

LOS 알고리즘과 미지 입력 관측기에 기초한 선도-추종 대형 제어

LOS (Line of Sight) Algorithm and Unknown Input Observer Based Leader-Follower Formation Control

윤석민, 여태경*, 박성재, 홍섭, 김상봉

(Suk-Min Yoon, Tae-Kyeong Yeu, Seong-Jea Park, Sup Hong, and Sang-Bong Kim)

Abstract: This paper proposes about decentralized control approach based Leader-Follower formation control using LOS (Line of Sight) algorithm and unknown input observer. The position of robots which is a basic information in multi-robot or single robot motion control is determined by localization algorithm fusing UPS (Ultrasonic Position System) and kinematics model. For formation control, a decentralized control approach individually installing a local controller in leader and follower robot is adopted. Leader robot is controlled to track a specified trajectory by LOS algorithm, and the other robots follow the leader by local controller based on tracking platoon level function, self-sensing data and estimated information from unknown input observer. The performance of proposed method is proven through the formation experiment of two vehicle models.

Keywords: leader-follower formation control, decentralized control, LOS (Line of Sight), unknown input observer, ultrasonic position system, multi-robots

I. 서론

차량 로봇(vehicle robot)에 관한 여러 기술 중에서도 육상, 수중 그리고 공중에서의 일정한 대형(formation)을 이루며 업무를 수행하는 다중 로봇(multi-robot) 관련 기술이 최근 많은 각광을 받고 있다.

다중로봇 대형 제어 방법에는 선도-추종(leader-following) 방법, 가상 추종 방법(virtual leader approach) 그리고 행위 기반 방법(behavior based approach) 등의 다양한 방법이 지금까지 제안되고 있다. 선도-추종 방법[1]은 하나 또는 그 이상의 로봇이 대형을 인솔하는 선도자(leader)로 지명되고, 추종자(follower)로 지명된 나머지는 일정한 위치와 자세를 유지하면서 선도자를 따르도록 제어하는 것이다. 가상 선도자 방법[2]은 계획된 경로상의 기준점에서의 차량 운동을 오차를 포함하는 미분방정식으로 지배하는 방법으로, 전통적인 궤도 추적(trjectory tracking) 방법과 동적 경로 추종(dynamic path following) 방법을 조합한 것이다. 행위 기반 방법[3]은 단일 로봇의 간단한 행위들 즉, 회피(avoidance), 집결(agggregation), 분산(dispersion) 등을 적절히 조합하여 로봇 집단 전체의 합리적인 행위를 도출하는 것이다. 위에서 소개한 방법들 중, 특히 선도-추종 방법에 관한 연구들이 다양하게 소개되고 있다.

Desai[4]는 추종 로봇의 로컬 좌표계에서 선도 로봇의 절대 속도를 대형 추적 제어기의 입력으로 사용한다. 그러나

현실적으로 추종 로봇에서 선도 로봇의 절대 속도 계측은 불가능하다. Wesselowski[5]는 선도-추종 대형 제어를 위해, 운동학 방정식과 피드백 선형화 제어기에 기초한 제어기 설계법을, Sanchez[6]는 운동학 방정식에 기초한 슬라이딩 모드 제어기(sliding mode controller)를 제안하였다. Liu[7]는 2차계 운동학 모델(second order kinematics model)과 선도 로봇의 운동 및 대형 형상의 제한을 통해 강인한 대형 제어 방법을 제안하였다.

다중로봇의 대형 제어를 위한 제어방법은 초기에는 중앙 제어법(centralized control method)이 널리 사용되었지만, 프로세서의 성능 향상에 따라 로컬 시스템에 제어를 삽입하는 분산제어법(decentralized control method)이 최근 소개되고 있다. Beard[8]는 대형 제어를 위하여 분산 제어 방식을 기반으로 감독 장치(supervisor unit)와 제어 구조(control architecture)를 제안하였다. 여기서, 로컬 제어기는 장치들의 로컬 실증(instantiation) 상태를 예측할 목적으로 설계되었다. 그러나 대형과 로컬 행위자 사이의 상호연결성(interconnection)과 감독 장치와 행위 사이의 상호작용(interaction)을 고려하지 않았고, 로컬 제어에서 언급된 관측기 설계에 대해서도 자세히 설명하지 않았다. Stilwell[9]는 자율 이동 로봇의 대형 제어를 위하여, 행위자 사이의 최소한의 정보만 통신을 통해 공유하고, 나머지는 비선형 관측기를 통해 상태를 예측하는 방법을 제안하였다. Stilwell[10]은 대형 전체의 특성을 나타내는 대형 수준 함수(platoon lever function)와 외인성 시스템(exogenous system)을 통한 제어 방법을 제안하였다. Nguyen[11]은 대형 수준 함수와 관측기를 기반으로 한 분산제어 방법을 제안하였다. 여기서는 동일한 대형 수준 함수에 대하여 중앙제어기와 분산제어기의 시뮬레이션 결과를 비교함으로써, 분산제어기의 유효성을 검증하였다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 11. 13., 수정: 2009. 12. 15., 채택확정: 2009. 12. 30.
윤석민, 여태경, 박성재, 홍 섭: 한국해양연구원 해양시스템연구부
(aquiline@moeri.re.kr/yeutk@moeri.re.kr/parksj@moeri.re.kr/suphong@moeri.re.kr)

