

초음파 촉각 구현을 위한 CPLD를 사용한 Shift Register 기반 다채널 초음파 집속 지연 제어 방법에 대한 연구

신덕식¹ · 박준현¹ · 임영철² · 최준호^{2,+}

A Study on the Shift Register-Based Multi Channel Ultrasonic Focusing Delay Control Method using a CPLD for Ultrasonic Tactile Implementation

Duck-Shick Shin¹, Jun-Heon Park¹, Young-Cheol Lim², and Joon-Ho Choi^{2,+}

Abstract

This paper proposes a shift-register-based multichannel ultrasonic focusing delay control method using a complex programmable logic device (CPLD) for a high resolution of ultrasonic focusing system. The proposed method can achieve the ultrasonic focusing through the delay control of driving signals of each ultrasonic transducer of an ultrasonic array. The delay of the driving signals of all ultrasonic channels can be controlled by setting the shift register in the CPLD. The experiment verified that the frequency of the clock used for the delay control increased, the error of the focusing point decreased, and the diameter of the focusing point decreased as the length of the shift register in the proposed method. The proposed method used only one CPLD for ultrasonic focusing and did not require to use complex hardware circuits. Therefore, the resources required for the design of an ultrasonic focusing system could be reduced. The proposed method can be applied to the fields of human computer interaction (HCI), virtual reality (VR) and augmented reality (AR).

Keywords: Ultrasonic, Haptic, Tactile, Delay control method, Ultrasonic focusing method

1. 서 론

최근 HCI 분야는 컴퓨팅 시스템에서 최적의 사용자 경험(UX)을 위해 활발히 연구되고 있는 분야이다. 컴퓨팅 시스템에서 키보드나 마우스 대신에 인간의 언어, 동작, 표정, 촉감 등의 오감을 사용하는 자연스러운 인터페이스의 요구는 점점 늘어나는 추세이다. 이러한 추세에 따라 컴퓨팅 시스템에서 사용할 수 있는 촉각 피드백 시스템이 점차 연구 개발되고 있다. 촉각 피드백을 제공하는 기존의 방식은 접촉 촉각 피드백 방식과 비접촉 촉각 피드백 방식으로 나눌 수 있다[1, 2]. 접촉 촉각 피드백 방식은

사람의 피부와 장치 사이의 접촉을 필요로 하며, 이는 원하지 않는 촉각을 유발할 수 있고 사용자의 물리적 움직임을 제한할 수 있다. 이러한 이유로 최근 비접촉 촉각 피드백 방식이 많은 관심을 받고 있다.

비접촉 촉각 피드백을 구현하는 방법은 대표적으로 공기의 흐름을 이용하는 방법, 광탄성 물질을 사용하는 방법, 그리고 초음파를 사용하는 방법이 있다[3, 4]. 공기의 흐름을 이용하는 방법은 공기의 흐름을 정확하게 제어하기 어렵고 촉각 해상도가 낮아 정밀한 촉각 피드백 구현이 어렵다. 그리고 광탄성 물질을 사용하는 방법은 레이저를 광탄성 물질에 조사하여 진동 촉각 자극으로 변환하는 방법이다[5-7]. 그러나 이는 광학 구조가 복잡하고, 광이 쉽게 차단될 수 있고, 사용자의 피부에 화상을 입힐 수 있다는 단점을 갖는다. 마지막으로 초음파를 사용하는 방법은 복수의 초음파 센서를 집속하여 촉각을 구현하는 방식이며, 짧은 반응 시간을 갖고 있으며, 제어 방법에 따라 다양한 질감을 표현할 수 있고, 높은 제어성과 재현성을 갖는다[8-15]. 이러한 특성으로 인해 초음파 촉각 피드백 기술은 비접촉 촉각 피드백을 얻을 수 있는 좋은 방법이다. 최근 초음파를 이용한 비접촉 촉각 피드백 기술은 활발히 연구되고 있으며, 초음파 비접촉 촉각 피드백 기술이 탑재된 제품 또한 상용화되어 판매되고 있다[27]. 하지만, 제품의 가격이 높다는 단점이 있기

¹ 한국전자기술연구원 스마트전장연구센터(Smart Electrics Research Center, Korea Electronics Technology Institute)

226, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61011, Korea

² 전남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Chonnam National University)

77, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

⁺Corresponding author: joono@chonnam.ac.kr

(Received: Aug. 22, 2022, Revised: Aug. 31, 2022, Accepted: Sep. 7, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

때문에, 개발 및 생산 비용을 절감할 수 있는 기술에 관한 연구가 필요하다.

