

이동로봇의 위치측정을 위한 개선된 초음파 위성 시스템

Improved Ultrasonic Satellite System for the Localization of Mobile Robots

김수용, 윤강섭*

(Su Yong Kim¹ and Kang Sup Yoon²)

¹Hyundai MOBIS

²Daegu University

Abstract: The localization of mobile robot in environment is a major concern in mobile robot navigation. So, many kinds of localization techniques have been researched for several years. Among them, the positioning system using ultrasound has received attention. Most of these ultrasonic positioning systems to synchronize the transmitters and receivers are used for RF (Radio Frequencies). However, due to the use of RF, the interference problems can not be avoided and the performance of radio frequencies directly affects the positioning performance. So we proposed the ultrasonic positioning system without synchronizing RF. The proposed system is based on existing USAT (Ultrasonic Satellite System) adopted infrastructure transmitting type, and consists of transmitter and receiver synchronizing modules instead of the radio frequency transmitters and receiver. The ultrasonic transmitters and receivers are synchronized individually by the transmitter and receiver synchronizing modules. In order to calculate the bias between the transmitter and receiver synchronizing modules, new positioning algorithm similar to GPS was proposed. The positioning performance of the improved USAT without synchronizing RF and the validity of the proposed positioning algorithm are verified and evaluated by experiments.

Keywords: localization, mobile robots, ultrasonic positioning system, ultrasonic satellite system, radio frequency

I. 서론

이동 로봇의 기술 분야는 크게 운동메커니즘 기술, 인식 기술, 지능제어 기술 등으로 분류할 수 있다. 특히 로봇이 실내에서 자율적으로 주행 및 보행을 하기 위해서는 각종 센서들을 통한 장애물의 위치 검출을 통한 지도 작성 및 자기위치 인식 기술들이 기본이 되어야 한다.

최근 실내에서 이동 로봇의 절대위치 측정을 위하여 가격이 저렴하고 다루기 쉬우며 소모 전력이 적고 신호처리 장치가 비교적 간단하고 정밀한 측정이 가능하다는 장점을 지닌 초음파 센서를 이용한 절대위치 측정용 시스템이 활발히 연구되고 있다[1-14].

초음파를 이용한 절대위치 측정시스템에는 초음파 송신기와 수신기의 위치에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다[1]. 첫 번째는 송신기가 기준지점에 위치하고 수신기가 측정대상물에 위치하는 기반시설송신방식(infrastructure transmitting type)으로, MIT의 Cricket [2]와 Tsai의 Localization System [3], 이수영 등이 제안한 전역 초음파 센서 시스템(global ultrasonic sensor system) [4], 고상일 등이 제안한 Indoor Mobile Localization System [5], 이동활 등이 제안한 초음파 위성 시스템(USAT: Ultrasonic Satellite System) [6,7] 등이

있다. 두 번째는 송신기가 측정대상물에 위치하고 수신기가 기준 지점에 위치하는 기반시설수신방식(infrastructure receiving type)으로, Active Badge [8,9], Active Bat [10,11]은 사람의 위치추적에 적용되었으며, Martin 등이 제안한 Ultrasonic 3D Position Measurement System [12], Mahajan 등이 제안한 3D Position Sensing System using Ultrasonics [13]은 로봇 위치인식에 적용되었다.

그림 1과 같은 구조를 가지는 기반시설송신방식은 위치 정보를 이동체에서 계산하게 되므로 이동로봇의 자기 위치 인식 문제에 유용하며, 장단점은 초음파 송신기의 구동 방식에 따라 달라진다. 우선 초음파 송수신기에 각각 RF (Radio Frequency) 송수신기를 부착하여 이동체에서 RF 신호로 이용하여 초음파 송신기의 구동을 제어하는 방식[2-4]은 위치인식이 필요한 시점에만 초음파를 송신하는 장점이 있지만, RF 신호의 혼선으로 인하여 여러 이동체의 위치 인식에는 문제가 발생할 수 있다. 다음으로 초음파 송신기에 RF 송신기를 초음파 수신기에는 RF 수신기를 부착하여 기반시설에서 초음파 신호와 RF 동기신호를 반복 송출하는 방식[7]은 초음파 신호를 계속 송신하는 단점이 있지만, GPS (Global Positioning System)처럼 여러 이동체의 위치 인식에는 매우 유리하다. 반면에 그림 1과 같은 구조를 가지는 기반시설수신방식은 위치정보를 기반시설에서 계산하게 되므로 이동체의 추적 문제에 유용하고 1개의 이동체를 대상으로 영역을 확장하기는 편리하지만, 초음파의 간섭으로 인하여 여러 이동체의 위치인식에는 많은 문제점을 가지고

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 26., 수정: 2011. 8. 1., 채택확정: 2011. 10. 4.

김수용: 현대모비스(rocksy@mobis.co.kr)

윤강섭: 대구대학교 기계자동차공학부(kasyoon@daegu.ac.kr)

* 본 논문은 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

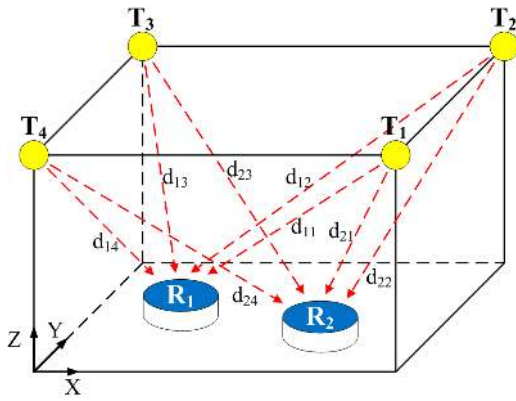


그림 1. 기반시설송신방식.
Fig. 1. Infrastructure transmitting type.

