
계획송신방법에 의한 초음파 반사노이즈 제거

진태석*

Reflection Noise Rejection of Ultrasonic Sensor using Scheduling Firing Method

Tae-Seok Jin*

이 논문은 2011년도 지방과학연구단지 육성사업의 연구결과임, 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(N. 2010-0021054)

요 약

본 논문에서는 초음파 송신 시간을 일정 패턴으로 계획하여 송신하고 연속해서 수신되는 거리 데이터 값을 이전 상태의 데이터를 통해 예측된 거리값으로 매핑 시키는 알고리즘을 제시하였다. 에리값에 대한 패턴을 인식하여 다중반사에 의한 에러를 판별 및 제거할 수 있다. 그리고 이동 로봇을 이용하여 다중반사 환경에서 실험을 통하여 거리값의 손실 없이 정확한 데이터를 획득할 수 있음을 실험을 통하여 보였다. 이동로봇에 다양한 센서기술들을 이용하여 실내에서 활용하기 적합한 지능적 역할을 수행할 수 있는 다목적용 자율 이동 로봇에 환경인식을 위한 다중 초음파센서를 장착하여 초음파 반사에 따른 크로스토크 실험결과를 제하였다. 또한, 기존 로봇에 장착된 초음파를 이용하여 계획송신(Scheduling firing)방법을 적용하여 임의의 환경에서의 실험결과를 통해 제시한 방법에 대한 유효성을 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, we proposed a new method which analyzes and eliminates errors occurring by multi-reflection of ultrasonic firing in mobile robot application. This new method allows ultrasonic sensors to fire at rates that are three times faster than those customary in conventional applications readings due to ultrasonic noise disturbance. It is possible them to collect and predict sensor data much faster than conventional methods. Furthermore, this method's capability allows mobile robot to navigate in a complex and unknown environment and to collaborate in the same environment with multiple mobile robot, even if their ultrasonic sensors operate. And it's usefulness to avoid moving obstacles by capability of rapid collecting data. Finally, we present experimental results that demonstrate the performances of the new proposed method by experiments in a multi-reflective environment.

키워드

초음파 센서, 간섭영향, 이동로봇, 노이즈, 장애물 회피

Key word

ultrasonic sensor, crosstalk, mobile robot, noise, obstacle avoidance

* 종신회원 : 동서대학교 메카트로닉스공학과
(교신저자, jints@dongseoo.ackr)

접수일자 : 2011. 08. 31
심사완료일자 : 2011. 09. 17

I. 서 론

환경인식용 초음파 센서는 값이 싸고 사용이 쉬우며 실시간 계산이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 장애물과의 거리 측정이나 즉각적인 반응에 의한 장애물 회피 등에 매우 유리하다.

그러나 5~30°에 이르는 넓은 지향각에 의한 데이터의 불확실성, 회절과 다중반사 간섭으로 인한 판단오류 등이 발생한다[1][2]. 특히 사용환경에 Machine tool, 고압의 공기 분출을 하는 장치가 존재할 경우에는 간섭파의 강도가 강하여 초음파센서의 사용이 곤란하며, 초음파 센서를 장착한 여러 대의 로봇이 같은 환경에서 작업할 경우에는 로봇 상호간에 간섭에 의한 여러 데이터를 수신하게 되는데, 이것은 수신되는 데이터를 연속적으로 읽어 데이터를 비교하여 비연속적인 데이터를 제거할 수 있다.

그러나 다중반사를 일으키는 특정 환경에서는 데이터가 일정한 크기로 연속적으로 들어오기 때문에 일정하고 연속적인 에러 값을 읽게 된다. 기존방법에 있어서 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 여러 가지 스캐닝 방법과 초음파의 반사파가 다른 센서에서 감지 못할 만큼 충분히 기다린 다음에 다른 센서를 동작시키는 방법 등을 통하여 해결하려고 했다. 그리고 Jorg, Borenstein은 이 문제를 초음파의 송신하는 시간을 다르게 계획하여 이 문제를 해결하려고 시도했다. 이 방법은 다중반사에 의한 에러를 해결할 수 있었으나 에러가 발생하는 부분에서 데이터를 모두 버림으로서 해결하였기 때문에 연속적으로 다중반사가 생기는 경우에는 데이터의 손실이 너무 많아서 정확한 데이터를 인식할 수 없는 단점이 있었다[3][4][5].

