 92] 長田典子，亀井光仁，赤根正樹，中嶋紘之：“感性計測技術に基づく真珠品質評価システムの開発”，電学論C，112巻2号，pp.17-22，(1992)

[Nandhakumar 94] N.Nandhakumar，V.Velten：“Thermophysical Affine Invariants from IR Imagery for Object Recognition”，Proc. of Image Understanding Workshop，(1994)

[Nayar 90] S.K.Nayar，K.Ikeuchi，T.Kanade：“Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives”，Proc. of Image Understanding Workshop，pp.185-212，(1990)

[Nayar 91] S.K.Nayar，K.Ikeuchi and T.Kanade：“Shape from Interreflection”，Int. J. Computer Vision，Vol.6，No.3，pp.173-195，(1991)

[Ohta 85] Y.Ohta：“Knowledge-based Interpretation of Outdoor Natural Color Scenes”，Pitman Advanced Publishing Program，(1985)

[Okamoto 93] A.Okamoto，Y.Nomura，S.Fujii：“Shape Estimation of Multiple Objects by Photometric Stereo”，Proc. of ACCV，pp.101-104，(1993)

[Oubutsu 86] 応用物理学会光学懇談会編：“色の性質と技術”，朝倉出版，(1986)

[Qing 90] 甘青，小谷一孔，宮原誠：“(R,G,B)→(H,V,C)色空間変換による色情報の特徴解析”，信学技報，IE90-66，pp.31-36，(1990)

[Remote 81] 日本リモートセンシング研究会編：“リモートセンシング実用講座　画像の処理と解析”，共立出版，(1981)

[Seki] 関重広：“照明光学講義”，pp.62-64，東京電機大学出版局

[Shafer 88] G.J.Klinker，S.A.Shafer and T.Kanade：“The Measurement of Highlights in Color Images”，Int. J. Computer Vision，Vol.2，No.1，pp.7-32，(1988)

[Shafer 90] G.J.Klinker，S.A.Shafer and T.Kanade：“A Physical Approach to Color Image Understanding”，Int. J. Computer Vision，Vol.4，No.1，pp.7-38，(1990)

[Shikisai] 日本色彩学会：“色彩科学ハンドブック”，東京大学出版会

[Suekuni 90] 末国健一，森脇耕介：“電子シャッター機能を用いたカラー画像入力法”，信学会春季大会，D-428，pp.7-180，(1990)

[Tajima 90] 田島譲二，岩川正人：“Rainbow Range Finder による距離画像取得”，信学論，J73-D-II，No.3，pp.374-382，(1990)

[Tian 93] Y.Tian，H.Tsui：“Shape from Specular reflection using Image Sequence”，Proc. of ACCV，pp.97-100，(1993)

[Tominaga 90] 富永昌治：“カラー画像の色分類と分割”，情報処理学会論文誌，Vol.31，No.11，pp.1589-1597，(1990.11)

[Tominaga 91] S.Tominaga：“Surface Identification Using the Dichromatic Reflection Model”，，

IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., Vol.13, No.7, pp.658-669, (1991)

[Tominaga 92a] 富永昌治，大橋伸一郎："物体のカラー反射モデル"，情処学論，Vol.33, No.1, pp.37-45, (1992)

[Tominaga 93a] 富永昌治："カラー反射モデルを用いた相互反射の解析"，情報処理学会論文誌，Vol.34, No.2, pp.302-311, (1993)

[Tominaga 93b] 富永昌治："３次元空間における物体色のリアルな生成とその評価"，情報処理学会論文誌，Vol.34, No.2, pp.289-301, (1993)

[Torrance 67] K.E.Torrance, E.M.Sparrow："Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces"，J. Opt. Soc. Am., Vol.57, No.9, pp.1105-1114, (1967)

[Yaguchi 90] 矢口博久："視覚系と表色系の関係"，信学技報，IE90-62, pp.1-7, (1990)

[Yamada 94] 山田正毅，宮本祐三："自動車用上塗り塗料の動向，［工業材料］臨時増刊号 '94 塗料・塗装技術ガイド"，Vol.42, No.7, pp.95-104, (1994)