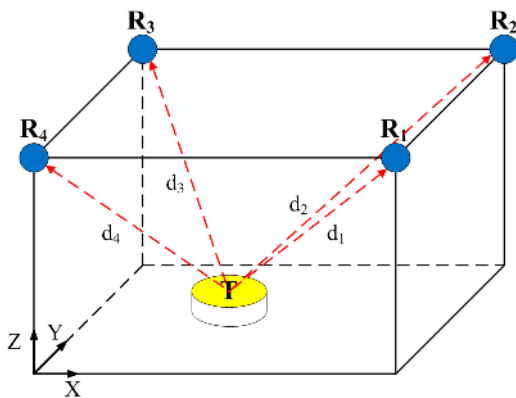


그림 2. 기반시설수신방식.
Fig. 2. Infrastructure receiving type.

있다. 따라서 이동체의 위치인식을 위해서 최근에는 기반시설수신방식보다 기반시설송신방식이 널리 연구되고 있다.

이러한 초음파 위치인식 시스템(ultrasonic positioning system)들은 초음파의 체공시간(time of flight)을 이용하여 초음파 송수신간의 거리를 측정하고 이를 이용하여 위치를 계산하는 방식을 사용하고 있다. 따라서 위치측정을 위해서는 송수신기간의 LOS (Line of Sight) 확보와 송수신기간의 동기화가 반드시 필요하다.

송수신기 사이에 장애물이 존재하여 LOS가 확보되지 못할 때는 초음파신호의 일부 혹은 전체를 받을 수 없으므로 초음파 위치인식 시스템만으로는 위치측정이 불가능하여, 추가적으로 다른 센서를 사용하여 센서퓨전(sensor fusion)을 이용하는 위치를 측정하는 방법이 사용된다[15].

송수신간의 동기화는 초음파가 송신기에서 발신되는 시점을 초음파 수신기에서 알아야 하는 것이다. 이러한 동기를 위해, Ghidary 등[14]은 적외선을 이용하기도 하였으나, 대부분의 시스템들은 RF 신호를 동기신호로 사용하고 있다. 이러한 RF 동기신호를 사용하는 초음파 위치인식 시스템들은 RF의 혼선에 대한 문제에 취약하며 RF의 성능이 초음파 위치인식 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한 RF 모듈을 사용함으로써 비용의 증가와 시스템의 크기 증가 등의 문제점이 존재하게 된다.

그러므로 본 논문에서는 초음파 위치인식시스템에서 RF 동기신호를 사용하지 않고 초음파 송수신기를 동기화하는 개선된 초음파 위치인식 시스템을 제안한다. 이를 위해 기존의 초음파 위성 시스템[7]을 기본으로 하고, RF 동기신호를 사용하는 대신에 초음파 송신기와 수신기에 각각 송신기 동기화 타이머와 수신기 동기화 타이머를 사용하여 송신기와 수신기를 독립적으로 동기화하고, GPS와 유사한 방법으로 초음파 송수신기간의 동기신호 바이어스(bias)와 3차원위치를 동시에 계산하는 알고리즘을 제안하고, 이를 바탕으로 RF 동기신호를 사용하지 않는 개선된 초음파 위성 시스템을 제안한다. 그리고 모의실험을 통해서 타당성을 검토한 후, 시스템을 구현하여 기존의 초음파 위치인식 시스템과 성능을 비교 분석하였다.

II. 기존의 초음파 위성 시스템

1. 시스템 구성

본 논문의 대상인 초음파 위성 시스템[7]은 초음파와 RF 동기신호를 사용하여 측정 대상물의 3차원 절대위치를 측정하는 초음파위치인식시스템이다. 이 시스템은 MURATA 사의 40kHz 초음파 센서와 RF 송수신기를 이용하여 그림 3과 같이 구성된 송수신기 모듈을 사용하고 있다. 기반시설 송신방식을 채택하여 그림 4와 같이 일정 영역 안의 고정된 위치에 송신기가 4개 설치되고, 각 송신기는 동기화를 위해서 유선으로 연결되어 있고 1번 송신기에는 타이머가 설치되어있다. 그리고 수신기는 측정 대상물에 설치된다. 각 송신기에서 초음파 신호와 RF 동기신호가 발신되고 수신기에서 이 신호를 받아서 송수신기간의 거리를 측정하고, 이를 바탕으로 3차원 위치를 인식하게 된다.

초음파 위성 시스템은 GPS처럼 송신기가 초음파와 RF 동기신호를 반복 송출하고 수신기에서 수신신호만으로 위치인식이 가능하므로, 영역 내에서는 아무리 많은 수의 이동체가 존재하더라도 서로 독립적인 위치인식이 가능한 특징을 가지고 있다.

이 시스템에서는 초음파가 송신기에서 발신되어 수신기에 도달하기까지의 체공시간을 측정하기 위해서 RF 동기신호를 사용한다. 송수신기간의 거리는 가까우므로 송수신기간의 RF 신호의 시간지연은 없는 것으로 가정하여, 송신기에서 초음파신호와 RF 동기신호를 동시에 발신하고 수신기에서 두 신호의 도착시간 차이를 초음파의 체공시간으로

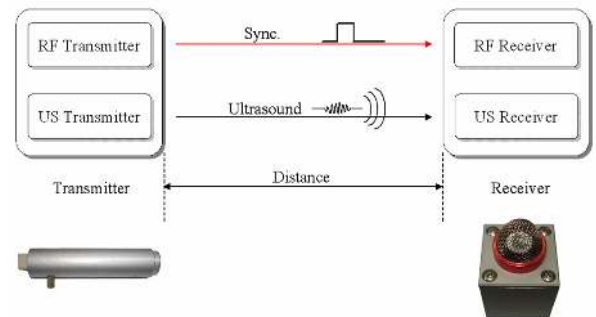


그림 3. 송신기와 수신기의 구조.
Fig. 3. Configuration of transmitter and receiver.

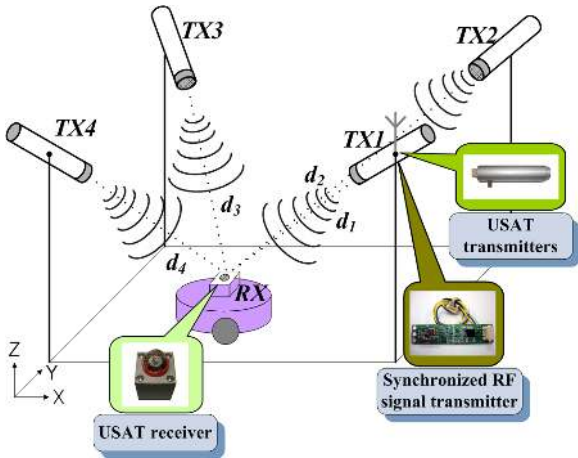


그림 4. USAT의 구조.
Fig. 4. Configuration of USAT.

