

물리적 모델링 합성법에 기반을 둔 줄 없는 기타 구현

Implementation of Non-Stringed Guitar Based on Physical Modeling Synthesis

강 명 수*, 조 상 진**, 정 의 필*
(Myeongsu Kang*, Sangjin Cho**, Uipil Chong*)

*울산대학교 컴퓨터정보통신공학부, **울산대학교 전기전자정보시스템공학부
(접수일자: 2008년 12월 4일; 수정일자: 2009년 1월 5일; 채택일자: 2009년 1월 23일)

본 논문에서 제안한 줄 없는 기타는 크게 레이저 현과 프렛, 음 합성 알고리즘과 프로세서로 구성된다. 레이저 현은 레이저 모듈과 포토다이오드를 이용하여 스트로크와 아르페지오를 표현할 수 있도록 하였고, 프렛은 전압 분배기를 이용하여 구현하였다. 몸통은 물리적 모델링 합성법을 이용하였기 때문에 줄 없는 기타에는 울림통의 역할을 하는 물리적인 몸통이 없다. 제안한 기타의 프렛은 실제 프렛을 동일하게 표현할 수 있어 기존의 코드 클리프를 이용한 코드 표현뿐 아니라 실제 기타와 같은 솔로 연주도 가능하다. 해머링 온, 풀링 오프, 슬라이딩과 같이 프렛 변화가 있는 연주음은 전압 분배기로부터 받은 프렛의 정보를 파라미터로 사용하여 합성한다. 연주법에 따른 음의 피치 변화는 디지털 도파관 모델에서 파동의 전파 속도 변화로 표현하였다. 이 합성 모델은 동일 프렛에서 현의 장력을 변화시켜 연주하는 비브라도 음도 합성할 수 있다. 레이저 현과 프렛으로부터 받아들이는 정보를 합성 알고리즘의 파라미터로 변환하여 기타 음을 생성하고 이를 실시간으로 출력할 수 있도록 TMS320F2812를 사용하였다. 웹에 공개한 동영상에는 제안한 알고리즘과 인터페이스를 이용하여 실시간으로 합성한 '아리랑' 연주를 볼 수 있다. 제안한 알고리즘이 피치 변화를 표현하는 기타 솔로 연주법에 효과적이고 줄 없는 기타로 실시간 연주가 가능함을 확인할 수 있다.

핵심용어: 줄 없는 기타, 레이저 현, 프렛, 물리적 모델링, 디지털 신호처리기

투고분야: 음악 음향 및 음향심리 분야 (8,6)

This paper describes the non-stringed guitar composed of laser strings, frets, sound synthesis algorithm and a processor. The laser strings that can depict stroke and playing arpeggios comprise laser modules and photo diodes. Frets are implemented by voltage divider. The guitar body does not need to implement physically because commuted waveguide synthesis is used. The proposed frets enable players to represent all of chords by the chord glove as well as guitar solo. Sliding, hammering-on and pulling-off sounds are synthesized by using parameters from the voltage divider. Because the pitch shifting corresponds to the time-varying propagation speed in the digital waveguide model, the proposed model can synthesize vibrato as well. After transformation of signals from the laser strings and frets into parameters for synthesis algorithm, the digital signal processor, TMS320F2812, performs the real-time synthesis algorithm and communicates with the DAC. The demonstration movieclip available via the Internet shows one to play a song, 'Arirang', synthesized by proposed algorithm and interfaces in real-time. Consequently, we can conclude that the proposed synthesis algorithm is efficient in guitar solo and there is no problem to play the non-stringed guitar in real-time.

Keywords: Non-stringed guitar, Laser string, Fret, Physical modeling, Digital signal processor

ASK subject classification: Musical Acoustics and Psychoacoustics (8,6)

I. 서론

음향 기술의 발전은 삶의 질 향상을 위한 과학 기술

개발과 어우러져 대중에게 다양한 형태의 감성 문화 콘텐츠들을 제공하고 있다. 음악과 관련하여서는 기존의 틀에서 벗어난 연주를 할 수 있는 뮤직 인터페이스 개발과 악기 음향 연구를 통한 알고리즘 기반의 악기 음 합성법이 결합되어 사용자의 오감과 감성을 자극하는 새로운 음악 창조 환경을 제공하고 있다. M. Karjalainen은 사운

책임저자: 정 의 필 (upchong@ulsan.ac.kr)
680-749 울산광역시 남구 무거동 산 29 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부
(전화: 052-259-2220, 팩스: 052-259-1687)

