
CG入門

- 歴史から最近の動向まで -

安生健一 土橋宜典
OLMデジタル/JST CREST 北海道大学/ JST CREST

第10回「計算機を用いた数学研究セミナー」GCOE セミナー
コンピュータグラフィックスと数学の接点
京都大学理学部3号館 110講義室

コンピュータグラフィックスの 歴史(1960年代～1999年)

安生健一
(株) オー・エル・エム・デジタル
<http://www.olm.co.jp/rd>
anjyo@olm.co.jp

黎明期 ～軍事／CAD／手描きアニメ～

- 1963年～1970年代
- 計算機性能は(今日みるような)描画力なし
- 想定されたコンピュータの画像生成への応用:
 - フライトシミュレーション
 - CAD (機械製品の設計とその可視化)
 - 手描きアニメ

コンピューターグラフィックスの歴史

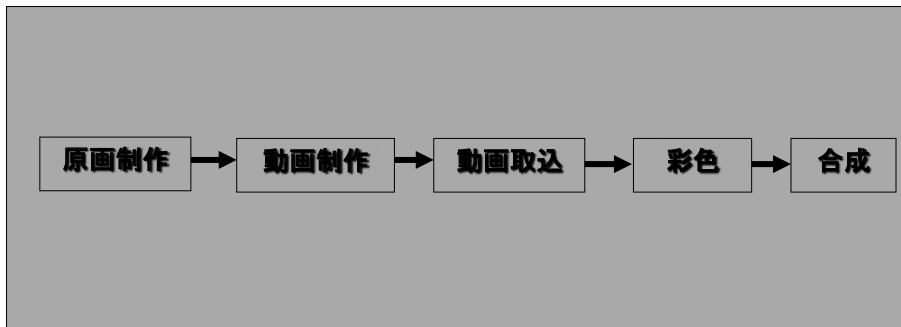
Sketch Pad

- Ivan Sutherland の学位論文(1963年)
 - コンピュータで三角形を描いた
 - ライトペンというデバイスの開発
 - 対話処理を想定
- 軍事応用
 - SAGE(半自動防空システム)のリアルタイム・オペレーション
 - 空海軍の訓練用フライト・シミュレータ

コンピューターグラフィックスの歴史

手描きアニメーション

- 効率向上を目指して
 - 従来の制作プロセス:



- コンピュータを使って、どうすれば効率よくできるか?

コンピューターグラフィックスの歴史

'70年代当初の技術開発の目的

- アニメーション制作プロセスの自動化
[自動中割り、彩色] → コスト低減
- 表現力の向上
[多重レイヤや特殊効果実現など]

コンピューターグラフィックスの歴史

In '70s: Utah大、NYIT、Cornell大、東映動画

- ◇ 代表的手法 ① 線分解と線形補間による自動中割り
[NYIT、Utah、etc.]
 - ・トレース線 → 線分への分解
→ 線分の両端座標の線形補間
 - ・複雑な場合は修正とキーフレーム追加で対処
- ◇ 代表的手法 ② 多角形ベースの補間方法 [アンティックス (英)]
 - ・トレース線 → 多角形への分解 → 閉図形としての変形
 - ・複雑な場合は修正とキーフレーム追加で対処

コンピューターグラフィックスの歴史

古くて新しい問題: 自動中割り

2次元平面上の単純な補間ではうまくいかない



- ◇ 表示対象は本来3次元だから？
- ◇ アニメづけはノウハウの固まりだから？
- ◇ 作り手はコンピュータが嫌いだから？

コンピューターグラフィックスの歴史

'70s~'80s: デジタルアニメ黎明期

- 「中割り自動化」へのこだわり
- Computerのパワー不足・高額な維持費
[ex. VAX11/780]

コンピューターグラフィックスの歴史

発展期 ~軍事/CAD/手描きアニメ~

- 1980年~1990年代
- 計算機性能は飛躍的進歩
- 1980年代はレンダリング全盛期
- 1990年代は百花繚乱
 - アニメーション研究も本格化
 - イメージベースレンダリング
 - 高品質リアルタイム表現への挑戦(GPU発展を促す)

コンピューターグラフィックスの歴史

Late'70s - '80s: CGはレンダリングの時代

- 続々と発表される表示手法:
 - Zバッファ法、スキャンライン法、...
- 光の反射屈折の取り込み: Ray-tracing (光線追跡法 T. Whitted '79)

コンピューターグラフィックスの歴史

Late'70s - '80s: CGはレンダリングの時代

- レンダリング方程式 (J. Kajiya, SIGGRAPH86):

$$L_o(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_{\Omega_x} f_r(x, \omega', \omega) L_i(x, \omega') \langle \omega', n \rangle d\omega'.$$

