다중 코드 초음파와 전파 신호 강도를 이용한 거리 측정

A Distance Estimation Algorithm Based on Multi-Code Ultrasonic Sensor and Received Signal Strength

조 봉 수, 김 필 수, 문 우 성, 백 광 렬*

(Bong-Su Cho¹, Phil Soo Kim², Woo-sung Moon¹, and Kwang Ryul Baek¹)

¹Pusan National University

²LG Electronics

Abstract: This paper reveals a distance estimation algorithm based on multi-code ultrasonic and wireless sensor network. For measuring the distances among the sensor nodes, each ultrasonic transmitter transmits multi-code ultrasonic signal simultaneously. Receivers use cross correlation method to separate the coded signals. The information of measured distances is broadcasted to each sensor node by wireless sensor network. The wireless sensor network measures the distance among the sensor nodes using the received signal strength of the broadcasting. The multi-code ultrasonic have a limitation of measurable distance. And the received signal strength is affected from an environment. This paper measures a distance using ultrasonic and a received signal strength in short range. These measured data are applied to the least square estimation algorithm. By the expansion of the fitting curve, a distance measurement in long range using the received signal strength is compensated. The coupled system reduce the error to an acceptable level.

Keywords: ultrasonic, multi-code, CCF, RSS, distance estimation

1. 서론

최근 공장자동화 및 홈 유비쿼터스 산업이 발달함에 따라 모바일 로봇(mobile robot)의 무인 주행 연구가 많이 이루어지고 있다. 모바일 로봇이 무인 주행을 하기 위해서 우선적으로 현재 모바일 로봇의 위치와 자세를 인식해야 한다. 특히 건물이나 공장 등 고정된 공간에서의 위치 정보 시스템은 여러 센서들을 이용하여 상호 상태를 인식하여 계산된다. 이러한 위치 정보 시스템은 모바일 로봇 시스템과 결합되어 다양한 분야에서 연구가 활발히 진행 중이다.

일반적으로 모바일 로봇의 위치 인식을 위하여 GPS (Global Positioning System), 초음파, 적외선, RFID (Radio Frequency Identification) 센서, 레이저, 스테레오 카메라 (stereo camera) 등을 센서를 사용하여 거리를 측정한다. 삼각법(triangulation)과 핑거프린팅(fingerprinting) 방식으로 위치를 결정한다[1]. 거리 측정 방법은 전파 수신 강도(RSS: Received Signal Strength), 신호의 비행시간(TOF: Time of Flight), 신호의 비행시간차이(TDOF: Time Difference of Flight), 신호의 수신각도(AOA: Angle of Arrival)등 방법을 사용한다[1-5].

건물이나 공장 등 실내에서 GPS는 신호가 미치지 못하여 사용을 할 수가 없고, 적외선, RFID 센서 시스템, 레이저, 스테레오 카메라 등은 추가적인 구조물이 필요하고 센

서 노드가 이 구조물을 벗어났을 경우 거리를 측정 할 수 없는 문제가 있다. 전파 신호 강도를 이용한 거리측정은 먼 거리 측정이 가능하지만, 전파 경로에 따른 손실이 발생하여 거리오차가 크게 나타난다. 또한 이 손실은 주변 환경에 많은 영향을 받기 때문에 일반화된 모델 적용이 어렵다 [6,7]. 초음파를 이용한 거리 측정은 먼 거리 측정이 불가능하며, 초음파 신호의 간섭으로 정밀한 거리 측정이 어렵고 멀티 로봇인 경우 순차적으로 거리를 측정해야 한다. 또한 송수신부가 시간적으로 동기를 맞추어야 하고, 측정된 거리 정보 등을 서로 교환하기 위한 무선 통신 네트워크가 필요하다[3].