초음파 촉각 피드백 기술은 복수의 초음파를 한 점으로 집속하여 촉각을 발생시킨다. 초음파를 한 점으로 집속하기 위해서는 각 초음파 센서의 위상 제어가 필요하다. 각 초음파 센서의 위상을 제어할 수 있는 방법으로는 지연 회로 사용, 카운터 사용 등의 방법이 있다. 지연 회로를 사용하는 방법은 시스템 설계 시 유연성이 떨어지며, 하드웨어 시스템의 부하가 크고 비용을 높다는 단점이 있다[16, 17]. 그리고 카운터를 사용하는 방법은 초음파의 개수가 늘어남에 따라 요구되는 메모리가 커지는 단점을 갖는다[18-20].

본 논문은 상기 기술한 단점을 해결하기 위해 CPLD를 사용한 Shift Register 기반의 다채널 초음파 집속 지연 제어 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 하나의 CPLD만을 사용하여 Shift Register를 설계한다. 그리고 이에 기반하여 입력된 초음파 구동 신호를 여러 개의 지연 신호로 나누어 저장시키고, 그 신호들을 기반으로 다채널 초음파 센서의 지연을 제어함으로써, 비접촉 촉각 피드백을 구현한다. 제안하는 방법은 초음파 집속을 구현하기 위해 하나의 CPLD외의 추가적인 하드웨어를 사용하지 않기 때문에 시스템 설계 시에 공간적, 비용적 이점이 있다.

2. 연구 방법

2.1 초음파 촉각 피드백 원리

초음파 촉각 피드백 기술은 초음파의 특성인 음향 방사 압력을 기반으로 한다[21, 22]. 음향 방사 압력은 파동 전파의 변위에 따라 움직이는 표면의 평균 압력과 정지 상태일 때 동일한 평균 밀도의 유체에 존재하는 압력을 의미한다. 사람은 하나의 초음파 센서에서 방출되는 초음파를 인지하기 어렵지만, 3차원 공간에서 복수의 초음파 센서의 초음파가 서로 교차할 때 사람이 인지할 수 있는 촉각 피드백을 생성할 수 있다.

음향 복사 압력 P [Pa]는 다음과 같이 설명할 수 있다[23, 24].

$$P = \alpha E = \alpha \frac{I}{c} = \alpha \frac{\rho^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

여기서 E [J/m^3]는 초음파 에너지의 밀도를, I [W/m^2]는 초음파의 강도를, c [m/s]는 음속을, ρ [Pa]는 초음파 음압의 RMS(Root Mean Square)를, ρ [kg/m^3]는 매질의 밀도를, α 는 $1 \leq \alpha \leq 2$ 를 만족하는 상수를 나타낸다. 물체 표면에 입사되는 초음파를 완벽하게 반사하면 $\alpha = 2$ 이고, 입사되는 초음파를 모두 흡수하면 $\alpha = 1$ 이다. 식 (1)은 초음파 p 의 공간 분포를 합성하여 음향 복사 압력 P 의 공간 분포를 제어할 수 있음을 설명한다.

2.2 펄스 변조

초음파 구동 신호의 공진주파수는 20 kHz보다 높기 때문에 사람의 촉각이 이를 인지할 수 없다. 그렇기 때문에 1 Hz에서 1 kHz 사이의 적절한 주파수를 선택하여 초음파 구동신호의 변조가 필요하다[25]. 본 논문에서는 초음파 구동신호를 변조하기 위해 PWM(Pulse Width Modulation) 기법을 사용한다. 초음파의 공진 주파수를 f_c 라고 하면, 구동 신호 $V(t)$ [V]는 다음과 같이 나타낼 수 있다[26].

$$V(t) = \begin{cases} V_m, & 0+rT < t \leq \beta T+rT \\ 0, & \beta T+rT < t \leq T+rT \end{cases} \quad (2)$$

