

コンピュータグラフィックスにおける
自然物および自然現象の表現に関する研究

東海 彰 吾

コンピュータグラフィックスにおける
自然物および自然現象の表現に関する研究

名古屋大学図書	
和	1250171

東海 彰吾

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の概要と論文の構成	4
第2章 自然物のレンダリング	7
2.1 はじめに	7
2.2 基本的な処理手順	10
2.3 爬虫類皮革の表現	12
2.3.1 爬虫類皮革の特徴	12
2.3.2 皮革テクスチャの生成	14
2.3.3 表示結果および考察	24
2.4 柑橘果実の表現	28
2.4.1 柑橘果実の特徴	29
2.4.2 柑橘果実のテクスチャ生成	30
2.4.3 柑橘果実形状の生成	35
2.4.4 表示結果および考察	38
2.5 実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現	41
2.5.1 みかんの色変化	41
2.5.2 色変化のシミュレーション	42
2.5.3 考察	48
2.6 まとめ	49
第3章 自然現象のビジュアライゼーション	53
3.1 はじめに	53
3.2 インタラクティブ可視化システム	54
3.2.1 各種データの導入・統合機能	56
3.2.2 CGアニメーション生成機能	57
3.2.3 インタラクティブ操作機能	60
3.3 現象「SL-9」への適用	60
3.3.1 現象の概要	60

3.3.2	CG 映像化のための表現要素と使用したデータ	62
3.3.3	CG による現象の表現	62
3.3.4	制作した CG シーン	68
3.3.5	開発環境と利用状況	76
3.4	まとめ	76
第 4 章 むすび		79
謝辞		83
参考文献		85
付録 1 自由曲線, 自由曲面		91
付録 1-1	ベジエ曲線	91
付録 1-2	ベジエ曲面	92
付録 1-3	B スプライン曲面	94
付録 1-4	ベジエ曲面と B スプライン曲面との関係	95
付録 1-5	B スプライン曲面に対する揺らぎ処理	97
付録 2 テクスチャマッピング		99
付録 2-1	パラメトリックな自由曲面とテクスチャマッピング	99
付録 2-2	バンプマッピング	100
付録 3 みかんの色変化モデル		103

第 1 章

序論

1.1 研究の背景と目的

コンピュータグラフィックス (以下, CG と略す) は, 計算機によって画像を生成する技術の総称であり, 近年 CG によって自然界の動物や植物などの自然物や, 気象や天文などの自然現象を扱う技術が注目されている [中島91] [千葉91] [大野91].

CG 技術の発達にともない, その表示対象は広がり続けている. これまで CG では建造物や工業製品などの人工物が中心として扱われてきたが, 人間や動植物あるいは山岳地形や雲などの自然物を扱う技術が求められるようになってきている. これは, CG 画像生成のためのハードウェアの発達によって, 高精細で高品質の CG が生成できるようになっただけでなく, より複雑な対象を扱うことが可能となってきたためである. また, 近年公開された「ジュラシックパーク」や「アポロ 13」といった映画にも CG による映像が特殊効果として積極的に用いられるようになってきた [デザイン93]. さらに, 最近注目されているバーチャルリアリティ (以下, VR と略す) や景観シミュレーションなどにおいては, 計算機内に表現された仮想的な空間とそこにある物体を CG を用いて表現する. つまり, CG はこれらの技術の視覚的な部分の中核であり, ここで現実世界と同様な現実味のある映像生成が必要である. 特に, 人間の身近な対象として自然物の表現は無視できない.

ところで, CG で自然物を扱うことを考えると, その複雑さや多様さをいかに扱うかが問題となる. CG において物体を表示するときには形状, 動き, 質感と言った要素の設定が必要となるが, 一般に自然物においてはこれらの要素が人工物よりも極端に複雑であり, それが自然物が扱われにくいと考えられた一つの要因である. さらに, 同じ種類の物体でも全く同一の物は無く, それぞれ微妙に異なっている. ハードウェア技術の面においては, 従来はその処理能力や表示能力の限界からあまり複雑な対象を扱うことは困難であったが, 近年の CPU の高速化, 記憶装置の大容量

第1章 序論

量化,あるいはCG画像生成のための専用ハードウェアの発達によって複雑な形状や動きを扱うこと自体の問題については解決されてきた。しかし,自然物の形状や動きなどの要素をいかに設定していくかが問題である。例えば,形状設定においては,従来は人間がキーボードやマウスを使い,三面図などを用いて手入力によって形状設定を行ってきた。これは,人工物など単純な形状に対しては適用可能であるが,自然物のような複雑な3次元形状を人間が設定することには限界があり,極端に複雑な形状設定は困難である。さらに,人間が設定するものは往々にして「不自然」なものが多く,CG映像における「自然らしさ」を損なうものが少なくない。

そこで,自然物の持つ表示要素を計算機を用いて設定することが試みられるようになった。実際に近年の研究では,各要素に対して物理法則や生物学,形態学などに関する適切なモデル化を行い,これによってそれぞれの要素を計算機を用いて半自動的に生成するということが行なわれている。具体的な例としては,樹木の形状を枝ぶりや葉の生長モデルを適用して生成するものや[中島88],バネと連結した質点のモデルを適用してヘビの動きを表現するもの[Miller88]などが報告されている。これらのモデルにはいくつかのパラメータが含まれ,これを人間が設定することにより,望む自然物の性質を表現することになる。ここで,モデルにおける個々のパラメータの値を変更してやることによって,類似してはいるが全く同じではない性質を表現することができる。これにより,自然物の多様性を表現可能である。また,自己相似性(フラクタル性)の考え方等の導入により,自然物の持つ「自然らしさ」をCGに取り入れることができるようになってきた[Mandelbrot82]。これらは,現実世界における対象の性質や特徴をモデル化し,そのモデルを用いて映像を生成を行うものである。用いられるモデルには,生物学や形態学などの分野における成果も含まれ,これらのモデルの妥当性の検証にCGが利用されることも少なくない。生物の成長や遺伝の要素を導入した人工生物の成長や進化のシミュレーションなども行われており,CGアートとしても紹介されている[河口94][レイサム90]。

しかし,現在のところ報告されているのは実際に存在する自然物のごく一部分であり,これらの対象だけではCGにおける表現対象としてはまだまだ不十分である。そこで,これまで扱われてこなかった新しい対象に対する表現手法の開発が必要である。

一方、CGの応用分野の一つである科学的可視化 (scientific visualization) において自然現象を扱うことが注目されている。科学的可視化とは、計算機内でシミュレートされた現象やある現象を実際に測定して得られた数値情報など、実際に目にすることが困難な現象をCGを用いて映像化し、その現象の理解を助けるものであり、これまで材料力学や流体力学、有機化学などの分野で利用されてきた。この分野で自然現象を扱った実例としては、台風や竜巻における流れの可視化 [大口91] 等が報告されている。さらに、従来の可視化技術は現象の一部分をCGによって映像化するにとどまるものであったが、VR技術として発達したグローブデバイスやヘッドマウントディスプレイなどのVRデバイスを利用した現象観察も行われるようになりつつある [Bryson92]。ここで重要となるのは、インタラクティブ性 (対話性) であり、現象観察の視点や時間の変化をインタラクティブに操作することが必要となる。これにより現象を自由な観点から見ることができ、新しい現象の理解が期待される。

また、最近、世界的な計算機ネットワークであるインターネットへの関心が非常に高まっているが、このようなネットワークを通して現象についての様々な情報を得ることが容易になりつつある。これらの情報は世界中に分散し、情報提供者によって絶えず最新の内容に更新されている。しかし、ネットワークで公開される情報は現象のごく一部を表すものが多く、一つ一つの情報は専門家には意味があるものでも、実際にその現象がどのようなものであるかを理解することは難しい。そこで、これら個々の情報をひとつにまとめ、対象となる現象を総合的に映像化することが望まれる。さらに、その映像をネットワークに還元することにより、科学的な教育や啓蒙に重要な役割を果たすことが期待され、ビジュアライゼーション技術の新しい可能性として重要である。

この様に、自然現象をネットワークなどの様々な情報源から集められた関連する情報に基づいてCG映像として可視化し、さらに各種デバイスを用いてインタラクティブに視点変更などをしながら現象を観察できるようなシステムが望まれている。

1.2 研究の概要と論文の構成

前節のような状況を踏まえ、本研究ではCGにおいて自然物や自然現象を扱うための手法の開発を行った。本文では、これまでCGで扱われていなかった自然物を対象としたレンダリング手法、および、収集した情報に基づいて自然現象を可視化し、インタラクティブにその現象を体験できる新しいシステムについて述べる。

本論文は4つの章から構成される。以下、各章の具体的な内容について説明する。まず、第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

次に、第2章ではCGで自然物をレンダリングするための一つのアプローチとして、生物の体表面の凹凸のテクスチャに注目した手法について述べる。基本的な処理手順は、自然物の持つ規則性と不規則性を考慮して、平面上の格子点上に配置した基準点を乱数を用いて移動し、この基準点をもとに凹凸のテクスチャを構成する図形発生を行うものである。ここでは具体的な対象として、これまでCGで扱われていなかった爬虫類皮革と柑橘果実を扱い、各テクスチャの特徴を再現するための幾何学的なテクスチャ生成モデルを提案している。爬虫類皮革テクスチャの生成では、爬虫類の体表面テクスチャの最大の特徴であるウロコの並びとその形状に注目し、シードの配置を制御したボロノイ分割を用いて2次元のウロコ模様を生成し、ベジェ曲線を用いて定義したウロコの断面形状によって最終的な立体的テクスチャを得るものである [東海94]。柑橘果実表面テクスチャの生成では、果実表面のくぼみの分布に注目し、2次元のガウス型の確率密度関数によって定義された3次元のくぼみ形状を平面上に分布してテクスチャを生成する [東海93-1]。これらの両手法ともに、自然物らしさを表現するために乱数を用いた変位処理や中点変位法を用いた疑似フラクタルによる揺らぎ処理などを導入し、自然物らしいテクスチャ生成を行う。ここで生成されたテクスチャを、別に設計した物体形状に簡易的な凹凸のマッピングであるバンプマッピングを用いて張り付け、最終的な表示結果を得ている。さらに、柑橘果実であるみかんについては、農芸の分野において実測に基づく果実表面の平均色の変化モデルが提案されている。そこで、これを用いたCGによる果実の色表現とフラクタルを用いた色変化の時間差を導入した色むらを付加した、より現実に近いCG表現とするための手法についても述べる [東海93-2]。

第3章では、自然現象をCGアニメーションによって映像化し、インタラクティブに現象を観察することを可能にするシステムについて述べる。これは、世界的なネットワークであるインターネットやCD-ROMなどのメディアから集められた最新の正確な科学的な根拠のある情報に基づいて現象をCGアニメーション化し、さらにマウスやダイヤル等のI/Oデバイスを用いてインタラクティブな視点変更や時間軸変更を行うことによって現象を自由に観察可能にするものである。さらに、このシステムの具体的な適用例として、1994年7月に木星にシューメーカー・レビー第9彗星と呼ばれる彗星が衝突するという天文学的にも珍しい現象に適用し、この彗星の過去からの振る舞いと衝突現象を可視化したCG映像について説明する [Tokai95] [東海95]。

最後に、第4章では、本研究全体の成果を要約し、今後の課題について述べる。

第2章

自然物のレンダリング

2.1 はじめに

前章でも述べたように，CGにおいて自然物を扱う技術が注目されている．CGにおいて自然物を扱う場合，(1) 人間，(2) 植物，(3) 動物，(4) その他，に大まかに分類できる．これらのそれぞれに対してCGの表現要素である形状，動き，質感など，様々な研究が報告されている．以下，それぞれの対象について幾つかの例をあげておく．

(1) 人間を対象とした研究

最も身近な対象であり，臨場感通信やTV会議システムにおける表示対象として必要不可欠である．具体的なものとしては，メタボールを用いた形状生成 [NHK89] や人間の感情を加味した歩行パターン生成 [宇田 90]，顔の表情生成 [Waters87]，把持動作に伴う手の形の表現 [Huang95] 等がある．さらに，写實的にリアルな映像生成のための質感表現手法として，皮膚の表現 [石井智 91] や頭髮の表現 [渡辺 90] [Anjyo92] などが報告されている．また，全体的な人間の表現としてのCGによる合成俳優の研究も行われている [Thalmann93]．

(2) 植物を対象とした研究

室内のシーンにおける観葉植物から，景観シミュレーションやドライビングシミュレーションにおける街路樹，あるいは，フライトシミュレーションにおける森や林にいたる身近な表示対象である．特に，樹木を扱った研究が多く，景観における街路樹の簡易的でリアルな表現手法 [Takita91] や生長モデルによる枝振りのシミュレーション [千葉 93] などが報告されている．また，質感を扱った研究としては，石膏型を利用した樹皮の表現 [Bloomenthal85] や，色素量の変化を考慮した紅葉の表現 [早乙女 92] などがある．さらに，形態学的な立場から花の表現を扱った研究 [Fowler92-1] も報告されている．

第2章 自然物のレンダリング

(3) 動物を対象とした研究

人間や植物と比べれば、比較的新しい対象である。形の複雑さのみならず、動きの複雑さもあり、これらを表現する手法の研究が報告されている。動物の形を扱った研究としては、貝殻の形状生成手法 [Fowler92-2] などがある。また、動物の動きを扱った研究としては、バネと質点のモデルを用いたヘビの動きの表現 [Miller88] や、6本の足の動きを考慮した昆虫の動きの表現などがある [McKenna90]。外観の特徴を扱ったものとしては、反応拡散モデルによるキリンやシマウマなどの動物の体表面テクスチャの生成手法 [Turk91] [Witkin91] や、テクセルを用いたボリュームレンダリングによる毛皮の表現 [Kajiya89] が報告されている。

(4) その他の自然物や現象を扱った研究

生物以外の自然物や自然現象に対する研究も報告されている。特に、フラクタルを用いた山岳や波の形状生成 [Anjyo91] などは、CGシーンにおける情景生成として重要である。さらに、煙や霧などの動きや光学的な振る舞いのシミュレーション [村上93]、雲の表現 [倉立95]、あるいは、陶器などにおけるひび割れの表現 [千葉90] や石垣の表現 [Miyata90] などが報告されている。

この様に、様々な自然物を対象としたCGにおける表現手法が報告されている。しかし、これまでに報告されてきた対象は実際の世界に存在する物体のごく一部分であり、実際にCGによって映像生成を行う場合の表現能力としては、まだ不十分である。そこで、CGシーン内で表示されるであろうと考えられる対象の表示能力の拡充が必要である。

本章ではこれまでに扱われていなかった自然物に対するCGにおけるレンダリング手法の確立を目指し、外観の特徴として重要であると思われる、生物の体表面のテクスチャに注目した表現手法について述べる。生物はそれぞれ異なった性質の体表面のテクスチャを持つものが多く、個々のテクスチャの特徴を表現することは、それぞれの生物のレンダリングにおいて重要な要素である。ここでは、生体表面の凹凸テクスチャを計算機によって生成し、それらをCG内の物体形状にマッピングして表示する手法について述べる。

ところで、CGでテクスチャを扱う場合に次の2通りが考えられる。

まず、実物の写真などを直接CG用のテクスチャとして利用する方法がある。これは、実際に撮影された写真をスキャナなどで計算機に取り込み、計算機上で加工した後CGシーン内の物体形状にマッピングして用いるものである。この方法は市販のCGレンダラなどにも実装され、シーン内の表示物の質感の向上に効果的である。具体的には、実際の樹皮の石膏型から得られた樹皮形状のマッピングによる表現手法が報告されている [Bloomenthal85]。しかし、この方法には、いくつかの問題点が考えられる。まず、表示したい対象に対して全てのテクスチャデータを用意する必要がある、例えば同じ種類の物体で個々の物体の細かな違いを表現するためには、それぞれに別のテクスチャを用意してやらなければならない。このため、実際にCGシーン内にテクスチャを必要とする多くの物体が表現される場合、大量の記憶容量を必要とする可能性がある。また、使用するテクスチャが一般的には色情報のみを持つものであり、これには、撮影時の照明条件などがテクスチャに影響する。また、CGシーンの照明や形状の変化に対応してテクスチャが変化しないため、不自然な印象を与える可能性がある。

一方、計算機によってテクスチャを生成するというアプローチがある。これは、何らかのプログラムによってテクスチャを生成するものであり、プログラム内のパラメータ調整や乱数の導入によって同一の手法で性質の似た別のテクスチャを生成可能であり、特に自然物を扱うときに個体差のようなものの表現が可能である。また、計算機内に立体的な形状が定義できるため、実際に撮影した写真などからは得られない細かな凹凸の情報など色以外の要素も算出でき、精密な反射モデルの導入などが可能である。

後者の技術は、以下の2種類に大別できる。一つは、信号処理的な方法でテクスチャを生成するもので、フーリエ変換等を用いた手法や雑音成分を利用した生成手法などが報告されている [Lewis84] [Haruyama84] [Perlin85] [Perlin89] [Lewis89]。これは汎用性が高い手法であるが、個々の対象の質感などをきめ細かく表現するには限界がある。もう一方は、テクスチャの生成手順に個々の対象の持つ特徴を表現するようなモデルを積極的に導入する方法である。この考え方において自然物テクスチャを扱ったものとしては、階層的なボロノイ分割を用いた人間の皮膚の表現 [石

第2章 自然物のレンダリング

井智 91] や反応拡散モデルを用いたキリンやシマウマの体表 [Turk91], あるいは貝殻表面のテクスチャ生成 [Fowler92-2], 石垣パターンの生成 [Miyata90] 等が報告されている.

本研究は後者, すなわち, 計算機によってテクスチャを生成する立場で実際の自然物の持つ形状特徴や色の特徴に注目し, これらを表現するようなモデル化によってテクスチャ生成を行うものである. ここでは, 自然物の持つ規則的な性質と不規則的な性質の両方の特徴を持ったテクスチャ生成を行うための, 基本的な処理手順を提案し, これによって自然物らしいテクスチャ生成を行う. 本章では, 具体的な対象としては, 独特のウロコ模様が特徴的な爬虫類皮革と, 表面の細かな凹凸が特徴的な柑橘果実の表現を取り扱う. どちらの対象も比較的身近な対象ではあるがこれまでCGでは扱われていなかったものである. 爬虫類皮革の表現はCGを用いた皮革製品のデザインなどへの利用も考えられる. さらに, 柑橘果実のみかんについて, 実測値の基づく色表現のモデルの導入についても述べる.

2.2 基本的な処理手順

CGによって自然物を表現するためには, 自然物の持つ「自然物らしさ」を計算機上でいかに扱うかが問題となる. ここで, 実際の自然物の持つ特徴を考えてみると, 均一性・周期性・階層構造・対称性・方向性などの規則的な性質と, 歪みや揺らぎあるいは個体差などの不規則な性質が混在していることがあげられる. さらに, 局所的な性質と大域的な性質があり, これらが極端に類似していたり, あるいは全く異なっていたりするような性質が観察できる. これらの性質を考慮したテクスチャ生成のためのモデル化を行うことによって, 自然物の持つ「自然物らしさ」が表現できるのではないかと考えられる. 計算機の性質上, 規則的な性質を扱うことは比較的容易であるが, 不規則な部分の取り扱いには容易ではない. 本研究では, このような自然物の不規則な部分を乱数や乱数によるフラクタルを用いた揺らぎ処理によって取り扱う. 実際には, 規則的な性質を持ったテクスチャ生成手順に揺らぎの要素を導入することにより自然物のレンダリングを行うこととし, 以下に示す手順によって自然物のテクスチャ生成と最終的な映像生成を行うものである(図2-1).

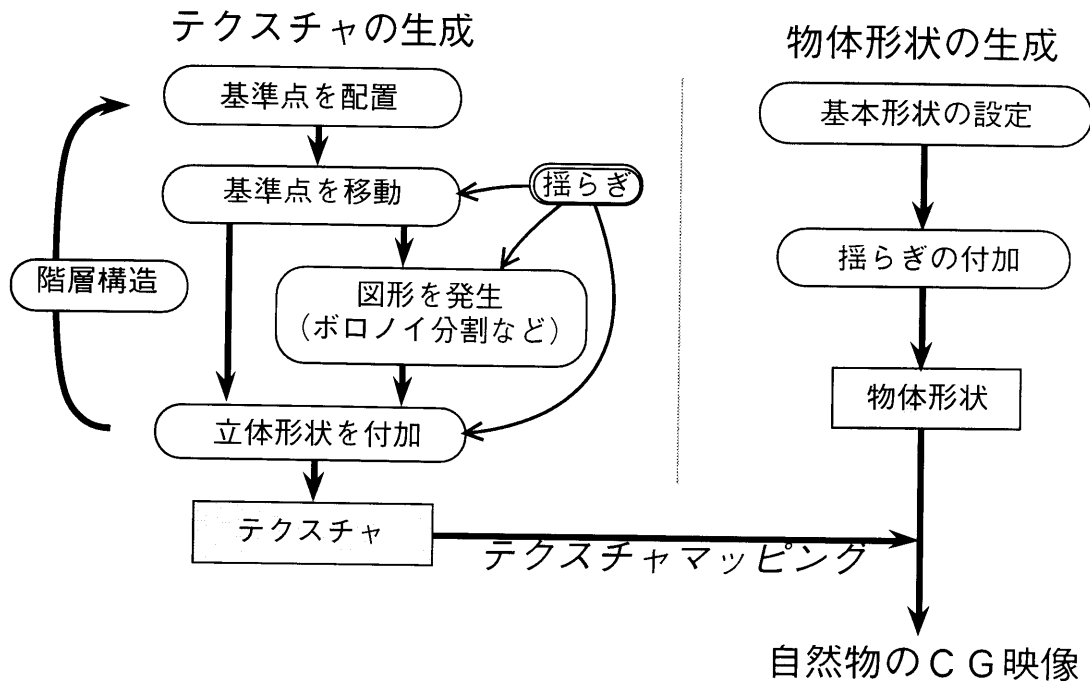


図 2-1 基本的な処理手順

処理は大きく2つの流れに分けられる。一つは自然物の表面テクスチャの生成処理であり、もう一つは、自然物の形状生成の処理である。テクスチャ生成の処理では、まず、平面上に一様にテクスチャ生成のための基準点を配置し、これを乱数を用いて平面上で移動する。これにより、ほぼ均一であるが、規則正しくは無い配置が得られる。これをもとに図形を発生し、その上に立体形状を設定して立体的なテクスチャを得る。さらに、これらの処理を繰り返し行うことにより、自然物の持つ階層的な構造をテクスチャに付加することができる。形状生成の処理では、まず、人間によって設定された基本的な形状に対し、疑似フラクタル処理である中点変位法 [Fournier82] によって自然物らしい揺らぎを付加し、最終的な自然物形状を得る。

この様に生成された物体形状にテクスチャを合成して最終的なCG画像を得るが、本章の実験では細かな凹凸の簡易的なテクスチャマッピング手法であるバンプマッピング法 [Blinn78] を用いて表示を行っている (付録 2-2 参照)。

2.3 爬虫類皮革の表現

これまで自然物のテクスチャについての様々な報告がなされているが、製品材料としても使用される爬虫類の皮革そのものの表示については、実際に撮影した皮革テクスチャを用いてこれをCG内の物体形状にマッピングして表示することが行なわれている程度であり、計算機によるテクスチャ生成のためのモデルについての報告はない。爬虫類の皮革テクスチャは、爬虫類生物そのものの表示だけでなく、CGを用いた皮革製品のデザインや、現在は実際に生息していない恐竜のCG表現における皮膚の表示などへの利用が可能であり、その表現手法の開発は重要である。本節では、爬虫類の皮革の中でも主としてワニの皮革を対象として、その形状の特徴に注目した幾何学的手法による3次元的な皮革テクスチャの生成と、これを用いた皮革のレンダリング手法について述べる [東海 94]。

2.3.1 爬虫類皮革の特徴

一般に、皮革が製品材料として利用される爬虫類としては、ヘビ・トカゲ・ワニなどがあり、財布やハンドバッグなどに加工される。爬虫類皮革の最大の特徴はウロコによる独特のテクスチャである。ウロコの形状や並びは爬虫類の種類によっても様々なものがあり、これが外観の質感に大きく影響している。図 2-2 は実際のワニ皮革 (腹部) [大石 83] であるが、一面に隙間なく並んだウロコの文様 (以下、ウロコ・パターン) が見られ、まず基本的に、次のような性質が見い出される。

- (1) 一つ一つのウロコはほぼ四角形で、その配列は規則正しい。
- (2) 中央から左右にほぼ対称であるが、完全に同一ではない。また、左右のパターンの境界部分に独特の文様 (左右の接合文様) が生じている。
- (3) ウロコの大さが、中央から左右端に行くにつれて小さく変化している。
- (4) ウロコの立体形状はほぼ偏平であるがやや凸であり、境界部分は溝になっている。

のような特徴が観察される。さらに、細部に注目すると

- (5) ウロコの配列に分岐・融合が起こっている。
- (6) ウロコ自体の形状も、場所により変化している。

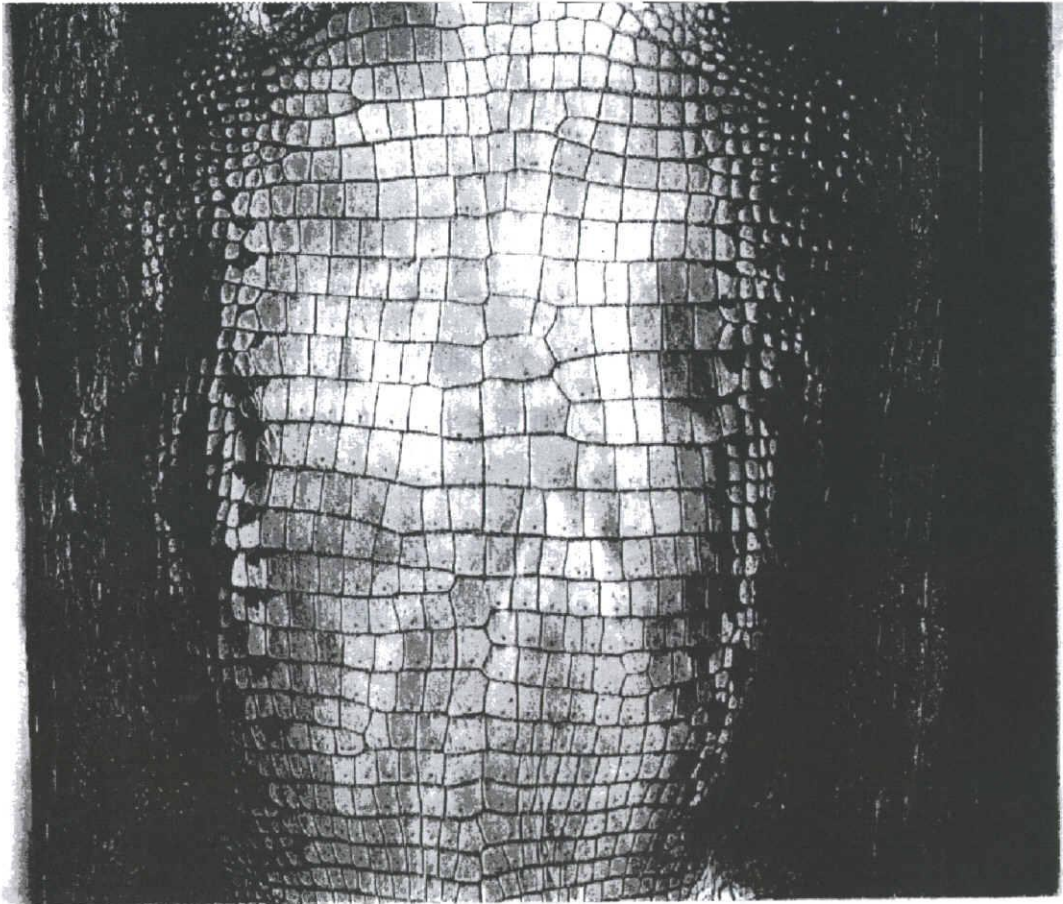


図 2-2 実際のワニ皮革（腹部）

第2章 自然物のレンダリング

これらの特徴は一般的なワニ全体にみられる特徴であり, 本文では基本的なワニ皮革の特徴である上記特徴 (1) ~ (4) に着目し, CG による皮革テクスチャの表現手法を提案する.

2.3.2 皮革テクスチャの生成

提案する皮革テクスチャの生成は, まず, ボロノイ分割を利用してウロコ・パターン (線図形) の生成を行い, 得られた線図形にウロコの立体形状を設定して立体的な皮革テクスチャを生成するという, 2 段階の処理により行われる. 以下, 各処理を順を追って説明する.

(1) ウロコ・パターンの生成

この処理では, 2 次元的なウロコ・パターンの生成を行う. ここでは, ボロノイ分割を用いてウロコの模様を表すような線図形の生成を行う. ボロノイ分割は, 図 2-3 に示すようなもので, 平面上に配置された有限個の基準点 (以下, シードと呼ぶ) が与えられたとき, 最近傍則によって平面を排反な多角形群に分割する手法である [伊理 86]. ボロノイ分割により生成される図形に対してシードの配置を制御することにより, 細胞の配列のようなパターンの生成が可能である. これらのパ

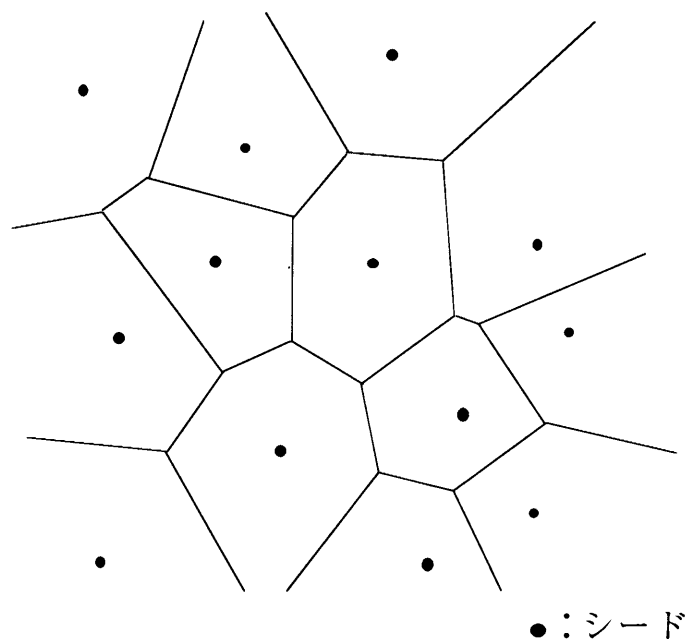


図 2-3 ボロノイ分割

ターンを個々のウロコと対応させることができることから、爬虫類皮革のような模様の生成手法の一つとしてボロノイ分割は有効であると考えられる。しかし、シードをランダムな位置に配置したような一般的なボロノイ分割では、個々の領域を様々な形状に分割するため、各領域がほぼ四角形の規則正しい配列となるワニ皮革のようなウロコ・パターン生成に直接適用することは不適當である。そこで、先に述べた実際の爬虫類の皮革の特徴を考慮し、これを実現するためにシードの与え方を制御したボロノイ分割を2段階で使用することによってワニ皮革のウロコ・パターンを生成する。なお、ウロコ・パターンは、縦方向に y 軸、横方向に x 軸を取った正方形領域 ($0 \leq x, y \leq 100$) の中に生成することとする。2段階の分割では、まず y 軸方向の分割を、次に x 軸方向の分割を行い、これにより、ほぼ四角形のパターンの生成を行なうことができる。この2段階処理はともに以下に示す4つの処理から構成される。

処理1：シードの配置

シードはまず等間隔の格子点上に配置する。これは、自然物の持つ規則的な部分を考慮している。実際には、2段階のそれぞれの処理において特有のシードの配置を行う。

処理2：シードの移動

シードの間隔 D に対する変位度 a と一様乱数 Rnd ($-1 < Rnd < 1$) を用いて、シードの変位量 M を次式のように求める。

$$M = D \cdot a \cdot Rnd \quad (2.1)$$

この M の大きさに従ってシードを移動するが、その方向は各段階で異なる。これは、自然物の持つ不規則な部分の表現となる。

処理3：ボロノイ分割

計算幾何学的アルゴリズム [杉原 89] を用い、連続平面上での分割処理を行う。この処理により与えられたシードを内部に含むような多角形群が得られる。

処理4：揺らぎ処理

第2章 自然物のレンダリング

ボロノイ分割によって生成されるのは直線を辺とする多角形であり,このままでは自然物の表現として不自然である.そこで,分割によって得られた多角形の各辺を中点変位法 [Fournier82] を用いた疑似フラクタルにより変形することによって,直線に揺らぎを与える.

処理1におけるシードの初期配置を三角格子点と正方格子点とした場合に生成されるパターンの例を図2-4に示す.シードの移動量の違いによって生成されるパターンは変化するが,適当な変位度 a を与えることにより,ワニ皮革(図2-4 (f))やヘビ皮革(図2-4 (b))の特徴を部分的に表現する様なパターンが得られる.しかし,先に述べたワニ皮革の特徴を考えると,ウロコの並びの方向や配列のしかたの特徴が前述した特徴と異なるため,このままではワニ皮革のパターンとしては不適當であると考えられ,ここでは,2段階のボロノイ分割による手法を用いる.

以下では,ワニ皮革のウロコ・パターンの生成のための2段階の処理手順を具体的に述べる.

