

초음파 촉각 구현을 위한 초음파 초점 제어 알고리즘

박준현*, 조현창*, 신덕식*
한국전자기술연구원*

Ultrasonic Focus Control Algorithm for Ultrasonic Tactile Realization

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

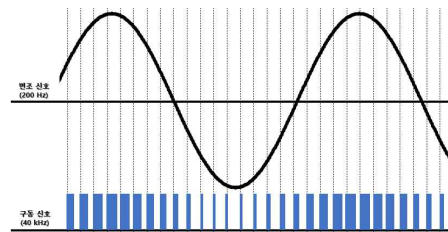
Abstract - 본 논문에서는 초음파 촉각 구현을 위한 초음파 초점 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 초음파 어레이의 각 초음파 센서의 구동 신호의 지연을 통한 초음파 어레이의 집속 제어를 실현한다. CPLD(Complex Programmable Logic Device)로 구현된 구동 신호 지연 로직을 사용하여 초음파 초점 제어 알고리즘에서 계산된 값을 정량화하여 초음파 초점 제어를 구현한다. 실험을 통해 본 논문에서 제안한 초음파 초점 제어 알고리즘의 촉각 구현을 확인하였다.

을 사용하여 40kHz의 구형파를 생성한다. 생성된 40kHz 구형파는 MCU의 Timer 기능을 사용하여 200Hz 주기로 펄스 폭 변조를 실행한다.

$$pwm\ duty = \sin\left(\frac{2 \times \pi}{I} \times A\right) + B$$

<식 1> 펄스 폭 도출식

펄스 폭 변조시 40kHz 구형파의 펄스 폭 도출식은 식 1과 같이 구할 수 있다. 식에서 I는 200Hz 주기의 인덱스이며, A는 진폭 배율, B는 진폭오프셋이다.



<그림 2> 구동 신호 펄스 폭 변조

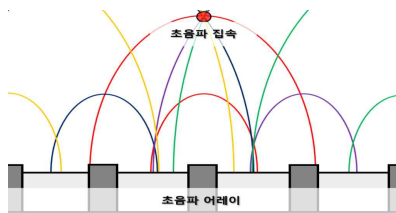
1. 서 론

초음파 초점 제어 알고리즘은 초음파 구동 신호 지연 로직을 사용하여 여러 개의 초음파를 한 점으로 집속시켜 촉각 영역을 만든다. 초음파 촉각 구현을 위해서는 수십 개 이상의 초음파 어레이가 필요하며, 초음파 어레이의 각 초음파의 구동 신호 지연 값을 계산하여 정량화한 값을 초음파 어레이에 적용하여 초음파 집속이 될 수 있도록 하여 초음파 촉각을 구현한다. 초음파 촉각 구현을 위해 초음파 구동 신호 변조 방법과 구동 신호 지연 로직을 사용한 초음파 초점 제어 알고리즘을 제안한다.

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.

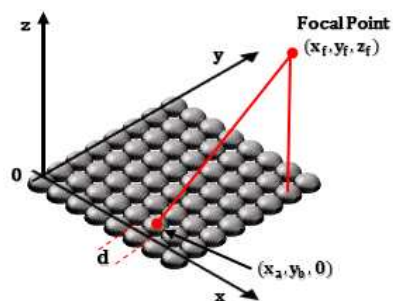
2.2 구동 신호 펄스 폭 변조

초음파 촉각 구현을 위해선 초음파 구동 신호는 펄스 폭 변조가 필요하다. 초음파 구동 신호는 보통 40kHz의 대역폭을 사용하는데, 이는 인간이 느낄 수 없기에 인간이 느낄 수 있는 1Hz에서 1000Hz사이의 주파수와 변조가 이루어져야 한다. 제안하는 방법은 MCU의 PWM(Pulse Width Modulation) 기능

촉각 구현은 구동 신호의 PWM 펄스 폭 변조와 변조신호의 주파수에 따라서 다양한 질감으로 구현할 수 있으며, 본 논문에서는 200Hz 변조 신호에서 0%에서 50%까지의 PWM 펄스 폭 변조를 사용하였다.

