

초음파 센서를 이용한 다수의 이동형 개체 위치 추적시스템 개발에 관한 연구

최진희* · 최 익** · 조 황*

Study on the Development of Multi-Agents Position Tracking System Using Ultrasonic Transducers

Jin-Hee Choe* · Ick Choy** · Whang Cho*

요 약

본 논문은 시뮬레이션을 통해 다수의 초음파 발신부로부터 순차적으로 발생하는 초음파를 공간 내에서 자유롭게 움직이는 여러개의 이동형 개체들에 각각 장착된 초음파 수신부가 수신하여 각 개체의 위치를 스스로 계산할 수 있는 시스템을 제안한다. 이 시스템은 적절한 위치에 고정 장착된 3개 이상의 초음파 발신부에 의해 정의되는 공간 내에서 움직이는 개체가 자신들의 위치를 스스로 추정 가능하게 하기 때문에 공간 내에 존재하는 개체 수에 제한을 받지 않는다는 장점이 있다. 따라서 본 기술은 다 개체 시스템의 위치 제어 및 모션 포착 기술에 효과적으로 응용이 가능하다.

ABSTRACT

In This paper, through simulation, proposes a system which makes it possible for freely moving multiple agents with ultrasonic receivers to estimate their own position by themselves using the ultrasonic signals sequentially emitted from multiple ultrasonic transmitters. This system possesses an advantage that there is no limit in the number of agents existing in the space covered by more than three transmitters fixed at proper locations. Hence, the proposed system can be utilized effectively in position tracking control of multiple robotic agents system and motion capturing system.

키워드

Ultrasonic sensor, position tracking system, Nonlinear least square Algorithm, Weighted nonlinear least square Algorithm
초음파 센서, 위치 인식 시스템, 비선형 최소 자승법 알고리즘, 가중 비선형 최소 자승법 알고리즘

1. 서 론

기존 연구에서 GPS를 이용한 위치인식 방법이 많이 이용되고 있으나, 이 기술은 실외에서는 가능하지만 위성의 전파신호가 건물내부에는 도달 할 수 없기 때문에 실내에서는 적용하기가 불가능하다[1]. 따라서

초기의 실내 위치인식에는 초음파나 적외선, LiDAR (Light detection and ranging) 및 스테레오 카메라 등이 주로 사용되었다[2].

실내·외 위치인식 시스템을 구축하는데 GPS나 초음파, 레이저 센서[8], 적외선, 스테레오 카메라, 등[9]을 사용한 기술을 이용하여 장소의 가능 영역에 따라

* 광운대학교 제어계측공학과(sokgkgk@gmail.com)

** 교신저자 : 광운대학교 로봇학부 교수(ickchoy@kw.ac.kr)

접수일자 : 2013. 02. 15

심사(수정)일자 : 2013. 03. 25

게재확정일자 : 2013. 05. 20

매크로 위치인식 시스템과 마이크로 위치인식 시스템으로 분류할 수 있다.

매크로 위치인식 시스템은 전 지구적인 영역에서 위치인식이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 실내 환경이나 건물 밀집 지역과 같은 GPS신호의 음영지역 등에서는 위치인식 시간이 상대적으로 많이 소요된다는 단점이 있다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 나온 시스템이 마이크로 위치인식 시스템이다.

마이크로 위치인식 시스템은 적외선 신호를 이용하는 Active badge system과 초음파 펄스의 속도차이 (TOF : Timer of Flight)를 이용하는 Active bat system, RF와 초음파의 속도차이를 이용한 Cricket location System, 영상인식을 이용한 Easy living project 등이 있다[3][4][5]. 여기서 Active bat system은 위치를 측정하고자 하는 물체가 여러 개가 될 경우 외부의 영향에 민감하여 사용할 수 없다. 반면, Cricket location system은 위치를 측정하고자 하는 물체가 다수이어도 측정할 수 있지만 이동물체에서 RF와 초음파 신호의 도착시간차를 구하기 때문에 여러 대의 수신기를 사용할 때 알고리즘이 매우 복잡하다.

