

성장 환경을 활용한 다수의 나무에 대한 사실적인 실시간 모델링 기법

김진모[†], 조형제^{**}

요 약

본 연구에서는 넓은 지형에 분포하는 많은 수의 나무를 사실적이면서 효율적으로 표현하는 나무 모델 방법을 제안한다. 나무 가지의 재귀적 계층 구조와 싹으로부터 자기조직화를 통한 가지 생성 과정을 결합하여 단순화시킴으로써 보다 직관적이고 효율적으로 나무를 생성한다. 이러한 생성 과정은 사용자가 단계별 구조와 가지 길이, 분포, 방향과 같은 외형 조절을 인터랙티브하게 제어할 수 있도록 한다. 또한 많은 수의 나무를 동시에 제어하여 다양하게 성장시킬 수 있도록 하는 환경 적응형 모델을 설계하고 이를 효과적으로 처리하는 성장 환경 적용 방법을 제안한다. 여기에 넓은 지형위에 분포하는 복잡한 나무 모델의 실시간 시물레이션을 위해 GPU(Graphics Processing Unit)를 통한 렌더링 과정과 가지 표면의 연속적 세분화단계, 그리고 인스턴싱 기법을 도입한다. 제안한 나무 모델을 통해 넓은 지형에 다양한 나무를 사실적이고 효율적으로 표현할 수 있는지 여부를 시물레이션을 통해 확인한다.

Realistic and Real-Time Modeling of Numerous Trees Using Growing Environment

Jin-Mo Kim[†], Hyung-Je Cho^{**}

ABSTRACT

We propose a tree modeling method of expressing realistically and efficiently numerous trees distributed on a broad terrain. This method combines and simplifies the recursive hierarchy of tree branch and branch generation process through self-organizing from buds, allowing users to generate trees that can be used more intuitively and efficiently. With the generation process the leveled structure and the appearance such as branch length, distribution and direction can be controlled interactively by user. In addition, we introduce an environment-adaptive model that allows to grow a number of trees variously by controlling at the same time and we propose an efficient application method of growing environment. For the real-time rendering of the complex tree models distributed on a broad terrain, the rendering process, the LOD(level of detail) for the branch surfaces, and shader instancing are introduced through the GPU(Graphics Processing Unit). Whether the numerous trees are expressed realistically and efficiently on wide terrain by proposed models are confirmed through simulation.

Key words: numerous trees modeling(다수의 나무 모델링), environment-adaptive modeling(환경 적응형 모델링), growing environment(성장 환경), real-time rendering(실시간 렌더링), GPU based branch surface(GPU 기반 가지 표면)

※ 교신저자(Corresponding Author) : 조형제, 주소 : 서울특별시 중구 필동 3가 26번지(100-715), 전화 : 02)2260-3344, E-mail : chohj@dongguk.edu
접수일 : 2011년 8월 15일, 수정일 : 2011년 10월 14일
완료일 : 2011년 11월 1일

[†] 준회원, 동국대학교 멀티미디어학과 박사과정
(E-mail : mythsjin@dongguk.edu)

^{**} 정회원, 동국대학교 멀티미디어학과 교수

※ 본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2011년도 문화콘텐츠산업기술지원사업(지정공모)의 연구결과로 수행되었음.

1. 서론

컴퓨터 그래픽스의 주요한 목표 중 하나는 구축하고자 하는 시스템의 사실성을 높이면서 동시에 효율적인 처리를 가능하게 하는 것이다. 나무와 같은 자연물은 그래픽스 기반 3차원 콘텐츠의 사실성을 높이는 중요한 요소 중 하나인데 사실성 향상을 위해 시스템에 적합한 나무 모델을 매년 새롭게 제작하고 제작된 많은 수의 복잡한 나무 모델을 효율적으로 드로잉 처리하는 과정은 다소 어려움이 따른다[1]. 이러한 이유로 나무를 보다 쉽게 사실적으로 제작하고 효율적으로 렌더링하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

나무 모델을 표현하는 일반적인 방법으로 가지 증식을 비롯한 나무 성장에 관련된 규칙을 정의하여 모델링하는 규칙 기반 모델링 방법이 있다. L-system이 이에 해당하며 가지의 각도, 길이 비율과 같은 기하학적 속성으로 정의되는 가지의 재귀적 구조로부터 나무를 모델링하는 방법[2,3], 식물학적 가설을 기반으로 자기조직화를 통한 나무 모델링 방법[4] 등이 있다. 뿐만 아니라 가지 증식을 위한 반복적이고 재귀적인 나무 생성 구조를 설계하고 여기에 규칙적인 구조를 바탕으로 가지에 영향을 미치는 매개변수의 변화나 난수의 도입함으로써 재귀적 나무 모델링의 사실적 표현을 향상시키는 연구들도 진행되어 왔다[5]. 하지만 대부분의 연구들은 정확하고 사실적인 나무 모델링에 초점이 맞추어져 있어 게임과 같은 실시간 시스템에서 많은 수의 나무를 동시에 제어하고 생성시키는 것은 물론 효율적으로 렌더링하기에는 규칙이나 처리과정이 복잡하다. 최근에는 Unreal이나 Unity와 같은 엔진에서 식물의 사실적 표현을 효율적으로 처리 가능하도록 하는 기술들이 개발되고 있지만 이는 주로 사전에 제작된 나무 모델을 활용하는 것으로 다양한 나무를 동시에 생성하고 제어하기 위한 처리는 고려하지 않고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 사실성을 유지하면서 동시에 나무 모델 정보를 효율적으로 관리할 수 있는 성장 구조를 설계함은 물론 여러 나무를 적은 조각으로 손쉽게 모델링할 수 있는 성장 환경과 이를 실시간 시스템에 적용할 수 있도록 효율적인 렌더링 과정이 설계되어야 한다.

