

修士論文

平成 16 年度 (2004)

リアルタイム 3DCG における
米国漫画調レンダリング手法

東京工科大学大学院メディア学研究科

鈴木 隼人

修士論文

平成 16 年度 (2004)

リアルタイム 3DCG における 米国漫画調レンダリング手法

指導教員 渡辺 大地 講師

東京工科大学大学院メディア学研究科

鈴木 隼人

論文の要旨

論文題目	リアルタイム3DCGにおける 米国漫画調レンダリング手法
執筆者氏名	鈴木 隼人
指導教員	渡辺 大地 講師
キーワード	NPR 米国漫画 リアルタイム3DCG
<p>米国漫画にセル画との共通点が多数ある事に着目し、セルシェーディングの技術を拡張してリアルタイム3DCGを用いて米国漫画調の画像を表示するための研究を行った。そして、その成果として米国漫画の特徴である斜線やスミベタによる陰影表現、輪郭線描画、そして光線表現やハイライトなどの特殊効果をリアルタイム3DCG上で再現する手法を完成させた。</p> <p>近年、写実的ではなく、油絵調や鉛筆画調、セル画調等の一般的に人の手によって描かれている画像を3DCGを用いて再現するノンフォトリアルスティックレンダリング(NPR = Non-Photorealistic Rendering)の研究が盛んに行われている。処理が重いためフレームベースのCGで使われることが多かったNPRであるが、近年のグラフィックスハードウェアの進歩により、PCやゲーム機上でリアルタイムに処理を行うことも可能となってきた。そして、NPRの中でも比較的簡単な技術である、セル画調の画像を表現するセルシェーディングを用いたインタラクティブコンテンツが多数発表されている。</p> <p>また、近年、米国漫画(アメリカンコミック、俗に言う「アメコミ」)を原作とした映画が多数公開されるようになり、米国漫画作品が注目を集め始めている。しかし、それらの作品を題材としたインタラクティブコンテンツを製作する際、写実的な表現にするか、従来のセルシェーディングを用いた表現にするに留まり、米国漫画らしさをうまく表現できている作品がないのが現状である。</p> <p>そこで本論文では、リアルタイム3DCG上で米国漫画調の画像を表示するための手法を提案する。</p>	

A b s t r a c t

Title	American-comic rendering for Real-time 3DCG
Author	Hayato Suzuki
Advisor	Lecturer Taichi Watanabe
Key Words	NPR American-comics real-time 3DCG

This paper proposes a new technique for rendering real-time 3D computer graphics animation with the modified cell shading technique, which can re-produce the impression of the original American comic pictures.

We have conducted a research on rendering 3D computer graphics animation that appears to be a typical American comic by using the modified cell shading technique, which creates pictures that look like celluloid pictures. The technique we have developed renders shades with hatched lines and solid fills, profile lines, and special effect such as rays and highlights.

Researches on Non-photo-realistic Rendering (NPR) techniques, which create images that appear to be hand-drawn images rather than real images using 3D computer graphics, have become popular recently. It has been difficult to render real-time animation with the NPR technique because it takes a significant computational cost. However, some of the latest graphics hardware for PCs and game consoles are fast enough for rendering real-time animation with the NPR technique. There are in fact some programs that use one of the variations of the NPR techniques called cell shading, which creates images that appear to be celluloid pictures, and such programs allow the user real-time interaction with the program.

On the other hand, American comics are drawing attentions because various movies are produced based on such comics, and many interactive contents based on such comics are made as well. However, such interactive contents typically use a realistic rendering technique or a cell-shading technique, and those techniques are not adequate for re-producing the impression of the original comic pictures.

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の目標と成果	2
1.2	研究背景	2
1.3	研究意義	4
1.4	論文構成	5
第2章	米国漫画	6
2.1	米国漫画とは	7
2.2	米国漫画の特徴	8
2.2.1	米国漫画の分業制	8
2.2.2	米国漫画の絵柄の特徴	9
2.2.3	特殊効果	15
2.2.4	その他の特徴	17
2.3	セル画調と米国漫画調の違い	17
2.3.1	セル画調と米国漫画調の表現方法の違い	18
2.3.2	各表現手法の適性	19
第3章	斜線による陰影・輪郭線のレンダリング	21
3.1	既存のセルシェーディングの手法	22
3.1.1	色の2階調化	23
3.2	輪郭線	26
3.2.1	3Dモデルを引き伸ばす手法	27
3.2.2	視線と法線の内積を利用する手法	29
3.3	斜線を用いた陰影表現	29
3.3.1	斜線とスミベタの作成	31
3.3.2	斜線テクスチャのマッピング方法	33
3.3.3	グラデーションを用いた表現	35
3.3.4	MIP-MAPの応用による斜線の太さの調整	36
3.3.5	様々な材質の表現	37
第4章	特殊効果レンダリング	38
4.1	光線表現	39

4.2	ハイライト	40
4.2.1	鏡面反射	41
4.2.2	米国漫画調ハイライト	44
第5章	評価と現状での問題点	48
5.1	実行結果	49
5.2	リアルタイム性の検証	52
5.3	評価	52
5.4	問題点	53
第6章	むすび	54
	参考文献	57

第 1 章

はじめに

1.1 研究の目標と成果

3DCG を用いてセル画調のグラフィックを再現するセルシェーディングの技術
を応用し、リアルタイム 3DCG を用いて米国漫画調のグラフィックを再現出来る
のではないかと考え、研究を行った。その成果として、3DCG を用いて米国漫画
の特徴である斜線とスミベタによる陰影表現、太さに強弱のある輪郭線、米国漫
画で頻繁に用いられる特殊効果である光線表現やハイライトをリアルタイムに再
現する手法を完成させた。米国漫画の特徴である斜線とスミベタによる陰影をリ
アルタイム 3DCG で再現したのは本研究が初である。

1.2 研究背景

以前、3DCG は、より写実的でリアルな画像を生み出す事を主眼に置いて研究
されてきた。しかし、近年では写実的でリアルな表現という点では、ある程度の
成果が得られ、実写映像と比較しても遜色のない画像を生み出せるようになって
きた。

写実的な表現がある程度達成されたことにより、それとは別の表現方法を生み
だそうという経緯や、ハードウェアの進歩により複雑な処理が出来るようになって
たという事から、写実的ではない、油絵調や鉛筆画調、セル画調等の一般的に人の
手によって描かれている画像を 3DCG を用いて再現しようと言う「ノンフォトリ
アリスティックレンダリング (NPR = Non-Photorealistic Rendering)」という技術
の研究が盛んに行われるようになってきている [1][2][3][4]。3DCG を用いるため、
油絵調や鉛筆画調の画像を、あらゆる角度から見られるようになる事や、一度モ
デルを作ってしまう後はコンピュータで自動的に描画できる等、様々なメリット
があるため、芸術分野、ゲームやアニメといったエンターテインメントの分野で
も需要がある。

その中でも近年、作画作業の簡略化や制作コストの削減、滑らかな動きのアニ
メーションを制作するために 3DCG を用いてセル画調のグラフィックを再現する

「セルシェーディング」又は「トゥーンシェーディング」と言う技術が実際に使用される事が多くなっている。この技術は、普通の3DCGでは実写画像のように滑らかな陰影になるようにシェーディングするところを、陰影をセル画のように2～3階調の色の違いで表現するようにシェーディングし、輪郭や素材の境目などに黒い縁取りをして、セル画の絵のように表現する技術である。最近では、ハードウェアの進歩により、リアルタイムでセルシェーディング処理が可能になり、リアルタイムに使用する事を目的とした研究 [5][6] も行われるようになってきた。この様な研究の成果として、セルシェーディングの技術はゲームなどにも用いられるようになってきた。セルシェーディングを用いたゲームの代表的な物に、任天堂の「ゼルダの伝説 風のタクト」や、セガの「ジェットセットラジオ」などがある。これらのゲームでは、プレイヤーの操作によってリアルタイムで動かすことができる3DCGをセルシェーディング処理することにより、あたかもアニメのキャラクターを自分で動かしているように感じる事が出来る。

今まで、3DCGを用いて作られたマンガやアニメのキャラクターを使ったゲームは、デフォルメされたキャラクターにリアルな質感のシェーディングを施した結果、フィギュアのような見た目になってしまい、違和感を覚えることがあった。しかし、このセルシェーディングという技術をゲームに用いたことにより、実際は3DCGであっても見た目はセル画調で表す事が出来るため、この様な違和感が出る事が無くなりゲームとしての表現の幅も広がった。セルシェーディングは、色を単純化し輪郭線を強調するため、物体の見た目の特徴を掴みやすいという点から、工業製品のテクニカルイラスト [7] などの分野でも使用する事がある。この際、陰影の色の階調を無くして、素材の色単色で塗りつぶすことが多い。タイトーのゲーム「ラクガキ王国」では、陰影処理にはセルシェーディングを用いながら、輪郭線を鉛筆画調に加工することにより、手書きのイメージを出すことに成功している [8]。この様に、基本的にはセル画調の絵を表現する技術ではあるが、応用次第で他にも様々な使い道が考えられる。

一方で、「X-MEN」や「スパイダーマン」と言った作品の映画化で、日本でも米

国漫画が注目され始めている。迫力のあるアクションシーンや、全編フルカラーで描かれているなど、日本の漫画とは違う独特の雰囲気を持っている点も人気の理由となっている。

また、リキテンシュタインやアンディー・ウォーホルの確立したポップアートカルチャー [9][10] や、アメリカから流入してきたストリートアートなどの影響からか、米国漫画調の絵はTシャツや看板などで街中でも頻繁に見かけるようになってきた。

1.3 研究意義

前述のように、現在セルシェーディング・米国漫画がそれぞれ注目を集めている。そして、実際に米国漫画作品を基にしたゲーム等のインタラクティブコンテンツが多数登場してきているが、現在、それらのコンテンツは

- 写実的なシェーディングで表現
- セルシェーディングで表現
- 基本的にセルシェーディングで表現し、陰影をスミベタで表現

の大きく分けて3つの表現が使用されている。現時点で、米国漫画調のグラフィックを再現するための手法は確立されていないのである。

米国漫画とセル画調の絵では様々な相違点があるが、色が単純化されている点や、輪郭線が描かれている点など、共通点も多く存在する。本論文では、この点に着目し、セルシェーディングの技術を応用し、米国漫画調のグラフィックを表現する手法を開発することを目的とした。

この手法を開発することにより、米国漫画作品を基にしたインタラクティブコンテンツを作成する際、より米国漫画らしい表現が可能になる他、米国漫画を基にしない作品でもこの手法を用いることにより、米国漫画のような力強く迫力のある表現が可能となる。

1.4 論文構成

本論文では、以下第2章で本論文で扱う米国漫画調とは何か、そしてセルシェーディングを応用して米国漫画調を再現するためにセル画調と米国漫画調の違いについて記し、それぞれの表現手法の向き不向きについて述べる。第4章では、米国漫画の基本となる輪郭線描画と斜線やスミベタによる陰影表現の手法について述べ、第5章では光線表現やハイライトなどの特殊効果の実装方法について述べる。第6章では本手法の評価と現状での問題点を示し、今後の発展を述べる。

第 2 章

米国漫画

2.1 米国漫画とは

本論文で扱う米国漫画調を明確に定義づけるために米国漫画の歴史を簡単に説明する。米国漫画の歴史をさかのぼると100年以上前の作品に辿り着く。1896年、アメリカのニューヨーク・ワールドという新聞紙で「Yellow Kid」という漫画が掲載された。これが米国漫画の起源といわれている。1938年、「スーパーマン」が誕生し、現在、米国漫画で主流となっているスーパーヒーロー物という概念が生まれた。この1938年から1945年までは米国漫画のゴールデンエイジと呼んでいる。その後、米国漫画は一次衰退し、1956年から1969年に再び訪れた黄金時代をシルバーエイジ、そして現代をモダンエイジと呼んでいる [11][12]。

