

手作業や手計算を重視したCG教育

斎藤 隆文

東京農工大学 工学部 情報コミュニケーション工学科

概要：

情報系学科の専門科目としてのCG教育において、講義とともに手作業による演習を行うことを試みている。演習課題は、主として幾何的な作図により具体例を得るものや、身のまわりのシーンに基づく思考実験などである。それによって、講義で学習した内容を自分で活用できる力を養うことを目指す。また、CG技術の理解を高めるとともに、入力画像の撮影にも役立たせることを目的として、カメラについてCGと関連付けて教えることを試みている。

Education of Computer Graphics Enhanced by Hand Working and Hand Calculation

Takafumi SAITO

Department of Computer, Information, and Communication Sciences
Tokyo University of Agriculture and Technology

Abstract:

In education of computer graphics for students who major computer science, the author tries to give them the original practices that require hand working. Subjects that require geometric drawing and those based on deep consideration of familiar scenes are included in the practices. It aims that the students get ability to apply the theories learned in the class onto actual situations. Also, the author tries to teach about cameras as the related topics of computer graphics.

1. はじめに

近年、学生を指導していて感じることだが、彼らの多くは、専門用語、公式、問題の解法などを憶え、試験問題を解く能力には長けている。しかし、それが実践的な場面、例えば卒業研究や大学院での研究活動の中で、授業で修得した内容を応用すべき場面に来て、それが活かさないことが多い。

CG分野の研究では、理論や手法を追試したり新たに提案する場合、計算機上で自らプログラムを作成して実験することが多い。このとき、誤りなくプログラムを作成することが、学生にとっては相当に難しいようである。CGのプログラムは結果が画像の形でビジュアルにわかるから、他の情報工学分野と比較すればデバッグは楽なはずである。にもかかわらず、多くの学生は、結果画像の詳細な検討をしない。数式をただそのままプログラムに翻訳し、動かなければ「先生、できません」、それらしい結果が出れば「先生、できました」とくる。出てきた画像を見ると、プログラ

ムの意図とは矛盾する部分が散見されるのだが、学生はそういった点になかなか気づかない。

原因の一つは、「結果が自分で予測できない」ことにある。与えた入力データに対し、どのような出力画像が得られるのか、明確なビジョンを持たずにプログラミングを行っている。漠然と予測できても、肝心な部分（個々の手法で生じるべき現象、生じるはずのない現象）に目が行かない。すなわち、授業で習った内容が、実際のプログラムや結果の検証に活かされないのである。

東京農工大学では、情報系学科の専門科目として、表1に示すようなCGの科目が開講されている。このうち筆者が担当する講義においては、授業時間中に、手作業や手計算による演習を積極的に導入している。それにより、習った内容を実際に活用できる力を身につけさせることを目指している。また、CG技術の理解を高めるとともに、入力画像の撮影にも役立たせることを目的として、カメラについてCGと関連付けて教えることを試みている。

表1．東京農工大学におけるCG関連科目

工学部情報コミュニケーション工学科および大学院工学研究科電子情報工学専攻での開講科目を示す。太字の科目は、筆者が担当するものである。

学年	科目名	種別	内容
3年	コンピュータグラフィックス	講義	座標変換，投影，モデリング，レンダリングなどの基礎
3年	コンピュータグラフィックス演習	演習	プログラミングによるCGの演習
4年	コンピュータエイデドデザイン	講義	いわゆるCADに限定せず，3年の講義の続編として，CG全般を扱う
修士	ビジュアルコンピューティング特論	講義	CGおよび関連分野の中からトピックスを選び，オムニバス形式で講義
博士	形状モデリング工学特論	講義	輪講形式による論文紹介

2．CG教育と授業形態

浪費し，十分な効果が得られないこともある。

大学の授業でCGを教える場合，主として以下の形態が考えられる。

(1) 講義

最も一般的な授業形態である。教官が黒板，OHP，プロジェクタ等を用いて，必要事項を学生に説明する。授業内容は，教科書あるいは教官独自の講義ノート等に沿って進める。

