

## 초음파 촉각 구현을 위한 구동 신호의 지연 방법에 대한 연구

조현창\*, 박준현\*, 신덕식\*  
한국전자기술연구원\*

### A Study on the Delay Method of the Driving Signal for Ultrasonic Tactile Realization

Hyun-Chang Cho\*, Jun-Heon Park\*, Duck-Shick Shin\*  
Korea Electronics Technology Institute\*

**Abstract** - 본 논문에서는 초음파 촉각 구현을 위한 구동 신호의 지연 방법을 제안한다. 제안된 방법은 초음파 어레이의 각 초음파 센서의 구동 신호의 지연을 통한 초음파 어레이의 집속 제어를 실현한다. CPLD(Complex Programmable Logic Device)를 사용하여 시프트 레지스터와 멀티플렉서의 로직을 설계하여 초음파 어레이의 구동 신호의 지연 제어를 구현한다. 실험을 통해 시프트 레지스터의 길이가 길어짐에 따라 초음파 어레이의 집속을 정밀하게 제어할 수 있음을 확인하였다.

#### 1. 서 론

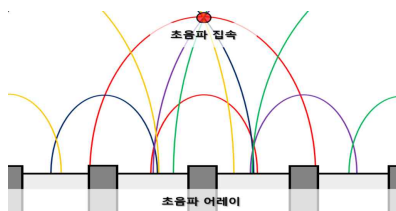
초음파 촉각 구현은 여러 개의 초음파를 한 점으로 집속시켜 촉각이 발생하는 방법을 사용한다. 초음파 촉각 구현을 위해서 일반적으로 수십 개 이상의 초음파 어레이가 필요하며, 각 초음파 센서의 위상과 진폭을 제어하여 원하는 위치에 여러 개의 초음파가 집속 될 수 있도록 한다.

각 초음파 센서의 위상을 효율적으로 제어 할 수 있는 방법은 지연 회로, 카운터 사용 등의 방법이 있는데 지연 회로 방법은 유연성이 떨어지며, 하드웨어 시스템 부하가 증가하고 높은 비용을 요구하는 단점이 있으며, 카운터를 사용하는 방법은 초음파 어레이의 초음파 개수가 늘어남에 따라 시스템에서 차지하는 리소스도 커져 요구 메모리도 커지는 단점이 있다. 상술한 단점을 해결 하기 위해 시프트 레지스터와 멀티플렉서의 로직을 CPLD로 구현하여 초음파 촉각 구현을 위한 구동 신호의 지연 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 여러 개의 시프트 레지스터와 멀티플렉서를 CPLD로 구현하여 시스템 설계 시 공간적 및 비용적으로 이점이 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 초음파 집속 원리

초음파 촉각 구현을 위해 초음파 어레이의 각 초음파 센서는 촉각을 구현할 위치에 집속해야 한다. 그림 1은 초음파 어레이의 집속을 보여주며, 각 초음파 센서는 구동 신호의 지연 제어를 통해 집속이 가능하다.

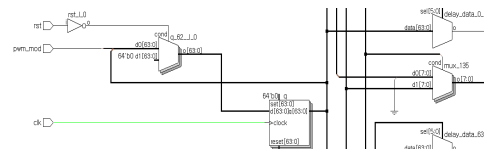


<그림 1> 초음파 어레이의 집속

20kHz 대역폭 이상의 초음파는 인간이 감지할 수 없기에 촉각 감지를 위해서 구동 신호는 최대 1000Hz의 신호 변조가 필요하다. 본 논문에서의 초음파 구동 신호는 40kHz의 구동 신호에 200Hz의 신호 변조를 통하여 사용한다.

##### 2.2 구동 신호의 지연 제어를 위한 CPLD 로직 설계

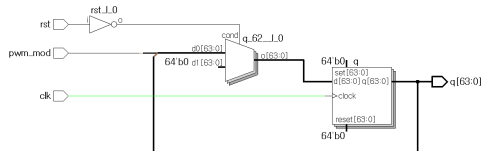
초음파 촉각 구현을 위해 구동 신호의 신호 지연은 시프트 레지스터와 멀티플렉서 로직을 설계하여 신호 지연을 실현한다. 그림 2는 CPLD 시스템의 Register Transfer Language를 보여 준다. 본 논문에서의 지연 제어는 64-bit 시프트 레지스터와 1:64 멀티플렉서 로직을 설계하여 구현하였다. 그리고 정량화된 지연 계산 값을 MCU로부터 가져오기 위하여 FMC Interface 로직을 설계하여 MCU와 데이터 통신을 하였다.