본 논문에서는 나무 모델링 및 표현과 관련된 다

양한 접근 방법을 토대로 넓은 지형 위의 많은 수의 나무를 사실적이고 효율적으로 생성 및 표현하는 성장 환경을 활용한 나무 모델을 제안한다. 이는 우선 기본적인 나무 성장 규칙을 L-system과 같은 재귀적 계층 구조와 나무 성장의 자기조직화 특징을 결합한 형태로 설계하여 간단하면서도 보다 직관적인 나무를 모델링하며 쉽게 제어할 수 있는 규칙을 정의한다[3,4]. 그런 다음 실세계에서의 기후, 바람 등 예측하기 어려운 환경 요소를 고려하고 인터랙티브하게 제어 가능한 실시간 시스템의 특징을 활용할 수 있도록 나무 성장에서의 환경 적용 방법을 제안하고, 이를 통해 다양하고 사실적인 나무들을 표현한다[1]. 마지막으로 실시간 시스템에서 많은 수의 정점으로 구성된 나무 모델과 드넓은 지형을 구성하는 복잡한 숲을 효율적으로 처리하기 위하여 GPU 기반 렌더링, 카메라와 나무 모델 사이의 거리에 따른 가지 표면의 연속적 세분화 단계 설정, 그리고 인스턴싱 기법을 설계한다[1]. 제안한 방법을 통해 사용자가 보다 쉽고 직관적으로 표현하고자 하는 나무를 다양하면서 사실적으로 생성하게 하고 실시간 시스템에서 많은 수의 복잡한 나무를 효율적으로 처리할 수 있도록 한다. 그리고 현재 상용화되는 엔진 가운데 하나인 유니티 3D에 본 연구 결과를 적용시켜 봄으로써 응용 분야에서의 활용 가능성을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 나무 모델링과 관련된 기존 연구들을 설명하고 3장에서는 기본적인 나무 성장 모델과 관련된 규칙을, 4장에서는 환경 요소를 포함한 인터랙티브 제어 방법을 설명한다. 그리고 5장에서는 실시간 렌더링과 관련하여 제안한 다양한 기법을, 6장에서는 다양한 실험을 통해 이를 확인한다. 마지막으로 7장에서는 논문에 대한 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 관련연구

나무 모델링은 구조가 복잡하고 형태가 다양하여 일반적인 모델링 방법으로는 표현이 불가능하다. 이러한 자연물을 표현하기 위한 방법으로 Lindermayer는 L-system을 제안하였고 이를 활용한 다양한 나무 모델링 방법이 연구되었다[6]. L-system은 3차원 나무 성장 형태를 가지의 길이, 각도, 폭 등으로 나누어 각각을 상징 문자로 지정하고 하나의 상태에서

문자들을 치환 규칙에 의해 다른 문자열로 치환함으로써 다음 단계의 나무 형태를 결정하였다[2,7]. 이러한 지역적인 규칙으로 단순한 개체를 계속적으로 바꾸어 나감으로써 결과적으로 복잡한 객체를 만들어 나가는데 이는 지역적인 현상들을 분석하여 하나의 큰 현상을 만들어 내는 것이 식물을 표현하는 방법과 잘 맞아 떨어진다. 따라서 내부적인 파라미터와 규칙을 이용하여 식물의 형태를 생성해내는 L-system을 활용한 연구가 활발히 진행되어 왔다[6,8].

McCormack와 Mech는 L-system의 장점을 부각시키는 연구로 식물의 모양과 함께 적합한 행동을 생성하는 연구 및 성장 과정을 분석하는 연구를 진행하기도 하였으며 주어진 환경과 상호작용하며 성장하는 나무 모델등도 연구하였다[2,6].

이러한 규칙 기반 모델링을 토대로 나무 모델링에 대한 다양한 시도가 이루어졌다. Honda는 명시된 가지 생성의 재귀적 구조나 가지 회전각, 나무 구조의 재귀적 단계 내 비율과 같은 매개변수의 특징으로 나무를 구성하였고 이러한 관점은 정의한 규칙을 바탕으로 재귀적으로 생성시킴으로써 자연스럽게 전체적인 모습을 만들어 나간다는데 있다[9]. 이와는 대조적으로 Ulam은 가지가 생존하는 공간 내 각각의 기본 단위의 경쟁으로부터 가지 패턴을 구성하는 자기 조직화 과정을 수행함으로써 나무를 구성하였다[10]. 또한, 가지말단에 존재하는 싹에 각기 다른 운명을 부여하여 매번 새로운 가지를 생성하게끔 하였고 이는 반복적, 재귀적 처리 결과가 아닌 오직 가지 증식을 위한 주어진 공간내의 경쟁 결과에만 의존하도록 하였다[11]. 이를 바탕으로 Prusinkiewicz는 가지 기하학의 지역적인 제어와 공간 내에서 싹과 가지의 경쟁 그리고 내부적 경쟁에서의 규칙 정의와 자기 조직화를 통해 모델링하는 방법을 제안하였다[4]. Borchert, Slade는 Honda가 제안한 재귀적 생성 구조와 Ulam이 제안한 자기 조직화를 통한 나무 구성의 핵심적 차이를 분석하였다. 일정한 크기의 반복적 가지 패턴과 재귀 구조의 깊이가 커질수록 기하급수적으로 늘어나는 가지 노드의 수 등을 관찰하였다[12].