ゴールデンエイジの頃の米国漫画は1ページに同じ大きさの長方形の12コマという、きっちりとしていて新聞連載漫画の様なコマ割りで描いていた。迫力のあるアクションシーンであっても、この小さいコマに描いていたため、こぢんまりとした感がぬぐえなかった。シルバーエイジの頃の作品になると、基本的には1ページあたり12コマではあるが、アクションシーンになると大きなコマを使うなど、変化が見られる。そして現代のモダンエイジの作品では、日本の漫画に影響を受けたアーティストが作品を手がけるようになり、1ページ基本は4~5コマ、大きなコマや見開きのコマなど、自由なコマ割りとなっていて、より迫力のある絵となってきた。

スーパーマンの誕生以降、米国漫画には「バットマン」「キャプテンアメリカ」「スパイダーマン」「X-MEN」「SPAWN」等といったスーパーヒーローが沢山誕生してきた。現在でもこのようなスーパーヒーロー物以外の作品も残ってはいるものの、一般的に米国漫画というとスーパーヒーローの活躍の話というイメージが強くなってきている。

今回、米国漫画調レンダリングの研究をするに当たって意識したのもこのスーパーヒーロー物の米国漫画である。年代による画調の違いなども考慮し、本論文で言う米国漫画調とはシルバーエイジ以降のスーパーヒーロー作品のような画調

を指すことにする。

2.2 米国漫画の特徴

2.2.1 米国漫画の分業制

まず米国漫画の絵柄にも関わってくる点でもあり、米国漫画の最大の特徴といえるのが分業制である。日本の漫画は基本的に漫画家がストーリーを考え、漫画家が絵を描くという風に、アシスタントなどが手がける部分もあるが基本的には漫画家一人で作品を制作している。それに対し、米国漫画は日本の漫画とは違い、漫画家が自分でストーリーを考え、自分で漫画を描くという形式ではなく、シナリオ・下書き・ペン入れ・色塗り等を別の人が行う、分業制が取られていることが多い[13]。一般的な分業構成は以下のとおりである。

- エディター：日本で言う編集者。
- ライター：シナリオを書く人。
- ペンシラー：作画担当。ペンシラーという名前が示すとおり、鉛筆での下書きをする。作品の絵柄はこのペンシラーに因るところが大きい。
- インカー：ペンシラーの描いた下絵にペン入れをする人。
- カラリスト：色塗り担当。ペン入れの終わった原稿に色を塗っていく。基本的には手塗りだが、最近ではデジタル彩色も多くなってきている。
- レタラー：吹き出しの中の文字を書く人。米国漫画は日本の漫画と違い吹き出しの文字も手書きである。ただ、最近ではこの作業もデジタル化が進み、手書き風のフォントをコンピュータを使い打ち込むという形になりつつある。

基本的にはこの様な分業制となっている。しかし中には日本の漫画家のように作画からペン入れまで一人でこなす場合もあり、そのような作家はアーティストと呼ばれることもある。また、著作権は基本的に出版社が所有しているので、同じ作品でも話によって描く人が変わると言うことが多々ある。このような業界、業種のシステム上、米国漫画作品の絵は非常に似た絵柄で固まっており、日本の漫画ほど作品ごとの絵柄の差は無い。そのため、本論文でも米国漫画調という風に、

全てを一括りでまとめることが可能であると言える。

2.2.2 米国漫画の絵柄の特徴

米国漫画の絵柄の特徴を大きくまとめると

- 色は基本的に単色で塗りつぶしている
- 陰影を斜線やスミベタで表現している
- 太く、強弱のある輪郭線を描画している

という3点が挙げられる。それら3点について詳しく検証する。

単色による塗りつぶし



図 2.1: 単色塗り



図 2.2: グラデーション

まず始めに色については、前述のとおり基本的に一色で塗られている。これは、色による陰影の表現はしていないという事である。実際に単色で塗られている物が図 2.1だが、青い部分は青 1 色、赤い部分は赤 1 色で塗りつぶされているのが分

かる。これは作業の単純化によるコストの削減のためにこの様な形式になったと言う事である。人気作品などの資金を掛けられる作品の場合は色による陰影の処理をする物も以前からあった。

前述の分業化の説明の中で、「最近ではデジタル彩色も多くなってきている」と書いたが、このデジタル彩色の影響で、米国漫画の色についても多少事情が変わってきている。実際にデジタル彩色を用いた図 2.2を見ると光が当たっている部分は黄色くなっており、筋肉などの影になっている部分は濃い色でグラデーションになっているのが見て取れる。デジタル彩色にを導入した事により、この様な色の表現も容易に出来るようになったため、モダンエイジと呼ばれる最近の作品では、この様に一色で塗りつぶしという形ではなく、明るいところは明るい色で、暗いところは暗い色でと言った、色による陰影の表現をする作品も増えてきている。色による陰影の表現は、表現の幅を広げる事に大いに役立つのだが、カラリストによっては、無闇に沢山の色を使ってしまい、多少うるさい印象を与える絵になってしまう事もある。

本論文では、1色による塗りつぶし、グラデーションをかけた塗りつぶしの両方の表現を再現する。

斜線・スミベタによる陰影表現

次に、斜線やスミベタによる陰影の表現である。米国漫画を表現するために一番重要となってくるのがこの部分である。



(a) 線画



(b) スミベタ



(c) 斜線



(d) スミベタ+斜線

図 2.3: 斜線・スミベタによる陰影表現

陰影の表現をせず、線画のみで描画した物が図 2.3(a)である。それに対し、スミベタによる陰影処理を施した物が図 2.3(b)である。陰影処理をしていない物に比べて立体感が出ていると共に力強さや迫力などが感じて取れる。次に、斜線による陰影処理を施した物が図 2.3(c)である。これも陰影処理をしていない物と比べると立体感が出ているし、スミベタによる陰影処理の物と比べると力強さや迫力といった面では劣る物の、人間の柔らかさがうまく表現できている。図 2.3(d)はスミベタと斜線両方を用いての陰影処理を施した物である。2つの処理を取り入れる事によって、有機物である人間の柔らかさを表現すると共に、筋肉の堅さや力強さ、迫力も表現することに成功している [14]

。この様に、スミベタと斜線による陰影処理を行う事によって米国漫画らしさを出すと共に、立体感や力強さなどを強調できる。

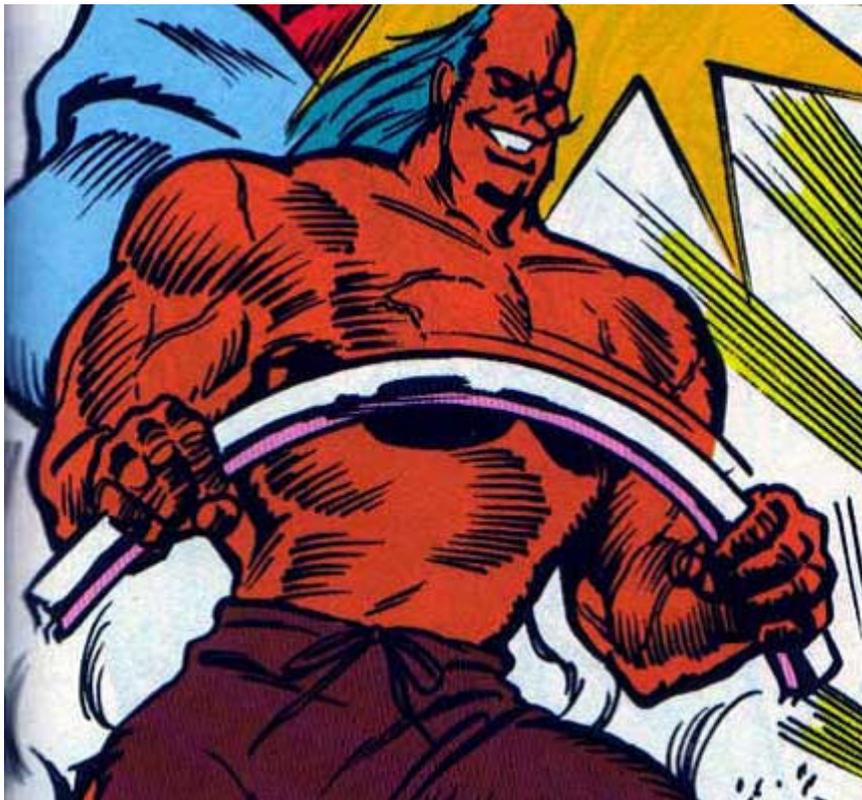


図 2.4: 金属の表現

スミベタと斜線という米国漫画において併用している2つの技法だが、描く物体によって使用方法に違いがある。図2.4はキャラクターと金属を描いた物であるが、キャラクターの肉体部分には斜線をふんだんに使用し、キャラクターが持っている鉄パイプはスミベタだけが使われている。この様に、スミベタと斜線は併用してはいるものの、

スミベタ： 金属などの無機質で硬い物に多く使用する

斜線： 人間の肉体や、服など、柔らかい物に多く使用する

といった風に、描く物体によってどちらがより効果的かを考え、使い分けている。ただ、完全に金属にはスミベタ、肉体には斜線と決めつけているのではなく、金属でも斜線を使った方が効果的な場面では斜線を使用する場合もあり、肉体でも陰を強調して迫力を出すといった目的から陰の暗い部分にはスミベタを使う場合も多い。また、米国漫画では斜線やスミベタを用いた陰影表現が基本となるが、それ以外にも網目状の斜線（クロスハッチング）や点描などを使用する事もある。



図 2.5: 人体構造に基づいた斜線

斜線による陰影の表現で一番重要となるのが、斜線の引かれる方向である。図 2.5は実際に斜線を用いて人体の陰影を表現した物であるが、この図を見てみると、陰の暗い方から明るい方に向けて斜線を引いているのが分かる。しかし、単純に暗い側の辺から垂直に斜線を引いているわけではない。人間の筋肉の構造や流れに沿ってバランスの良い角度に斜線を引いているのである。

しかし、斜線の向きを決定するのは必ずしも人体の構造だけというわけではない。脚の部分は足のつけ根の方向に、腕の部分は腕の先の方向に向けて線が傾いている傾向にある。また、胸や腹部などは身体の中心線に向けて引いている事が多い。多数の米国漫画の絵を見た結果、この様な向きで斜線を引いている事が多かったが、これは実際には人体の構造を考慮した結果であることが伺える。プログラマ的に自動で斜線の向きを決定する場合、人体の構造を考えるより、この統計

的な物から得られた斜線の向きを考慮する方が容易に表現できる。もちろん光源の位置によって陰の部分も変わるため、その影響で斜線の向きが変わる事もある。

輪郭線

最後に輪郭線が太いという点であるが、線を太くする事によって絵に力強さができる。また、ただ太いだけではなく、線の太さに強弱を付ける事によりメリハリが生まれている。陰となる部分は他の部分より更に太く見えるが、これはスミベタによる陰の表現と重なるためである。

近年、日本の漫画に影響を受けたモダンエイジの作品では輪郭線が細い物も多く見られるようになってきた。本論文では、そのような細い輪郭線にも対応する手法を採用する。

前述の単色塗り・斜線やスミベタによる陰影表現・輪郭線表現を再現できれば、一般的なイメージの米国漫画調の画像を再現することが出来る。

2.2.3 特殊効果

米国漫画作品のほとんどがSF要素を含みアクションシーンの多い作品である。そのため、米国漫画作品では

- レーザービームなどの光の表現
- 金属などの光沢を表現するハイライト

の2点の特殊効果が使われることが多い。これらの特殊効果を利用することで、より米国漫画らしい表現が可能になることから、この3点の特殊効果も研究の対象とした。

光の表現

前述の通り、米国漫画はスーパーヒーロー作品が大部分を占めている。そして、スーパーヒーローには決まって必殺技があり、その中でも武器や身体から出すレーザービームのような光線系の攻撃を多く見る事が出来る。また、悪役などが持つマシンガンなどの武器を打つ際、銃口の周りをフラッシュさせる手法も頻繁に用いる事がある。そして、それらの攻撃が当たったときに大きな爆発が起こり、さらに大きい光を描く。また、アクションシーンの迫力を増すために、キックやパンチなどの打撃がヒットしたときにその箇所が光るという効果を使う事もしばしばあり、近未来的な乗り物の移動の際に後を引くように光線を描く等の使い方をする事もある。

