군집로봇을 위한 다중 코드 초음파센서의 코드조합 최적화

Optimization of Code Combination in Multi-Code Ultrasonic Sensors for Multi-Robot Systems

문우성, 조봉수, 백광렬*
(Woo-sung Moon¹, Bong-su Cho², and Kwang Ryul Baek¹)

¹Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University

²PRI, LG Electronics

Abstract: In multi-robot systems, ultrasonic sensors are widely used for localization and/or obstacle detection. However, conventional ultrasonic sensors have a drawback, that is, the interference problem among ultrasonic transmitters. There are some previous studies to avoid interferences, such as TDMA (Time Division Multiple Access) and CDMA (Code Division Multiple Access). In multiple autonomous mobile robots systems, the Doppler-effect has to be considered because ultrasonic transceivers are attached to the moving robots. To overcome this problem, we find out the ASK (Amplitude Shift Keying)-CDMA technique is more robust to the Doppler-effect than the BPSK (Binary Phase Shift Keying)-CDMA technique. In this paper, we propose a new code-expression method and a Monte-Carlo based algorithm that optimizes the ultrasonic code combination in the ASK-CDMA ultrasonic system. The experimental results show that the proposed algorithm improves the performance of the ultrasonic multiple accessing capacity in the ASK-CDMA ultrasonic system.

Keywords: multi-robot, multi-code ultrasonic, sensor network, obstacle detection, localization

I. 서론

다수의 로봇이 동시에 움직이며 협동해야 하는 군집로봇에 있어서 각각의 로봇이 자신의 주변상황과 자신 및 다른 로봇의 위치를 파악하는 것은 로봇 간의 대형 제어, 경로 계획, 충돌 및 장애물 회피를 위해 필수적으로 이루어져야 하는 중요한 요소이다. 이를 위하여 GPS, INS, 카메라, 레이저 스캐너 등 다양한 센서들이 사용되고 있으며, 그 중에서도 초음파센서는 장애물의 인식과 위치인식 등 여러 방면에서 널리 쓰이고 있다[1-4].

기존의 초음파 송수신 방식의 가장 큰 단점은 동시에 송수신을 할 수 없다는 점이다. 대부분의 단일 로봇 시스템에서는 로봇에 장착된 초음파센서가 다수일 경우 각 센서들간의 간섭을 피하기 위하여 순차적으로 초음파를 송수신하는 시분할 방식(TDMA: Time Divide Multiple Access)을 적용하는 것이 일반적이다. 군집로봇 시스템에 있어서는 여러 대의 로봇이 장애물 인식을 위한 초음파 펄스를 수시로 송신하게 되며, 이는 다른 로봇이 송신한 초음파 신호를 자신의 센서 신호로 오인하여 오동작을 유발할 수 있다. 또한 로봇의 위치인식을 위하여 의사위성(pseudolite) [3,4,13] 혹은 로봇 간 상호 위치인식[12]에 초음파센서를 사용한 경우, 여러 센서 노드 간 거리 측정의 시간차로 인해 위치인식의 정확도가 떨어진다.

여러 개의 초음파 송신기와 수신기 사이의 거리를 상호 간

섭 없이 측정하기 위하여, 다중 코드 분할 방식(CDMA: Code Divide Multiple Access)을 사용하는 연구가 계속되고 있다. CDMA를 초음파센서에 적용시키는 방법으로는, 초음파 주파수(40kHz) 신호의 위상을 이용한 BPSK (Binary Phase Shift Keying)방식[5-10]과, 신호의 크기를 이용하는 ASK (Amplitude Shift Keying)방식[11-14]이 있다. BPSK 방식은 송신기와 수신기 사이의 거리가 비교적 일정하고 각 센서 노드가 이동하지 않는 경우 비교적 좋은 결과를 보여주지만, 신호의 대역폭이 넓으므로 넓은 주파수대역을 수신할 수 있는 수신기가 필요하며 센서 노드가 로봇 등 움직이는 물체일 때는 도플러 효과로 인한 위상 차이가 커지면 상호상관함수(CCF: Cross-Correlation Function)의 결과가 크게 감소하게 된다. 따라서 움직이는 물체에서 송수신되는 초음파 신호를 구분하기 위해서는 ASK 방식이 유리하다. BPSK 방식의 코드의 경우, Gold,

그림 1. 군집로봇 시스템에서 초음파센서의 활용.

