

単眼視と両眼視のグラフィックスシミュレーション

情報処理科 伊 奈 諭

要旨：日頃気付かない人間の視覚の見え方を調べるため、眼球の構造および両眼特性をある程度考慮、模倣することによって、単眼視時の網膜像と両眼視時の第一次的合成画像をグラフィックスとして再現・提示した。また一般の3次元コンピュータグラフィックスにおいて感ずるリアリティ表現の不自然さの原因を探るため、眼球レンズを模擬した被写界深度による遠近ボケと両眼視による重畳ボケや錯視イメージをシミュレーションし、本当はどのように見えているのかを調べることによって人間の視覚機能についての考察をした。

キーワード 単眼視、両眼視、錯視、周辺視、被写界深度

1. はじめに

情報解析やネットワークコミュニケーションの各分野では、その処理能力と転送スピードの飛躍的な発展により、数値計算結果の可視化や遠隔会議、テレグジスタンス、アバタなど視覚化技術が脚光を浴びている。その結果VR(Virtual Reality)技術をはじめとしてコンピュータグラフィックスの表示系は、大規模化、微細化、立体化、リアルタイム化の道を突き進んでいる。簡単な立体視メガネの着用により驚くほど迫力のある画像が生成できるようになったし、メガネを使用しない立体表示システムも考えられている。しかしながらそうした画像は精巧緻密ではあるが、我々の日常風景と比べて、どこか不自然さが残ることも確かである。その原因としては、陰影、色合い、汚れ、光線などの要因が重要な影響を与えていると考えられ、そうした面からの不自然さを除去するための手法が種々提案され実現されてきた。しかし、このような面からのアプローチではどうしても取り除くことのできない不自然さがあるように思われる。一つには視覚レンズ系の効果による焦点調節と被写界深度の影響がほとんど反映されていないこと、次にビデオカメラのように単眼系の映像に終始していること、人間が普段行っている両眼視の影響を考慮した画像になっていないことなどが考えられる。液晶シャッタやカラーフィルタを使った両眼立体視にしても、我々が普段見ている立体視とはどこか異なっているような気がする。そこで単眼視と両眼視の網膜像をシミュレートし可視化してみることが視機能の入り口で発生している現象を客観的に知るために意義があると思われる。

2. 目的

全焦点、多焦点画像については、写実絵画やレイトレーシングやサーフェスレンダリングなどの三次元グラフィックスあるいはバーチャルリアリティ環境での画像としてありふれている。現実の眼はレンズ系を使用したカメラに近い構造であるのに対し、これらはピンホールカメラの原理を使って再現されたグラフィックスといえる。そこで我々が日常あまり気付いていない人間の眼の見え方を確認するため、人間の視覚像をグラフィックスとして近似的に再現する方法を提案する。また同時に、世の3次元コンピュータグラフィックス等によるバーチャルリアリティ画像に不自然さがつきまとうのはなぜか、本当はどのように見えているはずか、などについて調べる。単眼視は写真やテレビ映像などで見慣れているが、両眼視は我々の日常生活では常に使われているにもかかわらず、その見え方については意外と気付いていない。そこで、できるだけ眼球の構造を反映して、両眼視三次元グラフィックス画像を自由に生成することにより、両眼の網膜画像とその合成画像の見え方を様々な条件下でシミュレート・可視化する。

3. 方法

眼球を小さなレンズカメラとして近似し、焦点調節に伴う、被写界深度(ピンボケ)の効果や単眼視と両眼視の効果グラフィックスとして再現・可視化する。

3.1 眼球構造のモデル化

眼のレンズ効果は角膜や層状をなす水晶体による合成レンズと考えると極めて複雑であるが、ここでは図1のように一枚の凸レンズで近似する省略眼[1]を用いて

モデル化する。また両眼の距離は人間の平均的な値として6 cmとする。図1において

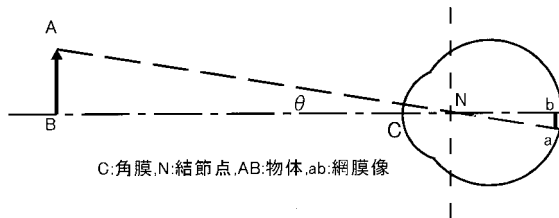


図1 省略眼

- ・ $bN = 17\text{ mm}$ 、 $bC = 23\text{ mm}$ 。
- ・ レンズサイズの設定範囲
絞り（瞳孔直径）8 mmから2 mm
- ・ 視野角と網膜像のサイズの関係
 $1' = 4.9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1^\circ = 290\text{ }\mu\text{m}$
- ・ 視野角範囲