光の色の表現方法としては、全体を同じ色で塗りつぶしている物、内側の色が薄く外側の色が濃くなっている物、また反対に内側が濃く外側が薄い物など、その場の状況により様々な表現を使用する。光と光を放つ物体の表現も、物体に光が重なっている部分は物体を描画しない、光の上に物体を普通に描画する、光と重なっている物体の輪郭線のみを描画する等、やはり様々な表現を使用している。

ハイライト

SF 要素の強い作品が多い米国漫画では、金属などの光沢のある素材で作られた装備品や乗り物・建造物が頻繁に登場する。そうした光沢のある物体を表現する際に重要となるのがハイライトである。ハイライトとは金属やプラスチック等の光沢のある素材の表面にライト(照明)が当たったときに表面が輝いて見える部分の事である。

米国漫画で描かれるハイライトは大きく分けて3種類ある。1つは実際に光を当てて出来るようなハイライト、次に逆光の写真のように輪郭にそって明るくなっているハイライト、そして光源などはあまり意識しないで光沢感を出すために描いている直線的なハイライトである。

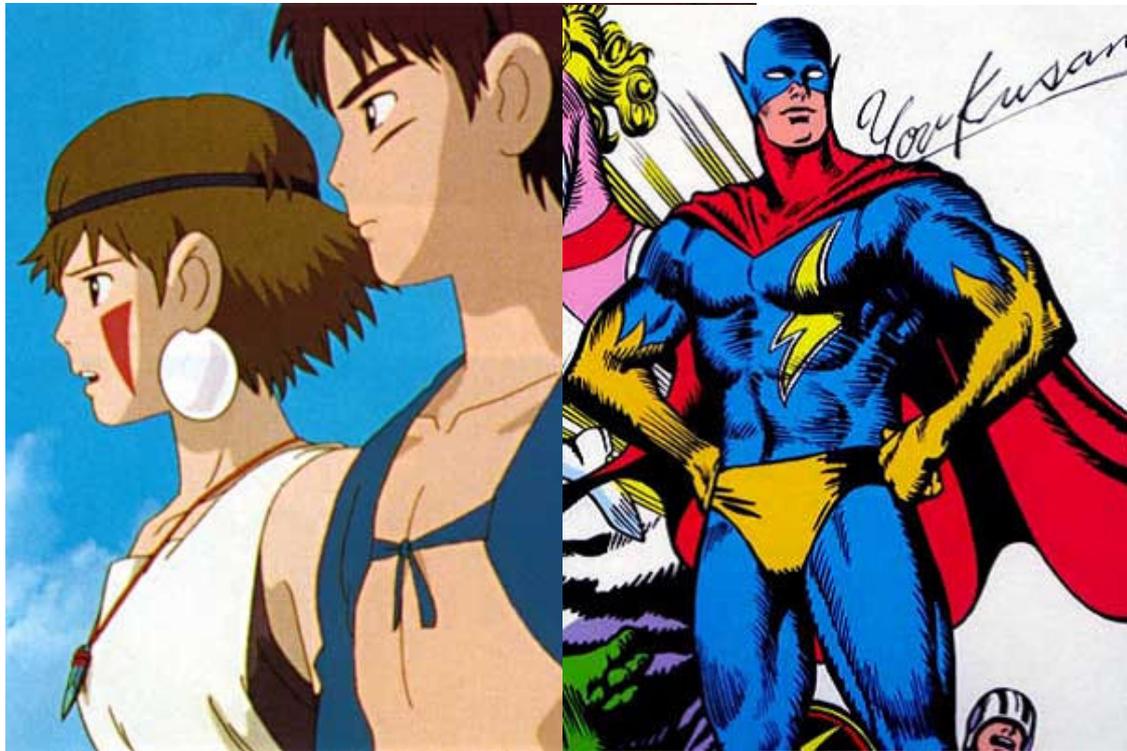
2.2.4 その他の特徴

米国漫画の特徴として、他に重要となる点がいくつかあるので解説する。一つは、登場キャラクターは皆、筋肉が発達していて逆三角形の体格をしているという点である。しかし、これは3Dモデルをモデリングする段階で解決できる事であり、今回の研究の中で特に気にしなくても良い点でもある。また、米国漫画では擬音のタイポグラフィを画面いっぱい描くという手法を頻繁に使用する。この表現も米国漫画には欠かせない物であるが、これも今回の米国漫画調レンダリングという研究と直接関わるものではない。しかし、キャラクターのモデリングの際、逆三角形の体格になるように心がけ、又、特殊効果として擬音のタイポグラフィを画面に表示するなどすれば、より本物の米国漫画のようになるだろう。

2.3 セル画調と米国漫画調の違い

セルシェーディングを応用して米国漫画調のレンダリングをするには、まずセル画調の絵と米国漫画調の絵柄の違いを理解する必要がある。そこで、それぞれの特徴を調査・比較する。

2.3.1 セル画調と米国漫画調の表現方法の違い



(a) セル画

(b) 米国漫画

図 2.6: セル画と米国漫画の比較

セルシェーディング処理で重要になるのは、陰影の表現と輪郭線である。まず図 2.6(a)はセル画調の絵 [15] であるが、陰影を基本色と陰の部分の色の 2 階調またはハイライトを含めた 3 階調で表現していて、輪郭線は比較的細くなっている。図 2.6(b)は米国漫画調の絵 [16] であるが、色はセル画調のように陰の部分やハイライトの部分が違う色になっている場合もあるが、基本的に 1 色でベタ塗りしていて色による陰影の処理は行っておらず、陰の部分は斜線やスミベタで表現しており、輪郭線はセル画調の絵に比べると太くなっている。この比較により、セルシェーディングを応用し米国漫画調の絵を再現するためには、大きく分けて 3 つ

1. 基本色と陰の色などを分けずに 1 色で塗りつぶす様にする

2. 陰影を斜線やスミベタを用いて表現するようにする
3. 輪郭線を太くする

という事が必要になることがわかる。

2.3.2 各表現手法の適性

セル画調と米国漫画調の表現手法の適性を比較すると、表情の表現と動きの表現に与える効果の違いを見ることが出来る。セル画調はデフォルメされたキャラクターを表情豊かに表現することに適しているが、力強さやスピード感を表現することには効果はなく、米国漫画調はリアルな頭身で細かく描き込まれたキャラクターを全身の動きを用いて力強くスピーディーに表現するといった用途に適しているが、その反面、顔の表情を表現することには向いていない。この根拠として次のような点が挙げられる。

セル画調は陰影を2～3の色だけで表現するため平面的に見え、筋肉などの細かい描き込みには向いていないが、余計な線が少ないためデフォルメされたキャラクターを表現する事には向いている。そのためデフォルメされたキャラクターの表情を表現しやすい。

米国漫画調は陰影の強さによって様々な斜線やスミベタを用い輪郭線に強弱がついているため、細かい描き込みにより立体感も得られ、筋肉などの隆起を強調することができ、リアルなキャラクターを用いて力強い動きやスピード感を出すことに向いている。反面、斜線を沢山用いるために簡潔にデフォルメされたキャラクターを描くには線などの情報量が多すぎ、あまり向いているとは言い難い。リアルなキャラクターにはリアルなモーションが合っているのだが、米国漫画調はセル画よりもリアルな描き込みが出来るとは言っても写実的ではないので多少誇張したモーションで動かしてもそれほど違和感を覚えることがないため、力強くスピード感のあるモーションを用いることができる。

このような理由により、セル画調はキャラクターの顔を表情豊かに表現することに効果があり、米国漫画調はキャラクターの動きを力強くスピーディーに見せることに効果があるといえる。

第 3 章

斜線による陰影・輪郭線のレンダリ ング

現時点で斜線とスミベタによる陰影表現という、米国漫画の一番の特徴を 3DCG 上で再現するための手法は確立されていない。本章では、本研究で独自に開発した米国漫画調の陰影表現と、米国漫画調レンダリングを行うために採用した既存の輪郭線描画の手法について解説する。

3.1 既存のセルシェーディングの手法

本論文で提案する米国漫画調レンダリングは、セルシェーディングの技術を応用し実現する。そこで、まずセルシェーディングについて説明する。セルシェーディングとは 3DCG をセル画調にレンダリングする技術であり、当初は手描きでは困難な、物体の回転や視点の移動を伴った滑らかに動くセル画調のアニメーションを 3DCG を用いて容易に作成すること、及び、3DCG を利用する事により、絵を毎コマ描かずに済ませるといった風に、作画作業の手間を省くといった目的から開発された手法である。

以前では、通常のレンダリングに比べ計算に時間が掛かる事もあり、上記のようなフレームベースのプリレンダリング CG の分野で用いられる事が多かったセルシェーディングであるが、近年のグラフィックスハードウェアの進化によりリアルタイムに処理する事も十分に可能となり、ゲーム等のリアルタイムベースの 3DCG 分野でも使用される機会が増加した。

セルシェーディングでは主に

- 色の階調をセル画のように 2 色程度にする
- 輪郭や素材の境界に線を引く

という 2 つの処理を行う事により、セル画調のグラフィックを再現している。

3.1.1 色の2階調化

まずは、セル画調の最大の特徴となる明るい色と暗い色で塗りつぶされた陰影表現について説明する。一般的に、3DCGの陰影づけにおいて、平行光源による物体の明度を計算するためには「Lambertの余弦則[17]」が使用される。この手法はモデルの任意の頂点の法線ベクトルと平行光源の逆ベクトルを用いて任意の点の明度を計算する手法である。

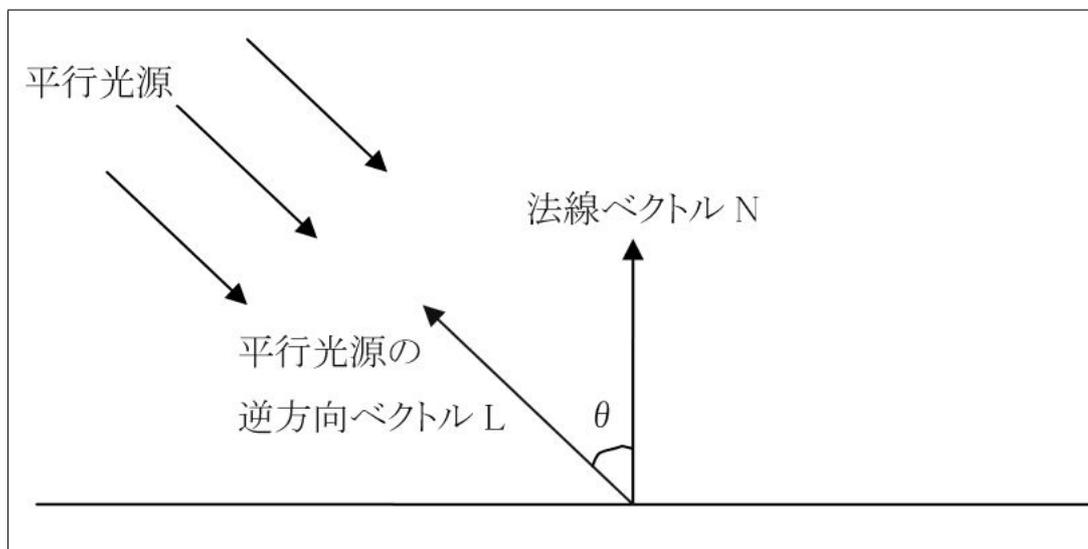


図 3.1: Lambert の余弦則

図 3.1は光が物体に当たる様子を描いた物だが、任意の点の法線ベクトルを N 、物体から光源への向き (ライトベクトル) を L 、ライトの入射角を θ 、ライトの強さを I_p とし、その物体の拡散反射係数 k_d を $0.0 \sim 1.0$ の間の値で適当に決めるとき、表面の輝度 I_d は

$$I_d = k_d \cdot I_p \cdot \cos \theta \quad (3.1)$$

上記の式 (3.1) で求められる。 $\cos \theta$ は単位法線 N と、平行光源の逆方向ベクトル L の内積 ($L \cdot N$) で求まるので

$$I_d = k_d \cdot I_p \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) \quad (3.2)$$

上記の式 (3.2) と置き換えられる。この様に、平行光源下での物体の任意の頂点の明るさは、頂点の法線ベクトルと平行光源の方向ベクトルから求める事が出来るのである。内積は2つのベクトルの向きが重なった時に最大となり、正反対の方向を向いた時に最小の値となる。つまり、この式は平行光源の向きに対して正面を向いている面は明るくなり、反対を向いている面は暗くなるという事を表している。

