2009年度　卒　業　論　文

リアルタイム3DCGにおけるシャボン玉の薄膜干渉の透過を考慮した影に関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号　M0106325
天摩 翔

Media Science

2009 年度　　卒　業　論　文　概　要

論文題目

リアルタイム 3DCG におけるシャボン玉の薄膜干渉の透過を考慮した影に関する研究

メディア学部 **学籍番号：M0106325**	**氏名**	天摩 翔	**指導教員**	渡辺 大地 講師

キーワード	3DCG、シェーダ、シャボン玉、干渉光、構造色

近年、ハードウェアの処理能力の向上によって、様々な物理現象や自然現象を表現することが可能となっている。映像コンテンツやビデオゲームなど、3DCG を用いる分野においても、自然現象を写実的に表現することは臨場感の面で大きな役割を果している。写実性を高めるためには、物体における光の反射、屈折、干渉などの光学現象を考慮する必要があり、本研究ではその中でも、光の干渉現象について着目した。光の干渉は、複数の光の波が重なることによって波の振幅が変化する現象であり、光の干渉による発色現象を構造色と呼ぶ。構造色は、光の波長よりも小さな微細構造を持つ物体に光が衝突し、干渉が起きた際に発生する。構造色を再現する研究は既に行われており、シャボン玉やコンパクトディスクといった物の構造色を再現できるようになっている。しかし、先行研究の手法ではシャボン玉の影を再現することは出来ない。シャボン玉の薄膜の反射における干渉は考慮しているが、透過における干渉を考慮していないためである。

本研究では、シャボン玉の影を描画する手法を提案する。写実的なシャボン玉の影を再現するために、薄膜干渉の透過における構造色描画の実現を目的とした。過去の構造色描画の高速化を実現した手法を基にして、薄膜干渉の透過における構造色の色情報の求め方を定義した。光の強度によって変化する影の明暗は、光の反射に関する等式であるフレネルの式を用いることによって、現実に則した影を再現した。ゲームや映像コンテンツなどに利用することを想定し、高速化処理を行うようにした。高速化処理を実現するために、薄膜干渉の透過によって発生する構造色の色情報の計算結果をデータベース化した。そのデータベースを参照することで、計算時間を短縮して色情報を求めることにより、高速な描画処理を可能にした。シャボン玉の影の生成結果から、実際に存在するシャボン玉の影の様子と比較し、検証した結果、本手法についての有効性を確認した。また、高速化処理によって、シャボン膜の厚みの時間経過に伴う変化に対応したことにより、写実的なシャボン玉の影のシミュレートが可能となった。

目 次

第 1 章　はじめに **1**
1.1　研究背景と目的 1
1.2　本論文の構成 4

第 2 章　提案するシャボン玉の影の生成手法 **5**
2.1　構造色について 5
2.2　シャボン玉の影について 6
2.3　透過における薄膜干渉の光路差 7
2.4　構造色表現手法 10
2.5　透過光の強度の計算 12
2.6　構造色と光強度のデータベース化 13
2.7　影の描画 15

第 3 章　動作の検証 **19**
3.1　実験環境 19
3.2　実験結果 19

第 4 章　まとめ **24**

謝辞 **26**

参考文献 **27**

図 目 次

1.1 加藤らの手法によるシャボン玉の描画結果 3
1.2 Maxwell Render によるシャボン玉の描画結果 3

2.1 構造色を放つシャボン玉 6
2.2 構造色を放つ DVD-R 6
2.3 シャボン玉の影 6
2.4 透過における薄膜干渉の光の経路 8
2.5 シャボン玉を厚みの構造 9
2.6 光の強度とフレネルの関係 13
2.7 データベースの配置図 15
2.8 生成したテクスチャ 15
2.9 地面に向かう光線 16

3.1 地面の画像 20
3.2 アスファルトの時のシャボン玉の影の生成結果 21
3.3 タイルの時のシャボン玉の影の生成結果 22

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

近年、ハードウェアの処理能力の向上によって、様々な物理現象や自然現象を表現することが可能となった。映像コンテンツやビデオゲームなど、3 次元コンピュータグラフィックス (以下 3DCG) を用いる分野においても、自然現象を写実的に表現することは臨場感の面で大きな役割を果している。写実性を高めるためには、物体における光の反射、屈折、干渉などの光学現象を考慮する必要があり、現在までに数多くの光学現象に関する研究 [1] [2] [3] [4] がある。

光学現象のうちの重要なものの 1 つに、光の干渉がある。光は光波とも呼ばれ、波の性質を持っている。光の干渉は複数の光の波が重なることによって波の振幅が変化する現象である。太陽や白熱灯から発せられる光は、様々な可視領域にある波長の光線が混ざった状態であり、干渉によって光線内のある特定の波の強さが変化することで構造色が発生する。構造色とは光の波長よりも小さな微細構造を持つ物体に光が衝突し、干渉が起きた際に発生する発色現象のことである。この微細構造には、マイクロメートル単位の非常に薄い厚さを持つ薄膜や、薄膜が何層も重なった多層膜、回折格子などが該当する。微細構造を持つ物体の例として、シャボン玉やコンパクトディスクなどがある。シャボン玉はそれ自体は透明であるが、薄膜の微細構造による光の干渉によって構造色を発して色付いて見える特徴を持っている。シャボン玉を写実的に描画するには、光の干渉を考慮しなければ

ならない。3DCG の分野においても光の干渉によって生じる構造色を再現する研究 [5] [6] [7] や、シャボン玉を写実的に再現する研究 [8] [9] [10] は数多く行われている。構造色の表現手法の中でも高速かつ写実的な描画に成功した手法として佐伯ら [11] の研究があり、それを改良して、シャボン玉の薄膜厚みの動的変化に対応させた加藤ら [12] の研究がある。佐伯らの手法は光の干渉によって起こる構造色の情報を事前に計算し、データベースにまとめたものである。加藤らの手法では佐伯らの手法に時間の経過による物体の微細構造の変化に関する要素を加える事で、構造色の情報の変化に対応している。また、リアルタイムでの処理を実現しているため、映像コンテンツやビデオゲームに対応することが可能となっている。図 1.1 は加藤らの手法によるシャボン玉の描画結果である。しかし、これらの既存の手法では薄膜の反射における干渉しか考慮していないため、薄膜の透過における干渉が大きく関わるシャボン玉の影を再現することはできない。光学現象を忠実に計算することで薄膜の透過干渉による構造色を再現しているレンダラーとして「Maxwell Render」(以下 MR)[13] がある。MR にはシャボン膜を再現するためのバブルマテリアルが標準で用意されている。バブルマテリアルとは、シャボン膜で起こる光学現象の計算を行うための情報を付加するものである。バブルマテリアルを適応することで、薄膜干渉の反射と透過における構造色を描画できる。図 1.2 は MR でシャボン玉を描画した結果である。MR は薄膜干渉の反射における構造色だけでなく、薄膜干渉の透過における構造色も再現可能であるが、忠実に光学現象を計算しているため、描画処理が完了するまでにとても多くの時間がかかる欠点があり、リアルタイムに処理することができない。