Fig. 1. Application of ultrasonic sensors in a multi-robot system.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received March 28, 2013 / revised April 5, 2013 / accepted May 17, 2013

문우성, 백광렬: 부산대학교 전자전기공학부

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

조봉수: LG전자 생산기술원(bongsu.cho@lge.com)

그림 2. 이진 코드 방식과 펄스 타이밍 코드 방식의 비교.

Fig. 2. Comparison of binary code expression and pulse-timing code expression.

Golay, Kasami 등 다양한 PR (Pseudo-Random) 코드 생성 방식을 적용시키는 것이 가능하다[7]. 하지만 ASK 방식은 신호의 특성상 음수를 표현할 수 없으므로 기존의 PR 코드 생성 방식을 사용하지 못하고 적합한 코드를 선택하여 사용하여야 하며, 신호의 오검출을 방지하기 위해서는 최대한 분리능이 우수한 코드 조합을 선택하여야 한다.

기존의 ASK 방식 다중코드초음파 연구에서는 초음파 신호의 코드를 2진수의 형태로 표현하였다. 이는 그림 2(a)와 같이 일정한 펄스를 출력하거나 출력하지 않음으로 1과 0을 표현하고, 이를 일정한 시간간격으로 배열하여 코드를 표현함을 말한다. 하지만 이러한 방식은 초음파 코드가 가질 수 있는 형태의 가능성이 제한적이다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 그림 2(b)와 같이 초음파 펄스를 송신하는 타이밍을 표현하는 것으로 코드를 표현하는 방식을 제안한다.

II 장에서는 이러한 펄스 타이밍 기반 다중 코드 초음파 신호의 특성을 정리하며, III 장에서는 펄스 타이밍 코드 표현 방식의 최적 코드조합을 평가하는 방법을 정리하고 IV 장에서는 이를 기반으로 몬테-카를로 기법의 코드 생성 알고리즘을 제안한다. V 장에서는 시뮬레이션 실험 결과를 바탕으로 알고리즘의 성능을 평가한다.

II. 펄스 타이밍 기반 다중 코드 초음파

초음파 펄스의 송신 타이밍을 기반으로 한 코드 표현방식에서, 송신신호는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^{N_p} \delta(t - p_k^i) \quad (1)$$

여기서 N_p 는 하나의 초음파 코드에 포함되는 초음파 펄스의 수를 말하며, p_k^i 는 i 번째 코드의 k 번째 펄스의 송신 타이밍을 말한다.

초음파 송신기에서 해당 코드의 신호가 송신되었을 때, 이를 수신한 수신기에서의 출력 신호는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$R_i(t) = T_i(t - t_i) \otimes W(t) \quad (2)$$

여기서 $W(t)$ 는 초음파 코드가 포함하고 있는 각 펄스의 형태를 말하며, 수신된 신호를 이진화할 경우 식 (3)과 같이 표현된다. t_i 는 각 코드의 신호가 수신된 시각(TOA: Time of Arrival)을 말하며, 각 송신기와 수신기 사이의 거리에 비례한다. 각 송신기 사이의 거리는 Uniform 분포를 가지는 확률변수인 것으로 간주한다.

그림 3. 다중코드 초음파 수신신호의 예.

Fig. 3. Example of received multi-code ultrasonic signal.

그림 4. 수신신호의 이진화의 예.

Fig. 4. Example of binarization of received signal.

$$W(t) = u(t) - u(t - T_{pulse}) \quad (3)$$

여기서 T_{pulse} 는 수신된 초음파 펄스가 이진화되었을 때 생기는 신호의 길이를 말하며 이는 실제로 초음파 송신기와 수신기 사이의 거리, 각도, 반사파의 영향 등 다양한 환경의 영향으로 달라질 수 있으나 본 논문에서는 연산의 단순화를 위하여 상수로 간주한다.