[Yamashita 91] 山下浩生，新保賀津雄："ラジオシティとレイ・トレーシングを組み合わせた照明シミュレーション"，PIXEL, No.106, pp.142-144, (1991)

[Yokoi 88] 横井茂樹："質感表現のアルゴリズム"，PIXEL, No.73, pp.103-106, (1988)

[Yoshida 92] 吉田豊彦："アニソトロピックカラー，塗膜の質感のためのオリエンテーション"，アニソトロピックカラーの計測と塗膜質感講演会資料，pp.1-8, (1992)

[Zwimpfer] M.Zwimpfer："図解色彩学入門＝色：光・目・知覚"，pp.72-135, 美術出版社

研究発表リスト

[学術論文]

(1) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："光源移動による相互反射の検出"，信学会論文誌，(1995.1 掲載予定)

(2) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："物体認識のためのスペクトル画像による材質の判別"，信学会論文誌，(投稿中)

(3) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："カラー画像における相互反射のモデル化と抽出"，システム制御情報学会，(投稿中)

[国際会議]

(1) Yoshitugu Manabe, Kosuke Sato and Seiji Inokuchi："Detecting Interreflection by Moving Light"，Proc. of ACCV，pp.109-112，(1993)

(2) Yoshitsugu Manabe, Kosuke Sato and Seiji Inokuchi："An Object Recognition through Continuous Spectral Images"，Proc. of 12th ICPR，vol.I，PA4.33.，pp.858-860，(1994)

[研究会・全国大会]

(1) 真鍋佳嗣，加藤博一，佐藤宏介，井口征士："距離画像・カラー画像のイメージフュージョン"，パターン計測部会研究会，(1990)

(2) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，加藤博一，井口征士："カラー画像からの相互反射成分の抽出"，信学会春季大会，D-683，(1991)

(3) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："相互反射成分のカラー画像からの抽出"，信学会春季大会，D-605，(1992)

(4) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："相互反射による色変化についての考察"，第35回自動制御連合講演会，pp.555-556，(1992)

(5) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："光源移動による相互反射の検出"，信学会春季大会，D-581，(1993)

(6) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："スペクトル画像を用いた異質同色物体の分離"，信学会春季大会，D-567，(1994)

(7) 真鍋佳嗣，佐藤宏介，井口征士："連続スペクトル画像による物体認識についての考察"，画像の認識・理解シンポジウム，Vol.I，pp.209-216，(1994)

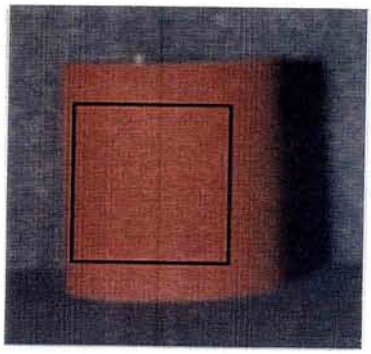


図２-９(a)

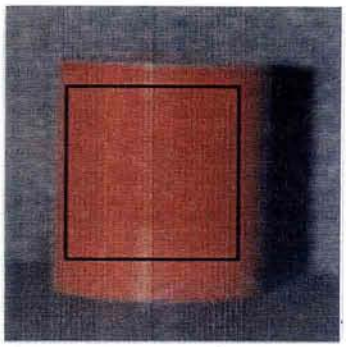


図２-１２(a)

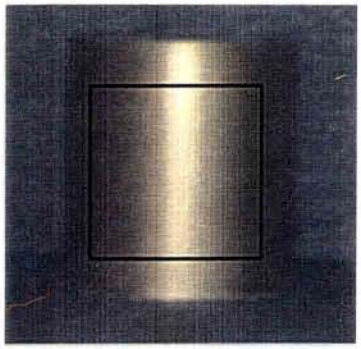


図２-１４(a)