第1段階では,縦方向の分割と中央部の重なり合いパターンの生成を行う(図2-5).縦方向の分割は, x 軸に平行にシードの列を配置したボロノイ分割を行うことに

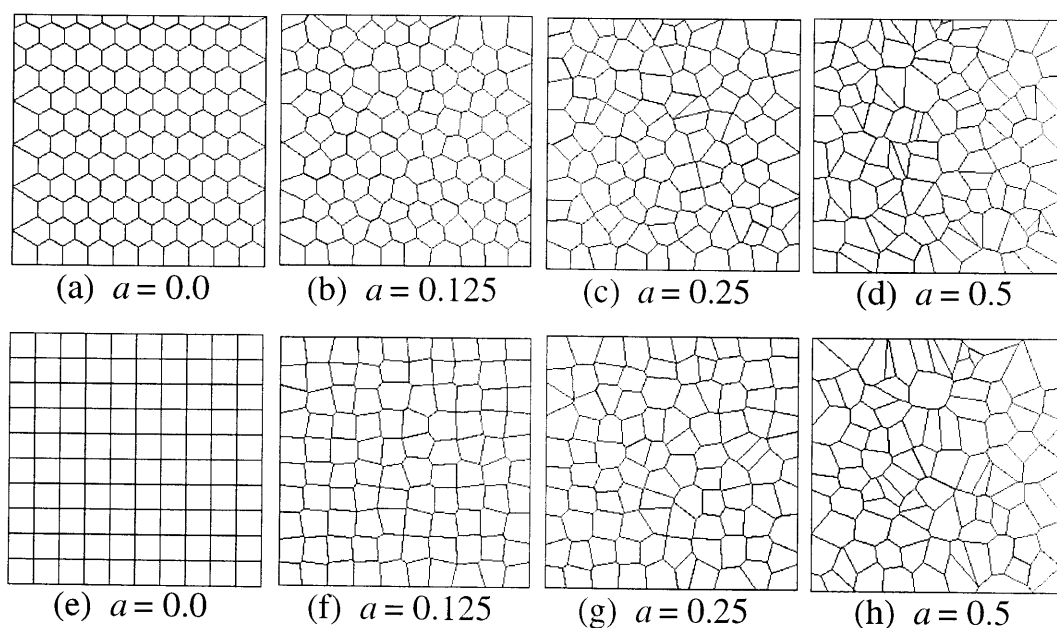


図2-4 三角格子 (a-d) および正方格子 (e-h) を基としたパターン生成例

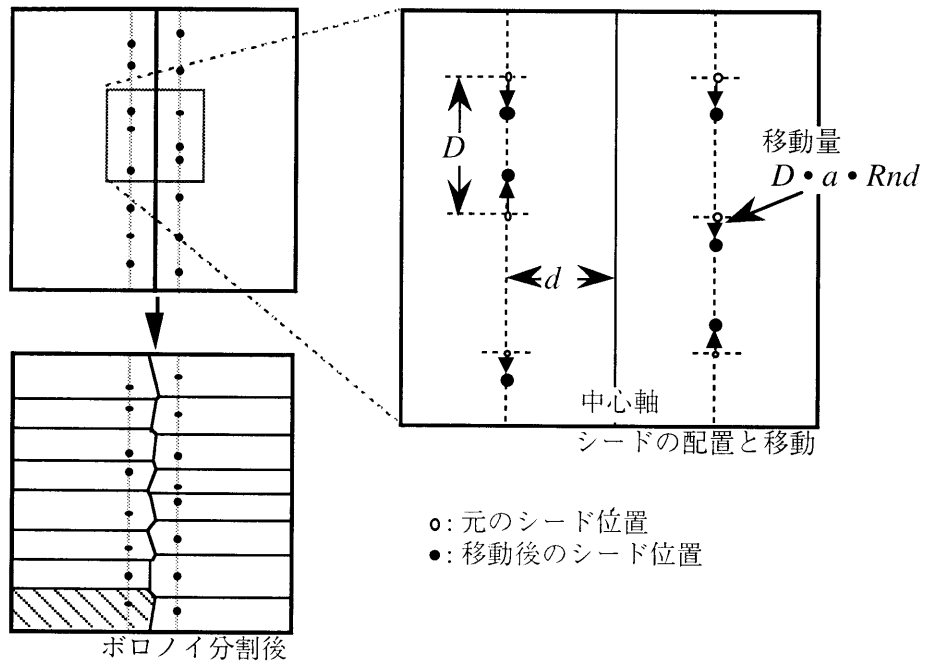


図 2-5 縦方向の分割処理

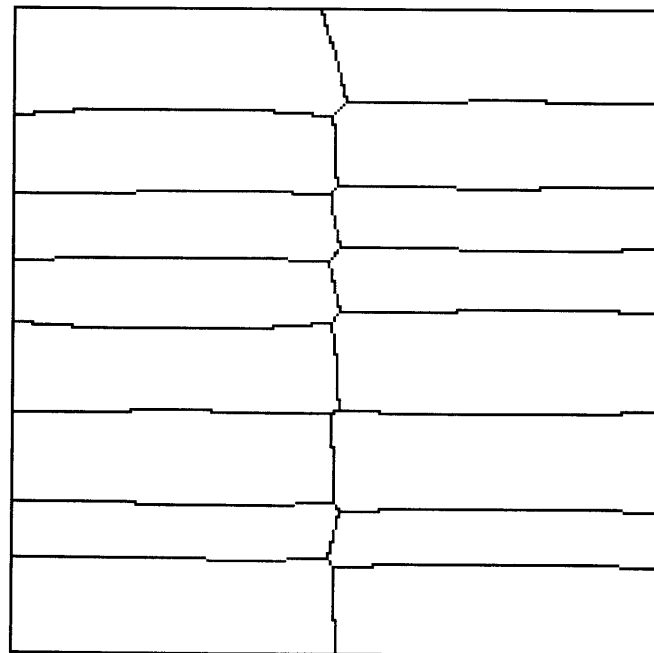


図 2-6 縦方向の分割後のパターン

第2章 自然物のレンダリング

よって得られる。また，中央部のパターンを作るために初めのシードの配置を中心軸の両側に軸に関して対称な位置にしている。以下に縦分割の処理手順を示す。

処理1：y 軸に平行で中心軸から等距離 d の二直線上に等間隔にシードを置く。

処理2：乱数を用い，y 軸に平行な方向へ式 (2.1) の変位量だけ各シードを移動する。

処理3：シードを基準にしてボロノイ分割を行う。

処理4：ボロノイ多角形の辺に対し，疑似フラクタルを用いて揺らぎ処理を行う。

縦方向の分割処理により生成される図形パターンを図2-6に示す。これにより，ワニ皮革に見られる，中央部の重なり合いパターンが生成されていることが分かる。このそれぞれの多角形に対して次の横方向の分割処理を施す。

第2段階では，第1段階で生成されたパターン（多角形）の内部を横方向に分割して，最終的なパターンを作る（図2-7）。横方向の分割は，x 軸に平行なシード列からボロノイ分割を行うことによって得られる。ただし，中心から両端に向かってパターンのサイズを小さくするために基準のシードの配置間隔を順に小さくする。以下に第2段階の手順を示す。

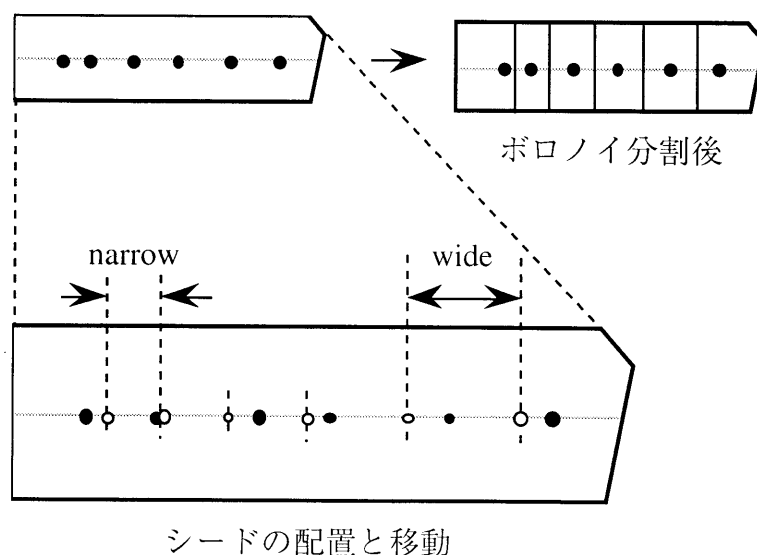


図2-7 横方向の分割処理

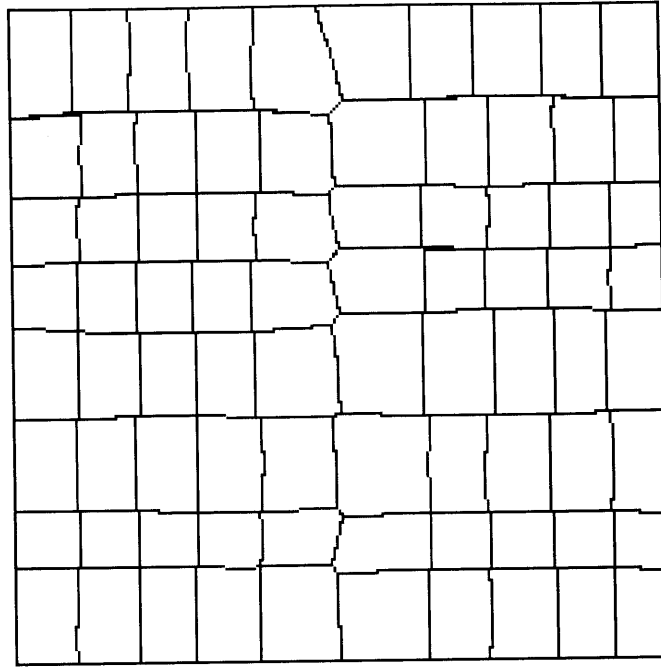


図 2-8 横方向の分割後のパターン

処理1: x 軸に平行にシードを置く. この際, シードの間隔は左右の両端に近づくほど狭くする.

処理2: 乱数を用い, x 軸に平行な方向へシードを移動する.

処理3: シードを基準にして第1段階の多角形の内部でボロノイ分割を行う.

処理4: 分割後の多角形の辺に対し, 疑似フラクタルを用いて揺らぎ処理を行う.

これら2段階の処理により生成されたウロコ・パターンの線図形の一例を図 2-8 に示す. このパターンは多角形群であり, 個々の多角形がウロコに対応している. 生成されたパターンは, 前述したワニ皮革のウロコ・パターンの特徴 (1) ~ (3) をほぼ満たしている.

ここで述べたウロコ・パターン生成手法においては, 以下のようなパラメータを与える.

D : 基本的な格子点間隔.

d : 縦方向の分割における中心線からシード列までの距離.

a : シードの格子点間隔に対する変位率.

p : 各辺の中点変位法の揺らぎ処理における変位度.

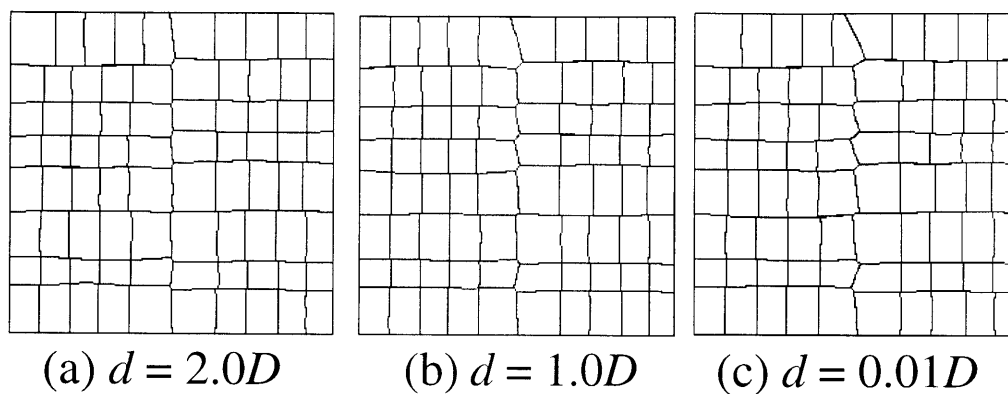


図 2-9 中心軸からの距離の影響

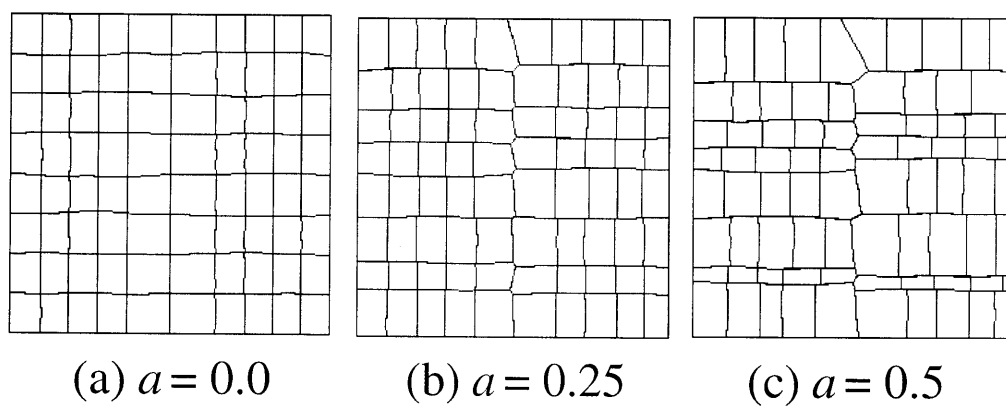


図 2-10 相対変位度の影響

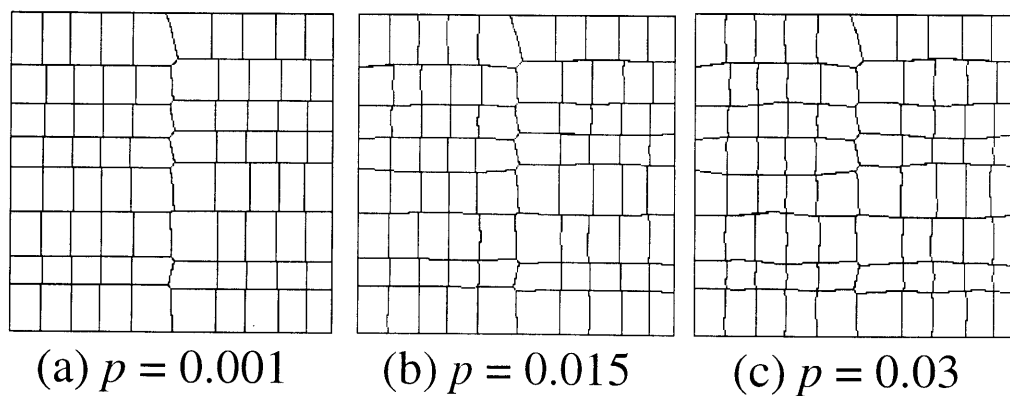


図 2-11 揺らぎ処理の大きさの影響

これら各パラメータのパターン生成への影響を図2-9～2-11に示す。以下の処理では図2-8のパターン生成に用いた $d = 1.0D$, $a = 0.25$, $p = 0.015$ のそれぞれの値を用いる。 D の値は、テクスチャを生成する正方形領域の大きさに対するウロコの大きさであり、図2-6, 図2-8では、 $D = 15$ の値を使用している。

(2) 立体形状の設定

3次元的な皮革テクスチャ生成の第2番目の処理は、前述の処理によって得られた平面的なウロコ・パターンに立体形状を与えることにより、3次元の皮革テクスチャを生成する処理である。皮革テクスチャの立体形状は、3次ベジェ曲線(付録1-1参照)を用いてウロコの断面形状を設定し、以下の手順で皮革テクスチャにおける立体的な形状を生成する(図2-12)。

まず、ウロコ・パターンのある一つの多角形について、頂点の座標からその重心 $m(m_x, m_y)$ を求める。 m から多角形の辺上の一点 $p(p_x, p_y)$ の方向に r 軸を取り、この軸上にベジェ曲線を断面形状として与える(図2-12(a))。曲線上の任意の点 q_0 の位置 (r_0, z_0) は、ベジェ曲線上の位置を決めるパラメータ $t = t_0$ ($0 \leq t_0 \leq 1$)を式(付1.3)に代入することにより計算される。また、シェーディングの際に重要となる法線方向のベクトル $n(n_x, n_y, n_z)$ は、ベジェ曲線の(付1.3)式を媒介変数で微分して

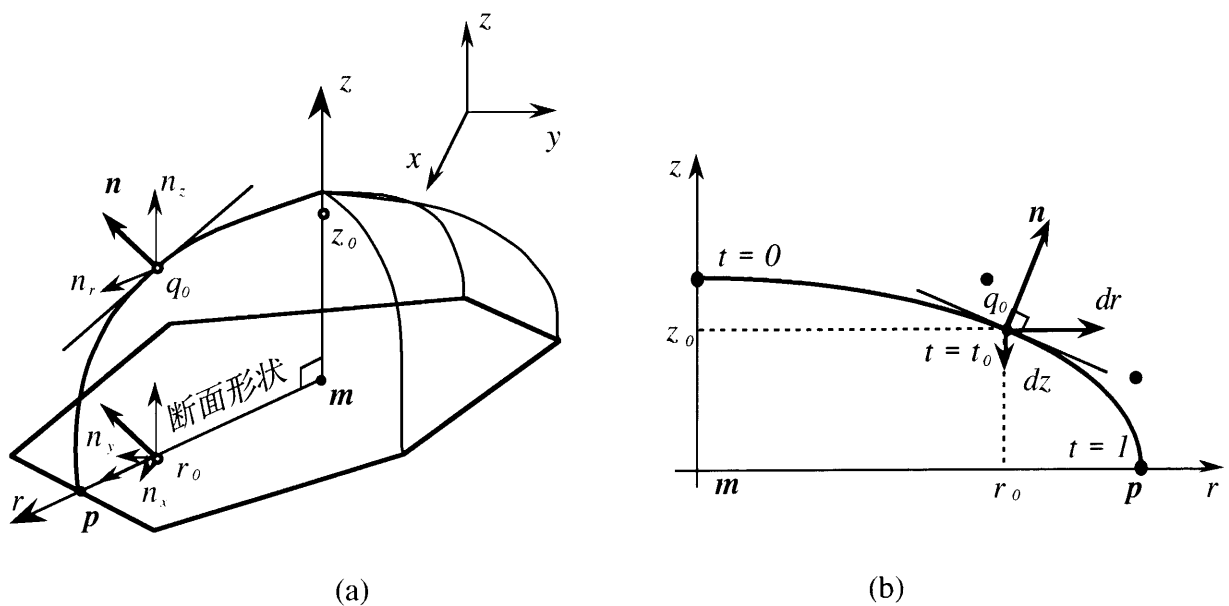
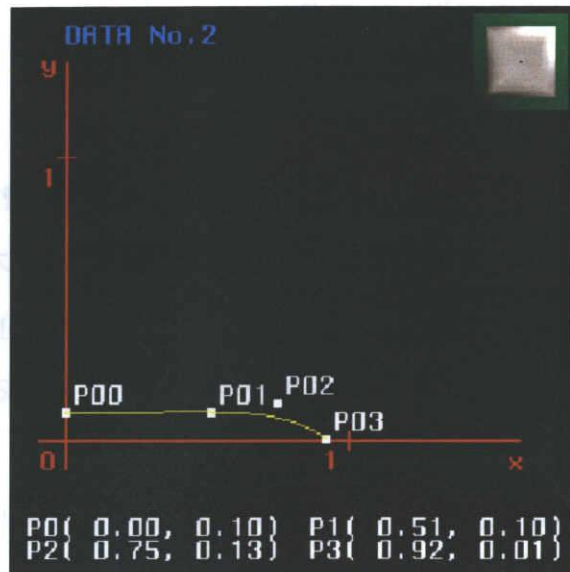


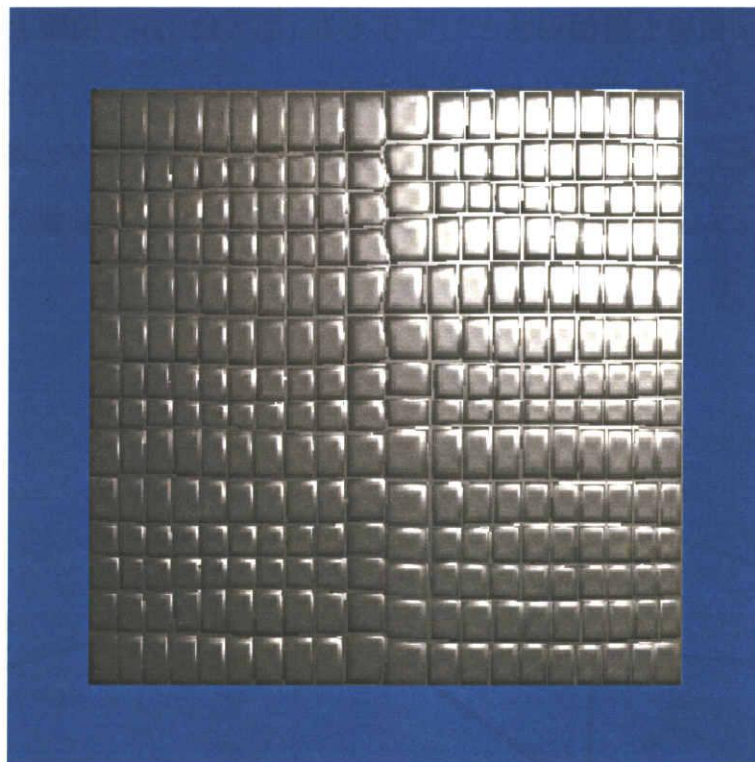
図2-12 立体形状と法線ベクトルの設定



(a) 断面形状

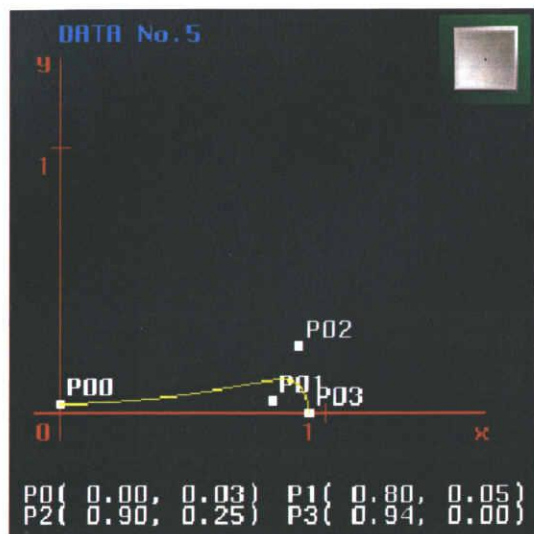


(c) テクスチャの拡大図

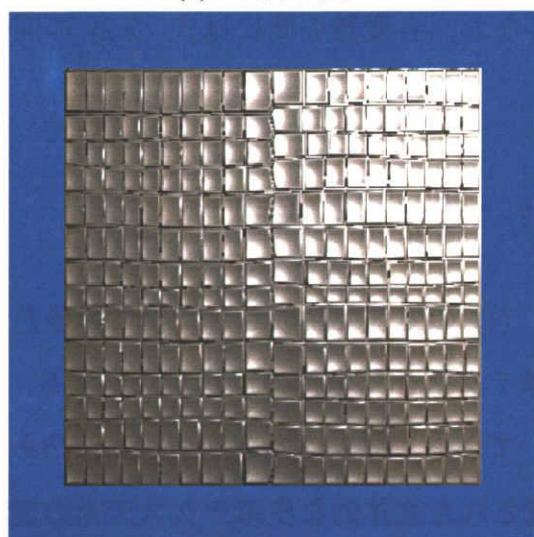


(b) 生成されるテクスチャ

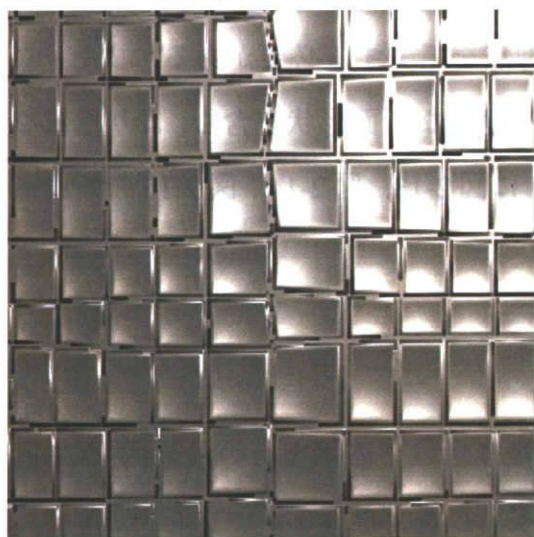
図 2-13 皮革テクスチャの生成と表示の例



(a) 断面形状

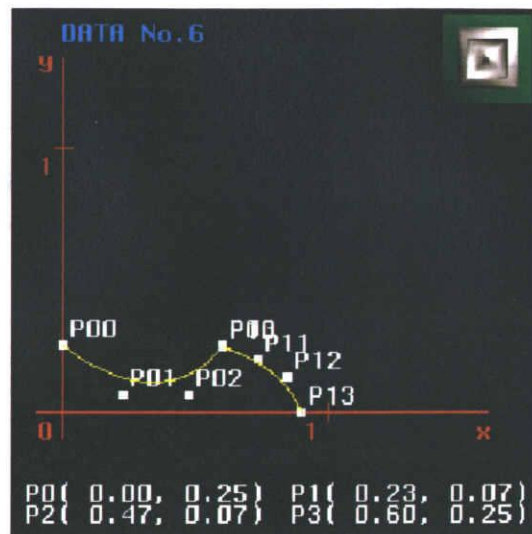


(b) 生成されるテクスチャ

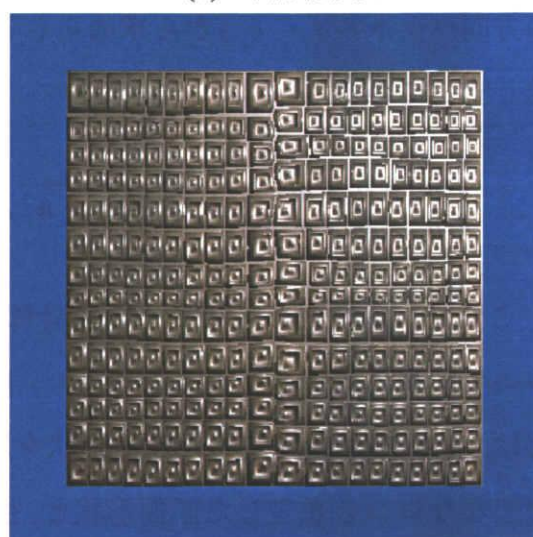


(c) テクスチャの拡大図

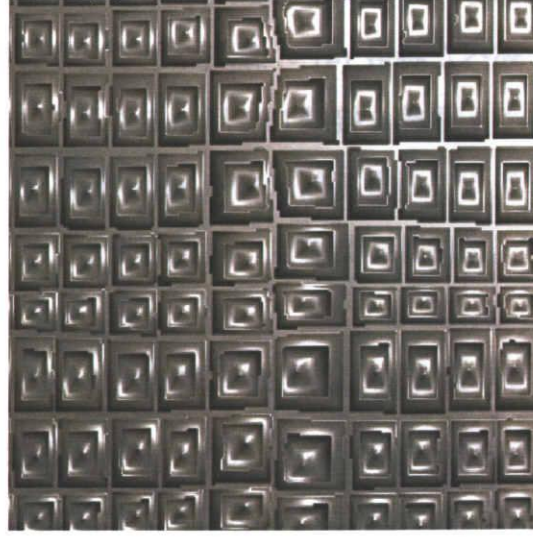
図 2-14 凹な形状の皮革テクスチャの生成と表示の例



(a) 断面形状



(b) 生成されるテクスチャ



(c) テクスチャの拡大図

図 2-15 複数の曲線による断面形状により生成されるテクスチャの例

表 2-1 断面形状設定のための曲線数と制御点座標

	曲線数	制御点の座標
図2-13	1	(0.0, 0.1), (0.51, 0.1), (0.75, 0.13), (0.92, 0.0)
図2-14	1	(0.0, 0.03), (0.8, 0.05), (0.9, 0.25), (0.94, 0.0)
図2-15	2	(0.0, 0.25), (0.23, 0.07), (0.47, 0.07), (0.6, 0.25) (0.6, 0.25), (0.73, 0.2), (0.85, 0.13), (0.9, 0.0)

得られる式 (付 1.4) より求められる dr, dz (図 2-12 (b)) 及び, r 軸の x - y 平面上での方向ベクトル (n_x, n_y) から求められる. なお, 各変数の間には式 (2.2) の関係が成り立っている.

$$\begin{cases} n_x = p_x - m_x \\ n_y = p_y - m_y \end{cases}, \quad n_r = \sqrt{n_x^2 + n_y^2}, \quad n_z = -\frac{dr \cdot n_r}{dz} \quad (2.2)$$

これを, 多角形の各辺について計算し, (1) の処理で生成された全ての多角形について同様の処理を行うことにより, 皮革テクスチャ全体の形状が決定する. 本文では, 試行錯誤的に定めた断面形状を用いており, 図 2-13 及び図 2-14 は, 凸あるいは凹なウロコを想定した断面形状と, 生成された立体的な皮革テクスチャの表示例である. ウロコ・パターンの多角形の辺の部分 (図 2-12 (a) の点 p) では, 2.3.1 節で述べた特徴 (4) の溝ができるように制御点を工夫する必要がある. また, 複数のベジェ曲線を接続して用いることにより不連続な断面形状を含む, より複雑な形状を扱うことも可能である (図 2-15). 表 2-1 に図 2-13, 図 2-14, 図 2-15 の断面形状のベジェ曲線の制御点の座標値を示す.