一般に，講義を行うことは授業として不可欠である。しかし，講義だけで学生が内容を修得することは非常に難しい。そのため，何らかの演習を併用する必要がある。

(2) 紙による演習

演習課題をプリントなどで配布し，授業時間中に学生に解かせる。場合によっては，黒板に学生の解答を書かせる。最後に，教官が正解を示し，解説を加える。

数学などでは有効な方法であるが，CGの場合，紙と鉛筆で結果画像は得られないため，それだけで内容を十分に理解できるような演習課題を作成することは困難である。

(3) プログラミングによる演習

コンピュータサイエンス分野では，講義で得た知識や理論を実際に身に付ける方法として，プログラミングの課題を与え，その中で教わったことを実際に使わせることが，しばしば行われる。

実践的な力をつける意味では最良の方法である。しかし，その分，多大な時間を要する。このため多くの課題を与えることができず，重要な内容に限定せざるを得ない。また，プログラミングの基礎ができていることが前提となる。プログラミングの苦手な学生は，CGの内容以前に時間を

(4) 電子教材による演習

学生が各種パラメータを設定すれば，結果を表示するようなツールを作成し，それを使用して演習を行う。優れたツールの例として，西田らによるWebベースのCG技法の教育システム [1] が挙げられる。学生としては，結果を手軽にかつビジュアルに得られるため，興味深く学習することができる。また，パラメータの設定を自分の意志で様々に変更できるため，主体的な学習が可能である。

ただし，手軽に結果が得られるだけに，学生は「わかったような気がする」ものの，現実に理解しているとは限らない。便利なツールを使用することで節約できる時間と労力を，より高度な思考に向けることができる学生は，大きく進歩する。一方で，何も考えずに結果を眺めているだけの学生は，ほとんど進歩がない。

電子教材においては，ツールとしての優劣のみならず，それを使って学生に深く考えさせることができるかどうか，成否を決めると考えられる。そのためには，適切な演習課題の設定が必要である。

3．手作業による演習

筆者は，担当するCG関連の講義(表1)において，コンピュータを使わない手作業の独自の演習を織り交ぜることにより，本質を理解し応用力をつけさせることを目指している。本章では，これについて解説する。

3.1 講義方法と演習の位置付け

筆者の担当する講義科目では，いずれも筆者独自のカリキュラムで授業を進めている。学部の授

業では教科書を用いる(現状では [2] を使用)が、教科書に沿って進めるのではなく、数式や実例など必要な部分だけを参照している。講義において、難しい理論や数式の導出などは極力避け、「詳細について興味のある者は教科書や参考書を見るように」で済ませる。その分、理論や数式の本質的部分を、具体例や応用例を織り交ぜながら、なるべく平易に解説するよう心がけている。さらに、学生が自ら考える機会を与えるために、授業時間の一部を演習に充てる。

演習課題は、幾何的な作図により具体例を得るものや、身のまわりのシーンに基づく思考実験などが主である。参考書に出ているような数式の導出や、数式に当てはめるだけの単純な計算問題は行わない。個々の課題ごとに異なるが、15~30分の時間を与え、個人ごとに、もしくは小グループに分けて討論させることにより、解かせる。正解を出すことよりも、様々な角度から考えることを奨励している。

3.2 演習課題の具体例

(1) 多面体の境界表現と集合演算

[課題 1]-----
立方体を一つの平面で切断したときにできる多面体形状は、全部で何通りあるか、考えてみよう。ただし、頂点、稜線、面の位相関係が同じであれば、同一種類と考えよ。

- まず、切断面が立方体の頂点を通らない、という条件をつけて考えよ。
- 次に、切断面が頂点を通る場合も含めて、すべての場合を考えよ。

課題 1 は、簡単な集合演算の結果と、そのときの頂点、稜線、面の位相関係を、自分の頭で考えさせるものである。

多面体を境界表現で記述する場合、頂点の座標と、稜線、面の位相関係が必要である。また、ソリッドモデルは、集合演算を用いることで、さまざまな形状を作成することができる。

これらの内容は一見易しそうに見えるが、プログラムを作成にはかなりの実力を要する。データ構造とその操作など、プログラムの設計力もさることながら、課題 1 に示したような 3 次元形状の具体例を手作業で作成する能力が、デバッグ効率を大きく左右する。