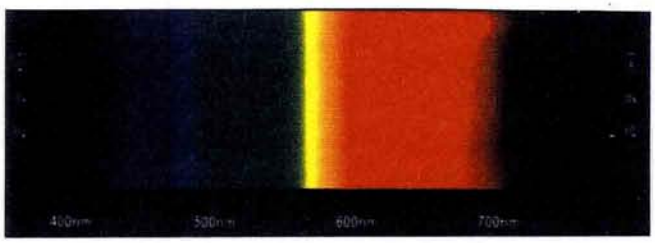
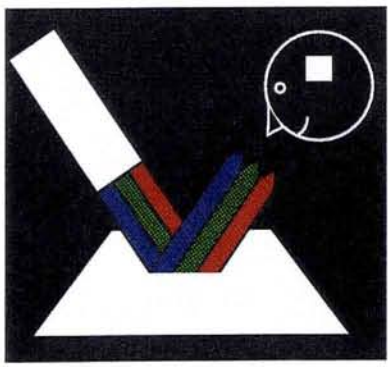
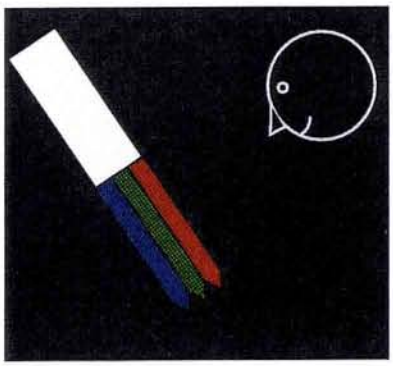


