최적화 기반의 음열음악 생성 및 제어 기법

Optimization based serial music generation and control

윤종철, Jong-Chul Yoon*, 이인권, In-Kwon Lee**, 유민준 Min-Joon Yoo***

요약

본 논문은 난수를 제어하는 통계적 방법을 사용한 음열음악의 작곡 및 제어 방법을 설명한다. 음열음악은 20세기 현대음악의 중요한 작곡 기술 중 하나로, 반음계의 모든 12음이 동일한 빈도로 사용되어야 한다는 성질을 갖는 음악을 뜻한다. 이러한 음열음악의 작곡을 위해, 우리는 최적화 기반의 난수생성기법을 사용하였다. 우리는 카이-제곱 테스트와 자기 상관성 테스트를 이용한 최적화식을 제안한다. 또한 이러한 최적화 기법에 사용자의 제약을 추가함으로써 사용자 제어 가능한 음열음악의 작곡이 가능하다. 본 논문의 기술을 사용하여 기존의 음열음악의 작곡 뿐 아니라, 사용자에 의해 주어진 멜로디나 비트를 따라가는 새로운 음열음악의 작곡이 가능하다.

Abstract

In this paper, we introduce a way to generate and control the serial music using stochastical tools. A serialism, which is one of composition techniques in the 20th century modern music, is composed using uniformly distributed notes or durations. To conserve this property, we design the optimization process to generate the random numbers which can be used to compose the serial music. The optimization are designed using chi-square test and auto-correlation test. User can also apply the additional constraint to the objective function for controlling the serial music. Using the our method, we can compose and control the traditional serial music automatically.

핵심어 : 음열음악, 난수생성, 최적화문제

keywords : serial music, Random number generation, optimization

본 논문은 문화관광부 및 한국문화콘텐츠진흥원의 문화콘텐츠기술연구소(CT) 육성사업의 연구결과로 수행되었음.

*주저자 : 연세대학교 컴퓨터학과 박사과정 e-mail:media19@cs.yonsei.ac.kr

**교신저자 : 연세대학교 컴퓨터학과 교수 e-mail: iklee@yonsei.ac.kr

***공동저자 : 연세대학교 컴퓨터학과 박사과정 e-mail:debussy@cs.yonsei.ac.kr

1. 서론

20세기 이후의 현대음악에서 기존의 작곡가의 감성에 더하여 수학적 또는 논리적 계산을 이용한 새로운 작곡방법이 제안되었다. 다양한 작곡가들이 이러한 새로운 작곡방법을 제시하였고 그 중 통계적 기반의 제나키스(Xenakis)[1]의 결과들과 완전한 난수를 음악의 작곡에 사용한 존 케이지(John Cage) [2]의 결과 등이 대표적인 경우라고 할 수 있겠다. 이러한 현대음악의 한 종류인 음열음악[3]은 기존의 화음기반의 음악이 아닌, 무조의 형태를 가지는 독특한 형식의 음악이다. 쉔베르크(A.Schenberg) 등에 의해 제안된 음열음악의 가장 주요한 특징은 12음기법으로 정의되는, 반음계의 모든 12개의 음이 같은 빈도로 사용되어야 한다는 점이다. 즉 작곡된 음악의 어떠한 부분을 보더라도 12개의 음계가 고르게 사용되고 있어야 한다. 이러한 12음기법은 음의 길이에까지 영향을 주어 단순 음계의 균일분포가 아닌 음의 길이의 균일분포로의 확장도 가져왔다. 하지만 이러한 음열음악의 작곡은 대부분 사용자의 손에 의해 진행되었고 이러한 수작업을 통하여 안정적인 무조음악을 생성하는 것은 결코 쉬운 일은 아니다.