본 논문에서는 초음파의 송신 시간을 일정 패턴으로 계획하여 송신하고, 연속해서 들어오는 거리값을 이전의 데이터를 통해 예측된 거리값으로 매핑시키는 알고리즘을 제시하며, 에러값에 대한 패턴을 인식하여 다중반사에 의한 에러를 판별 및 제거한다. 그리고 이 동 로봇을 이용하여 다중반사 환경에서 실험을 통하여 거리값의 손실 없이 정확한 데이터를 획득할 수 있음을 실험을 통하여 보인다.

본 논문은 II절에서 초음파 노이즈의 특성, III절에서 초음파 노이즈 제거 알고리즘 그리고 IV에서 제시된

알고리즘에 대한 실험으로 구성하였다.

II. 초음파 노이즈 발생

이동로봇 주행시 초음파 노이즈는 일반적으로 초음파를 사용하는 다른 로봇의 초음파 센서의 간섭과 로봇 시스템의 인접 초음파 센서로부터의 간섭으로 발생하는 다중반사에 의한 노이즈가 일반적이라 할 수 있다. 이 현상은 동일한 전기적 모듈로 여러 개의 초음파 센서를 구동할 경우에 발생한다. 즉 어떤 센서에서 송신된 초음파의 반사파가 다른 센서에 감지되는 바람직하지 못한 현상이다. 이러한 현상을 크로스토크라고하며, 그림 1은 wall 1과 wall 2 그리고 wall 3을 거쳐 y 센서 및 그와 인접한 센서에서 크로스토크가 발생한다. 그림 1과 같이 다중경로반사에 의한 크로스토크는 근본적으로 해결하지 못했다. 이 문제를 해결하기 위해서 III절에서는 초음파 데이터의 손실이 없으면서 크로스토크의 영향을 받지 않고 정확한 데이터를 수신할 수 있는 방법을 다루도록 한다.

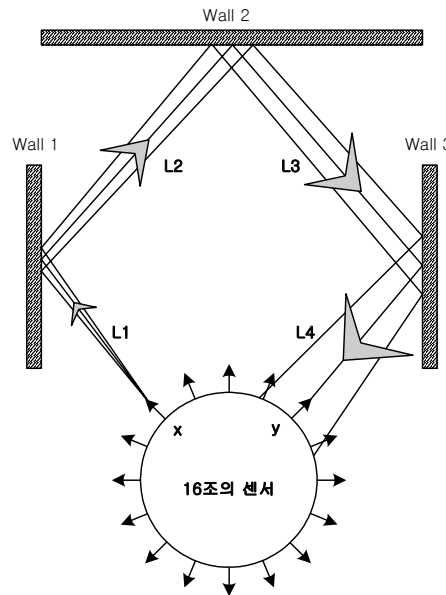


그림 1. 크로스토크의 발생.
Fig. 1 Crosstalk occurring structure.

III. 초음파노이즈 제거알고리즘

II 절에서는 초음파 센서에서 발생할 수 있는 여러 가지 노이즈를 보였다. 여기서는 II 절에서 나타난 노이즈를 해결할 수 있는 방법을 제시한다. 초음파 노이즈는 센서가 어떤 간섭에 의해 잘못된 데이터를 받는 것으로, 이와 같은 노이즈를 제거하기 위해서는 센서의 원리를 정확히 이해해야 한다.