2개의 초음파 송신기에서 송신된 신호가 중첩되어 수신된 신호는 식 (4)와 같이 표현되며, 여러 송신기로부터 송신된 초음파 신호가 중첩된 수신 신호는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$R_{i,j}(t) = R_i(t) + R_j(t) \quad (4)$$

$$R_{all}(t) = \sum_{i=1}^{N_c} R_i(t) \quad (5)$$

여기서 N_c 는 수신된 초음파 코드의 수를 말한다. 그림 3은 다수의 초음파 송신기로부터 송신된 초음파 코드를 하나의 수신기가 수신하였을 때의 신호를 나타낸 것이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 초음파 신호는 송신기와 수신기 사이의 거리, 각도, 주변환경 등에 따라서 신호의 크기와 형태가 크게 달라지기 때문에, 각 신호에 균등하게 코드 검출 알고리즘을 적용시키기 위해서는 이진화 과정이 필요하다. 그림 4는 수신신호에 대한 포락선 검파(envelop detection)를 적용한 뒤, 그 크기에 대한 문턱 값을 지정하여 이진화를 하는 과정을 나타내었다.

수신된 초음파 신호에서 특정 코드의 TOA를 검출하기 위

그림 5. CCF를 이용한 코드 검출.

Fig. 5. Example of code detection using CCF.

하여 CCF를 계산하는 수식은 하나의 코드, 두 개의 코드, 모든 코드에 대하여 각각 식 (6)-(8)과 같다.

$$C_{ij}(\tau) = CCF(T_i(t), R_j(t)) \quad (6)$$

$$C_{i,j,k}(\tau) = CCF(T_i(t), R_{\{j,k\}}(t)) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} C_{i,all}(\tau) &= CCF(T_i(t), R_{all}(t)) \\ &= CCF(T_i(t), \sum_{i=1}^{N_c} T_i(t-t_i) \otimes W(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 계산에는 모든 코드의 TOA($t_1, t_2, \dots, t_{N_c}$)의 값이 필요하다. 이는 수신된 초음파 신호에 대한 검출 연산에서는 상수로 결정되나 코드의 성능을 평가할 때는 변수로 고려된다.

초음파 코드의 검출은 CCF의 결과가 N_p 와 같아지는 지점을 찾아내는 것으로 이루어진다. 그림 5는 그림 4에서 예시한 수신신호에 대하여 CCF를 계산하고 그 값으로 해당 코드의 TOA를 검출한 것을 보여준다.

군집로봇 등의 응용 시스템에서 초음파 송신기, 수신기 혹은 양측 모두가 이동 중일 때, 초음파 신호의 길이의 변화는 도플러 효과의 일반적인 수식에 의하여 식 (9)와 같이 표현된다. 여기서 T_{code} 는 코드의 길이, ΔT 는 도플러 효과에 따른 코드 길이의 변화, c 는 음속, v_r , v_s 는 각각 초음파를 수신하는 로봇과 송신하는 로봇의 이동속도를 말한다.

$$\Delta T = \left(1 - \frac{c \pm v_r}{c \mp v_s} \right) T_{code} \quad (9)$$

BPSK 방식의 CDMA 초음파 시스템은 ΔT 가 초음파 주파수(40kHz)의 반 주기(12.5us)에 가까워지면 CCF의 결과가 급격히 감소하게 되어 신호의 검출이 어려워진다. 반면 ASK 방식의 시스템은 ΔT 가 T_{pulse} (0.2-0.5ms가량)보다 작으면 신호의 검출이 보장된다. 따라서 초음파 코드가 가질 수 있는 T_{code} 의 범위는 식 (10)과 같이 결정된다. 여기서 v_{max} 는 각 로봇이 움직일 수 있는 최대속도를 나타낸다.

$$T_{code} \leq \frac{c - v_{max}}{2v_{max}} T_{pulse} \quad (10)$$

그림 6은 음속을 350m/s로 가정했을 때 v_{max} 의 변화에 따른 임의의 128bit BPSK-CDMA코드와 $T_{code}/T_{pulse} = 128$ 인 ASK-CDMA코드의 도플러 효과로 왜곡된 신호에 대한 CCF

그림 6. BPSK-CDMA와 ASK-CDMA 방식의 초음파 신호의 도플러 효과에 대한 CCF의 최대값 변화.