여기서 V_m [V]는 구형파의 진폭을, T [s]는 구형파의 주기를, $T = 1/f_c$ 이고, β 는 구형파의 Duty Cycle, r 은 임의의 정수를 나타낸다. 그리고 $V(t)$ [V]의 기본 주파수 성분 a_1 [V]의 진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다[26].

$$a_1 = \frac{2}{\pi} V_m |\sin \pi \beta| \quad (3)$$

식 (3)은 50% Duty Cycle을 사용할 때, 캐리어 진폭이 최대임을 나타낸다. 초음파의 출력되는 음압은 a_1 에 비례하기 때문에 음향 방사 압력은 $|\sin \pi \beta|$ 에 비례한다[8]. 따라서, 음향 방사 압력의 강도는 초음파 구동 신호의 Duty Cycle을 제어함으로써 조절이 가능함을 알 수 있다. 구동 신호의 Duty Cycle이 50%일 때, 생성되는 음향 방사 압력이 가장 높으며, 그렇지 않을 경우 생성되는 음향 방사 압력은 감소한다. 또한, 초음파 센서의 공진 주파수는 사람이 인지할 수 있는 주파수보다 훨씬 높기 때문에, PWM 기법을 이용한 초음파 촉각 피드백 시스템 제어로 다양한 느낌의 촉각을 생성할 수 있다[15].

2.3 시스템 구성

초음파 촉각 피드백 시스템은 계산 모듈, 제어 모듈, 구동 모듈, 초음파 어레이로 구성된다. Fig. 1은 본 논문의 초음파 촉각 피드백 시스템의 블록도를 나타낸다.

계산 모듈인 MCU는 PC에서 보내는 초음파 초점의 좌표를 수신하여 초음파 어레이의 각 초음파 센서에 필요한 구동신호

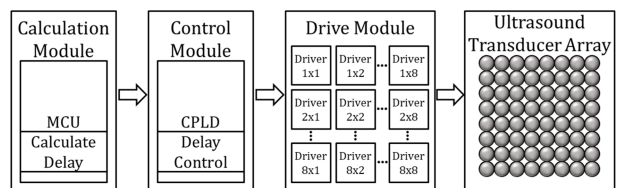


Fig. 1. Block diagram of the proposed ultrasonic tactile feedback system.

의 지연 시간을 계산하여 정량화를 한 후, 그 결과를 제어 모듈로 전송한다. 제어 모듈은 CPLD를 사용한 N-bit Shift Register와 Multiplexer의 조합으로 구성되며, 초음파 어레이의 각 초음파 센서에 필요한 초음파 구동신호의 지연 신호를 생성하고 보내준다. 구동 모듈은 CPLD로부터 출력된 각 초음파 센서의 지연된 구동 신호를 증폭한다. 3차원 공간에서 촉각 피드백을 얻을 수 있는 충분한 에너지를 제공받기 위해 8×8 배열의 초음파 어레이를 사용할 수 있는 구동 회로를 사용한다. 제안하는 시스템은 8×8 배열의 초음파 어레이가 초음파를 방출하기 시작하는 시간을 제어함으로써, 모든 초음파 센서가 방출되는 초음파의 위상이 초점으로 중첩되어 사람이 인지할 수 있는 촉각 피드백을 생성한다.

2.4 초음파 집속 방법

본 논문에서 제안하는 방법은 초음파 어레이의 각 초음파 센서 구동신호의 지연 제어를 위해 CPLD를 사용하여 N-bit Shift Register와 Multiplexer를 설계하여 사용한다. 초음파 집속을 위해서 지연 시간을 계산하고, 계산된 지연 시간을 정량화하고, 정량화된 지연 시간을 초음파 어레이의 각 초음파 센서로 출력하여 집속을 구현한다.

2.4.1 지연 시간 계산

계산 모듈은 PC에서 보내는 집속점 $P(x, y, z)$ 의 좌표에 따라 초음파 어레이의 각 초음파 센서 구동 신호의 지연 시간을 계산한다. Fig. 2는 초음파 집속 좌표계이며 지연 시간 계산 원리를 간략히 보여준다.