一次元テクスチャを用いた2階調表現

Lambertの余弦則は本来写実的な陰影を計算するための手法であるため、この式を用いてモデルの明度を計算した場合、滑らかなグラデーションのかかった陰影となる。この滑らかな陰影を、明るい部分と暗い部分との2値に分ける事により、セル画調の色調表現を再現する事ができる。この明るい部分と暗い部分をどのようにして分けるかと言う点がセルシェーディングにおいて重要となってくるわけだが、リアルタイムで処理する場合、一般的に輝度の情報を持たせた一次元テクスチャを使用する方法をとっている。



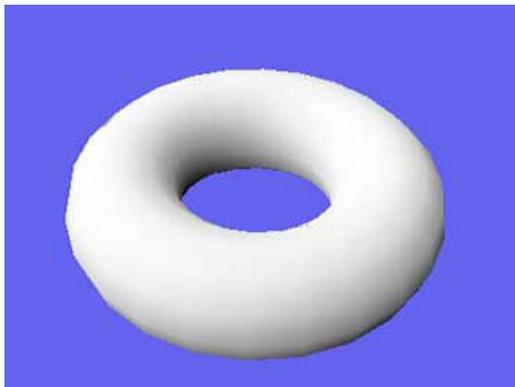
図 3.2: 輝度情報のテクスチャ

図 3.2が輝度の情報を持たせた一次元テクスチャである。これを用いてセルシェー

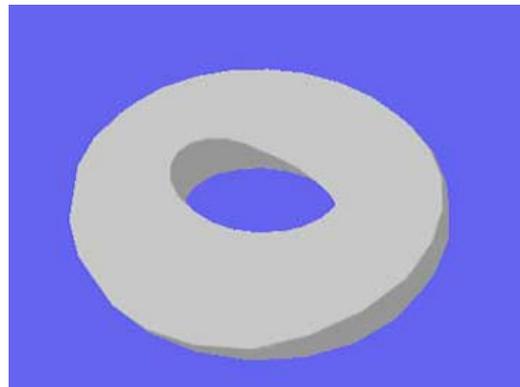
ディングの色調表現を行うには、

1. 式 (3.2) を使いセルシェーディングを行うモデルの各頂点の輝度を求める。
尚、この際、拡散反射係数 k_d と光の強さ I_p は任意の定数なので 1 と置くことで計算する必要がなくなる。結果、輝度は頂点の法線ベクトルとライトベクトルの内積で表せる。
2. 求められた輝度は内積であるため -1.0 ~ 1.0 の範囲で表される。
この数値に 1.0 を加え、2 で割る事によって 0.0 ~ 1.0 の値に変換する。
この値を頂点のテクスチャ座標の x 成分に対応させる。
3. このテクスチャ座標を元に一次元テクスチャを貼り付ける。

という処理をする。この処理により、一次元テクスチャのもつ輝度の情報が任意のモデルに割り当てられる事になる。図 3.2 のテクスチャは輝度が 2 階調になっているため、セル画のような色調表現が出来る。



(a) Lambert の余弦則を用いた画像



(b) 一次元テクスチャを用いた画像

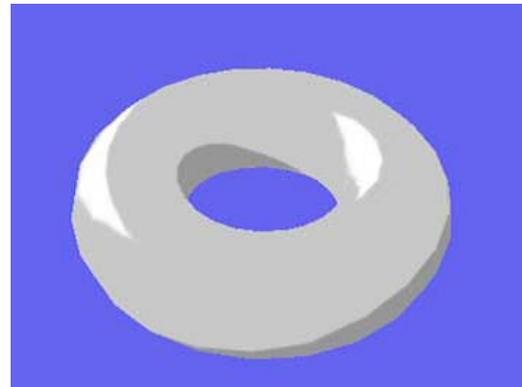
図 3.3: セルシェーディング

図 3.3(a) は「Lambert の余弦則」を用いて輝度を求めレンダリングした物であるが、陰影が滑らかで、立体感のある画像となっている。そして、図 3.3(b) は図 3.2 の

一次元テクスチャを用いてレンダリングした物だが、陰になっている部分とそうでない部分の色が明確に分かれていて、セル画のような表現になっている。



(a) 3 階調の
テクスチャ



(b) 3 階調の陰影

図 3.4: 3 階調のセルシェーディング

一次元テクスチャで輝度を表現するため、輝度が 3 階調になっているテクスチャを使用する事により、基本色と陰の色に明るい部分の色を加えた 3 階調のセル画表現なども簡単に行う事が出来るのが、この方法の特徴である。図 3.4(a)は 3 階調に色を分けた一次元テクスチャであり、図 3.4(b)が実際にこの一次元テクスチャを用いて 3 階調のセル画表現をしたものである。

3.2 輪郭線

米国漫画の特徴である輪郭線を 3DCG で再現するための手法について説明する。基本的には太くて太さに強弱のある輪郭線を用いている米国漫画だが、近年のモダンエイジ作品の中にはデジタル化や日本のマンガの影響で細く、太さが均一な輪郭線を用いる事もある。そのため、輪郭線描画の手法もいくつか採用した。

3.2.1 3Dモデルを引き伸ばす手法

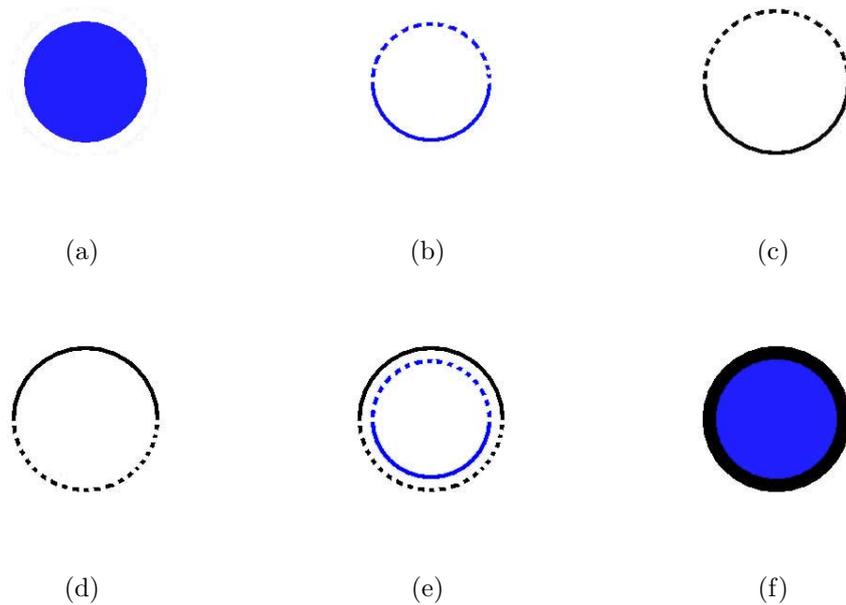


図 3.5: モデルを引き延ばす輪郭描画手法

まず、3Dモデルを頂点の法線方向に引き延ばし、元のモデルと重ねる事によって輪郭線を描画する方法 [18] について解説する。球体のモデルを用いて説明する。図 3.5(a)は球体モデルを正面から見た物である。これを視点上空から見下ろし、球を断面図にした物が図 3.5(b)である。図 3.5(b) ~ 3.5(e)において、視点は図の下側にある物とし、実線部は視点から見て表示されている面、点線部は表示されない面を表す。輪郭線を描く処理の行程は

1. 元のモデルを頂点の法線方向に拡大し、面の色を黒くする。
2. 拡大したモデルの面の表裏を反転させる。この処理によってモデルの視点から見て手前の面は表示されず、奥の面が表示される。
3. 拡大し、表裏を反転させたモデルに、元々のモデルを重ね合わせる。

である。図 3.5(c) ~ 3.5(e)はこの処理を図示した物であり、図 3.5(c)は拡大し面を黒くした図、図 3.5(d)は面の表裏を反転させた図、図 3.5(e)は元々のモデルを重ね合わせた図となっている。この様な処理をした結果、処理後の図 3.5(e)のように、拡大したモデルは元モデルより大きくなってはみ出した部分だけが表示される事となる。図 3.5(f)が実際に視点から見た図であり、しっかりと球体モデルの輪郭に輪郭線を引いたように見える。

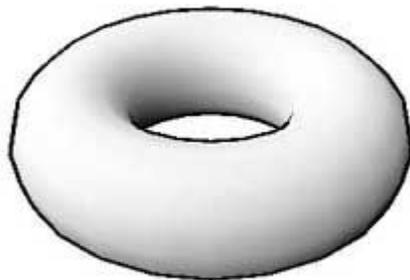


図 3.6: モデルを引き延ばした輪郭描画

図 3.6が実際にこの方法を用いて輪郭線を引いた物である。簡単な処理にしては十分な輪郭線が引けているのが分かる。この方法を用いると、表示するモデルと輪郭線のために拡大したモデルが必要となるため、表示ポリゴン数が倍になってしまうという問題があるが、比較的単純な処理のため、そこまで描画速度のロスにはならない。この方法の特徴として、均一な太さの輪郭線を描画出来るという点があげられる。そのため、近年の細く一定の太さの輪郭線を用いるモダンエイジ作品を再現する際に有効である。

3.2.2 視線と法線の内積を利用する手法

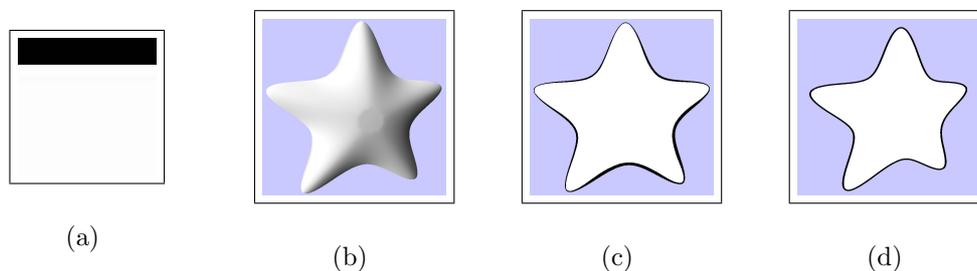


図 3.7: 視点と法線の向きで輪郭線を描画する手法

次に、視点に対して横を向いている面を黒く塗り輪郭線とする手法 [19] を解説する。手順は、視線と頂点法線の内積を取り、視点に対する法線の向きを計算し、その値に対応させた一次元テクスチャを張ることによって輪郭線を描画する。この手法は、輪郭線の太さが一定に保てないといった理由から、現在ではあまりセルシェーディングに用いられにくい手法であるが、米国漫画調を再現する際、逆にこの輪郭線の太さの強弱が利点となる。図 3.7(a)が実際にこの手法で用いる一次元テクスチャである。図 3.7(b)は普通にモデルをレンダリングした物、図 3.7(c)が実際にこの手法を用いて輪郭線を描画した物、図 3.7(d)が 3D モデルを引き延ばす手法を用いた物である。図 3.7(c)と図 3.7(d)を見比べると、この手法を用いる事によって線の強弱が上手く再現できている事が分かる。この手法は太く輪郭線に強弱のある、一般的な米国漫画を再現する際に有用である。

3.3 斜線を用いた陰影表現

セルシェーディングの手法を用いて、ある程度米国漫画のような画像を表現する事が出来る。



(a) 一般的なセルシェーディング



(b) 簡易的な米国漫画表現

図 3.8: 簡易的な米国漫画表現

図 3.8(a)は通常のセルシェーディングを用いた物である。通常のセルシェーディングでは基本となるモデルの色とその色の明度を下げた陰部分の色の 2 階調で陰影付けをし、細い輪郭線を描画する。それに対し輝度テクスチャの陰部分の色を黒くし、輪郭線を太くした物が図 3.8(b)である。この様な処理をすることによりスミベタによる陰影・太い輪郭線を再現でき、通常のセルシェーディングよりは米国漫画に近い画像を表現する事が出来る。現在、米国漫画を意識してセルシェーディングを利用しているインタラクティブコンテンツでは実際にこの様な処理をしている事が多い。しかし、4 章でも書いたように、米国漫画の特徴には、太い輪郭線とスミベタによる陰影の表現の他に、斜線による陰影の表現という物がある。この斜線による陰影の表現を施さない事には完全な米国漫画調の画像にはならない。