우리는 통계적 기법에 기반을 둔 최적화된 난수생성기법을 사용하여 새로운 음열음악의 생성기법을 제안하고자 한다. 음열음악을 만드는 가장 단순한 방법은, 12개의 음계를 랜덤하게 배치시킴을 반복하는 것이다. 하지만 이 경우 같은 배치가 반복될 수 있다는 단점이 있다. 이러한 반복성을 방지하면서 균일한 빈도를 보이는 음계를 생성하기 위해선 비주기성과 균일분포를 만족시키는 난수에 기반을 둔 음열음악을 생성하여야 한다. 우리는 양질의 난수생성을 위한 통계적 기법 기반의 최적화문제를 디자인해서 이러한 난수를 발생시키려 한다. 우선 난수의 균일성을 체크하기 위한 카이-스퀘어 (chi-squared) 테스트를 사용하여 생성될 난수의 균일분포성을 분석한다. 카이-스퀘어 테스트란 주어진 데이터 군이 기대하는 분포를 얼마나 만족하는가를 체크하는 도구이다. 만약 기대하는 분포가 균일한 분포일 때, 카이-스퀘어 값이 작으면 작을수록 기대 분포를 만족한다고 볼 수 있다. 다음으로 자기상관성 (auto-correlation) 테스트를 사용하여 생성될 난수의 주기성을 체크한다. 자기상관성 테스트는 주어진 데이터 내에서 대해 주기성을 가지는 곳에서 높은 값을 가지게 된다. 따라서 모든 데이터 내에서 자기상관성 값이 최소화 된다면 비 주기적인 형태를 가진다고 볼 수 있다. 우리는 이 두 가지 통계적 툴을 사용하여 최적화문제를 제안한다. 이렇게 디자인 된 수식을 최소화 하는 문제에 의해 음열음악 작곡을 위한 자동화된 난수 생성이 가능하였다.

추가적으로 본 논문에서는 음열음악을 제어하는 기법을 소개하고자 한다. 기존의 음열음악은 난수성에 의존한 반면에 우리가 제안하는 최적화 기반의 난수에 의해 생성되는 음악의 경우, 사용자가 추가적인 제약을 가할 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 사용자 제약은 안정적인 무조음악의 생성이란 점과는 반하는 부분이 존재한다. 즉 실제 음열음악이 가지는 이상적인 특징이 어느 정도 위반되어야 사용자 제어 기반의 작곡이 가능하다는 점이다. 하지만 이러한 난수성에 대한 제약은 작곡가의 수작업으로는 이루어지기 힘든 문제이다. 우리는 최적화문제에 추가된 제약식을 사용하여 사용자 제어 가능한 음열음악의 작곡법을 제시하고, 이상적 음열음악의 성질을 얼마나 유지할 것인가에 대한 제어가능성도 보인다.

음열음악의 제어가능성은 새로운 분야의 음열음악의 적용가능성을 보여줄 수 있다. 기존의 그래픽스기반의 영상 및 애니메이션의 배경음악 동기화 기술과 유사하게, 음열음악에 동기화된 영상의 제작이 가능하다. 또한 입력된 멜로디와 가장 유사한 음열음악의 작곡이 가능하며, 이는 새로운 형식의 결과를 보여 줄 수 있다. 우리는 이러한 제어가능성에 대한 예제를 보임으로써 본 기술의 타당성을 보이겠다.

본 논문의 기술이 가지는 장점은 다음과 같이 요약할 수 있다:

- **자동화된 음열음악의 작곡:** 사용자에 의해 주어진 초기값을 기반으로 한 안정화된 난수생성을 통해 자동화된 음열음악의 작곡이 가능하다.
- **사용자 제어 가능한 음열음악의 작곡:** 최적화 문제 기반의 접근에 의해 사용자가 추가적인 제약을 작곡에 가할 수 있다.
- **확장 가능성:** 컴퓨터에 의해 생성되는 난수는 무한한 정의역을 가짐으로, 12음기법의 제약을 벗어나 다양한 도메인의 음열음악 작곡에 사용될 수 있다.