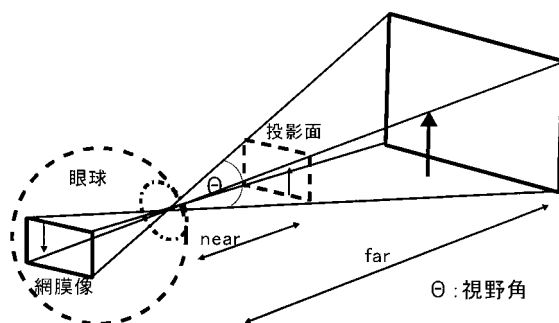
実際の眼球視野角は鼻側 55° ～耳側 70° 、合計 125° まで広がっているが、ここでは現実的な有効視野として以下の範囲で任意の値を扱えるようにする。

上下視野角 : $50^\circ \sim 80^\circ$

左右視野角 : $90^\circ \sim 128^\circ$ （上下視野角の1.6倍）

3.2 被写界深度のシミュレーション

眼球を図2のようにほぼ等価なレンズカメラで置き換えることにより、網膜上に結像しない像は被写界深度に



従ってボケる。この被写界深度（ボケ）を再現するには、正確には光線追跡の手法を利用することが望ましいが時間がかかるため、ここではピンホールカメラの原理を基盤として、そこにモーションブラー技術[3]を適用して近似表現する。すなわちピンボケの程度はレンズサイズに比例するため、眼球レンズサイズを直径を約8 mmの円盤と仮定して、その面内での視点振動を加えることによってシミュレートする。

3.3 網膜感度とその効果シミュレーション

周辺視の精度をランドルト環による相対視力のデータから近似的にシミュレートする[2]。中心視と周辺視の視力と視野角の関係は中心窩を境にして指数関数的に下がってくるが、ここでは簡単のために線形近似することにする。すなわちランドルト環の実験データより、最小分別閾（ ）は視野角 $= 44^\circ$ で $10 = 1/6^\circ$ というデータを基準にして $= / 264$ の式で線形補間を適用した。この効果を全視野に及ぼすために、視野角に微小振動を加えることによってシミュレートすることにする。

4. 実験

4.1 人工物のレイアウト

一辺10 mの正方形、天井高4 mの部屋に、以下のような人工物を図3に示すように配置する。

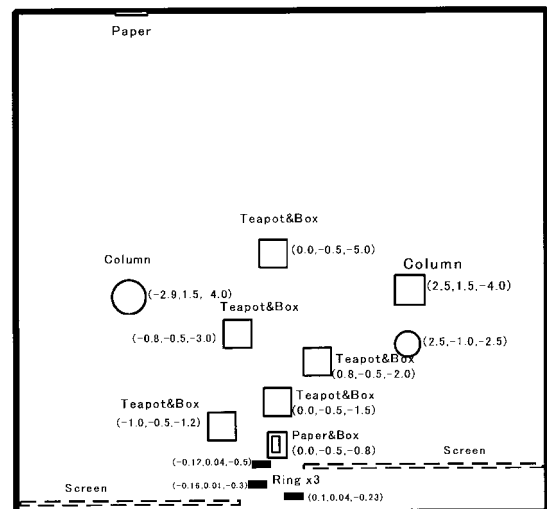


図3 人工物のレイアウト

ティーポット、ボックス（台）、円柱、角柱、円錐、文書、床、部屋壁（三方）、リング（吊り輪）、衝立（目隠し）

各物体のサイズは以下のように仮定した。

床タイル：一辺62 cm正方形の白黒チェッカーボード

壁タイル：一辺31 cm正方形の白黒チェッカーボード

リングサイズ：外周直径 20 cm 太さ直径 1.6 cm

ティーポットサイズ：長径25 cm

ボックスサイズ：一辺25 cm

手前上方から見た人工物の鳥瞰レイアウトを図4に示す。

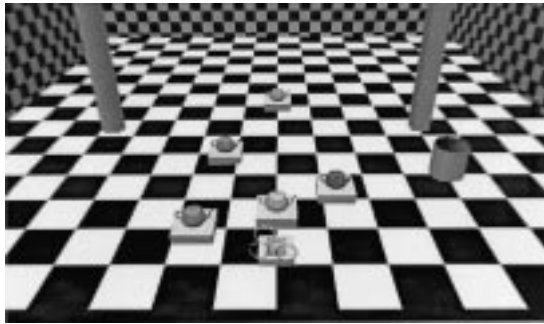


図4 人工物レイアウトの鳥瞰図

4.2 視点と注視点

視点は、単眼時、両眼時ともに両眼の中間点位置座標を指定することにより行う。また室内外の任意の座標を注視点として指定することにより、視線方向と焦点距離を決定する。

4.3 視野角

左右眼の水平視野角は鼻側耳側で非対称であるため、完全には重なり合わない。そこで本実験では左右の両眼視野角が重なり合う共通部分のみを興味の対象として扱うことにする。したがって本実験での表示画像の水平視野は実際よりも少し狭くしてある。