김상봉: 부경대학교 기계자동차공학부(sbkim@pknu.ac.kr)

※ 본 논문은 국토해양부 연구사업의 일부로 수행되었음.

본 논문에서는 분산제어법을 기반으로 LOS 알고리즘과 미지 입력 관측기를 이용한 선도-추종 대형 제어 방법을 제안하고 모델 실험을 통하여 성능을 검증하고자 한다.

대형 제어에서의 기본적으로 요구되는 로봇의 위치 정보는 초음파 위치시스템(ultrasonic position system)으로부터 얻어진다. 이것은 4개의 초음파 발신기로부터의 신호를 수신기가 받은 후, 도달 시간과 삼각법 알고리즘을 이용하여 위치를 계산한다. 실험을 위해 제작된 차량 모델은 크게 주행부와 중앙 제어부로 구성된다. 주행부에는 4개의 모터와 2개의 엔코더 그리고 엔코더 값과 모터의 속도 제어를 위한 컨트롤러(ATmega128L)가 탑재되어 있는 차량 몸체이다. 중앙 제어부는 리눅스 기반 S3C2440가 탑재된 임베디드 컨트롤러이다. 이것은 3개의 시리얼과 2개의 USB 포터를 지원한다. 2대의 차량 모델과 서버 컴퓨터로 구성된 대형 제어 실험 시스템은 무선 통신을 통해 대형 수준 정보를 공유한다.

본 연구에서 위치 측정을 위해 채택한 초음파 위치 시스템은 특성 상, 벽면 및 바닥 반사와 같은 환경적 오차와 다소 긴 측정 시간(0.6초)을 가진다. 이를 해결하기 위해, 초음파 위치 시스템으로부터의 계속된 값과 엔코더-차량 운동학 방정식을 이용한 위치 예측값을 융합한 위치 측정 알고리즘을 우선 제안한다. 이를 기반으로, 선도-추종 대형 제어와 각 차량 로봇에 로컬 제어를 삽입하는 분산제어법을 도입한다. 선도(leader)는 주어진 경로를 LOS 알고리즘을 이용하여 약속된 속도로 추종한다. 추종(follower)은 대형 수준함수의 변수, 미지 입력 관측기 그리고 자체 센서 정보에 기초한 제어칙에 의해 선도와 일정한 거리와 자세를 유지한다. 각 차량 로봇의 위치와 방위각 정보로부터 얻어지는 대형수준함수는 외부의 서버 컴퓨터에 의해 계산된 후, 추종 로봇에 방송중계(broadcasting) 방식을 통해 전달된다. 끝으로, 2대의 차량 모델을 이용한 대형 제어 실험을 통해 제안된 방법의 성능을 검증한다.

II. 초음파 위치시스템 및 차량 모델

1. 초음파 위치 시스템

본 연구에서 사용된 초음파 위치시스템은 공기 중의 초음파 전달 속도, 도달 시간 및 삼각법 원리를 이용하여 위치를 측정하는 장치이다[12].

이것은 그림 1과 같이 동기기(sync-generator), 발신기 그

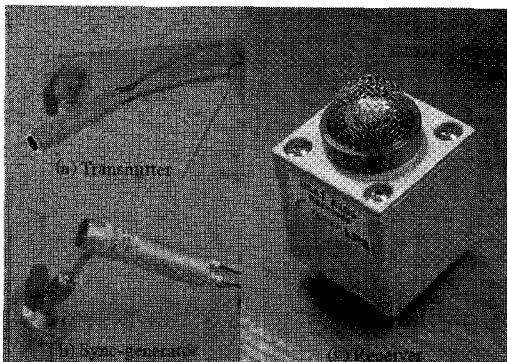


그림 1. 초음파 위치시스템.
Fig. 1. Ultrasonic positioning system.