2. 음열음악의 생성기법

2.1 쉔베르크의 음열도표

쉔베르크에 의에 제안된 음열도표(twelve tone matrix)는 하나의 음열과 그 음열의 전위 및 전조된 형태로 구성된 12x12 크기의 도표이다[3, 4]. 이 도표에는 원본 음열과 그 음열의 전위된 형태, 역행된 형태, 역행전위된 형태 및 전조된 형태등이 표현되어있다. 따라서 이 도표를 사용하면 초기의 하나의 음렬에 의해 생성될 수 있는 다양한 음렬을 쉽게 찾을 수 있기 때문에 이를 사용하여 음열음악의 작곡에 도움을 받을 수 있다. 하지만 이렇게 음열도표에 의한 작곡기법은 초기 음열에 의해 전체 음열도표가 결정되어, 사용자의 간섭이 어렵다는 단점을 가진다. 음악의 작곡이란 점에선 사용자의 제어가 어렵다는 점은 큰 문제점으로 남는다. 물론 도표의 배열을 바꾸는 방법을 사용하여 음열도표 안의 하나

의 숫자를 제어 할 수는 있다. 그림 1에서 보듯 음열도표 속 하나의 숫자를 다른 숫자로 교체할 경우 전체 도표을 약간씩 수정함으로써 음열음악의 제약을 만족시킬 수는 있다. 하지만 하나의 숫자, 즉 음계의 수정이 아닌 광역적인 수정은 불가능한 일이다.

(a) (b)

그림 1. 도표 배열 수정에 의한 음열도표 수정: (a) 원본 음열도표, (b) 9와 1(붉은색)을 서로 바꿈에 의한 음열도표의 변화(노란색).

2.2 난수 기반의 음열음악 작곡기법

펄린(Perlin)의 노이즈 함수를 사용한 음열음악의 작곡 및 제어기법은 이미 소개된 적이 있었다[5]. 이 기법은 펄린의 방향기 벡터 기반의 노이즈 함수를 사용하여 음열음악을 작곡하고, 작곡된 결과에 지역적인 제어를 가해 음을 하나씩 변경하는 기법이었다. 하지만 지역적인 제어의 경우 하나의 음에만 제어 할 수 있기 때문에 전체적인 분위기를 제어하는 데는 용이하지 않다[6]. 따라서 우리는 안정적인 난수를 제작하는 최적화 기법을 제안하고 이에 추가적인 제약을 가함으로써 기존의 지역적 난수 제어가 아닌 전역적 난수 제어기법을 제안하고자 한다.

3. 난수 안정화를 위한 최적화 기법

본 장에선 안정화된 난수를 생성하기 위한 방법을 소개한다. 이 방법은 카이-제곱 테스트와 자기 상관성 테스트를 이용한 최적화 식을 이용하여 이루어진다.

3.1 카이-제곱 테스트

카이-제곱 테스트(chi-squared)는 주어진 데이터의 분포와 기대분포가 얼마나 일치하는지를 측정하는 도구이다 [7]. X를 주어진 난수 데이터의 집합이라 가정했을 때, 우리는 같은 크기를 가지는 K개의 버킷으로 데이터를 분류 할 수 있다. j번째 버킷에 들어갈 데이터의 양을 mj라 정의 했을 때 카이-제곱 테스트는 mj와 기대분포와의 차이를 측정하게 된다. 우리는 3차원 노이즈 생성을 위한 [-1,1]의 도메인을 가지는 난수테이블의 N개의 항을 동일한 K개의 버킷으로 나누고 아래와 같은 식을 정의하였다:

$$CS(X)=\sum_{j=1}^{K}\left(\sum_{i}^{N}\left(B_j(x_i)-N/K\right)\right)^2, \quad (1)$$

$$B_j(x)=\begin{cases}1, & \text{if } b_j \le x \le b_{j+1},\\ 0, & \text{otherwise,}\end{cases} \quad (2)$$

여기서, Bj(xi) 는 j번째 버킷에 xi가 속하는지를 체크하는 boxcar함수이다. 우리는 기대분포를 N/K로 고정함으로써 모든 난수가 전체 도메인에 골고루 퍼져있을 때 가장 작은 값을 가지는 목적함수를 식 (1)과 같이 디자인 할 수 있었다.