본 논문에서는 실내 환경에서 다수의 로봇이 무인 주행을 할 경우, 각 로봇의 거리 측정에 관한 방법을 제시한다. 먼저 초음파를 이용하여 거리를 측정을 한다. 초음파 신호의 간섭과 순차적 송신 문제를 해결하기 위해 다중 코드를 적용한 초음파 송수신 시스템을 적용하였고, 초음파 송수신 동기 및 정보교환을 위해 Zigbee 네트워크를 사용하였다. 이 때 Zigbee 네트워크에서 측정되는 전파 신호 강도를 이용하여 거리를 측정한다. 이는 온도, 습도, 압력, 센서 노드 사이의 지형, 지물 등 주변 환경에 영향을 많이 받아 전파 손실이 발생하여 큰 측정 거리오차를 나타낸다. 하지만 다중 초음파 송수신 시스템 보다 넓은 범위까지 거리 측정이 가능하다. 따라서 초음파에서 측정된 거리정보와 전파 수신 강도로 측정된 거리 정보를 최소자승법(least square estimation algorithm)을 이용하여 측정거리를 보상한다. 즉 근거리에서는 초음파를 이용하여 거리를 측정하고 이 때 전파 수신 강도를 측정한다. 이 측정된 데이터를 최소자승

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 9. 15., 수정: 2010. 12. 29., 채택확정: 2011. 1. 3.

조봉수, 문우성, 백광렬: 부산대학교 전자과

(mscho97@pusan.ac.kr/crenmoon@pusan.ac.kr/krbaek@pusan.ac.kr)

김필수: LG 전자(philsoo.kim@lge.com)

법을 이용하여 원거리까지 확장된 전파 수신 강도에 따른 추정된 거리 정보를 만든다. 만약 초음파가 수신되지 않는 거리에서는 전파 수신 강도와 최소자승법으로 추정된 정보를 이용하여 거리를 추정한다.

본 논문에서 제안한 거리 측정 방법은 초음파 신호의 간섭 문제는 다중코드를 사용하여 해결하였고, 초음파가 측정이 불가능한 거리는 전파 신호 강도를 이용하여 거리측정을 하였다. 또한 전파 신호 강도가 주변 환경에 많은 영향을 받는 문제를 초음파와 결합하여 최소자승법을 적용하여 해결하였다. 또한 동작환경에 추가적인 시설이 필요없기 때문에 건물이나 공장 등 실내 환경에서 시간과 비용을 절감할 수 있다.

II. 다중 코드 초음파 거리 측정

1. 초음파를 이용한 거리 측정

초음파 센서를 이용한 거리측정은 초음파의 전달 속도와 초음파의 이동시간의 곱으로 측정한다. 초음파의 이동시간은 그림 1과 같이 TOF라 하며 초음파 신호가 전송된 시간(T_f)부터 수신된 시간(T_r)까지의 시간차이로 정의한다. 초음파의 전달 속도는 환경 조건에 영향을 받지만[8,9], 본 논문에서는 초음파의 속도를 343m/s로 가정하였다.

$$TOF = T_r - T_f \quad (1)$$

$$c \cong 331.4 \sqrt{T/273} = 343m/s \quad (2)$$

$$d = c \times TOF \quad (3)$$

초음파 신호에서 TOF를 구하기 위해서는 모든 송신부와 수신부가 동기가 맞아야 한다. 본 논문에서는 각 초음파 센서부의 송수신 동기를 위해 Zigbee 센서를 사용하였다.

2. 다중 코드 초음파 신호 처리

초음파 센서를 이용한 거리 측정의 정확성은 TOF의 측정에 의해 결정된다. 초음파 수신 신호에서 수신 시간의 검출 방법은 일반적으로 문턱값(threshold), 곡선 적합(curve fitting), 창문 이동(sliding window), 최적 상관(optimum correlation detection) 방법을 이용한다[8,9]. 문턱값을 이용한 방법은 간단하게 TOF를 측정할 수 있지만 잡음에 약하며 신호가 중첩이 되는 경우 TOF를 구하기 어렵다. 곡선 적합

그림 1. 초음파 펄스의 동기화.

Fig. 1. Synchronization of ultrasonic pulse.

의 경우는 초음파 신호가 중첩이 되는 경우 TOF 검출에 문제가 있다. 창문 이동 방법은 복잡한 연산이 필요하다는 단점이 있지만 앞선 방법보다 정밀한 TOF가 측정이 가능하다. 최적 상관 방법은 여러 신호들이 중첩된 신호에서도 개별 신호들을 추출할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 각 초음파의 송신부에 서로 다른 코드를 할당하고 여러 개의 송신부에서 동시에 할당된 코드의 초음파 신호를 송신한다. 그러므로 수신부에서 수신된 초음파는 여러 코드가 실린 초음파가 중첩된 형태의 초음파 신호가 측정된다. 따라서 창문이동 방법을 이용하여 중첩된 초음파 신호를 검출하고 이진화를 시킨다. 이렇게 이진화된 코드들은 상호 상관 함수(CCF: Cross Correlation Function) 연산을 통하여 개별 코드들로 분리 한다[3].