리고 수신기로 구성된다. 물체의 위치를 계속하기 위해서는 최소 4개의 발신기가 필요하다. 먼저, 동기기는 RF 무선과 케이블을 통해 수신기와 발신기에 동기신호를 각각 발송한다. 발신기는 동기 신호에 의해 0.15초 간격으로 1에서 4번 순서로 초음파를 발생시킨다. 4개의 발신기로부터의 신호가 들어오면 수신기는 내부 프로세싱을 거쳐 위치를 계산하고, 그 결과를 시리얼 통신을 통해 외부로 전송한다. 따라서 위치 측정에는 약 0.6초의 시간이 소요된다.

본 연구에서 채택한 초음파 위치 시스템은 여러 개의 수신기를 동시에 사용할 수 있어 다중 로봇의 위치 및 방위각 측정에 매우 적합하다.

2. 차량 모델 및 네트워킹

실험용으로 제작된 차량모델은 크게 구동부와 중앙제어부로 구성된다(그림 2). 구동부는 ATmega128L, 4개의 DC 모터 그리고 2개의 엔코더(encoder)가 탑재되어 있다. 양쪽 뒷바퀴에 부착된 엔코더 값과 바퀴 속도 제어를 위한 입력 값은 ATmega128L을 통해 임베디드 컨트롤러와 송수신한다.

리눅스(linux) 기반의 중앙 제어부에는 S3C2440 임베디드 컨트롤러가 탑재되어 있다. 여기에는 3개의 시리얼 포터와 2개의 USB 포터가 지원된다. 3개의 시리얼 포터는 2개의 수신기와 차량 몸체에 장착된 ATmega128L와의 통신에 사용된다. 2개의 수신기는 차량의 위치와 방위각을 동시에 계속하기 위한 용도이다. USB포터에는 무선 수신기를 연결하여 서버와 차량 사이의 무선통신을 실현하였다.

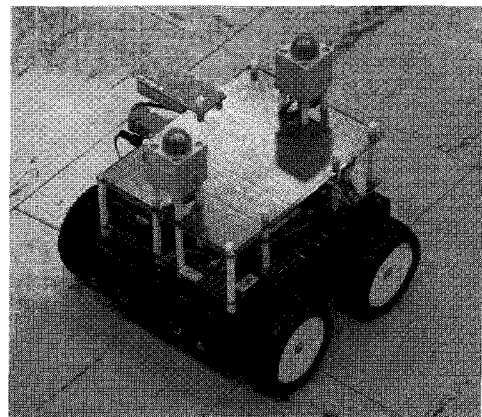


그림 2. 제작된 차량 모델.
Fig. 2. Manufactured vehicle model.

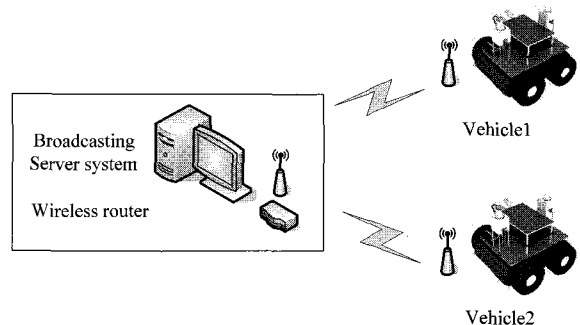


그림 3. 네트워크 시스템.
Fig. 3. Network system.

임베디드 컨트롤러는 0.1초 간격으로 엔코더 데이터를 읽고 모터 속도를 제어한다. 차량 구동 및 컨트롤러의 전원 공급을 위해 11.1V, 5400mA 용량의 배터리가 차량 몸체에 장착되어 있다. 대형 제어 실험을 위해, 각 차량과 외부에서 이를 감독지원하는 서버 컴퓨터를 두었고, 무선 네트워크를 통해 서로의 정보를 교환하도록 하였다. 서버 컴퓨터는 각 차량으로부터 위치 및 방위각 정보를 제공받고, 대형 수준 함수를 계산하여 그 결과를 방송중계 방식을 통해 각 로봇으로 전송하는 역할을 담당한다(그림 3).

III. 차량 위치 판별

1. 차량의 운동학 방정식을 이용한 위치 예측

로봇의 경로 추종 및 대형 제어 시험에 있어 기본적으로 중요한 것이 정확한 위치 정보이다.

본 연구에서는 초음파 위치 시스템을 사용한다. 이것의 성능 확인을 위해, 차량을 자율 주행(직진 및 선회)시키면서 수신기로부터 위치 데이터를 얻고, 이를 우선적으로 분석해 보았다(그림 4).