3.2 자기 상관성 테스트

자기상관성(auto-correlation) 테스트는 다차원 신호의 반복점을 찾는 문제로 사용되는 툴이다[8]. 일반적으로 자기상관성 테스트는 주어진 데이터와 그것을 특정 오프셋 벡터 k만큼을 이동한 데이터와의 상호상관 (cross-correlation) 비교를 통해 정의된다. 높은 상호 연관성 값을 가지는 k벡터의 지점이 신호의 반복점이 될 가능성이 크다고 판단된다. 임의의 벡터 k에 대한 자기연관성 값 autoc(k)을 계산하는 식은 아래와 같이 표현된다:

$$autoc(\mathrm{k})=\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-u)(x_{i+k}-u)}{\sum_{i=1}^{N}(x_i-u)^2}. \quad (3)$$

우리는 식 (3)의 자기상관성 값 autoc(k)을 모든 오프셋 벡터 k에 대해 최소화하는 아래와 같은 목적함수를 디자인 하였다:

$$AC(X)=\sum \| autoc(k) \|. \quad (4)$$

3.3 최적화 기법 정의

앞장에서 설명한 2가지 목적함수, CS(X)와 AC(X)를 사용하여 우리는 아래와 같은 최종적인 목적함수를 제작할 수 있다:

$$\text{minimize } w1CS(X) + w2AC(X) \quad (5)$$

여기서 wi는 각각의 목적함수에 대한 가중치를 뜻한다. 식 (5)를 최소화 시키는 난수의 집합 X는 안정적인 난수 분포를 가짐과 동시에 비 반복적인 특성을 가진다고 가정 할 수 있다. 따라서 우리는 음의 높이와 길이를 위한 64x64개

의 초기화된 의사난수(pseudo-random number)를 초기해로 가정하고 식 (5)를 최소화 시키는 문제를 풀었다. 이때 최적화 문제의 디자인을 위해선 모든 함수가 미분가능한 형태를 가져야 하지만, 카이-스퀘어 테스트의 항인 CS(X)의 경우 절대값을 가지는 복스카르(boxcar)함수이기 때문에 미분 불가능한 형태를 가진다. 따라서 3차원 b-spline을 사용한 복스카르 함수의 유사함수 디자인 기법[6] 을 적용하여 미분가능한 형태로 변환하였다.

4. 난수제약에 의한 음열음악의 제어

기존의 의사난수의 조합에 의한 음악의 생성과는 달리, 우리의 방법은 최적화 기반의 양질의 난수를 제작하는 방식이므로, 최적화기법에 추가적인 제약을 가할 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 장점을 응용하여 우리는 사용자가 원하는 제약 Con(X)을 최적화 문제의 제약으로 설정하고 음열음악을 작곡하고자 한다.

Con(X)의 형태는 사용자가 원하는 임의의 지점에서의 음의 노트 또는 길이의 제약이 될 수도 있으며, 모든 음열음악에 대한 전체적인 제어일수도 있다. 본 논문에선 미리 작곡된 하나의 일반적인 음악을 제약으로 가정하고 이와 유사한 음열음악을 작곡하는 문제를 디자인 해 보았다. 기존에 작곡된 일반적 음악의 경우 음열음악의 특성과는 거리가 멀기 때문에 식 (5)에 추가적인 항을 붙이는 약한 제약법을 사용하여야만 한다. 따라서 최종적인 제약 난수 생성기법은 아래의 문제를 풀어서 해결 할 수 있다:

$$\text{minimize } w1CS(X) + w2AC(X) + w3Con(X) \quad (6)$$

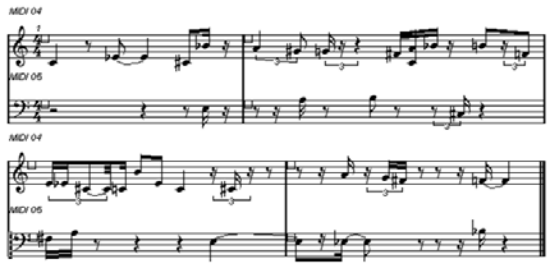

그림 2. 64x64난수에 의해 제작된 음열음악. 난수의 행에 의해 음높이를 설정하고 난수의 열에 의해 음 길이를 설정.

