

“自然のCG”技術の実用化時代

岩手大学工学部情報工学科

千葉 則茂

.....
自然景観の映像表現など自然らしさの表現のためのCG技術、すなわち“自然のCG”技術が実用化時代を迎えている。それは、“使える技術の確立を目指した研究”が期待されており、CG研究の環境整備をも急がなければいけないことを意味している。

本稿では、まずこれまでの自然のCG研究を概観し、自然のCG研究の広がりについて述べる。次に、自然のCG技術に関連したツールやデジタルコンテンツが数多く開発・流通され始めていることを概観し、自然のCG技術が実用化時代に入ってきたことを示す。さらに、実用化に向けた研究開発の具体例として筆者らの活動を紹介し、今後に期待される自然のCG技術の実用化・体系化研究について整理する。
.....

自然のCG研究の広がり

自然物や自然現象の映像表現を行うためのCG技術を“自然のCG”技術と呼ぶことにする。この自然のCG技術に関する研究には、個別の自然現象の表現法に関する研究が要求されるため、汎用技術の開発とは縁遠く、特異な興味を持った研究者が行うものという印象が強かったと思われる。しかしながら、自然を含まない景観を探す方が難しく、また以下のような広い応用分野が考えられるため、CGにとっては必須の技

術であるといえる。

- 特殊視覚効果を持つ映像コンテンツ
- 造園・庭園設計用CADシステム
- 土木建設用景観シミュレーションシステム
- 各種オペレータ養成シミュレータ
- 創作的アミューズメントシステム
- VR景観環境の生成

事実、これまでに研究がよく行われてきた対象を中心に実用的な表現ツールが提供されてきており、ますます個別現象の表現技術の開発に対する期待が大きくなってきている。また、これらの個別現象に対する表現技術の開発が、基本的なCG技術である形状モデルを生成するモデリング技術や、CG映像を生成するレンダリング技術をより豊かにするという良好な副作用も生み出してきている。以下では、まずこれまでに研究されてきている表現対象と表現技術の広がりについて概観する。

表現対象の広がり

これまでには、CG研究の対象として、図-1に示すような自然物・現象が研究されてきている。このうち、基本的な光現象の表現技術はCGの基本技術であるレンダリング技術におけるシェーディング（陰影付け）モデルの研究として発展してきており、CGの中でも精力的に研究され

てきた分野である。また、人間に関する研究も、その運動、行動、表情、皮膚、髪、および衣服の表現など、広い問題を抱えるため、大きな研究分野を形成している。そのため、これらの分野は、自然のCG研究とは区別して扱われることが多い。

図-1に示す対象には、すでに数10編の論文が報告されているものから、いまだ1, 2編しか存在しないものもある。これらの中でも最もよく研究されてきたのは、樹木・草本であり、続いて山岳地形や、炎・煙、雲・霧などのガス状物体や、海・波などが挙げられる。他の対象については、いまだ研究例は少ないが、この6月に開催されるCGI (CG International) 2000では、自然のCGが特集テーマとして取り上げられており、さまざまな対象に関する研究が報告されるものと期待している。なお、本学会「グラフィクスとCAD研究会」集中研究集会においては、すでに1989年度と1991年度に自然のCG関連の特集が組まれている^{1), 2)}。ちなみに、1990年度は人間の表現を特集している。

表現技術の広がり

これまでには、図-2に示すような自然のCG特有の表現技術が開発されてきた。自然のCG技術研究の走

● モデリングの観点から

- ・自然景観の表現 : 樹木, 草本, 森林, 山岳, 炎・煙, 水流, 海, 波, . . .
- ・季節・天候の表現 : 紅葉, 雲, 霧, 稲妻, 雪, つらら, 雨粒, . . .
- ・経年変化の表現 : 腐食, 汚れ, ひび割れ, 浸食・風化, . . .
- ・質感の表現 : 土, 粘土, 粘性流体, 布, 毛, . . .
- ・動物の表現 : 人間, 鳥, 魚, 虫, 蛇, 貝殻, 犬, 蝶, . . .
- ・その他の表現 : 沸騰, オーロラ, 埃・塵, . . .

