사실적인 게임 배경 제작을 위한 나무 성장 모델 설계

김진모*, 김대열**, 조형제***

동국대학교 영상문화콘텐츠연구원*, 국가수리과학연구소**,

동국대학교 멀티미디어학과***

mythsjin@dongguk.edu, daeyeoul@nims.re.kr, chohj@dongguk.edu

Tree Growth Model Design for Realistic Game Landscape Production

Jin-Mo Kim*, Dae-Yeoul Kim**, Hyung-Je Cho***

Research Institute for Image & Cultural Content, Dongguk Univ.*,

National Institute for Mathematical Sciences**,

Dept. of Multimedia, Dongguk Univ.***

요 약

본 연구에서는 게임의 실외 지형을 구성하는 많은 수의 다양한 나무를 효율적이고 자연스럽게 표현하기 위한 나무 성장 모델을 설계한다. 제안하는 나무 성장 모델은 (1) 다양한 종류의 나무를 보다 직관적이면서 자연스럽게 효율적으로 모델링하기 위한 성장 볼륨 및 약수 함수의 합성 곱 기반의 나무 모델링 방법, (2) 복잡한 구조의 다수 나무들의 실시간 처리를 위하여 인스턴싱 기반의 가지의 세분화 단계를 통한 렌더링 방법, 그리고 (3) 이를 조합하여 게임 배경을 효율적으로 구축하는 방법으로 구성된 나무 성장 모델이다. 제안한 나무 성장 모델을 통하여 자연스럽게 다양한 나무의 성장과 이를 통한 자연스러운 게임 배경의 구축 가능성 및 실시간 처리의 효율성을 실험을 통해 확인한다.

ABSTRACT

In this study, a tree growth model is designed to represent a variety of trees consisting of an outdoor terrain of game efficiently and naturally. The proposed tree growth model is an integrated tree growth model, and is configured using the following approaches: (1) the tree modeling method based on growth volume and the convolution sums of divisor functions, which is used to model a variety kind of trees more intuitively and naturally; (2) a rendering method using a level of detail of branch based on instancing for real-time processing of numerous trees with complicated structures; and (3) a combination of the above methods to efficiently implement a game landscape. The natural and diverse growths of trees that emerged using the proposed tree growth model is evaluated through experimentation, along with the possibility of implementing the natural game landscape and the efficiency of real-time processing.

Keywords : Tree Growth Model(나무 성장 모델), Game Landscape(게임 배경), Growth Volume(성장 볼륨), Convolution Sums of Divisor Functions(약수 함수의 합성 곱)

Received: Jan. 09, 2013 Accepted: Feb. 06, 2013

Corresponding Author: Hyung-Je Cho(Dongguk University)

E-mail: chohj@dongguk.edu

© The Korea Game Society. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ISSN: 1598-4540 / eISSN: 2287-8211

1. 서 론

광범위한 지형으로 구성된 게임 배경의 사실적 표현은 게임을 비롯한 컴퓨터 그래픽스에서 중요한 목표 중 하나이다. 이러한 이유로 다양한 식물을 사실적으로 모델링하고 효율적으로 렌더링하며 이를 통해 자연스러운 게임 배경을 효과적으로 구축할 수 있는 시스템에 대한 요구가 증대되고 있다.

게임의 배경을 구성하는 식물 중 나무는 구조가 복잡하여 이를 보다 쉽고 사실적으로 모델링하기 위한 연구들이 현재까지도 진행 중이다. 이러한 연구들로 가지 증식 방법과 잎의 위치를 포함한 나무 성장 규칙을 정의하는 규칙기반 모델링이 있다. 대표적인 방법으로 L-system[1]이 있으며, 가지의 재귀적이고 반복적 구조 안에서 가지의 성장 각도, 길이 비율과 같은 나무의 기하학적 속성을 매개변수로 하고 가지 증식 규칙을 문자열 형태의 문법으로 정의함으로써 나무를 모델링한다[2]. 또한, 가지 증식과정에서 주변 환경을 고려하여 가지들 사이의 경쟁을 식물학적 이론을 기반으로 정의하는 자기조직화를 통한 모델링 방법[3] 등이 있다. 이와 같이 자연스러운 나무 성장 과정을 정의된 규칙을 통해 제어함으로써 나무를 모델링하는 연구에 대한 다양한 접근과 시도가 이루어져왔고, 현재까지 꾸준히 진행되고 있다[4,5,6]. 가령, 싹의 운명을 결정하는 과정에서 빛의 영향, 중력굴성, 굴광성과 같은 환경적 요인을 고려하는 등 식물학적 접근을 통한 연구들도 진행되고 있다[7,8,9]. 뿐만 아니라, 규칙기반 방법을 기반으로 나무의 성장 과정을 사용자의 대화식 제어로 원하는 나무 모델의 효과적 생성을 가능하게 하는 대화식 나무 모델링 방법들도 연구되고 있다[10,11]. 최근에는 한 장 이상의 2차원 나무 영상 또는 3차원 스캔 정보로부터 나무 기하 정보를 추출하여 재구성하는 방법들이 진행되고 있다[12,13]. 컴퓨터 비전 기술을 활용한 재구성 방법은 입력 영상만으로 사용자의 제어를 간소화하여 원하는 나무 모델을 쉽게 생성할 수 있다[14]. 나무 생성과 관련한 여러 연구들을 토대로 가상