좌표계 $(x_a, y_b, 0)$ 에 위치한 초음파 어레이의 a 행 b 열의 초음파 센서가 방출하는 초음파가 집속점 $P(x, y, z)$ 에 도달하는데 필요한 시간 $time_{ab}$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$time_{ab} = \frac{\sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_b)^2 + z^2}}{c} \tag{4}$$

여기서, c 는 음파의 속도를 의미한다. 다음 식 (5)를 통해 초음파 어레이의 초음파 센서 중에 집속점까지 도달하는 시간의 최

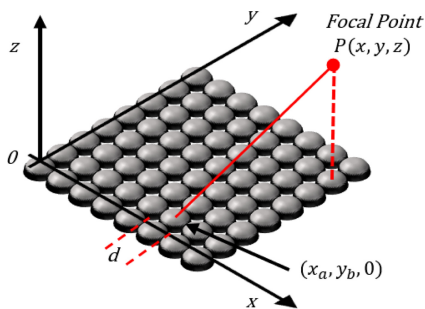


Fig. 2. Coordinate system of the ultrasonic focusing.

대값 $time_{max}$ 을 구한다.

$$time_{max} = \text{maximum}[time_{ab}] \tag{5}$$

그리고 초음파 어레이의 각 초음파 구동 신호 지연 시간 T_{ab} 는 다음 식 (6)과 같이 계산한다.

$$T_{ab} = time_{max} - time_{ab} \tag{6}$$

2.4.2 정량화

계산된 지연 시간은 정량화되어야 제어 모듈에서 사용할 수 있다. 제어 모듈의 Shift Register의 길이에 따라 요구되는 지연 제어 클럭은 달라지며, 지연 제어에 요구되는 클럭 f_m 은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$f_m = f_c L_s \tag{7}$$

여기서, f_c 는 초음파 센서의 공진 주파수이며, L_s 는 제어 모듈의 Shift Register의 길이를 나타낸다. 정량화된 시간 지연 값은 다음과 같이 계산된다.

$$time_q = \left[f_m \text{mod} \left(time_{ab}, \frac{1}{f_c} \right) + 0.5 \right] \tag{8}$$

여기서 $\text{mod}(x, y)$ 는 나머지 연산을 의미하며, $\text{mod}(x, y) = x - ky < |y|$ (k 는 정수)로 표현할 수 있다. 즉, 계산된 시간 지연 값 $time_{ab}$ 에 초음파 센서의 공진 주파수인 f_c 의 역수를 나누어 나머지를 취한 후, 그 값을 지연 제어 클럭 f_m 의 역수로 나누고 반올림하여 정량화된 시간 지연 값 $time_q$ 를 구한다.

2.4.3 지연 제어

본 논문에서는 제어 모듈로부터 입력 받은 구동 신호, 지연 제어 클럭, 정량화된 시간 지연 값을 가지고 지연 제어를 구현한다. 그리고 지연 제어를 구현하기 위해 CPLD를 사용하여 Shift Register를 구성하는 방법을 제안한다. Shift Register의 길이는 사용중인 CPLD의 성능을 고려하여, 최적의 길이인 128로 설정하였으며, 이 때, 지연 제어 로직에서 사용된 총 Look Up Table (LUT)은 3539(82%) 개이다. 초음파 센서의 공진주파수 f_c 의 128배만큼의 지연 제어 클럭이 요구된다. 요구되는 제어 모듈의 지연 제어 클럭은 40 kHz의 128배인 5.12 MHz이다.

Fig. 3은 128의 길이를 가지는 128-bit Shift Register의 RTL-

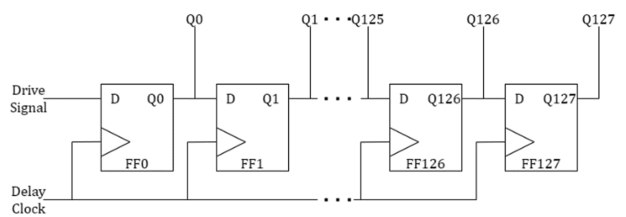


Fig. 3. RTL-Design of 128-bit Shift Registers.