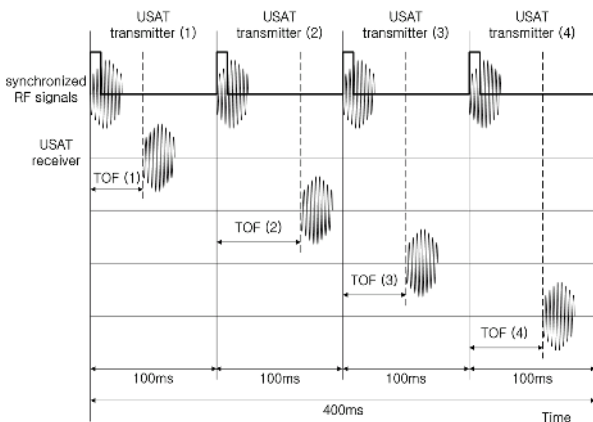


그림 5. USAT의 타이밍 선도.
Fig. 5. Timing diagram of USAT.

측정하게 된다. 그리고 동일영역 내에서 여러 대의 송신기에서 동시에 신호를 발신할 경우 간섭으로 인하여 개별 신호의 구분이 어려우므로 각각의 송신기에서는 신호를 순차적으로 발신한다. 그림 5는 초음파 신호와 RF 동기신호의 타이밍선도이다. 각 송신기에서는 100ms의 간격을 두고 순차적으로 신호를 발신하는데, 이는 가로와 세로가 각각 10m인 공간을 가정하여 각 초음파 신호간의 간섭과 반사파의 영향을 없애기 위해서이다. 또한, 발신간격 내에 초음파 및 반사파가 거의 사라질 수 있는 강도의 초음파신호를 사용한다.

수신기 측에서는 초음파의 제공시간을 측정하고, 초음파의 속도를 곱하여 각 송수신기 간의 거리 $d_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 를 계산한다. 4개의 거리 값이 구해지면 이로부터 수신기의 위치를 계산하게 된다. 따라서 초음파 위성시스템의 샘플링 주기는 400ms로서, GPS의 통상 샘플링 주기인 1초 보다 좀 더 빠른 위치측정이 가능하다. 또한 넓은 공간에 대해서도 초음파의 강도를 높이고 발신간격을 길게 하여 초음파 신호간의 간섭과 반사파의 영향 없이 위치를 측정할 수 있다.

2. 위치인식 알고리즘

초음파 위성 시스템의 위치인식은 이동체의 수신기 측에

서 수행되며, 수신기의 위치는 송신기의 위치와 4개의 송수신기 간 거리를 이용하여 다음 식과 같이 표현된다.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2 \quad (1)$$

여기서 x, y, z 는 초음파 수신기의 위치 좌표이고, $x_i, y_i, z_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 는 각 초음파 송신기의 고정된 위치 좌표이고, $d_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 는 각 송수신기 간의 거리이다.

식 (1)로부터 위치를 계산하기 위하여 2차 항을 소거하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &(x_1 - x_2)x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z \\ &= \frac{1}{2} \{ (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) + (z_1^2 - z_2^2) - (d_1^2 - d_2^2) \} = \alpha \\ &(x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y + (z_2 - z_3)z \\ &= \frac{1}{2} \{ (x_2^2 - x_3^2) + (y_2^2 - y_3^2) + (z_2^2 - z_3^2) - (d_2^2 - d_3^2) \} = \beta \\ &(x_3 - x_4)x + (y_3 - y_4)y + (z_3 - z_4)z \\ &= \frac{1}{2} \{ (x_3^2 - x_4^2) + (y_3^2 - y_4^2) + (z_3^2 - z_4^2) - (d_3^2 - d_4^2) \} = \gamma \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 - x_2) & (y_1 - y_2) & (z_1 - z_2) \\ (x_2 - x_3) & (y_2 - y_3) & (z_2 - z_3) \\ (x_3 - x_4) & (y_3 - y_4) & (z_3 - z_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 역행렬이 존재하도록 초음파 송신기를 배치하게 되면 초음파 수신기의 위치를 계산할 수 있다.

III. 개선된 초음파 위성 시스템

1. 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 RF 동기신호가 없는 개선된 초음파 위성 시스템은 기존의 초음파 위성 시스템을 기반으로 그림 6과 같이 구성된다. 우선 초음파 송수신기의 설치 위치는 기존의 시스템과 같이 고정된 위치에 초음파 송신기가 4개 설치되고, 초음파 수신기는 이동체에 설치된다. 그리고 초음파 송수신기는 RF 송수신기 대신에 송신기 동기화 타이머(transmitter synchronized timer)와 수신기 동기화 타이머(receiver synchronized timer)를 장착하여, 송수신기가 각각 별도로 100ms로 동기화하여 구동하도록 시스템을 구성하였다.

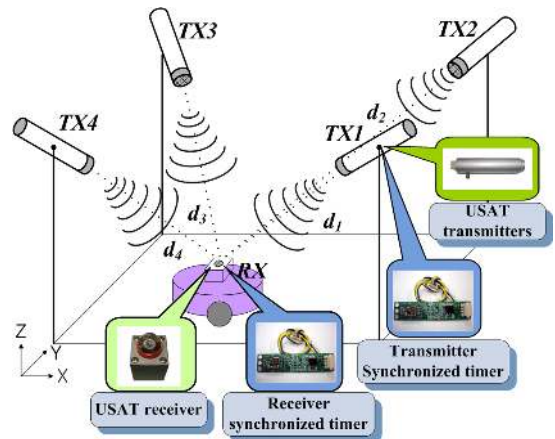


그림 6. 개선된 USAT의 구조.
Fig. 6. Configuration of improved USAT.