생태계와 같은 실외 지형을 사실적으로 효율적으로 구축하는 연구들 또한 진행되고 있다[15]. 게임 배경을 위한 국내 연구들은 주로 지형의 효율적인 생성 및 표현에 대한 연구들로 배경을 구성하는 식물 생성과 관련한 연구는 이루어지고 있지 않다[16,17].

다수의 나무로 구성된 실외 지형을 구축하는데 있어 기존의 규칙기반 모델링은 주로 사실적 표현에 초점이 맞추어져 성장 과정이 직관적이지 않고 복잡하며 제어해야 할 매개변수가 많다. 또한 성장 단계에 따른 가지 증식 분포가 복잡하여 다수의 나무로 확장할 경우 게임과 같은 실시간 시스템에 적용하기에 적합하지 않다. 재구성을 통한 나무 모델링 방법은 나무 모델 생성에 필요한 조건이 많고 이러한 조건을 통해 만들어낼 수 있는 실외 지형은 극히 제한적이고 소수의 나무에 불과한 상황이다. 이렇듯 다양한 다수의 나무를 보다 효과적으로 모델링하고 이를 실시간 시스템에서 효율적으로 적용하기 위한 렌더링 과정을 동시에 고려하는 연구는 부족한 상황이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 다수의 나무를 보다 쉽고 직관적이며 자연스럽게 모델링하면서, 가지와 잎의 분포가 일정한 패턴을 가짐으로써 게임 배경을 이루는 실외 지형을 구성하는 많은 수의 나무를 표현하는데 적합한 성장 패턴을 정의한다. 또한 다수의 나무들을 효율적으로 렌더링 할 수 있는 처리과정을 설계하고 이를 통해 실시간 게임 배경을 효과적이면서 자연스럽게 구축할 수 있는 통합 모델을 제안한다. 이는 다수의 나무를 동시에 직관적이면서 효율적으로 생성하는데 최적화되어있는 기존 방법들을 활용하고, 단점을 보완한 새로운 방법이다.

본 논문은 총 4절로 구성되어 있다. 2절에서는 제안하는 나무 성장 모델의 모델링, 렌더링, 게임 배경 제작 과정을 단계별로 설명하고 3절에서는 실험을 통해 본 연구의 결과를 분석하며 마지막으로 4장에서는 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

2. 나무 성장 모델

본 연구에서 제안하는 나무 성장 모델은 [Fig. 1]과 같이 다양한 나무를 보다 쉽고 직관적이며 자연스럽게 생성하면서 복잡한 구조를 갖는 가지의 성장 패턴을 효율적으로 관리할 수 있는 모델링 방법, 다수의 나무로 구성된 게임 실외 지형의 실시간 처리를 위한 렌더링 방법, 그리고 이를 통합하여 효율적으로 게임 배경을 제작하는 방법의 3 단계로 나누어 설계한다.

[Fig. 1] The tree growth model structure

2.1 자연스러운 나무 모델링

모델링 방법은 크게 부모 가지로 부터 새로운 가지의 성장 정보를 결정하는 성장 규칙의 정의와 현재 성장 단계에서 가지와 잎의 분포를 결정하는 성장 패턴의 두 단계로 나누어 설계한다.

우선 기본적인 나무 구조는 계층적인 가지 구조를 가지고 있으며 하나의 가지는 싹과 잎으로 구성된다. 그리고 매 성장 단계마다 각각의 싹에서 부모 가지의 정보를 바탕으로 새로운 가지를 증식한다. 가지 증식 과정은 싹의 위치, 방향, 가지의 길이, 폭 등 결정해야 할 매개변수가 많고, 다양한 형태의 나무를 생성하기 위해 여러 매개변수를 제어하는 규칙이 복잡해진다. 본 연구는 이러한 문제를 보완하기 위해 성장 볼륨 알고리즘을 활용한다 [18]. 이는 성장 볼륨 구성요소로부터 성장 요소를 자동으로 계산하고 원하는 형태의 나무를 쉽고 직관적으로 생성 가능한 장점이 있다.