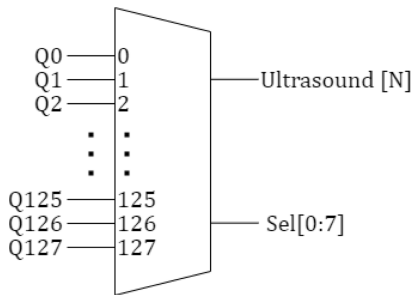


Fig. 4. RTL-Design of 128:1 Multiplexer.

Design이다. 여기서, Drive Signal은 초음파 센서의 공진주파수인 f_c 이며, Delay Clock은 지연 제어 클럭 f_m 이다. 128-bit Shift Register는 128개의 Flip-Flop으로 구성되며, 각 Flip-Flop의 출력을 버퍼에 저장한다. Flip-Flop에 의해 저장된 초음파 구동 신호의 지연 신호들은 Multiplexer를 거쳐 각 초음파 센서로 입력되어 초음파 집속을 구현한다.

Fig. 4는 128:1 Multiplexer의 RTL-Design을 보여준다. 128-bit Shift Register에 저장된 초음파 구동 신호의 지연 신호를 입력 받고, Sel[0:7]에 계산 모듈의 정량화된 시간 지연 값을 입력 받아 그에 맞는 초음파 구동 신호의 지연 신호를 선택하여 각 초음파 센서에 지연 신호를 보내준다. 보내진 신호는 구동 모듈에 의해 증폭되어 초음파 센서를 작동시킨다. 128:1 Multiplexer는 초음파 어레이의 초음파 센서의 개수만큼 설계되며, 모든 초음파 센서의 구동 신호 지연 제어는 동시에 실행되어 초음파 축각 피드백을 구현한다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 개요

Fig. 5는 실험에 사용된 초음파 축각 피드백 시스템을 보여주며, 계산 모듈, 제어 모듈, 구동 모듈 및 초음파 어레이로 구성되었다. 계산 모듈은 STM32F446ZETX을 사용하였으며, 시스템 클럭은 168 MHz를 사용하였다. 제어 모듈의 CPLD는 총 4320개의 LUT를 갖는 LCMXO2-4000HE-4TG144I를 사용하였다. 구동 모듈은 8×8 배열의 초음파 어레이에 구동 신호를 증폭하여 공급하기 위해 Dual-Channel MOSFET TC4429A를 32개 사용하여 구성하였다. 초음파 어레이의 초음파 센서는 MA40S4S

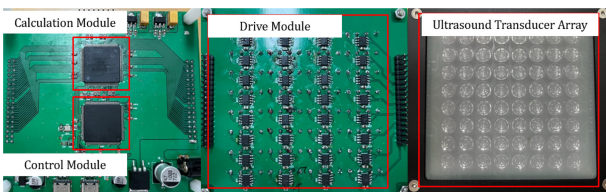


Fig. 5. Configuration of the ultrasonic tactile feedback system.

를 사용하였으며, 공진 주파수는 40 kHz이다. 본 논문은 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 초음파 집속이 되는 음압의 공간 분포를 측정하고 분석하였다.

3.2 실험 결과

음압의 공간분포를 측정하기 위해 초음파 구동 신호는 200 Hz에 의해 변조된 40 kHz의 주파수를 사용하였다. 음압의 공간 분포를 비교하기 위해 64-bit Shift Register와 128-bit Shift Register의 두 그룹으로 실험을 진행하였다.

Fig. 6은 집속점이 $P_1(20 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$ 일 때와, $P_2(20 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$ 일 때의, 64-bit Shift Register를 사용했을 때와 128-bit Shift Register를 사용했을 때의 두 그룹의 공간 분포를 정규화 한 결과를 보여준다. 측정된 최대 음압 강도의 80% 이상의 값부터 유효한 집속점이라 정의하고 그 직경을 측정하였다. 집속점의 높이가 20 mm 일 때, 집속점의 직경은 64-bit Shift Register를 사용한 (a)의 경우에는 4.7 mm로 측정되었으며, 128-bit Shift Register를 사용한 (b)의 경우에는 3.5 mm로 측정되었다. 그리고 집속점의 높이가 30 mm 일 때, 집속점의 직경은 64-bit Shift Register를 사용한 (c)의 경우에는 7.2 mm로 측정되었으며, 128-bit Shift Register를 사용한 (d)의 경우에는 4.0 mm로 측정되었다. 집속점의 높이가 높아짐에 따라 초점의 직경은 증가하였으며, 64-bit Shift Register를 사용했을 때보다 128-bit Shift Register를 사용하였을 때, 초점의 직경은 작아지고 음압의 강도도 더욱 높게 측정되었다.