3.1. 초음파 센서의 원리

대부분의 이동 로봇에 사용되는 초음파 시스템은 초음파를 송신하고 그 음파가 물체를 만났을 때 반사파가 발생하며 이때 측정되는 거리값은 반사파가 물체에 부딪히고 돌아오는 음파의 크기가 문턱값(threshold level) 보다 처음으로 크게 되는 시점의 시간을 측정하여 거리를 계산한다. 그 시간을 TOF(Time of Flight)라 하며, 실제 물체와의 거리측정은 다음과 같다[6].

$$d[m] = \frac{t}{2} \times c[m] \quad (1)$$

- c : 음파속도(공기)
- t : TOF(sec)
- d : 초음파센서에서 측정물체 까지 거리

$$c[m/s] = 331.5 + 0.6t, \quad t \text{는 } [^{\circ}C].$$

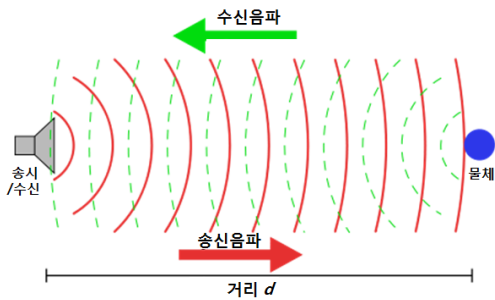


그림 2. 초음파 원리
Fig. 2 Ultrasonic sensor principle

3.2. 크로스토크 원리

그림 1에서 발생하는 크로스토크는 초음파 구동에 사용되는 일반적인 방법으로는 해결할 수 없다[7][8]. 왜냐하면 그 환경에서는 크로스토크의 영향을 받는 센서에 일정주기, 일정크기의 초음파의 반사파가 연속적으로 들어오기 때문에 기존의 방법으로는 크로스토크의 판별 및 해석을 할 수 없다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 초음파 센서의 동작을 계획하여 가장 빠르게 동작시키면서 크로스토크를 해결할 수 있는 방법을 제시하였다.

그림 1의 환경에서 그림 2의 계획 스케닝(scheduling scanning)방법으로 초음파를 구동하게 되면 y 주변의 초음파 센서에서 크로스토크가 발생할 것이다. 이에 대한 타이밍 다이어그램을 그림 3에 나타내었다.

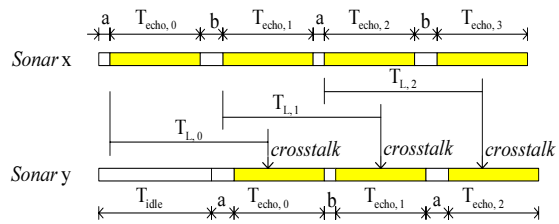


그림 3. 계획된 초음파 구동 타이밍도

Fig. 3 Timing diagram for scheduled sonar firing

그림 3에서 소나 x는 소나 y 에 크로스토크를 발생시키는 센서이며, 소나 y은 소나 x에 의해 영향을 받는 센서이다. a와 b는 초음파 센서를 쏘기 전에 각각 다르게 넣어주는 시간 값이다. T_echo는 음파를 송신하고 반사파를 기다리는 전체 시간 범위이다. T_L은 그림 1과 같이 반사파가 다른 초음파 센서에 영향을 줄 수 있는 초음파의 총 비행시간을 나타낸다.

T_idle은 초음파 센서의 타이밍을 맞추기 위해 임의로 삽입하였고 초음파 센서가 아무런 행동을 하지 않는 시간이다. 소나x에서 음파를 송신하면 T_echo의 시간주기 내에서 한 개의 반사파를 받게 된다. 그러나 그림 1과 같은 특수한 경우에는 소나x의 반사파가 L1+L2+L3+L4의 경로로 비행하여 소나y에 영향을 미친다. 그러나 그림 3과 같이 소나 x가 음파를 쏘기 전에 각각 다른 값의 시간 지연을 주고 음파를 쏘다면 소나 y에서는 소나 x에 의한

일정 패턴의 반사파를 받게 된다. 여기서 우리가 일정 패턴의 반사파를 분석하고 예측한다면 크로스토크를 해석할 수 있고, 이후에는 크로스토크의 영향을 제거할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이 일정 패턴의 반사파를 검사하여 발생할 수 있는 크로스토크의 값을 미리 예측하고 T_{echo} 내에 들어오는 한 개 이상의 센서값과 예측된 가상의 값을 매핑시켜 그 값 중에서 크로스토크를 판별 및 제거하고 정확한 현재의 센서값을 찾는다. 그에 대한 알고리즘을 그림 4에 나타내었다.