예를 들어, 사용자가 실린더 형태의 성장 볼륨 요소인 위·아랫면의 반지름(w_b, w_t), 높이(h)를 정의하면 싹의 위치(p_i), 성장 방향($\vec{v}_i$) 및 회전각(θ)과 같은 새로운 가지의 여러 성장 요소를 자동으로 계산하여 가지를 증식하게 된다. (eq. 1)은 이러한 처리과정을 나타낸 예이다.

$$\begin{aligned} p_i &= p_{pr} + r_{bud} * \vec{v}_{pr} \\ \vec{v}_i &= R(\Phi_i) R(\theta_i) \vec{v}_{pr} \\ \theta_i &= \theta_s + 0.1m * \lambda * g_s * \theta_t \end{aligned} \quad (\text{eq. 1})$$

여기에서 $r_{bud} = ((w_t/w_b)/w_{max})$ 는 성장 볼륨의 비율이고, $m = ((w_t - w_b)/|(w_t - w_b)|)$ 은 성장 볼륨의 증가, 감소 요소이며, θ_s 는 성장 볼륨 요소로부터 계산된 초기 각이다. 이밖에 R 은 회전 변환, λ 는 성장 조절 요소, g_s 는 현재 성장 단계, θ_t 는 성장 볼륨의 윗면 각도이다[18].

이밖에도 나무의 외형을 결정하는 성장 정보들로 가지의 길이(l), 폭(r) 등의 매개변수들을 성장 볼륨을 통해 자동 계산함으로써 다수의 다양한 나무를 쉽고 직관적으로 생성할 수 있다.

[Fig. 2] Result of tree modeling using growth volume algorithm

[Fig. 2]는 성장 볼륨을 바탕으로 나무를 성장한 결과를 보인 것 이다. 성장 볼륨만으로 원하는 형태의 나무 모델을 쉽고 직관적으로 생성할 수 있음을 알 수 있다. 여기서 얻은 그 효과를 잘 나타내기 위해 하나의 잎의 위치에 5개를 그룹으로 한 잎들을 임의로 추가한 것이다.

다음은 성장 패턴으로 현재 가지에서 얼마만큼의 가지가 생성되고 생성된 가지로부터 얼마만큼의 잎이 생성되거나 떨어질 것인지를 정의해야 한다. 본 연구에서는 약수 함수의 합성 곱을 활용하여 성장 패턴을 정의한다[19]. 일반적으로 식물 성장에 활용되는 L-system의 경우 사실적 표현에 초점이 맞추어져 있어 성장 단계가 증가할 때마다 가지의 수가 기하급수적으로 늘어난다.

본 연구는 약수 함수의 합성 곱을 활용하여 성장 패턴을 단순화하고 성장 과정에서 환경 요소를 자동으로 제어하여 다양한 다수의 나무로 구성된 게임 배경에 적합한 구조를 갖는 성장 패턴을 정의한다. 약수 함수의 합성 곱은 증명된 생성 규칙을 토대로 정확한 값으로 유도가 가능하며 임의의 N 에 따른 값의 분포가 일정한 간격을 갖는다. 이러한 성질로 최근 TCP 혼잡률 제어 등과 같은 컴퓨터 응용 분야에 약수 함수의 합성 곱을 활용하는 연구들이 진행되고 있다[20]. 본 연구 또한 복잡한 구조를 갖는 나무와 성장 단계에 따라 기하급수적으로 늘어나는 가지 분포를 효율적으로 관리하기 위해 약수 함수의 합성 곱을 나무 성장 패턴에 적용하였다.

(eq. 2)는 다양한 형태의 약수 함수의 합성 곱을 나타낸 것이다. 여기서 i 는 현재 성장 단계이다.

$$\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_1^i(k) \sigma_1^i(N-k) \quad (\text{eq. 2})$$

$$\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_{1,x}^i(k;2) \sigma_{1,y}^i(N-k;2)$$

$$\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_1^i(k) \sigma_1^i(N-k)$$

일반적으로 약수 함수($\sigma_1^i(k)$)는 자연수 k 의 양의

약수들의 합으로 정의된다. 또한 $\sigma_{1,x}^i(k;2)$ 는 약수들 중 짝수 또는 홀수(2로 나눈 나머지가 x 가 되는 약수)들만의 합으로 이루어진 함수이며 약수 중 짝수에 음수를 취하여 합하는 약수 함수($\tilde{\sigma}_1^i(k)$) 등 다양한 형태의 약수 함수들이 존재한다. 그리고 (eq. 2)와 같이 이런 약수 함수들을 조합한 약수 함수의 합성 곱을 정의할 수 있다. 수학 분야에서 다양한 종류의 약수 함수의 합성 곱을 정의하고 임의의 N 에 대한 일반적인 생성 규칙을 찾는 연구들이 활발히 진행되고 있다[21]. (eq. 3)은 일반적인 생성 규칙의 한 예이다. 여기서 N 은 현재 성장 단계로 지정하고, N 에 따른 합성 곱 값의 변화를 나무 성장 패턴으로 설계한다.