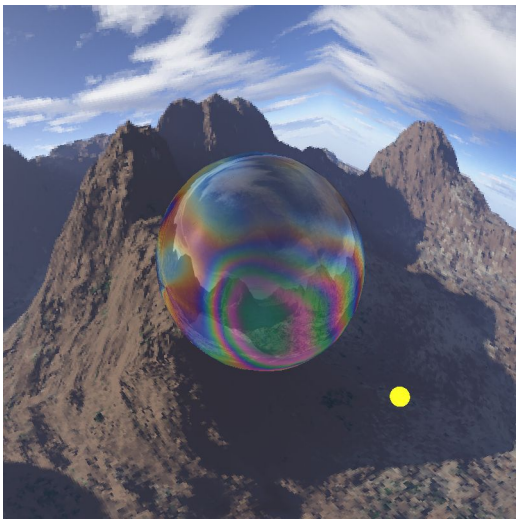


図 1.1: 加藤らの手法によるシャボン玉の描画結果

図 1.2: Maxwell Render によるシャボン玉の描画結果

本研究ではリアルタイム 3DCG における薄膜干渉の透過を考慮したシャボン玉の影の生成手法を提案する。構造色の表現には佐伯らの研究を基に、薄膜干渉の透過における構造色を求めた。シャボン玉の影の生成には光源からシャボン玉に光線を飛ばし、シャボン玉を通過した光線と地面が交差した時の位置を求め、その地点の透過光の強度の情報と薄膜干渉の透過によって生じた構造色の色情報を組み合わせることで影の色情報を求めた。影の明暗は、光の反射に関する等式であるフレネルの式によって導き出した透過光の強度から求めた。また、本研究では映像コンテンツやビデオゲームにおいて本手法を使用することを想定し、リア

ルタイムに描画処理を行うようにした。薄膜干渉の透過における構造色を事前に計算し、データベースにまとめることで高速化を実現した。本手法で生成した影の画像と実際のシャボン玉の影の画像を比較し、検証を行った結果、本手法についての有効性を確認した。

1.2　本論文の構成

本論文は全 4 章で構成する。第 2 章では、構造色とシャボン玉の影についての解説と本研究の手法、及び実装方法について述べる。第 3 章では様々な状況における実行結果とリアルタイム性についての検証と考察を行う。最後に、第 4 章では本研究の成果をまとめ、今後の展望について述べる。

第 2 章

提案するシャボン玉の影の生成手法

本章ではシャボン玉の影の特徴と光学現象のメカニズムを解析し、3DCG による薄膜干渉の透過を考慮したシャボン玉の影を生成する手法について述べる。

2.1 構造色について

構造色とは、光の波長よりも小さな構造を物体が持つことで色を発する現象で、光の干渉や回折、散乱によって起こる発色現象の総称である。自然界で見ることができる構造色の多くは光の干渉によって起こっている。これは、光の干渉は特定の色となる光の強度を著しく高めるからである。また、構造色は光の性質によって発色しているため、光の強さが変化しない特徴や、視点や光源の位置や角度によって色が変化する特徴を持つ [14]。

構造色が生じる物体には様々なものがあり、代表的なものとしてシャボン玉やコンパクトディスクがある。図 2.1 は構造色を放つシャボン玉、図 2.2 は構造色を放つ DVD-R の写真である。また、動物の体毛や昆虫の外骨格、宝石の中にも構造色を発するものがある。具体的な例としては、動物の体毛では、クジャクの羽やハトの首周りの羽、昆虫では、コガネムシやモルフォ蝶のりん粉、宝石では、オパール等がある [15] [16] [17] [18]。

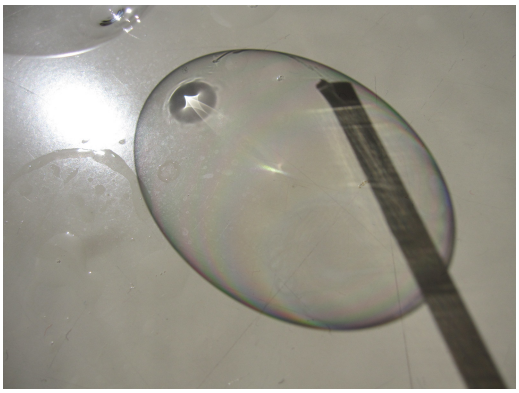
図 2.1: 構造色を放つシャボン玉

図 2.2: 構造色を放つ DVD-R

2.2　シャボン玉の影について

図 2.3 はシャボン玉の影である。図 2.3(a) は膨らましたばかりのシャボン玉の影であり、図 2.3(b) は図 2.3(a) からある程度時間が経過した後のシャボン玉の影である。

(a) 観測時のシャボン玉の影



(b) 時間経過した後のシャボン玉の影

図 2.3: シャボン玉の影

シャボン玉はそれ自体は透明であり、色付いていないにも関わらず、光が透過して映る影には色付くという特徴がある。これは、シャボン玉に差し込む光がシャボン玉の薄膜の微細構造内で干渉を起こして、特定の色の光が強まり地面に映るためである。図 2.3(a) から、シャボン玉の影の色は、縁の方になるにつれて特定の色が強くでるという特徴もある。図 2.3(a) と図 2.3(b) を比較すると、時間経過

に伴い影の色に変化が起きている。さらに時間が経過すると影に色はでなくなる。これは、シャボン玉における構造色は薄膜の厚みによって、干渉で強まる色が変化するからである。シャボン玉の成分はほとんどが水であるため重力の影響を受け、時間経過に伴いシャボン玉の薄膜の上方の膜は薄く、下方の膜になるにつれて徐々に厚くなっている。このため、シャボン玉の薄膜の厚みは一定ではない。本研究ではシャボン玉の薄膜の厚みの範囲を 5〜20000nm [19] とする。

2.3 透過における薄膜干渉の光路差

シャボン玉を透過する光は、薄膜内を通過して屈折、反射を起こすことで複数の光が重なり合い干渉が起こる。図 2.4 に透過における薄膜干渉の光の経路を示す。n_0 は空気中の屈折率、n_1 は薄膜中の屈折率である。本研究では n_0 を 1.0003、n_1 を 1.3330 とした。d は薄膜の厚さである。また、θ_i、θ_o、θ_r、θ_t はそれぞれ光源からの入射角、反射角、屈折角、出射角である。本研究では光源は太陽光を想定し、平行光源による干渉について述べる。平行光源とは太陽光のように、無限遠からの光を想定した光源であり、光の強さは変化することなく一定である。図 2.4 において、I は入射光を表す。