現在、ノンフォトリアリスティックレンダリングの研究の一環で、「Real-Time Hatching」[20] や「Pen-and-Ink 風画像の生成とそのアニメーション化」[21] といっ

た、斜線による陰影を表現するための研究がいくつか行われている。これらの研究は3DCGを用いて鉛筆画風やペン画風の画像を作り出す物である。これらの研究の中にはリアルタイムで処理できる物もあるが、まだまだ複雑な処理のため、ゲームなどのように一画面あたりのポリゴン数の多い物では、現時点では使用が難しい。

ノンフォトリアリスティックレンダリングの研究として「Non-Photorealistic Virtual Environments」[22]がある。この論文ではリアルタイムでノンフォトリアリスティックレンダリングを実現しているのだが、その手段として、ノンフォトリアリスティックに加工したテクスチャをあらかじめ用意しておき、それを全ての面に貼り付けてノンフォトリアリスティックに見せるという手法を提案している。

本論文では、この手法を応用し、陰影表現に使用するための斜線をテクスチャとして貼り付け、リアルタイムで行う処理を少なくし、実用に耐える速度を実現する。

3.3.1 斜線とスミベタの作成

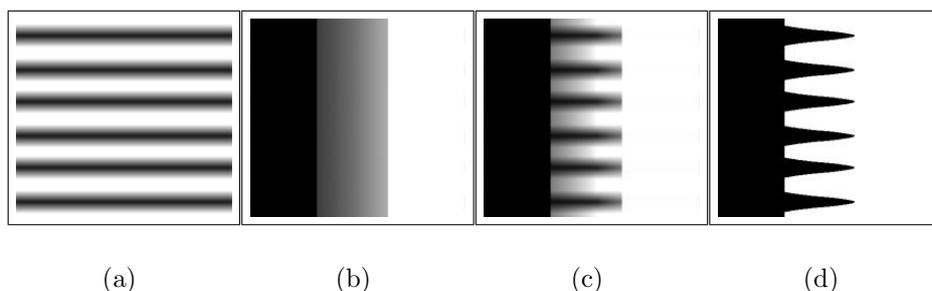


図 3.9: 斜線による陰影の作成手順

米国漫画調の斜線とスミベタによる陰影は、あらかじめ用意した斜線テクスチャと輝度情報を持たせた一次元テクスチャを合成することにより実現する。図3.9(a)は斜線テクスチャである。斜線のテクスチャは一次元テクスチャと合成させた時に先が細くなるように、線の中心から外側に掛けてグラデーションをかけておく。図

3.9(b)は一次元テクスチャである。セルシェーディングで用いられる2階調の物ではなく、黒白の2階調の間に灰色のグラデーションが入った物を用いる。この2つのテクスチャを合成する事により、黒の部分はスミベタ、灰色のグラデーションの部分は斜線となる。合成の方法だが、まず輝度を0~1の範囲で表すことにする。斜線を描き込んだテクスチャの輝度を S 、図6-6の陰影情報を持たせたテクスチャの輝度を L 、それを合成したテクスチャの輝度を F とする。そして、合成の式は次のようになる。

$$F = S + 2(L - 0.5) \quad (3.3)$$

実際に式(3.3)を適用して合成したものが図3.9(c)である。この状態では全体的に斜線とスミベタがぼやけた状態となっている。そこで、一定の閾値で黒と白に2階調化することにより、先の尖った斜線とスミベタをくっきりと描画する事が出来る。実際に2階調化した物が図3.9(d)である。この手法を用いる事により、斜線テクスチャと一次元テクスチャのグラデーションの加減によって、線の尖り具合などを調整する事が可能となる。

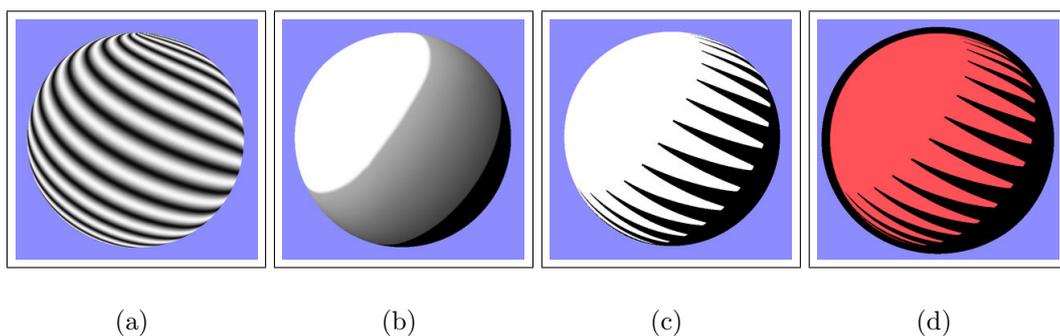


図 3.10: 斜線による陰影の作成手順

図3.10は実際にこの手法を用いてモデルをレンダリングしていく過程である。図3.10(a)は斜線テクスチャだけをマッピングしたモデルをレンダリングした画像、図

3.10(b)は一次元テクスチャを用いてモデルをレンダリングした画像である。この2つを本手法を用いて合成し、斜線とスミベタの陰を表現した物が図3.10(c)である。さらにモデルの素材の色を乗算し、輪郭線を加える事により、米国漫画調の画像を再現したのが図3.10(d)である。

3.3.2 斜線テクスチャのマッピング方法

本手法を実用するためには斜線テクスチャを3Dモデルにマッピングする必要がある。マッピングには

- モデリングソフトでマッピングしておく手法
- スクリーン座標に合わせてマッピングする手法

の2つの手法を用いる。

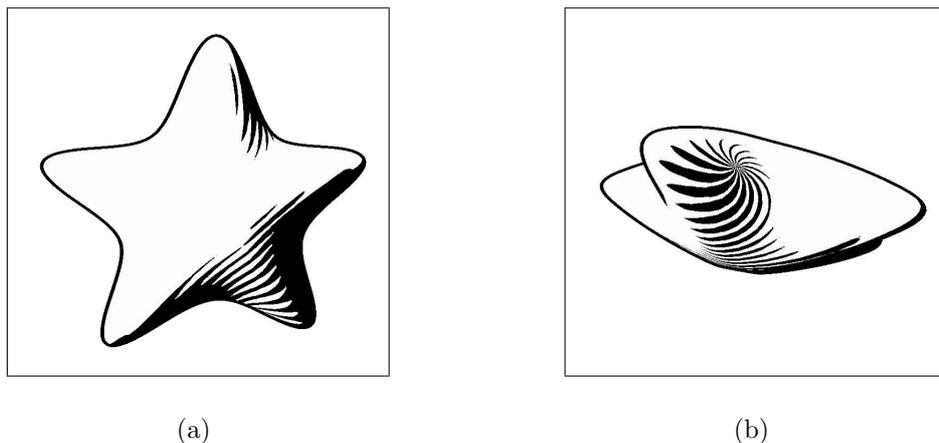


図3.11: モデリングソフトでマッピングしておく手法

図3.11はモデリングソフトを使ってあらかじめ斜線テクスチャをマッピングした物である。この手法を用いる事により、米国漫画作品によく見られる筋肉・人体構造にそって引いた斜線を容易に再現する事が出来る。しかし、そのモデルを

見る視点によっては図 3.11(b)のように斜線が螺旋状や輪っか状になってしまうなど不自然な斜線になってしまうことがある。

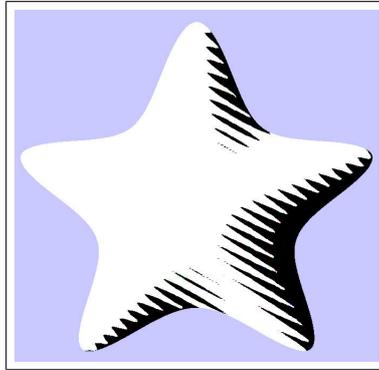


図 3.12: スクリーン座標に合わせてマッピングする手法

図 3.12は斜線テクスチャをスクリーン座標にあわせて平行投影する手法を用いた物である。この手法を用いる事により、どの視点からでもしっかりとした斜線を描く事が出来る。しかし、斜線の向きが一定になってしまい、多少人工的な不自然さが出てしまう。

このように両手法にはそれぞれ利点・欠点があるため、ある程度視点が決まっている場合には前者を、視点が自由に動き回る場合に後者を使うなど、場合によって使い分けるようにすると良い。

3.3.3 グラデーションを用いた表現



図 3.13: グラデーションを用いた表現

前章でも触れた様に、近年では米国漫画のデジタル彩色化により、単色塗りではなく陰影のグラデーションのかかった画調の米国漫画作品も増加し始めている。その様な米国漫画作品を再現するために、斜線による陰影を作り出すために用いた輝度情報を持った一次元テクスチャを再利用し、ここまでに述べた単色塗りの米国漫画調レンダリングに対し一次元テクスチャを乗算する。この処理によりグラデーションをかけた画像が図 3.13 である。グラデーションを再現するために別の一次元テクスチャを用意しても良いのだが、環境によっては一度に利用できるテクスチャの枚数が制限されるため、斜線による陰影を再現する際に用いた一次元テクスチャを流用する方法をとっている。尚、この処理では物体そのものの色とそれに対して陰で暗くなっている色との間でのグラデーションしか再現できないが、明るい色とのグラデーションに関しては次章で解説するハイライトを用いて再現する事が可能である。

3.3.4 MIP-MAP の応用による斜線の太さの調整

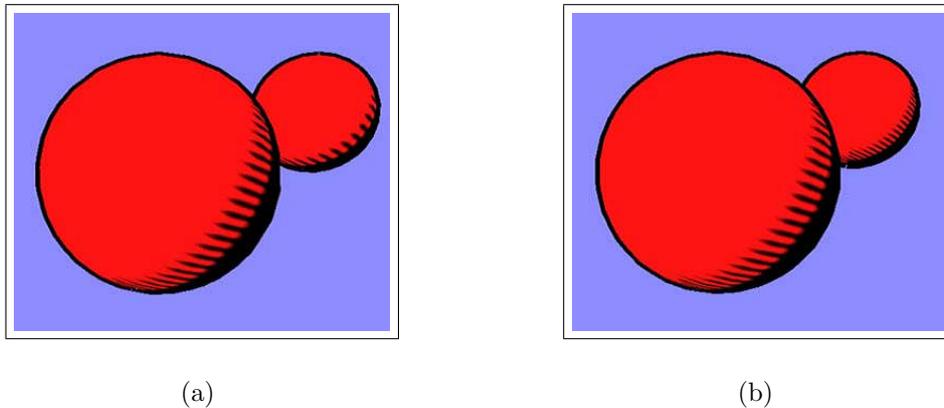


図 3.14: MIP-MAP の応用

ここまで上げた処理だけでは、まだ問題がある。図 3.14(a)は同じボールを一方は手前に、もう一方は奥に表示した物である。手前と奥のボールの陰の斜線を見比べると、奥のボールの斜線の方が細くなってしまっている。これは奥にあるボールの方が小さく表示されるため、それと共に斜線も縮小されてしまうためである。

このような症状を回避するためには MIP-MAP という技術を応用する。MIP-MAP はモデルの視点からの距離に合わせてテクスチャの解像度を変えるという物で、モデルが近くにあり大きく表示される時は解像度の高いテクスチャを、遠くにあり小さく表示される時は解像度の低いテクスチャを貼り付けることになる。この技術を応用して、何段階かの太さの斜線を描き込んだテクスチャを用意しておき、モデルの表示される大きさに合わせて張り替えるようにする事によって、モデルの表示される大きさにかかわらず、ほぼ同じ太さの斜線を引く事が出来る。図 3.14(b)はこの処理を実際に行った画像である。手前のボールと奥のボールの陰の斜線の太さがしっかりとそろっている。