드 이펙트를 포함한 기타 신디사이저에 센서 기반의 휴대용 사용자 인터페이스와 이를 신호를 매핑할 수 있는 소프트웨어로 이루어진 버추얼 에어 기타 (virtual air guitar) 를 소개하였는데 [1], 이를 이용하면 기타를 치는 몸짓으로 기타 연주가 가능하다. D. Overholt는 기존의 바이올린 형태에 제스처 센서를 추가하여 소리를 확장, 개선시킨 수 있는 새로운 표현법을 가진 오버톤 바이올린 (overtone violin)을 개발하였다 [2]. 이 밖에도 기타 몸통의 움직임으로 피치를 조절할 수 있게 고안한 마운틴 기타 (mountain guitar) [3], 기타 연주법을 이용한 컨트롤러 GXtar [4], 디지털 오케스트라 연주를 위해 고안된 티-스틱 (T-stick) [5], 이와 유사한 뮤직폴 (musicpole) [6] 과 스위트스틱 (sweetstick) [7] 등은 사용자의 행위를 인지하여 음악적으로 표현할 수 있도록 개발된 신개념의 악기이다. 최근 게임 시장에도 이러한 변화가 나타나고 있다. 2008년 7월 보스엔젤리스에서 열린 게임쇼 E3 미디어 서밋 2008 (E3 Media and business summit 2008)에서 닌텐도 Wii 게임에 음악을 적용한 Wii 뮤직 (Wii music)이 선보였다 [8]. 다양한 악기를 게임 컨트롤러를 이용하여 즐길 수 있는 게임으로 행위 인지 기술을 햅틱 (haptic)으로 적용한 예이다.

연주자의 연주 행위를 인지하여 햅틱으로 발전시킨 문화 콘텐츠와 관련하여 본 논문에서는 줄 없는 기타를 소개한다. 제안한 기타의 줄은 레이저 현으로 표현하고, 프렛은 전압분배기로 구현한다. 기타 소리를 합성하기 위해 진폭 속도가 변하는 디지털 도파관 모델을 제안한다. 이 모든 인터페이스와 알고리즘 수행은 TMS320F2812 디지털 신호처리를 이용하여 처리하였다. 줄 없는 기타로 연주한 '아리랑'에는 제안한 합성 알고리즘을 이용한 슬라이딩과 헤머링 온과 같은 기타 솔로 연주법을 포함하고 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에는 줄 없는 기타를 구성하는 각 요소에 대한 자세한 설명과 구현 방법에 대해 기술하였고, 3장에서는 제안한 합성 알고리즘의 합성 결과와 실제 구현한 줄 없는 기타로 연주한 '아리랑'을 확인할 수 있다. 제안한 기타의 한계와 해결 방안에

대해서는 4장에 기술하였고 5장에는 본 논문의 결론을 기술하였다.

II. 줄 없는 기타

현악기 연주자들은 악기를 연주하기 전에 현이 제대로 고정되어있는지, 조율은 잘 되어있는지 등을 확인한다. 초보자에게는 이러한 과정이 때로는 복잡하고 어렵기까지 하다. 만약 현악기에서 현이 없다면 이러한 복잡하고 어려운 과정은 없어질 것이다. 하지만 현의 기능을 대체할 무언가가 있어야 할 것이다. 예를 들어 기타의 경우, 연주자가 현을 어떠한 방법으로 튕기는가에 따라 다양한 연주를 할 수 있는데, 이는 기타의 현이 소리를 발생시키고 연주자는 현을 이용하여 다양한 연주법을 표현할 수 있음을 의미한다. 즉, 기타의 현은 소리 발생과 연주법 표현에 직접적인 관련이 있다. 본 논문에서는 현의 교체와 조율 등의 번거롭고 어렵기까지 한 과정을 없애기 위해 기타의 현을 레이저 모듈로 대체하였다. 이로써 스트로크와 관련된 간단한 연주법을 표현하고, 프렛을 선제하여 원하는 피치를 발생시킬 수 있도록 하였다. 기타의 소리는 물리적 모델링을 이용하여 합성하였고, 줄 없는 기타의 모든 인터페이스와 관련된 신호 처리 및 합성 알고리즘 수행은 범용 프로세서를 이용하여 처리하였다.

2.1. 레이저 현

레이저 현 (laser string)은 연주자가 기타의 현을 튕기는 것을 표현하기 위한 것으로 레이저 모듈과 포토다이오드 (photodiode) 한 쌍이 하나의 기타 현을 표현한다 [9]. 레이저 모듈에서 발생한 레이저 신호를 맞은편 포토다이오드가 항상 감지할 수 있도록 각각을 배치하고, 레이저 신호의 감지 여부에 따라 현의 튕김 여부를 판단한다. 그림 1은 레이저 모듈과 포토다이오드를 이용하여 구현한 레이저 현의 모습이다. 이를 이용한 스트로크 (stroke)

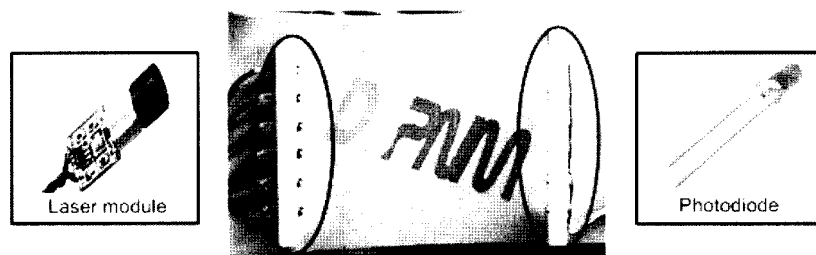


그림 1. 레이저 모듈과 포토다이오드를 이용한 레이저 현
Fig. 1. Laser string composed of laser module and photodiode.