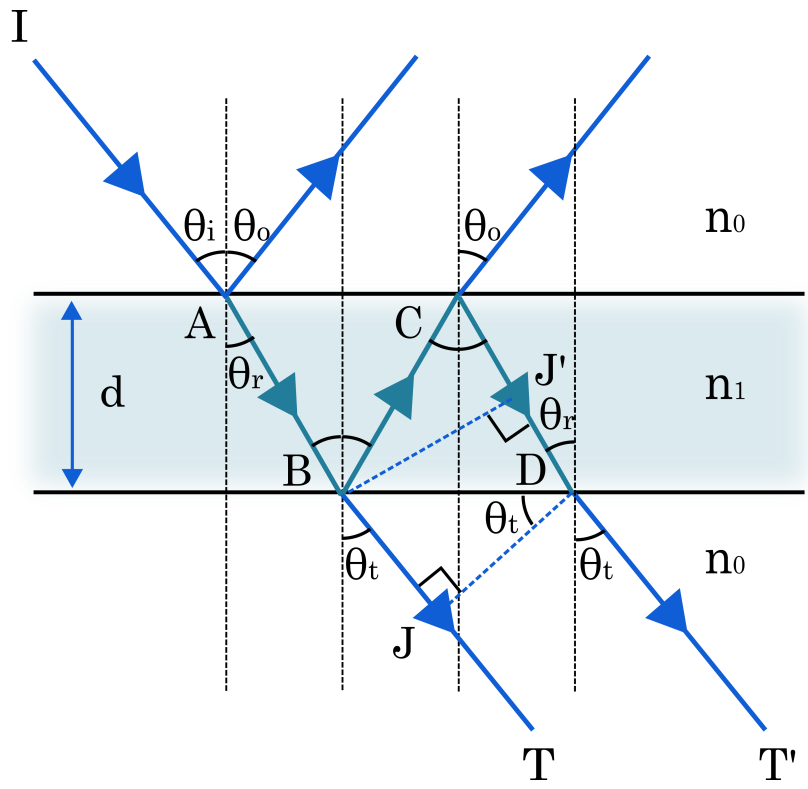


図 2.4: 透過における薄膜干渉の光の経路

I から入射して薄膜を透過する光について述べる。透過する光は 2 つの異なる経路を通ると考えると、1 つは $I \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow T$ のように薄膜を透過する経路である。もう 1 つは $I \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow T'$ のように薄膜内で 2 度反射をして薄膜を透過する経路である。図 2.4 の場合、光は 2 つの異なる経路を通ったことによって、経路 BCJ' において光学的距離に差が生じる。光学的距離とは、実際に光が進んだ距離に光が透過した媒質中の屈折率を掛け合わしたときの距離である。この光学的距離の差のことを光路差と呼ぶ。光路差が生じることで光の波の位相がずれて、2 つの光の波が経路 JT と経路 DT' で干渉を起こす。薄膜干渉の透過を考慮した構造色を計算するためには、光路差を求める必要がある。

ここで透過における光路差 Δ_t は式 (2.1) となる。

$$\begin{aligned} \Delta_t &= n_1(\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD}) - n_1\overline{AB} - n_0\overline{BJ} \\ &= n_1(\overline{BC} + \overline{CD}) - n_0\overline{BJ} \end{aligned} \tag{2.1}$$

入射角と屈折角の関係を表した法則であるスネルの法則を用いて式 (2.1) を整理する。スネルの法則は式 (2.2) である。

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = \frac{n_1}{n_0} \tag{2.2}$$

式 (2.1)、及び式 (2.2) より、透過の光路差 Δ_t は式 (2.3) となる。

$$\Delta_t = d\left(\frac{n_1^2}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2\sin^2\theta_i}} + \frac{n_1^2 - 2n_0^2\sin^2\theta_t}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2\sin^2\theta_t}}\right) \tag{2.3}$$

さらに、透過の干渉における光路差は光源の入射角 θ_i に強く依存する。このことから、反射の法則、スネルの法則式 (2.2) により、

$$\theta_i = \theta_o = \theta_t$$

上記より、式 (2.3) は、式 (2.4) となる。

$$\Delta_t = 2d\left(\sqrt{n_1^2 - n_0^2\sin^2\theta_i}\right) \tag{2.4}$$

次に、薄膜の厚みについて述べる。シャボン玉の薄膜は重力の影響を受け、上方の膜は薄く、下方になるにつれて膜は徐々に厚くなる。図 2.5 はシャボン玉の厚みの構造を表す。g は重力による影響を表す。$d_{\min}$、$d_{\max}$ はそれぞれ薄膜の厚みの最小値と最大値である。a はシャボン玉の最上部から任意の位置における垂直距離の長さを示し、d_a はその位置の薄膜の厚みである。h はシャボン玉の直径である。

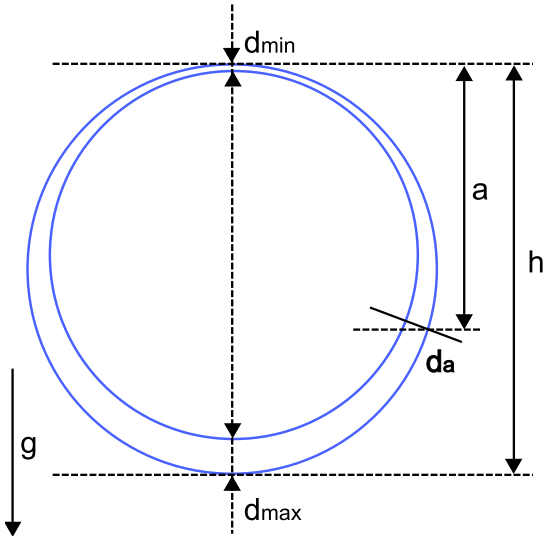


図 2.5: シャボン玉を厚みの構造

ここで、任意の位置における薄膜の厚み d_a は、式 (2.5) で求めることができる [20]。e は自然対数の底とする。

$$d_a \approx d_{\min} e^n \tag{2.5}$$

このとき、n は式 (2.6) となる。

$$n = \frac{a}{h} \ln \left(\frac{d_{\max}}{d_{\min}} \right) \tag{2.6}$$

2.4 構造色表現手法

構造色を 3DCG で再現する研究は数多く存在しているが、その中でも高速かつ写実的な画像を生成することに成功した研究として、佐伯ら [11] の構造色レンダリング手法がある。佐伯らは、事前に構造色の色情報の計算結果をまとめた色情報のデータベースを生成して、データベースをスクリーンに描画する際に利用することで構造色の計算処理を省略し、処理の高速化に成功した。

本手法では佐伯らの構造色の計算手法を基に、薄膜干渉の透過を考慮した構造色の計算手法を提案する。光路差は光の波の位相に影響を与えるため、光路差から色情報を表す為には光の波長の情報が必要となる。複数の波による干渉光を表す場合、n 個の波 f による干渉波を表す数式は式 (2.7) となる。ここで登場する A は振幅、$(\omega t + \delta)$ は波の位相である。

$$\begin{aligned} f_1 &= A_1 \cos(\omega t + \delta_1) \\ f_2 &= A_2 \cos(\omega t + \delta_2) \\ &\vdots \\ f_n &= A_n \cos(\omega t + \delta_n) \\ I(\lambda) &= \sum_{i=1}^{n} A_i^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n} A_i A_j \cos(\delta_i - \delta_j) \end{aligned} \tag{2.7}$$