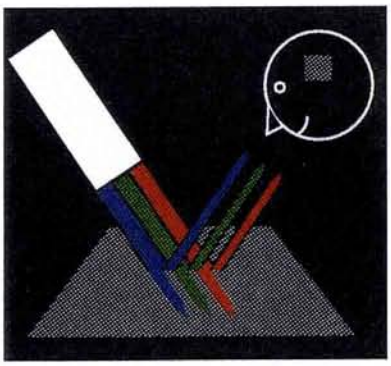
図２-１５　色スペクトル



(a)　白



(b)　黒



(c)　灰色

図２-１７

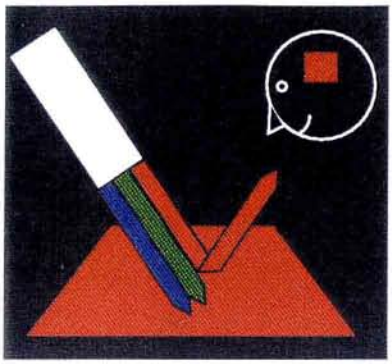


図2-18　赤

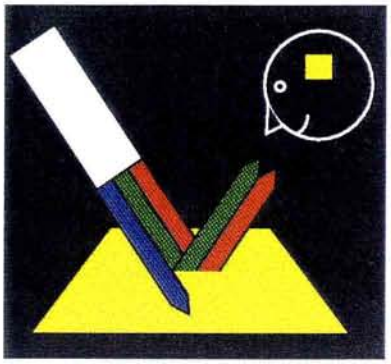


図2-19　黄色

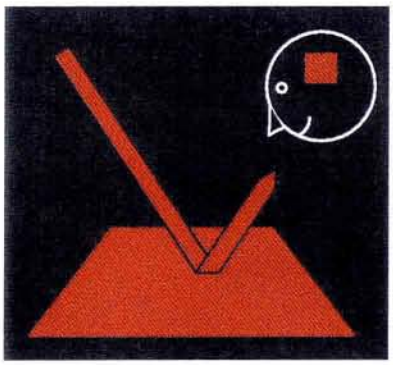


図2-20　赤

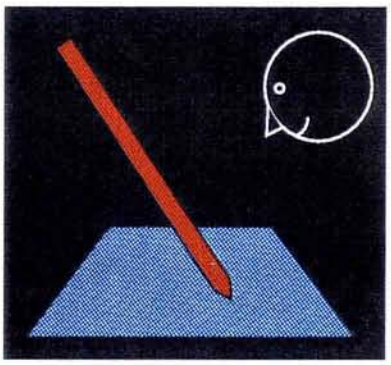
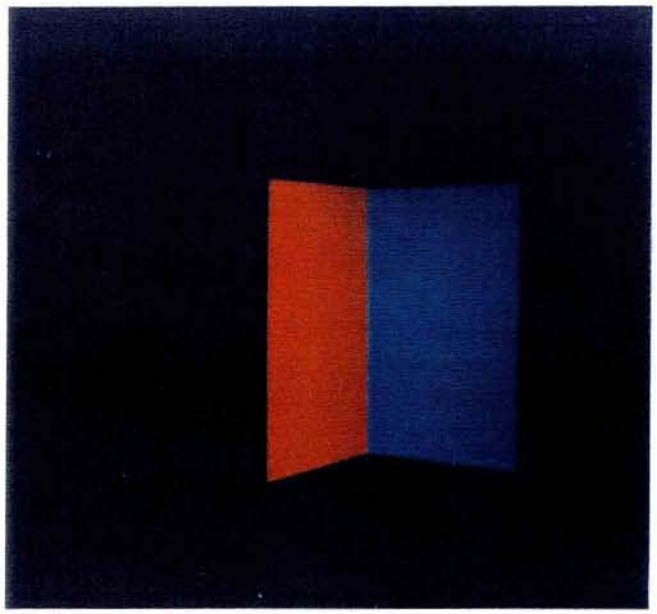
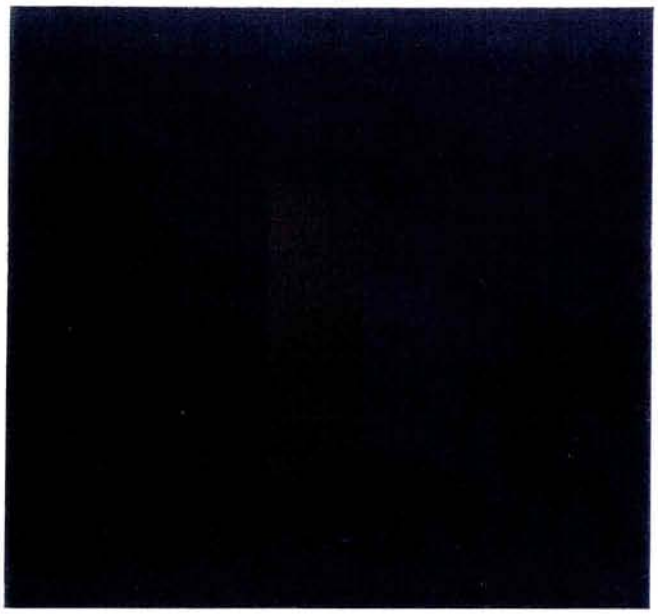