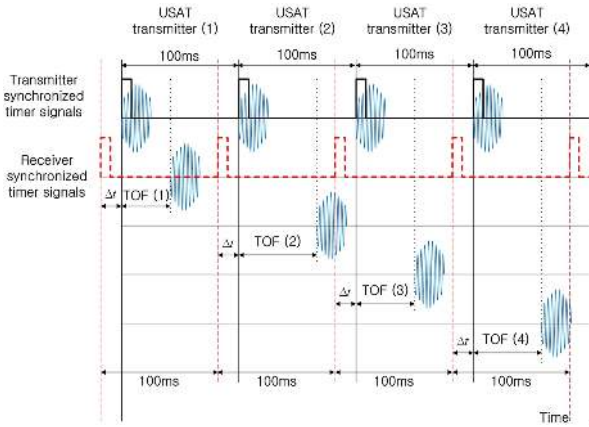


그림 7. 개선된 USAT의 타이밍 선도.
Fig. 7. Timing diagram of improved USAT.

초음파 송신기에서는 송신기 동기화 타이머가 100ms의 동기화 순차적으로 초음파를 송신하도록 제어하며, 초음파 수신기에서는 수신기 동기화 타이머가 100ms 간격으로 동기신호를 전달하고 그 동기신호를 기준으로 초음파 신호를 수신하여, 송수신기 간의 거리를 측정한다.

초음파 수신기가 자신이 가지고 있는 동기화 타이머를 기준으로 거리값을 측정하게 되면 그림 7에서 보듯이 초음파 송신기에서 발생하는 초음파 동기신호와 Δt 만큼의 시간차가 발생하게 된다. 따라서 초음파 수신기에서 계산되는 거리에는 동기신호 바이어스에 해당하는 거리가 포함되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = c \times (T_f + \Delta t) \tag{4}$$

여기서 T_f 는 체공시간, Δt 는 송수신부사이의 동기신호 바이어스를 나타내며, c 는 대기 중의 초음파 속력이다.

하지만 송수신부간 거리에 동기신호 바이어스로 인한 차이가 발생하더라도, 동기신호 바이어스나 그에 해당하는 거리를 미지수로 포함시켜서 3차원 위치와 같이 계산할 수 있으므로, 3차원 위치인식이 가능해진다. 자세한 계산 방법은 다음 절에 나타내었다.

RF 동기신호가 없는 경우의 다음 문제는 수신된 초음파의 발신 송신기를 식별하는 문제이다. RF 동기신호가 있는 경우에는 1번 송신기의 RF 동기신호에 ID를 부여하여 식별이 가능하지만, RF 동기신호가 없는 경우에는 초음파 수신기의 동작 시점에 따라서 최초 수신 초음파의 발신 송신기가 달라지기 때문에 정확한 위치인식이 불가능하다. 따라서 수신된 초음파의 송신기를 식별하는 문제는 매우 중요하다.

본 논문에서는 RF 동기신호를 사용하지 않고 초음파 신호만을 이용하여 초음파 송신기를 식별하기 위해서 1번 송신기의 발신시점을 일정시간 지연시키는 방법으로 ID를 부여하는 방법을 제안한다. 이 방법은 초음파 송신기 1번에서 4번까지 발신하는 한 주기 동안에는 동일한 간격으로 순차 발신을 하고, 다음 주기에서는 1번 송신기만 시간지연을 두고 발신하는 것이다. 이러한 식별방법의 타이밍선도는 그림 8과 같다. 만일 수신기가 설치된 이동체가 정지하고 있거나 저속으로 이동한다고 가정하면, 처음 주기와 다음 주기를

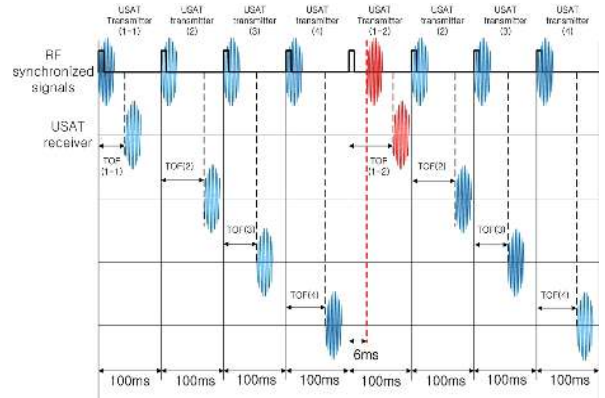


그림 8. 송신기 식별 알고리즘을 가진 개선된 USAT의 타이밍 선도.
Fig. 8. Timing diagram of improved USAT using transmitter detecting algorithm.

비교하여 1번 송신기 초음파 신호의 식별이 가능하다.

다음으로 지연시간을 결정하기 위해서, 이동체가 정지하고 있다는 가정 하에 지연시간으로 인한 처음 주기와 다음 주기의 송수신기간의 거리차를 살펴보면, 다음 식과 같다.

$$\Delta d = c \times |T_{f,1-1} - T_{f,1-2}| = c \times t_d \tag{5}$$

여기서 $T_{f,1-1}$ 과 $T_{f,1-2}$ 는 1번 송신기의 처음 주기와 다음 주기의 체공시간이고, t_d 는 1번 송신기의 지연시간이다. 만일 이동체가 이동한다면 한 주기 동안의 이동거리보다 시간지연으로 인한 초음파의 도달거리 차이가 커지지만 초음파의 식별이 가능하다. 만일 이동체가 성인의 걷는 속도인 1m/s로 이동한다면 한 주기 동안의 이동 거리는 0.4m이므로 지연시간은 1.2ms 이상이 되어야만 초음파의 식별이 가능하다. 따라서 1m/s 이상의 속도에 대한 여유와 측정오차를 고려하여 지연시간을 6ms로 결정하였다. 이동속도를 1m/s로 가정한 이유는 로봇이 공공장소에서 성인이 걷는 속도보다 빠르게 이동 할 경우 사람과 부딪힐 가능성 때문이다. 지연시간이 6ms인 경우에도 2m/s 정도의 속도까지는 측정이 가능하리라 판단되고, 지연시간을 더욱 증가시키면 그 이상의 속도에서도 측정은 가능하지만 이동에 따른 초음파의 수신위치 변화로 측정오차도 커질 것으로 예상된다.