(2) Bezier 曲線

[課題 2]-----

- 図 1 の制御多角形で定義される Bezier 曲線の概形を予想して描け。

- 図 1 の制御多角形で定義される Bezier 曲線の概形を、細分割法によって作図せよ。
- 4 点 $(-2,0)$, $(-2,4)$, $(2,4)$, $(2,0)$ をこの順に control point とする 3 次 Bezier 曲線の概形を描け。
- 上記 c) の曲線は、ある 3 次曲線の一部である。両端を延長するとすれば、曲線はどのように続くであろうか？ 推測せよ。

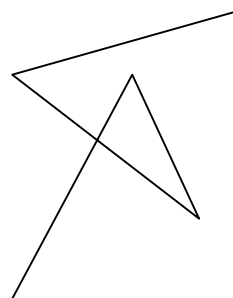


図 1 Bezier 曲線の制御多角形

Bezier 曲線をはじめとする曲線、曲面理論は、数式が多く出てくるだけに、本質的な理解は難しい。しかし、細分割法を知っていれば、制御点がどう配置されていても、かなり正確に曲線を作図することができる。曲線をプログラムで作成するのみならず、ドロー系ソフトで制御点を与えて自由曲線を描画する際にも役立つ。

課題 2 は、以下のような順序で行う。

- Bezier 曲線の定義(数式)を説明し、いくつかの曲線の実例を見せる。
- 課題 2 a) を解かせる。
- 細分割法について説明する。
- 課題 2 b) を解かせる。
- Bezier 曲線の性質(端点での接線方向, 凸包性など)を解説する。
- 課題 2 c), d) を解かせる。
- 課題 2 c), d) の解説をする。

課題 2 a) は、実例から推測する訓練である。曲線の端点とそこでの傾きが正しく推測できれば合格点といえる。図 1 の例では、多くの学生はループのある曲線を描く。b) では、細分割が正しく行えれば、ほぼ正確な曲線形状が得られる。なお図 1 の場合、正しくはループは生じない。

課題 2 d) は発展課題である。推測の手がかりとして、パラメータ t の 3 次式という条件から、 x, y の遠方での振舞いを考える方法がある。正確な曲線形状は、細分割を内分比ではなく外分比で与える、もしくは細分割の逆操作(細分割の結果として端点の一方が得られるような制御多角形を求める)を行うことにより、求められる。

なお、大学院の講義では、Bezier 曲線に加えて、B-spline 曲線や有理 Bezier 曲線についても、手作業での作図方法を説明し、演習を行っている。これらは、米国 Brigham Young 大学において Tom Sederberg 教授が行なっている Computer Aided Geometric Design の授業に基づいたものである。

(3) 本影と半影

[課題3]-----
地球から太陽までの距離はおよそ 1.4 億 km、太陽の直径はおよそ 140 万 km である。地球上で太陽が真上から照らしている状況下で、地上 6m の空中に直径 10cm のボールがある場合、地面にはどのような影が生じるだろうか？ 同じボールが地上 12m の空中にある場合は、どんな影になるか？

線光源や面光源に対して、本影のみならず半影が生じることは、概念としては容易に理解できる。これに対し、具体的な光源と物体に対して本影と半影の形状を求めることは、多くの学生にとって難しいようだ。だが、それができないと、自分でプログラムを作成しても正しいかどうかわからない。既存の CG ソフトを使用して作品を作る場合でも、影の予測ができないと、効果的な光源を設定するのに手間取ることとなる。

(4) テクスチャ画像の取得

[課題4]-----
以下のような目的でテクスチャマッピングに使うテクスチャ画像を写真撮影する場合、撮影時に留意すべき点や撮影後に必要な処理について考察せよ。

- a) 実存する校舎を CG で描く。建物形状は 1 個の直方体で近似し、各面を実写画像によるテクスチャで表現する。
- b) タイルが規則的なパターンで敷き詰められた広大な床面を CG で描く。タイルのテクスチャ画像は、実在するタイル張りの床を撮影することにより取得する。

実写画像をテクスチャとして用いることは、近年ますます重要度が増している。テクスチャマッピングの基本原理は非常に単純だが、実際に使う際には、適切なテクスチャ画像をいかにして得るかが問題となる。