● レンダリングの観点から

- ・光現象の表現 : 拡散反射光, 鏡面反射光, 透過・屈折光, 間接光, 天空光, 火面, . . .
- ・質感の表現 : 散乱光 (森林, 雲, 霧, 雪, 毛, . . .), 干渉光 (布, 真珠, シャボン玉, . . .), . . .

図-1 これまでに研究対象とされた自然物・現象

● モデリング

・モデリング技術

手続的モデル

フラクタル

1/fノイズ, 中点変位法 : ランダムテクスチャ, . . .

生成文法モデル : 草本, 稲妻, . . .

シミュレーション法

離散モデル

粒子ベースモデル

流動的關係モデル

生長モデル : 樹木などの生長点, . . .

運動モデル : 流体, 粘土, . . .

群の行動モデル : 動物, . . .

固定的關係モデル

質点-バネモデル : 弾性体, . . .

セルオートマトンベースモデル

: 植生, 繁殖, 腐食, 風化, 熱伝搬, 流体, 拡散-反応, . . .

粒子-セルオートマトン : 汚れ, 侵食, 波紋, . . .

動作・行動モデル : 飛翔, 遊泳, . . .

連続モデル

数値シミュレーション

差分法・有限要素法 : 流体, 弾性体, 拡散-反応, . . .

計測法

イメージベースモデリング : 地形, 樹木, . . .

インタラクティブ法 : 樹木・草本, . . .

・モデリングの視点

: 物理学的, 定性的, 現象的, fake, adhoc, . . .

・データモデル

ポリゴン, 曲面, ボクセル (ボリュームデータ), 2D/3Dテクスチャ (テクセルなど),

粒子, メタボール, セルオートマトン, . . .

● レンダリング

レンダリング技術

・3Dテクスチャモデル

等方型 (ボリュームデータ) : 雲, 雪, 炎・煙, 水煙, . . .

遠景樹木・草本, . . .

異方型 : 近景樹木・草本, . . .

・2Dテクスチャモデル : 遠景樹木, 雲, . . .

・3Dテクスチャレンダリング

散乱光型レンダリング : 雲, 雪, 樹木, 水煙, . . .

発光型レンダリング : 炎, 稲妻, . . .

・多重解像度レンダリング : 森林, 草原, 雲, 雪, . . .

3Dテクスチャ, LOD, . . .

・絵画調レンダリング : パース図, アニメ, マンガ, . . .

水墨画, 水彩画, ペン画, . . .

図-2 これまでに開発された表現技術

りは1980年代初めごろからのフラクタル手法によるものといえる。フラクタルブラウン運動や1/fノイズによる山岳地形の生成や、L-systemと呼ばれる生成文法などによる樹木や草本の生成である。その後、1/fノイズによる雲や炎・煙などのガス状物体の表現技術に関する研究が続いた。これらは、人工物体に対するインタラクティブな形状モデリング法に対して、確率的モデリング手法や手続的モデリング手法と呼ばれ、“データ増幅”の能力を持った自動生成法として期待された。一方、パーティクルシステムと呼ばれる粒子群による単純な運動シミュレーションにより火花状の噴出火炎の表現が、映像制作に用いられている。これがシミュレーション型の表現法の走りと思われる。しかし、本格的なシミュレーションによる表現法が提案されるのは、1980年代末から1990年代初めである。このころから侵食モデル、生長モデル、行動モデル、力学モデルなどのシミュレーションのためのモデル、計算法としてはいわゆる数値シミュレーション法や、粒子やセルオートマトンによるシミュレーション法など、シミュレーション型の手法の提案が相次いでおり、現在では自然現象のモデリング法の主流となっている。また、これらのシミュレーション手法には、流体力学や動力学などの既存の連続的な物理学モデルに基づき、有限要素法などを適用する物理学的シミュレーション法、現象の定性的な特徴に基づいた離散的なモデルによる定性的シミュレーション法、およびこれらの折衷的なシミュレーション法などがある。なお、物理学モデルに忠実なシミュレーションに対して、特に定性的シミュレーション法や折衷的なシミュレーション法は、視覚的な印象を重視したシ

ミュレーションであることからビジュアルシミュレーションと呼ばれることも多い。

最近ではまた、風化などの自然現象による形状変形効果を、いくつかの基本的な形状変形オペレータの組合せにより実現しようというアプローチも提案されている。一方では、実在の自然物を取り込むための画像計測法などイメージベースの手法も提案されている。また、草本のモデリングとして、基本的な部品の形状を表す関数や手続きをインタラクティブに組み合わせていくことにより形状生成を行う創作的な方法も提案されている。