본 논문에서는 다수의 초음파 발신부로부터 순차적으로 발생하는 초음파 공간 내에서 자유롭게 이동하는 이동형 개체 위치를 측정하고자 Nonlinear least square(비선형최소자승법) 알고리즘과 Weighted nonlinear least square(가중비선형최소자승법) 알고리즘을 제안하고 Ultrasonic Satellite System(USAT : 초음파위성 시스템)[7]에 각각 적용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 다수의 초음파 발신부로부터 순차적으로 발생하는 초음파 공간 내에서 성능 데이터 분석을 통하여 두 알고리즘 중에서 이동형 개체의 위치인식 시스템에 적합한 알고리즘을 제안하고자 한다.

II. 이동형 개체의 위치인식 알고리즘

2.1 Nonlinear least square 알고리즘

다수의 초음파 발신부로부터 순차적으로 발생하는 초음파 공간 내에서 자유롭게 이동하는 이동형 개체 위치, $P_0 = [x_0 y_0 z_0]^T$ 에 대해서 아래와 같이 식(1)은 최적의 측정 값 $\hat{P}_0 = [\hat{x}_0 \hat{y}_0 \hat{z}_0]^T$ 을 구한다.

$$\hat{P}_0 = \arg_{P_0} \min S(P_0) \quad (1)$$

식(1)의 $S(P_0)$ 는 식(2)같이 정의할 수 있다. 식(2)에서 i 번째 고정된 초음파 발신부 위치, $P_i = [x_i y_i z_i]^T$ $i = 1, \dots, N$ 와 P_0 사이의 측정거리를 r_i 라 할 때, ε_i 는 식(3)과 같이 정의 한다.

$$S(P_0) = \sum_{i=0}^N \varepsilon_i^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= (p_i - P_0)^T (p_i - P_0) - r_i^2 \\ &= p_i^T p_i - r_i^2 - 2p_i^T P_0 + P_0^T P_0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 다음 식(4)를 만족하는 P_0 는 식(2)의 $S(P_0)$ 를 최소화하는 최적해이다.

$$\frac{\partial S}{\partial P_0} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_{i=1}^N 2 \{ (p_i - P_0)^T (p_i - P_0) - r_i^2 \} \{ 2(p_i - P_0) \} \\ &= -4 \sum_{i=1}^N \left\{ \begin{aligned} &(p_i p_i^T p_i - r_i^2 p_i) + \\ &[-2p_i p_i^T + (r_i^2 - p_i p_i^T) I_{n \times n}] P_0 + \\ &[(2P_0 P_0^T + P_0^T P_0 I_{n \times n}) p_i - P_0 P_0^T P_0] \end{aligned} \right\} \end{aligned}$$

식(5)는 식(4)를 재구성하여 정리한 것이다.

$$\begin{aligned} v &= P_0 P_0^T + P_0^T P_0 I_{n \times n} \\ &= a + B P_0 + \{ 2v \} c - P_0 P_0^T P_0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$a = \sum_{i=1}^N (p_i p_i^T p_i - r_i^2 - p_i^T p_i),$$

$$B = \sum_{i=1}^N \{ -2p_i p_i^T + (r_i^2 - p_i^T p_i) I_{n \times n} \},$$

$$c = \sum_{i=1}^N p_i$$

식(5)에서 P_0 를 구해야하므로 새로운 벡터 q , c 를 도입하였다. 여기서 c 는 고정된 초음파 발신부들의 중심을 나타내고, q 는 c 에서 P_0 의 길이벡터로서 $P_0 = q + c$ 를 대입하면 다음 식(6)과 같다.

$$f(q) = a + Bc + 2cc^Tc + (A - q^TqI_{n \times n})q = 0 \quad (6)$$

$$A = B + 2cc^T + c^TcI_{n \times n}$$

여기서 $f(q)$ 의 각각 i 번째 원소 $f_i(q)$ 는 아래 식 (7)와 같다.

$$f_1(q) = k_1 + \{A_{11} - (q_{123}^2)\}q_1 + A_{12}q_2 + A_{13}q_3 = 0 \quad (7)$$

$$f_2(q) = k_2 + A_{21}q_1 + \{A_{22} - (q_{123}^2)\}q_2 + A_{23}q_3 = 0$$

$$f_3(q) = k_3 + A_{31}q_1 + A_{32}q_2 + \{A_{33} - (q_{123}^2)\}q_3 = 0$$

$$q_{123}^2 = q_1^2 + q_2^2 + q_3^2, k_i = a + Bc + 2cc^Tc$$

식(6)을 만족하는 q 를 구하기 위해서 아래의 식(8)과 같이 Newton-Raphson Method를 적용한다.