$I(\lambda)$ は干渉波のスペクトル分布であり、λ は光の波長を表す。δ は各波の位相差であり、波長 λ と光路差 Δ から求める。δ を求める式は式 (2.8) である。

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \tag{2.8}$$

次に、求めたスペクトル分布 $I(\lambda)$ を RGB 表色系の色情報に変換するため、XYZ 表色系 [21][22] の色情報で変換を行う。XYZ 表色系とは、光の波長と等色関数から正確な色情報を表す為の表色系であり、可視光線と呼ばれる可視領域にある光の波を積分して求めることができる。本研究では可視光線の領域は 360〜800nm の範囲にした。式 (2.9) は $I(\lambda)$ を用いて XYZ 表色系の X 成分について求めた式である。

$$\begin{aligned} X &= \int_{360}^{800} I(\lambda) I_{in}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ &= C \sum_{i=1}^{n} A_i^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n} A_i A_j V_t(\Delta) \end{aligned} \tag{2.9}$$

ここで、C、$V_t(\Delta)$ は式 (2.10) で求める。

$$\begin{aligned} C &= \int_{360}^{800} I_{in}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ V_t(\Delta) &= \int_{360}^{800} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta\right) I_{in}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \tag{2.10}$$

$I_{in}(\lambda)$ は入射光であり、光源が放った光のスペクトル分布である。$\bar{x}(\lambda)$ は等色関数を表す。Y 成分、Z 成分についても同様の式を使って求めることができる。

式 (2.9)、式 (2.10) から、本手法で用いる薄膜干渉の透過を考慮した構造色の計算式を求める。薄膜干渉の透過における $I(\lambda)$ の干渉光のスペクトルは、フレネルの式 (2.11) によって求める透過光の強度から、近似値を導くことができる [19][20]。フレネルの式とは光の反射に関する等式であり、入射角の傾き θ によって光の強度が変化する。R_p は入射面に平行な方向に振動する光の反射率、R_s は入射面に垂直な方向に振動する光の反射率である。θ_i、θ_r はそれぞれ光の入射角と屈折角である。r は反射光の強度になる。

$$\begin{aligned} R_p &= \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} \\ R_s &= \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} \end{aligned}$$

$$r = \frac{R_p + R_s}{2} \tag{2.11}$$

透過光の強度を t とすると、エネルギー保存の法則により式 (2.12) が成り立つ [19] [20]。

$$1 = t + r \tag{2.12}$$

したがって、薄膜干渉の透過を考慮した構造色における XYZ 表色系の X 成分を求めた式 (2.9) は式 (2.13) となる。ここで、C、$V_t(\Delta_t)$ は式 (2.10) によって求める。Δ_t は 2.3 節で求めた薄膜干渉の透過における光路差を用いる。成分 Y、成分 Z も同様に求めることができる。

$$\begin{aligned} X &= \int_{360}^{800} I(\lambda) I_{in}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ &= t\left(C + \sum_{i=1}^{n} V(\Delta_t)\right) \end{aligned} \tag{2.13}$$

式 (2.13) で求めた XYZ 成分を RGB 表色系への変換式 (2.14) [23] [24] [25] を用いて、RGB の値を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

本研究では薄膜干渉の透過を考慮した構造色の色情報を求めるために、光源のスペクトル分布 $I_{in}(\lambda)$ に、標準光源 D65 のスペクトル分布を使用した。等色関数 $\bar{x}(\lambda)$、$\bar{y}(\lambda)$、$\bar{z}(\lambda)$ には CIE(1964)10-deg color matching functions[26] を使用した。標準光源 D65 とは、CIE(国際照明委員会) が定めた光の色を正確に再現するときに使用する、測定用の人工光源である。

2.5 透過光の強度の計算

最終的に地面に届く透過光の強度を求める。シャボン玉の薄膜の主成分は加藤ら [12] の研究と同様に水として考え、水の質感を表すために、フレネルの式 (2.11) を用いて透過光の強度を求めた。透過における光の強度 t は入射光の強度から反射

における光の強度 r を引くことで求めることが出来る。図 2.6 に透過光の強度とフレネルの関係を表す。

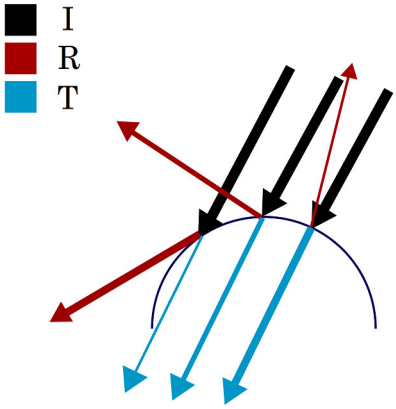


図 2.6: 光の強度とフレネルの関係

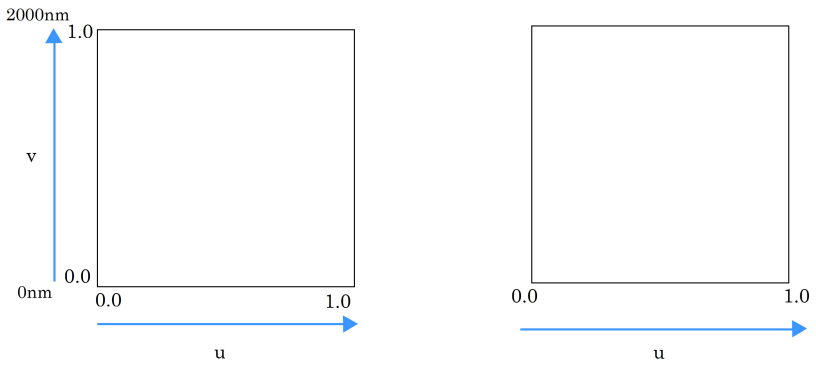
I、R、T はそれぞれ、入射光、反射光、透過光であり、線の太さは光の強さを示している。入射角の傾きが小さい場合は反射光の強度は弱く、透過光の強度は強くなる。入射光の傾きが大きい場合は反射光の強度は強く、透過光の強度は弱くなる。つまり、シャボン玉の縁の方に光が入射するにつれて、透過光の光の強度は徐々に弱くなり、シャボン玉の影の縁の部分が暗くなる。式 (2.15) によって透過光の強度を求める。L は入射光の光量、T_i は透過光の強度である。