그림 4의 결과로부터, 계속된 데이터는 계속 오차와 데이터 누락이 불규칙적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 바닥 및 지면 반사에 의한 환경적 외란과 수신기 자체의 성능에 의한 것으로 분석된다.

초음파 위치시스템은 0.6초 간격으로 위치 정보를 출력한다. 이것은 차량 로봇의 정밀 제어 측면에서 상당히 긴 시간에 해당된다. 따라서 그 간격 사이에서의 위치 정보가 반드시 요구된다.

본 연구에서는 측정된 위치값과 차량의 운동학 방정식에 0.1초 간격으로 출력되는 엔코더의 속도값을 대입함으로써 위치를 간접적으로 예측하는 방법을 융합하는 위치 측정 알고리즘을 고려한다.

그림 5는 차량 모델의 운동학적 모델링을 위해서 차량에 대한 절대 좌표와 차량의 로컬 좌표를 각각 나타낸 것이다. 차량의 무게중심 좌표는 $COM=(X, Y, Z)$ 로 표현되며, 여기서는 평면 운동만을 고려한다. 따라서 차량의 일반화 좌표 벡터는 $q=[X, Y, \theta]^T$ 로 정의할 수 있다.

차량의 로컬 좌표계에서의 x 방향 속도와 선회 각속도 ω 로 이루어진 벡터와 차량 일반화 좌표계의 속도 벡터와의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

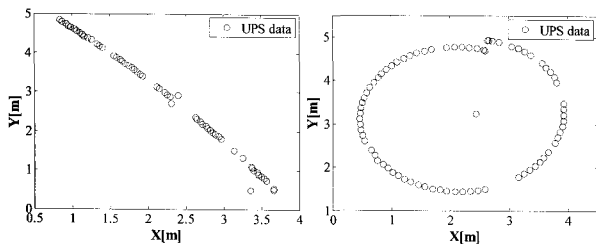


그림 4. 초음파 위치 시스템의 측정 데이터.
Fig. 4. Original data of ultrasonic positioning system.

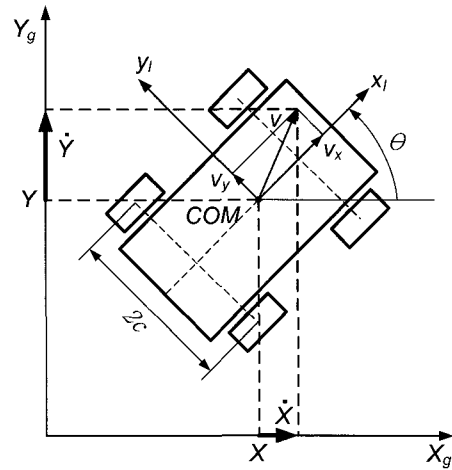


그림 5. 4바퀴 차량 좌표계.
Fig. 5. Coordinates of four-wheel vehicle.

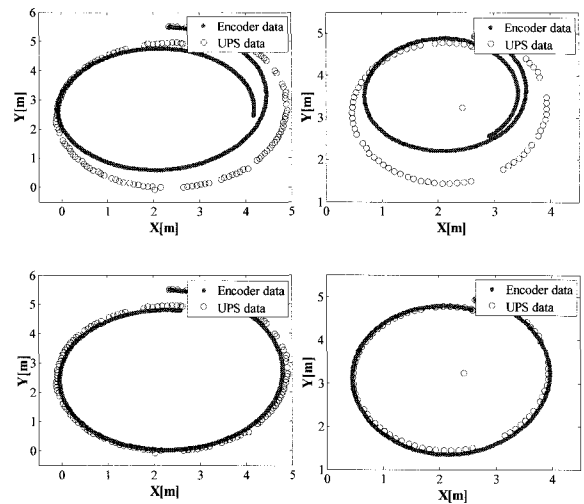


그림 6. 측정된 위치 결과와 예측된 결과.
Fig. 6. Measured and estimated position data.

또한, 로컬 좌표계의 속도 성분은 양쪽 바퀴의 속도 성분으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_x \\ \omega \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \frac{\omega_L + \omega_R}{2} \\ -\frac{\omega_L - \omega_R}{2c} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 ω_L, ω_R 은 좌우측 바퀴의 각속도, r 는 바퀴의 반지름 그리고 c 는 양쪽 바퀴 사이 거리의 절반을 나타낸다.