図2-21　シアン



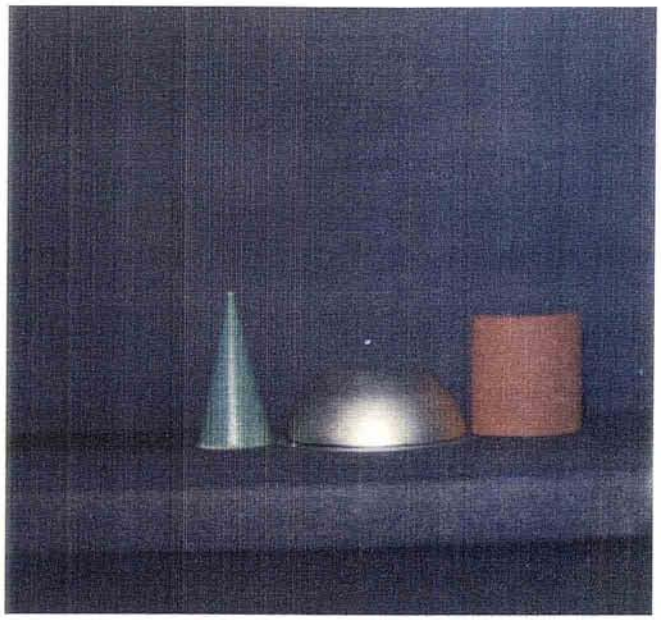
(a) 入力画像



(b) 相互反射抽出結果

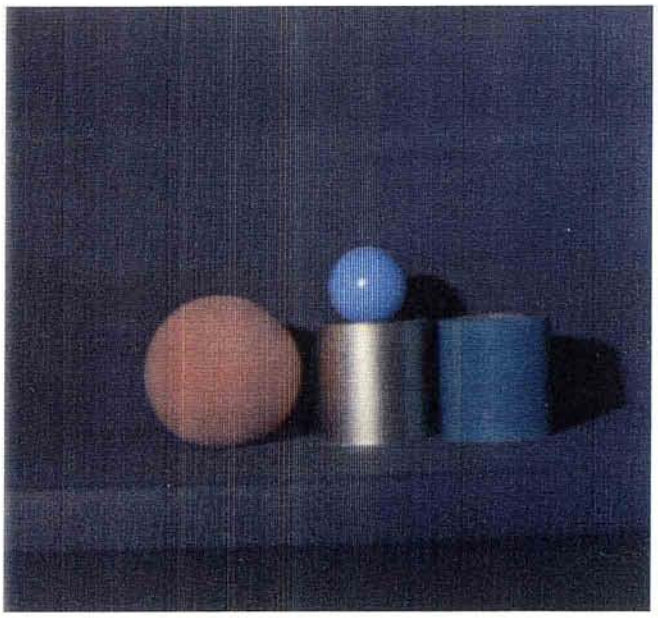
図4-22　相互反射抽出（40°，60°）

(a) 基準画像

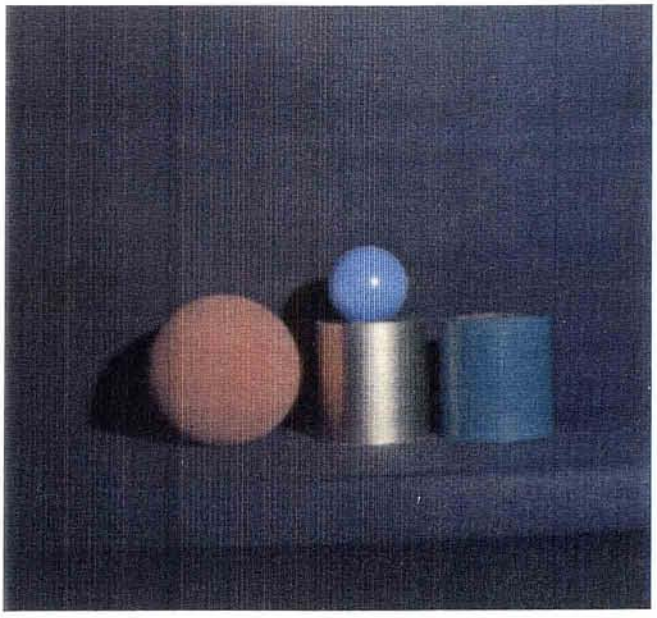


(b) 対照画像

図 5 - 1 0　入力画像



(a) 基準画像



(b) 対照画像

図 5 - 1 3　入力画像(2)