$$\begin{aligned} T_i &= tL \\ &= (1-r)L \end{aligned} \tag{2.15}$$

2.6 構造色と光強度のデータベース化

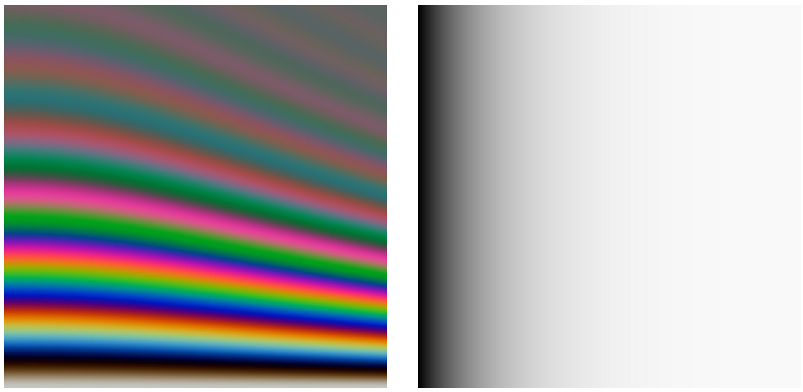
本研究では映像コンテンツやビデオゲームに用いることも想定している。ここでは、リアルタイムに処理を行うための高速化処理の手法について述べる。佐伯ら

[11] や加藤ら [12] が用いた、事前に構造色の色情報を計算した結果を構造色データベースとして書き出すことにより、構造色の色情報の計算時間を短縮し、高速化を図った手法を基にする。本研究では、薄膜干渉の透過における構造色の色情報をデータベースにまとめ、その結果を画像に書き出したものを構造色テクスチャとし、透過光の強度の情報をデータベースにまとめ、その結果を画像に書き出したものを光強度テクスチャとする。構造色の色情報は薄膜の厚みと光がシャボン玉の薄膜に差し込む角度によって変化する。そこで、構造色テクスチャは 2 次元テクスチャとして考え、テクスチャの縦方向を薄膜の厚みの変化に対応させ、テクスチャの横方向を光源の入射ベクトルと薄膜の法線ベクトルの内積の値に対応させた。薄膜の厚みは、薄膜は厚くなると、干渉で強まる光の波が増え、結果としてほとんどの波長の波が強まり特定の色がでなくなることから、薄膜の厚みの範囲を 0〜2000nm の範囲とした。図 2.7(a) は構造色データベースの配置図である。光強度テクスチャは、2.5 節から入射角に強く依存することから 1 次元テクスチャとして考え、テクスチャの横方向を光源の入射ベクトルと薄膜の法線ベクトルの内積の値に対応させた。図 2.7(b) は透過光の強度データベースの配置図である。u、v はそれぞれ横方向と縦方向のテクスチャ座標である。図 2.8(a)、図 2.8(b) はそれぞれ、配置図を基に構造色テクスチャと光強度テクスチャを作成したものである。構造色テクスチャは 2.4 節で述べた手法を用いて構造色の色情報を求めた結果から作成した。光強度テクスチャは 2.5 節で述べた手法を用いて透過光の強度を求めた結果から作成した。



(a) 構造色データベースの配置図　　(b) 光の強度データベースの配置図

図 2.7: データベースの配置図



(a) 構造色テクスチャ　　(b) 光強度テクスチャ

図 2.8: 生成したテクスチャ

2.7　影の描画

2.6 節で求めた構造色テクスチャと、光強度テクスチャを用いてシャボン玉の影を描画する。光源からシャボン玉に差し込んだ光は、2 度薄膜を通過して地面に到達する。このため、2 回ずつ構造色の計算、及び透過光の強度の計算を行い、その結果を組み合わせる事でシャボン玉の影を生成した。影を生成する上で光源を平行光源とし、地面全体に対して光線を飛ばした。光線がシャボン玉の膜を透過する

ことで、構造色の色情報と透過光の強度を取得し、地面に到達した時点の影の情報からシャボン玉の影を生成する。図 2.9 は地面に光線を飛ばしている図を表す。

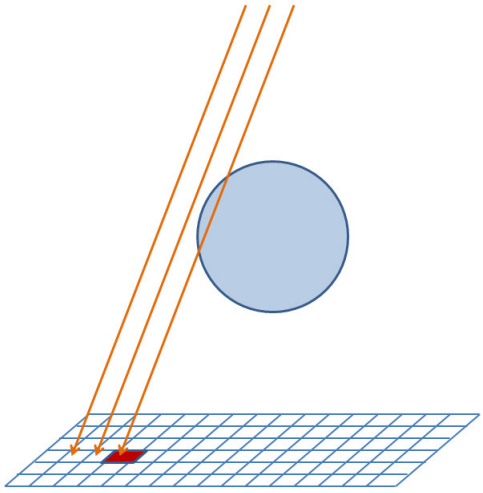


図 2.9: 地面に向かう光線

構造色の色情報は式 (2.13) を用いて生成した構造色テクスチャから求める。透過光の強度は式 (2.15) を用いて生成した光強度テクスチャから求める。オーバーレイ処理とは閾値を決め、光の強度情報の値が閾値より小さい値の場合は乗算して、閾値以上の大きい値の場合は値を加算して合成することで、基本色の明るさや暗さを表現する際に行う画像処理の 1 つである。本手法において、影を描画するための色情報には RGB 表色系を用いる。

まず、下記に詳細な処理の流れを示す。

(1) 1 回目に透過したときの構造色の色情報と透過光の強度を求める

(2) 2 回目に透過したときの構造色の色情報と透過光の強度を求める

(3) (1) と (2) で求めた構造色の色情報を加算合成

(4) (1) と (2) で求めた透過光の強度情報を乗算合成

(5) (3) と (4) で求めた色情報と光の強度情報をオーバーレイ処理

(6) (5) で求めた影情報と地面の情報を乗算

(7) 結果を影として地面に反映

次に具体的に影の描画処理について述べていく。1 回目に透過したときの構造色の色情報と透過光の強度の求め方について述べる。平行光源の光の方向ベクトルとシャボン玉の膜の表面の法線ベクトルの内積から入射角を求める。薄膜の厚みは、光線が当たるシャボン玉の膜の表面の位置から式 (2.5) を用いて求めた。シャボン玉に差し込む光の入射角と薄膜の厚みを用いて構造色テクスチャから構造色の色情報を求める。透過光の強度はシャボン玉に差し込む光の入射角を用いて光強度テクスチャから求める。2 回目に透過したときの構造色の色情報と透過光の強度も同様に求める。

求めた構造色の色情報の加算合成の処理には式 (2.16) を用いた。R は求める色情報の R 値である。R_1 は 1 回目に求めた構造色の色情報の R 値であり、R_2 は 2 回目に求めた構造色の色情報の R 値である。同様に、G 値、B 値も求めることができる。

$$R = R_1 + R_2 - \frac{R_1 R_2}{255} \tag{2.16}$$

透過光の強度の乗算合成の処理には式 (2.17) を用いた。T は求められる透過光の強度である。L は光源からの光量であり、T_i は薄膜を透過する光の強度である。

$$T = 255 L T_i \quad \begin{matrix} (0.0 \leqq L \leqq 1.0) \\ (0.0 \leqq T_i \leqq 1.0) \end{matrix} \tag{2.17}$$