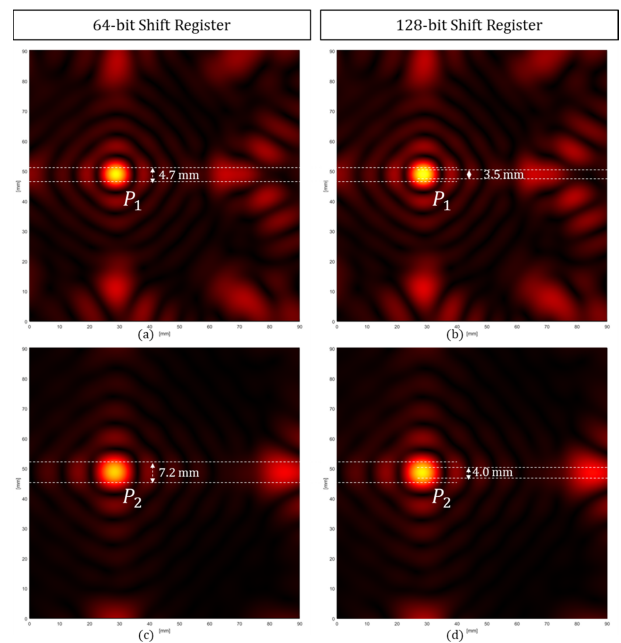


Fig. 6. Spatial distribution of the measured sound pressure (Focal Point $P_1 = (20 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$, Focal Point $P_2 = (20 \text{ mm}, 50 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$).

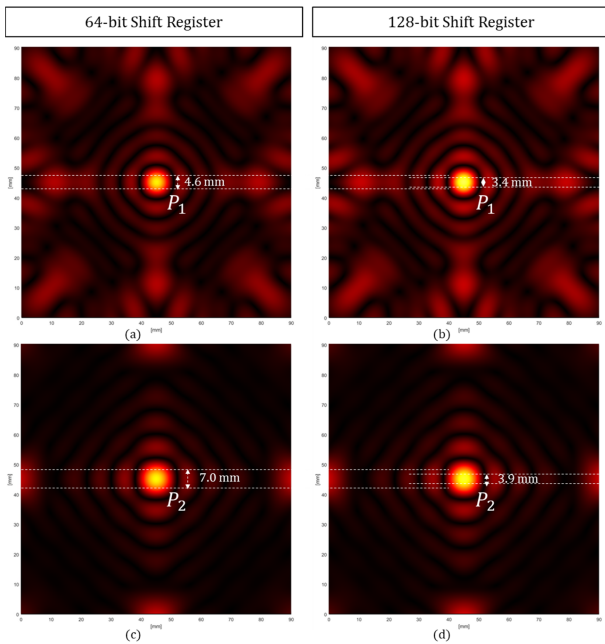


Fig. 7. Spatial distribution of the measured sound pressure (Focal Point $P_1 = (45 \text{ mm}, 45 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$, Focal Point $P_2 = (45 \text{ mm}, 45 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$).

Fig. 7은 Fig. 6와 다른 좌표에서의 집속점의 분포를 확인하기 위해서 집속점 $P_1(45 \text{ mm}, 45 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$ 일 때와, $P_2(45 \text{ mm}, 45 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$ 일 때의, 64-bit Shift Register를 사용했을 때와 128-bit Shift Register를 사용했을 때의 두 그룹의 공간 분포를 정교화 한 결과를 보여주며, 집속점의 높이가 20 mm 일 때, 집속점의 직경은 64-bit Shift Register를 사용한 (a)의 경우에는 4.6 mm로 측정되었으며, 128-bit Shift Register를 사용한 (b)의 경우에는 3.4 mm로 측정되었다. 그리고 집속점의 높이가 30 mm 일 때, 집속점의 직경은 64-bit Shift Register를 사용한 (c)의 경우에는 7.0 mm로 측정되었으며, 128-bit Shift Register를 사용한 (d)의 경우에는 3.9 mm로 측정되었으며, Fig. 6의 실험과 마찬가지로 64-bit Shift Register를 사용했을 때보다 128-bit Shift Register를 사용하였을 때, 초점의 직경은 작아지고 음압의 강도도 더욱 높게 측정되었다.