2.3 초음파 초점 제어 알고리즘

초음파 촉각 구현을 위해 초음파 초점 제어 알고리즘은 촉각 구현 영역에 초음파 어레이의 각 초음파 센서의 구동 신호 지연 값을 산출하고 구동 신호 지연 로직에 따라 정량화하는 작업을 한다.



<그림 3> 초음파 초점 제어 알고리즘 좌표계

초음파 센서의 구동 신호 지연 값을 산출하기 위해 초음파 어레이는 그림 3과 같이 초음파 초점 제어 알고리즘 좌표계로 나타낼 수 있다. 각 초음파 센서는 집속해야 하는 위치로부터의 도달 시간을 계산한다. 식 2는 초음파 센서의 집속점까지의 도달 시간을 나타낸다.

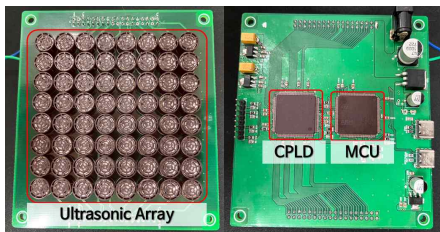
$$time_{ab} = \frac{\sqrt{(x_f - x_a)^2 + (y_f - y_b)^2 + z_f^2}}{c}$$

<식 2> 초음파 센서의 집속점까지의 도달 시간

모든 초음파 센서에 대해 집속점까지의 도달 시간을 계산하여 구하고, 계산된 값은 구동 신호 지연 로직에 따른 정량화작업을 진행한다. 본 논문에서는 CPLD로 설계된 구동 신호 지연 로직을 사용하였으며, 40kHz 대역폭의 64채배된 값인 2.56Mhz로 나누어주어 정량화를 진행한다. 정량화된 계산 값을 다시 구동 신호 지연 보드로 입력하여 초음파를 구동시켜 초음파 촉각을 구현한다.

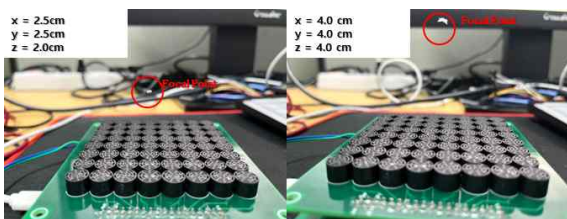
2.3 실험

본 논문에서 제안한 초음파 초점 알고리즘을 실험하기 앞서 CPLD 및 MCU 구동 보드와 8x8 크기의 초음파 어레이 구동 보드를 설계 및 제작하였다. 그림 4는 본 논문에서 제작한 초음파 촉각 구현을 위한 구동 신호 지연 로직 보드와 초음파 어레이 보드이다.



<그림 4> 초음파 촉각 모듈

초음파 초점 알고리즘의 실험은 초음파 초점 위치를 바꿔가며 초음파 촉각 유무를 확인하였다. 그림 5는 초음파 초점에 따른 집속 변화를 물체를 띄워 시각적으로 확인하였고, 표 1은 구동 신호의 펄스 폭 변조에 따른 초음파 집속점의 촉각 변화를 보여준다.



<그림 5> 초음파 초점에 따른 집속 변화

변조신호 주파수	촉각 강도(0-5)
100Hz	1
200Hz	5
300Hz	3

<표 1> 구동 신호의 펄스 폭 변조에 따른 촉각 변화

3. 결 론

본 논문에서는 초음파 초점 제어 알고리즘에서 계산하고 정량화된 값을 구동 신호 지연 로직에 적용하여 초음파 초점 구현하는 방법과 구동 신호의 펄스 폭 변조 방법을 제안한다.

제안한 방법은 초음파 어레이의 집속을 실현하여 초음파 촉각을 구현하였다. 간단한 구조의 알고리즘으로 초음파 촉각을 구현하였으며, 이는 초점 제어 알고리즘을 수행하는 MCU의 자원을 적게 소모하므로 시스템 설계 시 공간적 및 비용적 이점을 갖게 된다.

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.