2.3.3 表示結果および考察

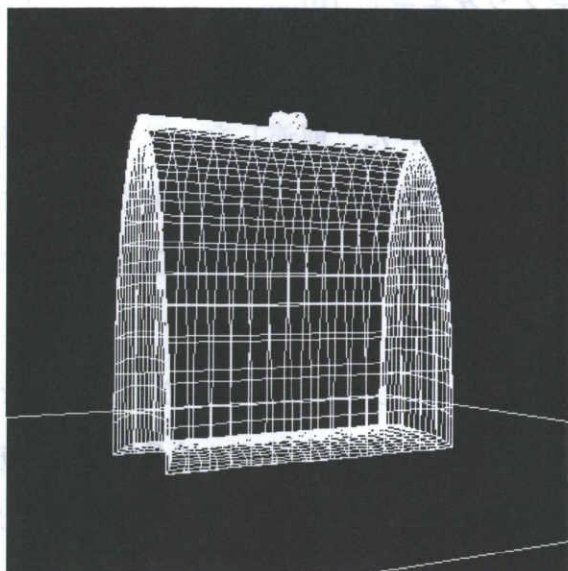
生成した皮革テクスチャを物体形状に張り付けて表示を行い最終的な CG 画像を得る. 図 2-16 はハンドバッグを想定した皮革製品形状 (ワイヤフレーム) と, 試作した皮革テクスチャ (図 2-13 (b)) をマッピングして表示した例である. 製品形状は 3 次ベジェ曲面 (付録 1-2 参照) による曲面セグメント 7 個, 球面のセグメント 2 個

2.3 爬虫類皮革の表現

により構成されている。これらの内、5つの曲面について皮革テクスチャをマッピングして表示し、他の4つのセグメントはハンドバッグの金具を想定したものである。反射モデルとしてはブリンのシェーディングモデル [Blinn77] を用い、皮革部分と金具部分のそれぞれを試行錯誤的に求めた反射パラメータを用いてシェーディングを行っている。なお、光源は2個の点光源を用いた。前述した、ワニ皮革の持つ特徴がほぼ表現されており、目視評価ではあるが満足のいく表示結果が得られている。また、実際に形状に張り付けて表示することにより、本手法が工業デザインに応用可能であることを示している。

図2-17はウロコ・パターンとして三角格子を利用した図2-4 (b) のパターンを、断面形状として凸な断面である図2-13 (a) を用いた1段階のボロノイ分割による皮革テクスチャと、それを用いたヘビ革のベルトの表示例である。ワニ皮革のテクスチャ生成手法と類似したアプローチで、その他の爬虫類皮革への対応が可能である。

図2-16の生成に要する時間は、SGI社のIRIS-Crimson (CPU: R4000, 85MIPS) を使用した場合、約2分である。



(a) 製品形状

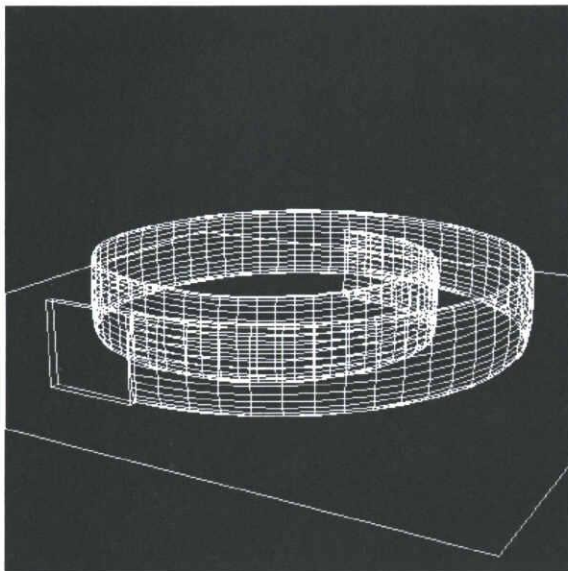


(b) 拡大図

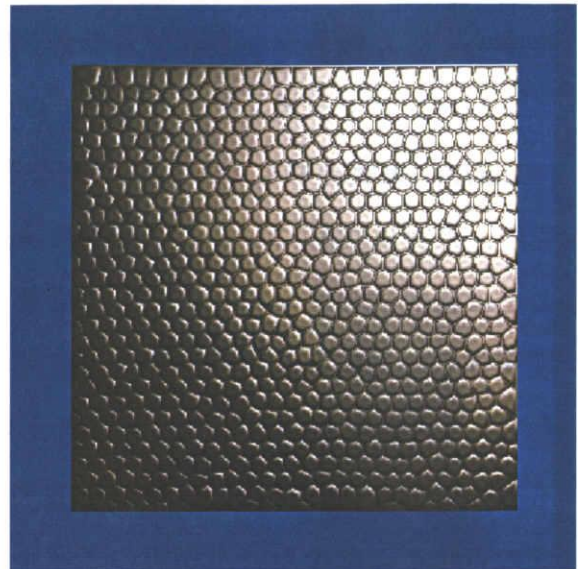


(c) テクスチャマッピングによる最終的表示結果

図 2-16 表示例－ハンドバッグ



(a) 製品形状



(b) 皮革テクスチャ
(図 2-4 (c) と図 2-13 (a))



(c) テクスチャマッピングによる
最終的表示結果



(d) 拡大図

図 2-17 表示例ーベルト

2.4 柑橘果実の表現

CGにおいて、これまでに植物を扱う研究としては、樹木や草木の幹や枝の表現を中心とした報告がなされてきたが、身近な植物である果実の表示に関しては、ブリンがバンプマッピングによるイチゴの簡易的な表示例を報告している程度であり [Blinn78], 果実そのものの持つ特徴を表現可能な手法に関する研究は報告されていない。果実は食料にもなることから身近な対象であり、これをCGにより表現することは自然物の表現の一つとして必要である。具体的には、アニメーションなどの映像作品や果実製品のパッケージデザイン、また、将来的にはVRの応用の一例としてのCG植物園などへの利用が考えられる。そこで、本節では実在の果実の中でもその表面の凹凸に特徴を持つ柑橘果実を対象とし、その表面凹凸のテクスチャ生成の方法とこれを用いた果実の表示手法について述べる。また、最終的な映像生成を考慮に入れて、果実の形状に対して自然な形状生成のための方法についても言及する [東海 93-1]。

ところで、CGにおける植物表現は、写実的な表現、簡易的手法による高速な表現、動的な表現に大別される。写実的な表現は、樹木や草木などを、対象の外観的な特徴を十分反映した絵としてCGによって表現するものであり、より現実に近い表現や、個々の植物の持つ特徴を踏まえた表現手法が望まれる。代表的な研究として、実際の樹皮からとれた石膏の型を用いてバンプマッピングにより樹皮の質感を表現するものや [Bloomenthal85], フラクタルを用いて枝の分岐や葉脈の模様を生成するもの [Demco85] がある。簡易的手法による高速な表現は、飛行機や自動車の操縦シミュレータや景観シミュレーションにおいて、付加的な情景として樹木を表現するものであり [中嶋 88], この場合、厳密な質感の表現より高速な生成やCGシーンにおける雰囲気向上を目指すものである。動的な表現では、樹木の枝振りなどの成長過程を日照などの環境を考慮してCGによりシミュレートする研究 [奥村 88] や、風による草木の揺らぎを表現する研究 [Reeves85] が報告されている。このように、植物の表現では、その目的に応じて様々なアプローチがあるが、本節では写実的な表現を目的とした柑橘果実のレンダリング手法について述べる。

2.4.1 柑橘果実の特徴

柑橘果実は食用に用いられるなど、非常に身近な果物である。実際の柑橘果実の例として、みかん、オレンジ、レモンの写真を図2-18に示す。これらの他にも柑橘果実の種類は豊富に存在するが、およそ以下に挙げるような特徴が共通して観察される。

- (1) 大まかな形状は球形又は楕円体である。
- (2) 形状に自然な歪みがある。
- (3) 細かなくぼみ（油胞と呼ばれる）が果実の表面にほぼ一様に分布している。
- (4) 独特の色艶がある。

このような、果実共通の特徴も、柑橘果実の種類によって果実の形状や凹凸の分布などが微妙に異なる。図2-18における3種類の柑橘果実についてその違いをまとめると、次のようになる。みかんは、大まかな形状としては球を上下方向につぶしたような形をしており、表面は凹凸が少なく、比較的なめらかである。オレンジは形状としてはほぼ球形と考えてよい。表面には細かいくぼみが多く見られる。レモンは形状としてはほぼ楕円球と考えてよいが、長軸方向の両端が小さく膨らんでい



図2-18 実際の柑橘果実（左からレモン、オレンジ、ミカン）

第2章 自然物のレンダリング

おり、表面の凹凸は比較的疎に分布している。この様に外観の特徴の違いが個々の果実の特徴として重要であり、CGにおいてはこの違いを表現できるモデルを開発することが求められる。

2.4.2 柑橘果実のテクスチャ生成

上記の特徴の中で、果実表面の凹凸に注目し、このテクスチャの生成手法について述べる。前述のように、柑橘果実の特徴として最も重要と思われるのは表面に一樣に分布した細かい凹凸の存在であり、CGにおいてこの凹凸を付加した表示を行うことによって、よりリアリティのある柑橘果実の表現が可能になると考えられる。ここでは、凹凸を構成するくぼみを正規分布の確率密度関数を利用して設定し、これを平面上に分布させることによって、柑橘果実の形状にバンプマッピングするために必要な凹凸テクスチャの法線マップを生成する。ここでは、テクスチャは平面上の正方形領域内 ($0 < x, y < 400$) に生成することとする。具体的な手順を以下に示す (図 2-19)。

(1) 基準点の配置 実際の柑橘果実におけるくぼみの分布を考慮し、ほぼ一樣な分布とするために平面上の三角格子点上にくぼみ生成の基準となる点を配置する。その格子点の間隔 D をパラメータとして与えることによりくぼみの分布の粗密を調節する (図 2-19 (a))。

(2) 基準点の移動 三角格子点上に配置した点の並びは規則的なものであり非常に不自然である。この処理は、くぼみの基準となる点を移動して点の配置に適度な揺らぎを与えることにより、より自然な点の配置にする処理である。ここでは、乱数を用いてくぼみの基準となる点を平面上で移動させる。具体的には、パラメータとして格子点間隔 D に対する移動量の割合 a を与えておき、一様乱数 Rnd ($-1.0 < Rnd < 1.0$) を用いてテクスチャの縦横それぞれの方向の移動量 dx, dy を以下の式で与える。

$$dx = D \cdot a \cdot Rnd, \quad dy = D \cdot a \cdot Rnd \quad (2.3)$$

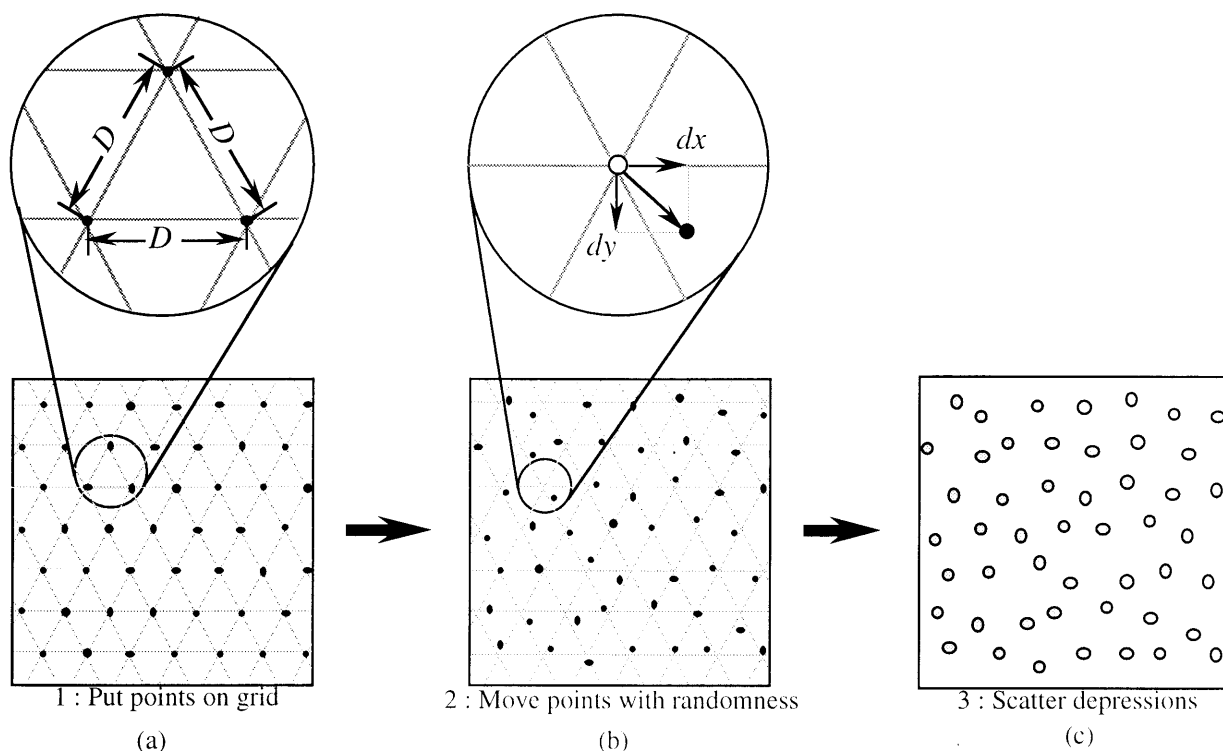


図 2-19 柑橘果実の表面テクスチャの生成手順

パラメータ a により，くぼみの分布の並びの乱雑さを設定する．ここでは，移動の割合が大きいほど，すなわち a が大きいほど，より乱雑で無秩序な点の配置となる (図 2-19 (b)).

(3) くぼみの生成 平面上に配置された基準点を中心としてくぼみを生成する．くぼみの形状には正規分布の確率密度関数を利用する．平面上のある点 (x_0, y_0) を中心とした 2 次元の正規分布の確率密度関数 $N(x, y)$ は以下の式で与えられる．

$$N(x, y) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2 |\Sigma|}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x - x_0, y - y_0) \Sigma^{-1} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix} \right\},$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y \\ \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ここではくぼみの形状が x, y の方向に依存しないため， $\rho_{xy} = 0.0, \sigma_x = \sigma_y$ として，これと x - y 平面に関して対称で係数 A 倍した関数，

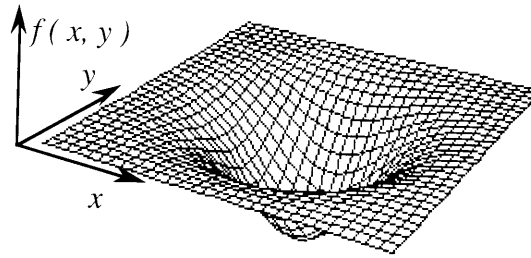


図 2-20 くぼみの立体形状

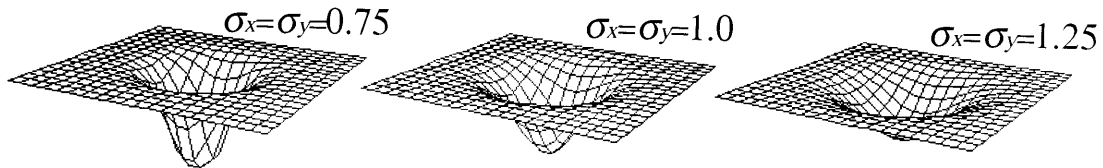


図 2-21 くぼみの形状の制御

$$f(x, y) = -A \cdot N(x, y) \quad (2.5)$$

を用いることとする (図 2-20). パラメータ A により形状の調整を行うが, ここでは果実生成のため $A=30$ を試行錯誤で決定し, 以下この値を用いることとした. 各基準点を中心にこの関数を配置し, くぼみによる凹凸テクスチャを得る.

なお, 本文ではバンプマッピングを用いるため実際に必要となるのはテクスチャの法線ベクトルであり, (2.5) 式を x, y それぞれで偏微分することによって得られる 2 方向の傾き, $\partial f / \partial x$ と $\partial f / \partial y$ を用いて, 法線ベクトル \mathbf{n} は, 以下の形で与えられる.

$$\mathbf{n} = (-\partial f / \partial x, -\partial f / \partial y, 1.0) \quad (2.6)$$

A を固定した後, さらにくぼみの形状はパラメータ (σ_x, σ_y) の値により調整でき, その値を大きくするとより平らなくぼみの形状となり, 小さくすると尖ったくぼみの形状となる (図 2-21). また, テクスチャ上での相対的な大きさは拡大率 s により調節可能であり, 関数 f の変数 x, y の代わりに $(x - (1-s)x_0) / s$, $(y - (1-s)y_0) / s$ を用いることにより拡大・縮小する. くぼみの基準点が近寄っている場合, 2 つのくぼみの形状が重なることがあるが, このときは重ね合わせの原理によって重なった部分は両方の和とすることで処理する.

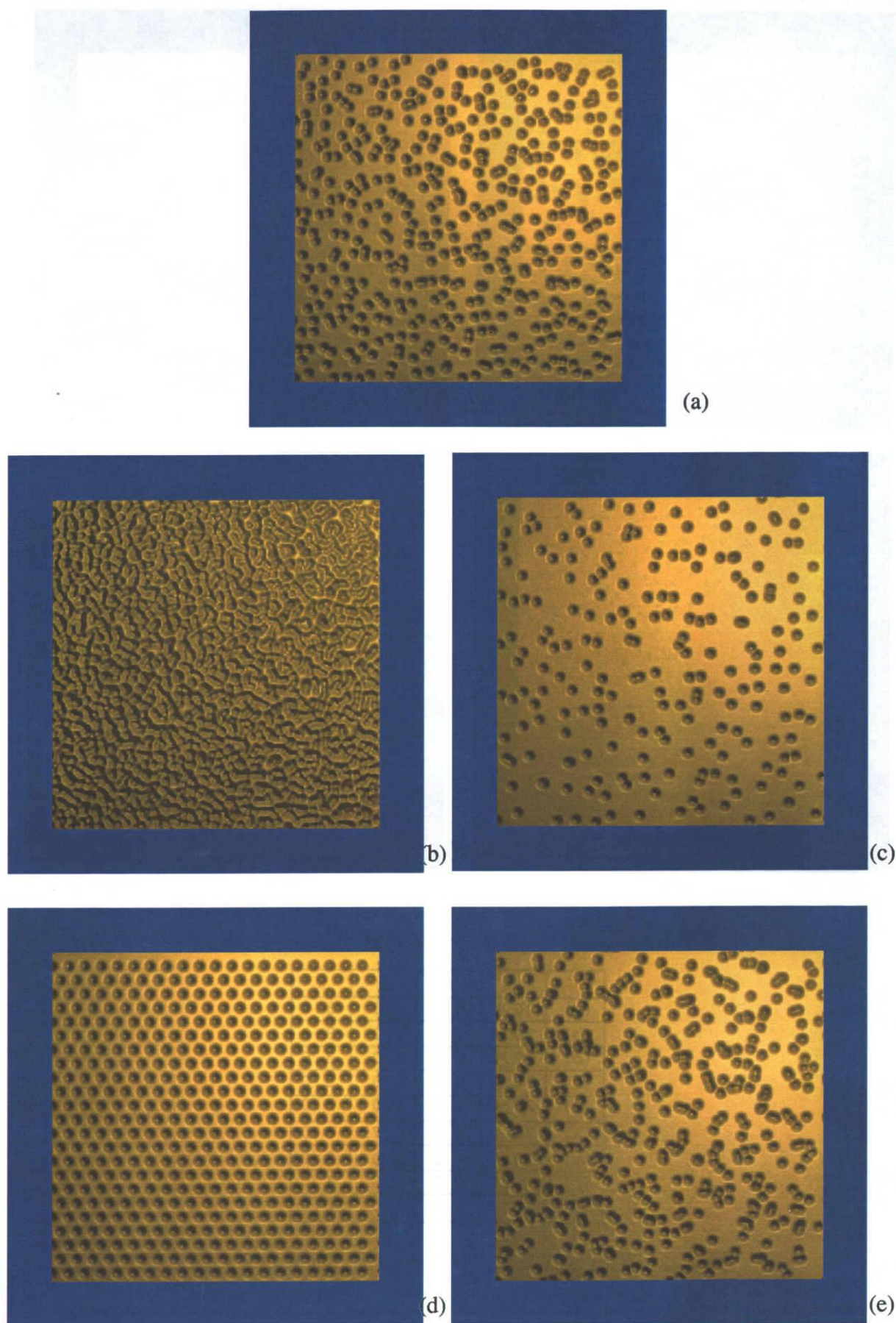
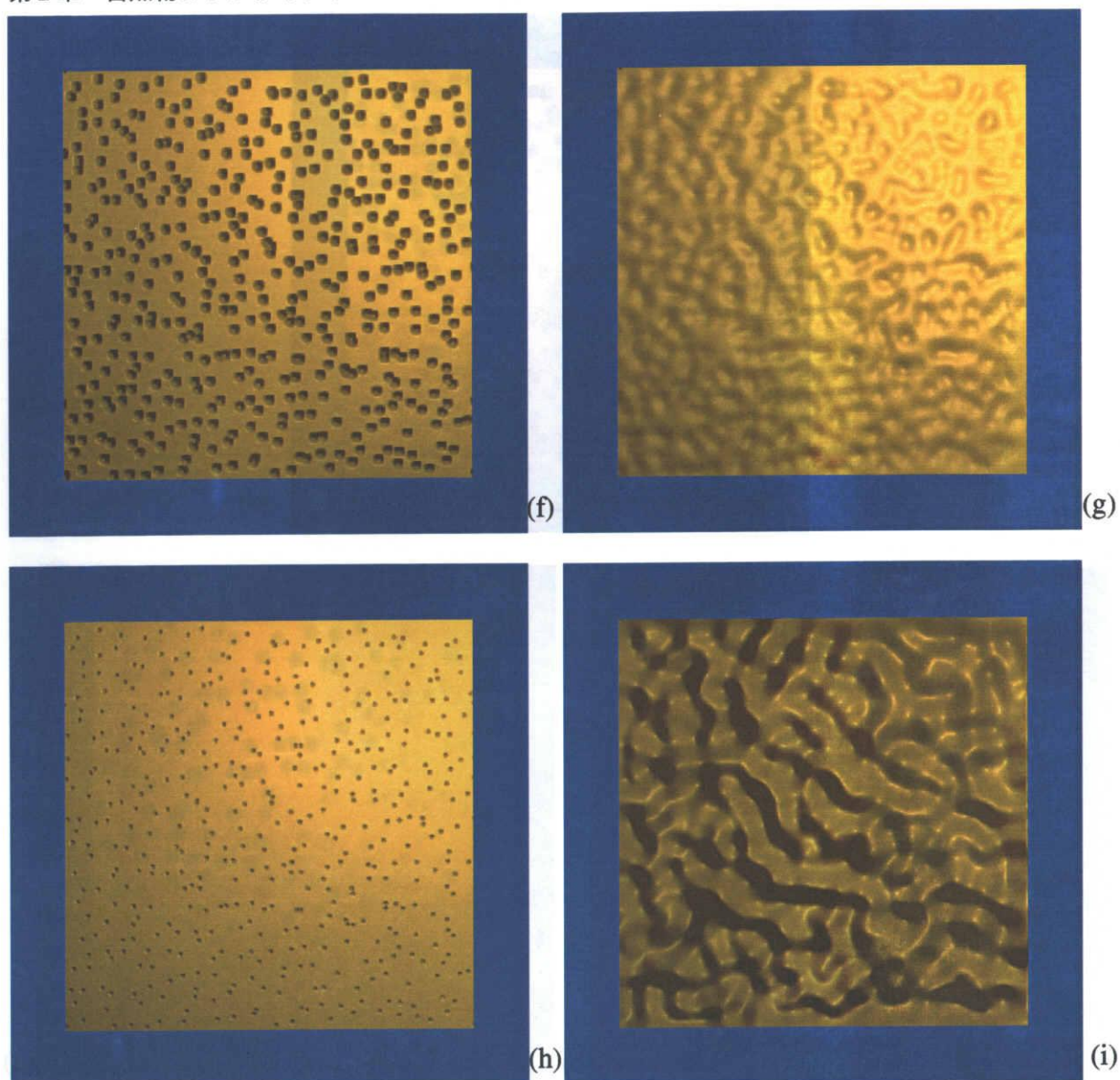


図 2-22 生成されるテクスチャの例（次頁に続く）



パラメータの値

	D	a	σ	s
(a)	20.0	0.5	1.0	3.0
(b)	10.0	0.5	1.0	3.0
(c)	30.0	0.5	1.0	3.0
(d)	20.0	0.0	1.0	3.0
(e)	20.0	1.0	1.0	3.0
(f)	20.0	0.5	0.75	3.0
(g)	20.0	0.5	2.0	3.0
(h)	20.0	0.5	1.0	1.0
(i)	20.0	0.5	1.0	10.0

図2-22 生成されるテクスチャの例（前頁からの続き）

以上のアルゴリズムにより生成されるテクスチャの例を図2-22に示す。なお、テクスチャ生成のためのパラメータをまとめると、

A ：くぼみの深さ (以下の実験では固定)

D ：三角格子の間隔

a ：基準点の格子間隔に対する移動率

σ ：分布形状

s ：拡大率

であり、図2-22 (a) ~ (i) は図2-22 (a) を基準として4つのパラメータをそれぞれ変化して得られるテクスチャである。図2-22 (b) (c) は D の変化、図2-22 (d) (e) は a の変化、図2-22 (f) (g) は σ の変化、図2-22 (h) (i) は s の変化によるテクスチャへの影響を示している。

生成されたテクスチャはバンプマッピングのデータとして以下の処理に用いる。柑橘果実の種類による表面の特徴の違いは上記の各パラメータを調節することによって表現するが、今回は実物を参考にして試行錯誤的に設定した値によりそれぞれの柑橘果実のテクスチャを決定した (図2-23)。

2.4.3 柑橘果実形状の生成

柑橘果実表現する上で、その形状表現も重要な要素である。ここでは、**B** スプライン曲面により設計された基本形状に、中点変位法による揺らぎ処理を行って果実形状を生成する。

まず、基本形状は**B** スプライン曲面を使用するが、これは一つの曲面を設定するために16個の制御点を用いるものであり、制御点の位置の与え方を工夫することによって複数の曲面をなめらかに接続することが可能である (付録1-3参照)。ここでは、球形を8つの3次**B** スプライン曲面を用いて表現する制御点の与え方 (図2-24) を応用して、ほぼ楕円体と考えられる柑橘果実の形状を実物を参考にして設定する。なお、レモンについてはその複雑な形状を考慮し、16個の曲面を接続して形状を表現する。図2-25にオレンジ、みかん、レモンの基本形状を各々示す。

この様に設定された柑橘果実の形状にフラクタルを用いた揺らぎ処理を行ない、果実形状に自然な歪みを付加する。ここでの処理は、乱数の要素を含んだ自己相似

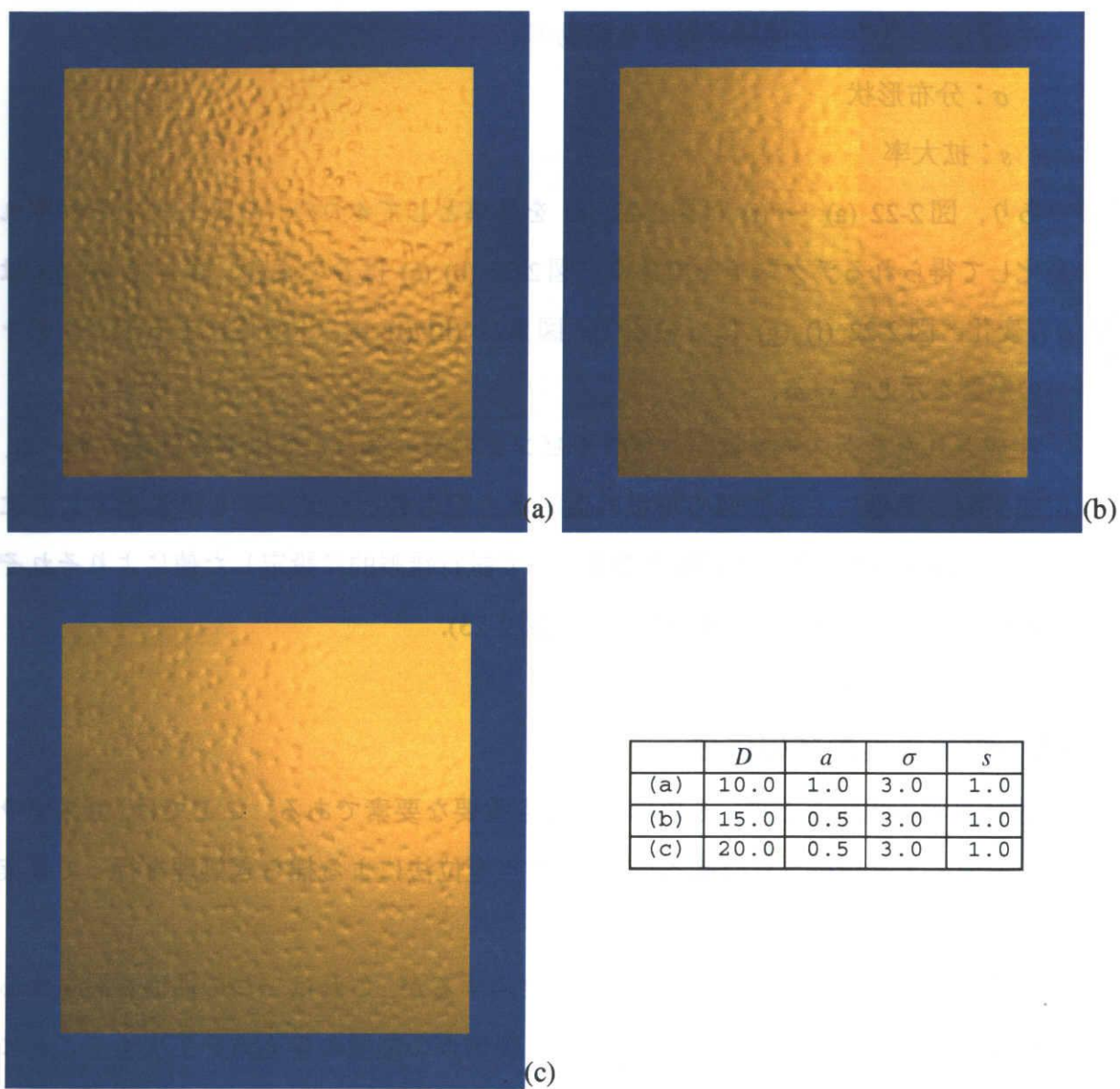


図 2-23 柑橘果実のテクスチャ - 表示例とパラメータの値
(a) オレンジ, (b) みかん, (c) レモン

によって曲面を変形する処理である (付録 1-5 参照). 柑橘果実の形状 (オレンジ) に対してこの処理を施した場合の例を図 2-26 に示す. 歪みを与えることにより自然な形状表現が得られ, この処理が効果的であることがわかる. 歪みの程度は相似比 (SR) によって調節するが, 大きな相似比による過度な揺らぎの付加は柑橘果実としては不自然な形状にしてしまい不都合である. そこで, ここでは相似比を試行錯誤的に 1.001 として処理を行った. なお, 相似比とはフラクタルを用いて曲面を分割変形する際の変形の尺度であり, 一つの分割による線分の長さの変化の割合を表す.

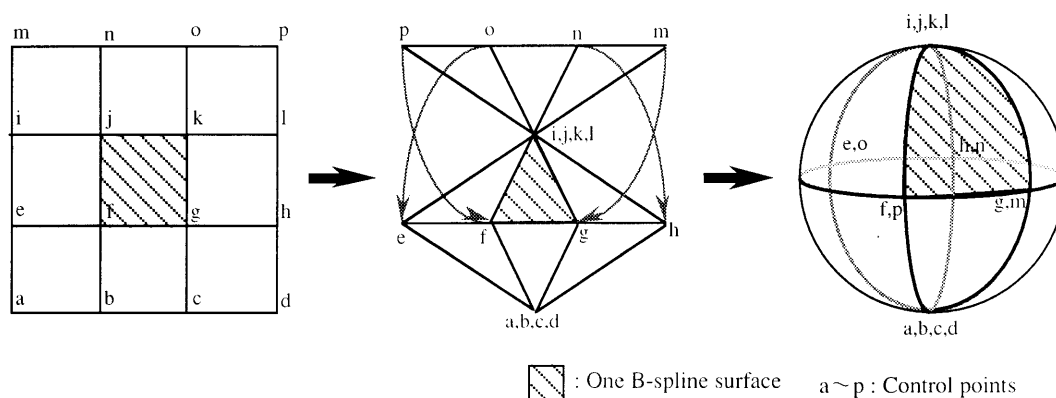


図 2-24 球形に対する制御点の配置

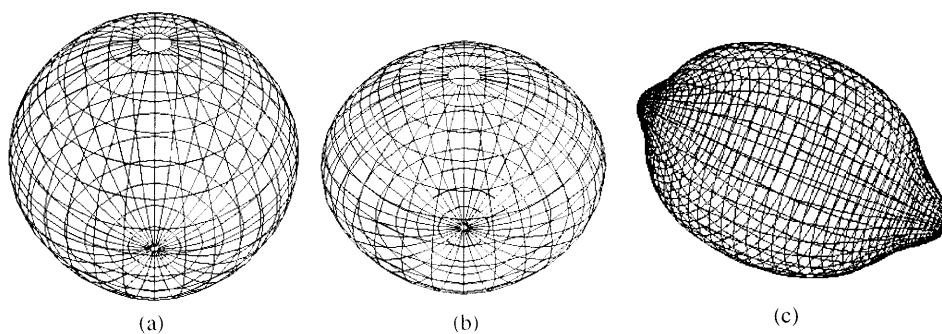


図 2-25 果実の基本形状

(a) オレンジ, (b) みかん, (c) オレンジ

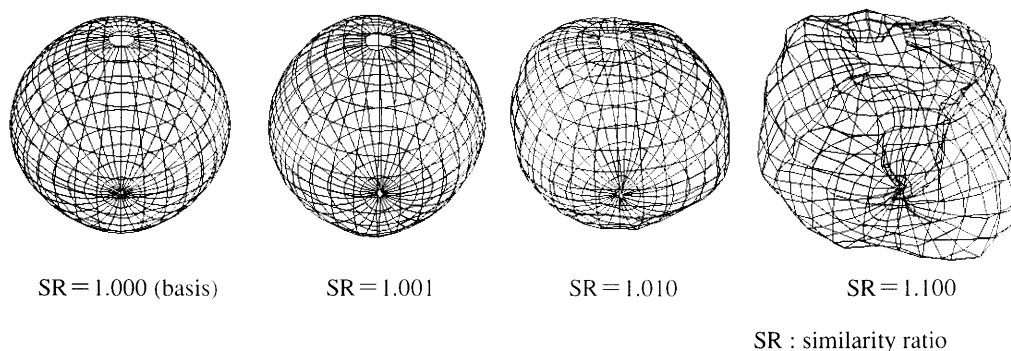


図 2-26 果実形状へのフラクタルによるゆがみの付加

2.4.4 表示結果および考察

実際の柑橘果実であるみかん, オレンジおよびレモンを考慮して生成された果実表面の凹凸テクスチャと果実形状を用いて最終的なCG画像生成を行った結果を図2-27に示す. テクスチャはバンプマッピングによって形状に張り付けられている(付録2参照). 1つの果実に対して1枚のテクスチャを用意し, 基本形状生成において使用した8枚(レモンは16枚)の個々の曲面に対してそれぞれ1枚分のテクスチャデータを張り付けている. また, 曲面の接合部はテクスチャの境界となるが, テクスチャの継ぎ目部分が目立たないように隣り合った曲面におけるテクスチャは折り返して張り付けている. 反射モデルとしてはブリンのモデルを使用し, 各果実の色などの反射パラメータはそれぞれの果実の種類によって適切な値を設定しシェーディングを行なった. 光源は2個の白色の点光源を設定している.

柑橘果実の特徴である表面のくぼみの形状を付加することによって, 実際に近い印象を与えうるCG表現が実現されている. また, 各果実の特徴についても, レモンの独特の形状と表面の細かいくぼみや, みかんの浅いくぼみの表面形状が表現できており, 本手法が柑橘果実の写実的な表現に対して効果的な手法であることが確認できた. なお, ここでは果実表面の凹凸に注目し, 実際の果実に存在する帯(へた)の部分を省略したため果実の極の部分に不自然な隙間が存在している. 今後, 帯を付加し, 自然な果実形状の生成を行うことも必要である.

図2-28は実際の画像に本手法により生成したCGのレモンを合成して表示したものである. 合成にはフォトタッチアプリケーションであるAdobe社のPhotoshopを用い, 影付けなどの処理も施されている. CG表現されたレモンを合成する前と後の画像を比較しても, 大きな違和感を感じないような画像となっていることから, 本手法が柑橘果実の表現手法として有効であることが分かる. ただし, この場合, 人間の認識には背景の部分の影響もあることに注意が必要である.

なお, 本実験ではSGI社のIRIS-4D/70を使用し, 形状の生成(揺らぎの付加)とテクスチャの生成にそれぞれ1分程度, バンプマッピングによる最終的な画像生成に約5分の計算時間を要した.