Fig. 6. Change of maximum CCF result of BPSK-CDMA and ASK-CDMA ultrasonic signal to distorted signal by Doppler effect.

최대값의 변화를 보여준다. BPSK-CDMA 방식의 코드는 느린 속도에서의 도플러 효과에도 상호상관함수의 값이 크게 낮아지는데 비하여 ASK-CDMA 방식의 코드는 초음파 송신기와 수신기가 비교적 고속으로 이동하는 중에도 안정적으로 동작할 수 있음을 알 수 있다.

III. 코드 조합의 평가방법

하나의 초음파 코드를 수신한 수신신호에서, 식 (6)에서 구해진 CCF의 결과가 n 의 값을 가질 확률은 히스토그램을 이용하여 식 (11), (12)로 구해진다. 여기서 T_{max} 는 TOA가 가질 수 있는 최대값을 나타내며, 초음파센서의 최대 인식거리에 따라서 결정된다.

$$H_{ij}(n) = hist(C_{ij}(\tau)) \quad (11)$$

$$P_{ij}(n) = \frac{H_{ij}(n)}{2T_{max}} \quad (12)$$

두 개 이상의 코드가 동시에 수신되었을 때, 수신된 신호에 대한 CCF의 결과의 확률은 식 (8)로부터 식 (13), (14)로 표현된다.

$$H_{i,all}(n) = hist(C_{i,all}(\tau)) \quad (13)$$

$$P_{i,all}(n) = \frac{H_{i,all}(n)}{(2T_{max})^{N_c}} \quad (14)$$

이때, 식 (15)는 코드 검출 알고리즘에 의하여 코드가 수신된 것으로 판단될 확률을 말한다.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N_c} P_{i,all}(N_p) \quad (15)$$

이렇게 구해진 ε 은 생성된 코드조합의 성능을 평가하는데 쓰일 수 있으나, 이를 계산하기 위해서는 식 (13), (14)의 결과를 얻기 위해 식 (8)의 모든 가능한 TOA($t_1, t_2, \dots, t_{N_c}$)의 조합에 대한 CCF 결과를 구하고 그 히스토그램을 계산하여야 한다. 이는 $T_{max}^{N_c}$ 에 비례하는 대량의 연산을 요구하기 때문에 현실적으로 불가능하다.

이를 해결하기 위하여, 식 (13), (14)을 식 (16)으로 대체한다. 이는 각 코드의 단일 수신신호에 대한 CCF의 확률을 조합하여 두 신호가 중첩된 신호에 대한 CCF의 확률을 근사화한 것이다.

$$\begin{aligned}\hat{P}_{i,\{j,k\}}(n) &= S(P_{ij}, P_{ik}) \\ &= \sum_{n_1=0}^n \sum_{n_2=n-n_1}^n q(n_1, n_2, n) P_{ij}(n_1) P_{ik}(n_2)\end{aligned}\quad (16)$$

$$q(n_1, n_2, n) = \frac{\binom{n_1}{n_2 - (n - n_1)} \binom{N_p - n_1}{n - n_1}}{\binom{N_p}{n_2}} \quad (17)$$

$$\hat{P}_{i,\{j,k,l\}}(n) = S(\hat{P}_{i,\{j,k\}}(n), P_{il}) \quad (18)$$

여기서 $q(n_1, n_2, n)$ 는 $C_{ij}(\tau)$ 에서 n_1 개의 펄스가 검출되고, $C_{ik}(\tau)$ 에서 n_2 개의 펄스가 검출되었을 때, 두 신호가 더해진 $C_{i,\{j,k\}}(\tau)$ 에서 n 개의 펄스가 검출된 것으로 나타날 확률을 나타낸다.