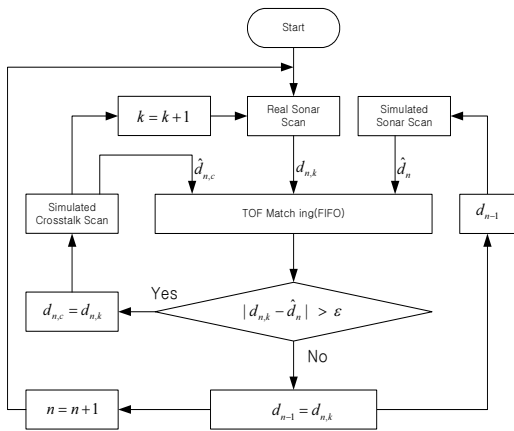


그림 4. 크로스토크 제거 및 거리측정 알고리즘
Fig. 4 Algorithm for Noise Rejection

현재 거리값의 예측은 크로스토크와 현재 거리값의 구별을 위해 필요하다. 입력되는 초음파신호의 정확성을 위해서는 현재의 센서값만을 참고해서는 불가능하다. 이를 위해 이전의 센서값들을 통해 다음의 센서값을 예측하는 것이 중요하다. 센서값의 범위를 알고 연속된 센서값이 급격히 변화하지 않는다고 가정할 경우 이전의 초음파센서의 값에서 현재의 센서값의 범위를 구할 수 있다. 예측값은 FIFO에 저장되어 있는 이전의 값들을 활용하여 구할 수 있다. 이 거리값들의 흐름을 통해 다음 거리값들의 편차의 평균값을 마지막 거리값과 합하여 얻는 방법을 사용하였다. 거리값 예측은 다음 식 (2)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\hat{d}_n = d_{n,k} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \Delta d_k \quad (2)$$

식 (2)에서 n 은 FIFO의 크기를 나타내고, d_n 은 현재의 거리값이며, \hat{d}_n 는 예측한 거리값이다. Δd_k 는 FIFO에 저장된 데이터들의 차이값이며, 식 (2)에서 얻은 예측값을 가지고 현재의 거리값을 보정하는데 현재 거리값과 예측한 거리값의 차이가 작으면 현재의 값을 사용하고 차이가 문턱값 ϵ 보다 크게 되면 크로스토크에 의한 노이즈로 보고 다음 거리값을 받게 된다. 그러나 입력된 거리값에서 원하는 거리값을 받지 못했을 경우에는 예측값된 거리값을 현재의 거리값으로 사용한다.

$$\begin{cases} d_{n,k} & |d_{n,k} - \hat{d}_n| < \epsilon \\ \hat{d}_n & otherwise \end{cases} \quad (3)$$

ϵ 는 연속된 신호에서 허용 오차 범위를 나타내며, 현재값과 예측값의 차이가 ϵ 보다 크면 이 값은 크로스토크에 의한 거리값으로 본다. 이 경우에는 크로스토크를 제거해 주어야 하는데 그림 4에 보인 것과 같이 크로스토크가 일정패턴으로 발생되기 때문에 현재의 크로스토크가 발생하는 시간을 예측할 수 있다. 현재 발생한 크로스토크가 예측된 크로스토크와 같으면 크로스토크를 제거할 수 있다. 초음파센서는 음파를 송신하고 전체 반사시간 T_{echo} 내에 들어오는 모든 거리값을 받으며, 그 중에서 크로스토크에 의한 거리값과 실제 자신의 반사파에 의한 거리값을 구분하며, 그 거리값들은 다음 거리값의 예측에 활용된다. 그리고 현재의 크로스토크는 다음 상태의 크로스토크의 예측에 중요하게 활용된다.