影の色情報を求めるオーバーレイの処理には式 (2.18) を用いた。R_s は影の色情報を求めた R 値である。同様に、G 値、B 値も求めることができる。

$$R_s = \begin{cases} 2\left(T + R - \dfrac{TR}{255}\right) - 255 & (127.5 \leqq T) \\ \dfrac{2TR}{255} & (0 \leqq T < 127.5) \end{cases} \tag{2.18}$$

影の色情報と地面の情報からシャボン玉の影を生成するための乗算の処理には式 (2.19) を用いた。R_g は地面の情報の R 値である。同様に、G 値、B 値も求める

ことができる。

$$R_s = \frac{R_s R_g}{255} \tag{2.19}$$

第 3 章

動作の検証

本章では第 2 章で述べた手法を用いてシャボン玉の影の生成結果を示し、本手法を検証する。その後、本手法について考察を行う。シャボン玉の影の生成においてのプログラムは、グラフィックス API の OpenGL [27] と OpenGL をベースとした 3DCG ツールキットである FK Toolkit System [28]、シェーダ言語には NVIDIA 社の Cg 言語 [29] を用いて実装した。

3.1 実験環境

本手法を検証するために使用した実験環境は表 3.1 の通りである。

表 3.1: 実験環境

OS	Windows7 Enterprise 32bit
CPU	Intel® $Core^{TM}$2 Duo CPU E8500 3.16GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX280
Memory	3.25GB
解像度	512 × 512

3.2 実験結果

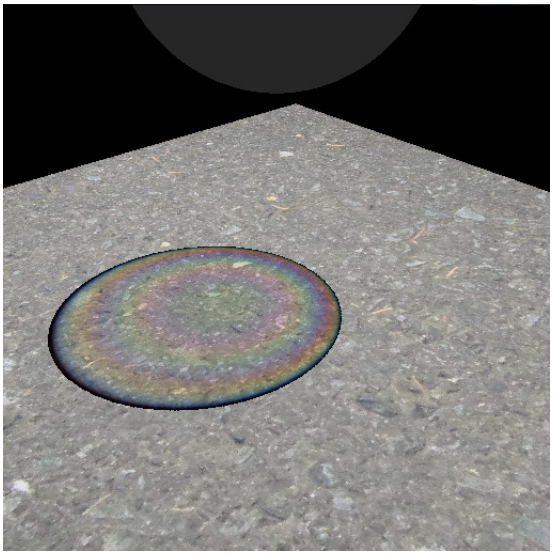
第 2 章の手法に基づき実装したシャボン玉の影生成プログラムを用いて検証を行った。初めに、3 次元空間に配置したシャボン玉を想定した球体に本手法を適用

した。シャボン玉の直径を 4cm、シャボン玉の中心の位置は地面から 5cm の高さとし、薄膜の厚みの最小値と最大値の範囲は Dariusz ら [20] の研究で用いていた薄膜の厚みを参考にした。構造色テクスチャと光強度テクスチャは、2.6 節で生成した図 2.8(a) の構造色テクスチャと、図 2.8(b) の光強度テクスチャを用いた。様々な状況を考慮するため、本検証では地面の画像にアスファルトとタイルの 2 種類を用意した。図 3.1(a) はアスファルトのテクスチャ画像であり、図 3.1(b) はタイルのテクスチャ画像である。

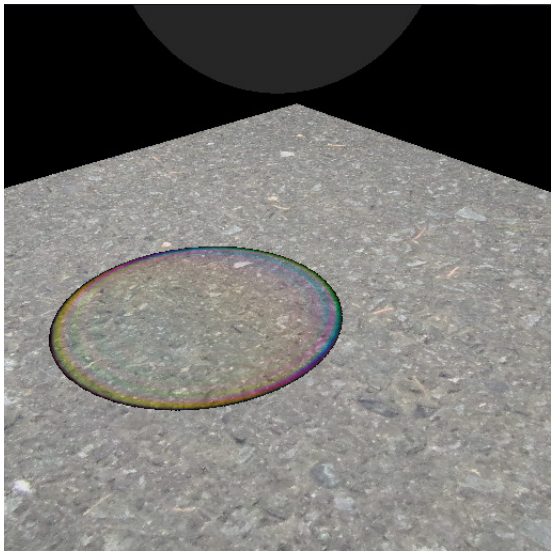
(a) アスファルト　　(b) タイル

図 3.1: 地面の画像

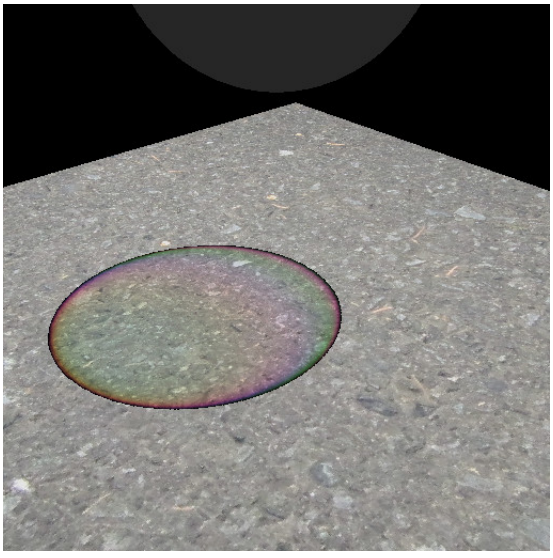
実験結果を図 3.2 と図 3.3 に示す。図 3.2(a)、図 3.2(b)、図 3.2(c)、図 3.2(d) はそれぞれ、地面がアスファルトのときの薄膜の厚みが 100〜3000nm、60〜600nm、200〜1500nm、400〜2500nm、100〜3000nm のときの結果である。図 3.3(a)、図 3.3(b)、図 3.3(c)、図 3.3(d) はそれぞれ、地面がタイルのときの薄膜の厚みが 100〜3000nm、60〜600nm、200〜1500nm、400〜2500nm、100〜3000nm のときの結果である。