2. 위치인식 알고리즘

RF 동기신호가 없는 초음파 위성시스템에서, 초음파 수신기에서 측정되는 초음파 송수신기간 거리에는 동기신호 바이어스에 해당하는 거리가 포함되며, 초음파 수신기의 위치와의 관계식은 다음과 같다.

$$d_i = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{1/2} + c\Delta t \tag{6}$$

여기서 $d_i (i=1,2,3,4)$ 는 동기신호 바이어스에 해당하는 거리가 포함된 각 송수신기간의 거리이다.

수신기의 위치를 계산하기 위하여, 식 (6)을 Taylor 급수 전개를 이용하여 임의의 초기 위치 벡터 $\vec{r}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ 에 대해 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} d_1(\bar{r}) \\ d_2(\bar{r}) \\ d_3(\bar{r}) \\ d_4(\bar{r}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1(\bar{r}_0) \\ d_2(\bar{r}_0) \\ d_3(\bar{r}_0) \\ d_4(\bar{r}_0) \end{bmatrix} + H \begin{bmatrix} (x-x_0) \\ (y-y_0) \\ (z-z_0) \\ c\Delta t \end{bmatrix} + H.O.T. \quad (7)$$

$$H = \begin{bmatrix} \delta d_1 & \delta d_1 & \delta d_1 & 1 \\ \delta x & \delta y & \delta z & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \delta d_4 & \delta d_4 & \delta d_4 & 1 \\ \delta x & \delta y & \delta z & \end{bmatrix}_{(x_0, y_0, z_0)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta d_i}{\delta x} &= \frac{-(x_i - x)}{[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{1/2}} \\ \frac{\delta d_i}{\delta y} &= \frac{-(y_i - y)}{[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{1/2}} \\ \frac{\delta d_i}{\delta z} &= \frac{-(z_i - z)}{[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2]^{1/2}} \end{aligned} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

여기서 $\bar{r} = [x, y, z]^T$ 이고, H 는 Jacobian 행렬이다. 식 (7)에서 고차항을 무시하면 다음과 같다.

$$\delta d_i = d_i(\bar{r}) - d_i(\bar{r}_0) = \bar{h}_i \delta \bar{r} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

여기서 \bar{h}_i 는 행렬 H 의 i 번째 행벡터이다. 행렬 H 의 역행렬이 존재한다고 가정하면 식 (10)의 선형식은 다음과 같이 계산된다.

$$\delta \bar{r} = H^{-1} \delta \bar{d} \quad (11)$$

여기서 $\delta \bar{d}$ 는 $\delta \bar{d} = [\delta d_1 \ \delta d_2 \ \delta d_3 \ \delta d_4]^T$ 이다. 만일 송신기를 5개 이상 사용할 경우에는 의사역행렬을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \bar{r} = (H^T H)^{-1} H^T \delta \bar{d} \quad (12)$$

위치 오차 $\delta \bar{r}$ 로부터 $\bar{r} = [x \ y \ z]^T$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + \delta \bar{r} \quad (13)$$

식 (13)을 이용하여 반복(iteration) 연산을 수행하면 임의의 시작점 \bar{r}_0 에서 시작하여 실제 초음파 수신기의 위치에 수렴하게 된다[16]. 그리고 동기시간 바이어스도 동시에 계산되므로, 동기시간 바이어스의 변화에 대처가 가능하다.

IV. 위치측정 모의실험

제안한 시스템에서 사용하는 위치인식 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 MATLAB을 이용하여 모의실험을 수행하여, 동기신호 바이어스가 포함된 송수신부간 거리로부터 동기신호 바이어스 해당거리와 수신기 위치의 수렴도 및 위치인식 정도를 분석한다.

시스템은 7m×5m×2.7m 공간에 구성되어 있고, 송신기는 천장모서리 4곳에 설치하는 것으로 가정하였다. 수신기의 위치는 설치공간의 가운데부분과 구석부분 두 곳을 선정하였다. 위치1: (4000mm, 2500mm, 1000mm), 위치2:

450mm, 550mm). 그리고 송수신부사이의 동기신호 바이어스는 위치1의 경우 10ms로, 위치2의 경우 1ms로 가정하였다. 반복 연산을 위한 초기위치는 위치인식 영역의 원점(0mm, 0mm, 0mm)으로, 초기 동기신호 바이어스는 0ms로 동일하게 두고 모의실험을 실시하였다.

1. 초음파 송신기를 4개 사용할 경우

먼저 초음파 송신기 4개 사용할 경우에 대해서 모의실험을 수행하였고, 위치1에 대한 결과는 그림 9에, 위치2에 대한 결과는 그림 10에 나타내었다.

그림 9와 10을 보면 위치1의 경우에는 발산하고, 위치2의 경우에는 3번의 반복연산 이후에 수신기의 위치로 수렴함을 확인할 수 있다. 수신기의 위치에 따라 수렴여부가 결정되는 것으로 판단되므로, 송수신기의 상대적인 기하학이 위치결정에 미치는 오차를 나타내는 GDOP (Geometric Dilution of Precision)를 분석하였다. GDOP는 다음과 같이 정의할 수 있다[15].

$$V = (H^T H)^{-1} \quad GDOP = \sqrt{V_{11} + V_{22} + V_{33} + V_{44}} = \sqrt{\text{trace}(H^T H)^{-1}} \quad (14)$$

위치1의 경우에 GDOP는 ∞로, 위치2의 경우 GDOP는 11.676로 나타난다. GDOP의 값이 작을수록 정확한 위치의 계산이 가능하지만, 송신기를 4개 사용할 경우 초음파 위성 시스템의 최대 확장영역(7m×7m) 안에서는 안정적인 GDOP

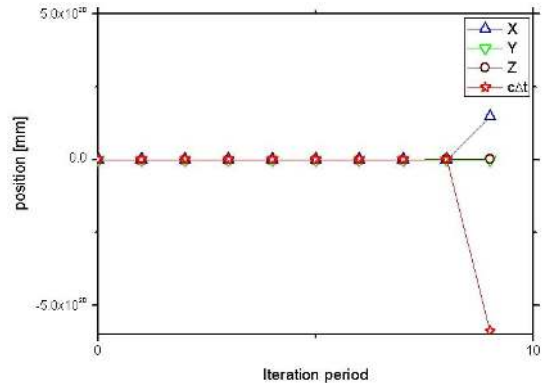


그림 9. 송신기 4개를 사용한 위치 1의 모의실험 결과.
Fig. 9. Simulation results of position 1 using four transmitters.