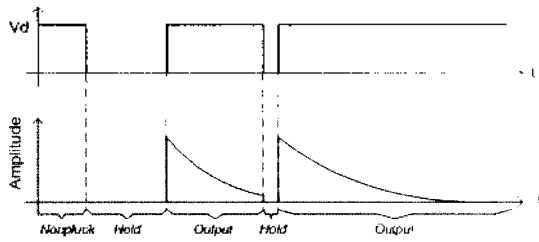


그림 2. 포토다이오드의 출력 전압과 줄 없는 기타 출력과의 관계
Fig. 2. Relationship between output voltage of photodiode and output waveform of the non-stringed guitar.

표현 과정은 다음과 같다. 레이저 모듈에 전원이 인가된 후 포토다이오드가 레이저 신호를 감지하고 있는 동안은 현이 튕겨지지 않았음을 의미하고, 레이저 신호가 차단 되는 동안은 기타의 현이 손이나 피크에 의해 눌러져 있음을 표현한다. 레이저 신호가 차단 후 다시 감지되는 순간이 현이 튕겨졌음을 나타내는 것이다. 그림 2는 포토다이오드의 출력 전압과 줄 없는 기타의 출력과의 관계를 보여준다.

2.2. 프렛

프렛 (fret)은 현악기의 각 현에 대해 피치 (pitch)를 조절하는 것으로 기타의 경우 그림 3과 같다 [10]. 기타의 프렛은 반음 (semitone)씩 증가하도록 설계되어있는데, 그림 3에서와 같이 연주자는 원하는 피치를 만들기 위해 프렛과 프렛 사이의 현을 눌러 실제 진동하는 현의 길이를 조절한다.

줄 없는 기타의 프렛은 순수 저항으로 이루어진 전압 분배기로 구현하였다. 그림 4는 기타 프렛을 위해 사용한 전압 분배기이다. R_0 는 출력 전압 측정을 위한 참조 저항 (reference resistor)이고 R_1 부터 R_5 까지가 각각의 프렛을 표현하기 위해 사용된 저항이다. 회로의 형태는 일반적인 전압 분배기 회로와 다르지만 개념은 동일하다. 그림 4의 경우 입력 전압 V_{in} 에 대해 출력 전압은 $V_{out} =$

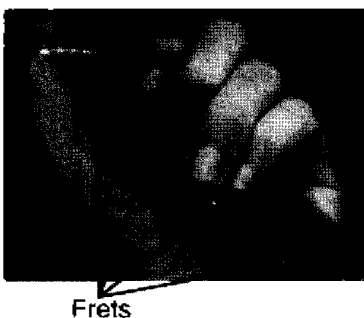


그림 3. 기타 프렛
Fig. 3. Guitar frets.

$V_{in}R_0 / (R_0 + R_2 + R_1 + R_0)$ 이다. 기타의 프렛을 만들기 위해서는 프렛 간 전압 차이를 정의하고 그에 맞는 저항 값을 산출하여야 한다. 프렛 간 전압 차이를 V_f , 프렛의 개수를 k 라고 한다면, k 개의 저항 값을 계산하여야 한다. n 번째 프렛의 전압과 $n-1$ 번째 프렛의 전압 차이는 V_f 와 같으므로 식 (1)이 성립한다.

$$\frac{R_0 V_{in}}{R_1} - \frac{R_0 V_{in}}{R_1 + R_n} = V_f \tag{1}$$

위 식을 R_n 에 대하여 정리하면 식 (2)와 같다.

$$R_n = \frac{R_1^2 V_f}{R_0 V_{in} - R_1 V_f} \tag{2}$$

여기서, $R_1 = \sum_{i=0}^{n-1} R_i$ 이다.

본 논문에서는 입력 전압 V_{in} 을 TMS320F2812DSP의 입출력 전압과 동일한 3.3V를, 참조 저항 R_0 는 20 kΩ을 사용하여 5개의 프렛을 구현하였다. 각 프렛간 전압 차이 V_f 는 0.5V로 하였는데, 사용된 저항과 각 프렛의 출력 전압은 표 1과 같다. 실제 프렛간 전압 차이가 정확하게 0.5V로 나타나지 않는 것은 시중에 생산되는 저항이 식 (2)에 의해 구한 값과 정확하게 일치하는 것이 없기 때문이다. 표 1에서는 계산 값과 가장 비슷한 저항을 사용하여 구한 결과이다.