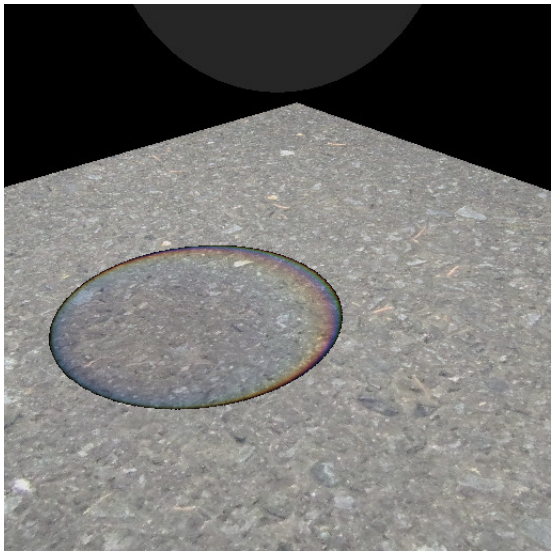
(a) 薄膜の厚さ 60〜600nm



(b) 薄膜の厚さ 200〜1500nm

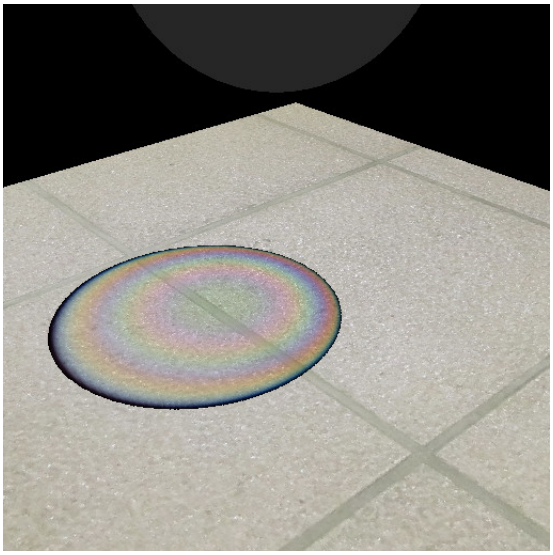


(c) 薄膜の厚さ 400〜2500nm

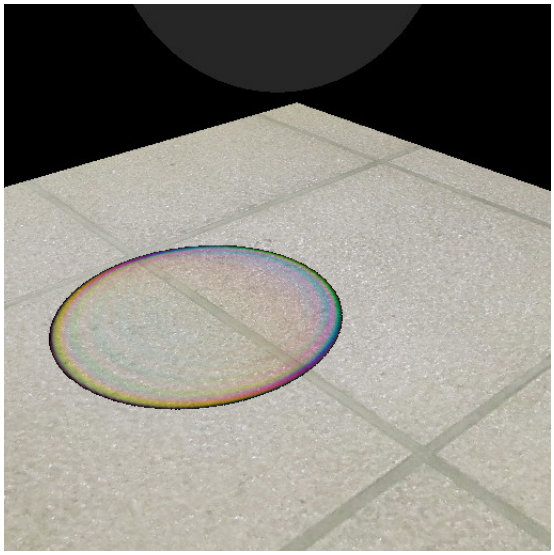


(d) 薄膜の厚さ 100〜3000nm

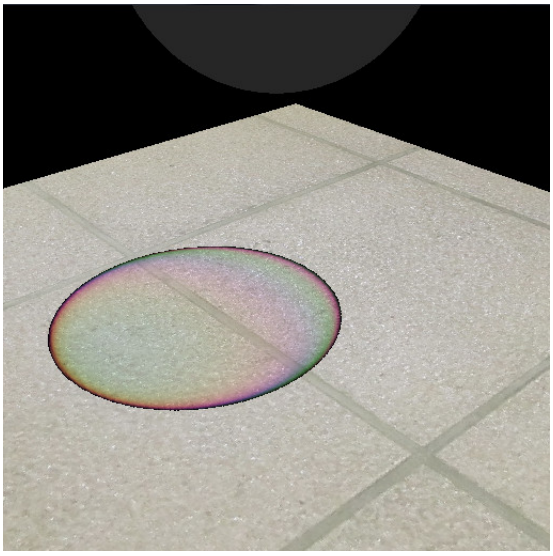
図 3.2: アスファルトの時のシャボン玉の影の生成結果



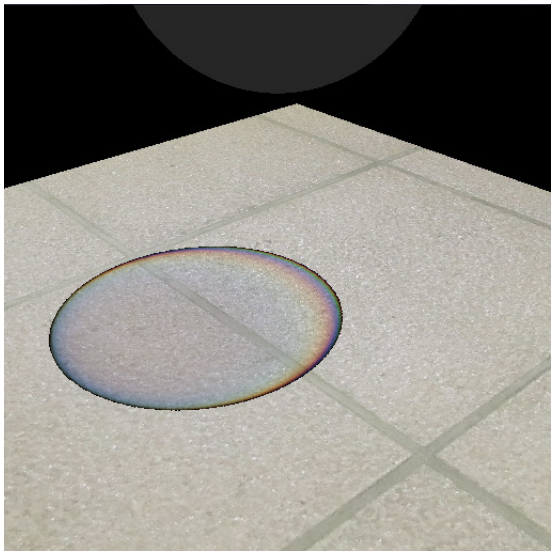
(a) 薄膜の厚さ 60〜600nm



(b) 薄膜の厚さ 200〜1500nm



(c) 薄膜の厚さ 400〜2500nm



(d) 薄膜の厚さ 100〜3000nm

図 3.3: タイルの時のシャボン玉の影の生成結果

本研究では薄膜干渉の透過を考慮した構造色を再現し、シャボン玉の特殊な影を生成した。実際のシャボン玉の影の様子である 2.2 節の図 2.3 と、本章で生成した画像の図 3.2 や図 3.3 を比較した結果、実際のシャボン玉の影と同様の表現が再現できていることから、薄膜干渉の透過を考慮したシャボン玉の影の生成において、本手法の有効性を確認できた。

また、本研究では高速化についても重視している為、シャボン玉の影のシミュレートを行い処理速度についても評価を行った。測定条件はシャボン玉の直径 4cm、シャボン玉の中心は地面から高さ 5cm の位置とし、薄膜の厚みの範囲は 5〜20000nm の範囲で動的に変化させた。影の生成にかかった処理速度の測定には 1 秒間に画面を更新する回数を測り、単位を Frame Per Second(以下 FPS) として表す。また、地面を形成する形状データの頂点数は地面の形状の精度に関係し、影にも影響を与えることから頂点数の違いにおいても比較する。シミュレートの処理速度の計測結果を、表 3.2 に示す。

表 3.2: シャボン玉の影のシミュレートの処理速度

地面の形状データ (頂点数)	FPS
100	2980〜3020
2500	2430〜2520
6400	2200〜2230
10000	1360〜1400

実験結果より、高速に処理を行うことが可能となったと言える。地面の形状データの頂点数が多くなると処理速度が遅くなるのは、並列演算装置である GPU で行う並列演算処理に負担がかかるからである。薄膜干渉の透過を考慮した構造色描画の高速化を図った本手法ではリアルタイムの基準である 60FPS を大きく超えていることから、提案手法のリアルタイム性は実現できたと言える。