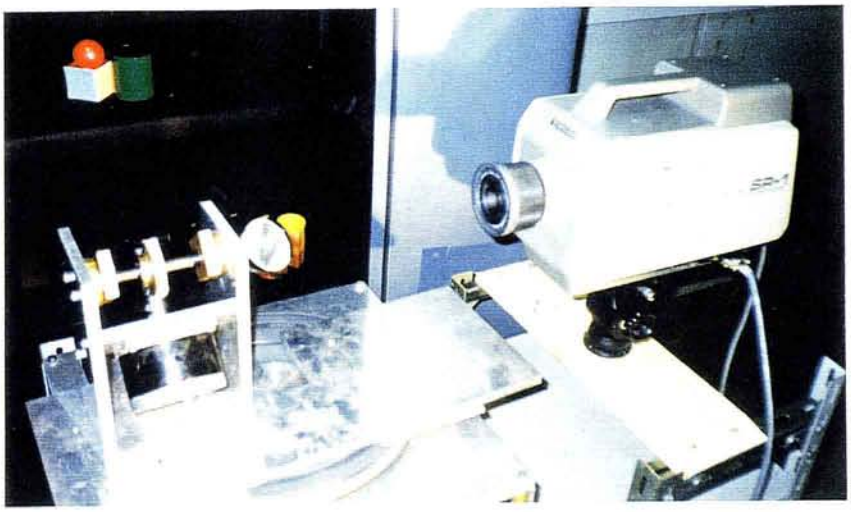
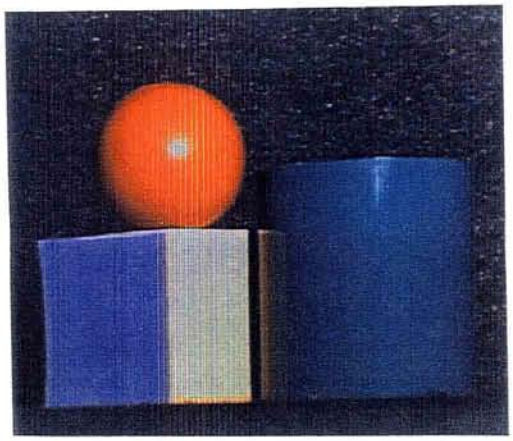
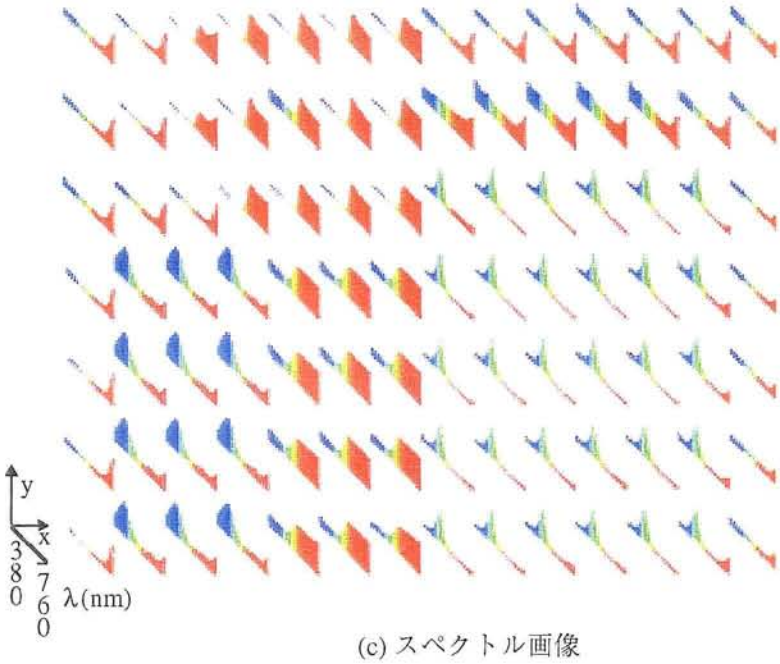


図6-2　入力システム



(a) 対象シーン



(c) スペクトル画像

図6-3　スペクトル画像測定結果

図6-9 (a) 緑色の異種同色物体

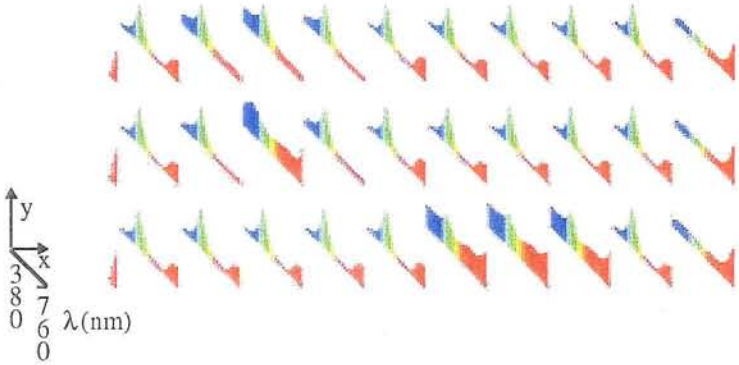


図6-12 (b) スペクトル画像