(16)의 연산을 식 (18)과 같이 반복적으로 적용함으로써, 모든 코드의 신호를 수신한 수신신호에 대한 CCF의 결과값의 확률 $\hat{P}_{i,all}(n)$ 을 구한다. 이때, 식 (19)과 같이 정상적인 신호 검출을 계산에서 제외하면, 식 (20)의 결과값은 정상적이지 않은 신호의 검출, 즉 초음파 코드가 오검출될 확률을 나타낸다.

$$P_{ii}(N_p) = 0 \quad (19)$$

$$\hat{\varepsilon} = \sum_{i=1}^{N_c} \hat{P}_{i,all}(N_p) \quad (20)$$

$\hat{\varepsilon}$ 은 모든 코드의 송신 신호들이 수신되었을 때 임의의 한 시점에서 오검출이 발생할 확률을 말하며, 해당 수신신호 전체에서 한 번 이상 오검출이 일어날 확률은 식 (21)과 같이 구해진다

$$\hat{\eta} = 1 - e^{-\frac{2T_{max}}{T_{pulse}} \hat{\varepsilon}} \quad (21)$$

$\hat{\varepsilon}$ 와 $\hat{\eta}$ 는 단조증가 관계를 가지므로, $\hat{\eta}$ 를 최소화하기 위해서는 $\hat{\varepsilon}$ 를 최소화하는 것으로 대체 가능하다. 또한 $\hat{\varepsilon}$ 및 $\hat{\eta}$ 의 계산은 하나의 수신기에 모든 송신기의 신호가 수신된 경우를 가정하고 있으며 실제 응용 시스템에서는 초음파 센서의 시야범위의 제한으로 하나의 수신기에 수신되는 코드는 전체 코드의 수보다 적다는 점을 감안하면, 실제 시스템에서 발생하는 오검출 확률은 일반적으로 $\hat{\eta}$ 보다 낮은 값을 가질 것으로 예상할 수 있다.

IV. 코드조합 최적화

ASK 방식의 CDMA 초음파 시스템은 코드에 음수를 표현할 수 없기 때문에 CCF의 결과가 항상 양의 값을 가진다. 이는 여러 코드가 중첩된 수신신호에서 원하는 코드의 TOA를 추정하는데 어려움을 유발하며 따라서 코드간 분리능이 시스템의 성능에 큰 영향을 끼친다. 이진 코드 표현방식

그림 7. 몬테-카를로 코드 조합 최적화 알고리즘.

Fig. 7. Flow chart of the Monte-Carlo based optimizing algorithm for the code combination.

의 초음파 코드를 사용할 경우 최적의 코드 조합을 찾기 위해 모든 가능한 코드의 조합을 검토하여 가장 성능이 좋은 코드조합을 선택할 수 있다. 하지만 펄스 타이밍 코드 표현은 가능한 코드의 경우의 수가 무한히 많으므로 모든 경우의 수를 검토하는 것이 불가능하다.

이를 보완하기 위하여 몬테-카를로 방식의 코드 생성 알고리즘을 적용하였다. 무작위로 $N_c + 1$ 개의 코드를 생성하고, 이를 평가하여 가장 성능에 나쁜 영향을 주는 코드 하나를 삭제하고 새로운 무작위 코드를 추가한다. 이를 계속해서 반복하면 점점 성능이 좋은 코드 조합이 생성된다.

식 (22)는 코드 k 를 제외한 코드 조합의 성능을 평가하는 지표이며, 알고리즘의 수행시 제외되는 코드는 $\psi(k)$ 가 가장 작은 값을 가지는 코드이다.

$$\begin{aligned}\psi(k) &= \sum_{i \in A_k} \hat{P}_{i,A_k}(N_p) \\ A_k &= \{j | 1 \leq j \leq N_c + 1, j \neq k\}\end{aligned}\quad (22)$$

V. 실험 및 결과

초음파 코드 최적화 알고리즘의 성능은 PC기반의 MATLAB 시뮬레이션으로 검증하였다. 그림 8은 초음파 코드의 각 펄스의 길이(T_{pulse}) 0.5ms, 샘플링 주파수 400kHz, 코드길이(T_{code}) 8ms, 최대 TOA(T_{max}) 10ms, 코드 수(N_c)는 3, 코드 당 펄스 수(N_p)가 4인 조건에서 100회의 알고리즘 반복으로 생성된 코드 조합의 예를 보여준다.