IV. 실험결과

4.1. 로봇 시스템

실험에 사용된 로봇은 초음파모듈 외에 비전센서, 전자식 마그네틱 컴퍼스(electronic magnetic compass)센서, 엔코더센서, 충돌감지센서가 장착되었다. 초음파센서는 폴라로이드 6500계열인 Ranging Module를 사용하였고 로봇을 중심으로 360°물체를 인식하기 위해서 16개의 링 구조로 초음파모듈을 구성하였다. 16개의 링 구조로 된 초음파센서들은 서비스로봇을 중심으로 360°의 물체에 대한 2차원 정보를 획득할 수 있다.

각각의 초음파센서들은 22.5°의 간격을 두고 배치되어 있다. 그림 5는 로봇에 탑재된 초음파센서의 배치도를 나타낸다. 초음파센서에 매겨진 번호는 구동 순서를 나타낸다. 그림 6은 로봇에 탑재된 16개의 초음파센서를 나타낸다[10].

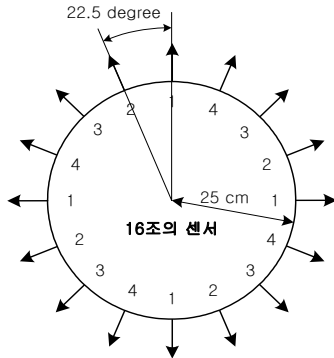


그림 5. 초음파센서 배치도
Fig. 5 The arrangement of ultrasonic sensor



그림 6. 로봇에 장착된 16-초음파센서
Fig. 6 16-ultrasonic sensor equipped on the robot

4.2. 계획송신(Scheduling firing)

초음파센서의 구동은 그림 5에 나타난 순서에 따라 센서를 4개씩 묶어 동시에 구동한다. 그러므로 센서 1번부터 센서 4번까지 구동하면 로봇에 장착된 전체 초음파센서의 데이터를 읽을 수 있다. 그에 따른 초음파 구동 스케줄을 그림 3의 타이밍도를 기반으로 표 1에 나타내었다.

표 1에서 a와 b는 초음파센서가 음파를 송신하기 전에 각각 다른 값의 시간지연을 주는 것으로 사용자가 임의로 주면 되고, 주의할 점은 일정한 패턴으로 값을 주어야 크로스토크에 의해 나타나는 노이즈가 일정 패턴으로 발생한다는 것이다. 그에 따라 크로스토크를 미리 예측할 수 있다. T_{echo} 는 초음파센서가 받아들이는 거리값

의 최대 거리를 제한할 수 있으며, 여기에서는 $T_{echo} = 20[ms]$ 를 주었으며, 그에 따른 최대 측정 거리 H_{max} 는

$$H_{max} = \frac{t}{2} u, \quad u[m/s]=331.5+0.6t$$

$$= \frac{(331.5+(0.6 \times 18))[m/s] \times 20 \times 10^{-3}[s]}{2} = 3.423[m] \quad (4)$$

이다. T_{echo} 를 크게 함으로서 초음파센서는 크로스토크에 많이 노출되도록 하였고 최소 측정거리는 초음파센서의 하드웨어적인 제약에 의해 $H_{min} = 50[cm]$ 로 제한하였다. 이후 더욱 빠른 초음파 데이터 획득이나, 단거리 데이터가 필요할 경우에는 T_{echo} 의 값을 줄임으로서 가능하다.

4.3. 실험환경설정

실험을 위하여 벽은 반사가 잘되는 반사판을 사용하여, 그림 7(a)와 같이 크로스토크가 잘 발생될 수 있는 실험환경을 구성하였다. 그림 7(b)는 실내복도에서 5mm 두께의 아크릴을 사용하여 만든 로봇을 배치한 실험환경이다.