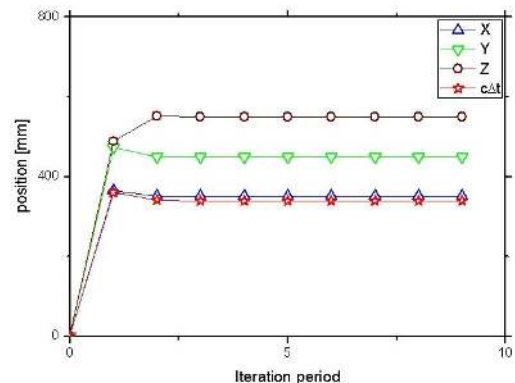


그림 10. 송신기 4개를 사용한 위치 2의 모의실험 결과.
Fig. 10. Simulation results of position 2 using four transmitters.

를 항상 보장할 수 없는 문제가 발생하게 된다.

이런 문제를 극복하기 위하여, 송신기를 1개 추가하여 GDOP를 안정화시키는 방법을 제안하고, 초음파 송신기를 5개 사용할 경우에 대해서도 모의실험을 수행하였다.

2. 초음파 송신기를 5개 사용할 경우

정확한 위치인식을 위해서, 즉 안정적인 GDOP가 보장되기 위해서, III 장에서 제안된 시스템에 송신기 1개를 추가

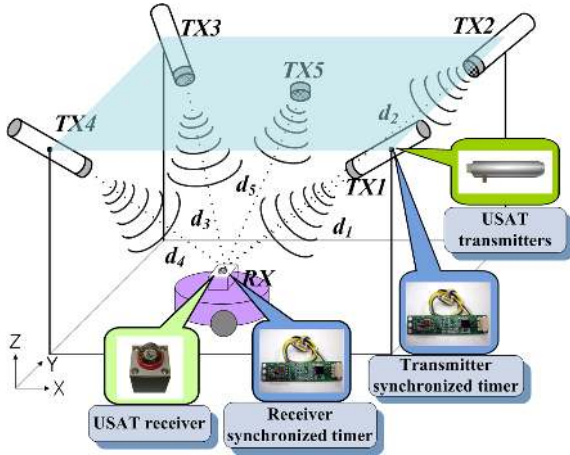


그림 11. 수신기를 5개 사용한 개선된 USAT의 구조.
Fig. 11. Configuration of improved USAT with five transmitters.

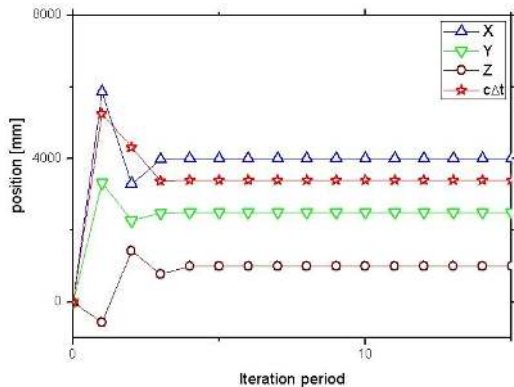


그림 12. 송신기 5개를 사용한 위치 1의 모의실험 결과.
Fig. 12. Simulation results of position 1 using five transmitters.

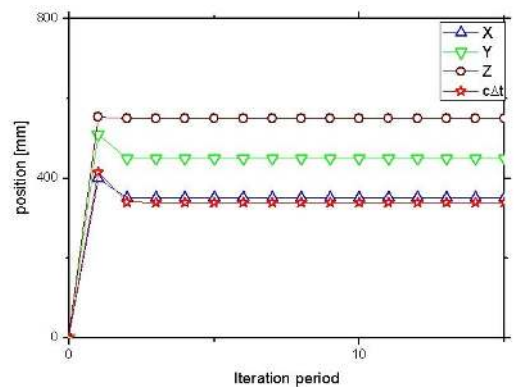


그림 13. 송신기 5개를 사용한 위치 2의 모의실험 결과.
Fig. 13. Simulation results of position 2 using five transmitters.

한 시스템을 제안한다. 새로이 제안된 시스템은 그림 11과 같이 송신기가 5개이며, 추가된 송신기의 위치는 기존 4개의 송신기 영역의 중앙에 설치한다. 각 송신기의 발신간격은 4개인 경우와 동일하게 100ms이고, 샘플링 주기는 500ms로 늘어나게 된다.

초음파 송신기가 5개인 시스템과 적용되는 위치인식 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 모의실험을 수행하였고, 위치1에 대한 결과는 그림 12에, 위치2에 대한 결과는 그림 13에 나타내었다.

위치1의 경우 대략 4번의 반복 연산 후에 수신기의 위치로 수렴하고, 동기신호 바이어스도 10ms에 해당하는 거리인 3400mm로 수렴하며, GDOP는 2.750로 안정적으로 나타난다. 위치2의 경우에도 대략 3번의 반복연산으로 수신기의 위치와 동기신호 바이어스 1ms의 해당거리로 수렴하며, GDOP는 6.381로 안정적으로 나타난다. 또한, 두 위치 모두에서 송신기가 4개인 경우보다 안정적인 GDOP를 나타낸다.

따라서 모의실험 결과로부터 송신기가 5개인 초음파 위성 시스템과 위치인식 알고리즘의 타당성이 입증되었다고 볼 수 있다.