コンピューターグラフィックスの歴史

Late'70s - '80s: CGはレンダリングの時代

- 有限要素法を用いて解く (ラジオシティ):

$$L_o(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_{\Omega_x} f_r(x, \omega', \omega) L_i(x, \omega') \langle \omega', n \rangle d\omega'.$$



$$L_o(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_S f_r(x, x' \rightarrow x, \omega) L_i(x' \rightarrow x) V(x, x') G(x, x') dA'.$$

ここで

$$G(x, x') = \frac{\langle \omega', n' \rangle \langle \omega', n \rangle}{\|x' - x\|^2} \quad V(x, x') = \begin{cases} 1 & x \text{ と } x' \text{ が互いに見えるとき} \\ 0 & \text{上記以外するとき} \end{cases}$$

コンピューターグラフィックスの歴史

Late'70s - '80s: CGはレンダリングの時代

- ラジオシティ (radiosity): 拡散反射の場合に解く:

$$L_o(x, \omega) = L_e(x, \omega) + \int_S f_{r,d} L_i(x' \rightarrow x) V(x, x') G(x, x') dA'.$$



$$\begin{aligned} B(x) &= B_e(x) + \int_S f_{r,d} B(x') V(x, x') G(x, x') dA' \\ &= B_e(x) + \frac{\rho_d(x)}{\pi} \int_S B(x') V(x, x') G(x, x') dA'' . \end{aligned}$$

コンピューターグラフィックスの歴史

Late '70s - '80s: CGはレンダリングの時代

- ラジオシティ (radiosity): 拡散反射の場合に解く:

$$\begin{aligned} B(x) &= B_e(x) + \int_S f_{r,d} B(x') V(x, x') G(x, x') dA' \\ &= B_e(x) + \frac{\rho_d(x)}{\pi} \int_S B(x') V(x, x') G(x, x') dA' \end{aligned}$$



- 連立一次方程式

$$B_i = E_i + \rho_j \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} B_j$$

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r_{ij}^2} V_{ij} dA_i dA_j$$

B_i : 放射輝度 (ラジオシティ)
 F_{ij} : フォームファクタ
 ρ_j : 拡散反射率
 V_{ij} : パッチ間の可視性を表す関数

コンピュータグラフィックスの歴史

Late '80s - '90s: CGはアニメーションへ

- シミュレーション手法の発展
 - 物理シミュレーション (physically based modeling)
- キャラクタアニメーションへの挑戦
 - Motion capture data の利用と研究
 - 21世紀にはデータベース活用・学習論的方法も
- イメージベースレンダリング/モデリング
 - 写真情報から幾何情報、光源情報を推定する

コンピュータグラフィックスの歴史

Late '80s -'90s: CGはアニメーションへ

■ 物理シミュレーション (physically based modeling)

[例] 弾性変形シミュレーション

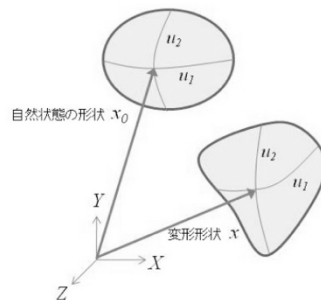
- ・ D. Terzopoulos et al. "Elastically Deformable Models" (1987)

- ・ 弾性体の方程式:

$$\mathbf{x}(u, t) = \mathbf{x}^0(u)$$

$$\mu \frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} + \gamma \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} + \delta_x \xi = \mathbf{f}$$

- ・ 同氏は 2005年にアカデミー賞
技術賞を受賞

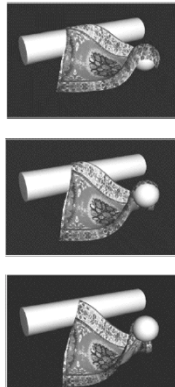


コンピューターグラフィックスの歴史

Late '80s -'90s: CGはアニメーションへ

■ 物理シミュレーション (physically based modeling)

[例] 固定された物体の上に自由落下するカーペットのアニメーション



コンピューターグラフィックスの歴史

Late '80s - '90s: CGはアニメーションへ

■ キャラクターアニメーションの研究

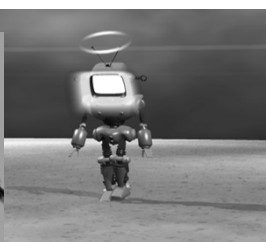
[例] 群衆、頭髪の表現、動きの特徴抽出



C. Reynolds In: SIGGRAPH87



SIGGRAPH92



SIGGRAPH95

コンピューターグラフィックスの歴史

イメージベースモデリング

- 画像と幾何情報のハイブリッド手法
- 入力写真画像をもとに、3次元幾何情報とテクスチャで建築物を構成する (P. Debevec In: Siggraph96, Siggraph97)