이 밖에도 원하는 형태의 나무를 영상으로 입력받아 분석하여 제작하는 스케치나 영상 기반의 나무 모델링 방법들이 개발되었다. 이는 사용자가 정의한 2차원 드로잉 영상이나 혹은 한 장 또는 여러 장의

나무 영상으로부터 3차원 모델을 구성하는 방법으로 최근 입력 영상을 레이저 스캐너로 입력받아 나무 정점들을 계산하고 이들로부터 나무 구조 그래프를 생성한 후 가지 볼륨을 자동으로 생성하는 연구들도 진행되고 있다[13].

나무 모델링과 관련된 연구 이외에 많은 수의 나무를 효율적으로 렌더링하기 위한 연구들로 나무를 구성하는 정점의 수를 줄이고 이를 나뭇잎 빌보드로 대신함으로써 효율을 높이면서 동시에 사실성을 유지하기 위하여 나뭇잎 빌보드의 조명 및 그림자를 셰이더를 활용하여 처리하는 연구, 실시간 시스템에서 많은 나무를 사실적 표현을 높이면서 효율적 처리가 가능하도록 나무 구조에 적합한 조명 처리에 관한 연구들이 꾸준히 진행되고 있다[14,15].

하지만 기존 연구들은 적은 수의 나무를 사실적으로 모델링하는데 집중하거나 제작된 나무가 존재할 때 이를 효율적으로 처리하기 위한 연구들이 주로 진행되어 많은 수의 나무를 적은 조작으로 모델링하고 이를 효율적으로 처리하기 위한 연구들은 거의 이루어지지 않고 있다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 간단한 성장 규칙과 환경 적응형 모델을 통한 성장 환경을 설계함으로써 사실적인 많은 수의 나무를 손쉽게 제작하며 동시에 효율적인 처리가 가능하도록 다양한 렌더링 처리 과정을 설계함으로써 실시간 시스템을 포함한 여러 분야에 활용 가능한 방법을 제안한다.

3. 나무 성장 모델

본 연구에서는 나무 가지의 간단한 재귀적 계층 구조 설계를 통해 나무의 전체적인 균형을 유지함과 동시에 가지 정보 관리를 용이하게 하고 자기조직화를 통한 가지 증식 규칙을 결합함으로써 보다 직관적으로 나무를 모델링할 수 있도록 설계하였다.

3.1 나무 가지의 재귀적 계층 구조 설계

많은 수의 가지로 구성된 복잡한 나무 모델의 전체적 균형을 유지하면서 가지 정보를 효율적으로 관리하기 위해 우선 재귀적 계층 구조를 설정한다. 이는 프랙탈을 통한 나무 생성과 유사한 방식으로 이전 부모 가지 정보로부터 새로운 가지를 생성해 나가는 과정에서 가지들 사이의 관계를 효율적으로 관리하

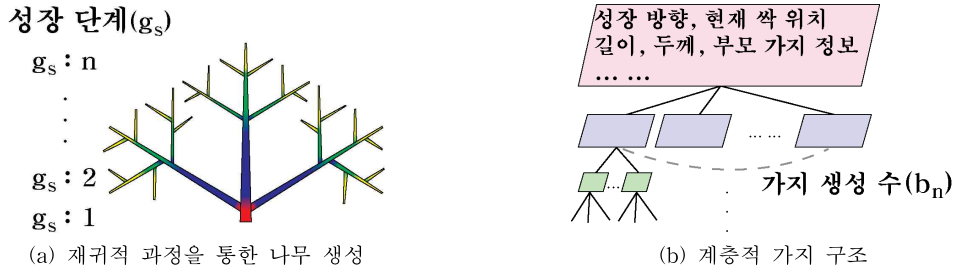


그림 1. 성장 규칙을 위한 나무 모델 구조

기 위한 처리 단계이다(그림 1-a). 또한 현재 단계에서 새로운 가지를 얼마나 생성할지를 결정한다(그림 1-b). 이 구조는 현재 가지의 부모가 누구인지 쉽게 판별하고 이로부터 자식 가지와의 상호 관계만을 연결시켜줄 뿐 가지 생성에 직접적인 영향을 미치는 것은 아니다. 이러한 구조는 GPU기반 실시간 가지 렌더링 처리에서 현재 정점의 정확한 성장단계 인자로 정점 정보를 보다 쉽게 처리할 수 있게 한다.

3.2 주변 인지를 통한 가지 생성

가지 증식을 통한 나무 생성 과정은 인터랙티브 나무 모델링(ITM, Interactive Tree Modeling)[16] 방법의 성장 규칙을 활용한다. 이는 크게 두 가지로 나누어 진행되는 우성 부모 가지로부터 자식 가지가 생성되는 구조로 현재 싹으로부터 성장 공간과 성장점(p_{gf})을 형성하고 이로부터 다음 가지의 성장 방향($\vec{v}_{gr} = \lambda(p_{gf} - p_{bud})$)이 결정된다(그림 2-a). 성장 공간과 성장점의 결정이 나무 형성에 중요한 요인이며 이들의 결정을 환경 요소와 인터랙티브하게 반응시킴으로써 다양하면서 사실적인 나무의 생성을 가능하게 한다.