V. 위치인식 실험

제안된 시스템의 위치인식 성능을 평가하기 위해서 고정된 위치에 대한 위치측정실험을 수행하였다. 우선, IV 장에서 최종적으로 제안된 시스템, 즉 RF 동기신호를 사용하지 않고 초음파 송신기가 5개인 개선된 초음파 위성 시스템을 실제로 구현하였다. 그리고 고정위치에 대한 위치측정 실험을 통해서 위치인식 성능을 검증하고, 그 결과를 기존의 초음파 위성 시스템 즉, RF 동기신호를 사용하고 송신기가 4개인 기존의 초음파 위성 시스템과 비교 평가한다.

개선된 초음파 위성 시스템과 기존의 초음파 위성 시스템을 7m×5m×2.7m의 동일한 공간에 구성하였다. 초음파 송신기는 천장모서리 4곳과 천장 가운데 1곳에 설치하였다. 그림 14는 실제 실험을 위해서 사용된 공간으로, 초음파 송신기의 설치 위치를 볼 수 있다.

초음파 송신기들은 송신기간의 동기화를 위해서 유선으로 연결되어있으며 1번 송신기에 장착된 타이머를 이용하여 순차발신을 수행한다. 기존의 초음파 위성 시스템의 경

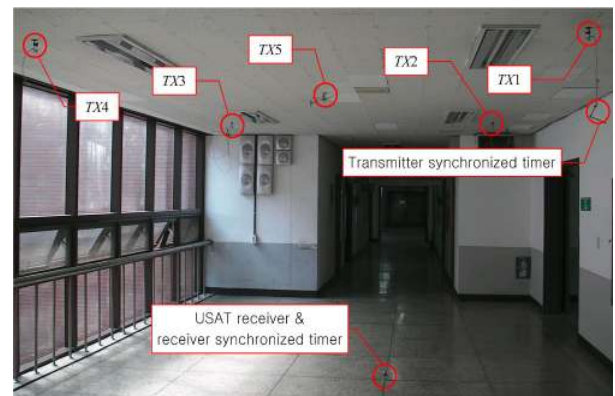


그림 14. 실제 실험을 위한 USAT의 구성.
Fig. 14. Configuration of the USAT for experiment.

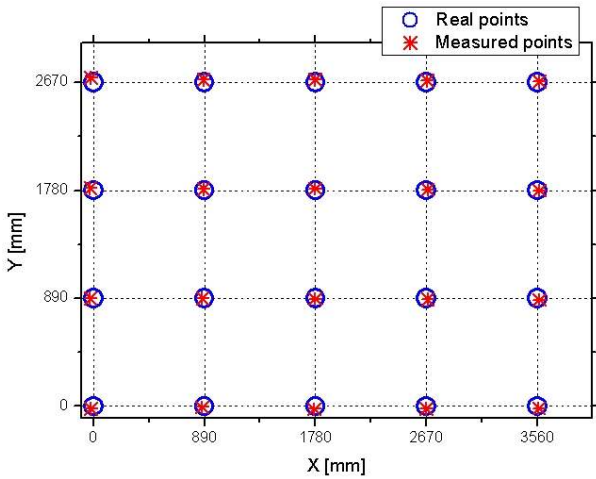


그림 15. USAT의 측정결과.
Fig. 15. Measurement results of the USAT.

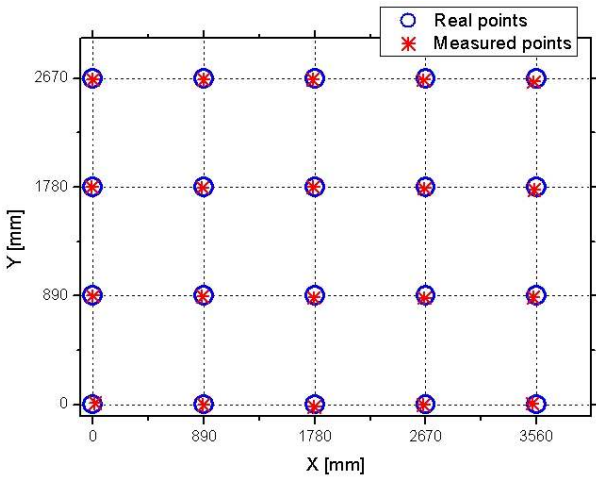


그림 16. 개선된 USAT의 측정결과.
Fig. 16. Measurement results of the improved USAT.

우는 천장모서리 4곳의 초음파 송신기를 사용하고, 개선된 초음파 위성 시스템의 경우에는 5곳 모두 사용한다.

두 시스템의 비교 실험을 위해서, 송신기의 발신간격은 두 시스템 모두 100ms로 동일하게 사용하였고, 실험공간이 보통의 공공장소보다 좁은 관계로 초음파의 간섭 문제가 발생되지 않도록 신호의 강도를 조절하여 동일하게 사용하였다. 기존의 초음파 위성 시스템의 경우 ISM 밴드의 315MHz ASK방식의 RF 동기신호를 사용하였다. 개선된 초음파 위성 시스템의 경우 초음파 송신기를 식별하기 위한 1번 초음파 송신기의 지연시간은 6ms로 사용하였다.

고정위치에 대한 위치측정을 위해서, 초음파 수신기는 바닥의 890mm 간격의 격자무늬 위에 놓고 20곳의 위치를 측정하였다. 측정 중에 초음파 신호나 그 반사파의 간섭 문제는 발생되지 않았다.

기존의 RF 동기신호가 있는 초음파 위성 시스템의 위치 측정 실험 결과는 그림 15와 같고, 본 논문에서 제안된 RF 동기신호가 없는 개선된 초음파 위성 시스템 위치측정 실

표 1. 측정오차의 비교.

Table 1. Comparison of measurement error.

Position errors [cm]	USAT			USAT without RF		
	RMS	Max	STD	RMS	Max	STD
	2.18	4.20	0.79	2.02	3.65	0.92

험 결과는 그림 16과 같다. 그리고 격자 위의 위치좌표와 측정한 좌표간의 오차의 RMS, 최댓값, 표준편차 등의 오차 특성은 표 1에서 비교하였다.