$$\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_{1,1}(k;2) \sigma_{1,1}(N-k;2) \quad (\text{eq. 3})$$

$$= \frac{1}{24} \{11\sigma_3(N) - \sigma_3(2N) - 2\sigma_{1,1}(N;2)\}$$

나무는 크게 가지와 잎으로 구성되기 때문에 본 연구는 두 개의 약수 함수의 합성 곱 형태를 활용한다. 그리고 k 에 해당하는 앞의 약수 함수를 가지 성장에 $N-k$ 에 해당하는 뒤의 약수 함수를 잎의 성장에 대응시킨다.

다음은 CGA 문법의 표기법[22]을 사용하여 약수 함수의 합성 곱 기반의 가지와 잎의 성장 패턴을 정의한 한 예이다. 본 연구는 다수의 자연스러운 나무의 효율적 모델링을 목적으로 하기 때문에, 성장 과정을 보다 직관적으로 표현하기 위하여 CGA 표기법을 활용하여 새롭게 정의하였다.

$$\text{function} \rightarrow \text{select} \left(\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_1^i(k) \sigma_1^i(N-k) \right) \quad (\text{eq. 4})$$

$$n_{dv} : k \equiv N-1 \rightarrow n_{dv} = \sigma_1^{g_s}(k) \quad (\text{eq. 5})$$

$$n_{dv} : k \neq N-1 \rightarrow n_{dv} = \sigma_1^{g_s}(k) - \sigma_1^{g_s-1}(k)$$

$$n_{br} : |n_{dv}| > 0 \rightarrow n_{br} \in \{x | 1 \leq x \leq |n_{dv}| + 1\}$$

$$n_{lf} : k \equiv N-1 \rightarrow n_{lf} = \sigma_1^{g_s}(N-k)$$

$$n_{lf} : k \neq N-1 \rightarrow n_{lf} = \sigma_1^{g_s}(N-k) - \sigma_1^{g_s-1}(N-k)$$

$$\begin{aligned}
 \text{branch} : n_{dv} > 0 &\rightarrow \text{growth}(n_{br}, \text{branch}) & (\text{eq. 6}) \\
 \text{branch} : n_{dv} = 0 &\rightarrow \text{env}(g, \alpha, \text{branch}(\text{"all"})) : 0.4 \\
 \text{branch} : n_{dv} < 0 &\rightarrow \text{env}(s, \alpha, \text{branch}(\text{"current"})) : 0.1 \\
 \text{branch} : n_{lf} > 0 &\rightarrow \text{leaf}(n_{lf}) \\
 \text{branch} : n_{lf} < 0 &\rightarrow \text{fallenleaf}(n_{lf})
 \end{aligned}$$

(eq. 4)는 (eq. 2)의 여러 합성 곱 가운데 원하는 약수 함수의 합성 곱을 선택하고 이를 기반으로 나무의 성장 패턴을 정의한다. 선택한 약수 함수의 합성 곱을 통해 계산된 수치적 값(n_{dv})을 바탕으로 반복 횟수 k 에 따라 현재 단계에서 가지와 잎이 얼마만큼(n_{br}) 추가($k \neq N-1$) 또는 새로 생성($k \equiv N-1$)이 될 것인지를 결정한다. 우선 나무의 구성 요소 중 가지는 이전에 생성된 가지로부터 추가로 가지가 자라는 경우와 나무 몸통으로부터 새로 가지가 생성되는 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. 따라서 약수 함수의 합성 곱을 이와 대응시켜 반복 횟수 k 에 따라 새로 생성($\sigma_1^g(k)$)하거나 이전 단계와의 관계를 고려하여 추가($\sigma_1^g(k) - \sigma_1^{g-1}(k)$)될 가지 성분(n_{dv})을 계산한다. 다음으로 부모 가지 또는 나무 몸통으로부터 증식되는 가지의 수(n_{br})는 n_{dv} 로부터 정의한다. 잎 성분

(n_{lf}) 역시 가지와 같은 방법으로 계산한다. 계산된 값(n_{lf})에 따라 현재 증식된 가지로부터 n_{lf} 개의 잎을 생성하거나 경우에 따라 떨어질 잎으로 지정하게 된다.