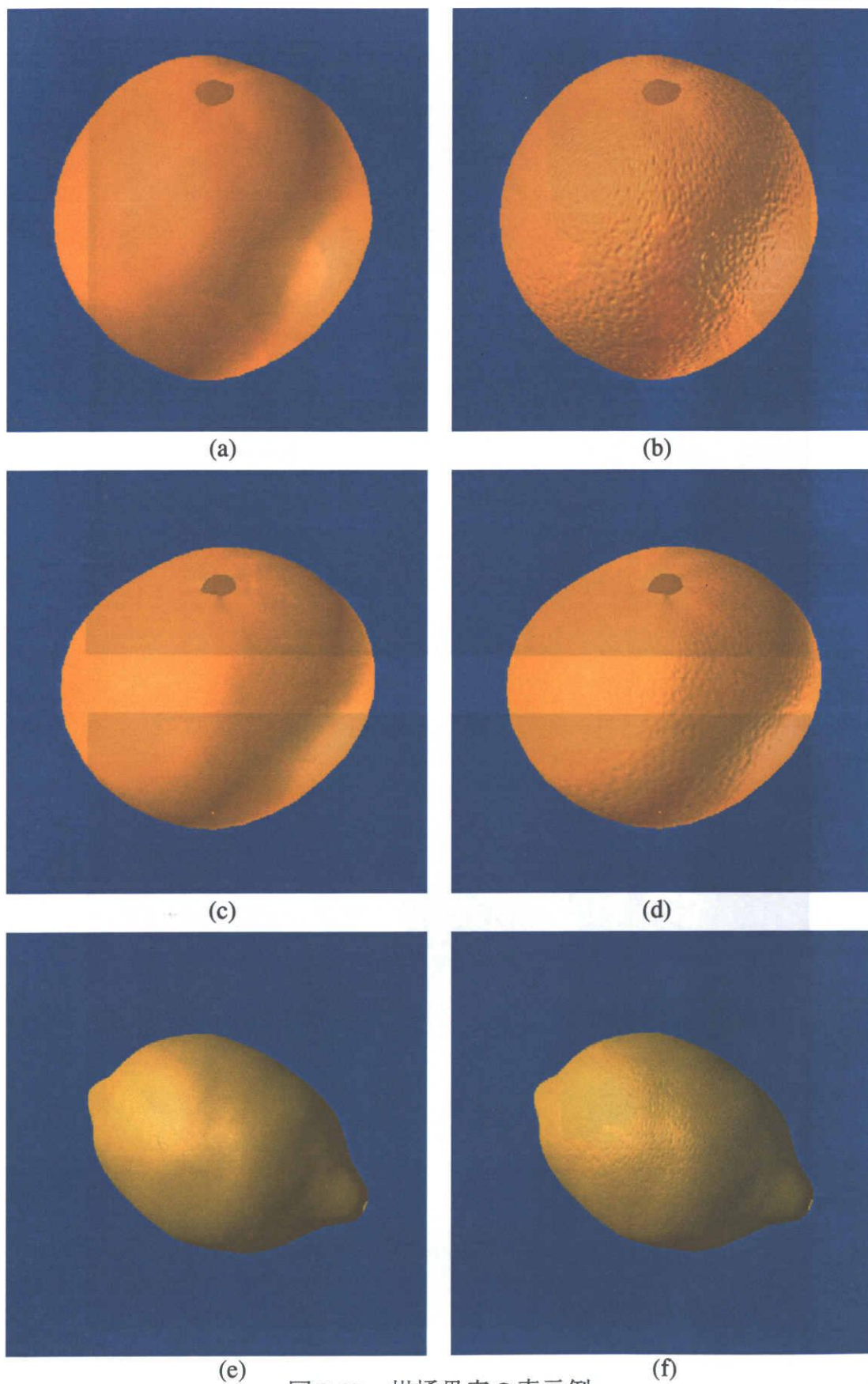


図 2-27 柑橘果実の表示例

テクスチャマッピング前の (a) オレンジ, (c) みかん, (e) レモン
 テクスチャマッピング後の (b) オレンジ, (d) みかん, (f) レモン



(a)



(b)

図 2-28 実画像との合成表示例

(a) 合成前, (b) 合成後

2.5 実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現

2.4 節では、特に全体の形状と表面の形の特徴に注目して柑橘果実を表現する手法について述べたが、色の要素については、試行錯誤的に決定した反射パラメータを使用して色付けを行っている程度であった。しかし、物の色彩は人間にとって視覚を始めとして様々な感覚に影響を与えるもので、CGにおいてもその表現は重要であり、より効果的で品質の高いCGを生成するためには、この色の要素に対する配慮が必要である。しかし、CGにおける色彩の研究の報告はまだ少なく、実際の自然物の色を生化学的な見地から扱った研究としては、紅葉の色変化をシミュレートしたものが報告されている程度である [早乙女 92]。

ところで、前節でも取り扱った柑橘果実のみかんについては、園芸農業の分野では、果実の色が果実の酸味・甘味等と密接に関わっているため、果実の収穫時期の判断の一つの指標として重要視されており、果実の持つ色やその経時変化についてその測定やモデル化などの研究が行われている [阿部 91]。

本節では、自然物の持つ色をCGで表現するための手法として、みかんの果実の色変化を時間を追って実際に測定して得られた結果に基づき、みかんの果実の色をより実際に近く表示し、また、時間の経過に伴う果実の色変化の過程を表現する手法について述べる [東海 93-2]。これによって、より現実に近いCG画像生成が可能となると考えられる。

2.5.1 みかんの色変化

みかんを含む様々な果実の色は、成熟にともなって様々に変化する。みかんは緑色から橙色に、リンゴは青緑色から赤色に変化する。これは、果実の成熟の度合い(熟度)などによって、果実表面に存在する色素の量や比率が変化するために生じる現象である。一般に果実の持つ色素としては、緑色のクロロフィル系色素、黄・橙・赤色のカロチノイド系色素、赤・紫・青色のアントシアン系色素の3種類の色素があり、これらの量の比率によりみかんの橙色、リンゴの赤色などの色が現われる。ここで扱う温州みかんの場合には、主に緑色のクロロフィルと赤色のカロチノイドが関わり、これらの色素の比率によって果実の色が決まる。未熟なみかんはクロロ

第2章 自然物のレンダリング

フィルを多く含みおよそ緑色を示す。成熟にともないクロロフィルの量が減少していき、緑色が薄れて黄緑色から黄色へと変化する。クロロフィルの量が十分に減った後、今度はカロチノイドの量が増加する。これにともない果実の色は黄色から完熟したみかんの橙色へと変化していく。色の変化は、果実の下部から進行し、果実の上部へ行くほど緑色が残ることが多い。色素の量の変化は果実の熟度に関係しているが、熟度だけでなく、日照や気温、湿度など周囲の環境からの影響によって変化の度合いが異なり、個々の果実の差や、同一の果実においても色むらなどの形で色変化の差が観察される。

このようなみかんの色変化の基本的なモデルとして、ここでは、共同研究を行った三重大学生物資源学部による研究成果[阿部91]を用いるものとする。これは、果実の色の基準として、果実の収穫時期の判断に使用される果実カラーチャートを用い、実際に測定された色変化とカラーチャートの評価値を対応づけることにより、経過日数と果実の平均色との関係を表すモデルである。この基本的なモデルについては付録3にまとめておく。

2.5.2 色変化のシミュレーション

果実カラーチャートの色ベクトルと経過日数との関係モデルを用いて、みかんの色の経時変化をシミュレートする。まず、果実カラーチャートの色ベクトルをそのまま用いて平均色の変化を表現し、これに果実の上部と下部の進行の差の表現を加える。更に、色むらの表現も行う。みかんの形状表現などは2.4節の方法を用い、表面凹凸のテクスチャマッピングが施されている。

(1) 平均色変化のシミュレーション

果実カラーチャートの評価値と色との関係は式(付3.1)、式(付3.2)によって、経過日数と評価値の変化との関係は式(付3.3)により与えられる。この2つの式を用いることにより経過日数から果実の平均色を算出することができる。算出された果実の色を反射モデルの拡散反射成分として用いることにより、みかんの果実の経時的な色変化をシミュレートする。表示結果を図2-29に示す。

色が全体に一様であるために多少不自然ではあるが、果実カラーチャートに沿っ

2.5 実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現

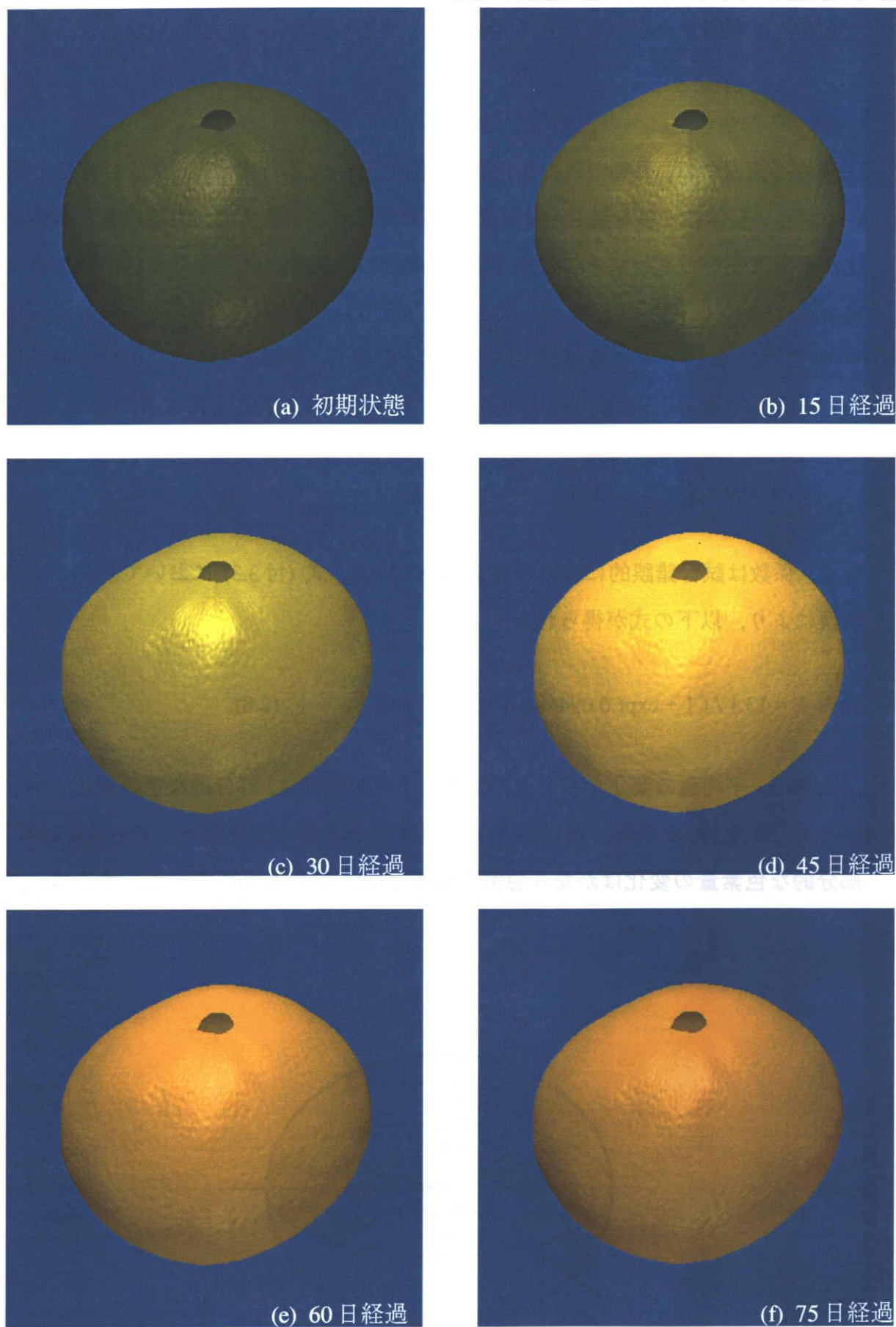


図 2-29 平均色変化の表示例

第2章 自然物のレンダリング

た色変化を表現できていると考えられる。

(2) 下部から上部への色変化の表現

前述の方法では、果実の色の変化を表現してはいるものの、あくまで平均色を用いており、全体に一律な色を与えることしかできない。そこで、実際の果実の色変化が果実下部から進行することを考慮し、果実の下部と上部で色の変化の差を導入する。

まず、図2-30のように極座標の中に果実を配置し、表面上の各点における遅延日数 t' を図2-30の θ ($-\pi \leq \theta \leq \pi$) を用いて以下の式で与えることにする。

$$t' = 30.0 \times \frac{\theta}{\pi} \quad (2.7)$$

なお、係数は試行錯誤的に求めた値を用いている。式(付3.3)において、 $t \rightarrow t - t'$ の置換により、以下の式が得られる。

$$E = 13.1 / (1 + \exp(0.094(46.3 - (t - t')))) \quad (2.8)$$

しかし、平均色の変化を示すこのシグモイド関数では、部分的な色の変化を示すことはできない。これは、式(付3.3)が全体的な色素量の変化を示しているだけで、部分的な色素量の変化はかなり急激であると考えられるためである。そこで、式

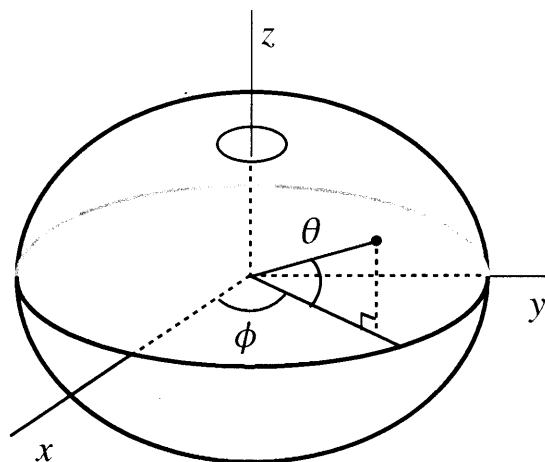


図2-30 極座標に置いたみかん果実

2.5 実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現

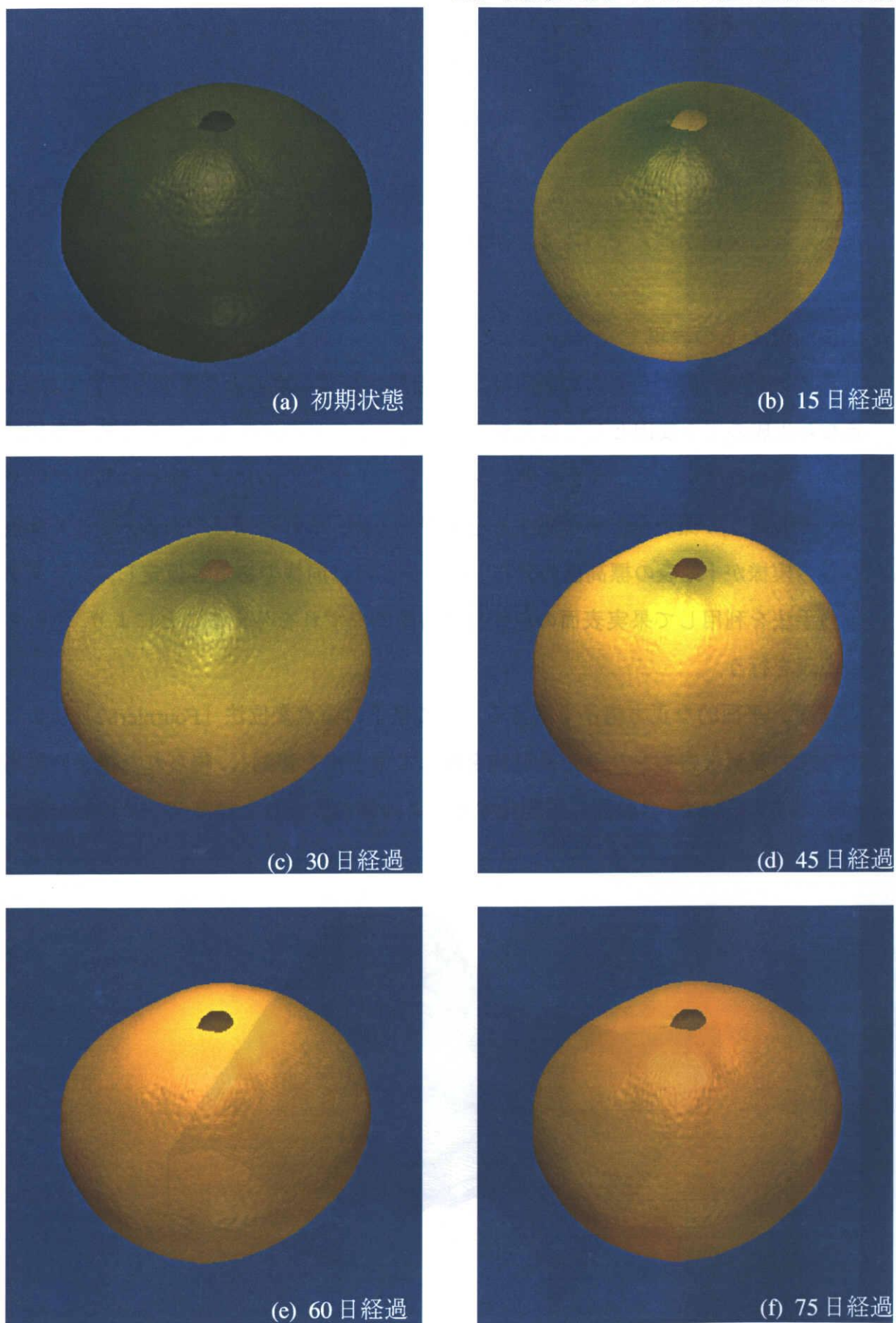


図 2-31 果実下部から上部への色変化の表示例

第2章 自然物のレンダリング

(2.8) のシグモイド関数において、立ち上がり部分をさめる乗数を変形した、

$$E = 13.1 / (1 + \exp(0.3(46.3 - (t - t')))) \quad (2.9)$$

を用いて、色を算出する。シミュレート結果を図2-31に示す。これより、果実の下部から色の変化が進んでいることが分かる。

(3) 色むらの表現

実際の果実の持つ色むらの表現は、より自然な表現とする上で重要な要素である。色むら生成の主な要因としては葉や枝などによる日光の遮断などの受光量の変化であると言われている。これを忠実にシミュレートするためには、個々の果実だけでなくその周りの環境全てを考慮する必要があるが、これは困難である。ここでは色むらの模様が「地表の標高値の分布」の様子とほぼ同様であると仮定し、フラクタルの手法を利用して果実表面の色変化に時間的なずれを与えることにより、色むらの表現を行う。

まず、平面的な正方格子を考える。この格子に中点変位法 [Fournier82] によって乱数の要素を含むフラクタル処理を施して格子点を移動し、得られた格子の標高 h を $(-1.0 \leq h \leq 1.0)$ の範囲に正規化する。この様に生成した標高データの例を図2-

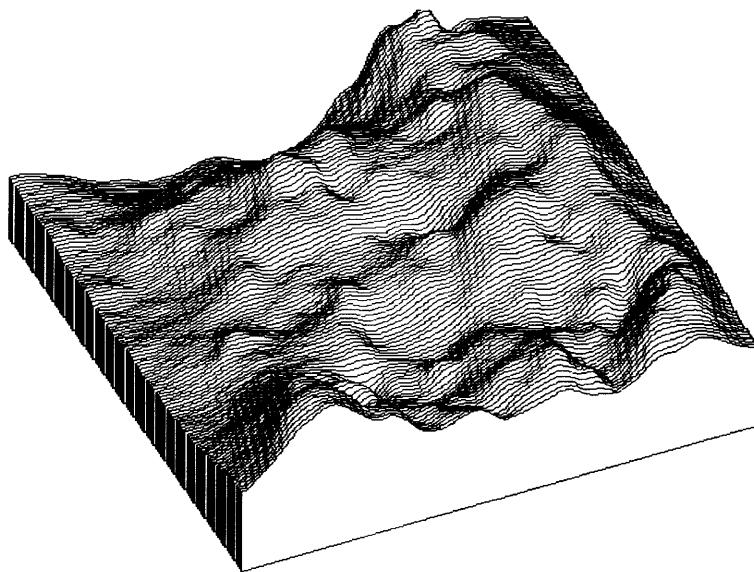


図 2-32 色むらのためのフラクタルによる標高データ

2.5 実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現

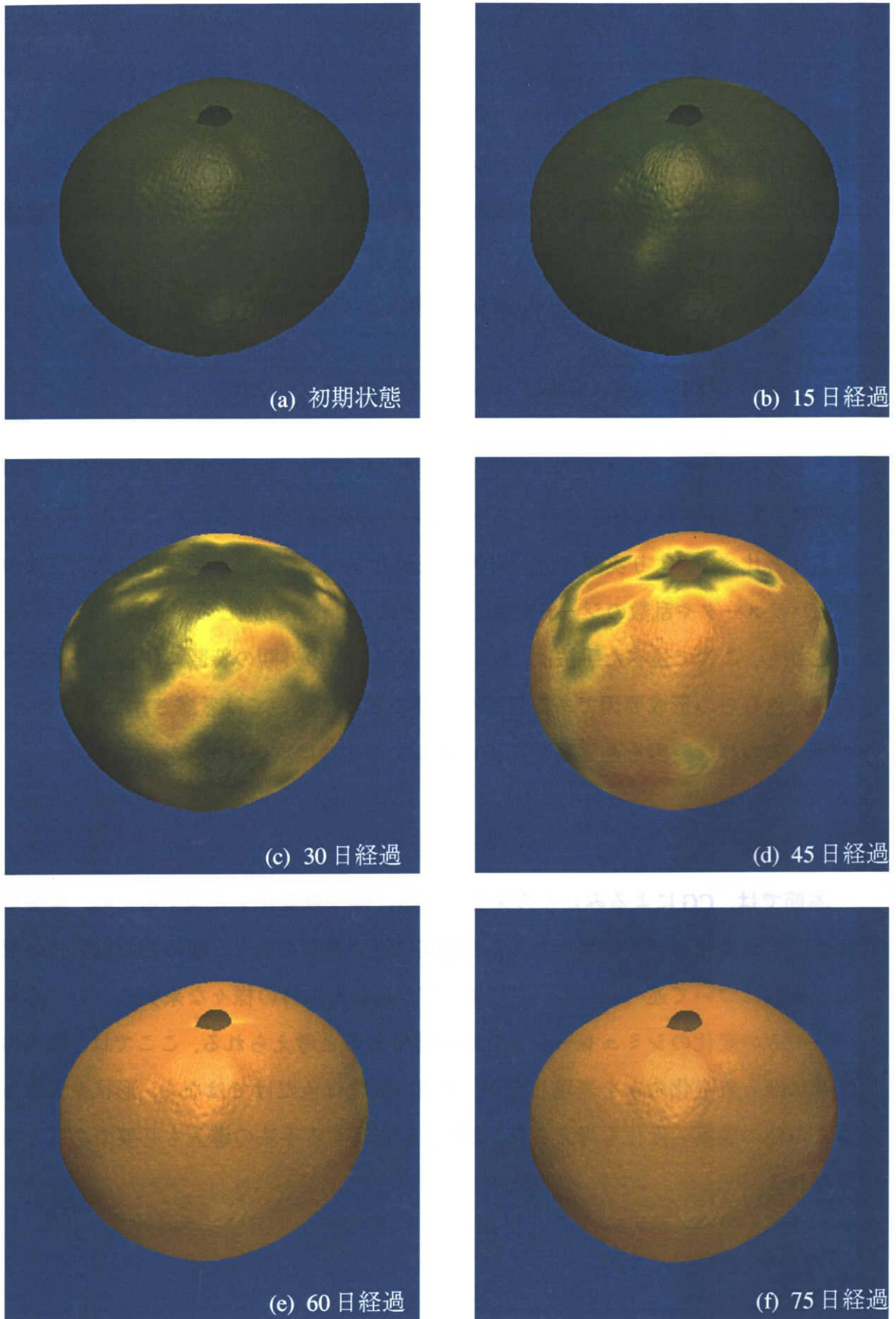


図 2-33 色むらの表示例

第2章 自然物のレンダリング

35に示す。この標高を定数倍（30倍）したものをその点での色変化の遅延日数 t'' （-30日～+30日）と考える。平面的な格子の x, y の方向と図2-30のように果実を極座標に置いたときの θ, ϕ とをテクスチャマッピングと同じ要領で対応付けてみかんの形状に貼り付け、格子の標高がその点における遅延日数を示すこととする。なお、実物では蒂（へた）の付近などの極の部分では色むらがないたため、この部分では遅延の無いように処理している。

前節と同様に遅延日数 t'' を式(2.9)に導入して色の計算を行う。

$$E = 13.1 / (1 + \exp(0.3(46.3 - (t - t' - t'')))) \quad (2.10)$$

これを用いたシミュレーション結果を図2-33に示す。形状の時間的な変化がないために、多少不自然な印象を受けるが、色むらの表現を加えることにより、図2-29、図2-31と比べて、より実際に近い自然な表現となっている。本手法は中点変位法の変位パラメータや乱数のシードを変えることにより様々な色むらが表現可能である。

しかし、ここで述べた手法は、あくまでも色むらの外観の特徴に注目した手法であり、色むらの形成要因である日照や枝葉の影響については考慮されてはいない。今後、この様な要因を遅延日数算出に導入することは重要であると思われる。

2.5.3 考察

本節では、CGによるみかんの果実の成熟に伴う色変化を表現するため、実測値に基づく色変化モデルを用いた、より現実に近い果実の色と、経時的な色変化の表現の方法について述べた。本手法によって、みかん以外の様々な果実についてもその色やその変化のシミュレーションが可能であると考えられる。ここでは、果実の成熟に伴う色変化のみを表現したが、実際の変化は色だけではなく、形状や大きさなどの他の要素の変化も考えられ、これらを表現する手法の導入も必要であると考えられる。

2.6 まとめ

本章では、CGにおける自然物のレンダリング手法として、自然物の持つテクスチャに注目し、これを表現するための基本的な処理手順と、その具体的な適用例として、爬虫類皮革と柑橘果実のテクスチャ生成と形状生成について述べた。これらは、対象をある程度限定してはいるが、その特徴を十分に表現可能なモデルであり、ほぼ満足のいく表示結果を得た。これにより、基本的処理手順の有効性を示し得たと考えられる。

しかし、以下に述べるようないくつかの問題点が今後の課題としてあげられる。

(1) パラメータ設定の問題. 本章で述べた手法には、テクスチャ生成あるいは形状生成に対して、いくつかのパラメータ設定が必要である。各パラメータを操作することにより同一の手法から、性質の異なるテクスチャの生成が可能であり、本手法がある程度の汎用性を持つことを示している。しかし、本論文で提示したテクスチャあるいは形状生成のためのパラメータは試行錯誤により決定されたものであり、これらの値の妥当性の検討が必要である。しかし、本論文で実際に用いた幾つかのパラメータは、テクスチャの異なった性質を比較的独立に制御するようなものであり、その値の決定は熟練が必要なほど複雑な作業ではない。また、実際に実物を計測し、統計的に各パラメータを設定することも考えられる。

(2) マッピングの問題. ここであげた表示例においては、正方形領域に生成したテクスチャをシーン内のほぼ短冊状の曲面に張り合わせることにしか行っていない。このことは、物体の形状設定におけるテクスチャ座標の与え方をかなり工夫しなければ不自然なテクスチャの偏りなどを起こすという問題をはらんでいる。例えば、爬虫類皮革の表示において皮革製品を想定した表示例を示したが、実際の皮革製品は、ほぼ平面である皮革材料から立体形状を作り出す。このため、皮革製品デザインなどに利用するためには、テクスチャのマッピングに際しては、展開図と立体形状との関係を考慮する必要があると思われる [Bennis91]。

(3) 他の要素の導入の問題. ここで述べた手法は特にその形状特徴に注目したものであった。しかし、物体の見目の質感を決める要素は他にもあり、特に物体表面における反射特性については無視できない重要な要素である。生体表面の光の

第2章 自然物のレンダリング

振る舞いは単純ではなく、生体表面の非常に微細な形状や構造をモデル化することによって光学的に妥当な反射モデルを得ることは重要なテーマとなりうる。例えば、柑橘果実においては、そのみずみずしさが重要であり、これを表現するためには、反射特性に言及する必要がある。さらに、皮革など工業材料となるような対象の場合、製品への加工の段階での処理による独特の質感を与えられるものもあり、これらに対する考慮も必要である。また、物体を取りまく環境の影響も考えられ、写り込みの処理や高次反射などの導入は重要である。

(4) 動的な性質の考慮. 自然物、特に生物の場合、成長にともなう時間的な変化やその生物自身の動きを考慮することは重要である。本文で扱った対象に関して言えば、柑橘果実などは時間の経過にともなって成長により形状などが変化し、さらに、周りの環境によってこれらの変化が影響を受けるものであるため、これらを考慮したCGによる表示モデルの検討も重要であると思われる。また、生物のテクスチャにおいては、皺などの要素も考えられ、これは、その生物の生きているときの動きに依存するものであり、これらを総合的に扱うことに対しても検討の余地がある。

(5) 汎用性の問題. 2.2節で述べた基本的な処理手順により、目視による主観的評価ではあるがほぼ満足できる表示結果が得られた。しかし、実用上はより汎用性を持ったテクスチャ生成モデルが望ましいと考えられる。この点で本手法には改良の余地があると思われ、他の対象への本手法の適用や応用に関する検討も必要である。具体的な例をあげると、本文では爬虫類の皮革を取り上げたが、皮革製品として利用される動物としては、一般によく利用される牛や羊の他、象やオストリッチなどがあり、これらの皮革に対するCG表現の手法の研究も重要であり、これらの対象に対する本手法の応用などについても考慮が必要である。また、自然なテクスチャを少ないパラメータ設定によって数多く生成できるようなテクスチャジェネレータの開発は有意義であると思われる。また、近年のハードウェアの高性能化、低価格化によって、実際の写真などを利用したテクスチャマッピングにおいても補助記憶容量などの問題は減少しているため、実物の画像などをうまく利用する方法の検討も必要である。例えば、実物を撮影した1枚のテクスチャを加工し、同様な性質を持つ異なったテクスチャを新たに生成することが可能となれば、自然物の持

つ個体差の表現などに有効であると考えられる。

(6) 評価方法の問題. 本手法がどの程度に対象の特徴を表現できているか、あるいはCG映像の「現実らしさ」の評価は現在のところ目視に頼るのみであり、定量的、客観的な評価方法の確立が望まれる。しかし、現在のCG技術では、CG画像は一目でそれとわかるほど、実物の画像との質的な違いが大きく、この差を少なくしない限り、心理学的な比較評価も難しい。また、CG生成のための様々な要素を極限まで現実世界の物体に近づけ、光学的な振る舞いを忠実にシミュレートすることができれば、より現実に近い映像が得られると思われるが、これは大変困難である。そこで、実際の対象においてその物体「らしさ」が物体の持つどのような特徴に起因するものであるかを解析し、これを導入あるいは、誇張したCG表現とすることで、人間に対してより効果的なCG映像となると考えられる。このためには、人間がそのCG映像を見て「何であるか」をどの様に認知するかを解析することが必要であり、背景なども含めたシーン全体の文脈の考慮や感性情報処理といった観点からのアプローチも重要であると考えられる [鳥脇 94]。

第 3 章

自然現象のビジュアライゼーション

3.1 はじめに

CG を用いて実際に不可視な物体や現象を観察することは、科学的可視化 (scientific visualization) と呼ばれる応用分野であり、流体力学における流れの可視化や、有機化学における分子模型表示などに使用されている [石井隆 91] [Visualization93].