다음은 새 가지가 시작되는 경우로 새 가지의 시

작점 결정 과정 또한 ITM 방법을 통해 결정한다. 여기서 시작점의 위치(p_i)는 부모가지의 싹(p_{pr})과 성장 방향(\vec{v}_{gr}) 그리고 여기에 성장과 관련된 나무 고유의 내부 힘(F_i)을 조합하여 결정한다(그림 2-b). 이때 p_i 의 개수는 가지 계층 구조를 바탕으로 현재 성장 단계에서 선택적으로 결정한다. 다음 새 가지의 성장 방향(\vec{v}_i)은 시작점을 기준으로 ϕ_i, ψ_i 을 통해 결정한다. ϕ_i 는 외부 힘의 영향을 일부 고려하여 임의로 설정하고 ψ_i 는 내부 힘($\psi_i = 1/(F_i + 0.5)$)을 고려하여 설정한다. 시작점과 성장 방향이 결정되면 같은 방법으로 후보 싹과 성장 공간을 형성하여 가지를 생성한다(그림 3).

4. 성장 환경을 활용한 환경 적응형 모델

제안한 나무 성장 모델은 간단한 나무 구조와 성장 규칙으로 쉽게 나무 구조를 모델링할 수 있다. 이를 바탕으로 실시간으로 변화하는 주변 환경에 반응하며 넓은 지형에 분포하는 다양한 나무를 적은 조작으로 생성할 수 있는 환경 적응형 모델과 이를 통한 성장 환경 적용 방법을 설계한다.

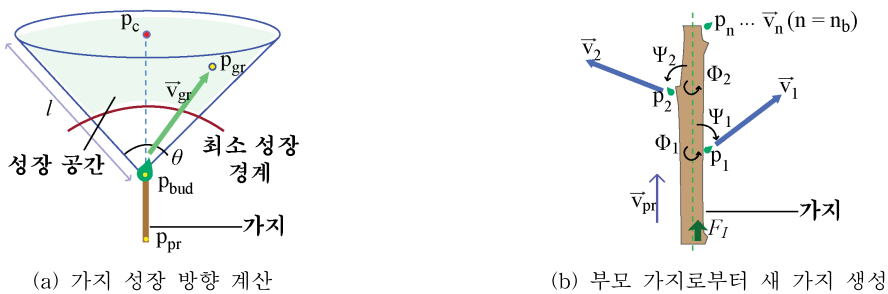


그림 2. 가지 생성 규칙[16]



그림 3. 제한한 나무 성장 모델을 통한 성장 렌더링 결과

4.1 환경 적응형 모델

나무 성장 과정에서 인터랙티브 제어의 필수 요소는 가지 생성의 성장 공간이다. 기본적인 나무 성장 모델에서 성장 공간이 어떻게 형성되느냐에 따라 성장점 생존 범위의 차이가 발생하고 이것이 나무의 전체적인 차이를 유도한다. 따라서 성장 공간 요소인 범위각(θ)과 범위 길이(l)를 효율적으로 제어할 수 있는 방법을 제시한다면 다양한 나무 모델 생성이 가능할 것이다.

우선 가상공간 내부의 토양, 빛, 바람 등 환경이 정해지면 나무 각각이 주어진 환경에 적응하며 자연스럽게 성장할 수 있도록 성장 요소와 대응되는 환경 요소를 정의한다. 본 논문에서는 환경 요소를 빛 ($L = \{p_L, Q_L\}$), 토양(Q_G), 외부 힘($E = \{\vec{v}_E, F_E\}$) 3가지로 정의하고 나무 고유의 내부 힘까지 포함시킨 4가지 속성을 고려하여 나무 성장을 정의한다. 이를 바탕으로 빛은 가지 방향과 길이, 토양은 길이와 두께, 내부 힘은 방향과 길이 그리고 외부 힘은 가지 방향에 영향을 미친다고 가정한다. 또한 환경 요소와 성장 구조와의 효율적 처리를 위해 성장에너지(F_G)를 설정한다.

성장에너지는 나무의 영양 상태와 성장 가능성을 나타내는 값으로 아래와 같다. 이는 토양 상태, 내부 힘, 빛의 양의 조합으로 결정되며 궁극적으로 성장에너지는 범위각과 범위 길이를 결정하여 환경 적응형 나무 모델을 완성한다.

$$F_G = \min(1, \max(0, \vec{w}^T \vec{En}))$$

$$\text{where, } \vec{w}^T = \{w_1, w_2, w_3\}, w_1 + w_2 + w_3 = 1,$$

$$\vec{En}^T = \{Q_G, F_I, Q_L\},$$

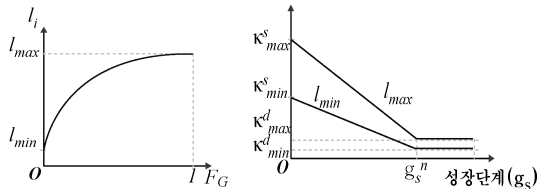
$$F_G, Q_G, F_I, Q_L \in [0, 1]$$

우선 범위각(θ)은 외부 힘에 비례하고 성장에너지에 반비례한 관계로 정의한다. 이는 성장에너지가 커질수록 가지가 곧게 뻗으려는 특성을 고려한 것이다.

$$\theta = (F_E * \|\text{Perp}_{\vec{v}_E}\| - F_G + \frac{\pi}{2}) * \gamma + Q_G$$

여기서 γ (≈ 0.4)는 범위각을 조절하는 변수이며 토양의 상태가 유독 좋을 경우 가지가 주변으로 고르게 뻗어나갈 수 있도록 Q_G 값을 추가로 더해준다.

다음으로 범위 길이(l)는 성장에너지에 따라 일정 비율의 길이 변화가 발생하고(그림 4-a) 성장 단계가 증가함에 따라 길이의 변화폭인 최대, 최소 범위가 다르게 설정된다(그림 4-b). 결론적으로 성장에너지가 클수록 가지의 길이가 길어지고 단계가 증가할수록 성장 길이의 범위가 작아지는 것이다.