줄 없는 기타의 초기 모델에서는 기타 코드 (chord)를 표현하기 위하여 코드 글러브 (chord glove)를 사용하였다 [9]. 이 경우 코드 글러브로 표현할 수 있는 코드의

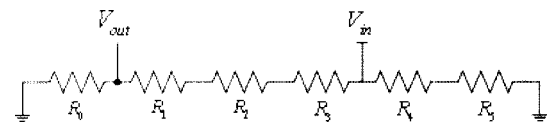


그림 4. 프렛을 구현하기 위한 전압 분배기 회로
Fig. 4. Voltage divider circuit for frets.

표 1. 프렛 구현에 사용된 저항과 각 프렛의 출력 전압
Table 1. Resistors used in fret and output voltages of each fret.

프렛 (n)	저항 (R_n , kΩ)	출력 전압 (V_{out} , Volt)
1	2	3
2	4.3	2.510
3	6.8	1.994
4	12	1.463
5	22	0.984

종류와 기타 솔로 연주법에 한계가 있었으나, 실제 기타와 같은 fret의 구현으로 자유로운 기타 코드의 표현이 가능할 뿐만 아니라 슬라이딩 (sliding), 해머링 온 앤 풀링 오프 (hammering-on and pulling-off)와 같은 기타 솔로 연주법이 가능하게 되었다.

2.3. 음 합성 알고리즘 : 전파 속도가 변하는 디지털 도파관 모델

J. O. Smith가 제안한 1차 선형 양방향 디지털 도파관에서 이산 시간 상수 n , 위치 k 에서 도파관 출력은 식 (3)과 같다.

$$y(n, k) = y_r(n - k) + y_l(n + k) \tag{3}$$

여기서 $y_r(n)$ 과 $y_l(n)$ 은 각각 오른쪽과 왼쪽으로 이동하는 파동이다 [11]. 파동의 전파 속도는 공간과 시간 샘플링 간격의 비인 $c = X/T$ 이므로, 시간 상수 n 과 $n+1$ 사이의 이동 거리는 $X = cT$ 이다. 이는 전파 속도가 공간적으로 균일하게 분포하고 일정한 속도 c 를 갖는다는 가정 아래 성립한다. 만약 전파 속도가 $c(n)$ 으로 시간에 따라 가변적이라면 파동은 시간 상수 n 과 $n+1$ 사이에 거리 $X = c(n)T$ 를 이동할 것이다. 그림 5에 가변적 파동 속도와 고정적 파동 속도를 갖는 경우에 대해 디지털 도파관에서의 이동 거리를 비교하여 보았다. $c(n) > c$ 인 경우는 단일 지연보다 멀리, $c(n) < c$ 인 경우에는 단일 지연보다 짧게 이동한다.

그러나 실제 디지털 영역에서는 시간 상수 n 과 $n+1$ 사이에 어떠한 시간 상수도 존재할 수 없으므로 단일 지연의 정수배보다 크거나 혹은 단일 지연보다 작은 파동의 이동을 직접적으로 표현할 수는 없다. 이러한 미세 이동 (그림 5의 빗금 부분)을 표현하기 위해 T. I. Laakso와 3명은 미소 지연 필터 (fractional delay filter)를 사용하였다 [12]. 시간에 따라 가변적인 전파속도를 갖는 디지털 도파관 모델을 설명하기 위해 오른쪽으로 이동하는 파동,

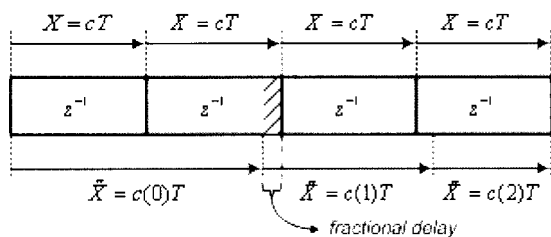


그림 5. 전파 속도에 따른 파동의 이동 거리
Fig. 5. Propagation distance corresponding to wave speed.