<그림 2> CPLD System - RTL design

##### 2.2.1 시프트 레지스터 로직 설계

시프트 레지스터는 초음파 구동 신호를 입력받고, 래치 신호를 입력받아 지연된 신호를 버퍼에 저장한다. 그리고 구동 신호의 64배 배 한 신호를 래치 신호로 사용하여 64-bit 시프트 레지스터를 설계한다. 구동 신호는 40kHz를 사용하고, 래치 신호는 2.56Mhz를 사용한다. 그림3은 64-bit 시프트 레지스터의 Register Transfer Language를 보여준다.



<그림 3> 64-bit Shift Register - RTL design

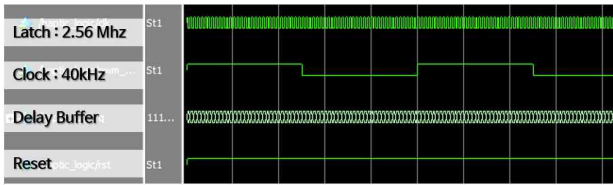
버퍼에 저장된 지연 신호는 멀티플렉서를 거쳐 각 초음파 센서에 정량화된 지연 계산 값에 따라 초음파 센서로 들어가게 된다.

##### 2.2.2 멀티플렉서 로직 설계

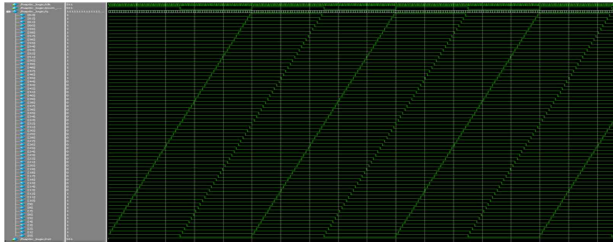
멀티플렉서 로직은 초음파 어레이 개수에 맞추어 1:64 멀티플렉서로 설계한다. 멀티플렉서는 MCU로부터 정량화된 지연 계산 값을 입력받아 가장 가까운 지연 신호 버퍼를 선택하여 각 초음파 센서로 보내준다.

##### 2.2.3 시뮬레이션

CPLD로 설계한 로직은 ModelSim을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림4는 64-bit 시프트 레지스터와 1:64 멀티플렉서 로직의 시뮬레이션 한 결과이며, 그림5는 저장된 지연된 신호 버퍼를 보여준다.



〈그림 4〉 CPLD Logic Simulation - ModelSim

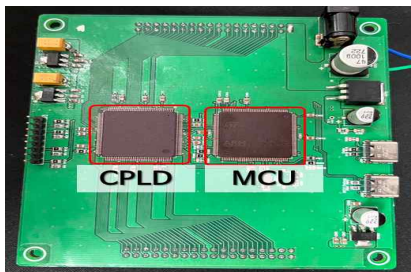


〈그림 5〉 Delay Buffer - ModelSim

시뮬레이션 결과, 초음파 구동 신호와 래치 클럭에 따라 시프트 레지스터의 동작이 변함을 확인하였고, 64-bit 시프트 레지스터 및 1:64 멀티플렉서 로직의 동작을 확인하였다.

### 2.3 실험

시뮬레이션 결과를 바탕으로 구동 신호 지연을 위한 CPLD 및 MCU 보드를 설계 및 제작하였다. 그림 6은 제작된 구동 신호 지연을 위한 보드이다. 실제 CPLD 로직 테스트 결과 시뮬레이션과 동일한 결과를 얻을 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 방법을 적용하여 시스템 설계 시 공간적 여유와 저비용으로 설계할 수 있다. 그리고 초음파 어레이의 개수가 증가하여도 전체 시스템의 크기는 많이 변하지 않기 때문에 시스템 설계에 용이함을 알 수 있다.