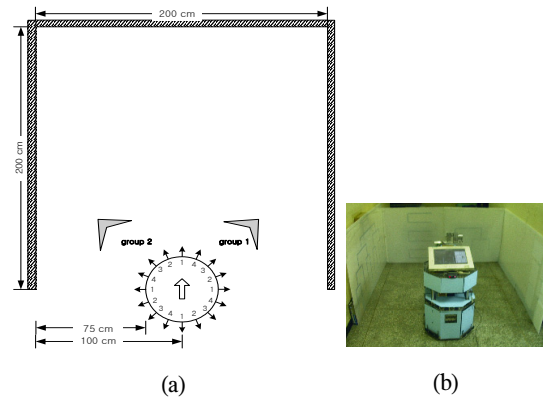


그림 7. 크로스토크를 고려한 실험환경
Fig. 7 Experimental set-up in crosstalk -promoting environment

크로스토크의 영향을 알아보기 위하여 그림 7(a)에 표시된 센서 그룹 1과 센서 그룹 2의 8개의 센서를 사용하여 실험하였다. 각 센서는 22.5°간격이며, 센서 그룹 1

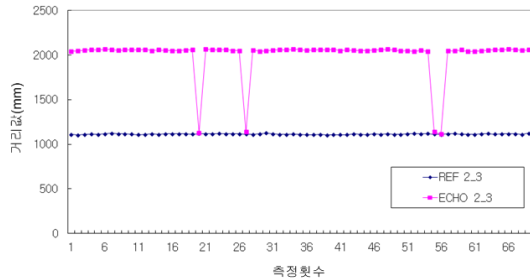
은 각각 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ 를 그룹 2는 $90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ$ 에서 벽과의 거리값을 읽을 수 있다.

표 1. 초음파 구동 계획표
Table. 1 Modified Firing Schedule

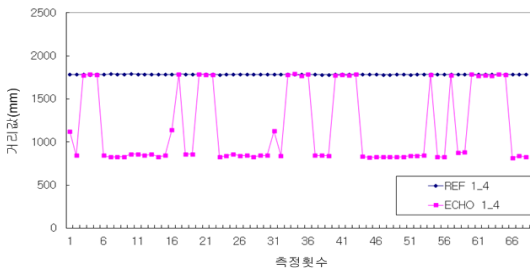
Sonar	1	2	3	4
a[ms]	2.5	5	1.25	6.25
b[ms]	5	2.5	6.25	1.25
$T_{echo,0}$ [ms]	20	20	20	20
$T_{echo,1}$ [ms]	20	20	20	20
$T_{echo,2}$ [ms]	20	20	20	20
$T_{echo,3}$ [ms]	20	20	20	20

4.4. 실험결과

크로스토크가 발생하는 환경에서 기존의 방법과의 성능 비교를 위한 표준 거리값을 측정하였다. 표준 거리값은 반사파의 영향을 고려하여 각 센서마다 250ms 주기로 150회 측정하여 사용하였다. 그림 8과 그림 9에 사용된 “REF”와 “ECHO”는 각각 표준 거리값과 측정거리값을 나타낸다.



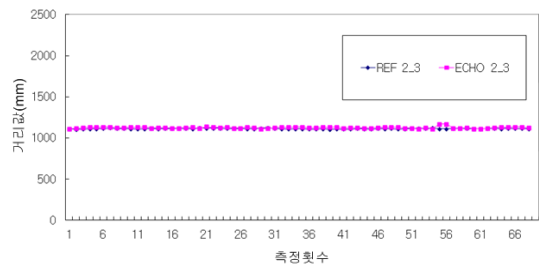
(a)



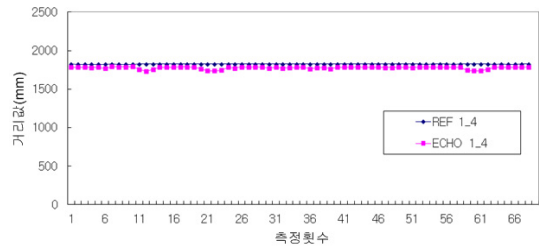
(b)

그림 8. 크로스토크에 의한 오차발생 거리값
Fig. 8 Distance error by crosstalk

실험 결과 일부 센서에서 크로스토크가 발생하는데 센서 그룹 1의 2번 센서 구동 후에 센서 그룹 2의 3번 센서를 구동할 경우와 센서 그룹 2의 3번 센서 구동 후 센서 그룹 1의 4번 센서를 구동하는 경우이다. 그림 8(a)는 그룹 1의 2번 센서의 구동 후 센서 그룹 2의 3번 센서를 구동할 경우에 그룹 2의 3번 센서에 에러 데이터가 연속적으로 나타남을 보여주고 있다. 그림 8(b)는 센서 그룹 2의 3번 센서 구동 후 센서 그룹 1의 4번 센서를 구동할 경우에 나타나는 에러를 나타내었다.