大きな傾向としては、1980年代におけるパターン生成技術という造形的な手法の時代から、1990年代は、シミュレーションやインタラクティブな方法など、リアリティを重視した“使える”CG制作手法へと研究の重点が移動してきた時代であったといえよう。いずれにせよ、CGの応用分野は広いので、多種多様な表現法が開発されるのは好ましいことである。

一方、自然物・現象を表すデータモデルとしては、人工物のCGで標準的に用いられるポリゴンモデルに加え、雲などの空間の密度分布（ボリウムデータ）を表すボクセル（3次元配列）、森林や毛などの質感表現やエイリアシング除去の目的で用いられる3次元テクスチャ、粒子ベースのシミュレーション結果から密度分布を生成するための基本要素として用いられるメタボール（中心濃度が高く周辺で低くなる球状の密度分布）、シミュレーションやその結果としてのテクスチャや形状表現を行うための2次元や3次元のセルオートマトンなどが挙げられる。これらのボリウムデータや3Dテクスチャから直接画像を生成するポリ

● 対象別CG技術

- [1] 基本的な構成要素の表現
 - (1) 侵食地形、樹木、森林・草原、炎・煙、水流、積雪、・・・
 - (2) 岩場地形、爆発火炎、絹雲・層雲、・・・
- [2] 季節や天候景観の表現
 - (1) 紅葉、降雪、積雪・融雪、降雨、波紋・跳ね、・・・
 - (2) (広い空間での) 積雪・融雪、降雨・波紋・跳ね、・・・
- [3] 経年変化の表現
 - (1) 腐食、曲面上のひび割れ、浸食・風化、苔生し、・・・
 - (2) 木材の風化、汚れ、・・・
- [4] 動物の表現
 - (1) 蝶の飛翔、魚の遊泳、・・・
 - (2) 行動モデル、・・・
- [5] 柔軟物体のモデリング技術
 - (1) 粘土、・・・
 - (2) 粘性流体（溶岩流など）、・・・

● 基盤的CG技術

- [6] 多重解像度CG技術
 - (1) 3次元テクスチャ法、LOD法、・・・
 - (2) 異種モデル統合による多重解像度CG技術、・・・
- [7] 粒子ベースCG技術
 - (1) 粒子ベースCG・プラットフォームの設計、・・・
 - (2) 粒子ベースCG・プラットフォームの開発、・・・
- [8] 絵画調表現のCG技術
 - (1) 水墨画、水彩画、ペン画、・・・
 - (2) 自然現象の絵画調表現、・・・

● CG応用システム

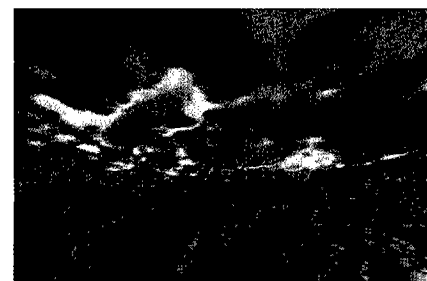
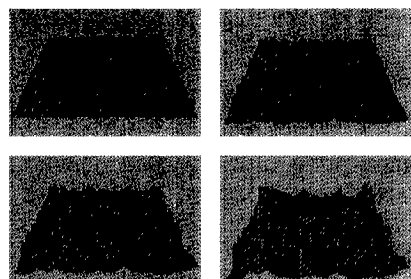
- [9] 創作的活動を支援するCGシステム
 - (1) 造園、盆栽、陶芸、・・・
 - (2) ハプティックディスプレイなどインタフェースの開発、・・・
- [10] CGと音の融合
 - (1) 音楽駆動によるフライスルー映像の生成、・・・
 - (2) 自然現象のサウンドモデリング、サウンドレンダリング、・・・