〈그림 6〉 구동 신호 지연을 위한 보드 설계

## 3. 결 론

본 논문에서는 시프트 레지스터와 멀티플렉서 로직을 설계하여 초음파 촉각 구현을 위한 구동 신호의 지연을 제어하는 방법을 제안한다.

제안된 방법은 초음파 어레이의 각 초음파 센서의 구동 신호의 지연 제어를 실현하고 초음파 어레이의 집속을 달성 할 수 있다. 그리고 추가의 하드웨어나 메모리를 사용하지 않고 초음파 어레이의 집속을 위해 CPLD를 사용하여 시프트 레지스터와 멀티플렉서 로직을 설계하여 시스템 설계 시 공간적 및 비용적 이점을 갖게 된다.

시프트 레지스터는 구동 신호와 래치 신호를 입력받아, 구동 신호와 래치 신호의 체비비만큼 시간 지연을 시켜 버퍼에 저장하고, 버퍼에 저장된 신호를 각 초음파 센서에 정량화된 지연 계산값에 따라 구동 신호의 지연 제어를 동시에 시작 할 수 있어 전체 시스템의 리소스가 감소한다.

### 감사의 글

본 연구는 2021년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임[S3195362]

### [참 고 문 헌]

- [1] K. Hasegawa and H. Shinoda, "Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli", Proc. 11th EuroHaptics. Int. Conf. Haptics Technol. Appl., pp. 276-288, Jun. 2018.
- [2] Rafael Morales, "Generating Airborne Ultrasonic Amplitude Patterns Using an Open Hardware Phased Array", MDPI, 11, 2981p, 2021
- [3] G. Korres and M. Eid, "Haptogram: Ultrasonic point-cloud tactile stimulation," IEEE Access, vol. 4, pp. 7758 - 7769, 2016.
- [4] J. Buckwalter and A. Hajimiri, "An active analog delay and the delay reference loop," in IEEE Radio Freq. Integr. Circuits (RFIC) Syst. Dig. Papers, Forth Worth, TX, USA, pp. 17 - 20, Sep. 2004.
- [5] C.-Y. Kim, J. Yang, D.-W. Kim, and S. Hong, "A K-band CMOS voltage controlled delay line based on an artificial left-handed transmission line," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 18, no. 11, pp. 731 - 733, Nov. 2008.
- [6] J. Chen, F. Yu, Z. Wang and L. Lin, "Multichannel ultrasound focusing delay control method based on variable-length shift register for airborne ultrasound tactile feedback", IEEE Access, vol. 8, pp. 24904-24913, 2020.
- [7] L. Fan, A. Song and H. Zhang, "Haptic interface device using cable tension based on ultrasonic phased array", IEEE Access, vol. 8, pp. 162880-162891, 2020.
- [8] R. Takahashi, L. Hasegawa and H. Shinoda, "Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli", Proc. 11th Int. Conf. EuroHaptics, pp. 276-288, Jun. 2018.
- [9] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater and S. Subramanian, "UltraHaptics: Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces", Proc. 26th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol., pp. 505-514, Oct. 2013.
- [10] A. Raza, W. Hassan, T. Ogay, I. Hwang and S. Jeon, "Perceptually correct haptic rendering in mid-air using ultrasound phased array", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67, no. 1, pp. 736-745, Jan. 2020.
- [11] M. Obrist, S. Subramanian, E. Gatti, B. Long and T. Carter, "Emotions mediated through mid-air haptics", Proc. ACM Conf. Hum. Factors Comput. Syst., pp. 2053-2062, 2015.
- [12] Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T., and Shinoda, H. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. IEEE Transactions on Haptics 3, 3, 155 - 165, 2010.
- [13] Iwamoto, T., Tatzono, M., and Shinoda, H. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. In Proc. EuroHaptics 2008, Springer-Verlag, 504 - 513, 2008.
- [14] Dalecki, D., Child, S., Raeman, C., and Carstensen, E. Tactile perception of ultrasound. J. Acoust. Soc. Am. 97, 3165 - 3170, 1995.