그림 9는 그림 8의 코드 각각에 대한 $C_{ij}(\tau)$ 를 보여주며, 그림 10은 코드 각각에 대한 $P_{ij}(n)$ 과 $\hat{P}_{i,all}(n)$ 을 보여준다. 정상적인 신호검출에 대한 확률은 식 (19)를 적용하여 제거하였다.

그림 11은 1000개의 무작위 코드를 발생시켜 이에 대한 최적화 알고리즘을 적용시킨 결과를 보여준다. 무작위로 발생된 코드에 비하여, 알고리즘의 반복 횟수가 늘어남에 따라 점차 오검출률($\hat{\varepsilon}$)이 줄어들며 최적화됨을 알 수 있다. 실험 결과 생성된 코드 중 가장 우수한 코드는 $\hat{\varepsilon} = 0.00037$, $\hat{\eta} = 0.0437$ 이며, 동일한 조건에서의 이진코드방식의 최대성능은 $\hat{\varepsilon} = 0.0012$, $\hat{\eta} = 0.1367$ 이다.

그림 8. 생성된 코드 조합의 예.

Fig. 8. Example of generated code group.

그림 9. CCF 계산 결과.

Fig. 9. Result of CCF.

그림 10. CCF 결과의 확률분포.

Fig. 10. Probability distribution of CCF result.

그림 12는 초음파와 코드의 코드길이($T_{\max}$) 50ms, 최대 TOA ($T_{\max}$) 30ms, 코드 수(N_C)는 16, 코드 당 펄스 수(N_p)가 6인 조건에서 생성된 코드 조합의 예를 보여준다.

그림 11. 코드 생성 알고리즘 적용에 따른 오검출 확률 분포의 변화.

Fig. 11. Distribution change of error rate by iteration of code generation algorithm.

그림 12. $T_{\max} = 50, N_C = 16, N_p = 6$ 인 코드 조합의 생성 결과.Fig. 12. Result of code generation in case of $T_{\max} = 50, N_C = 16, N_p = 6$.

VI. 결론

본 논문에서는 군집로봇에서의 다중 코드 초음파와 센서 네트워크 시스템을 최적화하기 위하여, ASK-CDMA 방식의 초음파신호의 코드 조합을 최적화하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 성능의 검증 결과는 제안된 알고리즘을 이용하여 최적화된 초음파 코드 조합은 알고리즘이 적용되기 전보다 향상된 코드 분리성능을 가지고 있다는 것을 보여주며, 기존의 이진코드표현방식보다 크게 개선된 결과를 보여

준다. 또한 기존 방식으로는 어려웠던 많은 수의 초음파 신호를 구분할 수 있는 복잡한 코드 조합도 동일한 알고리즘으로 생성해내는 것이 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 저자의 기존 논문[12]에서 구현한 하드웨어와 위치인식 및 추정 알고리즘을 통하여 군집로봇의 위치인식 시스템으로서 활용 가능하다. 제안된 시스템을 적용하면 군집로봇 시스템에서 초음파센서를 사용할 때 간섭으로 인한 오작동을 방지할 수 있으며, 초음파 거리측정의 시간차로 인한 위치인식의 오차가 발생하지 않는다. 제안된 알고리즘으로 생성된 초음파 코드조합은 초음파 센서를 이용한 장애물탐색, 의사위성을 이용한 위치인식, 로봇간 상호위치인식 등 다양한 응용분야에 사용될 수 있다.

향후 연구로는 다수의 초음파 센서 노드를 가진 군집로봇과 의사위성이 혼재하는 환경에서, 로봇의 이동에 따라 환경 내의 초음파 센서 노드의 수가 가변적일 때 상황에 따라 코드의 수를 가감하며 최적화하는 동작을 실시간으로 구현하는 것을 목표로 하고자 한다.