(a) 성장에너지에 따른 범위 길이 변화 (b) 성장 단계에 따른 변화 간격 설정

그림 4. 범위 길이 결정 과정

마지막으로 가지의 방향은 후보 싹의 위치가 결정적 역할을 하기 때문에 이를 빛의 방향, 내부 힘과 외부 힘을 조합하여 결정한다(그림 5).

$$p_c = p_{bud} + \sum_{i=1}^3 \mu_i q_i \vec{v}_i$$

$$\text{where, } \vec{v}_1 = p_L - p_{bud}, \vec{v}_2 = \vec{v}_{pr}, \vec{v}_3 = \vec{v}_E$$

$$q_1, q_2, q_3 \in [0, 1]$$

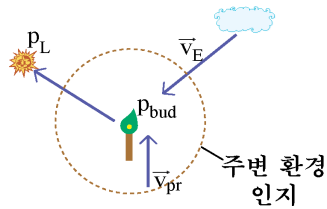


그림 5. 주변 환경 인지를 통한 후보 싹 위치 결정 과정

여기서 내부 힘의 방향은 부모 가지의 성장 방향이고 q_2, q_3 는 내, 외부 힘의 양이며 q_1 은 $Q_L \propto (1/\|v_1\|)$ 로 가지에서 빛이 멀어질수록 작을 값을 갖는다. 그리고 각 요소별 가중치를 다르게 설정하기 위해 μ 값을 설정한다.

이와 같이 간단한 대응관계와 수식으로 정해진 환경 안에서 많은 수의 나무를 자동으로 성장시킴으로써 시스템의 효율과 사실적 표현을 높이고(그림 6) 사용자의 번거로움을 최소화시킬 수 있다.



그림 6. 환경 적응형 모델을 통한 다양한 나무 생성 결과

4.2 성장 환경 설정

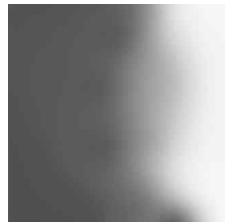
설계한 모델을 통해 환경 요소의 변화에 따른 다양한 나무 성장 제어가 가능해지면 다음은 많은 수의 나무를 효율적으로 모델링하는 과정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 성장 환경을 설계하였다. 이



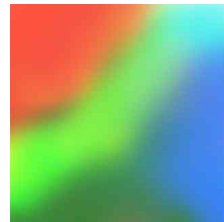
(a) Q_G 맵



(a) Q_L 맵



(a) F_E 맵



(d) 성장 환경 맵

그림 7. 환경 요소를 바탕으로 성장 환경 생성

는 다양한 환경 요소에 대응되는 값들을 텍스처로 저장하여 각 나무의 성장 요소를 설정하는 방법으로 그래픽스 분야에서 자주 사용되는 높이맵, 노말맵과 유사한 개념이다. 정의한 3가지 환경 요소(빛, 토양, 외부 힘)의 양적 수치(Q_L, Q_G, F_E)의 값을 0~1로 정규화하고 이를 3채널의 컬러 이미지의 성장 환경 값으로 저장함으로써 넓은 지형의 환경 상태를 효과적으로 관리한다(그림 7). 성장 환경을 생성하고 나면 넓은 지형에 분포하는 각 나무들은 현재 위치에 해당되는 성장 환경의 값에 따라 환경 적응형 모델에 맞게 자동으로 성장시킴으로써 보다 쉽게 사실적인 나무의 성장 표현이 가능해진다.

5. 실시간 렌더링 처리

지금까지의 과정은 나무 모델의 대략적인 형태만을 나타내는 것으로 나무 전체 모습을 모델링하고 드로잉하는 것은 아니다. 여기서는 가지의 방향, 분포, 길이 등이 결정되면 이로부터 효율적으로 가지 표면을 생성하면서 실시간 시스템에 적합한 렌더링 방법을 제시한다.

5.1 GPU 기반 가지 모델

환경 요소를 고려한 나무 성장 모델을 통해 연속적인 가지의 성장 방향과 성장점이 결정되면 이를 통해 가지 표면을 구성한다. 이 과정 역시 ITM의 가지 표면 구성을 활용하여 자연스러운 가지를 생성한다[16]. 현재 싹으로부터 유도된 성장 정보를 통해 곡선 분할 단계(c)를 설정하여 가지 곡선을 생성하고 표면 정점 수(s)를 바탕으로 가지 볼륨을 구성한다. 이때 가지의 두께를 적절한 비율로 설정($w_{branch} \propto F_I$)하고 이전 가지의 두께를 고려하여 성장 단계(g_s)가 증가함에 따라 일정 비율로 감소시켜 나간다. 그리고

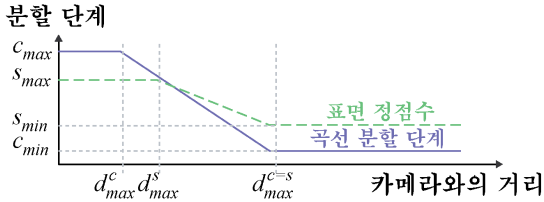


그림 8. 카메라와 거리에 따른 가지 세분화 단계 설정[16]