このような科学的可視化の分野において、近年、自然現象を扱うことが注目されている。具体的な例としては竜巻や台風の可視化 [大口 91] などが報告されているが、本章では、自然現象の中でも、主に宇宙現象を取り扱う。これまでに CG で宇宙における現象を扱ったものは幾つか報告されているが、中でも NASA-JPL (ジェット推進研究所) によって作られた宇宙探査衛星ボイジャーの土星への接近を表現した CG 映像はその代表的なものの一つである。これは、直接目で見ることが難しい宇宙現象を可視化する手段として CG が有効であることを示した好例といえる。

また、一般に現象の真の姿を理解するためにはいろいろな観点から現象を観察することが必要である。例えば、現象を見る視点位置や現象の表現される座標系が変わることによって現象の見え方は異なり、これら併用することが現象の理解には重要である。さらに、時間進行に関して言えば、実時間よりも遅い映像化 (高速度カメラの映像) や速い映像化 (コマ落とし映像) が有効な場合が多い。特に、宇宙で起こる現象は人間の考える時間進行よりも極端にゆっくりと進行するものが多い。そこで、CG 映像化に際して、視点や時間進行などをいろいろ変えて現象を観察できることは重要であり、これらの条件をインタラクティブ (対話的) に変更しながら現象が観察できるシステムが実現されれば、新しい観点からの現象の理解が期待される。しかし、従来この様なシステムは報告されていない。

さらに、最近の宇宙技術の発達によって様々な現象の観測が可能となり、これに

第3章 自然現象のビジュアライゼーション

ともない、宇宙の現象に関する多くの情報が世界的なコンピュータネットワークであるインターネットやCD-ROMなどの新しいメディアを通じて提供されるようになってきた。特にインターネットは、世界中に散在する情報を比較的容易に取り出すことができるため、最近非常に注目されているメディアである。しかし、これらのデータは数表や静止画の状態で示されることが多く、これら個別の情報から現象全体を正しく理解することは非常に難しい。そこで、これらの情報を総合的に扱うことができ、また、そこから、よりわかりやすいCG映像を生成することが可能なシステムが望まれる。また、後に述べるようなシューメーカー・レビー第9彗星(Shoemaker-Levy 9. 以下, SL-9と略す)の例の様に、その現象の進行中に映像生成を行うような場合、情報の更新も現象と並行して行われるため、CG化に多くの時間を費やして制作される従来の様なCGアニメーションでは、最新の情報を導入した映像生成は困難であり、より新しい情報を反映した映像作りを比較的短時間で行うことができるシステムが必要である。

これらをふまえて、本章では、インターネットなどを通じて得られた現象に関する最新情報に基づいてグラフィックワークステーション(以下, GWSと略す)を用いてリアルタイムのCGアニメーションとして現象を可視化し、さらにユーザがマウスなどのデバイスを用いて対話的に現象観察の視点や時間進行を変更できるインタラクティブ・ソフトウェア・システムについて述べると共に、システムの実用性の検証として、実際の現象であるSL-9と木星との衝突現象の可視化に適用した実験の結果を示す [Tokai95] [東海95]。

3.2 インタラクティブ可視化システム

インタラクティブ可視化システムでは、CGアニメーションによる現象の表示だけでなく、視点や時間経過をユーザが自由に変更しながら現象を観察できることが必要であり、このためには、各種デバイスによるCG生成のためのパラメータ制御と、GWSを用いることによるリアルタイムのアニメーション生成が必要である。さらに、ある現象について収集された様々な内容・形式の情報をCG映像に反映させるための機能が必要である。そこで、本研究における可視化システムは、基本的な

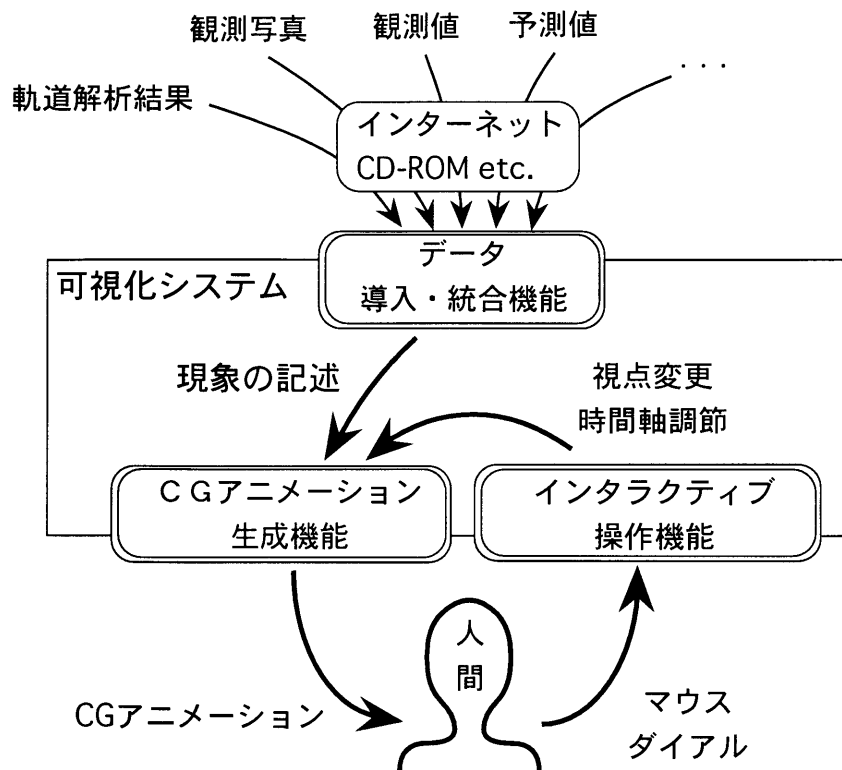


図 3-1 インタラクティブ可視化システムの概要

機能として以下に示すような3つの機能を有するものとしてGWS上に実現した。本システムの概要を図3-1に示す。

(1) 各種データの導入・統合機能：インターネットやCD-ROMなどの様々な形式の情報を、システム内で統一的に扱うことのできる形式や座標系に変換する機能である。

(2) CGアニメーション生成機能：得られたデータを基にしてCGによって現象を映像化する機能である。さらに、必要に応じて惑星などの表示を行うことにより、現象の理解を助けることができる。

(3) インタラクティブ操作機能：マウスやダイアルなどのI/Oデバイスを用いて、CGアニメーションの視点位置変更や時間軸の速度調節を対話的に行う機能である。

これらの機能が1つのシステム内で連係して動作することにより、映像化の対象となる現象に関する最新情報を導入したCG画像を比較的短時間で生成することが可能となる。以下、個々の機能の詳細について述べる。

3.2.1. 各種データの導入・統合機能

インターネットなどで世界各地から提供される最新の情報を速やかに導入するために、様々な形式や座標系で表現されている情報を統一した座標系に変換する機能が必要である。また、インターネットなどのメディアを通じて収集される情報には、データ形式の面では文字情報や数表、あるいは異なった計算機用のフォーマットなど様々な形で記述されたものがあり、これらを同時に使用できる必要がある。そこで、以下に示す座標系、距離単位、時間単位を用た。

(1) 座標系：太陽を原点とする3次元直交座標系である日心黄道座標系を用いる。これは、 x 軸を春分点方向、 z 軸を黄道面に垂直な方向（北が正）、 y 軸を右手直交座標系となる方向にとるものである。

(2) 距離単位：地球と太陽との平均距離を1とする単位系である天文単位を用いる。1天文単位は約 $1.50 \times 10^8 \text{ km}$ である。

(3) 時間単位：天文分野で用いる表現方法であるユリウス日を用いる。これは紀元前4713年1月1日12時を基準とした通算日数による表現である。

各データは本システムへの導入時にこれら統一的な形に変換される。一方、現象によっては異なった座標系での観察がその現象の把握には有効である場合もある。例えば、ある天体の動きを太陽系全体の中でとらえる場合と、地球など特定の惑星からの視点でとらえるなどである。本システムでは、一度統一した座標系に変換されたデータを新たに任意の座標系に再変換する機能を持ち、任意の座標系を用いた可視化が可能である。

ところで、天体の位置や大きさの変化などの観測データは、一般的には関数などにモデル化された表現ではなくて不均一なサンプリング間隔で記録された不連続な値の並びで表されることが多い。本システムでは、これらを直接用いることとし、必要に応じて線形補間（折れ線近似）によってこれらのデータの内挿を行い、任意の時点での位置や距離などを算出する。これにより、複雑な計算が不必要なため、アニメーションの1フレームを作るために必要な時間が比較的短く、リアルタイムアニメーションとしての映像化が可能といった利点が考えられる。更に、この内挿操作の組み合わせによって任意の時間間隔で位置計算ができ、ユーザが求める様々な時間進行のアニメーション生成に対応することが可能となる。

3.2.2. CG アニメーション生成機能

本機能は、収集したデータをもとにして、高速にCG描画を行うことが可能なGWSを用い、その描画能力を最大限に利用することにより、リアルタイムのCGアニメーションによる映像化を行うものであり、対象となる現象の描画部分とその他の基本的な表示物の描画部分とからなる。対象となる現象の描画は、収集した情報をもとにした描画ルーチンにより行い、得られる数値データに基づいて科学的に根拠のある映像生成を行うもので、各現象に対して固有の描画となる。基本的な表示対象としては、太陽系内の惑星と、映像の背景となる恒星の表示を可能にしている。各対象は、画面上でインタラクティブに表示と非表示の切り替えが可能であり、作成する場面で必要に応じて切り替える。これにより、各シーンで表現したい現象を明確にし、理解を容易にすることができる。以下、基本的な表示要素について述べる。

(1) 惑星の表現：太陽系における現象の表現において惑星は不可欠な表現要素であり、とりわけ、後述のSL-9のように、各惑星の引力がその天体の軌道の決定に大きく影響を及ぼすような場合、同時に表示してその位置関係を明らかにすることは、現象の理解の上で重要である。太陽系の惑星は基本的に楕円軌道上を運動する。個々の惑星の楕円軌道と任意の時点での位置を表すために軌道要素と呼ばれる各惑星に固有のパラメータを与え、これを用いて位置を算出することができる [理科年表 94] [長沢 85]。一例として、地球の軌道要素を表 3-1 に示す。惑星の形状は多面体近似した球を用い、各惑星の固有の表面模様のテクスチャをマッピングで張り付けて表現した。テクスチャとしては実際にその惑星の天体写真からその特徴をよく表している長方形領域を切り出して使用している。ただし、木星については、NASAの探査衛星ボイジャーが撮影した木星表面の帯状の展開写真 (NASA:P-21771C) を利用し、他の惑星に比べてよりリアルな表現が可能となった (図 3-2)。また、ある時点での惑星の位置だけでなく、その惑星がどのような軌道上を動いているかも必要に応じて表示可能な機能を有している。

(2) 恒星の表現：CGシーンの背景となる恒星の表現は、生成したCG映像の視線方向の変化を理解する手段としての効果は大きい。ここでは、恒星の位置データである Yale Bright Star Catalog [YBSC91] を利用する。CG映像では背景にこれら

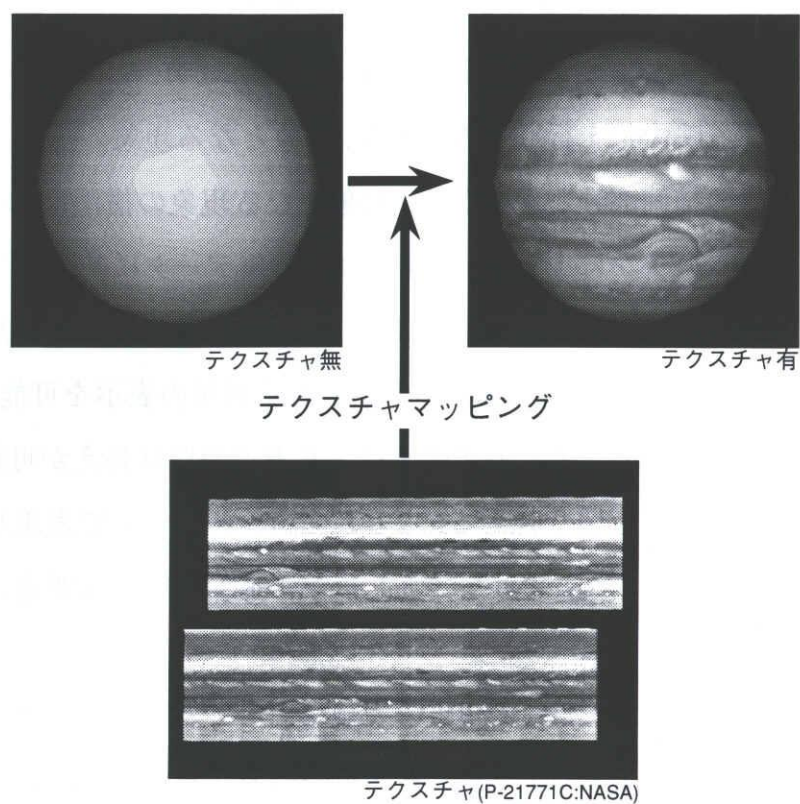


図3-2 テクスチャマッピングによる惑星の表現（木星）

表3-1 地球の軌道要素

軌道長半径	1.0天文単位
離心率	0.0167
軌道傾斜	0.001°
近日点黄経	102.921°
昇交点黄経	354.865°
平均近点離角	175.979°
赤道半径	6378km

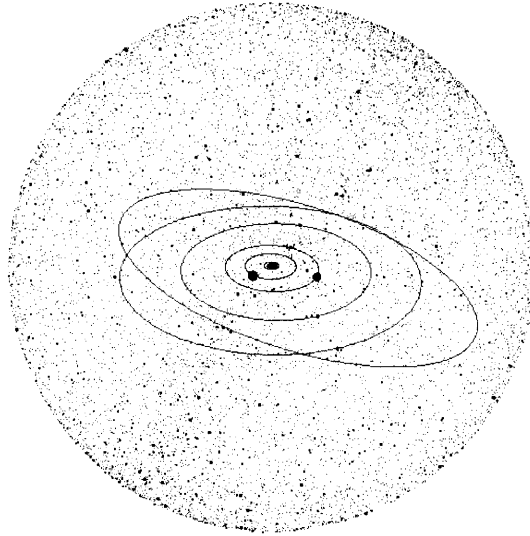


図 3-3 背景の恒星の表現

の恒星を配置するが、実際の恒星がほぼ無限遠にあると仮定できるため、CGシーン内の表示物と視点を囲む十分大きな半径を持つ透明な球面上にこれらを配置して表示する (図 3-3)。また、各恒星はその等級に応じて大きさを変えて表示し、2 等級までを 3×3 画素、4 等級までを 2×2 画素、それ以外を 1×1 画素で表現している。これにより、簡易ではあるが実際の夜空に近い表現となり、星座を認識できることから、視線の方角を大まかに知ることも可能である。

また、宇宙現象を扱う上で、表示物のスケールの問題が生じる。これは、現象を観察する視点によっては、画面の解像度に対して表示物の画面上での大きさが極端に小さくなる場合があるためであり、例えば、太陽系全体を観察するようなシーンにおいては、地球を実際の縮尺で表現した場合には極めて小さな像になってしまう。本システムでは、必要に応じて対象物ごとにその大きさを誇張して表現する。この場合には現象の正しい理解を妨げない程度の誇張にとどめることが重要であり、実際には当該現象の専門家の指示によって誇張の程度を決めることになる。後述の適用例では、彗星の軌道については誇張を行わず、惑星の大きさ (赤道半径) についての誇張のみを行っている。

3.2.3. インタラクティブ操作機能

現象の理解を容易にするためには、CGアニメーション映像を生成するための視点位置や時間経過速度を適切に設定する必要がある。本システムでは、マウスやダイヤルを使用した対話的操作によって視点位置決定や時間経過の速度調節をユーザが自由に行うことができる。また、映像はGWSを用いたリアルタイムアニメーションであるため、視点などの変更を即座に映像に反映することが可能である。

3.3 現象「SL-9」への適用

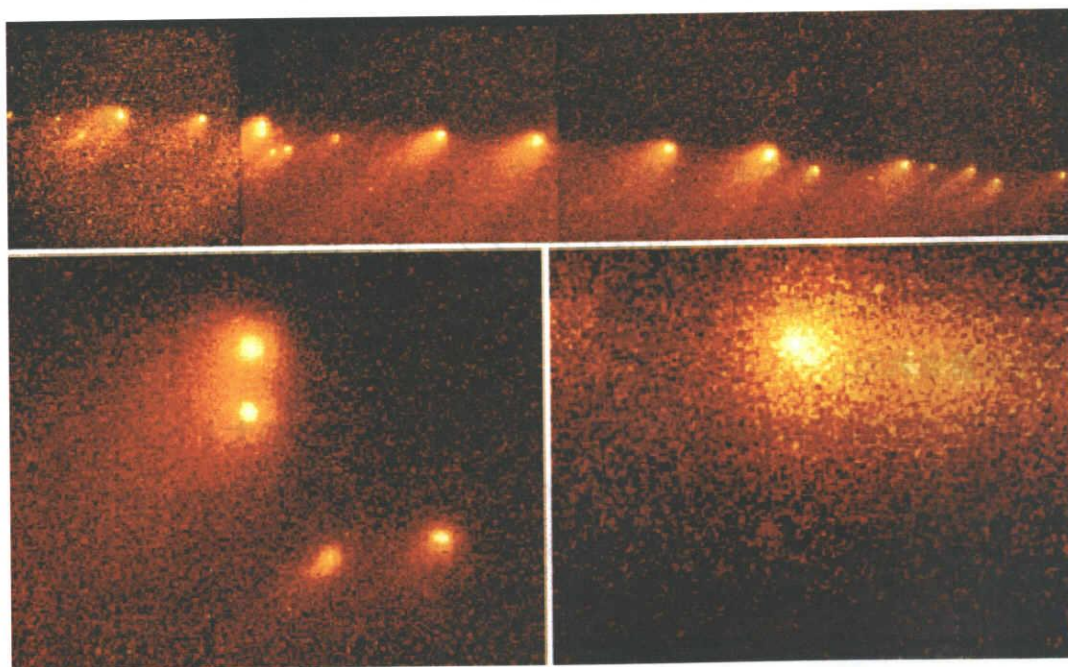
本システムの有効性を検証するため、本システムを利用して1994年7月のシューメーカー・レビー第9彗星 (SL-9) の木星への衝突現象のCGアニメーション化を行った。このCG映像は、実際に現象が起こる前に制作し、名古屋市科学館プラネタリウムの1994年7月のプログラムとして、来館者への現象の解説に利用された。また、現象の事後に新たに観測された事実の導入も試み、部分的な変更を行った。本システムは最新情報の利用を即座に行うことが可能であるため、この変更は数分で実行された。

3.3.1 現象の概要

1994年7月に、シューメーカー・レビー第9彗星 (1993年3月発見) と名付けられた彗星が木星に衝突するという、天文学的に大変珍しい現象が観測された [惑星学会誌93] [惑星学会誌94] [Science95]。彗星は20数個の核が一直線に並ぶなど、他の彗星と異なった外観上の特徴を持ち (図3-4)、彗星の軌道解析により木星に衝突することが予測され世界的に注目された。さらに、過去に遡り彗星の軌道を解析した結果、1992年7月の木星への最接近時に核が複数に分裂したらしいことが分かった。この現象について、各国の天文機関による最新の観測画像や予測値・予測図などがインターネットなどを通して多数公開され、個々の情報は随時更新された。実際の衝突現象は、1994年7月20日前後の1週間にわたって起こり、複数の核が次々と木星に衝突した。核の衝突時の閃光や衝突の痕跡なども観測された [惑星学会誌94] [Science95]。衝突後の画像などもインターネットを通して公開されている。



(a)



(b)

図 3-4 実際のシューメーカー・レビー第 9 彗星

(a) アリゾナ大：sl9.93.03.30.gif

(b) ハッブル宇宙望遠鏡：NASA P-43510

3.3.2 CG 映像化のための表現要素と使用したデータ

この現象のCGアニメーションによる映像化に際して、彗星の挙動を表現するのに必要な表現要素としては、彗星の過去から衝突までどのような軌道を通ってきたかの可視化、彗星の核の分裂と一直線上に並ぶ核や彗星の尾など彗星の持つ外観の特徴の可視化、および、最大の関心事である核の衝突現象の可視化の3点が特に重要である。また、現象の理解の助けとして、惑星やその軌道、背景の恒星など付随する要素の表現を必要に応じて行う必要があると考えられる。

ところで、この適用例においては、以下のデータを使用した。

(1) 観測画像：ハッブル宇宙望遠鏡や各国の天文台が撮影した観測画像で、NASA などから GIF 形式や JPEG 形式の画像フォーマットで公開されており、インターネットを通じて取得することができる。図3-4は実際にインターネットを通じて得られた観測画像である。これは、主として生成したCG映像の検証に利用した。

(2) 彗星の軌道解析結果[吉川93]:観測データに基づいた計算機シミュレーション結果であり、衝突までの百年間の位置情報である。

(3) 各核の衝突時刻予測 [Bruton94]:天文学的なモデルによって計算された衝突時刻予測であり、彗星のそれぞれの核の名前 (A 核-W 核) とその衝突時刻からなる数表である。これは、FAQ と呼ばれるインターネット上でよく出る質問とその答からなる文書に含まれたデータであり、新しい観測結果を用いて、衝突の4日前まで随時更新された。

(4) 核の並び長さの変化 [Bruton94]:地球からの見かけの大きさとそれを実際の長さに換算した数表であり、観測値と予測値からなる。(3) と同様に FAQ に含まれたデータであり、情報は随時更新された。

3.3.3 CG による現象の表現

前述のような情報に基づいてCG映像化を行う。以下、個々の要素の表現手法について述べる。

(1) 彗星の軌道と運動の表現。 彗星の軌道や運動は、このCG映像の最も重要な要素である。ここでは、彗星の発見後の観測結果をもとにした計算機シミュレー

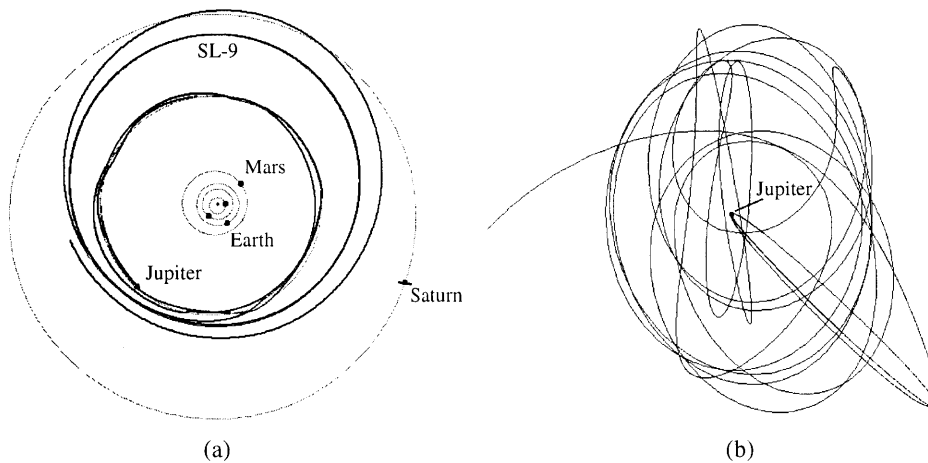


図 3-5 SL-9 の軌道シミュレーションの結果

(a) 太陽中心の座標系における軌道（惑星は 1994.7.20 での位置）

(b) 木星中心の座標系における軌道

シミュレーションによって算出された、1899 年から 1994 年 7 月の衝突までの約 100 年間にわたる軌道解析結果 [吉川 93] を利用した。太陽中心の座標系及び、木星中心の座標系における彗星の軌道をそれぞれ図 3-5 に示す。

ところで、彗星の動きは全体として一様ではなく、今回の SL-9 の場合は以下のような 4 つの stage に大きく分けることができる。

- ・ stage1 — 太陽を周回する軌道 (1900 年頃から 1960 年頃まで)：この stage では、彗星は惑星とはほぼ同様に太陽中心の楕円軌道上を運動した。しかし、1920 年頃に一度土星に接近した後、軌道が変わり木星に接近していった。

- ・ stage2 — 木星の重力に捕まり、木星近傍での運動へ (1960 年頃から 1992 年まで)：木星の重力に捕まった後、彗星は木星の近傍を運動するようになった。この stage でもグローバルには太陽を周回する運動に見えるが、実際には木星と共に運動し、木星の周りでの複雑な運動である。

- ・ stage3 — 核の分裂から衝突へ (1992 年から 1994 年 7 月)：この stage では、発見時 (1993 年 3 月) に観測された様々な特徴が重要となる。具体的事項としては、木星への 1 度目の最接近と核の分裂 (1992 年 7 月)、彗星の発見、木星との衝突 (1994 年 7 月) などが含まれる。

- ・ stage4 — 彗星の木星への衝突 (1994 年 7 月 16 日から 22 日)：これは、stage3 の

第3章 自然現象のビジュアライゼーション

最終的な部分で、彗星の個々の核が次々に木星に衝突する。

それぞれの stage で、彗星の動きの性質が変化し、その運動の複雑さは極端に異なる。また、現象を観察する視点が変化すると、相対的な移動量や見え方も大きく変わり、必要とされる計算および表示の精度が変化する。このため、上記の全 stage にわたって同一のサンプリング間隔による座標データを用いて彗星の挙動全体を表現することは難しい。ここでは、データの提供者と連絡を取り合い、各 stage における彗星の挙動に応じた適切な時間間隔でサンプリングし、彗星の位置を算出したデータを用意した。実際には、10日間隔～1時間間隔と徐々に細かくサンプリングしたデータを用いている。用いた座標データのサンプリング間隔とデータ数を表3-2に示す。CG映像では線形補間(折れ線近似)によって彗星の軌道を表現することとし、実際に映像化を行いながら折れ線でつないで違和感が無い程度の細かさとなるような軌道データのサンプリング間隔を設定した。

とりわけ、木星に非常に接近した部分では彗星の速度は極端に速く、1時間間隔のサンプリングでも軌道を正確に表現することは難しい。そこで、彗星の核が分裂した1992年7月の付近、および、木星に衝突する1994年7月の付近については、それぞれ0.01日(約15分)間隔、および、0.002日(約3分)間隔という特に詳細なデータを用いた(表3-2の☆印)。これらの座標データの総数は12512個である。

ここで軌道表現の基になる軌道座標データは、ユリウス日で表される日時(T_i)、彗星の3次元座標値(C_i :位置ベクトル)、および、木星の3次元座標値(J_i :位置ベクトル)からなる。3次元座標値は、日心黄道座標系に従い、天文単位で表現され

表3-2 SL-9の軌道データのサンプリング間隔と3次元座標データ数

期間	サンプリング間隔	データ数	備考
1899.12/24 - 1949.12/22	10日	1827	木星接近前
1950. 1/ 1 - 1989.12/27	5日	2922	木星周回軌道へ
1990. 1/ 1 - 1994. 4/30	1日	1583	木星を周回、1回目の最接近
1994. 5/ 1 - 1994. 7/20	1時間	1910	木星を周回、衝突へ
☆ 1992.6/30 - 7/15	0.01日(約15分)	1500	核の分裂の前後の詳細な軌道
☆ 1994.7/15 - 7/20	0.002日(約3分)	2770	衝突の前後の詳細な軌道

ている．軌道データにはさまざまなサンプリング間隔のデータが含まれるが，これらは，ユリウス日の順にソートして扱う．

彗星の運動をアニメーションとして表現する場合には，不均一のサンプリング間隔が問題となるが，線形補間によって任意の時点での彗星の位置を算出する（図3-6）．具体的には，任意の時刻 t における彗星の位置 C を，時刻 t を挟む隣り合った時刻 T_k, T_{k+1} ($T_k < t < T_{k+1}$) のデータにおける座標値 C_k, C_{k+1} を内分する点として，

$$C = \frac{(T_{k+1} - t)C_k + (t - T_k)C_{k+1}}{T_{k+1} - T_k} \quad (3.1)$$

によって計算する．木星の位置 J も同様に算出できる．彗星の位置をシーンの描画のサンプリング間隔で逐次算出していくことにより，彗星の動きを表現する連続したアニメーションを生成することができる．

(2) 彗星の核の位置の算出． この彗星の外観の特徴の一つとして，複数の核が直線上に並ぶことが挙げられる．核の並びはほぼ一直線であり，木星と彗星の重心の座標を通る直線上に並ぶと考えてよい．すでに述べた彗星の軌道解析結果からは，核の並びの重心位置だけが得られるため，各々の核の位置は衝突時刻予測値（表3-3）の差を用いて算出した（図3-7）．具体的には，最初に衝突する核（A核）と最後に衝突する核（W核）のそれぞれの衝突時刻を T_a, T_w とし，時刻 t での彗星の重心位置をベクトル P_g ，木星の位置をベクトル P_j とし，核の並びの長さを L とすると，

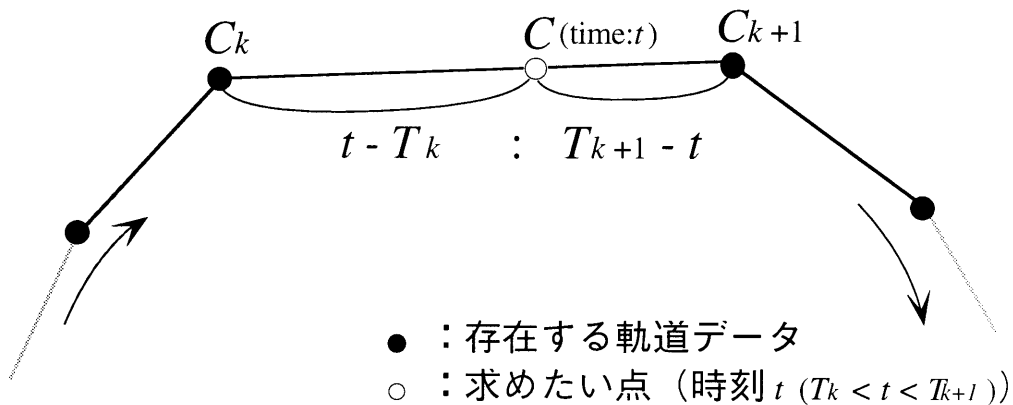


図3-6 任意の時刻の彗星位置の計算

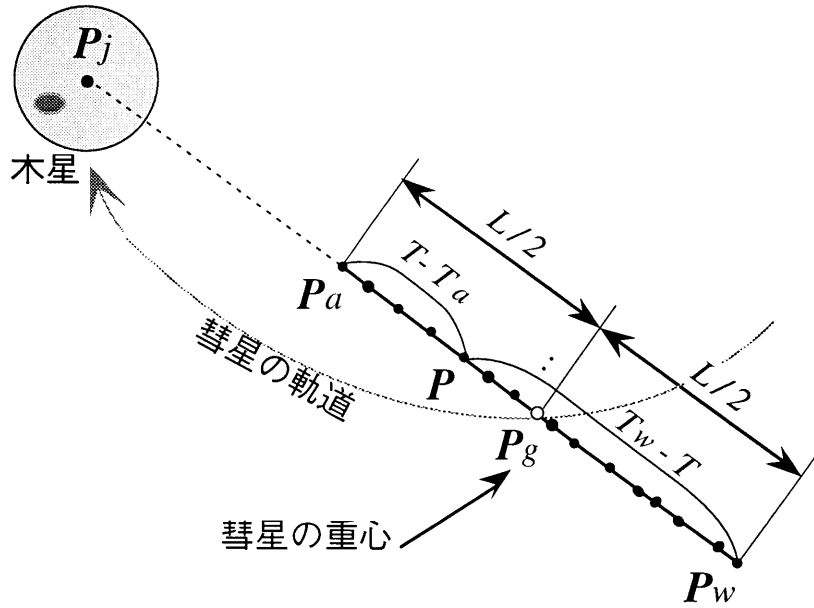


図 3-7 核の位置決定

A核の位置ベクトル \mathbf{P}_a および W核の位置ベクトル \mathbf{P}_w は,

$$\mathbf{P}_a = \mathbf{P}_g + \frac{(\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_g)}{|\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_g|} \times \frac{L}{2}, \quad \mathbf{P}_w = \mathbf{P}_g - \frac{(\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_g)}{|\mathbf{P}_j - \mathbf{P}_g|} \times \frac{L}{2} \quad (3.2)$$

で与えられる．これらを用いて衝突時刻が T の核の時刻 t での位置 \mathbf{P} は以下の式で算出される．

$$\mathbf{P} = \frac{(T - T_a)\mathbf{P}_w + (T_w - T)\mathbf{P}_a}{T_w - T_a} \quad (3.3)$$

ここで、 L は核の並びの長さ変化の観測・予測値 (表 3-4) から線形補間で求めている．これらは最新の情報に随時更新され、CG 映像では最も新しい数値を使用した．

(3) 彗星の尾の表現．尾は彗星の持つ大きな特徴の一つである．本システムでは、ランダムな方向に水平投射した細かな粒子 (質点) の運動によってこの尾を簡易的に表現した．すなわち、図 3-8 のような座標を考え、 z 軸方向に下向きの重力場を与え、乱数によって x - y 平面上の投射方向と初速を与えて粒子を投射する．各描画フレームで 1 個の粒子を新たに発生し、すでに存在する粒子は、次の時間での位

表 3-3 各核の衝突時刻予測

核名	衝突時刻 (7月日本時間)	
A	17 04:58	N 20 19:21
B	17 11:54	P2 21 00:10
C	17 15:59	Q2 21 04:32
D	17 20:46	Q1 21 05:00
E	18 00:05	R 21 14:24
F	18 09:27	S 22 00:10
G	18 16:28	T 22 03:06
H	19 04:26	U 22 06:53
K	19 19:18	V 22 13:15
L	20 07:07	W 22 16:57

A-W:核の名前、衝突順にA,B,C,...
(I,Oは使わない、J,M,P1は消滅)

表 3-4 核の並びの長さの変化

日時	実長(Km)
1993 03 / 25	158,000
07 / 01	265,000
1994 01 / 01	584,000
02 / 01	669,000
03 / 01	762,000
04 / 01	893,000
05 / 01	1,070,000
06 / 01	1,366,000
07 / 01	2,059,000
07 / 15	3,593,000
A核衝突時	4,907,000

置を計算し描画位置を更新する.発生からある一定時間以上経過した粒子は消去し,新たに1個の粒子を投射することを繰り返す.また,彗星の尾は太陽と反対の方向にできることが知られているため,上記の座標軸をシーンの座標系における彗星と太陽の位置関係により正しい位置に回転したもので表現する.この手法は,ここでは彗星の尾の表現として使用したが,仮想的な重力の与え方等を変れば,その他の放射物の表現として利用できると考えられる.

(4) 衝突の表現 木星大気に上記の核が衝突した場合,大気に何らかの変化が起こるのではないかということは衝突現象の発生前から予測された.実際の現象観測の結果,衝突の瞬間に赤みがかった閃光が発生し,以後何日にもわたって黒い痕跡が観測された [惑星学会誌 93] [惑星学会誌 94] [Science95].

各核の衝突時刻は表3-3の時刻を用い,この日時に衝突するように個々の核に時間の差を与えて動かす.全ての核は木星のほぼ同じ位置に衝突するが,木星が自転しているために,衝突箇所は木星のある緯度のところに帯状に分布することになる.閃光・痕跡は半透明の球によって表現し,閃光を半透明の赤い球,痕跡を不透明の黒い球で描いている.核が木星中心から木星半径の距離に入ったときに閃光を表示し,数フレームにわたって徐々に透明度を増し,完全な透明になった後に消える.消えた後に黒い球で痕跡を表現する.これらの透明度の変化の様子を図3-9に示す.