(eq. 4)를 통해 가지와 잎에 대한 성장 패턴이 결정되면 앞서 도입한 성장 볼륨을 통해 자동으로 계산된 성장 정보를 기반으로 가지를 증식하고 잎

뿐만 아니라 현재 가지의 잎의 성분 값(n_{lf})에 따라 떨어질 후보 잎을 결정하여 [Fig. 3](d)와 같이 외부 힘이 나무에 적용될 경우 후보 잎 중 일부가 선택적으로 낙화하는 현상도 표현할 수 있다. 이러한 과정을 통해 다양한 나무 생성을 사용자의 최소한의 제어로 가능하게 하며 성장 단계마다 증식되는 가지의 분포 또한 효율적인 구조를 갖는다.

[Fig. 3]은 약수 함수의 합성 곱을 통해 다양한 나무의 성장 결과를 나타낸 것이다. 약수 함수 $\sigma_{1,x}^i(k;2)$ 는 n_{dv} 의 계산 값이 0이 되는 경우가 자주 발생하며, $\tilde{\sigma}_1^i(k)$ 는 음수 값이 계산되는 약수 함수의 성질을 갖는다. 이런 약수 함수의 성질을 나무 성장에 대응시켜 다양한 나무 형태를 최소한의 제어로 생성 가능함을 확인하였다.

[Fig. 3] Result of growth of various trees through the convolution sums of divisor functions based growth pattern; W : (a) $\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_1^i(k) \sigma_1^i(N-k)$; (b) $\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_{1,x}^i(k;2) \sigma_{1,y}^i(N-k;2)$; (c) $\sum_{k=1}^{N-1} \tilde{\sigma}_1^i(k) \sigma_1^i(N-k)$; (d) $\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_1^i(k) \sigma_1^i(N-k)$.

2.2 다수 나무의 효율적 렌더링

제한하는 나무 모델은 다수의 나무로 구성된 실시간 게임 배경 제작을 위한 것으로 이를 위한 렌더링 과정이 구현되어야 한다. 본 연구에서는 카메

라와 나무 모델들 사이의 거리에 따라 가지의 세밀함을 조절하는 세분화 단계를 설정한다. [Fig. 4]는 이를 나타낸 것으로 카메라와 나무 모델 사이의 거리에 따라 가지 곡선의 부드러움, 표면을 구

성하는 정점의 수 그리고 성장 단계를 조절하여 시스템의 효율을 높이는 방법이다. 우선 각 나무 모델에 대해 세밀함을 3단계로 나누어 생성하고, 거리에 따라 렌더링되는 나무 모델을 교체하는 방식을 사용한다. 그리고 일정거리 이상이 되면, 이전 성장 단계의 나무 모델을 호출하여 불필요한 잔가지를 렌더링에서 제외하는 구조를 갖는다. 이에 대한 구체적인 방법은 Kim[18,19]이 제안한 방법을 활용한다.

[Fig. 4] Level of details according to the distance to the camera

그리고 게임 배경의 실외 지형을 구성하는 많은 나무를 모두 다르게 생성하는 것 보다는 동일한 성장 값을 갖는 나무들 중 일부는 반복 처리함으로써 시스템의 효율을 높인다. 이때 나무의 반복적 호출을 줄이면서 적은 메모리 사용으로 처리하는 인스턴싱 기법을 활용한다[18]. 이는 렌더링 시 나무의 정점과 인덱스 등의 정보를 메모리에 넘기고 반복 호출 시 저장된 정보를 복사해서 사용하는 방법이다.

2.3 게임 배경 제작

제안한 모델링 및 렌더링 방법을 통해 효율적인 나무 성장 과정이 정의되면 이를 기반으로 자연스러운 게임 배경을 효과적으로 구축할 수 있는 방법을 정의한다. 게임 배경 제작 과정은 다음과 같다. (1) 각 나무에 대한 성장 정보를 자동으로 결정하는 성장 볼륨을 정의하고 (2) 성장 패턴을 결정하기 위한 약수 함수의 합성 곱을 나무에 개별적으로 부여한다. (3) 성장 단계를 반복하여 다수

의 나무를 자동으로 생성한다. 그리고 정의한 렌더링 방법을 적용하여 효율적으로 게임 배경을 표현한다. 이때 다수의 나무들을 개별적으로 제어하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 성장 볼륨 요소를 RGB컬러 모델과 같은 3개의 채널로 분류하고 약수 함수의 합성 곱 분포를 나누어 이들을 지형 맵과 유사한 개념으로 텍스처로 정의한다. 그리고 게임 배경에 대한 지형이 결정되고 나무들이 배치될 공간이 결정되면 이때 각각의 나무 성장에 대한 정보를 나무 위치에 해당되는 텍스처로부터 불러와 자동으로 설정한다. 이는 높이 맵을 통해 지형을 구성하는 방식과 동일하다. [Fig. 5]는 전체 지형에 대한 성장 정보를 임의의 크기의 텍스처로 나타낸 한 예이다. [Fig. 5](a)는 성장 볼륨의 구성 요소(w_b, w_t, h)를 임의의 최대값을 기준으로 정규화하여 이를 텍스처로 표현한 것이다. 예를 들어, A 지역의 나무 모델은 해당 지역의 텍스처 맵으로부터 w_t, h, w_b 값을 추출하고 각각 $1 \sim [w_t, h, w_b]$ 사이의 임의의 값을 설정하여 성장 볼륨을 자동으로 생성한다. 그리고 성장 볼륨 알고리즘을 통해 가지 증식으로 자동으로 계산한다. 또한 A지역과 같은 색상을 갖는 지역이 존재하는데 이때는 성장 정보가 동일하므로 일부 나무는 인스턴싱을 통해 반복 호출하게 된다.