課題 4 は、思考実験によって、現実にテクスチャ画像を使うときの問題点と困難さを予測し、その対策を考えるものである。

3.3 演習の効果

授業の最終回で、学生に感想を書いてもらっているが、手作業による演習に関しては、おおむね評判が良い。特に、「わかりやすい」「興味を持てた」という感想が多い。数式などと違い、作図を中心とした手作業を行うことで、具体例を実感として掴めることが、その理由だと推測できる。

しかし、その効果を卒業研究以降に反映させることは、やはり難しい。週 1 コマ、1 学期間の授業だけで、これを要求すること自体が無理かもしれない。現状では、研究室での個別指導により、フォローアップを行っている。

4. CG とカメラ

CG 教育を行っている、「CG を学ぶ人はもっとカメラのことを知るべきだ」と痛切に感じる。現代では、ほとんどの人が、日常の様々なシーンを記録するために、カメラ(フィルム、デジタル、ビデオなど)を使用した経験をもつ。しかし昔とは違い、今のカメラはシャッターを押すだけでそれなりにうまく写る。そのため、カメラに関する技術的知識(露出、レンズによる違いなど)を持っている人は、以前よりもむしろ減っている。

CG による画像生成(透視変換、輝度や色の決定)は、カメラをシミュレートしたものと考えることができる。このため、カメラを知ることができ、CG 技術をより深く理解することができるはずである。特に、イメージベース処理など、実写画像を CG に用いる場合は、カメラの知識は不可欠といえる。

筆者は、大学院の講義の中で 1 ~ 2 コマを使って、カメラや写真の技術的説明を、CG との関連性にも触れながら行っている。本章ではその概要について述べる。

4.1 レンズの画角と投影像との関係

レンズの焦点距離(画角)の違いと得られる像との関係について、多くの人は、

短焦点(広角) = 広い範囲が小さく写る

長焦点(望遠) = 遠くものが大きく写る

という認識は持っている。しかし、遠近感の違いについては、あまり理解されていないようである。

例えば、2 人が前後に 5m 離れて立っているシーンで、手前の人の体が画面上一杯に写るようにカメラを構えたとする。望遠と広角とでは、カメラ位置は違ってくる。このとき、後ろの人がどんな大きさで写るかを考えれば、遠近感の違いは容易に理解できる。ビルなどの直方体形状でも、手前の面と奥の面とで長さが違って写る。その違

いが大きいほど、平行線は歪んで写ることになる。

CGで不自然に歪んだ絵が出る場合、画角を大きく取りすぎていることが、しばしば見受けられる。カメラの「標準レンズ」は、人間の眼で見るのに最も近い描写ができるそうであるが、対角線方向の画角は50度足らずである。

4.2 光軸方向とトリミング

建築物や商品の撮影では、視線方向は地面から見上げる（もしくは斜め上から見下ろす）角度であるにもかかわらず、鉛直方向の線がすべて平行になるように写すことが、しばしばある（図2）。建築物を見上げる角度で普通に撮ると、上の方が小さくすぼまる（三点透視）。鉛直な線を平行に写すためには（二点透視または一点透視）、光軸を水平方向に向ける必要がある。しかしそれでは、建物を画面の中央に写すことができない。

一つの解決法は、画角の大きい超広角レンズを水平に向けて撮影し、建物部分を残して不要部分を切り取る（トリミングする）ことである。この場合、光軸は写真の中央点ではなくなる。実際のプロの撮影では、蛇腹カメラ等を使ってレンズをシフトすることにより、同等の効果を得ている。

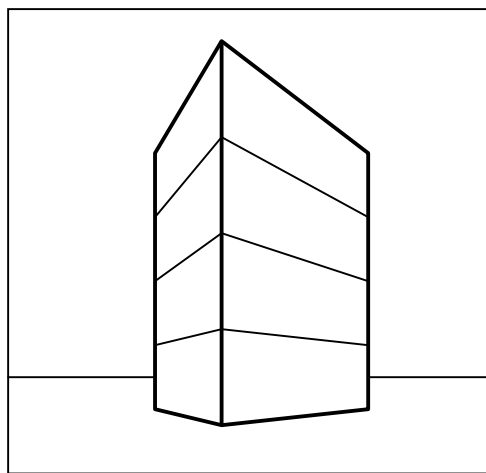


図2 建築物の写真の例

4.3 露出調整

物体からくる光の強さ（輝度）は、シーンによって大きく異なる。フィルムや CCD などの感光体は、適度に反応する光量のレベルが決まっているため、それに合わせてレンズから入る光量を制御する必要がある。これは、「絞り」によるレンズの有効口径の制御と、「シャッター速度」による光を取り入れる時間の制御との組合せにより、実現される。ほとんどのカメラでは自動化されている（AE = Automatic Exposure）。