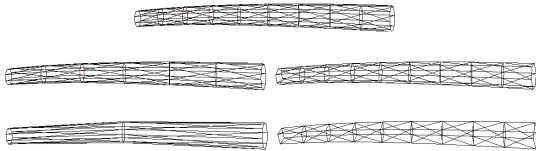


그림 9. 곡선 분할 단계 및 표면 정점 수 조절 결과

가지 표면 구성과 관련된 볼륨 구성은 나무의 3차원 렌더링과 직접적인 관련이 있는 처리과정으로 CPU가 아닌 GPU에서 처리함으로써 효율을 높인다. 마지막으로 실시간 시스템에서 많은 정점으로 구성된 나무의 효율적 렌더링을 위하여 세분화 단계를 설정한다. 이는 가지 볼륨 구성에서 설정하였던 곡선 분할 단계와 표면 정점 수를 카메라와 나무의 거리에 따라 조절시킴으로써 자연스러움은 최대한으로 유지하면서 효율을 높이는 방법이다. 그림 8은 카메라와 나무 사이에 따른 세분화 단계 조절을 나타낸 그래프이고 그림 9는 곡선 분할 단계와 표면 정점 수를 조절하여 가지를 렌더링한 결과이다. 또한 그림 10은 실제 세분화 단계를 적용하여 렌더링 한 결과로 자연스러움이 유지됨을 알 수 있다.

5.2 셰이더 인스턴싱

전체적인 외형은 다르지만 나무를 구성하고 있는

정점의 수가 동일한 나무가 한 화면에 여러 개가 존재한다면 이를 좀 더 효율적으로 처리할 수 있는 방법을 생각해보아야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 셰이더를 통한 인스턴싱 기법을 적용한다[1]. 동일한 객체를 여러 번 반복적으로 화면에 렌더링 할 경우 드로우 호출을 줄이고 메모리를 효율적으로 사용하는 방법으로 렌더링 시 나무의 정점과 인덱스 등의 정보를 메모리에 넘겨주고 저장해 놓은 나무의 정점 정보를 복사해서 사용함으로써 실시간 시스템에서의 효율을 높인다. 실제 같은 정점을 가지는 나무를 화면에 렌더링 할 경우 효율이 얼마나 좋을 수 있는지 6장의 실험을 통해 확인한다.

6. 실험 및 분석

제안한 나무 모델의 시뮬레이션 프로그램은 Visual Studio 2005와 DirectX SDK 9.0을 사용하여 개발하였으며 성능 실험에 사용된 PC는 Inter Core i5-650 CPU, 4GB RAM, Geforce GT320 GPU를 탑재하고 있다. 실험은 다양하면서 사실적 나무의 성장 가능성을 확인하는 시뮬레이션 과정, 효율성을 확인하는 성능 실험 그리고 응용 분야에서의 활용 가능성 확인 과정의 세 단계로 나누어 진행된다.

먼저 정의한 4개의 환경 요소를 각각 부각시켜 각 환경 요소가 나무의 성장에 어떻게 영향을 미치는지를 실험하였다. 그림 11은 전반적인 성장에너지의 역할과 내부 힘의 나무의 두께와 시작점에 미치는 영향, 토양의 상태로 인한 나무의 가지 분포, 빛의 양을 통해 높게 뻗어나가는 가지 표현 그리고 외부 힘이 성장방향에 미치는 것들을 다양하게 보인 것이다. 이처럼 간단한 조작으로 다양하고 자연스러운 나무 모

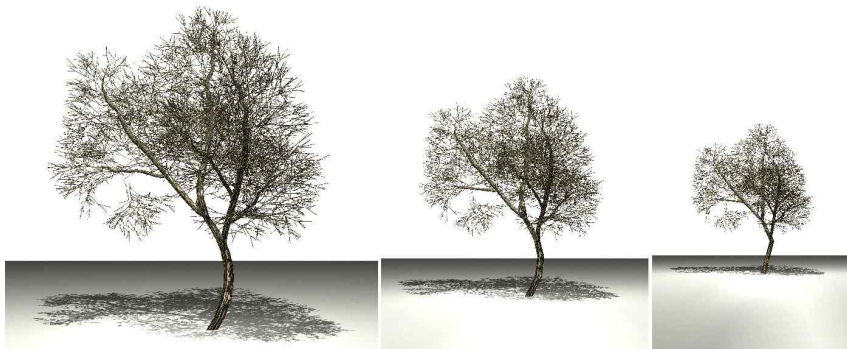


그림 10. 세분화 단계를 적용하여 나무를 렌더링 한 결과



그림 11. 환경 적응형 모델을 통해 다양하게 성장 시킨 나무 생성 결과

델 생성이 가능하며 이를 인터랙티브하게 제어할 수 있음을 확인하였다.

여기에 성장 환경을 적용하여 넓은 지형을 구성하는 나무를 손쉽게 생성가능한지를 실험을 통해 확인하였다. 그림 12는 3가지의 환경 요소 값을 성장 환경 맵으로 저장하고 이로부터 임의의 실외 지형에 분포하는 나무들을 성장 환경을 바탕으로 자동 생성시킨 결과로 효율적으로 다양하고 사실적인 나무를 손쉽게 제작할 수 있음을 확인할 수 있다.

두 번째는 제안한 나무 모델의 실시간 처리에 관한 성능 실험으로 가지의 세분화 단계 설정과 인스턴싱 기법을 적용하여 많은 수의 나무가 효율적으로 처리되는지 여부를 확인하였다. 그림 13의 그래프는 중복되는 나무를 표현하는 방법으로 본 논문에서 제안한 인스턴싱 기반의 렌더링을 실험한 것으로 총 100여 그루의 나무에 대해 1초당 처리할 수 있는 프

레임 수가 20이상으로 실시간 시스템에 적용하기에 크게 무리가 없음을 확인할 수 있다. 앞에서 보인 그림 6은 성장 단계가 8단계이고 그림 11은 9단계일 때의 실험 결과로 8~9 단계 정도면 사실적인 나무 표현에 무리가 없다.