본 논문에서는 노이즈 영향을 적게 받도록 고안된 PN (Pseudo-random Noise) code를 사용하였다. 그리고 다음 기준에 따라 3개의 8 bit PN code를 선정하였다[3].

- 시작 비트가 '1' 이며 '1'의 개수가 4개인 코드
- 자기상관함수(ACF: Auto Correlation Function)의 최댓값과 두 번째 높은 값의 차이가 크고, 두 번째 높은 값이 나타나는 개수가 작은 코드
- 상호상관함수의 최댓값과 자기상관함수의 최댓값의 차이가 큰 코드

선정 기준에 따라 선정된 코드는 다음과 같으며, 각 코드의 자기상관함수와 상호상관함수는 그림 2와 같다.

Code 1: 1 1 0 0 1 0 1 0

Code 2: 1 0 1 1 0 0 0 1

Code 3: 1 0 1 0 0 1 1 0

창문 이동 방법은 1차 문턱 연산, 윈도우 연산, 2차 문턱 연산으로 이루어진다. 중첩된 초음파 신호를 1차 문턱 값 N과 비교하여 초음파가 수신 된 시점들을 추출하고, 창문 연산을 통해 1차 문턱 값을 넘는 샘플의 개수를 계산한다. 이렇게 구해진 각 샘플들의 개수는 2차 문턱 값 M 값과 비교하여 M개수 이상의 값이 1차 문턱을 넘었다고 판단되

그림 2. 선정된 코드의 CCF 및 ACF.

Fig. 2. CCF and ACF of selected codes.

그림 3. 다중 코드 초음파 신호 처리 과정.

Fig. 3. Signal processing of multi-coded ultrasonic signal.

는 점을 '1'로 인식하여 이진화를 한다.

창문 이동 방법 연산에서 1차 문턱 값, 창문의 크기, 2차 문턱 값은 시스템이 동작하는 환경, 측정 하고자 하는 최대 및 최소 거리 그리고 잡음의 정도 등에 따라 적절하게 설정해 줘야 한다. 1차 문턱 값이 크면 잡음에 강인하지만 정상적인 초음파 수신 신호를 잡음으로 처리하는 경우가 생긴다. 창문의 사이즈가 크면 잡음에 강인하지만 여러 잡음들의 중첩으로 만들어진 신호를 실제 초음파 수신 신호로 검출하는 경우가 발생한다. 또한 2차 문턱 값이 너무 낮으면 창문 이동방법 후 이진화된 결과에서 코드를 분리할 때 코드를 검출하지 못하는 경우가 발생한다.

창문 이동 방법을 통해 이진화된 초음파 신호는 상호 상관 함수 연산을 통하여 입력된 초음파 신호로부터 각각의 코드를 분리한다. 이때 해당 코드의 신호가 가장 먼저 입력된 시점을 TOF로 정의한다. 그림 3은 수신부에서 중첩된 초음파 신호를 창문 이동 방법과 상호 상관 함수를 이용하여 초음파 신호를 분리하는 과정이다.

III. 전파 신호 강도를 이용한 거리 측정

전파 신호 강도를 이용한 거리 측정은 수신 노드에서 수신 된 신호 세기를 측정하여 신호의 경로 손실을 이동한 거리와 연결시키는 방식이다. Friis의 공식에 의하면 환경 변수(λ)를 포함한 신호의 경로 손실(L)과 거리(d)와의 관계는 다음과 같다[10].

$$L = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ (dBm)} \quad (4)$$

$$L = A \log_{10}(d) + B \text{ (dBm)} \quad (5)$$

여기서 A와 B는 상수로서 시스템이 사용되는 환경 및 사

그림 4. RSS를 이용한 거리 측정 방법.

Fig. 4. Ranging method using RSS.

용 주파수 대역에 따라 결정된다.