5. 結果

視点と注視点および単眼視と両眼視を変化させることにより、いくつかの興味深いグラフィックスが得られた。その中から、ここでは 原点に視点を置いて一番奥のティーポットを注視した場合、衝立で視野を遮った場合、両眼位置が独立分離で自由にえられる場合、の3種類についてその見え方を示す。

5.1 原点に視点を置いて一番奥のティーポットを注視した場合

視点：原点、注視点：一番奥のティーポット、上下視野角：70°、水平視野角：112°の条件で計算を行った。図5は右単眼視で被写界深度付き、図6は左単眼視で被写界深度と周辺網膜感度付き、図7は両眼視で、被写界深度と周辺網膜感度付き、である。図7の注視点（一番奥のティーポット）を注視していると、この一見不自然な両眼合成画像がよりリアルに見えてくるから不思議である。

5.2 衝立で視野を遮った場合

両眼視では左右眼の視差により衝立の周りで錯視現象が現れる。この画像からは錯視の程度がどのくらいの範囲に及ぶものが推定できる。図8と9は左右2枚の衝立が有り、二番目のティーポットを注視した場合の画像である。図8が右単眼視、図9が両眼視した場合である。

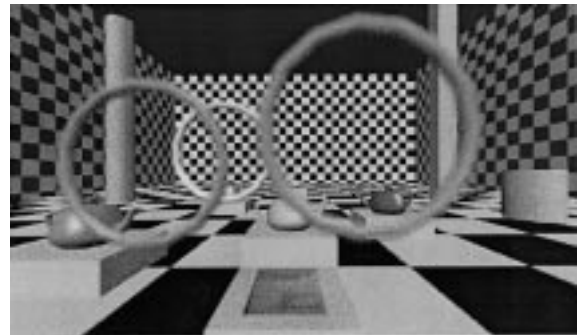


図5 右単眼視 + 被写界深度

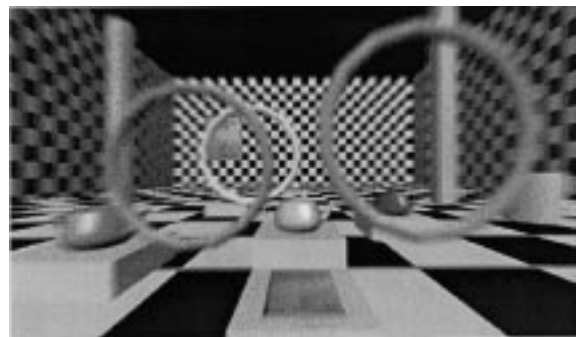


図6 左単眼視 + 被写界深度 + 網膜感度

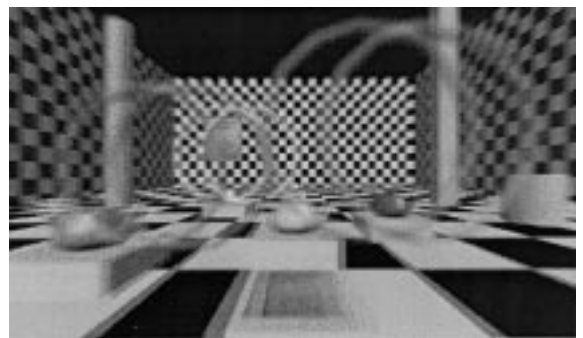


図7 両眼視 + 被写界深度 + 網膜感度



図8 右単眼視 + 被写界深度 + 衝立2

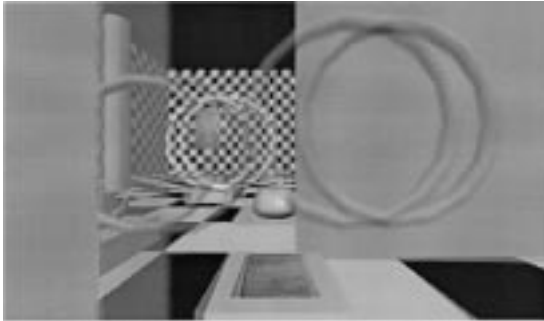


図9 両眼視 + 被写界深度 + 衝立 2



図10 両眼視 + 被写界深度 + 衝立 1



図11 独立分離両眼視 + 被写界深度

図10は中央付近に一枚の衝立があり、一番手前の文書を注視した場合の両眼視像である。両眼視の場合にはいずれも衝立の周辺における錯視の程度が見て取れる。

5.3 両眼位置が独立分離で自由に換えられる場合

このようにもしも両眼が飛び出して別々に自由に伸び縮みと移動ができるならば、ピカソの絵にでも出てきそうな表も裏も同時に見えるような不思議なイメージが次々とできあがる。図11では左眼が右斜め前方、右眼が後方壁側から中央ティーポットを注視点として眺めた場合の分離両眼視画像である。

6. 討論 / 考察

本報告ではあくまでも単眼視時の物理的な網膜像を基に、両眼視時の第一次視覚野での両眼入力画像の認識強度の比重を同等としてシミュレーションを行った。(現実の両眼視では、左右眼の効き眼等の差異があったり、錯視時などの状況や本人の意志によって効き眼の変更が可能であると考えられる。)また視神経以降の視覚中枢の処理過程ではさらに高度の注意機構や選択機構などが働いているはずであるが、そうした二次処理についても反映をしていない。

今回眼の構造による見え方をシミュレーションしながら、関連したいくつかの疑問点も出てきた。たとえばなぜ眼球は飛び出さないか。