마지막으로 그림 14는 사전에 제작된 나무 모델을 활용하여 가상 환경을 구축하는 Unity 3D 엔진[17]에 본 연구를 통해 생성된 다양한 나무를 입력시켜 적용한 결과로, 수동으로 많은 수의 다양한 나무들을 제작해야하는 수고 없이 많은 수의 나무로 구성된 복잡한 실외 지형을 쉽고 효율적이며 자연스럽게 구성할 수 있음을 확인할 수 있다. 제안한 모델링 방법을 기반으로 성장 환경만을 정의하여 자동으로 나무를 모델링함으로써 그림 14에서처럼 다양한 나무를 생성하는데 3~4분여 정도의 시간 밖에 소요되지 않는다. 따라서 가상 지형을 필요로 하는 여러 응용

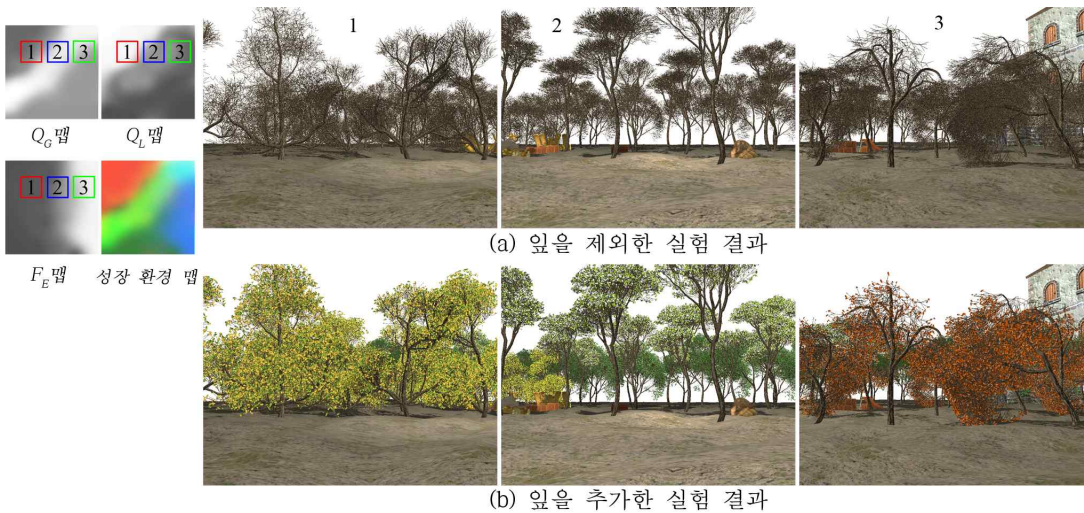


그림 12. 성장 환경을 통해 넓은 지형을 구성하는 나무 모델의 자동 생성 결과

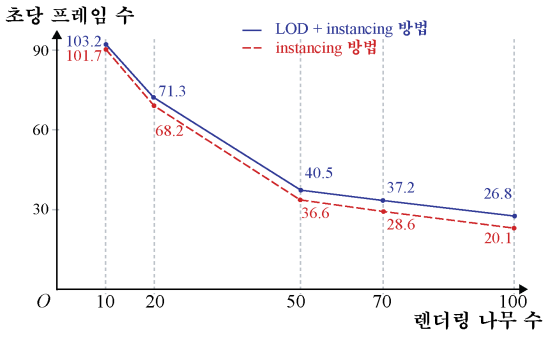


그림 13. 셰이더 인스턴싱과 가지 표면의 세분화 단계를 활용한 렌더링 비교 실험

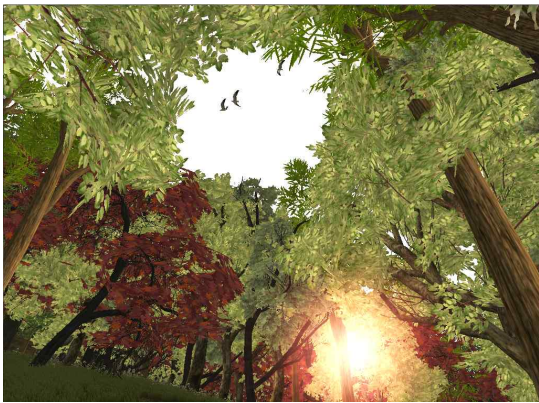


그림 14. 제안한 모델링 방법과 Unity 3D 엔진을 활용한 가상 지형의 생성 결과

분야에서 쉽게 활용 가능함을 확인하였다.

7. 결 론

본 논문에서는 다양한 3차원 그래픽 시스템에서 사실성을 높이기 위한 중요한 요소 중 하나인 나무를 다양하고 사실적으로 표현하면서 더불어 실시간 시스템에서 효율적으로 처리하기 위한 방법을 제안하였다. 단순한 형태의 재귀적 계층 구조를 바탕으로 가지 증식에서의 자기조직화 처리를 통한 성장 규칙을 설계하였고 인터랙티브 제어를 위한 파라미터 설정과 이에 대응하는 환경 요소를 정의함으로써 변화하는 환경에 반응하며 성장하는 자연스러운 나무 모델을 설계하였다. 그리고 실시간 시스템에서 많은 수의 정점으로 구성되는 나무를 표현하는데 발생하는 계산 부하를 최소화하기 위해 GPU기반 가지 표면 모델과 가지 표면의 세분화 단계 설정 방법을

설계하였다. 또한 넓은 지형의 복잡한 숲을 표현하기 위해 인스턴싱 처리 방법을 추가로 고려함으로써 나무 모델의 자연스러움을 유지함과 동시에 실시간 시스템에서 효율을 높일 수 있도록 하여 연산 양과 속도의 문제를 보완하면서 나무 모델의 자연스러운 표현이 가능함을 실험을 통해 확인하였다.