第 4 章

まとめ

本研究では、写実的なシャボン玉の影を生成することを目標とし、薄膜干渉の透過を考慮したシャボン玉の影を生成する手法を提案した。構造色の表現においては、シャボン玉の薄膜干渉の透過における構造色の計算式を求めることで可能とした。実際のシャボン玉の影に現れる構造色と比較した結果、現実で起こる薄膜干渉の透過における構造色と酷似した結果を得ることができた。また、薄膜干渉の透過における構造色の色情報をデータベースにまとめ、描画する際に参照することによって、構造色の計算時間を短縮し、処理の高速化を実現した。その結果、シャボン玉の薄膜厚みを時間経過に伴い変化させることが可能となり、写実的なシャボン玉の影のシミュレートができたことから、本研究の有用性が確認できた。

本手法では、標準光源 D65 のスペクトル情報を採用したが、他にも白熱電球や蛍光灯のスペクトル情報も用いることができる。スペクトル情報の操作を行う処理を組み合わせれば、光源の変化にも対応した構造色表現が可能となる。また、本手法はシャボン玉の透過による光の干渉に着目して提案し、重力の影響を考慮して薄膜の厚みを変えている。しかし、シャボン玉の薄膜厚みが変化する条件は重力以外にも、風や土埃などの外的要因が関係してくる。これらの外的要因が加われば、シャボン玉の薄膜の厚みは最上部が最も薄くなり、最下部が最も厚くなるとは限らなくなる。よりリアルなシャボン玉の影を生成するには様々な要因によって変化する薄膜の厚みをシミュレートする必要がある。光源の変化や外的要因に

対応する事が今後の課題である。

謝辞

本論文を締めくくるにあたり、研究方針から手法、論文の執筆に至るまでご指導頂きました、本校メディア学部の渡辺大地講師、並びに三上浩司講師に心からの感謝の意を表します。また、研究に関して様々な相談に乗ってくださった本校の卒業生である海上一徳様、加藤良章様には厚く御礼申し上げます。そして、様々な相談に乗ってくださった院生の方々及び、多くの苦楽を共にした研究室のメンバーに深く感謝いたします。特に、泊まり込んでまで研究の相談や、論文の添削をしてくださった武田巧視先輩、阿部雅樹先輩、石塚真貴男先輩には心より感謝いたします。最後に、私を支えてくれた家族と、体調や研究に関して心配してくれた全ての友人に感謝いたします。

参考文献

[1] T. Hachisuka, W. Jarosz, R. Weistroffer, K. Dale, G.Humphreys, M. Zwicker, and H. W. Jensen, "Multidimensional adaptive sampling and reconstruction for ray tracing," *ACM Transactions on Graphics* **27** (2008).

[2] SUN X., ZHOU K., STOLLNITZ E., SHI J., GUO B., "Interactive relighting of dynamic refractive objects," *ACM Transactions on Graphics* **27** (2008).

[3] SUN X., ZHOU K., CHEN Y., LIN S., SHI J., GUO B., "Interactive relighting with dynamic brdfs," *ACM Transactions on Graphics* **26** (2007).

[4] Guy Stephane, Soler Cyril, "Graphics Gems Revisited: Fast and Physically Based Rendering of Gemstones," *ACM Transactions on Graphics* (2004).

[5] 安部 高明, "構造モデルを用いたオパールの遊色現象の再現," **奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文** (2003).

[6] Kei Iwasaki, Keichi Matsuzawa, Tomoyuki Nishita, "Real-time Rendering of Soap Bubbles Taking into Account Light Interference," (2004).

[7] Yinlong Sun, F. David Fracchia, Mark S. Drew, Thomas W. Calvert, "Real-time Rendering of Soap Bubbles Taking into Account Light Interference," (2000).

[8] A. Glassner, “Soap Bubbles: Part1,” *IEEE Computer Graphics and Applications* **20**(5), pp. 76–84 (2000).

[9] A. Glassner, “Soap Bubbles: Part2,” *IEEE Computer Graphics and Applications* **20**(6), pp. 99–109 (2000).

[10] By Michael Hutchings, Frank Morgan, Manuel Ritoré, and Antonio Ros, “Proof of the Double Bubble Conjecture,” *Annals of Mathematics* **155**, pp. 459–489 (2002).

[11] 佐伯 昌彦, 井村 誠孝, 安室 善弘, 眞鍋 佳嗣, 千原 國宏, “汎用的な構造色レンダリング手法,” **奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文** (2006).

[12] 加藤 良章, “リアルタイム 3DCG における薄膜厚みの動的変化を考慮した構造色描画手法,” **東京工科大学メディア学部メディア学科卒業論文** (2008).

[13] Next Limit Technologies, “Maxwell Render.” `http://www.maxwellrender.com/index.php`.

[14] 木下 修一, “特集 構造色 総論,” *O plus E* **23**, pp. 298–301 (2001).

[15] 木下 修一, 吉岡 伸也, “構造色研究会.” `http://mph.fbs.osaka-u.ac.jp/~ssc/index.html`.

[16] 木下 修一, “構造色の世界　生物が作るナノ構造,” **高分子学会** *NTS* **版** , pp. 39–87 (2006).

[17] 木下 修一、吉岡 伸也、藤井 康裕, “自然界の構造色の仕組み,” **色材協会誌 75**, pp. 493–499 (2002).

[18] Anvar A. Zakhidov, Ray H. Baughman, Zafar Iqbal, Changxing Cui, Ilyas Khayrullin, Socrates O. Dantas, Jordi Marti, Victor G. Ralchenko , “Carbon Structures with Three-Dimensional Periodicity at Optical Wavelengths,” *Science* **282**, pp. 897 – 901 (1998).

[19] Isenberg Cyril, [*The Science of Soap Films and Soap Bubbles*], Dover Publications,Inc., New York (1978).

[20] Dariusz Jaszkowski, Janusz Rzeszut, " Interference colours of soap bubbles," *The Visual Computer* **19**, pp. 252–270 (7 2003).

[21] 牟田 淳, [**アートのための数学**], オーム社 (2008).

[22] 千々岩 英彰, [**色彩学概説**], 東京大学出版会 (2001).

[23] M.Stokes (Hewlett-Packard), M.Anderson (Microsoft), S.Chandrasekar (Microsoft), and R.Motta (Hewlett-Packard), "A standard default color space for the internet - sRGB." `http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB` (11 1996).

[24] S. S*ü*sstrunk, R. Buckley, and S. Swen, "Standard RGB color spaces," *in Proc. IS T/SID 7th Color Imaging Conf.* , pp. 127–134 (1999).

[25] B.Gralak, G.Tayeb, and S.Enoch, "Morpho butterflies wings color modeled with lamellar grating theory," *Optics Express* **9**(11), pp. 576–578 (2001).

[26] "CVRL Color & Vision database." `http://cvision.ucsd.edu/`.

[27] OpenGL.org, "OpenGL." `http://www.opengl.org/`.

[28] 渡辺 大地, "Fine Kernel ToolKit System." `http://fktoolkit.sourceforge.jp/`.

[29] NVIDIA Corporation, "Cg Toolkit 2.2 -GPU Sheder Authoring Language-." `http://developer.nvidia.com/object/cg_toolkit.html`.