なぜ眼球は6cmくらいしか離れていないのか。

なぜ眼は二つで左右についたか、上下ではなぜ無いのか。このことが上下反転画像の提示に対して、わかりにくくなってしまう原因にもなっていると考えている訳であるが、これは重力の向きに起因する対象性に関係しているように思われる。

片目ではなぜ歩きにくい。一般的には奥行き認知ができないためと説明されている。それも一因と考えられるが、それだけではない。体中線を基準とした両眼座標系に慣れた運動系(肉体)に対して、片眼では、その片眼を基準とした(体中線を通らない)片眼座標系によって空間把握がなされると考えられる。従って片眼歩行時には片眼座標系から両眼座標系への座標変換を常にしながら肉体の運動制御をしなければならないことが、原因ではないかと推測している。

両眼視差による錯視(注視文字近辺以外は2重に見える)を見る限り、片眼の方が文書文字を読みやすそうである。しかしなぜ人間は両目を使って読むのか。点字文書を読むときや触図を認識するときには片手よりも両手を使った方が速く効率がよいことがわかっているが、眼の場合にも共通の要因が働いているような気がしている。

現状行われている両眼立体視の画像や映像では、どこまで行ってもある種の不自然さは残る。真のリアリティのためには眼球レンズを模擬した遠近ボケと両眼視による錯視現象の実現、そのためには両眼のフォーカス検知に連動した提示画像制御機構が必要かもしれない。

絵画と写真は全く別物である。絵画という写実画とは多焦点積分画である。結局見えているようには描けないのである。

今回は簡単のため瞳孔サイズを直径約8mmのレンズとして近似したが、実際の所、被写界深度は瞳孔の大きさ(2~8mm)により変化する。暗い所ほど瞳孔が

広がるため、被写界深度は浅くなり、ピンボケ度は大きくなる。リアリティ表現を追求するならば、こうした外界要素も考慮する必要があるだろう。

7. おわりに

現在のVR映像では全焦点画像を左右両眼に提示する手法が基本となっており、被写界深度によるピンボケの制御や錯視画像の提示が十分にできていない。従来のような多焦点画像を用いるのではなく、眼球の向きと焦点位置を把握し、その結果に応じて、周辺画像のピンボケを制御できるような機構も必要と思われる。

今回提示の網膜像はフィルムと同じく矩形の枠で切り取った形となっているが、本来は網膜画像にははっきりとした境界はなく、ぼんやり漠然とした縁が意識されるにすぎない。このぼんやり感は、網膜投影面が球形凹面形であり周辺では斜投影になってしまうことによる画像品質の低下および周辺に至ると網膜細胞（錐体細胞）の単位面積あたりの密度が徐々にではあるが低くなることによる検出精度の低下とに関係があるかもしれない。そうした構造をシミュレートして網膜像イメージを再現してみたいと思っている。

引用文献

- 1) 田崎京二他：視覚情報処理、初版、朝倉書店、1990
- 2) 乾 敏郎：Q & A でわかる脳と視覚 - 人間からロボットまで -、初版、サイエンス社、1995
- 3) OpenGL ARB：OpenGL Programming Guide (日本語版)、初版、アジソン・ウエスレイ、1993