본 연구에서는 나뭇잎의 생성과 표현은 고려하지 않았다. 따라서 향후 나뭇잎의 표현 방법을 추가적으로 구현함으로써 보다 사실적인 나무 표현이 가능할 것으로 예상된다. 또한 카메라와의 거리에 따른 세분화 단계에서 불연속적 세분화 단계를 추가로 고려하여 조명이 고려된 빌보드 기법 중 하나인 BTFs (Bidirectional Texture Functions)과 같은 알고리즘을 적용한다면 나무 모델의 품질을 높이면서 동시에 효율성을 높일 수 있을 것이다. 또한 나무의 종에 따른 성장 패턴을 다양하게 할 수 있는 방법을 추가적으로 고려한다면 침엽수, 활엽수와 같은 다양한 종류의 나무를 손쉽게 제작할 수 있을 것이다.

마지막으로 설계한 나무 모델링 방법을 사용자가 편리하게 활용하여 응용 어플리케이션에 바로 적용시킬 수 있도록 라이브러리 형태로 제작한다면 다양한 분야에서 활용 가능할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] 김진모, 조형제, “프랙탈과 셰이더 인스턴싱 기법을 이용한 자연스러운 잔디의 실시간 렌더링,” 한국멀티미디어학회논문지, 제13권, 제2호, pp. 298-307, 2010.

[2] McCormack, “Interactive Evolution of L-System Grammars for Computer Graphics Modeling,” *Complex System: From Biology to Computation*, ISO Press, pp. 118-130, 1993.

[3] J. Weber and J. Penn, “Creation and Rendering of Realistic Trees,” *Proc. of SIGGRAPH 1995*, pp. 119-128, 1995.

[4] W. Palubicki, K. Horel, S. Longay, A. Rumions, B. Lane, R. Mech, and P. Prusinkiewicz, “Self-Organizing tree Models for Image Synthesis,” *Proc. of SIGGRAPH 2009*, pp. 58:1-10, 2009.

[5] P. Prusinkiewicz, L. Mundermann, R. Kar-

wowski, and B. Lane, "The Use of Positional Information in the Modeling of Plants," *Proc. of SIGGRAPH 2001*, pp. 289-300, 2001.

[6] A. Lindenmayer, "Mathematical Models for Cellular Interaction in Development Part I and II," *Journal of Theoretical Biology* 18, Vol. 18, No. 3, pp. 280-315, 1968.

[7] R. Mech and P. Prusinkiewicz, "Visual Models of Plants Interaction with Their Environment," *Proc. of SIGGRAPH 1996*, pp. 397-410, 1996.

[8] J. Power, A.J. Bernheim-brush, P. Prusinkiewicz, and D. Salesin "Interactive Arrangement of Botanical L-System Models," *Proc. of the 1999 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp. 175-182, 1999.

[9] H. Honda, "Description of the form of Trees by the Parameters of the Tree-Like Body: Effects of the Branching Angle and the Branch Length on the Shape of the Tree-Like Body," *Journal of Theoretical Biology* 31, Vol. 31, No. 2, pp. 331-338, 1971.

[10] S. Ulam, "On Some Mathematical Properties Connected with Patterns of Growth of Figures," *Proc. of Symposia on Applied Mathematics* 14, pp. 215-224, 1962.

[11] A. Runions, B. Lane, and P. Prusinkiewicz, "Modeling Trees with a Space Colonization Algorithm," *Proc. of Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, pp. 63-70, 2007.

[12] R. Borchert and N. Slade, "Bifurcation Ratios and the Adaptive Geometry of trees," *Botanical Gazette* 142, Vol. 142, No. 3, pp. 394-401, 1981.

[13] Y. Livny, F. Yan, M. Olson, B. Chen, H. Zhang, and J. El-Sana, "Automatic Reconstruction of Tree Skeletal Structures from Point Clouds," *Proc. of SIGGRAPH Asia*, pp. 151:1-8, 2010.

[14] A. Candussi, N. Candussi, and T. Höllerer, "Rendering Realistic Trees and Forests in Real Time," *Proc. of Eurographics 2005*, Short papers, 2005.

[15] K. Boulanger, K. Bouatouch, and S. Pattanaik, "Rendering Trees with Indirect Lighting in Real Time," *Eurographic Symposium on Rendering*, Vol.27, No.4, pp. 1189-1198, 2008.

[16] 김진모, 조형제, "실시간 시스템에 적합한 인터랙티브 나무 모델링 기법," 2011 한국컴퓨터종합 학술발표논문집 제38권 제1호(A), pp. 426-429, 2011.

[17] Unity 3D Homepage: <http://unity3d.com>, 2012.



김진모

2006년 2월 동국대학교 멀티미디어공학과 졸업(공학사)
 2008년 2월 동국대학교 멀티미디어학과 졸업(예술공학석사)
 2010년 2월 동국대학교 멀티미디어학과 박사 수료

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 게임 프로그래밍, 실시간 렌더링, 영상처리



조형제

1973년 부산대학교 전자공학과(학사)
 1975년 한국과학기술원 전기·전자공학과(공학석사)
 1986년 한국과학기술원 전기·전자공학과(공학박사)

1986년~현재 동국대학교 멀티미디어학과 교수
 관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 게임공학, 컴퓨터비전, 디지털사운드처리