상기 실험을 통해, 본 연구에서 제안한 방법은 초음파 집속을 통해 초음파 촉각 피드백을 구현할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 CPLD로 설계한 Shift Register의 길이가 늘어남에 따라 요구되는 지연 제어 클럭이 높아지며, 초음파 초점의 직경이 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 초음파 초점의 직경을 작게 만들기 위해 지연 제어 클럭을 무한정 늘리게 되면, 제어 모듈에서 요구되는 메모리나 여러 사양 등이 증가하기 때문에 어플리케이션에 맞는 적절한 Shift Register의 길이를 결정해야 한다.

4. 결 론

본 논문은 CPLD를 사용한 Shift Register를 기반으로 한 다 채널 초음파 집속 지연 제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 초음파 어레이의 각 초음파 센서 구동 신호의 지연 제어를 통하여 초음파 집속을 구현하였다. 제안된 방법은 추가 하드웨어 회로를 사용하지 않고 하나의 CPLD만 사용하여 초음파 집속을 구현하여 초음파 촉각 피드백 시스템 설계 시 공간적, 비용적 이점을 갖는다. CPLD로 구성된 Shift Register는 길이의 가변이 가능하며, 초음파 구동신호와 길이에 따른 지연 제어 클럭만 입력 받아 동시에 모든 초음파 어레이의 초음파 구동신호의 지연 제어가 가능하기 때문에 시스템 자원을 감소시킨다.

제안된 방법은 특정 초점에서 음압의 공간 분포를 64-bit Shift Register와 128-bit Shift Register를 사용했을 때를 비교하여, 초음파 집속 구현을 확인하였으며, Shift Register의 길이가 늘어남에 따라 요구되는 지연 제어 클럭의 주파수도 높아지고, 초음파 집속점의 직경도 작아지고 음압의 강도도 강해지는 것을 확인하였다. 어플리케이션에 따른 초점의 최대 직경을 결정하여 적절한 길이의 Shift Register를 사용해야 한다.

제안된 방법은 HCI나 AR, VR 등의 여러 분야에 적용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2022년 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P189800002).

REFERENCES

- [1] K. Minamizawa, S. Kamuro, S. Fukamachi, N. Kawakami, and S. Tachi, "GhostGlove: Haptic existence of the virtual world", *In ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos*, pp. 1-1, 2008.
- [2] S. C. Kim, C. H. Kim, T. H. Yang, G. H. Yang, S. C. Kang, and D. S. Kwon, "SaLT: Small and lightweight tactile display using ultrasonic actuators", *In RO-MAN 2008-The 17th IEEE Int. Symp. ROMAN*, pp. 430-435, 2008.
- [3] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, and A. Israr, "AIREAL: interactive tactile experiences in free air", *ACM Trans. Graph. (TOG)*, Vol. 32, No. 4, pp. 1-10, 2013.
- [4] M. Y. Tsamlal, P. Issartel, N. Ouarti, and M. Ammi, "HAIR: HAptic feedback with a mobile AIR jet", *2014 IEEE Int. Conf. on Robot. Autom. (ICRA)*, pp. 2699-2706, 2014.
- [5] Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, "Cross-field aerial haptics: Rendering haptic feedback in air with light and acoustic fields", *Proc. of the 2016 CHI Conf. on Hum. Factor. Comput. Syst.*, pp. 3238-3247, 2016.