[Fig. 5](b) 또한 같은 방법으로 나무들이 속해 있는 지역에 맞는 약수 함수의 합성 곱을 부여하고 성장 패턴을 결정한다.

(a) Texture map about growth volume information

(b) Texture map about convolution sums of divisor functions

[Fig. 5] Examples of texture map about growth information

3. 실험 및 분석

제안한 나무 성장 모델은 Visual Studio 2008과 DirectX SDK 9.0을 이용하여 개발하였으며 성능 실험에 사용된 PC는 Intel Core i5-650 CPU, 4GB RAM, Geforce GT 320 GPU를 탑재하고 있다. 자연스러운 게임 배경 제작과 렌더링은 Unity 3D엔진을 활용하였다. 본 연구는 성장 볼륨만으로 가상 생태계를 구성하는 기존 방법에 효율적인 가지 증식 구조를 갖는 약수 함수 합성 곱 집나의 성장 패턴과 이를 조합한 게임 배경 제작 방법에 대한 실험을 진행하였다.

실험은 크게 두 단계로 나누어서 진행한다. 우선 제안한 나무 성장 모델을 활용하여 다양하고 효율적인 나무 모델 생성과 이를 통한 자연스러운 게임 배경을 구성할 수 있는지 여부에 대한 실험이다. [Fig. 6]은 제안한 모델링 방법을 통해 생성된 나무 모델들로 성장 볼륨을 통해 다양한 나무 형태를 제어할 수 있고, 약수 함수 합성 곱 기반의 성장 패턴을 통해 나무 모델을 구성하는 정점 수가 성장 볼륨만을 활용한 기존 방법[18]의 20,000개 이상의 정점 수와 비교하여 효율적임을 알 수 있다.

[Fig. 6] Result of tree growth using proposed tree modeling method(growth step: 6~7, convolution sums of divisor functions: $\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_1^i(k) \sigma_1^i(N-k)$, the average number of vertices: 13,872)

[Fig. 7]은 [Fig. 5]의 텍스처 정보를 기반으로 사용자의 별다른 제어 없이 자동으로 생성된 나무 모델들로 복잡한 게임 배경을 빠르고 쉽게 구축할 수 있음을 확인하였다. [Fig. 7]과 같은 게임 배경을 제작하는데 있어 지형, 잔디 등의 부가적 요소가 구성되었다고 가정할 경우, 나무 모델만을 생성하는데 2~30분이 넘지 않는 빠르고 효과적인 표현이 가능하다.

다음은 다수의 나무로 구성된 복잡한 게임 배경에서의 성능 실험으로 먼저 약수 함수의 합성 곱을 통한 성장 패턴을 분석하였다. [Table 1]은 $\sum_{k=1}^{N-1} \sigma_1^{i*}(2^m k) \sigma_1^i(N-k)$ 를 통한 나무 성장에서의 가지 분포를 나타낸 것이다.

성장 패턴의 예측이 쉬운 함수인 $\sigma_1^*(k)$ 은 약수(d) 중에서 보수(k/d)가 홀수 인 수의 합을 나타내는 것으로 L-system에서 단계별로 2~3개의 가지를 생성하였을 때 기하급수적으로 늘어나는 가지 패턴과 비교하여 효율적인 구조를 가지는 것을 알 수 있다. 가령, 성장 단계를 10이라 할 때 $2^{10} \sim 3^{10}$ 의 가지가 추가되는데 반해 약수 함수의 합성 곱을 활용하면 보다 일정한 패턴을 가질 수 있다.

[Fig. 7] Construction result of a game landscape consisting of numerous trees

뿐만 아니라 수학적으로 계산하였을 때 m (가지의 증감비)의 값의 변화에 따라 추가 또는 생성되는 가지의 수가 2배로 늘어나는 것은 물론 난수를 적용하여 가지 패턴의 불규칙성을 부여하여도 가지의 수를 대략 2배, 4배, ... 등으로 조절이 가능함

을 알 수 있다. 이는 다수의 나무로 구성된 게임 배경을 제작할 때 사용자가 성장 패턴을 조절하는데 유용하게 활용 될 수 있다.