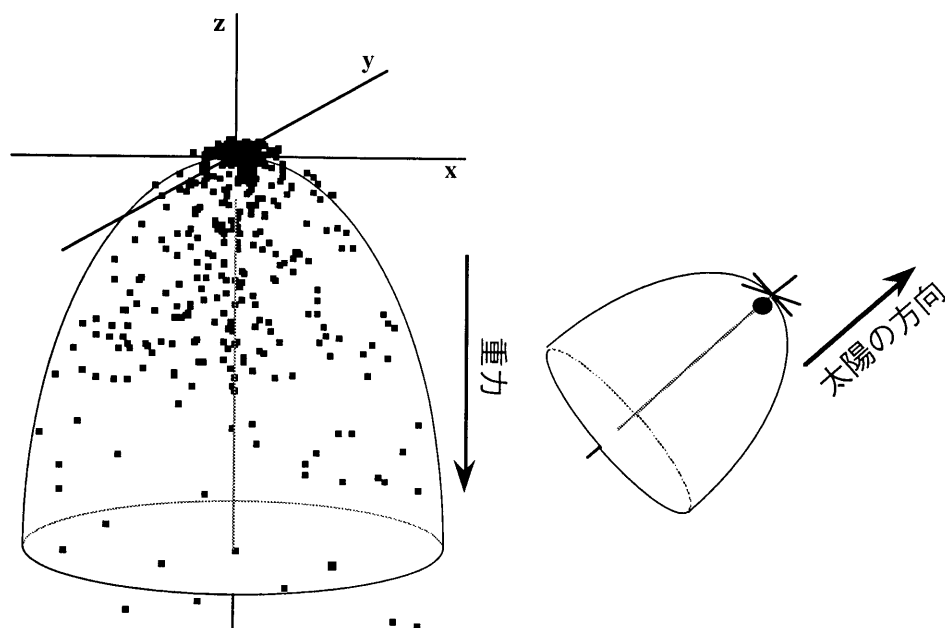


図 3-8 彗星の尾の表現

3.3.4 制作した CG シーン

生成したCGアニメーションは、およそ3.3.3節で述べた4つの各 stage に対応した、それぞれ約1分間程度の6シーンの動画から構成された。座標系や視点は、各シーンにおいて彗星の挙動を表現するために最も適切なものをシステムのインタラクティブ機能を利用して専門家の意見を聴きながら実験的に選択した。各シーンの具体的な内容を以下に述べると共に代表的なフレームの例とCGアニメーションの連続した数フレームを示す(図3-10～図3-15)。

(1) 彗星の過去の軌道の表現(シーン1, 2, 3) 軌道解析から知られた彗星の過去の軌道を座標系や視点を変えて観察した。また、太陽系内の惑星を同時に表示することにより、彗星の運動に太陽や他の惑星の重力の影響があることを表現した。シーン1(図3-10)は、stage1を太陽中心の座標系で観察し、太陽系全体を見おろす位置に置いた視点である。土星や木星と彗星との位置関係の変化から、他の惑星の重力の影響の存在を観察することができた。シーン2(図3-11)は、stage2を太陽中心の座標系で観察するが、木星を視野の中心に捉える視点とし、彗星の軌道を太陽中心の座標系でのものとする。これにより、木星の重力に捉えられ、その周りを絡みつくように運動する彗星が観察できた。シーン3(図3-12)は、stage2を木星中心の座標系で観察するもので、木星から見た彗星の軌道および運動が観察できる。

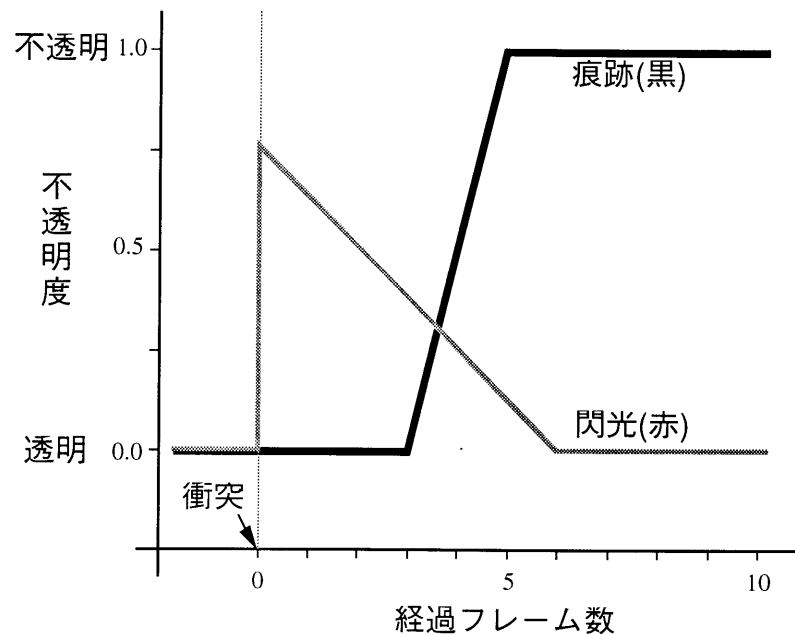
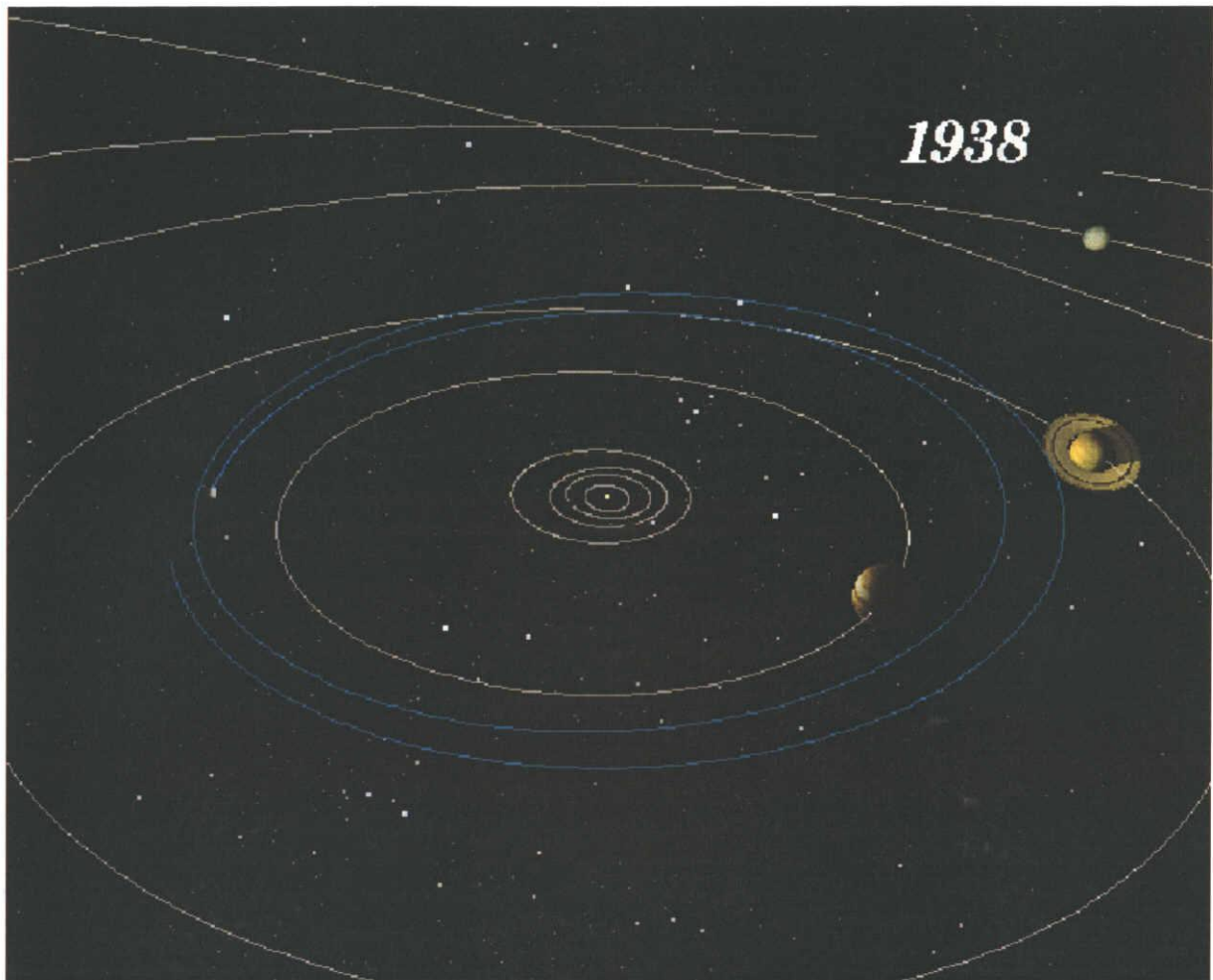


図3-9 核の衝突時における閃光と痕跡の表現における透明度変化

(2) 彗星の特徴の表現 (シーン4, 5) 発見後の観測によって明らかになった彗星の外観の特徴を表現した。具体的には、核の分裂や並び、およびその長さの変化や彗星の尾などを可視化した。シーン4 (図3-13) は、stage3を木星中心の座標系で観察するもので、木星衝突までの約3年間を表現した。一度目の木星への最接近、地球からの発見、そして衝突に至る過程を可視化した。シーン5 (図3-14) は、一度目の木星への最接近時に木星の潮汐力により核が分裂した様子を表現した。彗星の核に働く力を矢印で表現し、分裂現象を模式的に表現した説明的なシーンとした。

(3) 彗星の木星への衝突の表現 (シーン6) SL-9の最後の特徴である木星への衝突を表現したシーン6 (図3-15) ではいくつかの代表的な視点を考え、各視点から衝突現象がどの様に見えるかを映像化した。具体的な視点としては、地球方向からの視点 (この視点では衝突地点は直接見ることはできない)、宇宙探査衛星ガリレオ (米) からの視点 (木星の昼夜の境が中心に見え、衝突箇所も確認できる)、および、彗星からの視点 (観察者も彗星の核と一緒に衝突していく) である。現象自体は計算機内では統一座標系で一意に記述され、それぞれの視点の位置の制御を適切に行うことで上記の各映像化を行った。



→

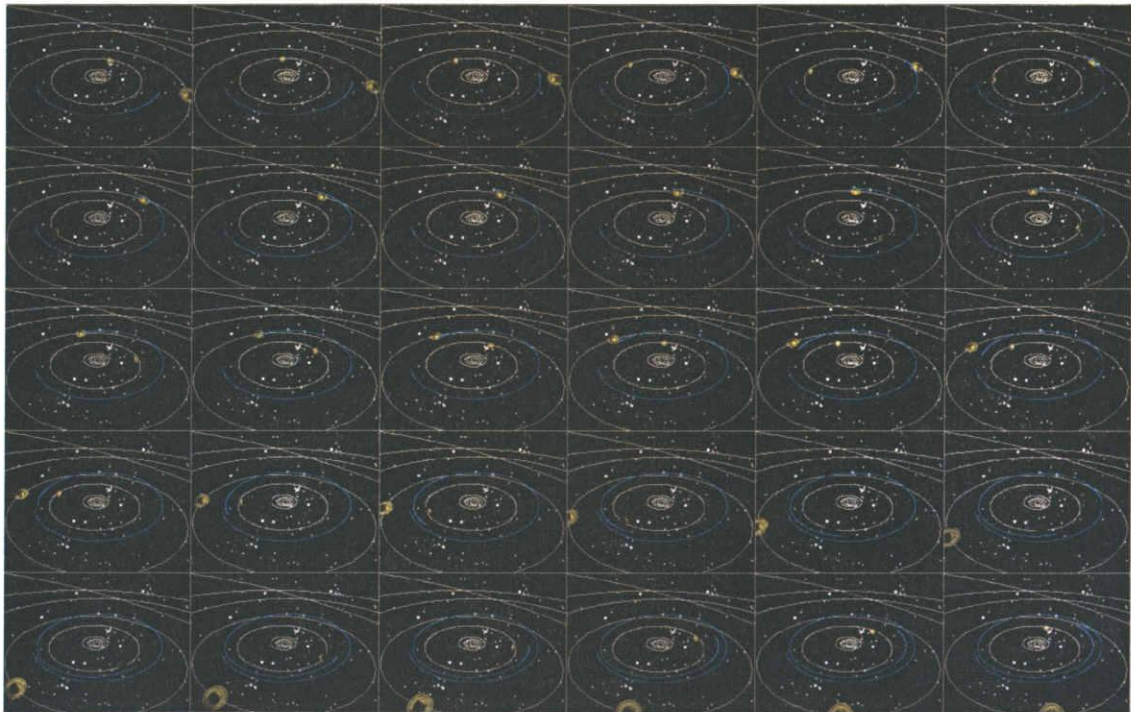
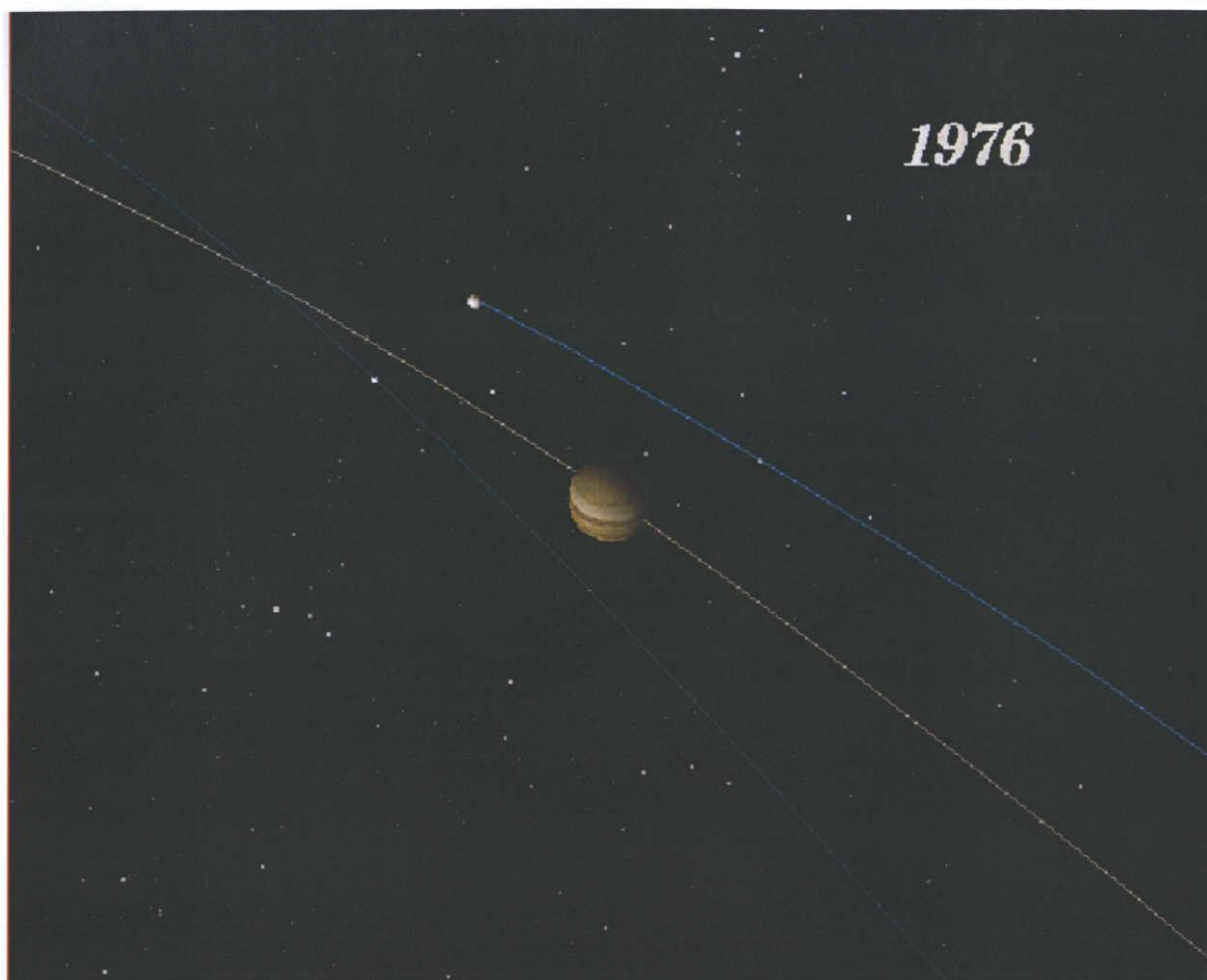


図 3-10 太陽系における SL-9 の軌道 (シーン 1)



→

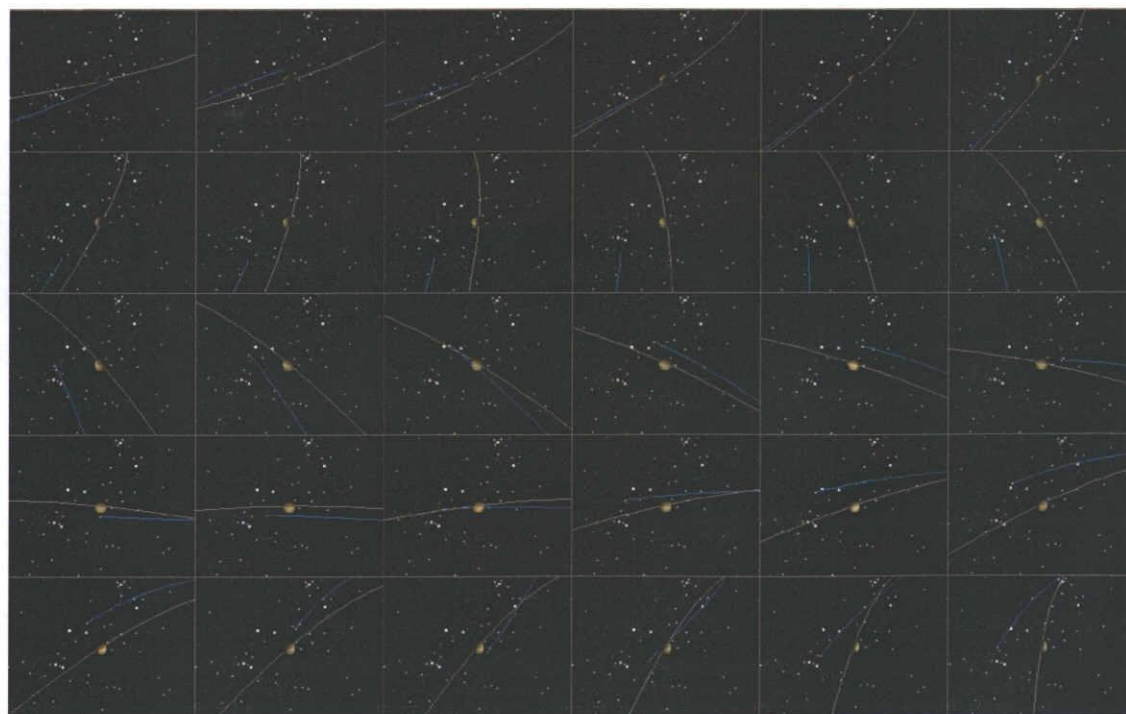
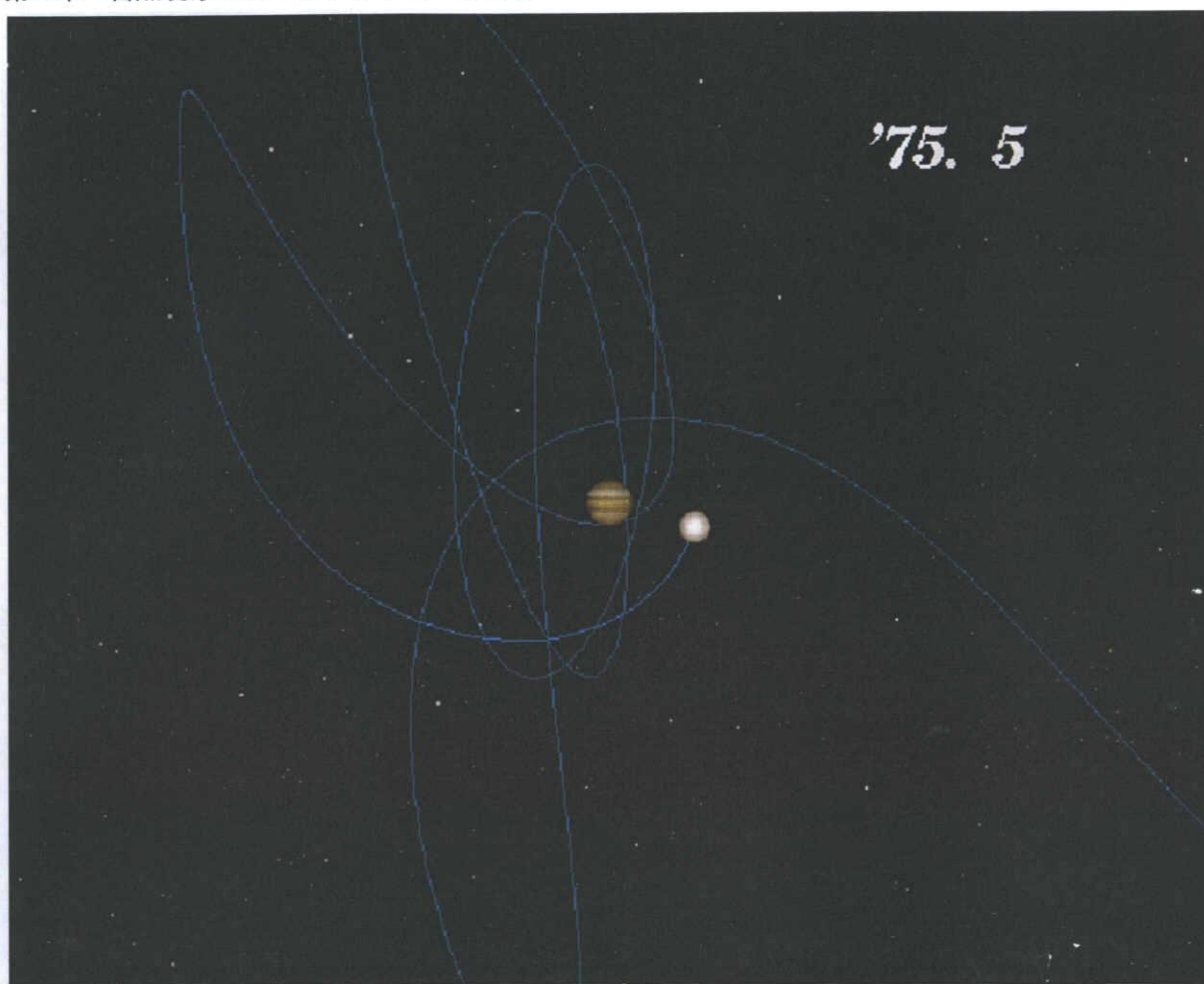


図 3-11 木星と共に動く SL-9 (シーン 2)



→

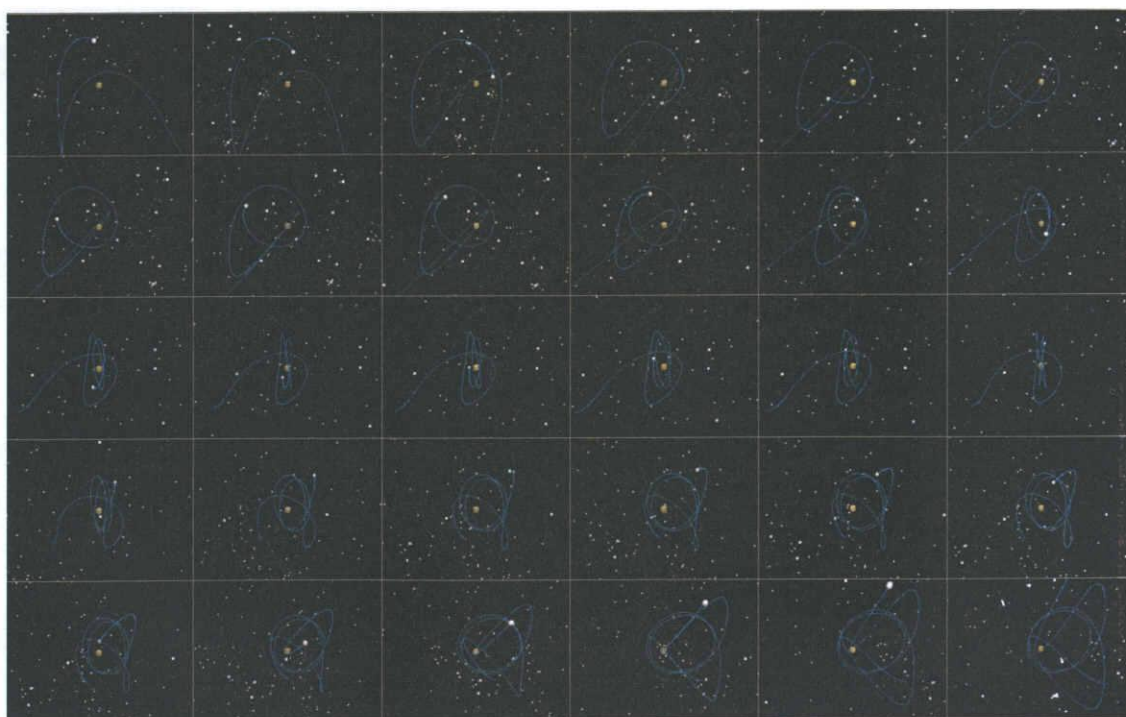


図 3-12 木星中心の座標系で観察した木星の周りを動く SL-9 (シーン 3)

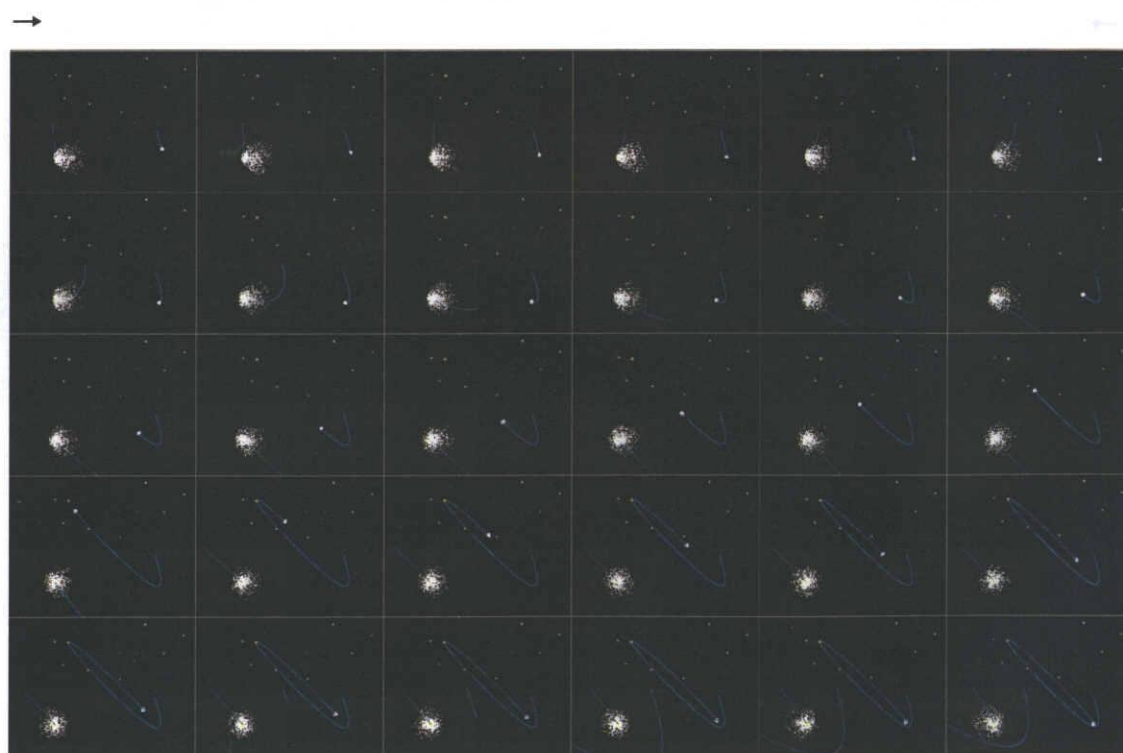
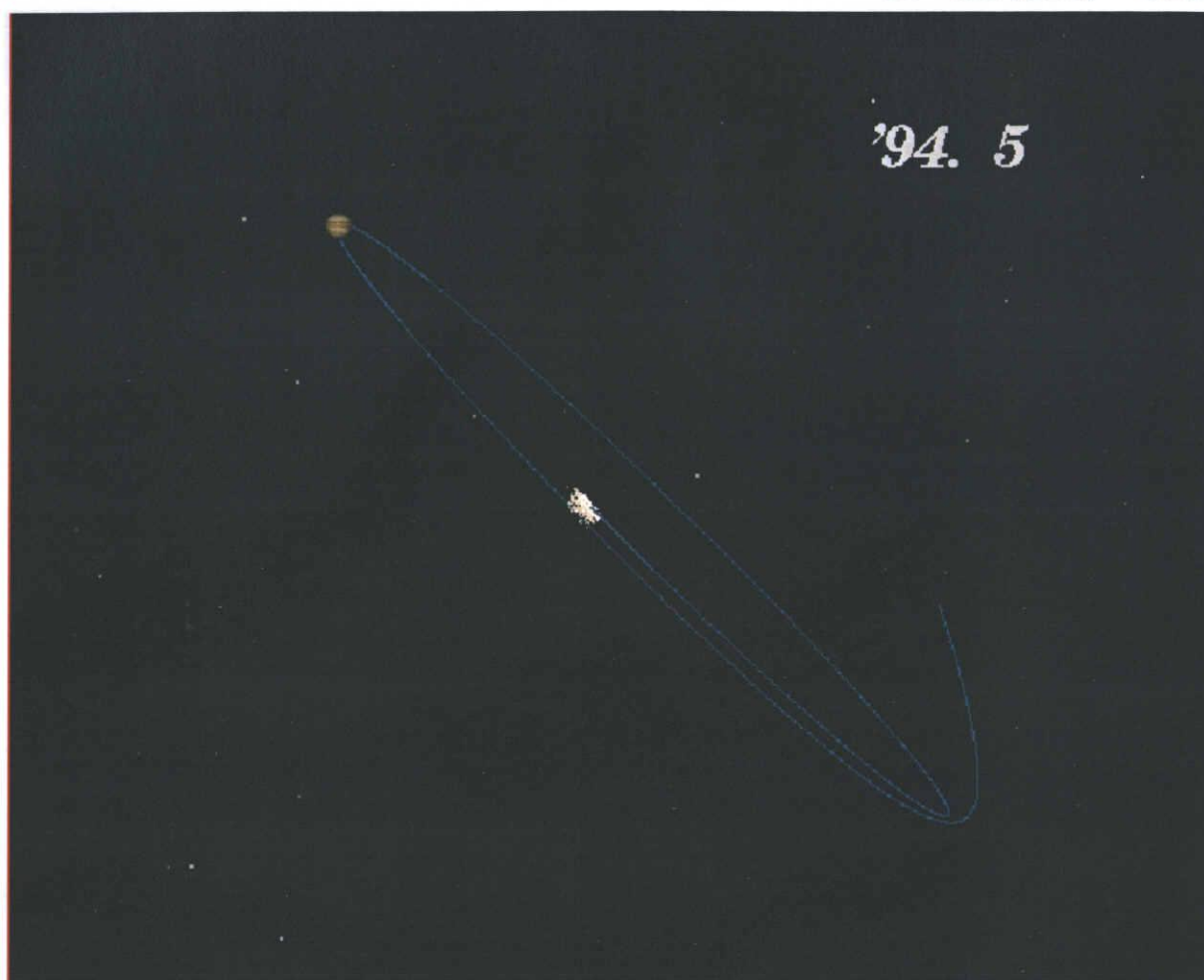
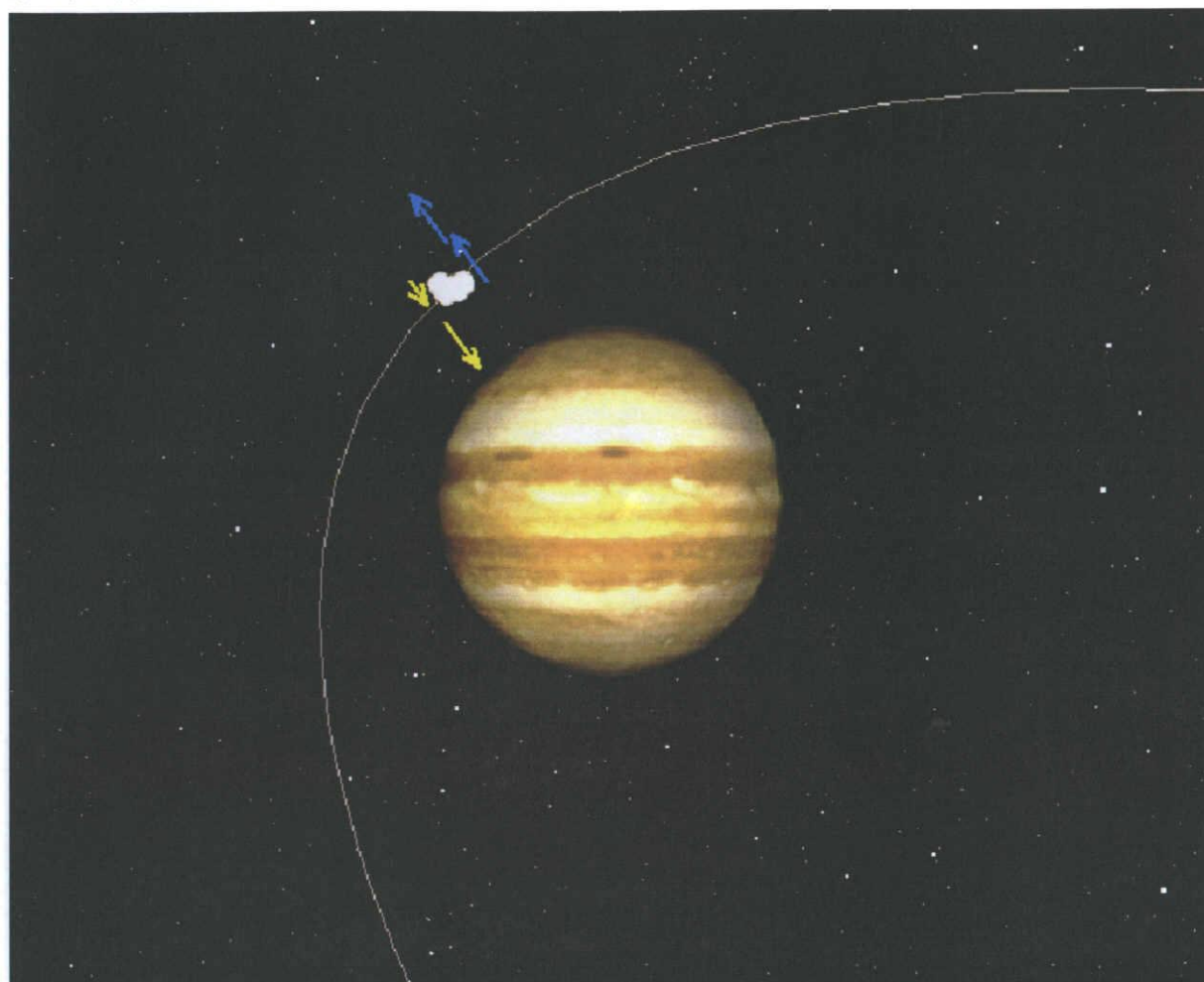


図 3-13 SL-9 の最後の 3 年間 (シーン 4)