3.3.5 様々な材質の表現

第2章でも記述したとおり、米国漫画では表現する材質などにより斜線とスミベタ、そしてそれ以外の陰影表現を使い分けている。そのため、米国漫画をしっかりと再現するためには、これらの陰影表現の表現にも簡単に対応できる事が必要となる。本論文で提案する米国漫画調レンダリングの手法では、斜線テクスチャを描き変える事により、それらの様々な陰影表現を実現可能としている。

第 4 章

特殊効果レンダリング

4.1 光線表現

米国漫画で頻繁に用いられる特殊効果の1つである光線表現について説明する。光線表現には前章で述べた「視線と法線の内積を利用した輪郭描画の手法」を応用する。実際の処理内容は、物体からカメラへの向き(視線ベクトル)を \mathbf{E} 、任意の点の単位法線ベクトルを \mathbf{N} 、一次元テクスチャの x 成分を T_x と置いたとき、

$$T_x = \mathbf{E} \cdot \mathbf{N}$$

上記の式で \mathbf{E} と \mathbf{N} の内積から T_x を求め、このテクスチャの座標に基づいて一次元テクスチャをマッピングする。

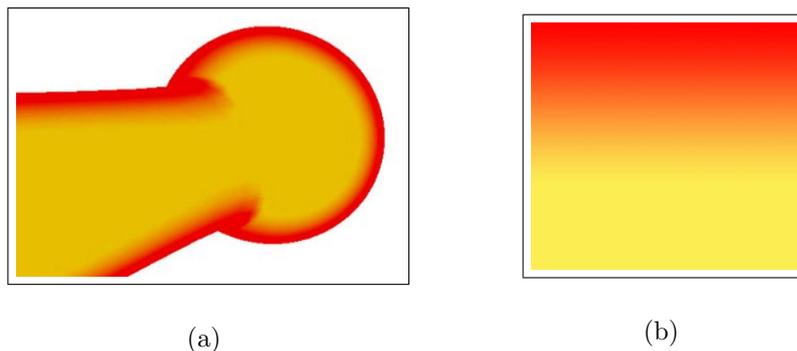


図 4.1: 光線のシェーディング

図 4.1(a)は実際にこの手法を用いて一次元テクスチャをマッピングした物で、図 4.1(b)はこの際に利用した一次元テクスチャである。この様に内側と外側で色の異なる光線を再現する事が出来る。光の色の表現方法としては、全体が同じ色で塗りつぶされている物、内側の色が薄く外側の色が濃くなっている物、また反対に内側が濃く外側が薄い物などがあるが、この手法を用いる事により一次元テクスチャを描き変える事でそれらの様々な表現を再現する事が出来る。

さらに米国漫画の光線表現は、光線と重なっている物体の輪郭線を透過して描画するといった表現をすることがある。この様な表現は、まず光線と重なる物体

を描画し、その上に光線を描画し、さらに物体の輪郭線のみを乗算合成するという手順を追う事で実現できる。

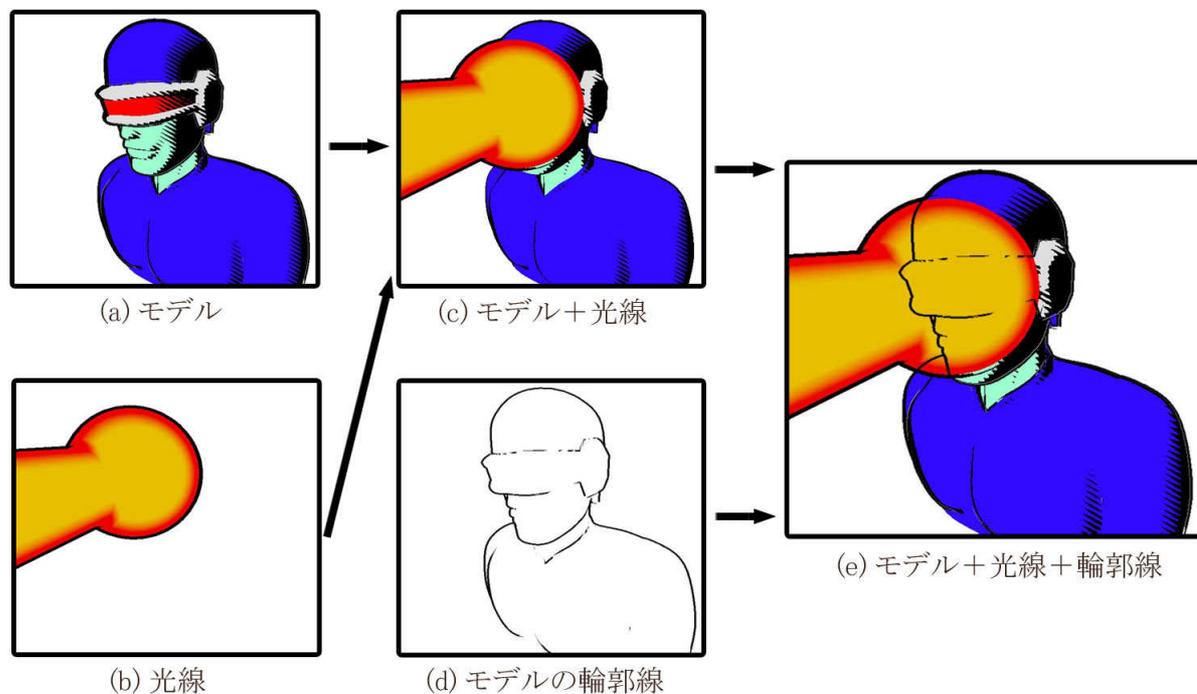


図 4.2: 輪郭線の透過する光線表現

図 4.2は実際に輪郭線を透過した光線表現を行う手順を図示した物である。図 4.2(a) は光線と重なる物体のみを描画した物、図 4.2(b) は光線のみを描画した物である。通常、この2つを同時に描画すると光線と物体が重なったように描画される。図 4.2(c) はその状態の画像である。これに対して、物体の輪郭線を再抽出した図 4.2(d) を乗算合成することにより、光線部分に輪郭線を透過した画像が再現できる。図 4.2(e) が実際に輪郭線を透過させた光線を再現した画像である。

4.2 ハイライト

NPR 用のハイライトの研究として安生らの研究 [23] がある。この研究はフレームベースのセルシェーディングのために開発された物であり、米国漫画調のハイラ

イトにも共通するハイライトの特徴を再現できているのだが、リアルタイム3DCGに用いるのは難しい。そこで本論文では、リアルタイムでも実現可能な米国漫画調のハイライト手法を提案する。

4.2.1 鏡面反射

米国漫画調のハイライトを表現するために、実際に3DCG上でハイライトを表現するための手法について述べる。

Phong

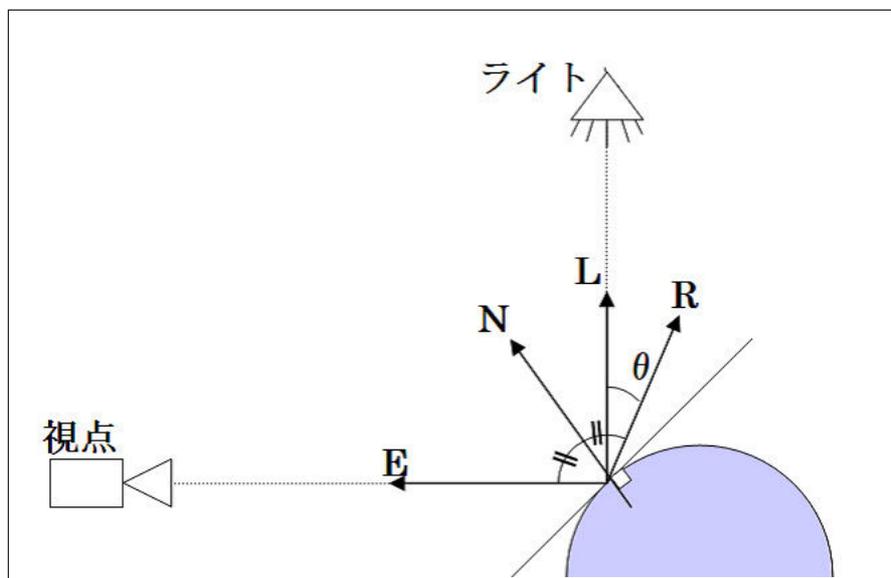


図 4.3: Phong

3DCGでハイライトを表現するための手法として最も知られているのが Phong による鏡面反射のモデル [24] である。そこで、まずは Phong 鏡面反射について解説する。ハイライトは入射した光が反射する角度から見たときに一番明るく見える。それは、視線が物体に当たって跳ね返った方向が光の入射方向に近いときに明るく見えるとも言い換えられる。視線が物体に当たって跳ね返った時の反射ベクトルを R とし、物体から光源への向き (ライトベクトル) を L としたとき、 R と

L が近ければ強い光、離れていれば弱い光に定式化した物が Phong の鏡面反射モデルである。反射光を I 、ライトの強さを I_s 、反射係数を k_s 、 \mathbf{R} と \mathbf{L} の角度を θ 、物体からカメラへの向き (視線ベクトル) を \mathbf{E} 、単位法線ベクトルを \mathbf{N} としして数式で表すと

$$\mathbf{R} = -\mathbf{E} + 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{E})\mathbf{N}$$

$$I = I_s \cdot k_s \cdot \cos^n \theta$$

$$= I_s \cdot k_s \cdot (\mathbf{L} \cdot \mathbf{R})^n$$

となる。図 4.4 はこれらを図で表した物である。この式で n は鏡面反射指数と呼ばれる物で、 n が無限大ならば $\mathbf{L} \cdot \mathbf{R}$ が 1 のときだけ $I = 1$ になり、それ以外は 0 となる。つまり、反射ベクトルとライトベクトルが完全に一致しない限り鏡面反射を起こさない。無限大でない場合は、反射ベクトルとライトベクトルが少しずれていても明るくなり、ハイライトがぼやけて広がるようになる。

Blinn-Phong

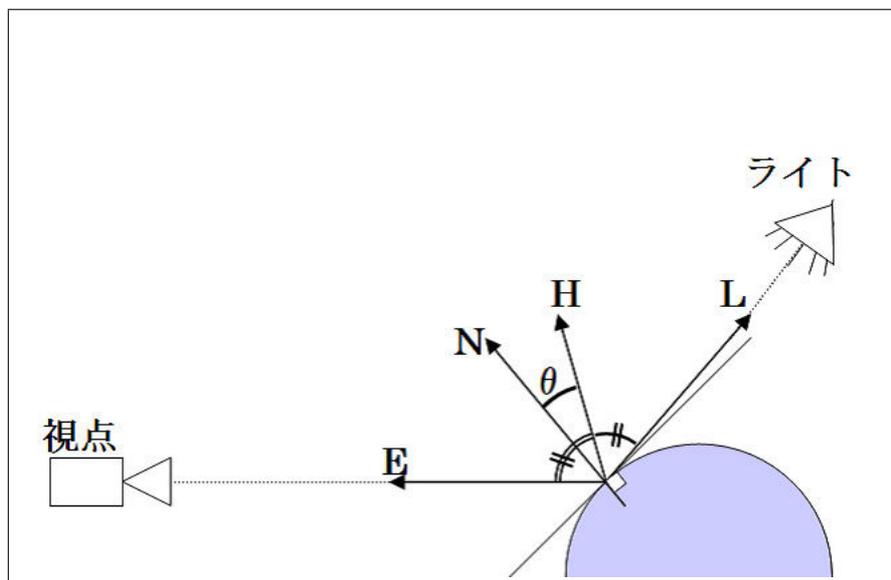


図 4.4: Blinn-Phong

Phong の鏡面反射モデルでは反射ベクトルを計算しなくてはいけない。しかし、

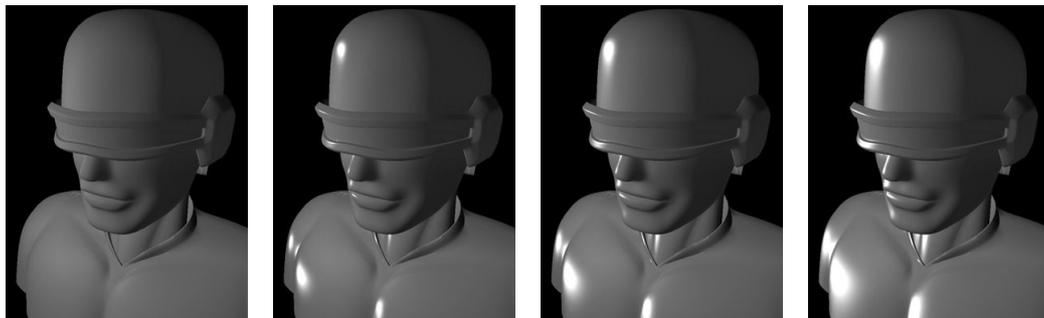
環境によっては反射ベクトルを計算するのが大変であり、代替手法として Blinn-Phong 鏡面反射モデル [25] が有る。この手法ではハーフベクトルを用いる。ハーフベクトルとはライトベクトル L と視線ベクトル E の中間ベクトルで、ハーフベクトルを H とすると