$$q_{i+1} = q_i - J(q_i)^{-1}f(q_i) \quad (8)$$

식(8)에서 $J(q)$ 는 $f(q)$ 의 자코비안 행렬로서 다음 식(9)과 같다.

$$J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} A_{11} - (3q_{123}^2) & A_{12} - 2q_1q_2 & A_{13} - 2q_1q_3 \\ A_{21} - 2q_2q_1 & A_{22} - (q_{123}^2) & A_{23} - 2q_2q_3 \\ A_{31} - 2q_3q_1 & A_{32} - 2q_3q_2 & A_{33} - (q_{123}^2) \end{bmatrix}$$

식(8)로부터 계산된 q 의 값을 이용하여 P_0 의 최적 값 \hat{P}_0 을 구할 수 있다. 그러나 P_0 의 초기치는 임의로 주기 때문에 계산시간이 늘어날 뿐만 아니라 현 위치를 구할 수 없는 경우도 발생할 수 있다. 또한 r_i 의 값이 어느 하나라도 정확하지 않으면 \hat{P}_0 의 위치오차가 클 수 있다.

2.2 Weighted nonlinear least square 알고리즘

Weighted nonlinear least square 알고리즘은 3.2. Nonlinear least square의 단점을 보완하기 위해 제시한 알고리즘이다. 다수의 초음파 발신부로부터 순차적으로 발생하는 초음파 공간 내에서 자유롭게 이동하는 이동형 개체 위치, $P_0 = [x_0 y_0 z_0]^T$ 에 대해서 위의 식(1)의 최적의 측정값 $\hat{P}_0 = [\hat{x}_0 \hat{y}_0 \hat{z}_0]^T$ 를 구하기 위해 weighted nonlinear least square 알고리즘은 P_0 의 초

기 위치를 Bancroft Method[6]로 구하여 계산시간을 단축하였다. 또한, r_i 의 값이 어느 하나라도 정확하지 않을 경우를 대비하여 각 r_i 값에 따른 가중치를 주었다. i 번째 고정된 초음파 발신부 위치, $P_i = [x_i y_i z_i]^T$ $i = 1, \dots, N$ 와 P_0 사이의 측정거리를 r_i 라 할 때, P_0 를 식(10)로 정의 할 수 있다. 식(10)에서 는 가중치이다.

$$S_w(P_0) = \sum_{i=0}^N w_i \varepsilon_i^2 \quad (10)$$

Bancroft Method로 구한 초기값을 weighted Nonlinear least square 알고리즘에 적용하여 이동형 개체 P_0 를 구하기 위해 다음 식(11)를 만족하는 P_0 는 식(10)의 $S_w(P_0)$ 를 최소화하는 최적해 이다.

$$\frac{\partial S_w}{\partial P_0} = 0 \quad (11)$$

$$0 = \sum_{i=1}^N 2w_i \{ (p_i - P_0)^T (p_i - P_0) - r_i^2 \} \{ 2(p_i - P_0) \}$$

$$= -4 \sum_{i=1}^N w_i \left\{ \begin{aligned} & (p_i p_i^T p_i - r_i^2 p_i) + \\ & \left[-2p_i p_i^T + (r_i^2 - p_i p_i^T) I_{n \times n} \right] P_0 + \\ & (2P_0 P_0^T + P_0^T P_0 I_{n \times n}) p_i - P_0 P_0^T P_0 \end{aligned} \right\}$$

$$v_w = P_0 P_0^T + P_0^T P_0 I_{n \times n} \quad (12)$$

$$= a + B P_0 + \{2v\}c - P_0 P_0^T P_0$$

$$a_w = \sum_{i=1}^N w_i (p_i p_i^T p_i - r_i^2 - p_i^T p_i),$$

$$B_w = \sum_{i=1}^N w_i \{ -2p_i p_i^T + (r_i^2 - p_i^T p_i) I_{n \times n} \},$$

$$c_w = \sum_{i=1}^N w_i p_i$$

식(12)에서 P_0 를 구해야하므로 새로운 벡터 q, c_w 를 도입하였다. 여기서 c_w 는 고정된 초음파 발신부들의 중심을 나타내고, q 는 c_w 에서 P_0 의 새로운 길이벡터로 수식 $P_0 = q + c_w$ 를 대입하면 다음 식(13)와 같다.