[Table 1] Comparison between the number of branches increasing by growth step

Growth step	The number of branches by changes in m			
	the exclusion of random number		the application of random number	
	0	1	0	1
2	4	7	8	10
5	18	35	79	135
10	67	133	179	332

마지막으로, 제안한 성장 모델을 기반으로 구축한 게임 배경의 실외 지형의 실시간 처리 가능성에 대한 실험으로 [Table 2]는 각각 500, 1000, 1500 그루의 나무를 배치하였을 때의 실험 결과이다. 1500여 그루의 나무를 생성하는 경우에도 제안한 방법을 통해 실시간 처리가 가능함을 확인하였다. 단순히 자기 조직화 기반의 성장 볼륨만을 활용한 기존 방법은 성장 단계에 따른 가지 분포가 앞서 설명한 것과 같이 지수(n^k) 단위로 증가하는 것에 반하여 본 연구는 일정한 분포를 갖는 약수함수의 합성 곱을 가지 분포에 적용함으로써 같은 나무 수에서 효율이 높아짐을 알 수 있다.

[Table 2] Rendering speed using the proposed tree growth model

The number of trees	Average growth step	FPS
500	7~9	49.55
1000	7	35.22
1500	6	34.10

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 실외 지형을 비롯한 게임 배경을 구성하는 다수의 다양한 나무들을 보다 쉽고 직관적이고 자연스럽게 생성하면서 동시에 실시간으로

표현할 수 있는 나무 성장 모델을 설계하였다. 제안하는 모델은 3차원 나무의 모델링 및 렌더링 과정은 물론 이를 통한 게임 배경 제작을 모두 고려한 통합 나무 성장 모델이다. 모델링 방법은 자연스러운 나무 성장은 물론 다수의 나무를 효과적으로 모델링하기 위하여 성장 볼륨 기반의 성장 규칙을 활용하였고 효율적인 가지 증식 구조를 갖기 위해 약수 함수의 합성 곱을 통한 성장 패턴을 활용하였다. 또한 게임 배경의 실시간 처리를 위하여 인스턴싱 기반의 가지의 세분화 단계를 적용하여 게임 배경을 구성하는 다수의 나무를 효율적으로 렌더링할 수 있도록 하였다. 이러한 모델링과 렌더링 방법을 결합하여 자연스러운 게임 배경을 효과적으로 제작할 수 있는 방법을 제안함으로써 다양한 나무의 자연스러운 표현을 보다 쉽고 효율적으로 처리할 수 있는 나무 성장 모델을 제안하였다. 또한 제안한 방법을 통해 게임 배경의 효과적인 제작 가능성과 실시간 시스템에서의 효율성을 실험을 통해 확인하였다.

현재 연구에서 적용된 나뭇잎은 기초적 방법의 조명 처리가 적용된 빌보드 방식으로 향후 나뭇잎의 표현 및 나무 전체의 사실성을 높이기 위한 조명 응용 기술을 구현함으로써 게임 장면의 사실적 표현을 높일 수 있을 것이다. 또한 약수 함수의 합성 곱을 통한 값의 패턴 변화를 잎의 색에 적용하여 계절에 따라 혹은 환경에 따라 잎의 변화를 나타내는 방법과 나무 모델에 대한 애니메이션 기술에 대한 연구들을 진행함으로써 더욱 자연스러운 나무 모델 생성이 가능할 것이다.

REFERENCES

- [1] R. Sun, J. Jia and M. Jaeger, "Intelligent tree modeling based on l-system", 2009 IEEE 10th International Conference on ComputerAided Industrial Design Conceptual Design, pp. 1096-1100, 2009.
- [2] J. Weber and J. Penn, "Creation and rendering of realistic trees", In Proceedings of SIGGRAPH 1995, pp. 119-128, 1995.
- [3] W. Palubicki, K. Horel, S. Longay, A. Runions, B. Lane, R. Měch and P. Prusinkiewicz, "Self-organizing tree models for image synthesis", In Proceedings of SIGGRAPH 2009, pp. 58:1-10, 2009.
- [4] R. Karwowski and P. Prusinkiewicz, "Design and Implementation of the L+C Modeling Language", Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 86, No. 2, pp. 134-152, 2003.
- [5] P. Prusinkiewicz, F. Samavati, C. Smith and R. Karwowski, "L-system Description of Subdivision Curves", International Journal of Shape Modeling, Vol. 9, No. 1, pp. 41-59, 2002.
- [6] F. Boudon, C. Pradal, T. Cokelaer, P. Prusinkiewicz and C. Godin, "L-Py: an L-System Simulation Framework for Modeling Plant Development based on a Dynamic Language", Frontiers in Plant Science, Vol. 3, No. 76, pp. 1-20, 2012.
- [7] P. Reffye, C. Edelin, J. Francon, M. Jaeger and C. Puech, "Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development", Computer Graphics, Vol. 22, No. 4, pp. 151-158, 1988.
- [8] A. Takenaka, "A Simulation Model of Tree Architecture Development based on Growth Response to Local Light Environment", Journal of Plant Research, Vol. 107, No. 3, pp. 321-330, 1994.
- [9] C. Jirasek, P. Prusinkiewicz and B. Moulia, "Integrating Biomechanics into Developmental Plant Models Expressed using L-systems", Plant biomechanics 2000, Proceedings of the 3rd Plant Biomechanics Conference, pp. 615-624, 2000.
- [10] S. Pirk, O. Stava, J. Kratt, M. A. M. Said, B. Neubert, R. Měch, B. Benes and O. Deussen, "Plastic trees: interactive self-adapting botanical tree models", ACM Trans. Graph. Vol. 31, No. 4, pp. 50:1-10, 2012.
- [11] S. Longay, A. Runions, F. Boudon and P. Prusinkiewicz, "TreeSketch: interactive procedural modeling of trees on a tablet", Proceedings of the International Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling,