(a)



(b)

그림 9. 알고리즘에 의해 보정된 거리값
Fig. 9 Sensor values calibrated by proposed algorithm

그림 9(a)와 그림 9(b)에 크로스토크에 의해 나타나는 에러를 보정한 결과를 나타내었다. 결과적으로 다중 반사가 심한 환경에서 크로스토크를 식별 및 제거하고 거의 정확한 자신의 반사파를 수신할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 초음파 발신 및 수신에서 발생하는 크로스토크를 줄일 수 있는 새로운 초음파 계획순신 (scheduled firing)을 제한하였다. 초음파 누적 거리값에

의한 현재 거리값을 예측하는 알고리즘을 제시하였다. 그리고 크로스토크에 의한 거리값을 활용하여 다음 수신상태에서 발생할 크로스토크의 거리값을 예측함으로써 크로스토크에 대해 효율적으로 대처할 수 있었다. 결과적으로 크로스토크에 의한 불확실한 초음파 데이터를 보다 신뢰성을 갖도록 하였으며, 기존의 방법에서는 크로스토크를 피하기 위해 초음파 데이터 획득 방법을 중시하였으나 본 연구결과에서 제시된 계획송신 방법과 크로스토크 제거 알고리즘을 적용하여 데이터를 획득하는 속도면에서 3배 이상의 향상된 속도를 얻을 수 있었다. 본 연구의 결과를 응용하여 동일 주파수를 사용하는 2대 이상 로봇이 공존하는 작업환경이나 연마로봇과 같은 소음이 많은 환경에 적용하여 송수신의 오류없이 센서구동이 가능할 수 있도록 추가적인 실험이 필요하다고 생각된다.

참고문헌

[1] L. Kleeman and R. Kuc, "An optimal sonar array for target localization and classification," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3130-3135, May, 1994.

[2] T. Schlegl, T. Bretterklieber, M. Neumayer, H. Zangl, "Combined Capacitive and Ultrasonic Distance Measurement for Automotive Applications," *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 99, pp. 1, 2011.

[3] S. Shoval and J. Borenstein, "Using coded signals to benefit from ultrasonic sensor crosstalk in mobile robot obstacle avoidance," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2879-2884, May, 2001.

[4] J. Borenstein and Y. Koren, "Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robots Obstacle Avoidance," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 11, no. 1, pp. 132-138, Feb, 1995.

[5] K. W. Jorg and M. Berg, "Mobile robot sonar sensing with pseudo-random codes," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 2807-2812, May, 1998.

[6] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini, and A. Taroni, "Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, no. 1, pp. 193-97, Feb, 1992.

[7] R. T. Higuti and J. C Adamowski, "Ultrasonic densitometer using a multiple reflection technique," *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1260-1268, Sept, 2002.

[8] C. C. Tong, J. F. Figueroa, and E. Barbieri, E, "A method for short or long range time-of -flight measurements using phase-detection with an analog circuit," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 5, pp. 1324-1328, Oct, 2001.

[9] 박수민, 강웅기, 진태석, 이장명, "다목적용 자율이동 로봇설계 및 구현," *대한기계학회부산지부*, pp. 188-193, 2002.

[10] N.S.C. Ingaroca, J.M.M. Villanueva, S.Y.C. Catunda, J.L.G. Santiago, C.E.T.Vargas, "Multilayer measuring system and uncertainty analysis using ultrasonic sensors with wavelet transform" *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2011 IEEE, pp. 1-6, 2011.

저자소개

진태석(Tae-Seok Jin)

한국정보통신학회 논문지
제11권 제11호 참조