図-3 研究テーマ一覧

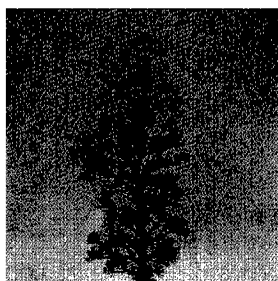
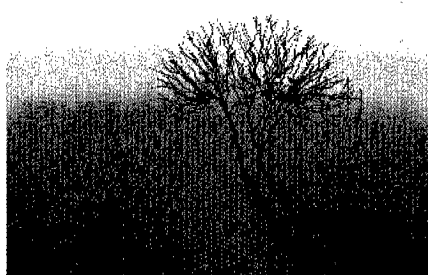
ームレンダリング技術も自然のCGの特徴である。また、密度分布から等密度面を切り出す手法を用いればポリゴンモデルを得ることができるので、水流など境界面が明確な物体の表現には通常のポリゴンベースのレンダリング法も適用できる。

自然のCG特有のレンダリング法としては、質感表現のための散乱光型ボリウムレンダリングが挙げられる。一般的にレンダリングアルゴリズムの基本は、ピクセル位置でのシーンのサンプリングであるため、エイリアシングの問題が発生する。特に、遠景の森林のように微細な構造を持つ物体のレンダリングでは“ざらつき”が顕著となる。アニメーションでは、このざらつきが“ちらつき”ため、画質の低下はさらに顕著となる。そのため、このエイリアシングを軽減する方法として、物

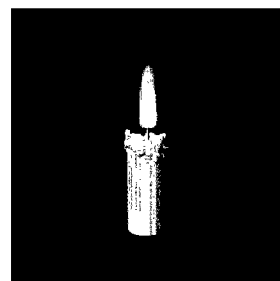
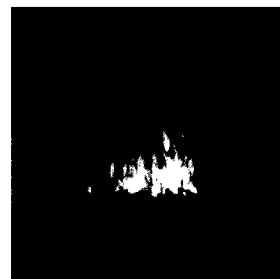
体を平滑化されたボリウムデータに変換してボリウムレンダリングを適用するという手法が提案されている。このエイリアシングを除去する方法が、レンダリングの高速化のために視点からの距離に応じて解像度を下げたモデルを使うという多重解像度技術（LOD: Level of Detail）とも自然にマッチするため、実用的な手法として詳細化されることが期待される。また、一方では写実的なレンダリングではなく、絵画調やテクニカルイラスト風の非写実的な画像を生成する技術（NPR: Non Photo-realistic Rendering）も、自然のCGの分野において重要な研究テーマとなると考えている。もちろん、インクの滲みなどの自然現象のシミュレーションや、自然な手描き風の特徴を出すことが技術的な課題となるというだけでなく、自然景観



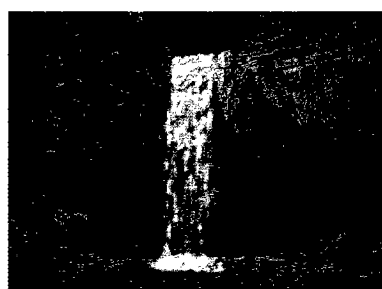
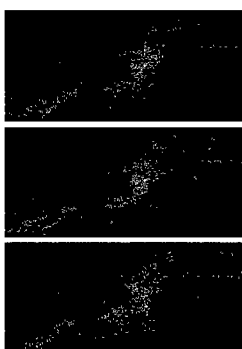
(a) 侵食地形：粒子による水流のシミュレーション，セルオートマトンによる侵食・運搬・堆積モデル



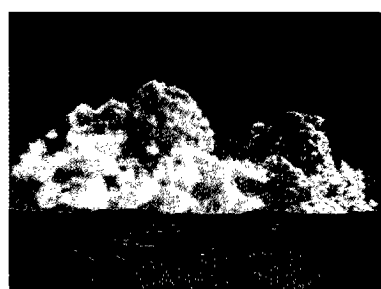
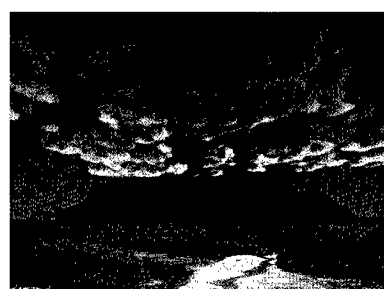
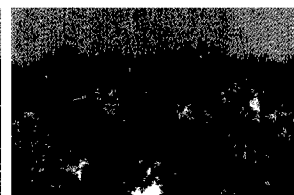
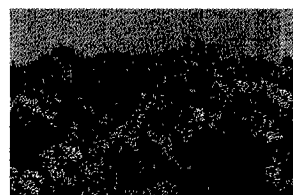
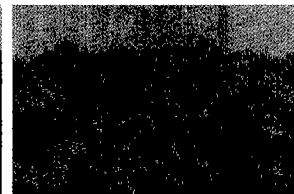
(b) 樹木：向日性や頂芽優性などの生長制御機能を考慮した生長モデル