→

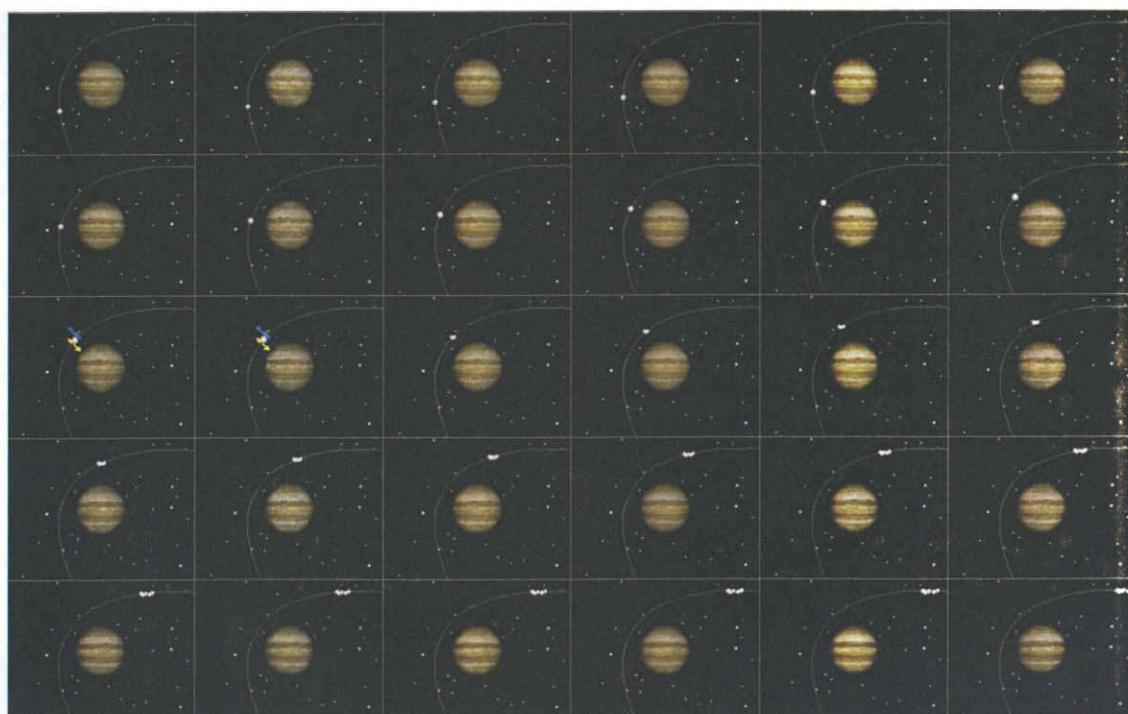


図 3-14 潮汐力による核の分裂（シーン 5）



図 3-15 木星への衝突（シーン 6）

3.3.5 開発環境と利用状況

本システムには SGI 社の IRIS Crimson + Reality Engine を使用した。本章で述べた実験では、1 秒当たり 10 フレーム程度の描画速度の CG アニメーション映像が得られる。

実験例で生成した CG アニメーション映像は 1994 年 7 月に名古屋市科学館プラネタリウムで使用され、一般の多くの人々に対する現象の解説に利用された。また、テレビ番組の中でも現象の紹介のために取り上げられた (NHK など)。この CG 映像のビデオは天文学会などを通じて希望する研究者にも配布され、この映像の有用性を示している。さらに、生成した CG 映像の静止画および動画の一部は名古屋大学情報文化学部の WWW (World Wide Web) に置かれ、インターネットを介して世界中に公開されている (1996 年 1 月現在)。この CG 映像より以前に、この様な彗星の過去の軌道変化を映像化した例はなく、この映像は天文の教育普及にも有用な成果となった [毛利 94]。なお、本 CG 映像は第 36 回科学技術映像祭において学術研究部門科学技術庁長官賞を受賞した。

3.4 まとめ

本章では、従来行われていなかったインターネット上に散在する各種マルチメディア情報を統合し、それをもとに対話的に自由な 3 次元 CG アニメーションを生成することが可能なシステムについて述べた。また、本システムを SL-9 と木星との衝突現象に適用し、システムの有効性を示した。世界各地でインターネット、CD-ROM などの最新のメディアを介して公開される時々刻々正確なものとなっていく観測データやシミュレーション結果にもとづいた 3 次元 CG アニメーションを即座に生成して、さらにインターネット上へ還元することによって、現象の把握がより容易なものとなったと考えられる。

今後の課題としては、以下の事項が挙げられる。

(1) 1 データを構成するサンプル数の問題。これまで使用したものは、比較的細かなサンプリングによって観測されたデータが多かったが、少ないデータのみを有効に利用するためには、線形近似では限界がある。例えば、さらに高次のデータ

補間や科学的根拠に基づくモデル化などを導入して観測データを加工する必要がある可能性は高い。また、観測データなどに含まれるノイズの影響についても、予めフィルタ処理するなどの考慮が必要であろう。

(2) 科学教育への応用. 一般に科学教育において最新データを利用したCG映像化は大きな教育効果が期待されることから、インターネットなどの最新情報メディアを有効に利用する方法の確立が必要である。さらに、VRやマルチメディアなど対話性を含む技術の導入が、今後の科学映像には重要であると考えられる。例えば、ヘッドマウントディスプレイなどを利用した立体視などが考えられ、これにより、さらに一歩進んだ現象の「体験」が可能となるであろう。

(3) ネットワークを利用した方法の検討. 本システムでは、惑星などの基本的な物体に関しては描画のためのサブルーチンを持つため比較的容易にシーンの構築が可能となっている。しかし、新しい現象に関するCG映像を作ろうとした場合には、現象に関する描画ルーチンを新たに作らなければならない、このままでは汎用性に多少問題がある。これを解決するためには、将来、本システムを多くの現象の可視化に適用していくことによって、個々の描画ルーチンをライブラリとして蓄積していくことなどが必要となるであろう [加藤95]。さらに、現在インターネットなどで公開される情報は数値や文字などが中心であるが、これに描画のためのプログラムのようなものを付加して提供することにより、ユーザの要求にあわせて様々なレベルの現象の可視化が可能となると考えられる。

第4章

むすび

本論文では、CGにおける自然物の表現手法や、CGによる自然現象の可視化手法について述べた。

第1章ではCGにおいて自然物を取り扱うことが注目されているが、CGによる表示対象として扱うことのできる対象はまだ一部分に限られており、これまで扱われていない対象に関する表現手法の開発の重要性について述べた。さらに、自然現象に関してネットワークやマルチメディアを通じて得られる情報が増大したが、これらを一つのCG映像としてまとめ、インタラクティブな操作で現象を観察することによって現象に関する総合的な理解が期待でき、CG映像が新しいメディアの視覚的な部分を扱うことから、得られた情報をCG映像に加工してメディアに還元することが重要になるであろうことを述べた。これらをふまえ、本研究ではCGによる自然物の表現や自然現象の可視化を扱うことを目的とした。

第2章では自然物のレンダリング手法として自然物の外観の特徴として重要と考えられる表面のテクスチャの立体的な形状や色の特徴に注目し、計算機によって自然物のテクスチャを合成するための手順を提案した。これにより自然物の持つ規則的な性質と不規則な性質を表現することが可能となった。これを従来のCGでは扱われていなかった爬虫類皮革や柑橘果実という具体的な例に対して適用したテクスチャ生成手法を示した。さらに、最終的なCG映像として生成したテクスチャを物体形状に張り付けて表示を行い、本手法の有効性を確認した。また、柑橘果実のみかんについては、実測値に基づく果実の色変化モデルを用い、より現実に近い色表現を導入した。ここで述べたテクスチャ生成手法は、幾つかのパラメータの設定によって異なった性質のテクスチャ生成が可能であり、今後は他の対象への適用も重要な課題である。また、現状では自然界に存在する対象を個別に取り上げるに止まっているが、将来は自然界に存在する多くの対象を統一的に扱うことが可能な汎用性の高い手法が求められると考えられる。このためには、外観的な特徴の導入だ

第4章 むすび

けでなく、生物学などに基づくより根本的なモデル化が必要であり、今後の課題として重要なテーマである。

第3章では自然現象の可視化手法として、ネットワークなどから得られる現象に関する最新の情報に基づき、GWSを用いて現象をCGアニメーションとして可視化し、インタラクティブに観察することが可能なシステムを提案した。さらに、このシステムをSL-9の木星への衝突という実際の宇宙現象に適用し、システムの有効性を示した。本システムは、刻々と更新される情報に対しても比較的迅速に対応することができ、CG映像としてこれらの最新情報を導入可能なことは重要な要素である。また、現在のところ本システムはマウスやダイヤルなどの簡単なデバイスを利用したインタラクションを実現しているが、近年注目されるグローブデバイスやヘッドマウントディスプレイなどのVRデバイスの利用も重要であり、これによりさらに自由度の高い現象の観察を可能とすることにより、新しい現象の理解が期待される。

本研究に関する今後の課題としては、以下のようなことが特に重要と思われる。

まず、今後、この様に自然物を扱うことに関しては、実際にCGを目にする人間との関わりが重要となることが考えられる。現実世界にある自然物をCGの中で扱うためには、物理的に厳密なモデルを計算機内に構築することが必要となる。しかし、これは自然物の持つ全ての性質を計算機内にシミュレートすることであり、それにはある程度の限界がある。そこで、第2章のまとめでも少しふれたが、実際の対象における「物体らしさ」を解析することにより得られる物体の本質的な特徴を表現する手法を導入することによって、人間に対してより効果的なCG映像を得ようとすることは重要であると思われる。このためには、実際にCGを目にする人間がそのCG映像を見てどの様に考えるか、あるいはどのような印象を受けるかといったことを知る必要がある。また、単なる「見た目」だけでなく、物体の持つ性質を示す様な動き（柔軟な物体の振動など）や物体全体の運動などの動的な性質の表現も含まれてくるであろう。逆に、CGを用いることによって現実にはない仮想的な世界をも表示可能であることから、第2章で述べたような技術は、実際の物体をCGの中で扱うことだけでなく、現実には存在しないような物体の「本物らしい」表

現手法への発展も重要な課題である。

また、ネットワークやVRなどCGと切り離して考えることができないような技術に対する期待は高まっており、これらにおいて、自然物を取り扱うことは将来的にさらに活発になると思われる。このような部分でCGの利用価値は非常に高いと考えられ、各種の情報のCG映像への加工によるネットワークへの還元だけでなく、ネットワークの持つ性質を利用した新しい可視化技術の開発も重要である。現在、VRML (Virtual Reality Modeling Language) と呼ばれる、仮想空間内の物体形状や簡単な動きの記述をネットワークを介して提供し、専用のブラウザによってこれを可視化しその仮想空間の中を移動するというものが注目されている [田中95]。これなどを参考に、例えば、これまで数値でのみ公開されていた各種の情報にその情報要素をCG映像化するための描画ルーチンを付加しておき、ユーザは世界に散在する「情報+描画手順」を任意に取り出し、これらを組み合わせて現象を可視化し体験することができるようなシステムも考えられる。これにより、これまで「与えられるのみであった映像」をユーザのニーズに沿った形にアレンジすることができることから、専門家から一般人までそれぞれがレベルに応じて求める現象の可視化が自由に行えるようになると考えらる。ただし、その実現のためには、ネットワークにおける通信フォーマットなどのさらなる検討が必要である。

謝辞

本研究は名古屋大学大学院工学研究科において、多数の方からのご指導、ご協力により行われました。本研究を進めるにあたり、指導教官でもあった名古屋大学工学部情報工学科鳥脇純一郎教授、名古屋大学情報文化学部横井茂樹教授、また、同工学部情報工学科大西昇教授には丁寧なご指導・ご助言を頂き御礼申し上げます。また、研究室内で所属するCG班においてご指導いただいた名古屋大学情報文化学部安田孝美助教授には本研究の詳細な部分について多くのご指導を頂き感謝いたします。

さらに、研究室のディスカッションなどにおいて多くの貴重なご助言をいただいた、名古屋大学工学部情報工学科斎藤豊文講師、清水昭伸助手、同大大型計算機センター田中敏光助教授、同大情報処理教育センター岡田稔助教授、中京大学情報科学部長谷川純一教授、並びに同大宮崎慎也助手に感謝いたします。また、名古屋大学工学部大下弘技官には、使用した計算機などハードウェアの面から本研究を支えていただき感謝いたします。

本研究の爬虫類皮革の表現の部分においては、在学時に基礎的な研究を行った倉地忠彦氏（現（株）リンクス）に感謝いたします。また、人間皮膚の表現を研究されていた石井智海氏（花王（株）文理科学研究所）には研究室配属当初に本研究の基礎部分について多くのご指導をいただき感謝いたします。柑橘果実の表現の部分においては、在学時に基礎的な研究を行った宮城真氏（現（株）リコー）、柑橘果実表面の微視的な性質についてご助言いただいた和歌山県工業技術センターの井口信和氏に感謝いたします。三重大学生物資源学部の亀岡孝治教授には農芸の分野から果実の色彩などについて多くのご助言をいただき感謝いたします。また、同教授のもとで実際に長期間にわたる測定実験を行い、多くの貴重なデータを提供していただいた阿部正勝氏、西川博士氏に感謝いたします。

本研究の自然現象の可視化システムの部分においては、貴重な彗星軌道の解析結果を提供して下さった郵政省通信総合研究所の吉川真博士、天文学的見地から様々なアドバイスをいただいた名古屋市科学館の北原政子天文係長、毛利勝廣学芸員、

謝辞

鈴木雅夫学芸員, CG映像のビデオによる公開で協力いただいたコンピュータ音楽の作曲家である大河内俊則先生, ビデオの監修をしていただいた元名古屋市科学館天文主幹の山田卓氏に感謝いたします。また, 本研究で制作したCG映像をマスメディアを通じて一般に公開する場を与えて下さったNHKの北野和宏氏に感謝いたします。さらに, 本研究において様々な情報を使用させていただいた各方面の方々に感謝いたします。

私の学生生活の間でもあった名古屋大学工学部鳥脇研究室, 並びに名古屋大学情報文化学部横井研究室の皆様には, 日頃から熱心に御討論いただき, 本研究に対して多くのご助言をいただき感謝いたします。特に同期の北川英志君, 目加田慶人君には日頃から忌憚のない多くの意見を頂き, また, 2人の存在が本研究を進める上で大きな励みとなったことに感謝します。

最後に, 私の研究活動を支えてくれた家族に感謝する。

参考文献

- [伊理 86] 伊理正夫 (監), 腰塚武志 (編), 他: 計算幾何学と地理情報処理, 共立出版, 1986
- [石井隆 91] 石井隆寛, 池口満徳, 山田俊宏, 土井淳多: 生体分子のための対話型分子グラフィックスシステム LIVE の開発, 情処論, Vol.32, No.5, pp.590-598, 1991
- [石井智 91] 石井智海, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 表面の微細形状に注目した皮膚の質感表現の一手法, 情処論, Vol.32, No.5, pp.645-654, 1991
- [宇田 90] 宇田紀之, 木村文隆, 鶴岡信治, 三宅康二: 人体動作表現における目的指向モデルの検討 - 歩行動作について -, 第 6 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.127-135, 1990
- [NHK89] NHK 取材班: NHK サイエンススペシャル 驚異の小宇宙・人体 別巻 1 CG 図鑑, 日本放送協会, 1986
- [大石 83] 大石芳野: ワニの民 - メラネシア芸術の人びと -, 冬樹社, 1983
- [大口 91] 大口孝之, 上田明彦, 佐藤雅弘: "台風" コンピュータアニメーションによる科学的啓蒙映像の制作, 第 7 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.365-374, 1991
- [大野 91] 大野義夫: 植物を対象とする CG 技術の研究動向, 情処研報, 91-CG-52-3, 1991
- [奥村 88] 奥村昭雄, 小川真樹: 光天球の中で生長する樹形 (樹形の構成要素と環境への対応), Science on Form, I: 2 (1), 1986, pp.59-88, II: 3, 1988, pp.127-141
- [加藤 95] 加藤光章, 安田孝美, 横井茂樹, 毛利勝廣, 鈴木雅夫: 天文現象の CG シミュレーション - 土星の環の消失 -, 第 11 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.171-178, 1995
- [河口 94] 河口洋一郎: コアセルベータ Artificial Life Creation, NTT 出版, 1994
- [倉立 95] 倉立尚明, 松田夏子, 鈴木薫: 時間および視点変化を考慮した雲の可視化, 第 11 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.151-160, 1995

参考文献

- [早乙女 92] 早乙女良江, 藤代一成, 池辺八州彦: 生物学的モデルに基づく紅葉の可視化ー葉一枚における色変化ー, 情報処理学会グラフィクスと CAD シンポジウム論文集, pp.59-68, 1992
- [杉原 89] 杉原厚吉: パターン認識の道具としてのボロノイ図構成算法の整備, 情処研報, 89-CG-37-1, 1989
- [田中 95] 田中宏幸: VRML の応用と問題点, 第 11 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.127-132, 1995
- [千葉 90] 千葉則茂, 海野啓明, 和田誓一, 村上一信: ひび割れの行動モデルとその CG への応用, 信学論, Vol.J73-D-II, No.10, pp.1742-1750, 1990
- [千葉 91] 千葉則茂: 動物を対象とする CG 技術の研究動向, 情処研報, 91-CG-52-2, 1991
- [千葉 93] 千葉則茂, 大川俊一, 村上一信, 三浦守: CG のための樹木の生長モデルー架空の「植物ホルモン」による自然な樹形の生成ー, 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1722-1734, 1993
- [デザイン 93] スーパーデザイン 5 ハイパー・イメージ・ミュージアム, 玄光社, 1993
- [東海 93-1] 東海彰吾, 宮城真, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: CG による柑橘果実の質感表現の一手法, 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1746-1754, 1993
- [東海 93-2] 東海彰吾, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎, 亀岡孝治: 実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現法, 信学技報, PRU93-94, 1993
- [東海 94] 東海彰吾, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 爬虫類皮革の質感表現の一手法, 情処論, Vol.35, No.5, pp.801-809, 1994
- [東海 95] 東海彰吾, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: "CG アニメーションを用いた宇宙現象のインタラクティブな可視化システムとシューメーカー・レビー第 9 彗星の木星衝突現象への適用", テレビジョン学会誌, Vol.49, No.10, pp.87-96, 1995
- [鳥脇 94] 鳥脇純一郎, 東海彰吾: コンピュータ・グラフィックスによる質感表現に基づく感性情報の抽出と記述の研究ーCG におけるモデルと感性情報ー, 平成 6 年度文部省科学研究費補助金重点領域研究「感性情報処理の情報学・心理学的研究」, 第 1 回全体会議予稿集, pp.25-36, 1994
- [長沢 85] 長沢工: 天体の位置計算, 地人書館, 1985

- [中島 88] 中島正之, 福田智美, 安居院猛: 景観表示のための樹木生成法, 第 4 回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp.22-29, 1988
- [中島 91] 中島正之: CG による自然物体の生成に関する研究動向, 情処研報, 91-CG-52-1, 1991
- [村上 93] 村上一信, 千葉則茂, 高橋宏道, 三浦守: 渦場と粒子による煙や炎の 2 次元 CG シミュレーション, 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1735-1745, 1993
- [毛利 94] 毛利勝廣, 鈴木雅夫, 北原政子, 安田孝美, 東海彰吾, 吉川真, 沢武文: シューメーカー・レービー第 9 彗星衝突の CG 映像作成とヒューマンネットワークについて, 日本天文学会 1994 年秋季年会講演予稿集, 講演番号 Y01w, 1994
- [吉川 93] 吉川真: 彗星の軌道運動, 日本惑星科学会誌, Vol.2, No.4, pp.164-172, 1993
- [理科年表 94] 国立天文台 (編): 理科年表 平成 6 年版, 丸善, 1994
- [レイサム 90] 品川文化振興財団 O 美術館, 天野一夫 (編): ウィリアム・レイサム展 THE EMPIRE OF FORM, 品川文化振興財団 O 美術館, 1990
- [惑星学会誌 93] 特集「木星に衝突する彗星」, 日本惑星科学会誌, Vol.2, No.4, pp.164-19, 1993
- [惑星学会誌 94] 特集「シューメーカー・レービー第 9 彗星の木星衝突」, 日本惑星科学会誌, Vol.3, No.4, pp.232-291, 1994
- [渡辺 90] 渡辺保日兎, 末永康仁: 三角柱と房のモデルによる頭髮像の生成, 信学論, Vol.J73-D-II, No.3, pp.367-373, 1990
- [Anjyo91] K.Anjyo: Semi-globalization of stochastic spectral synthesis, The Visual Computer, Vol.7, No.1, pp.1-12, 1991
- [Anjyo92] K. Anjyo, Y. Usami, T. Kurihara: A Simple Method for Extracting the Natural Beauty of Hair, Computer Graphics, Vol.26, No.2, pp.111-120, 1992 (SIGGRAPH92 Proceeding)
- [Bennis91] C.Bennis, J.M.Vezien, G.Iglesias: Piecewise Surface Flattening for Non-Distorted Texture Mapping, Computer Graphics, Vol.25, No.4, pp.237-246, 1991 (SIGGRAPH91 Proceeding)
- [Blinn77] J.F.Blinn: Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures, Computer Graphics, Vol.11, No.2, pp.192-198, 1977 (SIGGRAPH77 Proceeding)

参考文献

- [Blinn78] J.F.Blinn : Simulation of Wrinkled Surfaces, Computer Graphics, Vol.12, No.3, pp.186-192, 1978 (SIGGRAPH78 Proceeding)
- [Bloomenthal85] J.Bloomenthal : Modeling the Mighty Maple, Computer Graphics, Vol.19, No.3, pp.305-311,1985 (SIGGRAPH85 Proceeding)
- [Bruton94] D.Bruton, J.Harper : Frequently Asked Questions about the Collision of Comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter, 1994-07-13, ftp : //tamsun.tamu.edu/pub/comet (日本語版「彗星と木星の衝突についてのFAQ」, ftp : //sasun11.kusastro.kyoto-u.ac.jp/usr3/pub/shoji)
- [Bryson92] S.Bryson, C.Levit : The Virtual Wind Tunnel, IEEE CG&A, Vol.12, No.4, pp.25-34, 1992
- [Demco85] S.Demco, L.Hodges, B.Naylor : Construction of Fractal Objects with Iterated Function Systems, Computer Graphics, Vol.19, No.3, pp.271-278, 1985 (SIGGRAPH85 Proceeding)
- [Fournier82] A.Fournier, D.Fussel, L.Carpenter : Computer Rendering of Stochastic Models, Comm. ACM, Vol.25, No.6, pp.371-384, 1982
- [Fowler92-1] D.R.Fowler, P.Prusinkiewicz, J.Battjes : A Collision-based Model of Spiral Phyllotaxis, Computer Graphics, Vol.26, No.2, pp.361-368, 1992 (SIGGRAPH92 Proceeding)
- [Fowler92-2] D.R.Fowler, H.Meinhardt, P.Prusinkiewicz : Modeling Seashells, Computer Graphics, Vol.26, No.2, pp.379-387, 1992 (SIGGRAPH92 Proceeding)
- [Haruyama84] S.Haruyama, B.A.Barsky : Using Stochastic Modeling for Texture Generation, IEEE CG&A, Vol.4, No.3, pp.7-19, 1984
- [Huang95] Z.Huang, R.Boulic, N.M.Thalmann, D.Thalmann : A Multi-sensor Approach for Grasping and 3D Interaction, in R.Earnshaw, J.A.Vince Ed. : Computer Graphics : Development in Virtual Environments, pp.235-253, Academic Press, 1995
- [Kajiya89] J.T.Kajiya : Rendering Fur with Three Dimensional Textures, Computer Graphics, Vol.23, No.3, pp.271-280, 1989 (SIGGRAPH89 Proceeding)
- [Lewis84] J.P.Lewis : Texture Synthesis for Digital Painting, Computer Graphics, Vol.18, No.3, pp.245-252, 1984 (SIGGRAPH84 Proceeding)
- [Lewis89] J.P.Lewis : Algorithms for Solid Noise Synthesis, Computer Graphics, Vol.23, No.3, pp.263-270, 1989 (SIGGRAPH89 Proceeding)

- [Mandelbrot82] B.B.Mandelbrot : The fractal geometry of nature, W.H.FREEMAN AND Company, 1982
- [McKenna90] M.McKenna, D.Zeltzer : Dynamic Simulation of Autonomus Legged Locomotion, Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.29-38, 1990 (SIGGRAPH90 Proceeding)
- [Miller88] G.S.P.Miller : The Motion Dynamics of Snakes and Worms, Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.169-178, 1988 (SIGGRAPH88)
- [Miyata90] K.Miyata : A Method of Generating Stone Wall Patterns, Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.387-394, 1990 (SIGGRAPH90 Proceeding)
- [Perlin85] K.Perlin : An Image Synthesizer, Computer Graphics, Vol.19, No.3, pp.287-296, 1985 (SIGGRAPH85 Proceeding)
- [Perlin89] K.Perlin, E.M.Hoffert : Hypertexture, Computer Graphics, Vol.23, No.3, pp.253-262, 1989 (SIGGRAPH89 Proceeding)
- [Reeves85] W.T.Reeves, R.Blau : Approximate Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems, Computer Graphics, Vol.19, No.3, pp.313-322, 1985 (SIGGRAPH85 Proceeding)
- [Science95] Comet Shoemaker-Levy 9, Science, Vol.267, No.5202, pp.1277-1323, 1995
- [Takita91] S.Takita, K.Kaneda, T.Akinobu, E.Nakamae, T.Nishita : A simple method for rendering penumbræ caused by sunlight, The Visual Computer, Vol.7, No.5-6, pp.259-268, 1991
- [Thalmann93] N.M.Thalmann, D.Thalmann : The Artificial Life of Synthetic Actors, 信学論, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1506-1514, 1993
- [Tokai95] S.Tokai, T.Yasuda, S.Yokoi, J.Toriwaki : "A Method of Expression of Space Phenomena with CG Animation. ~ the collision of the comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter in July 1994 ~" in R. A. Earnshaw and J. A. Vince eds. : Computer Graphics : Developments in Virtual Environments, pp.267-280, Academic Press, 1995 (CG International'95 Proceeding)
- [Turk91] G.Turk : Generating Texture on Arbitrary Surfaces Using Reaction-Diffusion, Computer Graphics, Vol.25, No.4, pp.289-298, 1991 (SIGGRAPH91 Proceeding)
- [Visualization93] G.M.Neilson, D.Bergeron, Ed. : Proceedings Visualization'93, IEEE, 1993

参考文献

- [Waters87] K.Waters : A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression, Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.17-24, 1987 (SIGGRAPH87 Proceeding)
- [Witkin91] A.Witkin, M.Kass : Reaction-Diffusion Textures, Computer Graphics, Vol.25, No.4, pp.299-308, 1991 (SIGGRAPH91 Proceeding)
- [YBSC91] Yale Bright Star Catalog 5th Rev.Ed (Hoffleit & Warren) , 1991 (CD-ROM " Selected Astronomical Catalog " より , NASA Goddard Space Flight Center)

付録 1

自由曲線，自由曲面

CGにおける物体の形状定義などにおいては，形状表現を3次元の座標値としてハードウェアに渡す必要があるが，人間がイメージした物体形状の具体的な座標値を与えることが困難なことが多い．そこで，いくつかの制御点の位置の決定によって，試行錯誤的に複雑な形状を設定することが可能な幾つかの自由曲線や自由曲面が用いられる．ここでは，CGの分野では比較的良好に用いられ，本論文内でも使用しているベジエ曲線，ベジエ曲面，Bスプライン曲面について，これらの定義と本文に關係する性質等についてまとめておくことにする．

付録 1-1 ベジエ曲線

CGで良く用いられる自由曲線であり，いくつかの制御点によって曲線を定義するものである．これは，媒介変数による曲線表現であり，制御点の位置ベクトルとブレンド関数と呼ばれる係数によって一つの曲線が定義され，媒介変数 u によって曲線上の一点が求められる．

$$\begin{aligned} P(u) &= \sum_{k=0}^n p_k B_{k,n}(u) \quad (0 \leq u \leq 1), \\ B_{k,n}(u) &= C(n, k) u^k (1-u)^{n-k}, \\ C(n, k) &= \frac{n!}{k! (n-k)!} \end{aligned} \quad (\text{付 1.1})$$

例えば，式 (付 1.1) において $n=3$ の場合は制御点は $p_0 \sim p_3$ の4点であり，各係数は，

$$\begin{aligned} C(3,0) &= \frac{3!}{0! (3-0)!} = 1, & C(3,1) &= \frac{3!}{1! (3-1)!} = 3, \\ C(3,2) &= \frac{3!}{2! (3-2)!} = 3, & C(3,3) &= \frac{3!}{3! (3-3)!} = 1 \end{aligned} \quad (\text{付 1.2})$$

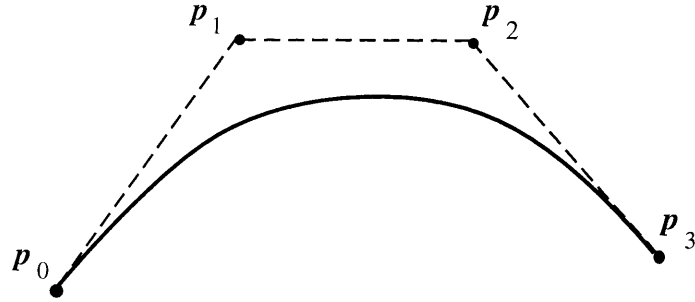


図 付 1-1 3 次ベジェ曲線

となり, 式 (付 1.1) は,

$$P(u) = (1-u)^3 p_0 + 3u(1-u)^2 p_1 + 3u^2(1-u)p_2 + u^3 p_3 \quad (\text{付 1.3})$$

となる. 3 次のベジェ曲線の例を図付 1-1 に示す. また, 式 (付 1.3) をパラメータ u によって微分すると,

$$\frac{d}{du}P(u) = -3(u^2 - 2u + 1)p_0 + 3(3u^2 - 4u + 1)p_1 + 3(3u^2 - 2u)p_2 + 3u^2 p_3 \quad (\text{付 1.4})$$

が得られる. これは曲線上の任意の点での接ベクトルを与えるものであり, 実際には, p_k は x 軸, y 軸方向の成分を持ったベクトルで表されるため, 各成分を式 (付 1.4) に代入し計算することにより接ベクトルを得る. さらに, 曲線上の同じ点における法線ベクトルは, この接ベクトルに直交するベクトルとして算出が可能である. ただし, 曲線の制御点の並び方によっては, 求めたい法線ベクトルの逆方向が算出されることもあり, 注意が必要である.

付録 1-2 ベジェ曲面

ベジェ曲面はベジェ曲線を面に拡張したもので, 2つのパラメータによって面上の 1 点の座標を算出するものである. 定義式は以下のようになる.

$$P(u, v) = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^n p_{j,k} B_{j,m}(u) B_{k,n}(v) \quad (\text{付 1.5})$$

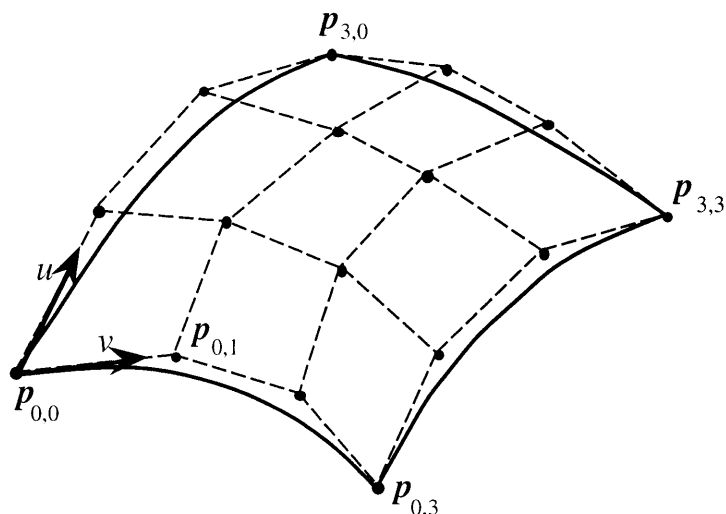


図 付 1-2 3次ベジエ曲面

ここで、 p_{ij} は制御点の位置ベクトルであり、 u, v の2変数が媒介変数である。また、 $B_{k,n}(u)$ は式 (付 1.1) と同様のブレンド関数である。

例えば、3次のベジエ曲面の場合 ($n=3$) は、曲面は16個の制御点によって定義される。3次のベジエ曲面の例を図付 1-2に示す。以下の式によって面上の点の座標を得る。

$$P(u, v) = \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 p_{j,k} B_{j,3}(u) B_{k,3}(v) \quad (\text{付 1.6})$$

特徴としては、面の四すみの制御点の座標を必ず通ることや、面の定義範囲の端の曲線がベジエ曲線になることなどがあげられる。また、複数の曲面を接続して使用することもあり、制御点の与え方を工夫することにより、滑らかに接続することも可能である。

CGにおいては、この様に算出できる面上のいくつかの点から構成される平面のパッチによって表現することとなる。具体的には、一つの曲面を $N \times N$ に分割して表現するとすると、2つのパラメータ u, v を離散的に与えた、

$$u = \frac{1}{N}k \quad (k=0,1,\dots,N), \quad v = \frac{1}{N}l \quad (l=0,1,\dots,N) \quad (\text{付 1.7})$$

を式 (付 1.6) に代入して得られる、 $(N+1) \times (N+1)$ 個の頂点による平面群によって曲面表現が得られる。実際には (k, l) の組として、 $(a, b), (a+1, b), (a, b+1), (a+1, b+1)$

付録1 自由曲線, 自由曲面

である4点を用いて2個の三角形を作り曲面を構成する. N は大きいほど, より滑らかな面の表現となるが, あまり大きくすることは実用上は記憶容量などに問題が出る可能性もあり, 実際にはスムーズシェーディング等を併用することにより $N=10$ 程度で曲面として十分違和感のない表現が得られる.

ところで, 式 (付 1.6) を2つのパラメータ u, v でそれぞれ偏微分すると, 2つの接ベクトルが算出でき, $(u, v) = (u_0, v_0)$ における2方向の接ベクトル t_u, t_v は,

$$t_u = \frac{\partial}{\partial u} P(u_0, v_0), \quad t_v = \frac{\partial}{\partial v} P(u_0, v_0) \quad (\text{付 1.8})$$

で与えられる. バンプマッピング (付録2-2) では, 曲面上の2つの接ベクトルを必要とするが, この t_u, t_v を用いればよい. また, 前述の平面パッチの各頂点での法線ベクトル n も, この2ベクトルの外積として計算でき,

$$n = t_u \times t_v \quad (\text{付 1.9})$$

で与えられる. ただし, 座標系によっては, 面の法線が逆を向く可能性もあり, 注意が必要である.