- pp. 107-120, 2012.
- [12] C. Li, O. Deussen, Y.-Z. Song, P. Willis and P. Hall, "Modeling and generating moving trees from video", In Proceedings of SIGGRA-PH Asia 2011, pp. 127:1-12, 2011.
 - [13] P. Tan, T. Fang, J. Xiao, P. Zhao and L. Quan, "Single Image Tree Modeling", Proceedings of SIGGRAPH Asia 2008, pp. 108:1-7, 2008.
 - [14] Y. Livny, S. Pirk, Z. Cheng, F. Yan, O. Deussen, D. Cohen-Or and B. Chen, "Texture -Lobes for Tree Modeling", Proceedings of SIGGRAPH 2011, pp. 53:1-10, 2011.
 - [15] O. Deussen, P. Hanrahan, B. Lintermann, R. Mch, M. Pharr and P. Prusinkiewicz, "Realistic modeling and rendering of plant ecosystems", In Proceedings of SIGGRAPH 1998, pp. 275-286, 1998.
 - [16] E.-S. Lee, J.-H. Lee, I. Jo and B.-S. Shin, "Acceleration of Terrain Rendering Using Bounding Box Subdivision", Journal of Korea Game Society, Vol. 11, No. 6, pp. 71-80, 2011.
 - [17] I.-S. Baek, K.-H. Um and K.-E. Cho, "A 3D Terrain Reconstruction System using Navigation Information and Realtime-Updated Terrain Data", Journal of Korea Game Society, Vol. 10, No. 6, pp. 157-168, 2010.
 - [18] J. Kim and H. Cho, "Efficient modeling of numerous trees by introducing growth volume for real-time virtual ecosystems", Computer animation and Virtual Worlds, Vol. 23, No. 3-4, pp. 155-165, 2012.
 - [19] Jinmo Kim, "Realistic and efficient modeling of trees and forest using growth volume and divisor function", Dongguk University, PhD thesis, 2012.
 - [20] NIMS, <http://www.nims.re.kr>
 - [21] B. Cho, D. Kim, and J.-K. Koo, "Modular forms arising from divisor functions", Journal of Mathematical Analysis and Applications, Vol. 356, No. 2, pp. 537-547, 2009.
 - [22] P. Mller, P. Wonka, S. Haegler, A. Ulmer and L. Van Gool, "Procedural modeling of buildings", In Proceedings of SIGGRAPH 2006, pp. 614-623, 2006.

김진모 (Kim, Jin Mo)

2006년 2월 동국대학교 멀티미디어공학과 졸업(공학사)
 2008년 2월 동국대학교 멀티미디어학과 졸업
 (예술공학석사)
 2012년 8월 동국대학교 멀티미디어학과 졸업(공학박사)
 2012년 9월-현재 동국대학교 영상문화콘텐츠연구원
 전임연구원

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

김대열 (Kim, Dae Yeoul)

1991년 2월 전북대학교 수학과 졸업(이학사)
 1993년 2월 전북대학교 수학과 졸업(이학석사)
 1998년 2월 전북대학교 수학과 졸업(이학박사)
 2007년 11월-현재 국가수리과학연구소 선임연구원

관심분야 : 정수론, 절차적 모델링, 특수함수론

조형제 (Cho, Hyung Je)

1973년 부산대학교 전자공학과(학사)
 1975년 한국과학기술원 전기·전자공학과(공학석사)
 1986년 한국과학기술원 전기·전자공학과(공학박사)
 1986년-현재 동국대학교 멀티미디어학과 교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 게임공학, 컴퓨터 비전,
 디지털사운드처리