$y(n, m) = y_r(n, m)$ 만을 고려해 본다. 왼쪽으로 이동하는 파동에도 동일하게 적용할 수 있으며 손실이 없다고 가정한다. 초기 분포가 $y(0, m)$, $m = -\infty, \dots, \infty$ 으로 주어졌을 때, $n = 1$ 이고 관측 지점이 k 인 곳에서의 출력은 $y(1, k) = y(0, k - c(0)T)$ 이고, $n = 2$ 인 경우 $y(2, k) = y(0, k - c(0)T - c(1)T)$ 이다. 그림 5에서의 같이 가변적 전파 속도를 $c(n) = c + c_p(n)$ 이라고 정의하면, 식 (4)와 같이 일반화 할 수 있다 [13].

$$y(n, k) = y(0, k - n - T \sum_{l=0}^{n-1} c_p(l)), \quad n > 0 \tag{4}$$

여기서 $c_p(n)$ 은 $0 \leq c_p(n) < c$ 인 경우이며, 후항의 합계 항은 식 (5)와 같이 정의하여 미소지연 필터로 구현한다.

$$d(n) = -T \sum_{l=0}^{n-1} c_p(l) \tag{5}$$

그러나 $c_p(n) \geq c$ 인 경우에는 $c_p(n)$ 을 식 (6)과 같이 수정하여야 한다.

$$c_p(n) = i(n)c + c_f(n) \tag{6}$$

여기서 $i(n)$ 은 양의 정수이고, $0 < c_f(n) < c$ 이다. 이 경우 식 (4)는 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$y(n, k) = y(0, k + M(n) + d(n)), \quad n > 0 \tag{7}$$

여기서 $M(n) = \sum_{l=0}^{n-1} i(l)$ 이고, 디지털 도파관에서 파동의 공간 위치 즉, 지연 라인에서의 위치와 관련된 파라미터이며 또한 파동의 속도에 의존적인 파라미터이다 [14]. 최종적인 전파속도가 변하는 디지털 도파관 모델 (digital waveguide model with time-varying propagation speed)의 출력은 식 (8)과 같다.

$$y(n, k) = y_r(0, k + M(n) + d(n)) + y_l(0, k - M(n) - d(n)), \quad n > 0 \tag{8}$$

전파 속도가 변하는 디지털 도파관 모델의 가장 큰 특징은 피치가 변하는 음을 합성할 수 있다는 것이다. 기타 솔로 연주법 가운데 앞 절에서 언급한 슬라이딩, 해머링 온 풀링 오프는 fret의 위치를 바꿔가며 연주하는 기법으

로 피치가 바뀌는 음을 만들어 낸다. 비브라토 (vibrato)와 밴딩 (bending 또는 초킹, choking)은 프렛의 위치가 바뀌는 것은 아니지만 현의 장력을 변화시켜 피치를 바꾸는 연주법이므로 전파 속도가 변하는 디지털 도파관 모델을 이용하면 각 연주법에 해당하는 음을 합성할 수 있다. 본 논문에서는 기타 음의 주파수 의존적 감쇠를 표현하기 위해 [15]에서 제안한 1차 루프 필터를 사용하였고, 식 (5)의 미소자연을 처리하기 위해 1차 라그랑주 보간기 (lagrange interpolator) [12]를 사용하였다.

2.4. 프로세서 및 시스템

앞 절에서 설명한 레이저 현과 프렛은 연주자의 연주 정보를 프로세서로 보내는 역할을 한다. 프로세서는 이 정보를 바탕으로 해당 연주 기법에 따른 각 현의 음을 합성하고 그 결과를 DAC (digital to analog converter)로 보내 스피커를 통해 들을 수 있게 한다. 이러한 과정이 수행되기 위해서는 일차적으로 레이저 현과 프렛에서 측정된 전압을 디지털 값으로 변환하는 ADC (analog to digital converter)가 필요하다. 본 논문에서는 16채널의 12 bit 분해능을 가진 ADC를 내장하고 150 MHz의 처리 속도를 가진 디지털 신호처리 프로세서 TMS320F2812를 사용하였다 [16]. 16채널의 ADC중 6채널은 레이저 현에 다른 6채널은 프렛에 할당하였다. 이 프로세서는 주변장치와의 통신을 위해 RS-232, SCI, SPI, CAN등의 통신을 지원하는데 본 논문에서는 DAC와의 통신을 위해 SPI 통신을 사용하였다. 그리고 CCS (Code Composer Studio)

를 이용하여 프로그래밍하고 동시에 프로그램을 DSP에 적재할 수 있으며 결과를 시뮬레이션 해 볼 수 있는데, 프로그램을 프로세서에 다운로드하기 위해서는 JTAG 에뮬레이터가 필요하다. 그림 6은 줄 없는 기타의 전체적인 시스템 구성도이다.

III. 제안한 합성 알고리즘 결과와 줄 없는 기타 연주 데모

줄 없는 기타의 레이저 현과 전압 분배기를 이용한 프렛은 연주자의 연주법과 각 현의 피치를 표현할 수 있도록 구현하였다. 기타 6줄에 대한 포토다이오드로부터의 신호와 프렛 신호, 총 12채널에 대한 아날로그 신호를 음 합성 알고리즘에 맞게 디지털 값으로 변환시키는 ADC기능과 이 값을 이용하여 음 합성 알고리즘을 주어진 시간 내에 정확하게 구동시키는 역할은 TMS320F2812가 수행한다. 그림 7은 제작한 줄 없는 기타의 제작 및 구동 환경이다.