$$f_w(q) = a_w + B_w c_w + 2c_w c_w^T c_w + kq = 0 \quad (13)$$

$$k = A - q^T q I_{n \times n}$$

$$A = B_w + 2c_w c_w^T + c_w^T c_w I_{n \times n}$$

여기서 $f_w(q)$ 의 각각 i 번째 원소 $f_{wi}(q)$ 는 아래 식(14)와 같다.

$$f_{w1}(q) = k_1 + \{A_{11} - (q_{123}^2)\}q_1 + A_{12}q_2 + A_{13}q_3 = 0 \quad (14)$$

$$f_{w2}(q) = k_2 + A_{21}q_1 + \{A_{22} - (q_{123}^2)\}q_2 + A_{23}q_3 = 0$$

$$f_{w3}(q) = k_3 + A_{31}q_1 + A_{32}q_2 + \{A_{33} - (q_{123}^2)\}q_3 = 0$$

$$q_{123}^2 = q_1^2 + q_2^2 + q_3^2, k_i - a_w + B_w c_w + 2c_w c_w^T c_w$$

식(13)를 만족하는 q 를 구하기 위해서 아래의 식(15)와 같이 Newton-Raphson Method를 적용한다.

$$q_{i+1} = q_i - J_w(q_i)^{-1} f_w(q_i) \quad (15)$$

식(15)에서 $J_w(q)$ 는 $f_w(q)$ 의 자코비안 행렬로서 다음 식(16)과 같다.

$$J_w(q) = \frac{\partial f_w}{\partial q} \quad (16)$$

$$= \begin{bmatrix} A_{11} - (3q_{123}^2) & A_{12} - 2q_1q_2 & A_{13} - 2q_1q_3 \\ A_{21} - 2q_2q_1 & A_{22} - (q_{123}^2) & A_{23} - 2q_2q_3 \\ A_{31} - 2q_3q_1 & A_{32} - 2q_3q_2 & A_{33} - (q_{123}^2) \end{bmatrix}$$

식(15)로부터 계산된 q 의 값을 이용하여 P_0 의 최적 값 \hat{P}_0 을 구할 수 있다. w_i 의 값을 구하기 r_i 를 아래 식(17)과 같다. 식(17)에서 v 는 초음파의 속도 (340m/s), t 는 TOF사용하여 구한 시간을 나타낸다. 하지만 초음파 특성상 P_i 와 P_0 사이의 거리가 멀어질 수록 초음파의 크기가 조금씩 작아진다. 약 40Khz의 발진주파수를 갖는 초음파의 속도 v 에서 만약 초음파 수신부에서 초음파의 한 주기를 놓친다면 8.5mm 정도의 오차가 생기는데 이를 Δt , 외부의 온도에 따라 v 의 값이 미세한 오차가 생기는데 이를 Δv 라고 정의 하였다. 여기서 Δt 와 Δv 는 오차가 작기 때문에 $\Delta t \Delta v \approx 0$ 으로 본다.

$$r_i = vt \quad (17)$$

$$= (\hat{v} + \Delta v)(\hat{t} + \Delta t)$$

$$\approx \hat{v}\hat{t} + \hat{v}\Delta t + \hat{t}\Delta v$$

$$= \hat{r}_i \left[1 + \frac{\Delta v}{\hat{v}} \frac{\Delta t}{\hat{t}} \right]$$

$$= \hat{r}_i + \alpha \hat{r}_i$$

$S(P_0)$ 에 r_i 를 대입하면 아래 식(18)과 같다.

$$S(P_0) = \sum_{i=1}^N \{(p_i - P_0)^T (p_i - P_0) - r_i^2\}^2 \quad (18)$$

$$= \sum_{i=1}^N \{r_i^2 - (\hat{r}_i + \alpha \hat{r}_i)^2\}^2$$

$$= \sum_{i=1}^N \{-2\alpha r_i^2 - \alpha^2 \hat{r}_i^2\}$$

$$= \sum_{i=1}^N \beta r_i^4$$

그러므로 식(18)로부터 w_i 를 구하면 식(19)과 같다.

$$w_i = \frac{\frac{1}{r_i^4}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i^4}} \quad (19)$$

식(19)에서 정규화된 w_i 를 식(15)에 대입하여 오차량이 최소화된 최적의 \hat{P}_0 위치를 구할 수 있다.