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{E} + \mathbf{L}}{|\mathbf{E} + \mathbf{L}|}$$

という式で求める事が出来る。そして法線ベクトル N とハーフベクトル H のなす角度を θ とすると、鏡面反射光は

$$\begin{aligned} I &= I_s \cdot k_s \cdot \cos^n \theta \\ &= I_s \cdot k_s \cdot (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n \end{aligned}$$

で計算する事が出来る。図 4.3は、これらを図で表した物である。鏡面反射光の強さが大きくなるのは、法線ベクトルとハーフベクトルの向きが同じときで、これは視線ベクトルと法線ベクトルのなす角度とライトベクトルと法線ベクトルのなす角度が同じになる所であり、Phong 鏡面反射モデルで反射ベクトルとライトベクトルが一致するのと同じ点である。したがって、Phong 鏡面反射と Blinn-Phong 鏡面反射で表されるハイライトの中心位置は等しい位置となる。



(a) 反射無し

(b) $n=200$

(c) $n=100$

(d) $n=50$

図 4.5: Blinn-Phong 実装結果

図4.5(a)は Lambert の余弦則を用いてシェーディングした画像、図4.5(b)～4.5(d)は鏡面反射指数 n をそれぞれ 200、100、50 と設定し実際に Blinn-Phong を適用した画像である。この図を見ると鏡面反射指数 n の値を小さくするとハイライトの範囲が広がる事が分かる。

本研究では、DirectX のプログラマブルシェーダ上で扱いやすい Blinn-Phong 鏡面反射モデルを元に米国漫画調のハイライトを表現する [26]。

4.2.2 米国漫画調ハイライト

現実的な米国漫画調ハイライト

2章にて、米国漫画で用いられるハイライトは大きく分けて3種類あると述べた。まずは実際に光を当てて出来るようなハイライトについて実装方法を述べる。このハイライトを再現するために前述の Blinn-Phong を利用する。しかし、Blinn-Phong をそのまま利用するとハイライトだけが写実的になってしまい、上手く米国漫画調を再現する事が出来ない。そこで、Blinn-Phong の式を用いて導いた輝度を I_b 、そして実際に描画するハイライトの輝度を I_a とし、輝度の範囲は 0～1 で表す場合、

$$I_a = \begin{cases} 1 & (I_b > b) \\ 0 & (I_b \leq b) \end{cases}$$

の様に、 I_b を任意の閾値 b で2階調化することにより、米国漫画調のくっきりとしたハイライトを再現することが可能となる。



図 4.6: 2 階調のハイライト

図 4.6(a)はこの処理を適用したハイライトで、図 4.6(b)は実際に米国漫画調のグラフィックに加算合成した物である。

近年のデジタル彩色になりグラデーションを用いる様になった米国漫画作品ではくっきりとしたハイライトだけでなく、グラデーションのかかったハイライトを用いる事もある。その際は

$$I_a = \begin{cases} ((I_b - b) \cdot (5b/2 + I_b)^m) / 2 & (I_b > b) \\ 0 & (I_b \leq b) \end{cases}$$

上記の式を用いることによりグラデーションのかかったハイライトを再現する。この式に置いて m はグラデーション調整用の係数であり、係数 m と閾値 b 、そして Blinn-Phong の鏡面反射指数 n の値を変化させる事により、ハイライトのグラデーションの掛かり方やハイライトの大きさを調整することが可能である。

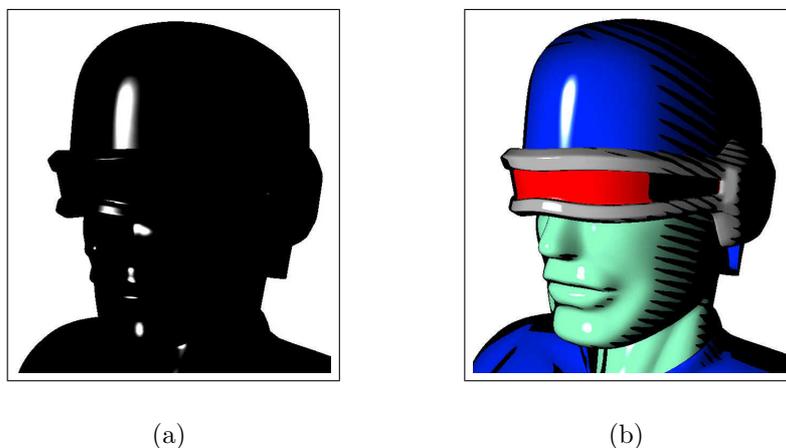


図 4.7: グラデーションのハイライト

図 4.7(a)はこの処理を適用して出来たグラデーションの掛かったハイライトで、図 4.7(b)は実際にグラデーションを用いた米国漫画調のグラフィックに加算合成した物である。

逆光風の米国漫画調ハイライト

次に逆光の様に物体の輪郭にそって描かれるハイライトの実装方法について述べる。逆光風のハイライトを再現するために本論文で提案する手法は、第 4 章で述べたセルシェーディングの手法を応用するものである。

この手法では白と黒で塗り分けた一次元テクスチャを用いる。そして、このハイライト用に新しいライトベクトルを用意する。実際の処理としては Lambert の余弦則に基づいて、法線ベクトルを \mathbf{N} 、(ライトベクトル)を \mathbf{L} とし、 $-1.0 \sim 1.0$ の範囲で求められる輝度 I を $0.0 \sim 1.0$ の範囲のテクスチャの x 成分 T_x に変換する。

$$T_x = ((\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + 1)/2$$

上記の式 4.1 で求められた $0.0 \sim 1.0$ のテクスチャ座標を一次元テクスチャに適用さ

せる。そして、逆光の様にモデルの輪郭部分にハイライトを描画するために、ライトベクトルの方向は視点から見て物体の後方向きにする。

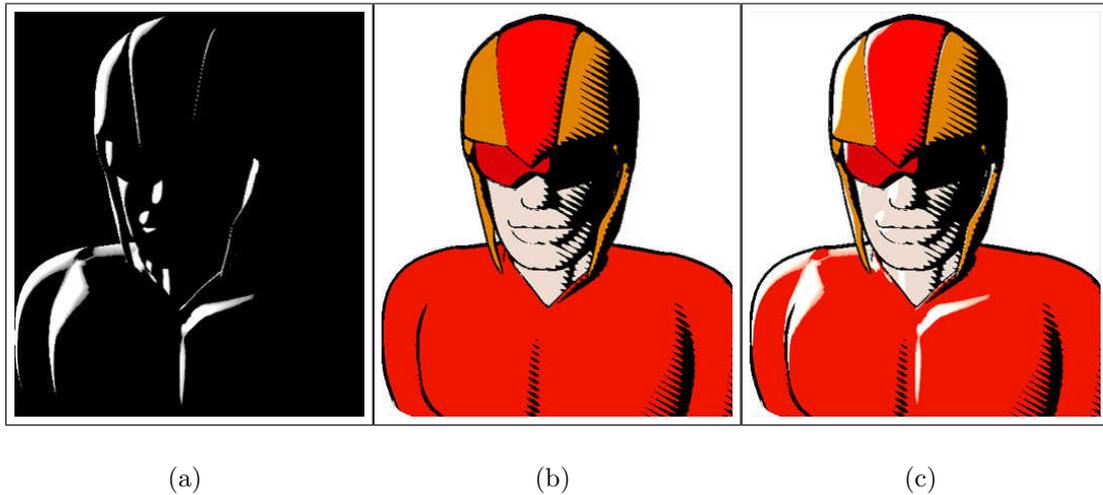


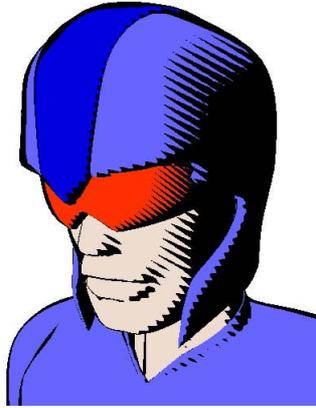
図 4.8: 逆光風のハイライト

以上の処理により作り出されたハイライトが図 4.8(a)である。これを第 4 章までの手法を用いてシェーディングした画像である図 4.8(b)に対して加算合成することにより、輪郭にそって描かれるハイライトを再現した物が図 4.8(c)である。ハイライトの大きさや形は一次元テクスチャやライトベクトルの向きを変更する事により調整する事が可能である。

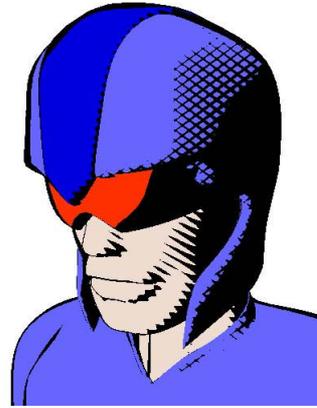
第 5 章

評価と現状での問題点

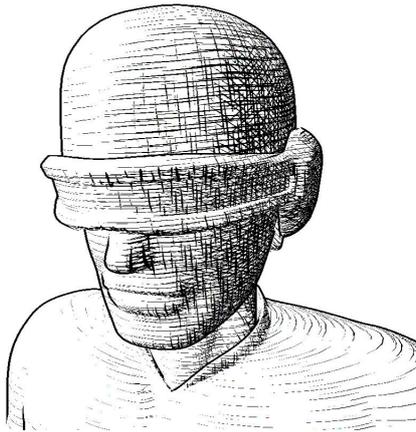
5.1 実行結果



(a)



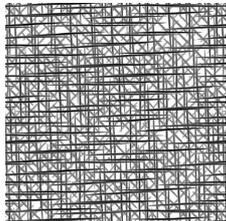
(b)



(c)



(d)



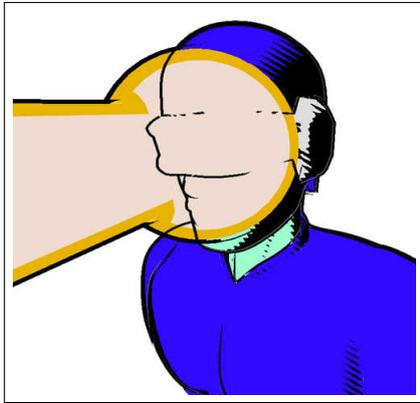
(e)



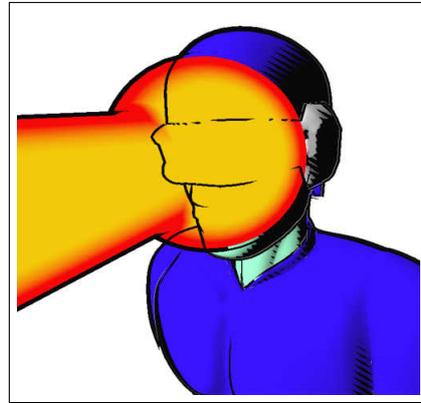
(f)