3.1. 전파 속도가 변하는 디지털 도파관 모델을 이용한 음 합성 결과

본 논문에서 사용된 합성 알고리즘은 기타의 뉘름 특성을 여기 신호에 포함시켜 사용하는 대체 합성법 (commuted synthesis) [17]을 기반으로 구현된 것이므로 합성된 신

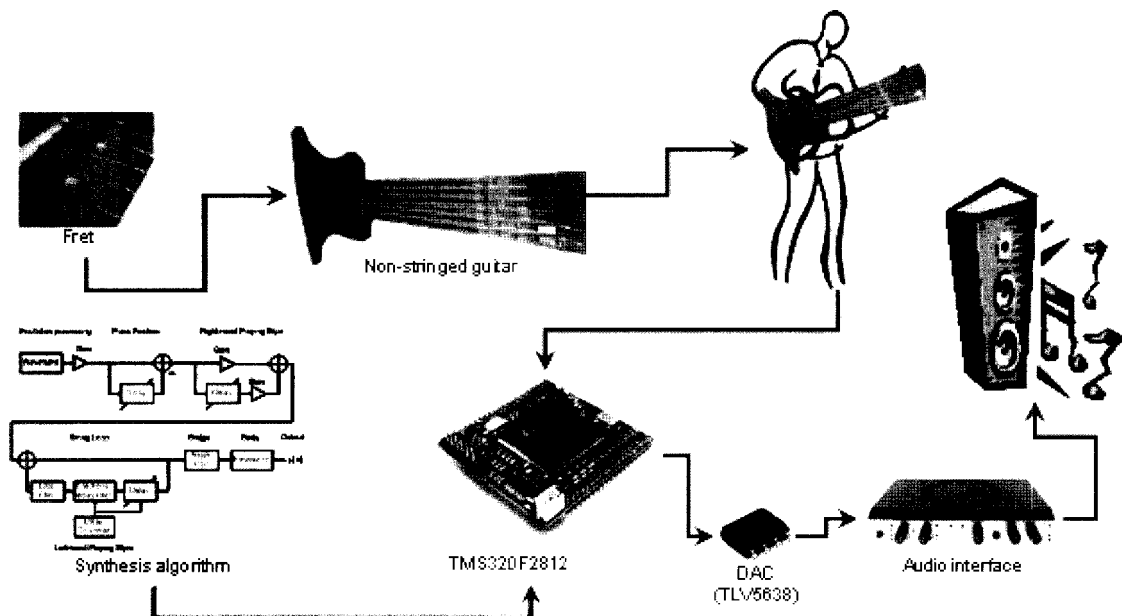


그림 6. 줄 없는 기타의 전체 시스템 구성도
Fig. 6. Block diagram of overall system.



그림 7. 줄 없는 기타 제작 및 구동 환경
 Fig. 7. Environment to implement and play the non-stringed guitar.

호는 기타 음색을 표현하는데 문제가 없으며, 합성의 초점은 피치가 변하는 음을 합성할 수 있는가와 각 연주법의 특징을 잘 표현할 수 있는가에 맞춰져 있다.

합성할 음은 표준 조율법 (standard tuning) [18]으로 조율한 기타의 1번 줄 (E, 329.60 Hz)에 대해 1번 프렛 (F, 349.20 Hz)에서 3번 프렛 (G, 391.96 Hz)으로 위치가 변하는 슬라이딩 연주법과 해머링 온 앤 풀링 오프 연주법에 대한 음이다. 합성 모델에 사용된 루프 필터의 계수

(a)는 -0.005 , 이득 (g)는 0.996 이고 각 연주법에 해당하는 합성음의 스펙트럼은 그림 8과 같다.

동일한 현의 3번 프렛 (G, 391.96 Hz)에 대한 음을 비브라토와 밴딩으로 연주하였을 경우 제안한 모델의 결과는 그림 9와 같다. 비브라토와 밴딩의 깊이 (depth)는 한 음 깊기로 하였고 밴딩은 릴리스까지 포함한 밴드 앤 릴리스 (bend and release) [19]를 표현한 것이다.