(c) 炎・煙：層流や渦などの気流プリミティブによる気流生成，粒子による運動シミュレーション，3Dセルオートマトンによる熱伝搬シミュレーション



(d) 水流：粒子による運動シミュレーション，ボクセルによる体積表現



(e) 積雲：気流生成，粒子による水蒸気上昇モデル



(f) 紅葉：老化と日射量に伴う色素量変化モデル，地形の解析に基づく植生モデル

図-4 CG画像例

の絵画調画像の生成自体も有効な技術である。たとえば，建設関連のペース図，アニメーション，マンガの背景，挿し絵など応用は広い。

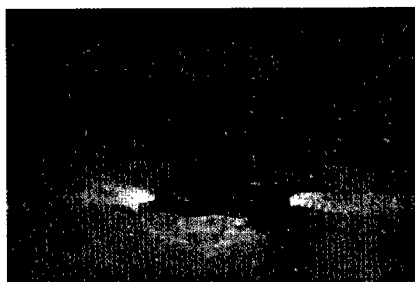
自然のCGの具体例

図-3に，上述した自然のCG技術

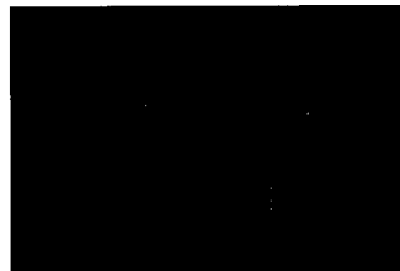
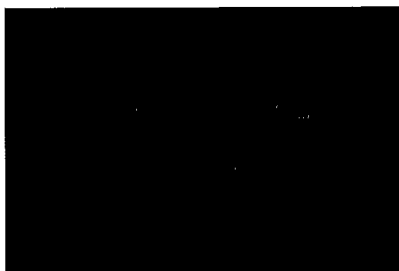
の具体例として，筆者らの研究テーマの一覧を示す。(1)で示すテーマ(対象)はこれまでに手がけてきたもので，比較的成果が出ているもの，(2)で示すものは最近始めたもので，今後力を入れたいものである。図-4に，主な研究成果についてCG画像例を示す。これらは，図-2に示す

表現技術に基づいている。ここでは，モデリング法の基本的な手法について少し説明を加えておく。

なお，以下のサイトに，研究成果であるCG画像やアニメーション，論文リストとアブストラクト，また自然のCG研究に役立つような資料を集めた自然のCG資料館を開設し



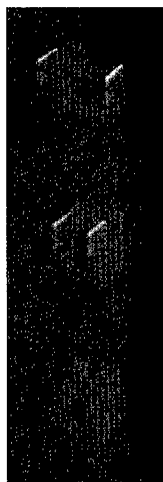
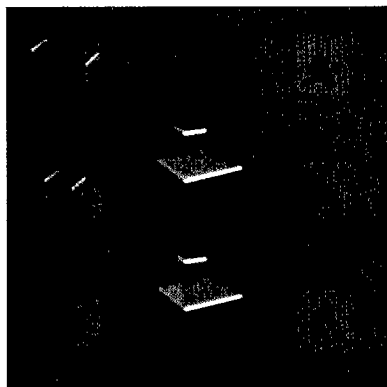
(g) 降雪・積雪・融雪：気流生成，粒子による運動シミュレーション，3Dセルオートマトンによる熱伝搬，融解，沈み込みシミュレーション