この制御がうまくいかないと、画像は明るすぎたり、暗すぎたりする。しかし、ネガフィルムならプリント時に、デジタル画像なら画像処理によって、撮影後でも露出調節を行うことができる。ただし、フィルムや CCD が反応する輝度の範囲（ラチチュード）や、デジタル画像で扱う画素値は有限であるため、それを超えた輝度は表現できない。輝度が大きすぎる部分はすべて白となり（「白とび」と呼ぶ）、逆に小さすぎるとすべて黒となる（「黒つぶれ」と呼ぶ）。このような部分は輝度情報が失われるため、後で調節を行うことは不可能となる。

4.4 光源の色とホワイトバランス

人間の眼やカメラに入ってくる物体（被写体）の色は、光源の色と、物体固有の色（表面の反射特性）との組合せによって決まる。このことは、CGの基本の一つである「Phongのシェーディングモデル」にも反映されている。しかし、人間の眼には、主として物体固有の色が認識される。これは、光源の色の違いに眼が順応するためで、光源が異なっても見え方はさほど左右されない。一方、フィルム等では絶対的な色が記録される。すなわち、光源の色によって、物体の色は大きく変化する。このため、眼で見たのとは異なった色合いの写真ができることになる。

眼に見えるのと同じ色をフィルムに記録するためには、光源の色を知り、それに合わせた特性のフィルムを使用することが必要である。もっとも、一般用に販売されているフィルムは、デライトタイプ（昼光用 = 晴天時の屋外用）がほとんどであるし、CCDは取り替えるわけにいかない。そこで、光源ごとに特性を合わせるために、レンズの前に色のついた光学フィルタを付けるか、CCDで得た色を画像処理で補正する。このような操作を、「色温度を変換する」「ホワイトバランスをとる」という。ただし、一般に使われるネガフィルムでは、写真店でプリントを行う際にある程度の色の補正が行われている。

4.5 ピント調節

カメラでは、レンズによる像をフィルムなどの面に結ばせることで、鮮明な画像を得る。しかし、結像位置は被写体までの距離によって異なるため、撮影の度にレンズとフィルムとの距離を調節する必要がある。これがピント調節である。最近のほとんどのカメラでは、ピント調節は自動化されている（AF = Automatic Focus）。

ピントを複数の距離の被写体に合わせることは、厳密には不可能である。そのため、近くの物体にピントを合わせると、遠くの物体はボケて写

る。しかし、ボケの量が十分小さければ、実用上はピントが合っているとみなされる。ピントが実用上合う被写体の距離は、1点ではなく、ある幅を持っている。これを被写界深度という。一般に、1) 絞りを絞るほど、2) レンズが広角であるほど、3) 被写体が遠いほど、4) フィルム等のサイズが小さいほど、被写界深度が深く、ピントの合う幅が広い。

5. おわりに

情報系学科の専門科目としてのCG教育において、手作業や手計算による演習の試みについて述べた。現在はまだ試行錯誤を繰り返している状況であるが、いずれは系統的なカリキュラムとし

てまとめていきたいと考えている。なお、手作業には簡単な作図が多く含まれるが、これは図学教育とも関連性がある。図学の考え方は、ある意味でCG教育に有効と考えられる。これについても、今後検討していきたい。

参考文献

- [1] 西田友是, 他, CG 技術系のための WBT コースと Java 教材の開発, 情報処理学会第 62 回全国大会講演論文集, 5D-04 (2001) .
- [2] 技術編CG標準テキストブック編集委員会編, 技術編CG標準テキストブック, (財)画像情報教育振興協会, 1999 .