5. 실험 결과

본 논문에서 제안하는 안정된 난수 기반의 음열음악 작곡법을 실험하기 위해 우리는 64x64개의 난수를 식 (5)의 최적화 문제를 풀어 생성하였다. 난수테이블의 한쪽 축은 음의 높이를 표현하게 하였고, 나머지 한쪽 축은 음의 길이를 표현하게 하였다. 각각의 난수는 모두 [-1,1]의 도메인을 가지게 설정하였다. 음계를 구성하는 순서는 쉔베르크에 의해 제안된 구성 방식을 이용하였다[3].

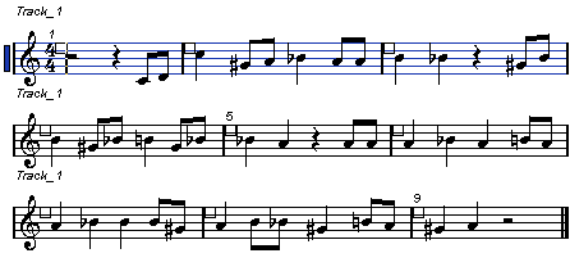

그림 3. 제약된 난수에 의해 생성된 음열음악 형태의 결과. 사용자 제어는 동요 '하늘끝까지' 노래의 음을 사용자 제어로 가정하고 이를 기반으로 한 음열음악을 제작함. 각각의 음계의 길이는 원본 음악의 길이를 그대로 따름.

그림 2는 안정된 난수에 의해 생성된 음열음악의 결과를 보여준다. [-1,1]의 도메인을 C4를 기준으로 한 음역으로 변환하였고, 음의 길이는 1분음표로부터 32분음표까지의 영역으로 할당하여 사용하였다. 제작된 난수에 의해 자동적으로 음열음악의 작곡이 가능하였으며, 난수가 가지는 안정성이 음악에도 그대로 반영됨을 확인 할 수 있었다.

그림 3은 제약된 난수를 사용한 음열음악의 결과를 보인다. 우리는 동요인 '하늘끝까지' 의 음의 높이를 사용자 제어로 가정하고 이와 유사한 음열음악을 작곡하는 문제를 디자인 해 보았다. 여기서 음열음악의 길이는 또 다른 동요인 '학교종' 을 따르게 가정하였고 음의 높이에 대해서만 안정화된 난수를 따르도록 조정하였다. 이러한 가정 하에서 '학교종' 의 멜로디와 유사하지만 음열음악의 원래 고유한 특성을 최대한 유지하는 결과를 생성 할 수 있었다.

6. 결론

우리는 최적화기법에 기반을 두어 사용자가 제약 가능한 음열음악의 작곡기법을 설명하였다. 우리의 기법의 장점은 사용자가 원하는 멜로디 또는 비트와 유사한 형태를 가지는 음열음악의 작곡이 가능하다는 점이다. 하지만 최적화 문제 기반이기 때문에 우리가 제안하는 방식이 전통적인 음열음악의 조건을 정확히 만족한다고는 볼 수 없다. 하지만 이러한 통계치 기반의 방식을 사용하여 새로운 형태의 음열음악을 만들어 낼 수 있다는 점에서 그 가치를 찾을 수 있다고 생각된다.

참고문헌

[1] Harley, J.: The Electroacoustic Music of Iannis Xenakis. Computer Music Journal 26:1 (2002) 33-57.

[2] Pritchett, J., Whittall, A.: The music of John Cage (Music in the Twentieth Century). Cambridge University Press, 1996.

[3] Kostka, S.: Materials and Techniques of Twentieth-Century Music. Prentice Hall, 1999.

[4] D. Cope. New Music Composition. Schirmer Books, 1977.

[5] Y.-W. Jeon, I.-K. Lee, and J.-C. Yoon: Generating and Modifying Melody Using Editable Noise Function, CMMR 2005, Pissa, Italia Lecture Notes in Computer Science, Volume 3902, pages 164-168 March 17, 2006.

[6] J.-C. Yoon, I.-K. Lee, and J.-J. Choi: Editing Noise, Computer Animation and Virtual Worlds Vol. 15, Issue 3, pages 277-287, July 7, 2004.

[7] D. E. Knuth,"The Art of Computer Programming", Addison-Wesley, 1998.

[8] J. G. Proakis, D. G. Manolakis., "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications",3rd Edition, Cambridge University Press, 1996.