전파 신호 강도를 이용한 거리 측정의 정확성은 신호강도 측정의 정확성과 이동 장치가 있는 환경에 따라 달라진다. 즉 온도, 습도, 기압, 센서 노드에 설치된 안테나의 방향성, 센서 노드들 사이에 존재하는 물체 등이 신호의 경로 손실에 커다란 영향에 준다. 따라서 측정된 신호강도 값이 항상 안정적이지 않다[6,7]. 전파 신호 강도를 이용한 거리 측정은 상대적으로 낮은 거리 추정 정확성 및 안정성을 제공하지만 장치의 구조가 간단하고 기존의 근거리 무선 통신 기술들이 신호강도 정보를 이용할 수 있는 구조를 취하고 있기 때문에 관련된 분야에서 광범위하게 사용되고 있다.

1. 전파 수신 강도에 영향을 주는 경로 손실

Friis의 공식에서 전파가 전달될 때 신호는 전파 경로에 따른 손실이 발생한다. 이러한 경로 손실(pathloss)은 평균 수신 강도(average received signal power)가 거리에 따라 감소하는 것을 의미한다. 하지만 같은 거리에 존재하는 수신기와 송신기 사이에서도 환경에 따라 서로 다른 전파 특성을 가지고 전파 수신 신호강도를 이용한 거리 측정의 경우 이러한 환경에 따른 전파 신호의 감소도 고려해야한다.

센서 노드간의 거리 측정 환경을 고려할 때 센서 노드의 거리에 따른 감쇠 이외에 센서노드 사이의 지형, 지물에 의한 감쇠도 고려해야한다. 이러한 지형, 지물에 의한 감쇠를 Shadowing이라고 한다. 일반적으로 Shadowing에 대한 감쇠는 가우시안 랜덤 변수의 형태로 나타나기 때문에 log normal Shadowing pathloss 모델이라고 한다[11].

$$PL(d) \propto \left(\frac{d}{d_0} \right)^n, PL(d)(dB) = PL(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (6)$$

여기서 $PL(d)$: 거리 d 의 경로 손실

d_0 : 기준 거리 ($d_0 < d$)

n : 전파 경로 손실 계수

전파 경로 손실 계수(n)는 주위 환경에 따라서 변화하는 값이며 표 1은 주위 환경에 따른 전파 경로 손실 계수의 값을 나타낸다.

본 논문에서 다수의 로봇이 무인 주행을 하는 경우를 실험을 하였으므로 구성된 센서 노드들은 지상에서 1미터 거

그림 5. 전파가 전송될 때 발생하는 손실.

Fig. 5. Loss of propagation.

표 1. 환경에 따른 전파 손실 계수.

Table 1. Pathloss coefficients by loss of propagation.

전파 전송 환경	경로 손실 계수 η
Free space	2
Urban area	2.7 ~ 3.5
In building line-of-sight	1.6 ~ 1.8
Obstructed in building	4 ~ 6
Obstructed in factories	2 ~ 3

리 이내에 안테나가 존재한다. 이 경우 온도, 습도, 기압 등의 영향을 받아 신호를 반사하여 신호의 감소를 발생시키는 near-earth radio frequency propagation loss factor(n)가 존재한다[12].

$$n = 77.6 \times 10^{-6} \left(\frac{P}{T} \right) - 5.6 \times 10^{-8} (\rho) + 1.7305 \times 10^{-3} \left(\frac{\rho}{T} \right) + 1 \quad (7)$$

여기서 T : temperature (Kelvin)

P : localized atmospheric pressure (mb)

ρ : water vapor concentration (g/cm^3)

2. 전파 수신 강도를 이용한 거리 측정 방법

전파 수신 강도는 주위 환경에 따라 변화가 심하다. 비록 전파 수신 강도에 영향을 주는 요소들과 관련된 식을 알고 있지만 모든 요소들을 고려하여 신호 강도를 측정하기 어렵다. 따라서 전파 신호 강도를 이용한 거리 측정은 확률적인 개념을 도입한 Maximum likelihood Estimation과 경험적인 측정을 기반으로 최소자승법을 이용한 곡선 적합 등의 방법을 많이 사용한다. 본 논문에서는 전파 신호 강도를 1차 함수로 모델링하여 사용하며 초음파와 결합하기 위하여 최소자승법 이용한 곡선 적합 방법을 사용하였다.