コンピューターグラフィックスの歴史

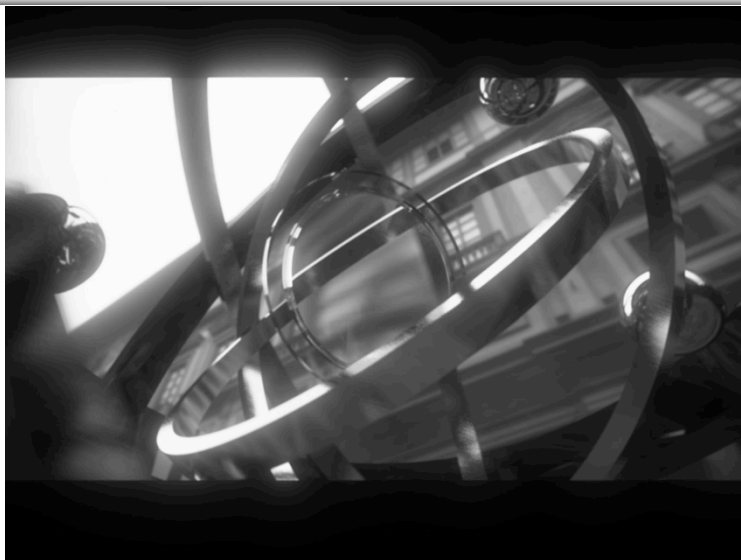
イメージベースモデリング

幾何情報とテクスチャを張り合わせる手法（形状は多角形ベースと仮定）



コンピューターグラフィックスの歴史

“Fiat Lux” (P. Debevec, U. California, Berkeley SIGGRAPH99)



コンピューターグラフィックスの歴史

Making Of “*Fiat Lux*”

- 状況設定: 聖ピータース寺院に巨大なドミノと金属球
 - 技術: Image-Based Lighting
 - 照明条件のモデル化 (Siggraph97)
 - 仮想物体との合成 (Siggraph98)
 - Image-Based Modeling
 - 寺院のモデル化 (Siggraph96, 97)
- <http://www.debevec.org/>

コンピューターグラフィックスの歴史

Making Of “*Fiat Lux*” (cont.)

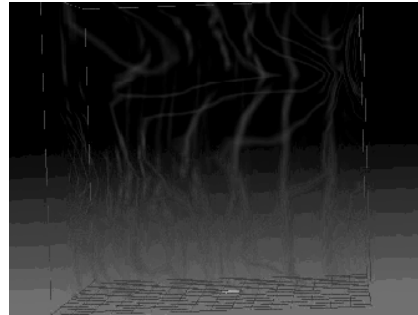
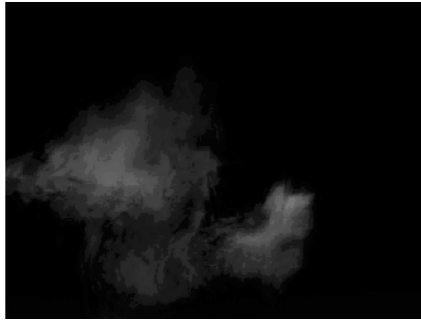
- 演出 (&ポスプロ): 神々しさを高める
 - 明らかに架空でしか存在し得ないものと
実在物との対比
 - ソフトフォーカス、ビネット、フレア
- 狙い:
 - IBRに「光りあれ」
 - ガリレオvs.カトリック教会
 - ~ 科学 vs. 宗教 ~ 真実 vs. 迷信

コンピューターグラフィックスの歴史

流体のシミュレーション

J. Stam, Alias|wavefront

- ✓ 簡易 (安定型) Navier-Stokes方程式の
ビジュアルシミュレーション



コンピューターグラフィックスの歴史

実写とCGとのリアルタイム合成

- 従来は「3D合成」

「手作業」
「フレームバイフレーム」

- * これからは「4D融合」へ



「リアルタイム vs. ハイクオリティ」から
「リアルタイム = ハイクオリティ」への転換

コンピューターグラフィックスの歴史

成熟期 ～高速化／応用技術／細分化～

- 2000年～現在
- 計算機性能の飛躍的な向上
- より高速な表示
- より高度な物理シミュレーション