표 1에서 RF 동기신호를 사용하지 않는 개선된 초음파 위성 시스템의 위치측정 결과를 살펴보면, 오차의 RMS는 2.02cm, 오차의 최댓값은 3.65cm, 오차의 표준편차(STD)는 0.93cm로 나타나므로, 인식공간에 대비하여 우수한 위치측정 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 개선된 초음파 위성 시스템의 위치측정 결과를 기존의 초음파 위성 시스템의 결과와 비교해 보면, 오차의 RMS와 최댓값은 각각 0.16cm(7%), 0.55cm(13%) 작게 나타나고, 오차의 표준편차는 0.13cm(16%) 크게 나타나므로, 두 시스템이 거의 동일한 위치측정 성능을 가진다고 볼 수 있다.

따라서 개선된 초음파 위성 시스템은 초음파 송신기가 1개 추가되지만 RF 동기신호를 사용하지 않고 기존의 초음파 위성 시스템과 동일한 위치측정 성능을 가진다. 그리고 RF 동기신호를 사용하지 않으므로, RF 혼선 문제없이 인식공간에 대비하여 우수한 위치측정 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

VI. 결론

초음파를 이용하여 절대위치를 측정하는 초음파 위치측정 시스템들은 대부분 송수신부의 동기를 위해서 RF 동기신호를 사용하고 있다. 이러한 RF 동기신호의 사용으로, RF의 혼선이나 성능이 위치인식 성능에 직접적인 영향을 미치며, RF 모듈을 사용함으로써 비용 증가와 시스템의 크기 증가 등의 문제점이 있었다.

따라서 본 논문에서는 RF 동기신호를 사용하지 않고 초음파 송수신부를 동기화할 수 있는 개선된 초음파 위치인식 시스템을 제안하였다. 이를 위해 기존의 초음파 위치인식 시스템 중에서 동시에 여러 이동체에서 위치인식이 가능하고 영역대비 측정 정도가 우수한 초음파 위성 시스템을 기본으로 하여, RF 송수신모듈 대신에 송신기 동기화 타이머와 수신기 동기화 타이머를 이용하여 시스템을 구성하였다. 아울러 RF 동기신호 없이 초음파 송신기를 식별하는 방법과 송수기간의 동기신호 바이어스와 수신기의 3차원 위치를 동시에 계산하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안된 방법으로 시스템을 구현하고 기존의 초음파 위성 시스템과의 비교 실험을 수행하였다. 실험결과 개선된 초음파 위성 시스템이 RF 동기신호를 사용하지 않으면서도 인식공간에 대비하여 우수한 위치측정 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

앞으로 이동상태에 대한 위치측정 실험과 보완작업을 통하여, RF에 영향을 받지 않는 새로운 초음파 위치측정 시스템의 구축도 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] A. Smith, H. Balakrishnan, M. Goraczko, and N. Priyantha, "Tracking moving devices with the cricket location system," *The 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp. 190-202, 2004.
- [2] N. B. Priyantha, *The Cricket Indoor Location System*, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [3] C. C. Tsai, "A localization system of a mobile robot by fusing dead-reckoning and ultrasonic measurements," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, pp. 1399-1404, Oct. 1998.
- [4] S. Y. Yi and J. H. Jin, "Self-localization of a mobile robot using global ultrasonic sensor system," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 9, no. 2, pp. 145-151, Feb. 2003.
- [5] S. I. Ko, J. S. Choi, and B. H. Kim, "Indoor mobile localization system and stabilization of localization performance using pre-filtering," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 204-213, Feb. 2008.
- [6] D. H. Lee, S. Y. Kim, K. S. Yoon, and M. H., Lee, "A long range accurate ultrasonic distance measurement system by using period detecting method," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering (in Korean)*, vol. 24, no. 8, pp. 41-49, Aug. 2007.
- [7] D. H. Lee, S. Y. Kim, K. S. Yoon, and M. H., Lee, "USAT (Ultrasonic Satellite Systems) for the autonomous mobile robots localization," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 13, no. 10, pp. 956-961, Oct. 2007.
- [8] R. Want, A. Hopper, V. Falcap, and J. Gibbons, "The active badge location system," *ACM Trans. on Information Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 91-102, Jan. 1992.
- [9] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," *IEEE Computer*, vol. 34, no. 8, pp. 57-66, Aug. 2001.
- [10] A. Ward, A. Jones, and A. Hopper, "A new location technique for the active office," *IEEE Personal Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 42-47, Oct. 1997.
- [11] A. Harter, A. Hopper, P. Ateggles, A. Ward, and P. Webster, "The anatomy of a context-aware application," *Proc. of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 59-68, 1999.
- [12] J. M. Martin, A. R. Jimenez, F. Seco, L. Calderon, J. L. Pons, and R. Ceres, "Estimating the 3D-position from time delay data of US-waves: experimental analysis and a new processing algorithm," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 101, no. 3, pp. 311-321, Oct. 2002.
- [13] A. Mahjan and F. Figueroa, "An automatic self-installation and calibration method for a 3D position sensing system using ultrasonics," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 281-294, Sep. 1999.
- [14] S. S. Ghidary, T. Tani, T. Takamori, and M. Hattori, "A new HRPS (Home Robot Positioning System) using IR switched multi ultrasonic sensors," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 737-741, 1999.
- [15] S. Y. Kim, K. S. Yoon, D. H. Lee, and M. H. Lee, "The localization of a mobile robot using a pseudolite ultra system and a dead reckoning integrated system," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 339-347, Mar. 2011.
- [16] J. A. Farrell and M. Barth, *The Global Positioning System & Inertial Navigation*, McGraw-Hill, 1999.



김수용

2003년 부산대학교 기계공학부 졸업. 2005년 동 대학원 지능기계공학과 공학석사. 2011년 동 대학원 지능기계공학과 공학박사. 2011년 4월~현재 현대모비스 연구원. 관심분야는 이동로봇의 위치측정 및 자율주행, 무인 차량 제어, ASV 등.



윤강섭

1986년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업. 1988년 동 대학원 기계공학과 공학석사. 1997년 동 대학원 정밀기계공학과 공학박사. 1997년 9월~2000년 2월 동경대학교 생산기술연구소 박사연구원. 2000년 3월~현재 대구대학교 기계자동차공학부 부교수. 관심분야는 ITS, 메카트로닉스, 로보틱스, 예측제어 등.