임의의 직선 $y = ax + b$ 대하여 n 개의 실험 값 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 에 존재 할 경우 n 개의 편차 $d_1, d_2, \dots, d_n$ (d =데이터 값과 직선 값과의 차)을 얻을 수 있다. n 개의 데이터 점이 지나는 최적의 직선은 편차의 제곱의 합이 최소가 되는 직선이 된다. 이를 최소자승법을 이용하여 정리하면 아래와 같다[13].

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (8)$$

그림 6. 최소자승법 개념도.

Fig. 6. The concept of least square estimation.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9)$$

(8), (9)를 log normal Shadowing pathloss model과 비교해 보면 추세선의 기울기에 해당하는 a 의 값은 환경에 따라 변화하는 환경 상수에 해당하고, 상수항인 b 는 기준 거리에 서의 신호강도가 된다.

IV. 전파 신호 강도의 보상

전파 수신 강도의 분포를 곡선 적합하기 위해 구현한 시스템의 전파 신호 강도를 확인하면 아래 그림과 같다. 이론적으로는 Friis의 식처럼 log의 형태를 가지면서 감소해야 한다. 그러나 외부 환경과 노이즈의 영향으로 거의 선형적으로 나타나는 것이 확인된다. 그러므로 본 논문에는 거리에 따른 전파 신호 강도의 분포를 직선의 방정식으로 가정하였다.

그림 7에서 보면 전파 신호 강도를 이용한 거리 측정은 주변 환경에 민감하게 반응을 하여 홀로 거리 측정을 하기 어렵다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 초음파를 이용하여 현재 전파 신호 강도에 대한 거리를 보상하였다. 먼저 근거리에서는 초음파를 이용하여 거리를 측정하고 이때 전파 수신 강도를 같이 측정한다. 이 측정된 전파 수신 강도 데이터를 최소자승법을 이용하여 원거리까지 확장된 전파 수신 강도에 따른 추정된 직선의 추세선을 만든다. 만약 초음파가 수신되지 않는 거리에서는 전파 수신 강도와 이 추정된 추세선을 이용하여 거리를 추정한다. 또한 초음파가 수신 가능한 거리에서는 초음파와 전파 수신 강도를 이용하여 계속적으로 최소자승법을 이용한 직선의 추세선

그림 7. 환경에 따른 시스템에서 전파 수신 강도의 변화.

Fig. 7. Received signal strength at system.

그림 8. 원거리에서의 측정 거리의 보상.

Fig. 8. Measuring distance compensation in long range.

을 업데이트하여, 현재 환경에 맞추어 전파 신호 강도 대 거리 곡선을 계속 추정을 한다.

V. 실험 및 결과

1. 시스템 구성

1.1 센서 노드의 외형 및 제어 시스템 구성

본 논문에서 제안한 거리 측정 방법을 모바일 로봇의 위치 인식에 응용하기 위하여 센서 노드의 기본 플랫폼은 모바일 로봇의 형태를 가진다. 센서 노드는 총 4개의 기관으로 구성된다. 가장 위의 기관은 초음파 수신 및 증폭 회로이고, 두 번째는 Zigbee 통신회로와 선제 노드간의 ID 구분을 위한 DIP 스위치로 구성된다. 세 번째는 TMS320F28335 프로세서를 이용한 제어 회로, 가장 아래 기관은 초음파 송신회로이다. 그림 9는 센서 노드의 전체 외형이다.

제어 시스템은 Texas Instrument社の TMS320F28335를 메인 프로세서로 사용하였다. TMS320F28335는 최대 300 MIPS로 동작하며 부동 소수점 연산 및 제어 알고리즘 처리 능력이 우수하다. 또한 16개의 ADC (Analog to Digital Converter)와 비동기 직렬 통신 등 다양한 주변 장치를 가지고 있어 추가적인 회로 구성없이 초음파의 송·수신과 Zigbee 통신 등의 기능을 수행한다.

1.2 초음파 센서 및 무선 네트워크 구성

초음파 센서는 AUDIOWELL社の AW8T40-120A00과 AW8R40-120A00을 사용하였다. 이 센서들은 40kHz로 동작하며 지향각 70°를 가진다. 초음파 수신 회로는 증폭을 한 후 정류 회로를 통해 정류된 초음파를 신호처리에 사용하였다. 초음파 송수신 센서는 각각 8개씩 45° 등간격으로 배

그림 9. 센서 노드의 전체 외형.