REFERENCES

- [1] L. Kleeman, "Optimal estimation of position and heading for mobile robots using ultrasonic beacons and dead-reckoning," *Proc. of the 1992 IEEE int. Conf. on Robotics and Automation*, Nice, France, pp. 2582-2587 May 1992.
- [2] C.-J. Wu and C.-C. Tsai, "Localization of an autonomous mobile robot based on ultrasonic sensory information," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, pp. 267-277, 2001.
- [3] S. Y. Kim and K. S. Yoon, "Improved ultrasonic satellite system for the localization of mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1240-1247, 2011.
- [4] J. H. Han, Y. S. Seo, and J. M. Lee, "An ubiquitous mobile robot using position-sensing method," *Proc. of KIIS Spring Conference (in Korean)*, vol. 20, no. 1, pp. 267-270, 2010.
- [5] J. Manuel Villadangos, J. Urena, M. Mazo, A. Hernandez, F. Alvarez, J. J. Garcia, C. De Marziani, and D. Alonso, "Improvement of ultrasonic beacon-based local position system using multi-access techniques," *Intelligent Signal Processing, 2005 IEEE International Workshop*, pp. 352-357, Sep. 2005.
- [6] W.-L. Yao, "A Pseudo Random (RP) Code Based Ultrasonic Navigation system (UNS)," *Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Singapore, pp. 752-757, Dec. 2004.
- [7] M. C. Perez, J. Urena, A. Hernandez, F. J. Alvarez, and C. De Marziani, "Performance comparison of different codes in an ultrasonic positioning system using DS-CDMA," *IEEE 6th International Symposium on Intelligent Signal Processing*, Budapest, Hungary, pp. 125-130, Aug. 2009.
- [8] M. Alloulah and M. Hazas, "An efficient CDMA core for indoor acoustic position sensing," *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Zurich, Switzerland, pp. 1-5, Sep. 2010.
- [9] Q. Wang and H. Hashimoto, "Fast localization of multi-targets in the intelligent space," *SICE Annual Conference*, Kagawa University, Japan, pp. 264-269, Sep. 2007.
- [10] C. D. Marziani, J. Urena, A. Hernandez, J. J. Garcia, F. J. Alvarez, A. Jimenez, M. C. Perez, J. M. V. Carrizo, J. Aparicio, and R. Alcoleas, "Simultaneous round-trip time-of-flight measurements with encoded acoustic signals," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 10, pp. 2931-2940, Oct. 2012.
- [11] C. S. Kim, B. J. Choi, Y. J. Lee, and S. R. Lee, "Simultaneous driving system of ultrasonic sensors using codes," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 10, no. 11, pp. 1028-1036, 2004.
- [12] W. S. Moon, B. Cho, J. W. Jang, and K. R. Baek, "A multi-robot positioning system using a multi-code ultrasonic sensor network and a Kalman filter," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 6, pp. 1349-1355, 2010.
- [13] W. J. Seo, B. S. Cho, W. S. Moon, and K. R. Baek, "Position estimation using hyperbolic model for time difference of flight of ultrasonic," *International Conference on Electrical and Control Engineering*, China, pp. 6036-6039, Sep. 2011.
- [14] B. S. Cho, P. S. Kim, W. S. Moon, and K. R. Baek, "A distance estimation algorithm based on multi-code ultrasonic sensor and received signal strength," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 2, pp. 144-151, 2011.

문 우 성

2007년 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부(공학사). 2009년 부산대학교 전자전기공학과(공학석사). 2009년~현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정 재학중.

조 봉 수

2004년 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부(공학사). 2006년 부산대학교 전자전기공학과(공학석사). 2012년 부산대학교 전자전기공학과(공학박사). 2012년~현재 LG전자 생산기술원 재직중.

백 광 열

1984년 부산대학교 전기기계공학과(공학사). 1986년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학석사). 1989년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학박사). 1994년~현재 부산대학교 전자공학과 교수.