- [6] J. H. Jun, J. R. Park, Y. M. Bae, J.-Y. Park, H.-S. Kim, S. Choi, S. J. Jung, S. H. Park, D.-I. Yeom, G.-I. Jung, J.-S. Kim, S.-C. Chung, and S. P. Kim, "Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations", *Sci. Rep.*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-16, 2015.
- [7] H. Lee, J.-S. Kim, J.-Y. Kim, S. Choi, J.-H. Jun, J.-R. Park, A.-H. Kim, H.-B. Oh, J.-H. Baek, S.-J. Yang, H.-S. Kim, and S.-C. Chung, "Mid-air tactile stimulation using indirect laser radiation", *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 9, No. 4, pp. 574-585, 2016.
- [8] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Non-contact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound", *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155-165, 2010.
- [9] M. Ito, D. Wakuda, S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda, "High spatial resolution midair tactile display using 70 kHz ultrasound", *Int. Conf. on Hum. Haptic Sens. Touch Enabled Comp. Appl.*, pp. 57-67, 2016.
- [10] S. Suzuki, R. Takahashi, M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino, and H. Shinoda, "Midair haptic display to human upper body", *2018 57th Annual Conf. Soc. Instrum. Control Eng. Japan (SICE)*, pp. 848-853, 2018.
- [11] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "Ultra Haptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces", *Proc. the 26th Annual ACM Symp. on User Interface Softw. Technol.*, pp. 505-514, 2013.
- [12] A. Price and B. Long, "Fibonacci spiral arranged ultrasound phased array for mid-air haptics", *2018 IEEE Int. Ultrason. Symp. (IUS)*, pp. 1-4, 2018.
- [13] A. Marzo, T. Corkett, and B. W. Drinkwater, "Ultraino: An open phased-array system for narrowband airborne ultrasound transmission", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 65, No. 1, pp. 102-111, 2017.
- [14] A. Marzo Pérez and B. W. Drinkwater, "Holographic acoustic tweezers", *Proc. Natl Acad. Sci.*, Vol. 116, No. 1, pp. 84-89, 2019.
- [15] K. Hasegawa and H. Shinoda, "Aerial vibrotactile display based on multiunit ultrasound phased array", *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 11, No. 3, pp. 367-377, 2018.
- [16] J. Buckwalter and A. Hajimiri, "An active analog delay and the delay reference loop", *2004 IEE Radio Freq. Integr. Circuits (RFIC) Syst.*, pp. 17-20, 2004.
- [17] 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 Mmicro. Wirel. Commun. Lett.*, Vol. 18, No. 11, pp. 731-733, 2008.
- [18] Y. Liu, H. Li, Y. Wang, T. Xing, H. Baghaei, J. Uribe, and W. H. Wong, "A programmable high-resolution ultra-fast delay generator", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 50, No. 5, pp. 1487-1490, 2003.
- [19] H. Zhang, H. G. Yang, J. Zhang, and F. Liu, "High-speed programmable counter design for PLL based on a delay partition technique", *2009 IEEE Int. Symp. on Radio-Freq. Integr. Technol. (RFIT)*, pp. 100-103, 2009.
- [20] M. A. Do, X. P. Yu, J. G. Ma, K. S. Yeo, R. Wu, and Q. X. Zhang, "A 2GHz programmable counter with new re-loadable D flip-flop", *2003 IEEE Conf. on Electron Devices Solid-State Circuits (IEEE Cat. No. 03TH8668)*, pp. 269-272, 2003.
- [21] T. Hasegawa, T. Kido, T. Iizuka, and C. Matsuoka, "A general theory of Rayleigh and Langevin radiation pressures", *Acous. Sci. Technol.*, Vol. 21, No. 3, pp. 145-152, 2000.
- [22] J. Awatani, "Studies on acoustic radiation pressure. I.(General considerations)", *J. Acous. Soc. Am.*, Vol. 27, No. 2, pp. 278-281, 1955.
- [23] T. Hoshi, "Development of aerial-input and aerial-tactile-feedback system", *2011 IEEE World Haptics Conf.*, pp. 569-573, 2011.
- [24] T. Hoshi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Non-contact tactile sensation synthesized by ultrasound transducers", *World Haptics 2009-Third Joint Eurohaptics Conf. Symp. Haptic Interfaces Virtual Environ. Teleoper. Syst.*, pp. 256-260, 2009.
- [25] B. Long, S. A. Seah, S. Subramanian, and T. Carter, "Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound", *ACM Trans. Graph.*, Vol. 33, No. 6, p. 181, 2014.
- [26] 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.
- [27] <https://www.ultraleap.com/product/stratos-explore/> (retrieved on Sep. 1, 2022).