Fig. 9. Full view of the sensor node.

(a) Receive part.

(b) Transmit part.

그림 10. 센서 노드.

Fig. 10. Sensor node.

치되어 360° 전 방향으로 송수신이 가능하도록 구성하였다. 각 센서 노드간의 정보 교환을 위한 통신과 전파 강도를 이용한 거리 측정을 위한 무선 네트워크는 Zigbee를 사용하였다. Zigbee 모듈은 MaxStream社사 제품의 Xbee pro를 사용하였다. 실내 환경에서 100m, 실외에서 1.6km 정도의 통신 거리를 가지며 전파의 신호 강도를 측정하는 기능이 있다. 그림 10은 송·수신부 센서 노드이다.

2. 실험 결과

2.1 실험 환경

실험 환경은 커맨드 센서 노드 한 개와 거리 측정을 위한 두 개의 센서 노드를 사용하였다. 두 개의 센서 노드는 1m에서 10m까지 움직여 두 센서 노드간의 거리를 측정하였고, 측정된 데이터들은 순차적으로 커맨드 노드로 전송된다. 실험 과정을 통해 측정된 센서 노드의 거리 정보 데이터는 커맨드 센서 노드로부터 PC로 전송하여 MathWorks社の MATLAB v7.9를 통해 그래프로 표현하였다.

2.2 초음파를 이용한 거리 측정의 오차

초음파를 이용하여 측정된 거리는 신호 강도를 이용한 거리 측정의 기준 거리로 사용된다. 센서 노드를 1m에서 3m까지 50cm 간격으로 측정 위치에 놓고 각각 1024번씩 10회씩 측정하였다. 초음파로 측정된 거리와 실제 위치 사이의 거리 오차 분포를 통계하였다. 실험 과정에서 2개의 센서 노드가 서로 송수신한 2개의 거리 정보가 통계에 포함되었다. 그림 12는 측정된 거리 값의 오차 분포이다.

그림 11. 실험 환경.

Fig. 11. Environment of experiment.

그림 12. 초음파 거리 측정 오차.

Fig. 12. Error distribution of measuring distance using ultrasonic sensor.

그림 13. 다양한 환경에서의 전파 신호 강도.

Fig. 13. RSS of various environments.

2.3 전파 신호 강도 측정

전파 수신 강도는 주위 환경에 따라 다양하게 변한다. 본 논문에서 사용한 Zigbee 모듈의 특성과 실험 환경 변화에 따른 전파 수신 신호 강도의 분포를 알아보는 실험을 하였다. 측정 시간을 다르게 하여 1m에서 10m까지 총 50회의 전파 신호 강도를 측정하였다. 그림 13은 환경 변화에 따른 전파 수신 신호 강도의 변화의 결과이다. 전파의 수신 강도는 거리가 멀어짐에 따라서 불안정한 특성을 보인다. 붉은 색 직선은 수집된 데이터에 대한 전파 신호 강도를 최소자승법을 이용하여 곡선 적합을 한 결과이다.

2.4 초음파와 전파 신호 강도를 이용한 거리 측정

전파 신호 강도를 이용하여 거리를 측정하기 위해 1m, 2m, 3m의 거리에서 초음파로 거리를 측정하고 각각의 거리에서의 전파 신호 강도를 측정하였다. 이렇게 얻은 3개의 전파 신호 강도 정보를 이용하여 곡선 적합을 하였다. 또한 이 곡선 적합에 의한 거리 측정 결과 비교를 위해 3m에서 10m까지의 거리의 전파 강도 역시 측정하였다.

그림 14는 측정된 전파 신호강도와 곡선 적합 결과이다. 각 그래프에서 붉은 색 직선은 사전 실험에 의한 전체 데이터의 곡선 적합을 의미하며, 초록색 그래프는 본 논문에서

그림 14. 실험 결과.

Fig. 14. Experimental result.

서 제안한 알고리즘을 적용한 곡선 적합 한 직선이다. 마지막으로 파란색 직선은 1m에서 10m까지 전체적인 전파 신호강도의 곡선 적합을 나타낸다. 표 2, 3, 4, 5는 전파 신호 강도를 이용한 거리 측정의 오차이다. Aaptive system 은 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용한 시스템이며 Fixes

표 2. CASE I의 오차 분포.