図 5.1: 斜線とスミベタによる陰影表現

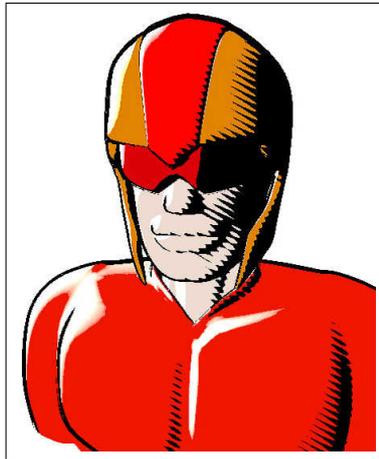
まず、本論文で提案した手法を用いた画像を紹介する。図 5.1(a)は斜線とスミベタのみを用いてモデルを描画した物となっている。それに対し、図 5.1(b)は斜線テクスチャを変える事により、サングラス部分の陰影をスミベタのみで表現し、ヘルメット部分には網目状の斜線を用いて表現した画像である。この様に、斜線テクスチャを変えるだけで様々な陰影表現が可能となる。これを応用する事により、米国漫画調以外の画調を表現する事も可能である。図 5.1(c)・5.1(d)は斜線テクスチャを描き変え、鉛筆画調の画像を再現した物である。図 5.1(e)・5.1(f)はその際に用いた斜線テクスチャである。現在、米国漫画ではこのような陰影表現を用いる事はない。しかしこれらの画像は、今後米国漫画で新しい陰影表現を用いる様になっても、黒いペンなどで描く物である限りは、本手法の斜線テクスチャを描き変える事により対応できる可能性が高い事を示している。



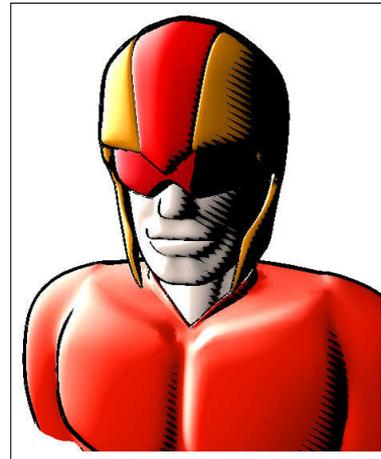
(a)



(b)



(c)



(d)

図 5.2: グラデーション

図 5.2は、図 5.2(a)・5.2(c)は単色塗りの米国漫画を再現した物であるのに対し、図 5.2(b)・5.2(d)はグラデーションを用いた米国漫画を再現した物である。本手法では、この様に昔ながらの単色塗りによる米国漫画、デジタル彩色を取り入れグラデーションを用いる近年の米国漫画を共に再現可能である。

5.2 リアルタイム性の検証

本手法を用いて実際にプログラミングをした際に、どれほどの速度で処理する事が可能かを検証した。検証に用いたPCの構成はCPU: AthlonXP2400+、グラフィックボード: Radeon9800pro、メモリ: 512MBである。プログラミングにはMicrosoft社のVisualC++を使用し、DirectX9のVertexShader2.0・PixelShader2.0の機能を用いて本手法を実装した。画面解像度1024*768で頂点数11098の3Dモデルを描画するのに、通常のシェーディングを用いた場合は秒間約380フレームで処理されるのに対し、本研究の米国漫画調レンダリングを用いた場合は秒間約350フレームで処理する事が出来た。本手法の実装による処理速度の低下は1割程度であり、ほぼ速度低下を気にすることなく実装可能である。この検証結果により、本手法のリアルタイム性を証明する事が出来る。

5.3 評価

本論文では、リアルタイム3DCG上で米国漫画調の画像を再現するための手法を提案した。本手法を用いる事により、既存手法では再現する事の出来なかった、色を単色化(モダンエイジを表現する場合はグラデーション)、斜線とスミベタによる陰影表現、強弱のついた輪郭線描画などの米国漫画の絵柄の特徴と、光線表現やハイライトといった特殊効果を用いた画像を3DCGを用いてリアルタイムに描画する事が可能となる。そして、斜線のテクスチャを描き変える事により、米国漫画に置ける斜線以外の様々な陰影表現や、米国漫画調以外の手書き風表現も再現する事が可能である。そして、将来的に米国漫画で新しい陰影表現方法が用いられても、黒いペンやトーンで描く物である限りは、再現出来る可能性が高い。

本手法を用いることにより、米国漫画作品のキャラクターを用いたインタラクティブなコンテンツを制作する際、原作のイメージを崩さないよう米国漫画調のグラフィックで描画する事が可能となる。又、米国漫画調の絵はリアルに描き込んだキャラクターを用いたスピード感のあるアクション物に向いているため、迫力

やスピード感を強調するための特殊効果として使う事もできる。

5.4 問題点

現状の問題点として、まず米国漫画作品で頻繁に用いられるモーションブラー、ハイライトの1つである現実的ではない直線的な光沢感を出すために用いるハイライト等が未実装である。この2つの表現を再現出来る様になれば、より米国漫画らしい画像を描画する事が可能となる。

また、現時点では光源は平行光源のみ使用可能で、点光源やスポットライト、天空光源などには対応していない。前述の通り、米国漫画では光線表現などの光の表現を頻繁に用いる。そこから発生する光を元に陰影を表現できる様にするためには、平行光源以外にも対応できるようにする必要がある。

第 6 章

むすび

米国漫画調のグラフィックを 3DCG を用いてリアルタイムに描画する事を目標として研究に取り組んだ。その成果として、セルシェーディングを応用し、米国漫画の絵柄の特徴である、色の単純化・斜線やスミベタによる陰影表現・輪郭線の描画に加え、米国漫画で頻繁に用いる特殊効果である光線表現・ハイライト表現を 3DCG を用いてリアルタイムに再現するための手法を完成させた。そして、本論文で提案した米国漫画調レンダリングの手法は、陰影に用いる斜線をテクスチャを用いて再現するという方法を取ったため、斜線テクスチャを変更する事によりモデルの材質などに応じて斜線の表現に変化を持たせる事が出来ると共に、斜線以外の陰影表現なども容易に再現できること、また通常のレンダリングと比較して処理速度の低下が少ない事を証明し、その有用性を確認した。

本手法を用い、アクションシーンが多く迫力のある米国漫画をリアルタイム 3DCG 上で再現することにより、その場面全体をあらゆる角度から眺める事が可能となり、より臨場感がますであろう。さらに、現在ではリアルなシェーディングや単純なセルシェーディングを用いる事が多い米国漫画作品を題材としたゲームなどの 3D コンテンツを、より原作の米国漫画に近い画調で制作する際に大いに役立つだろう。

問題点としては米国漫画で頻繁に用いられるモーションブラーなどの特殊効果などを再現する手法が完成していない点、現時点では平行光源にしか対応していない点などがある。また陰影に用いる斜線を、どの視点から見ても不都合なく表示され、また一定の向きに揃ってしまわない様に描画する手法などを完成させる事により、更に有効な手法に発展できるであろう。また、陰影を描画する際、どのような状況・材質の表現に対してどのように斜線・クロスハッチング・スミベタ等を使い分ける事が適しているかなどを深く考察することにより、本手法の利用の幅を広げられるのではないだろうか。

本研究は FIT2003 において”リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリングに関する研究”[27]、情報処理学会第 66 回全国大会において”リアルタイム 3DCG

における米国漫画調レンダリングの開発”[28]として発表した内容を含む。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究や論文執筆など幅広くご指導して戴いた渡辺大地講師、横井俊夫教授および和田篤氏、また大学院の講義やミーティングなどを通じて助言を戴いた宮岡伸一郎教授および淵上季代絵教授に心より感謝いたします。

また、アニメ作品からの画像の転載を快く許可して戴いたスタジオジブリ、書籍からの画像の転載を快く許可して戴いた MPC、グラフィック社に心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Takafumi Saito, Tokiichiro Takahashi, “Comprehensible rendering of 3-D shapes,” *SIGGRAPH 90* , pp. 197–206, 1990.
- [2] Paul Haeberli, “Paint by numbers: abstract image representations,” *ACM SIGGRAPH Computer Graphics archive*, 24 , pp. 207–214, 1990.
- [3] Amy Gooch, Bruce Gooch, Peter Shirley, Elaine Cohen, “A Non-Photorealistic Lighting Model For Automatic Technical Illustration,” *SIGGRAPH 98* , 1998.
- [4] Adrian Secord, Wolfgang Heidrich, Lisa Streit, “Fast primitive distribution for illustration,” *Eurographics Workshop on Rendering* , 2002.
- [5] Sim Dietrich, “Cartoon Rendering and Advanced Texture Features of the GeForce 256 Texture Matrix, Projective Textures, Cube Maps, Texture Coordinate Generation and DOTPRODUCT3 Texture Blending,” tech. rep., NVIDIA Corporation, 2000.
- [6] Johan Claes, Fabian Di Fiore, Gert Vansichem, Frank Van Reeth, “Fast 3D Cartoon Rendering with Improved Quality by Exploiting Graphics Hardware,” *Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ) 2001* , pp. 13–18, 2001.
- [7] C.T.I.Tayama, “テクニカルイラストレーターの!!!.” <http://www.h5.dion.ne.jp/~cti/>.
- [8] CFC, “CG-Online.” <http://www.cg-online.jp/>.
- [9] 河瀬昇, “ART CONTEMPORARY IN JAPAN.” <http://www.linkclub.or.jp/~kawasenb/index.htm>.
- [10] 野口徳雄, 矢崎淳, “New-York-Art.com.” <http://www.new-york-art.com/index.htm>.

- [11] Jamie Coville, “The History of Superhero Comic Books.” <http://www.geocities.com/Athens/8580/>.
- [12] 坂口哲也, 堺三保, “S F オンライン.” http://www.so-net.ne.jp/SF-Online/no6_19970818/index.html.
- [13] 高木亮, “アメコミくえすと.” <http://ameque.cool.ne.jp/>.
- [14] Christopher Hart, 森屋利夫, 松下進, “アメコミの描きかた.” グラフィック社, 1997.
- [15] 宮崎駿, “もののけ姫.” スタジオジブリ, 1998.
- [16] 草野雄, “アメリカンコミックイラストレーションテクニック.” MPC, 1989.
- [17] 阿部知弘, “Digital Matrix.” <http://www.not-enough.org/abe/manual/index.html>.
- [18] 新坂秀敏, “カクカクシカジカ.” http://home.att.ne.jp/yellow/hide_n/profile.html.
- [19] Microsoft, “頂点シェーダを使用した DirectX 8 でのトゥーン レンダリング.” <http://www.asia.microsoft.com/japan/msdn/directx/techart/DXVertex.asp>.
- [20] Emil Praun, Hugues Hoppe, Matthew Webb, Adam Finkelstein, “Real-Time Hatching,” *SIGGRAPH2001*, pp. 579–584, 2001.
- [21] 芳賀俊之, 西田友是, “Pen-and-Ink 風画像の生成とそのアニメーション化,” *CAD/Graphics'2001*, 2001.
- [22] Allison W. Klein, Wilmot Li Michael, M. Kazhdan Wagner, T. Correa, Adam Finkelstein, Thomas A. Funkhouser, “Non-Photorealistic Virtual Environments,” *SIGGRAPH2000*, pp. 527–534, 2000.

- [23] Ken-ichi Anjyo, Katsuaki Hiramitsu, “Stylized Highlights for Cartoon Rendering and Animation,” *IEEE Computer Graphics and Applications Vol.23 No.4*, pp. 54–61, 2003.
- [24] Bui-Tuong Phong, “Illumination for computer generated images,” *Comm ACM 18*, pp. 311–317, 1975.
- [25] Jim Blinn, “Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures,” *SIGGRAPH 77*, pp. 192–198, 1977.
- [26] 今給黎 隆, “DirectX 9 シェーダプログラミングブック.” 毎日コミュニケーションズ, 2004.
- [27] 鈴木隼人, 渡辺大地, “リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリングに関する研究,” *FIT2003*, pp. 223–224, 2003.
- [28] 鈴木隼人, 渡辺大地, “リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリングの開発.” 情報処理学会第 66 回全国大会, 2004.

画像の出典

図 2.1, 2.4, 2.5, 2.6(b) MPC “アメリカンコミックイラストレーションテクニック”より

図 2.2, 2.3 グラフィック社 “アメコミの描きかた”より

図 2.6(a) スタジオジブリ “もののけ姫”より

学会発表論文

鈴木隼人, 渡辺大地, “リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリングに関する研究”, *FIT2003*, 2003.

鈴木隼人, 渡辺大地, ”リアルタイム 3DCG における米国漫画調レンダリングの開発”, 情報処理学会 第 66 回全国大会, 2004.