付録1-3 B スプライン曲面

B スプライン曲面はベジェ曲面と同様にいくつかの制御点と2つのパラメータによって定義される面であり, 以下の式で定義される.

$$P(u, v) = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n p_{j,k} N_{j,s}(u) N_{k,t}(v),$$

$$N_{k,t}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_k \leq u < u_{k+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad N_{k,t}(u) = \frac{u - u_k}{u_{k+t-1} - u_k} N_{k,t-1}(u) + \frac{u_{k+t} - u}{u_{k+t} - u_{k+1}} N_{k+1,t-1}(u),$$

$$u_j = \begin{cases} 0 & \text{if } j < t \\ j - t + 1 & \text{if } t \leq j \leq n \\ n - t + 2 & \text{if } j > n \end{cases} \quad (\text{付 1.10})$$

3次B スプライン曲面の場合は16個の制御点によって定義され, 係数は以下のようになる.

$$N_0(u) = -\frac{1}{6}u^3 + \frac{1}{2}u^2 - \frac{1}{2}u + \frac{1}{6},$$

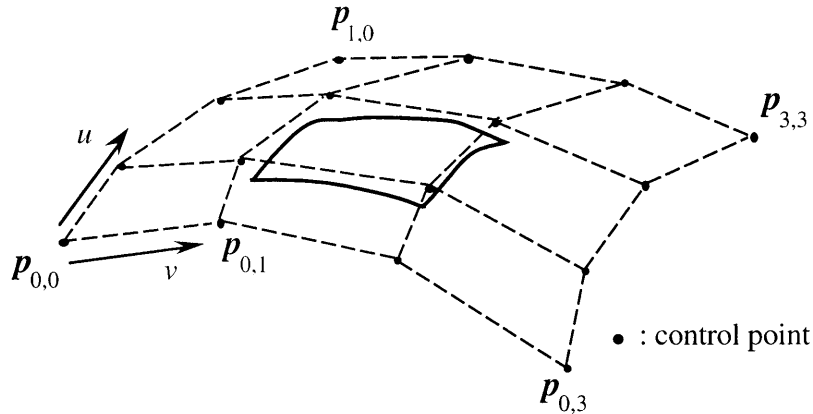


図 付 1-3 3 次 B スプライン曲面

$$\begin{aligned}
 N_1(u) &= \frac{1}{2}u^3 - u^2 + \frac{2}{3}, \\
 N_2(u) &= -\frac{1}{2}u^3 + \frac{1}{2}u^2 + \frac{1}{2}u + \frac{1}{6}, \\
 N_3(u) &= \frac{1}{6}u^3
 \end{aligned}
 \tag{付 1.11}$$

特徴としては，図付 1-3 に示すように，およそ中央の 4 つの制御点に囲まれる部分に面が定義されることがあげられる．

実際の CG では，B スプライン曲面もベジエ曲面と同様に平面パッチによって表現される．平面パッチの頂点座標はベジエ曲線と同様に求めることも可能であるが，付録 1-5 の揺らぎ処理を考慮し，曲面の分割のための制御点生成による方法がある．これは，もとの 16 個の制御点で定義される曲面を 4 等分した 4 つの曲面を得るための新たな制御点 16×4 個（一部は重複）を生成することを繰り返し処理される．この結果，制御点座標がそのまま曲面を表現する平面パッチの頂点として用いることができる．また，接ベクトル，法線ベクトルについても，式 (付 1.8)，式 (付 1.9) と同様に算出できる．

付録 1-4 ベジエ曲面と B スプライン曲面との関係

付録 1-2 および付録 1-3 で次数を 3 次とした場合のベジエ曲面と B スプライン曲面の表現について述べた．この 2 種類の曲面はいずれも 2 つのパラメータと 16 個の制御点によって定義される曲面であり，これらの制御点同士の関係を知っておくこと

付録 1 自由曲線, 自由曲面

は, 簡単な物体定義等の際に有用である. ここでは, 同一の曲面を表現するようなベジェ曲面と B スプライン曲面の制御点の関係についてまとめておく.

それぞれの式表現をみると, 制御点の位置ベクトルと u, v から構成されていることが分かり, u, v の次数の組み合わせとしては,

$$u^3v^3, u^3v^2, u^3v^1, \dots, u^0v^0 \quad (\text{付 1.12})$$

の 16通りがある. 同一の曲面を表現するような制御点を与えたとき, これらの変数にかかる係数が一致するようにしてやればよい. ここで, ベジェ曲面の制御点を p_{ij} ($ij=0,1,2,3$), B スプライン曲面の制御点を q_{ij} ($ij=0,1,2,3$) とすると, 式 (付 1.2) の各変数の係数がそれぞれ等しいすると, 2つの曲面の制御点の間の関係式が得られる. 実際に計算してみると, 両者の制御点座標は 16×16 の行列によって表される一次変換によって対応付けが可能であり, 以下のような形に表すことができる.

$$\begin{pmatrix} q_{0,0} \\ q_{0,1} \\ \vdots \\ q_{3,3} \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} p_{0,0} \\ p_{0,1} \\ \vdots \\ p_{3,3} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} p_{0,0} \\ p_{0,1} \\ \vdots \\ p_{3,3} \end{pmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} q_{0,0} \\ q_{0,1} \\ \vdots \\ q_{3,3} \end{pmatrix},$$

$$T = \begin{pmatrix} 36 & -42 & 12 & 0 & -42 & 49 & -14 & 0 & 12 & -14 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & 12 & 0 & 0 & 7 & -14 & 0 & 0 & -2 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & -42 & 0 & 0 & -14 & 49 & -42 & 0 & 4 & -14 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & -14 & 4 & 0 & -6 & 7 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & 0 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & -14 & 12 & 0 & -2 & 7 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6 & 7 & -2 & 0 & 12 & -14 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 0 & 0 & -2 & 4 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 7 & -6 & 0 & 4 & -14 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & -14 & 4 & 0 & -42 & 49 & -14 & 0 & 36 & -42 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -2 & 0 & 0 & -2 & 7 & -6 & 0 & 12 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 4 & 0 & 0 & -2 & 14 & -14 & 0 & 0 & -6 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & -14 & 12 & 0 & -14 & 49 & 12 & 0 & 12 & -42 & 36 \end{pmatrix},$$

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} 1/36 & 1/9 & 1/36 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 1/36 & 1/9 & 1/36 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/9 & 1/18 & 0 & 0 & 2/9 & 4/9 & 0 & 0 & 1/9 & 1/18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/18 & 1/9 & 0 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 1/18 & 1/9 & 1/36 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/36 & 1/9 & 1/36 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 1/36 & 1/9 & 1/36 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 1/18 & 2/9 & 1/18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2/9 & 4/9 & 0 & 0 & 1/9 & 2/9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/18 & 1/9 & 1/18 & 0 & 1/18 & 2/9 & 1/18 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/18 & 1/9 & 1/18 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2/9 & 1/9 & 0 & 0 & 4/9 & 2/9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/9 & 2/9 & 0 & 0 & 2/9 & 4/9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/18 & 2/9 & 1/18 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/36 & 1/9 & 1/36 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 1/36 & 1/9 & 1/36 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/9 & 1/18 & 0 & 0 & 4/9 & 2/9 & 0 & 0 & 1/9 & 1/18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/18 & 1/9 & 0 & 0 & 2/9 & 4/9 & 0 & 0 & 1/18 & 1/9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/36 & 1/9 & 1/36 & 0 & 1/9 & 4/9 & 1/9 & 0 & 1/36 & 1/9 & 1/36 \end{pmatrix} \quad (\text{付 1.13})$$

これらの対応関係を利用することにより, どちらか一方で定義された曲面をもう一方で定義するための制御点群の算出が可能となる. また, 後述の揺らぎ処理のように一方の曲面表現にのみ定義された処理をもう一方に対して施すことも可能となる (ベジェ曲面で定義した曲面に対して中点変位法による揺らぎ処理を施すなど).

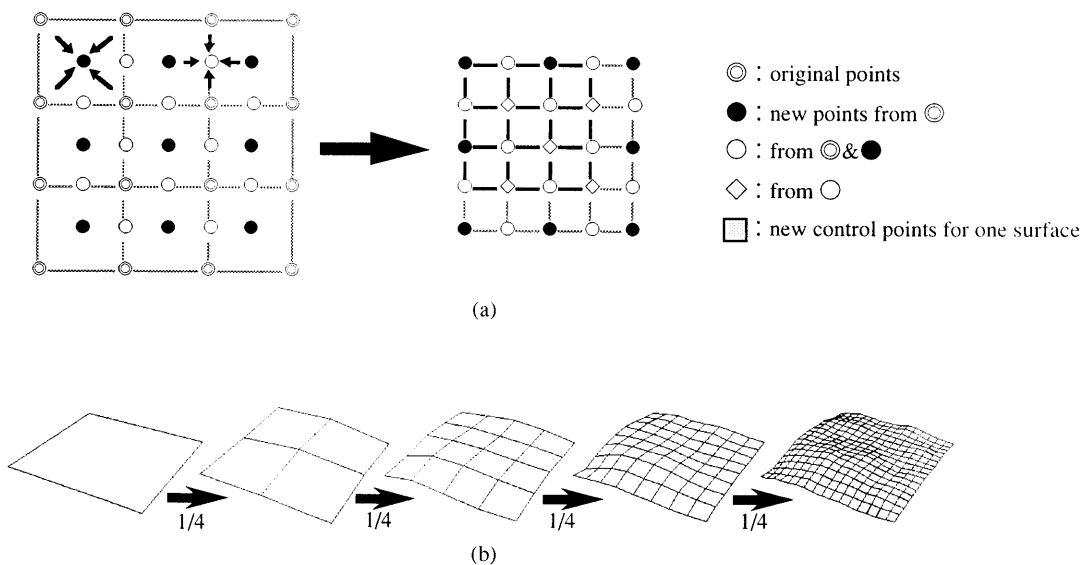
実際、ベジェ曲面で定義しやすい形状やBスプライン曲面で定義しやすい形状が存在し、相互に制御点を変換できることは様々な形状生成のために有用である。

付録 1-5 B スプライン曲面に対する揺らぎ処理

乱数を用いた疑似フラクタル処理である中点変位法 [Fournier82] を利用して、Bスプライン曲面で定義された曲面に揺らぎ処理を施す。これによって、自然物の持つような適度な歪みを持った形状が生成される。以下、3次Bスプライン曲面に対する具体的な処理について述べる。

3次Bスプライン曲面による形状は実際には複数のポリゴンに分割して表現するが、これは与えられた16個の制御点から、元の曲面を4分割する新たな曲面のための制御点を算出することを繰り返して処理される。新しい制御点の発生手順を図付 1-4 (a) に示す。元の制御点◎を4個ずつ用いてその四角形の中心に新たな制御点●を1個発生する。このとき、中点変位法によって乱数を用いた変位を制御点の座標に与える。16個の◎から9個の●を発生し、同様に○、◇の制御点を順次発生して、元の曲面を4分割する新たな25個の制御点とする。これを繰り返すことにより曲面は微小多角形に分割され、形状に歪みが付加される。微小多角形への分割処理の過程を図付 1-4 (b) に示す。

ここで、歪みの程度を制御するのが、相似比と呼ばれるパラメータである。相似



図付 1-4 曲面に対する揺らぎ処理

付録1 自由曲線, 自由曲面

比はフラクタルを用いて曲面を分割変形する際の変形の尺度であり, 1回の分割による線分の長さの変化の割合を表す. すなわち, 相似比=1.0であれば, 揺らぎによる変形処理は施されない. 実際には乱数の要素が加わるため, 実際の線分の変化が相似比に完全に一致するわけではない.

参考文献

- [Fournier82] A.Fournier, D.Fussel, L.Carpenter : Computer Rendering of Stochastic Models, Comm. ACM, Vol.25, No.6, pp.371-384, 1982
- [Hearn86] D.Hearn, M.P.Baker : Computer Graphics, Prentice-Hall, 1986
- [太田 86] 太田昌孝, 竹内あきら, 大口孝之 : 応用グラフィックス, アスキー出版局, 1986
- [杉原 95] 杉原厚吉 : グラフィックスの数理, 共立出版, 1995

付録 2

テクスチャマッピング

テクスチャマッピングとは、物体表面の特徴を表現するような模様や図柄をテクスチャとして物体形状とは別に用意しておき、CG シーン内の表示物にこのテクスチャを張り付けて表示することである。テクスチャそのものは、物体の質感に関わる外見的な特徴として重要であり、実物から取り込んだり、本論文第2章のように計算機で生成する方法などがある。テクスチャマッピングはテクスチャの持つ特徴をCGシーン内の物体に与えることで、CGシーン内の表示物の質感の向上を比較的容易に行うことができる効果的な手法である。現在のGWSにおいてはハードウェアでテクスチャマッピングをサポートするものもあり、一般的な技術となってきたと言える。ここでは、本論文で形状定義に用いた自由曲面に対するテクスチャマッピングと、法線情報を張り付けることにより簡易的な凹凸表現を可能とするバンプマッピングについてまとめておく。

付録 2-1 パラメトリックな自由曲面とテクスチャマッピング

マッピングとは写像の意味であり、テクスチャマッピングとはテクスチャデータの定義されている空間からCGシーン内の物体表面への写像を行って、テクスチャの持つ色や形状などの情報を物体表面に張り付けることである。物体形状は付録1に示したようなパラメトリックな自由曲面で構成されることが多い。このような、曲面上の1点とテクスチャ上の1点とを何らかの形で対応付け、テクスチャの情報を物体表面に割り当てる。対応付けの方法としては、投影による方法など幾つかがあるが、ここでは、付録1で扱ったパラメトリックな自由曲面生成のための2つのパラメータ (媒介変数) を用いた方法について説明する。

パラメトリックな自由曲面では面上の一点を2つの変数 u, v ($0 < u, v < 1$) によって一意に決定することができ、この u, v を曲面上の座標と考えることができる。今、テクスチャがある x - y 平面上 ($0 < x, y < 1$) に定義されている場合、曲面上の u, v と

付録2 テクスチャマッピング

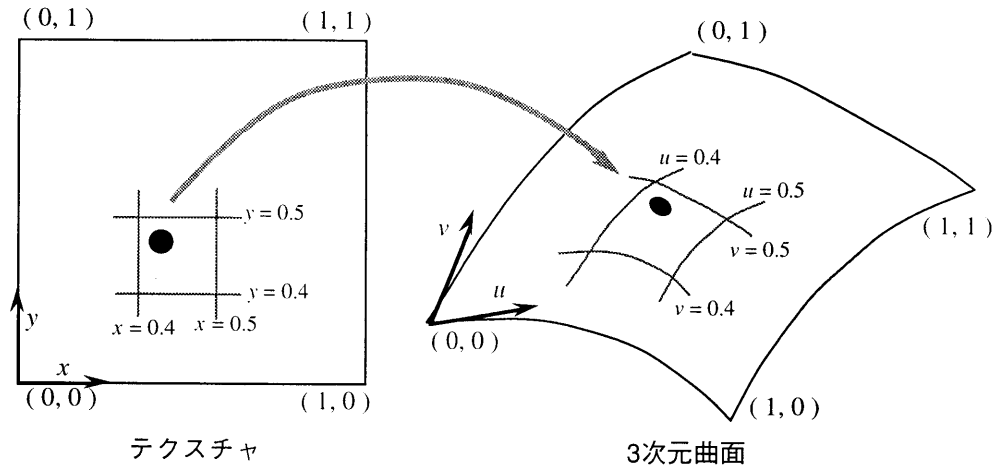


図 付 2-1 テクスチャマッピング

テクスチャ上の座標 x, y とは容易に対応づけることができる。例えば、図付 2-1 の様な場合、テクスチャ上の $0.4 < x < 0.5$, $0.4 < y < 0.5$ の正方形領域と、自由曲面上の $0.4 < u < 0.5$, $0.4 < v < 0.5$ とを対応付けることができる。張り付ける情報としては、色の情報、法線情報、反射属性 (反射モデルやそのパラメータ) などが考えられ、これらの複数を同時にマッピングすることもあり得る。対応づけの方法は $(x, y) \Leftrightarrow (u, v)$ だけでなく、 $(x/2, y/2) \Leftrightarrow (u, v)$ などの対応づけによってテクスチャの一部 (この場合は全体の 1/4 だけ) を曲面上に張り付けることもできる。

実際の描画では、 u, v の値は曲面を構成するポリゴンの頂点にあらかじめ与えられており、ポリゴン内を描画するときに線形補間によって各画素での u, v の値を算出して用いる。

付録 2-2 バンプマッピング

テクスチャマッピングは張り付ける要素によって幾つかに分けられる。まず、テクスチャとして画像を用意し、これを張り付けるカラーマッピングがある。これは、画像の色情報を物体表面に張り付けて表示するものであり、ハードウェアで対応するものもあって、普通テクスチャマッピングと言うと、このカラーマッピングを指すことが多い。また、色の情報ではなく、形の情報をマッピングするのがバンプマッピングであり、テクスチャとしては表面凹凸を表現する立体的なものとなる。この立体的テクスチャを物体表面に張り付けて物体表面の凹凸を表現する [Blinn78]。

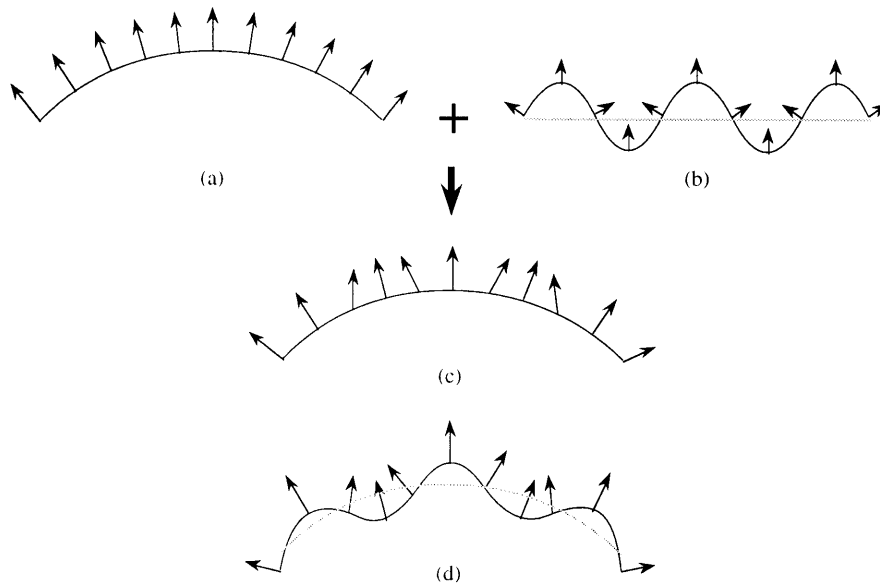


図 付 2-2 バンプマッピング

(a) 曲面形状, (b) 凹凸データ

(c) バンプマッピングによる法線の変化, (d) 曲面の見え方の変化

バンプマッピングを模式的に示すと図付 2-2 のようになる。CG におけるシェーディングにおいては、物体表面の輝度を計算する際、その面の反射特性とともにその面の法線ベクトルが重要となる。バンプマッピングでは、物体自身の持つ法線ベクトルにテクスチャの持つ法線情報を合成し、合成された新しい法線ベクトルを用いてシェーディングすることによって、その物体表面にあたかもテクスチャの凹凸があるような表現を得る。図付 2-2 (a) のような曲面に図付 2-2 (b) のような凹凸データを張り付けるとき、図付 2-2 (c) のように面の法線が処理され、あたかも図付 2-2 (d) のような面のように表示される。

この手法の長所は、物体形状と凹凸テクスチャを分離して考えることができることであり、直接物体形状に凹凸を与えるより物体形状のデザインが容易である。しかし、表示に際して、背景との境界部分では、凹凸の影響が消え、もとの物体形状が見えてしまい、不都合である。また、表面上の 3 次元的な位置が変わらないため、精密な反射モデルを導入すると不具合が生じる可能性がある。

参考文献

[Blinn78] J.F.Blinn : Simulation of Wrinkled Surfaces, Computer Graphics, Vol.12, No.3, pp.186-192, 1978

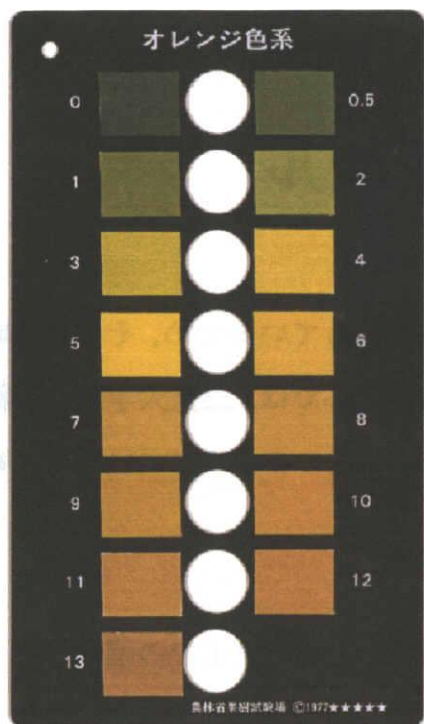
付録 3

みかんの色変化モデル

みかんの色変化は果実の熟度や酸味・甘味と深く関わっているため、その収穫時期の判断材料として農芸の分野で重要視されている。ここでは、三重大学生物資源学部の阿部らにより提案されたみかんの色とその経時変化のモデルについてまとめておく [阿部 91]。

果実の色を忠実に扱うことは簡単ではない。これは、個々の果実での個体差や色むらなどから、どのような色かを決めることが困難なためである。そこで、果実の色の基準となるものを用いて色を扱うこととし、出荷時期の判断などに用いる果実カラーチャートに注目した。果実カラーチャートは、幾つかの評価値とそれに対応する色見本からなり、果実表面上の平均色と各色見本とを比較して、その果実の成熟度合いを判断するものであり、現在、みかんをはじめニホンナシ、リンゴ、ブドウなどの果実カラーチャートが作成され、果実の成熟状態の判定や収穫時期の判断に利用されている (図 付 3-1) [山崎 80] [山崎 81]。

みかんに対して用いられる果実カラーチャートは「オレンジ色系」と呼ばれるもので、評価値 0, 0.5, 1, 2, ..., 12, 13 の値にそれぞれ色が割り当てられている。おのおのの色は **Munsell** 表色系で定義されており、その一意性が保証されている。CG で利用する場合は、これを **RGB** 表色系に変換して使用することになる。各評価値に対する **Munsell** 表色系と **RGB** 表色系での色表現を表 付 3-1 に示す [色彩ハンドブック 82]。各評価値での色座標を **RGB** 空間にプロットするとほぼ一平面上 ($B=0.2$) に並ぶ。つまり、**RGB** の **B** 成分はほとんど変化しない。この平面上でのプロット結果 (図 付 3-2) を見ると、色座標が 2 本の直線に漸近していることが分かる。一本は評価値 0~5 の点を最小二乗法で近似した直線であり、もう一本は評価値 5~13 の点を最小二乗法で近似した直線である。この 2 直線はそれぞれクロロフィルとカロチノイドの各色素の増減による色の変化直線と考えることができ、前述の色素の増

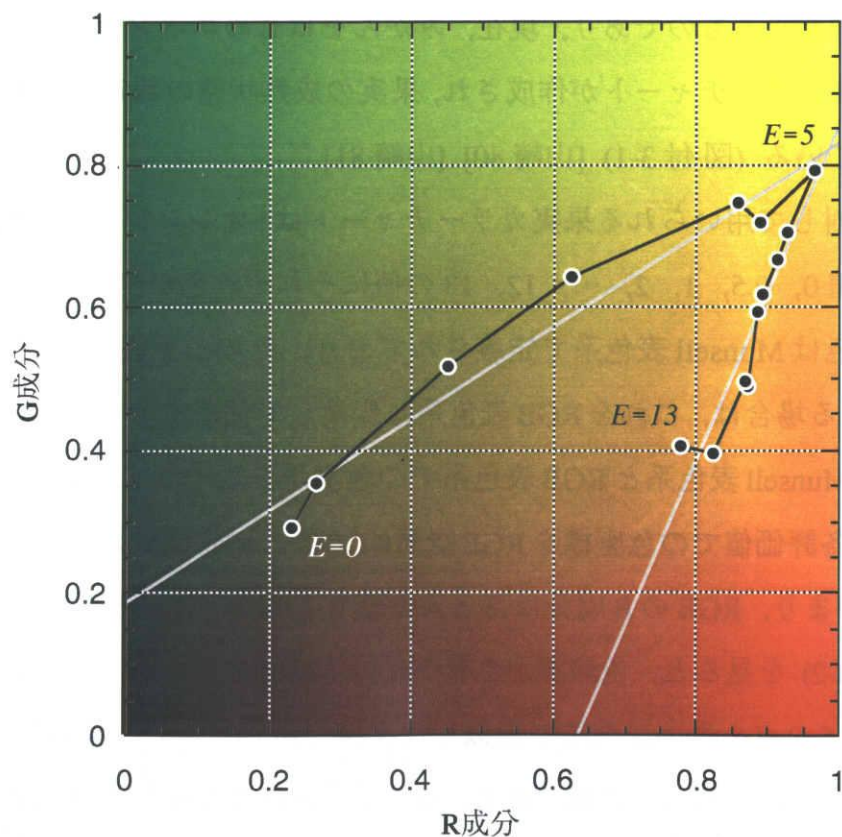


図付3-1 果実カラーチャート
(オレンジ色系)

表付3-1 果実カラーチャート（オレンジ色系）の
各評価値に対する各表色系での色座標

評価値	Munsell表色系	RGB表色系		
		R	G	B
0	6.5GY2.8/ 2.8	0.2314	0.2902	0.1882
0.5	4.7GY3.9/ 4.3	0.2667	0.3529	0.1412
1	1.4GY4.7/ 5.8	0.4510	0.5176	0.1843
2	7.4Y 6.0/ 6.9	0.6235	0.6431	0.1961
3	2.3Y 6.8/10.9	0.8588	0.7451	0.2040
4	9.9YR6.9/11.5	0.8902	0.7176	0.1686
5	9.2YR7.3/13.0	0.9647	0.7922	0.2275
6	8.2YR6.8/11.8	0.9255	0.7059	0.1765
7	6.5YR6.4/12.1	0.9137	0.6667	0.2275
8	5.8YR6.3/12.1	0.8941	0.6196	0.1725
9	4.1YR6.0/12.7	0.8863	0.5922	0.2275
10	2.6YR5.6/13.0	0.8706	0.4902	0.1569
11	1.4YR5.5/12.8	0.8667	0.4980	0.2275
12	0.5YR5.2/13.1	0.8235	0.3961	0.1608
13	9.8R 5.0/11.6	0.7765	0.4078	0.2510

注：RGB表色系の値は、カラーチャートを直接分光測色計で測定したXYZ表色系の値から算出。
分光測色計：CM-2002(ミノルタ)、光源：D65、視野：2度、測定環境：SCI(正反射光を含む)



図付3-2 近似平面へのプロット結果 (B=0.2)

減の現象と照らし合せてもその変化の過程をうまく表わしている。

みかんの果実の色の変化が色空間の一つの平面上で近似的に表現できるということは、この変化曲線を含む平面上の任意の点 P が、この近似平面上の点 $P_0 = (0.0, 0.0, 0.2)$ と線形独立な2つのベクトル x, y の線形結合として以下の式のように表わすことができることを意味する。

$$P = P_0 + \alpha x + \beta y \quad (\text{付 3.1})$$

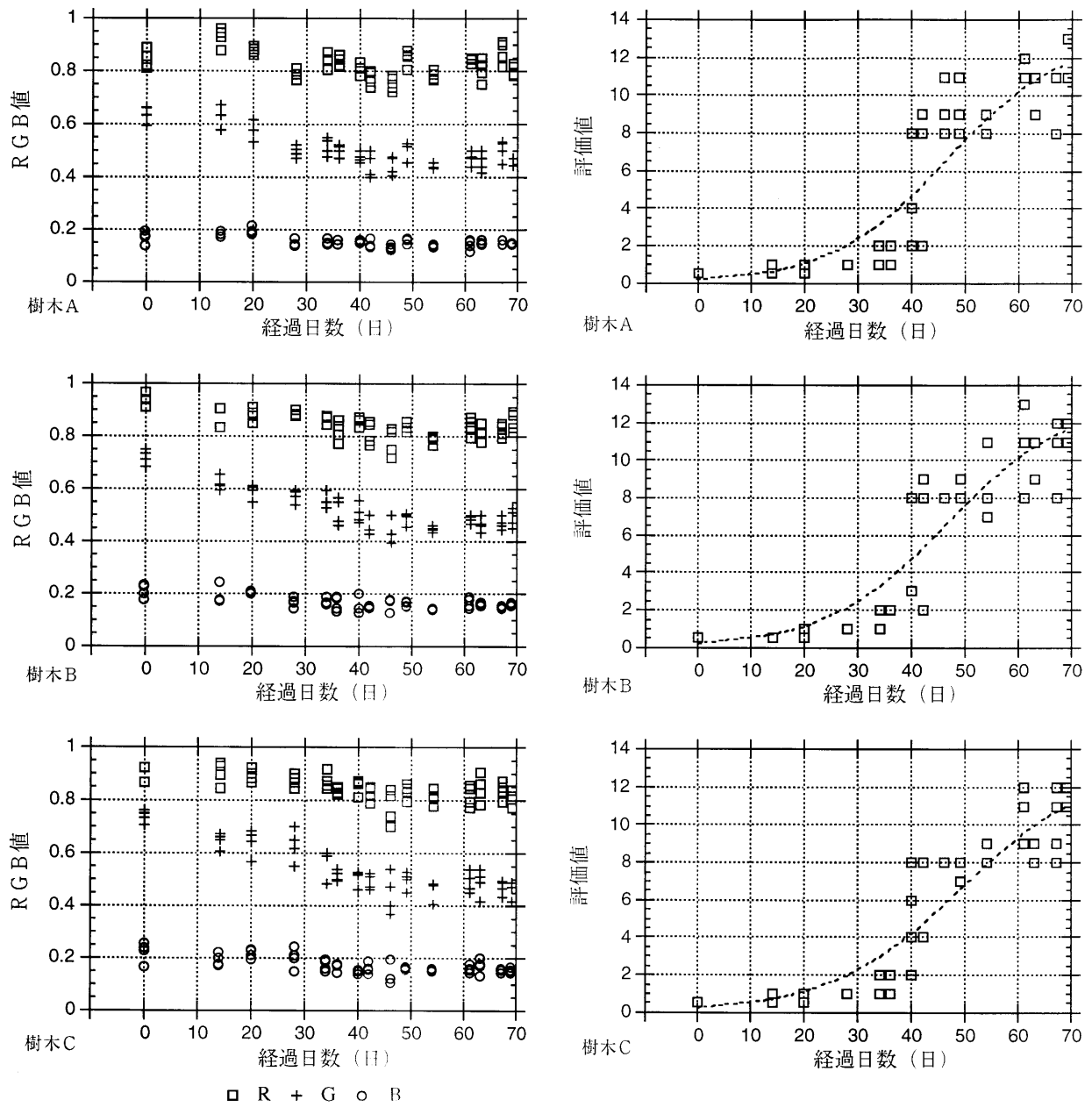
ここで、評価値0の色ベクトルを疑似色素ベクトル x が100%，評価値13の色ベクトルを疑似色素ベクトル y が100%と仮定し、この二つのベクトルの線形結合で表現した場合、 α, β の各値は評価値 E をパラメータとして、

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.11 + 0.47E - 0.093E^2 + 0.0039E^3, \\ \beta &= -0.086 + 0.24E - 0.018E^2 + 0.00049E^3 \end{aligned} \quad (\text{付 3.2})$$

と表わすことができ、これを式 (付 3.1) に代入して用いることにより各評価値における色座標が算出できる。ここで用いた疑似色素の x, y はそれぞれクロロフィルとカロチノイドとに近似的に対応すると考えられるが、実際にどちらかの色素が完全に100%であることはないため、実際の色素量の比を表わしている訳ではない。

ここで、注意が必要なのは、みかんの果実カラーチャートから得られる果実の色の変化は、実際の経過日数に比例してはおらず、評価値と経過日数は線形な関係に無いことである。このため、そのまま並べただけでは果実の経時的な色の変化を表現したことにはならない。そこで、実際の樹上果実の色の変化を測定して評価値と経過日数との関係が導かれた。

色変化の測定としては、実際の農場から3本の温州みかんの樹木 (A,B,C) を選び、日当たりによる変化を少なくするために東西南北の各方向から2ヶ月間定期的に果実をサンプリングし、果実の平均色の測定を行った。果実の平均色は、CCDカメラによる入力画像において、へたの部分を除いて残った果実表面領域の画素の色ベクトルの平均値を平均色として用いている。このようにして3本の温州みかん樹木の約70日間の果実の色変化と果実カラーチャートにおける評価値を測定した。測定結



図付3-3 実測によるRGB値および評価値の経時変化 [阿部91]

果を図付3-3に示す。樹木による相違はほとんどなく、ほぼ一般的なデータが得られていると考えられる。

この測定結果と、果実カラーチャートとを比較すると、測定値がカラーチャートの変化曲線の上にプロットされる。これより、経過日数 t と評価値 E の変化の関係を示す次式が導かれる。

$$\begin{aligned} E &= 13.1 / (1 + \exp(4.35 - 0.094t)) \\ &= 13.1 / (1 + \exp(0.094(46.3 - t))) \quad (\text{付 3.3}) \end{aligned}$$

関数の形はシグモイド関数であり、時間の経過にともなって評価値は0から13へと変化する。また、量の変化する色素がクロロフィルからカロチノイドに変わる評価値5には約40日で到達することになる。

参考文献

- [阿部91] 阿部正勝：果実の色認識に関する基礎的研究，平成3年三重大学大学院生物資源学研究科修士論文，1991
- [山崎80] 山崎利彦，鈴木勝征：果実の成熟判定のためのカラーチャート作製とその利用に関する研究（第一報）カラーチャートの色特性，果樹報告A，第7号，pp.19-44，1980
- [山崎81] 山崎利彦，鈴木勝征，村瀬昭治，宮川久義野方俊秀，水戸部満，森田彰：“果実の成熟判定のためのカラーチャート作製とその利用に関する研究（第三報）成熟と果皮色との関係”，果樹報告A，第8号，pp.85-100，1981
- [色彩ハンドブック82] 日本色彩学会（編）：色彩科学ハンドブック，東京大学出版会，1982