Table 2. Error distribution of CASE I.

	case I			
	Adaptive system	Fixed system	Error of adaptive system	Error of Fixed system
1	0.951	-0.144	0.048	1.144
2	1.771	0.835	0.228	1.164
3	3.607	3.029	-0.607	-0.029
4	3.675	3.111	0.324	0.888
5	5.472	5.258	-0.472	-0.258
6	6.411	6.381	-0.411	-0.381
7	7.563	7.757	-0.563	-0.757
8	8.545	8.931	-0.545	-0.931
9	11.617	12.601	-2.617	-3.601
10	10.641	11.435	-0.641	-1.435
Ave			-0.5256	-0.4196

표 3. CASE II의 오차 분포.

Table 3. Error distribution of CASE II.

	case II			
	Adaptive system	Fixed system	Error of adaptive system	Error of Fixed system
1	1.323	3.290	-0.323	-2.290
2	1.660	3.651	0.339	-1.651
3	2.711	4.779	0.288	-1.779
4	4.310	6.493	-0.3101	-2.493
5	4.541	6.741	0.458	-1.741
6	5.489	7.758	0.510	-1.758
7	6.809	9.174	0.190	-2.174
8	8.036	10.490	-0.036	-2.490
9	9.298	11.843	-0.298	-2.843
10	11.043	13.715	-1.043	-3.715
Ave			-0.02251	-2.2934

표 4. CASE III의 오차 분포.

Table 4. Error distribution of CASE III.

	case III			
	Adaptive system	Fixed system	Error of adaptive system	Error of Fixed system
1	0.589	-0.431	0.410	1.431
2	2.466	1.620	-0.466	0.379
3	3.312	2.545	-0.312	0.454
4	3.644	2.908	0.355	1.091
5	4.676	4.036	0.323	0.963
6	6.037	5.524	-0.037	0.475
7	6.456	5.981	0.543	1.018
8	7.401	7.015	0.598	0.984
9	8.763	8.502	0.236	0.497
10	9.775	9.609	0.224	0.390
Ave			0.1874	0.7682

표 5. CASE IV의 오차 분포.

Table 5. Error distribution of CASE IV.

	case IV			
	Adaptive system	Fixed system	Error of adaptive system	Error of Fixed system
1	0.675	0.301	0.325	0.698
2	2.513	1.802	-0.513	0.197
3	2.954	2.162	0.0455	0.837
4	3.866	2.907	0.133	1.092
5	5.176	3.976	-0.176	1.023
6	5.707	4.409	0.292	1.590
7	6.603	5.140	0.396	1.859
8	7.074	5.525	0.925	2.474
9	8.898	7.014	0.101	1.985
10	12.781	10.184	-2.781	-0.184
Ave			-0.12525	1.1571

표 6. 전체 측정 데이터의 오차 분포.

Table 6. Error distribution of total measuring data.

	1	2	3	4	5	
Fixed	1.507	1.032	1.009	1.532	1.126	
adaptive	0.308	0.402	0.371	0.297	0.377	
	6	7	8	9	10	Ave.
Fixed	1.224	1.564	1.881	2.512	2.003	1.539
adaptive	0.359	0.449	0.615	1.414	1.523	0.612

system 은 전파 신호 강도만을 이용한 시스템이다. 표 6은 50개의 측정 결과에 대해 각 거리별 오차이다. 결과를 확인 하면 제안된 시스템은 전파 신호 강도만을 이용한 시스템 보다 60% 이상의 성능 개선을 보였다.

VI. 결론

본 논문에서는 실내 환경에서 다수의 로봇이 무인 주행을 할 경우, 다중 코드 초음파 센서와 신호의 전파 강도를 이용하여 센서 노드간의 거리를 구하는 시스템을 구현하였다. 초음파를 이용한 거리 측정은 먼 거리 측정이 불가능하며, 초음파 신호의 간섭으로 정밀한 거리 측정이 어렵고, 송신 초음파가 다수일 경우 순차적으로 초음파를 송신해야 한다. 전파 신호 강도를 이용한 거리측정은 넓은 범위까지 거리를 측정 할 수 있지만 주변 환경에 영향을 많이 받아 정밀도가 많이 떨어진다.