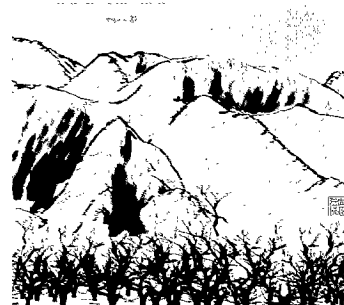
(i) 苔：土壌，水量，日射量，蒸発量などを考慮した繁殖モデル



(h) 錆と釉薬の貫入：多面体上で動作するセルオートマトン，腐食の成長モデル，応力分布を考慮したひび割れモデル



(j) 粘土：特殊な相互作用力を持つ粒子モデル



(k) 水墨画：2Dセルオートマトンベースの紙，筆，墨の移動・拡散モデル，3D形状モデルから筆のストローク生成

図-4 CG画像例（続き）

ているので，興味を持たれた方は参照されたい。

<http://www-cg.cis.iwate-u.ac.jp/>

自然のCG技術の実用化動向

図-5に示すように，自然のCGに関連するツールやコンテンツが多く

現れてきた（ここでは，製品を網羅することではなく，すでに多くの製品が出ていることを示すことが目的であるので，一部の例示になることをご容赦願いたい）。

同じツールでも，趣味を目的にしたようなものから，本格的な映像制作を目的としたものまである。さら

に，個別現象の表現ツールから建設計画のための景観シミュレーションを行うものなど，目的も扱うスケールもさまざまである。趣味を目的としたようなものでも，今後それぞれの応用分野のニーズに合わせた開発が進められ，本格的な映像制作や景観シミュレーション向けのツールへ

と発展する可能性は大である。もちろん、その逆もあり得る。これはアミューズメントを中心としたインタラクティブコンテンツにとってもその可能性は大であり、コンテンツとして深められるとともに、ツールとしても幅広く成長することが期待できる。

なお、自然のCGに関連する映像制作法やツールに関する解説記事が、商業雑誌⁴⁾にも期を同じくして掲載されているので参照されたい。自然のCGに対する期待と実用化時代をさらに強く感じ取っていただけのものと思う。

筆者らも、前述した研究成果を実際のコンテンツ制作に貢献させるため、地元企業との連携によりコンテンツやツールとして製品化を行っている (<http://www.jfp.co.jp/>参照)。製品化のための研究開発には、国や県の支援事業や大学の共同研究制度を活用している。現在開発中のものを含めると、図-6のような製品開発を行っている。図-7に、デジタル・ランドスケープによるCG画像を示す。デジタル・ランドスケープに対しては、土木など大規模建設用景観シミュレーション、映像制作、ゲーム開発、植物関連研究などの分野から関心が集まっている。3Dテクスチャ・シェーダは現在開発中であるが、汎用的な多重解像度CG技術を提供するものであり、自然のCGの基盤ツールとして位置づけられていくと考えている。これらのツール開発は、次章で述べる体系的な研究開発の1つとして位置づけている。

バーチャル・ガーデニングやバーチャル盆栽は、アミューズメントはもちろん、造園設計・プレゼン用、造園・造形教育利用、住居用景観シミュレーション用などとして展開することが“実直”な応用分野からも期待されている。

● ツール

- 土木・造園CAD : 景観シミュレータ (建設省), ガーデン倶楽部, SUCCESS 3D, など多数
- 景観ソフト : VistaPro, Bryce, WORLD BUILDER, World Construction Set, Natural Scene, Designer, Terragen, カシミール, Mountain View, など
- 景観要素 : Tree Professional, AMAP, TreeDruid (樹木), Digital Nature Tools (波, 空, 雲,), Fractalizer, HyperVoxels, PyroCluster, Particle系 (雲, 炎・煙,), RealFlow, RealWave (流体), など多数
- 絵画調CG : 水彩, 硯絵, EVA (絵画調), ElectricImage (アニメ), Piranesi (パース), など多数

● コンテンツ

- ガーデニング : THE VIRTUAL GARDENING, ザ・マイクロコズミック (日本庭園), ガーデニングフラワー, パラ〜趣味のデスクトップ, Garden Designer Global Software Publishing, Garden Encyclopedea 2, など
- 素材 : 添景工房, Shade 実用3Dデータ集, 花の森, など

図-5 自然のCG関連ツールとコンテンツ

● ツール

デジタル・ランドスケープ: 自然景観シミュレータ

基本技術:

- 樹木の生長シミュレーション技術
- 侵食地形のシミュレーション技術
- 植生のシミュレーション技術
- 紅葉のシミュレーション技術
- 多重解像度レンダリング技術