III. 시뮬레이션을 이용한 알고리즘 비교 분석

본 논문의 시뮬레이션은 그림 1과 같이 9개의 고정된 초음파 발신부 위치를 각 알고리즘에 동일하게 적용하였고, 또한 P_i 위치와 P_0 위치를 알고 있는 상태로 가정하여 거리 r_i 을 알 수 있다. 두 알고리즘에 각각 거리 r_i 과 오차 α 를 동일하게 적용하고, 이동형 개체 P_0 위치를 10군데의 각기 다른 위치에서 시뮬레이션 통해 두 알고리즘을 비교 분석하였다.

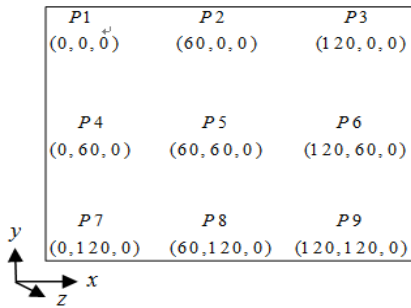


그림 1. 9개의 고정된 초음파 발신부 위치
Fig. 1 Fixed ultrasonic transmitters position of nine pieces

거리 r_i 와 α 를 가지고 Nonlinear least square 알고리즘과 Weighted nonlinear least square 알고리즘에 각각 적용하여 시뮬레이션 한 결과 그림 2, 3, 4과 같은 결과를 얻었다. 표2는 이동형 개체 P_0 의 3차원 좌표로 10군데의 각기 다른 위치를 나타낸 것이다.

표 2. 3차원 좌표(P_0)
Table 2. Three-dimensional coordination(P_0)

Data number	x_0	y_0	z_0
1	33	50	200
2	100	100	155
3	0	0	100
4	500	300	50
5	151	228	80
6	300	150	180
7	250	200	150
8	200	180	150
9	80	80	144
10	160	400	95

단위 : cm

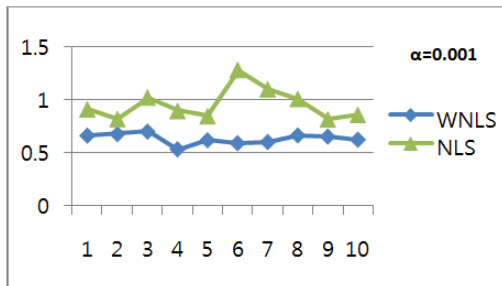


그림 2. 시뮬레이션 결과($\alpha=0.001$)
Fig. 2 Simulation result($\alpha=0.001$)

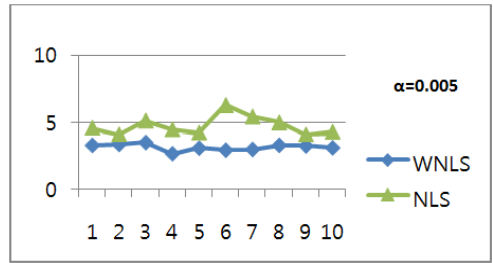


그림 3. 시뮬레이션 결과($\alpha=0.005$)
Fig. 3 Simulation result($\alpha=0.005$)

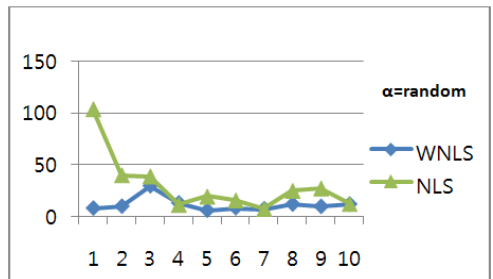


그림 4. 시뮬레이션 결과($\alpha=random$)
Fig. 4 Simulation result($\alpha=random$)

위치 오차를 비교하면 Nonlinear least square 알고리즘에서 위치를 시뮬레이션 결과 값 보다 weighted Nonlinear least square 알고리즘이 일반적으로 더 정확하게 위치가 결과 값이 나온다는 것을 그림 2,3,4에서 볼 수 있다. 그림 2,3,4의 x축은 Data number이고, y축은 $|P_0 - \hat{P}_0|$ 값이다.