제안된 시스템은 다중 코드 초음파 신호를 이용하여 1~3m 이내의 비교적 근거리의 거리를 측정하였다. 다중 코드 초음파 시스템을 이용하여, 초음파 신호의 중첩으로 인하여 발생하는 낮은 정밀도, 순차적 초음파 송신 문제를 해결하였다. 그리고 전파 신호 강도는 log 형태로 감소 하지만, 외부 환경과 노이즈의 영향으로 거의 선형적으로 나타나는 것을 이용하여 전파 신호 강도의 분포를 직선으로 가정을 하였다. 근거리에서는 초음파를 이용하여 거리를 측정하고, 이 때 전파 수신 강도를 동시에 측정하였다. 이 측정된 데이터를 최소자승법을 이용하여 원거리까지 확장된 전파 수신 강도에 따른 추정된 거리 정보를 만들었다. 따라서 전파 신호 강도가 주변 환경에 영향을 받는 문제를 초음파

와 결합하여 최소화하였다.

본 논문에서 센서 노드의 위치가 아닌 센서 노드간의 거리 측정을 하였다. 여러 개의 센서 노드가 존재할 경우 각 센서 노드들의 위치를 찾는 실험과 연구가 필요할 것이다. 또한 제안된 시스템을 군집 로봇 시스템과 같이 여러 개의 움직이는 물체에 적용한다면 시스템이 동작하는 환경 변화에 강인한 위치 인식을 할 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

- [1] S. Tadakamadla, "Indoor local positioning system for ZigBee, based on RSSI," *M.Sc Thesis within Electrical Engineering D, Electronics Design Programme*, Mid Sweden University
- [2] J. Graefenstein, M. E. Bouzouraa, and R. B. GmbH "Robust method for outdoor localization of a mobile robot using received signal strength in low power wireless networks," *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, CA, USA, May. 2008
- [3] B. S. Cho, S. B. Cho, S. O. Yang, and K. R. Baek, "Implementation of th ultrasonic local positioning system using dual frequencies and codes," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 14, no. 7, pp. 647-655, July 2008.
- [4] A. Catovic and Z. Sahinoglu, "The cramer-rao bounds of hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS location estimation schemes," *IEEE Comm. Letters*, vol. 8, no. 10, pp. 626-628, Oct. 2004.
- [5] A. Catovic and Z. Sahinoglu, "Hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS location estimation schemes for short-range wireless networks," *Mitsubishi Electric*, TR2004-096, Dec. 2004.
- [6] S. Yang and H. Cha, "An Empirical study of antenna characteristics toward RF-based Localization for IEEE 802.15.4 sensor nodes," *Lecture Notes In Computer Science*, 2007.
- [7] H. Cho, M. Kang, J. Park, B. Park, and H. Kim, "Performance analysis of location estimation algorithm in ZigBee networks using received signal strength," *Proc. of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, vol. 2, pp. 302-306, 2007.
- [8] B. Barshan and B. Ayrulu, "Performance comparison of four time-of-flight estimation methods for sonar signals," *IEEE Electronics Letter*, vol. 34, no. 16, pp. 1616-1617, Aug. 1998.
- [9] J. V. DiFranco and W. L. Rubin, *Radar Detection*, U.S.A., Scitech Publishing, INC., 2004.
- [10] I. A. Getting, "The global positioning system," *IEEE Spectrum*, pp. 36-47, Dec. 1993.
- [11] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge

University press, 2005.

- [12] R. A. Wert and A. K. Goroch "Near-earth radio frequency propagation," U.S. Naval Research Laboratory,

Electronics and Electromagnetics, pp. 153-155, 2007.

- [13] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, Inc., pp. 231-311, 2002.

조 봉 수

제어·자동화·시스템공학 논문지 제13권 제1호 참조.

문 우 성

제어·로봇·시스템학회 논문지 제16권 제3호 참조.

김 필 수

2007년 부산대학교 전자과 졸업. 2010년 부산대학교 전자과 석사. 현재 LG 전자 CTO Multimedia Lab. 근무. 관심 분야는 실내 위치 인식 및 로봇틱스 제어.

백 광 렬

제어·자동화·시스템공학 논문지 제5권 제1호 참조.