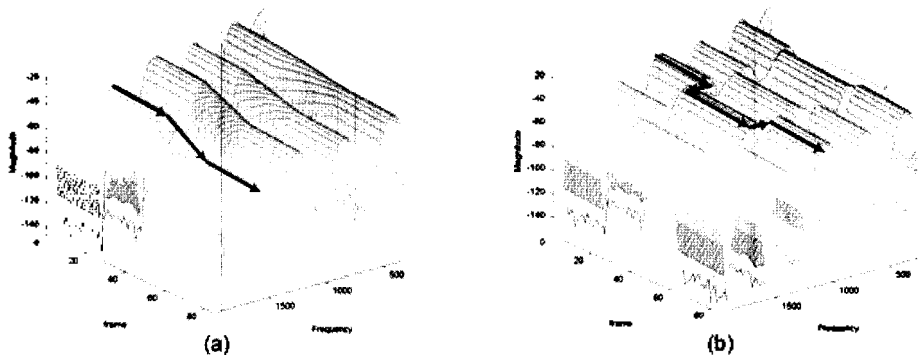


그림 8. (a) 슬라이딩, (b) 해머링 온 풀링 오프 음에 대한 스펙트럼
 Fig. 8. Spectra of sounds by (a) sliding and (b) hammering-on and pulling-off.

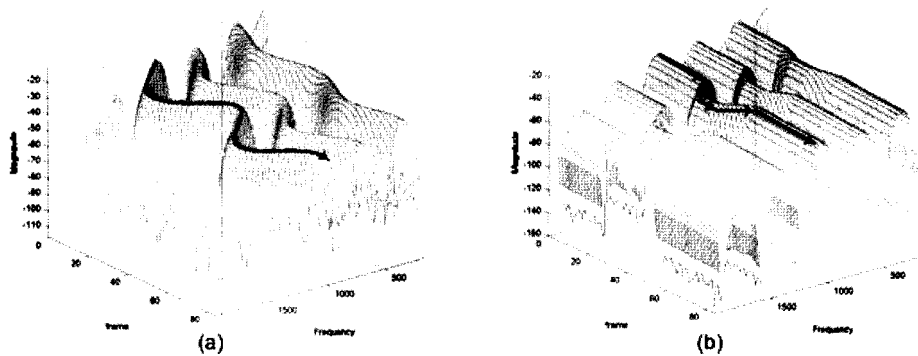


그림 9. (a) 비브라토, (b) 밴드 앤 릴리즈 음에 대한 스펙트럼
 Fig. 9. Spectra of sounds by (a) vibrato and (b) bend and release.

3.2. 연주 데모

본 논문에서 제안한 줄 없는 기타를 이용하여 경기 아리랑을 연주하였다. 경기 아리랑의 '아라리요' 부분에는 슬라이딩과 해머링 온 앤 폴링 오프를, '나를 버리고' 부분에는 슬라이딩으로 처리하였다. 저자의 연구실에서 녹화하여 노이즈가 많은 것이 아쉽지만 기타 연주를 확인하는 데는 어려움이 없을 것이다. 아래의 웹 페이지에서 연주 데모를 확인할 수 있을 것이다.

링크:

http://signal.ulsan.ac.kr/elektro/documents/nonstringed_guitar.htm

IV. 토의

본 논문에서 제안한 줄 없는 기타는 새로운 인터페이스를 가진 신개념의 전자악기 개발이라는 취지로 만들어지게 되었다. 현악기에서 현을 없앤 것은 획기적인 발상의 전환이라고 생각하지만 해결해야 할 많은 문제들을 남겼다. 지금부터 줄 없는 기타의 한계와 이를 극복할 방안에 대해 토의하고자 한다.

줄 없는 기타의 레이저 현은 포토다이오드로 레이저 신호의 온/오프를 검사함으로써 스트로크와 아르페지오 같은 현을 통기는 연주법을 표현할 수 있었다. 하지만 1 리듬 2에서와 같이 'Hold' 이 후에 바로 현이 통겨지는 현재의 레이저 현으로는 현을 뮤트 (mute)시키거나 키팅 (cutting)하는 등의 연주법을 표현하지 못하는 단점이 있다. 또한 실제 현을 통기는 느낌을 표현할 수 없는데, 이를 위해서는 다양한 연주법을 표현할 별도의 컨트롤러를 개발하거나 레이저 현을 다른 형태로 바꾸어야 할 것이다.

전압 분배기로 구현한 프렛은 데모 동영상에서 보았듯이 그림 4의 V_{in} 을 손가락 끝에 고정시켜 사용하다보니 프렛 간 이동이나 코드를 잡을 때 구리판과 접촉이 잘 되도록 신경을 써야하는 등의 불편한 점이 있었다. 이는 프렛을 스위치로 구현하면 쉽게 해결될 수 있다.