VI. 결론

본 논문에서는 가상의 실내 환경에서 고정 장착된 9개의 초음파 발신부에 의해 정의되는 공간 내에서 각 두 알고리즘을 적용하여 얻어낸 이동형 개체의 위치 데이터들을 성능 분석하였다. 분석한 결과 weighted nonlinear least square 알고리즘이 위치 오차 값이 적은 알고리즘으로 이동형 개체의 위치인식 시스템에 적합한 알고리즘이라는 것을 알 수 있었다. 제안한 weighted nonlinear least square 알고리즘을 실제로 적용할 수 있는 실내에서 고정 장착된 9개의 초음파 발신부에 의해 정의되는 공간 내에서 쿼드러플터 같은 소형 비행체나 x, y, z 좌표 값이 필요한 이동형

다 개체 시스템의 위치 제어 및 모션 포착 기술에 효과적인 응용분야로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

그러므로 향후 과제로는 이동형 개체의 위치인식에서 대한 연구로 초음파 센서와 IMU 센서로 weighted nonlinear least square 알고리즘에 적용하여 위치인식 제어 및 자세제어에 대한 융합 연구가 필요하다. 따라서 이러한 연구가 추가 적으로 진행된다면 본 논문에서 제시하는 알고리즘으로 보다 더 정밀하고 광범위한 분야에 위치인식 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

[1] L. Wirola, I. Halivaara and J. Syrjarinne, "Requirements for the next generation standardized location technology protocol for location-based services," Journal of Global Positioning Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 91-103, Dec, 2008.

[2] D. G. Seo and J. M. Lee, "Localization Algorithm for a mobile robot using iGS," Proc.of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, pp. 6-11, July, 2008.

[3] J. J. Park, D. H. Lee, S. Y. Kim and Y. S. Mun, "A Study on the Recognizing Range Expansion Techniques of the Ultrasonic Location Awareness System for the Ubiquitous Computing", The Journal of The Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 31, No. 7B, pp. 595-601, July, 2006.

[4] Y. S. Nam, E. C. Choi and J. D. Huh, "Location Awareness Method using Vector Matching of RSSI in Low-Rate WPAN," Journal of Information Technology Applications & Management, Vol. 12, No. 4, pp. 93-104, Dec, 2005.

[5] J. J. Park, D. H. Lee and S. Y. Kim, "A Study on the Application of U-SAT System for the Indoor Positioning Technology of Ubiquitous Computing," Journal of International Journal of Control, Automation, and Systems Engi-

neering, Vol. 11, No. 8, pp. 1-8, August, 2006.

[6] N. Sirola, "Closed-form algorithms in mobile positioning: Myths and misconceptions," 7th Workshop. Positioning Navigation and Communication(WPNC), pp. 38-44, March, 2010.

[7] K. S. Yoon, "Improved Localization Algorithm for Ultrasonic Satellite System", The Journal of The Korean Institute of Electronic Communications Sciences, Vol. 6, No. 5, pp. 775-781, October, 2011.

[8] T. G. Kim, N. Y. Ko and S. W. Noh, "Particle Filter SLAM for Indoor Navigation of a Mobile Robot Using Ultrasonic Beacons", The Journal of The Korean Institute of Electronic Communications Sciences, Vol. 7, No. 2, pp. 391-399, April, 2012.

[9] C. S. Kim, "A Study on the Mac Protocol for Multichannel Network Underwater Acoustic Communication", The Journal of The Korean Institute of Electronic Communications Sciences, Vol. 1, No. 1, pp. 41-47, August, 2006.

저자 소개



최진희(Jin-Hee Choe)

2011년 목원대학교 지능로봇공학과 졸업(공학사)

현재 광운대학교 대학원 제어계측공학과 공학 석·박사통합 과정

※ 관심분야 : 지능 로봇 공학, 모터제어



최 익(Ick Choy)

1979년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1981년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2003년~현재 광운대학교 로봇학부 교수

※ 관심분야 : 서보제어, 전력전자, 전동기제어



조 황(Whang Cho)

1981년 인하대학교 기계공학과 졸업(공학사)

1985년 University of Texas Austin 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

1989년 University of Texas Austin 대학원 기계공학과 졸업(공학박사)

1990년~현재 광운대학교 로봇학부 교수

※ 관심분야 : 지능 로봇 시스템, 모빌리티 메커니즘 설계 및 제어