3Dテクスチャ・シェーダ: 高機能多重解像度レンダラ

基本技術:

- 3次元テクスチャのモデリング技術
 - 3次元テクスチャのマッピング技術
 - 3次元テクスチャのレンダリング技術
 - 3次元テクスチャの高速レンダリング技術
- (注: 3次元テクスチャについては異方性も実現)

● コンテンツ

バーチャル・ガーデニング: 造園用アミューズメントソフト

基本技術:

- 樹木の生長シミュレーション技術
- 草本の表現技術
- 季節・天候の簡易表現技術
- 造園モデリング技術

バーチャル盆栽: 盆栽アミューズメントソフト

基本技術:

- 樹木の生長シミュレーション技術
- アミューズメント化技術

図-6 研究成果に基づく製品化開発

期待されるこれからの 実用化・体系化研究

CGの基盤的な技術であるモデリング技術やレンダリング技術に関する研究開発から、今後はCGの表現力を高めるための表現対象寄りの研究開発がより盛んになると思われる。筆者は、自然のCGに関連する特にコンテンツ制作ツールは、

- (1) 表現対象別CGツール,
 - (2) 技術ベースCGツール, および
 - (3) 応用分野別CGツール
- とに分化して開発されていき、自然のCGの技術もそれに従って体系化されていくものと考えている。(1), (2)に関する具体的なツールの例として、図-8に筆者のイメージを示す(対象別CGツールの名称は例示にすぎない)。



図-7 開発製品によるCG画像例 (株)JFP提供

(1), (2) は映像制作用汎用ツールであり, (3) は (1), (2) の技術をベースとして開発される特定分野向き専用ソフトである. (1) は, 特定表現対象向きの高機能な表現力を持ったツールで, ユーザの負担は少ない. (2) は, 個別の表現力は (1) に劣るが, 汎用的な基本ツールとして開発されるため, ユーザはこれらのツールを組み合わせることにより, あらかじめ想定されていない現象の表現も創作的に行える. いずれ, 用途に応じて, かつユーザの満足感を満たす“使えるツール”として広く開発されていかなければならない. そのためにも, 研究者, 開発企業, ユーザとの連携がますます重要になる. 実は, 図-5で示した外国産のツールの中には, 研究成果が製品化されるまでが実に短いと思われるものが多い. この点で事情が異なる日本の現状に対する危機感³⁾は安生氏の言葉にもストレートに現れている. CG研究の大きな目的は, 表現ツールの開発にあるこ

● 対象別CGツール

デジタル・ランドスケープ	: 自然景観 (地形, 樹木, 草本, . . .)
デジタル・ウエザー	: 天候景観 (雲, 霧, 雨, 雪, . . .)
デジタル・エイジング	: 経年変化 (腐食・錆, 風化・侵食, . . .)
デジタル・クレイ	: 柔軟物体, 弾性体
デジタル・フルイド	: 気流, 水流, 粘性流体
デジタル・フレーム	: 火炎
デジタル・ロコモーション	: 動物の動作・行動 (飛翔, 遊泳, 群行動)
. . .	

● 技術ベースツール

○ モデラ	
粒子ベースモデラ	
セルオートマトンベースモデラ	
粒子-セルオートマトンベースモデラ	
数値シミュレーションベースモデラ	
1/fノイズモデラ	
. . .	
○ レンダラ	
3Dテクスチャ・シェーダ	
異種モデルベース多重解像度レンダラ	
特殊光現象レンダラ	
絵画調レンダラ	
. . .	

図-8 自然のCG技術の体系的開発

とを改めて思うと, 研究の目標や研究開発の体制を整備し直す必要性を感じている. 筆者は, 1つの方向として, 近年流行の産学官連携に期待している.

参考文献

- 1) 情報処理学会研究報告, 89-CG-40 (1989).
- 2) 情報処理学会研究報告, 91-CG-40 (1991).
- 3) 安生健一 (監修): 次世代のCGを支える研究最前線, 日経コンピュータ, 1, pp.54-55 (2000).
- 4) 特集: 自然を作る一樹, 水, 雲を作り出す一, 日経コンピュータ, 2, pp.62-87 (2000).
(平成12年2月21日受付)