합성 알고리즘과 프로세서는 같이 고려하여야 하는데, 합성 알고리즘이 주어진 시간 안에 정확하게 수행되어야 하기 때문이다. 6줄을 동시에 통겼을 경우에 대해 제안한 알고리즘을 TMS320F2812로 처리하였더니 최소 60 μ s의 짧지 않은 알고리즘 수행시간이 필요하였다. 이는 내부적으로 샘플링 주파수가 16.67 kHz인 디지털 데이터를 합성하는 것이므로 CD 음질과 비교할 때 해당 음의 음색

을 표현하기에 많이 부족하다. 이를 극복하기 위해서는 보다 빠른 처리 속도를 가진 프로세서를 선택하고 어셈블리 언어로 프로그래밍 하여야 할 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 진파 속도가 변하는 디지털 도파관 모델을 제안하고 TMS320F2812로 알고리즘을 수행하는 줄 없는 기타를 제안하였다. 데모 동영상에서 보았듯이 제안한 줄 없는 기타는 실시간 연주가 가능하고 해머링 온, 폴링 오프, 슬라이딩과 같은 기타 솔로 연주법을 표현할 수 있었다. 또한 레이저 현과 프렛과 같은 새로운 인터페이스를 이용한 전자 악기 개발에 대한 가능성을 보여주었다. 향후, 실제 기타의 사실적 표현을 시작으로 다른 악기의 확장 개발, 초보자도 손쉽게 연주할 수 있는 사용자 편의적 모델을 개발하여야 할 것이다. 또한 연주자의 오감과 감성을 표현할 수 있는 햅틱 (haptic) 기반의 인터페이스 개발도 병행하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 울산대학교 연구 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. M. Karjalainen, T. Mäki-Patola, A. Kanerva, A. Huovilainen, and P. Jänis, "Virtual air guitar," *Proc. 117th AES Convention*, pp. 2-19, Oct., 2004.
2. D. Overholt, "The overtone violin," *Proc. 2005 International Conference on new Interfaces for Musical Expression (NIME 05)*, pp. 34-37, 2005.
3. J. Kanabako, J. Gibson, and L. Mignonneau, "Mountain guitar: a musical instrument for everyone," *Proc. 2007 International Conference on new Interfaces for Musical Expression (NIME07)*, pp. 396-397, 2007.
4. L. Kessous, J. Castet, and D. Arlib, "GXtar, an interface using guitar techniques," *Proc. 2006 International Conference on new Interfaces for Musical Expression (NIME06)*, pp. 192-195, 2006.
5. J. Malloch and M. M. Wanderley, "The T-stick: from musical interface to musical instrument," *Proc. 2007 International Conference on new Interfaces for Musical Expression (NIME 07)*, pp. 66-69, 2007.
6. *The MUSICPOLE MIDI controller*, http://www.themusicpole.com/the_MUSICPOLE.pdf, 2008.
7. *The Sweatstick* - RAY EDGAR, <http://www.rayedgar.com/>

sweatstick.html, 2008.

8. *Wii Music* - *Wikipedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Wii_Music, 2008.
9. Sangjin Cho, Uipil Chong, "Implementation of non-stringed instruments without bodies," *Proc. Meetings on Acoustics*, vol. 2, 2008. (online paper)
10. *Fret* - *Wikipedia*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Fret>, 2008.
11. J. O. Smith, "Physical Modeling using Digital Waveguides," *Computer Music J.*, vol. 16, no. 4, pp. 74-91, 1992.
12. T. I. Laakso, V. Välimäki, M. Karjalainen, and U. K. Laine, "Splitting the Unit Delay - Tools for Fractional Delay Filter Design," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 13, pp. 30-60, 1996.
13. T. Tolonen, V. Välimäki, and M. Karjalainen, "Modeling of tension modulation nonlinearity in plucked string," *IEEE Trans. speech and audio processing*, vol. 8, no. 3, pp. 300-310, 2000.
14. 조상진, 오훈, 정익필, "장력 변조 모델을 이용한 합성음의 피치 변환 구현", *한국음향학회 학술발표대회 논문집*, 24권, 1(s)호, 381-384쪽, 2005.
15. V. Välimäki, J. Huopaniemi, M. Karjalainen, and Z. Jánosy, "Physical Modeling of Plucked string Instruments with Application to Real-Time Sound Synthesis," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 44, no. 5, pp. 331-353, 1996.
16. *TSM320F2812 Datasheet*, <http://focus.ti.com/lit/ds/sprs174o/sprs174o.pdf>, 2008.
17. J. O. Smith, "Efficient synthesis of stringed musical instruments," *Proc. International Computer Music Conference*, pp. 74-91, Sep., 1993.
18. *Guitar tunings* - *Wikipedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Guitar_tuning, 2008.
19. *Bending and Vibrato* - *Wikipedia*, http://en.wikipedia.org/wiki/Bending_and_Vibrato, 2008.

저자 약력

•강 명 수 (Myeongsu Kang)



2008년 2월 : 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부
 2008년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 컴퓨터정보통신
 공학과 석사과정
 *주관심분야 : 오디오 신호처리 응용

•조 상 진 (Sangjin Cho)

한국음향학회지 제23권 제7호 참조

•정 의 필 (Uipil Chong)

한국음향학회지 제23권 제7호 참조