선회비를 1.1007과 1.1740으로 설정하여 자율 주행시키려는 엔코더 값과 차량에서 직접 실측한 $r=0.044, c=0.106$ 을 대입하여 얻은 위치 정보는 그림 6의 상단과 같다. 여기서, 'o'은 초음파 위치 시스템부터의 측정된 결과이며, '.'은 운동학 방정식으로부터 예측된 값이다. 이로부터 실측된 값과 예측된 값 사이에는 상당한 오차가 있음을 알 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 최적의 r, c 값을 찾는 알고리즘을 제안한다. 이것은 일정 범위 내에서 r, c 값을

변화시키면서 얻어진 값과 다양한 선회 주행 실험(선회비 : 1.1007, 1.1740, 1.2430, 1.3159, 1.3831, 1.4557)에서의 결과값 사이의 오차를 최소화하는 r , c 를 계산하는 방법이다.

그림 6의 하단은 상기의 알고리즘을 통해 출력된 $r=0.042$, $c=0.135$ 을 적용하여 얻어진 위치 결과이다. 이것은 실측한 r , c 값을 이용하는 것보다는 오차가 상당히 줄었지만, 소량의 오차가 지속적으로 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

2. 위치 측정 알고리즘

본 연구에서는 초음파 위치 시스템으로부터의 계측된 값과 운동학 방정식으로부터의 예측값을 결합시켜 계산하는 차량 위치인식 절차는 다음과 같다.

1. 매번 0.1초 간격으로 엔코더 정보와 운동학 방정식으로부터 위치와 방위각을 계산한다.
2. 0.6초가 되는 순간은 2개의 수신기로부터 출력된 위치 정보를 가져온다.
 - 1) 각 수신기로부터의 출력된 정보의 신뢰성을 판별한다.
 - a) 각 수신기의 이전 위치 정보와 현재 정보와의 차를 구한 후, 설정 범위 내에 존재하면 우선적으로 신뢰할 수 있다고 가정하고, 그렇지 않으면 신뢰할 수 없는 것으로 판단한다.
 - b) 앞 · 뒤 두 개의 수신기 모두 신뢰할 수 있다고 판단되면, 다음으로 두 수신기 사이의 거리가 실제 설치된 거리 범위 내에 있는지를 판단한다.
 - 2) 1)의 과정을 통해 두 개의 정보 모두 신뢰할 수 있다면, 이것을 이용하여 차량의 위치와 방위각을 계산한다.
 - 3) 1)의 과정을 통해 단 한 개의 정보만 신뢰할 수 있다면, 그것의 위치 정보와 운동학 방정식으로부터 예측된 방위각 정보를 이용하여 차량 중심 위치를 계산한다.
 - 4) 1)의 과정을 통해, 두 개 모두 신뢰할 수 없다면, 1. 과정을 통해 계산된 결과를 이용한다.
3. 최종적으로 위치와 방위각을 결정한다.
 - 1) 상기 2 과정에서 2)와 4)의 경우는 계산된 값을 그대로

로 결정한다.

- 2) 상기 2과정에서 3)의 경우는 3)에서 결정된 위치와 1 과정에서 계산된 위치의 중간점을 최종 위치로 결정한다.

제안된 위치 측정 알고리즘을 통해 얻어진 결과는 그림 7과 같다.

그림 7에서의 상단은 직진 주행을, 하단은 급속한 선회 주행을 통해 얻어진 위치 측정 결과이다. 여기서 실선은 제안된 알고리즘으로부터 계산된 값이며, 점선은 기준 좌표로서 수 mm의 측정 오차를 갖는 팔콘 카메라(falcon camera) 시스템을 이용하여 계측된 결과이다.

상단의 직진 주행에서는 위치 오차가 4cm 이하인 반면, 하단의 선회 주행에서는 최대 20cm까지 오차가 발생한다. 이와 같이, 선회 주행에서 오차가 크게 발생하는 것은 초음파 위치시스템 자체가 갖는 오차와 더불어 이를 이용하여 차량 방위각까지 계산하기 때문인 것으로 분석된다.

IV. 선도-추종 대형 제어

먼저, 다중 차량 로봇의 대형 특성을 나타내는 대형 수준 함수는 각 차량의 위치 및 방위각 정보를 이용하여 서버 컴퓨터에서 계산된다. 계산된 결과는 방송 중계 방식을 통해 각 차량에 전달한다. 각 차량 로봇은 대형 수준 함수 값과 자체 계측된 센서 정보로부터 대형 제어를 수행한다.

본 연구에서의 선도 로봇은 주어진 경로만을 추종하도록 제어된다. 경로 추종을 위하여 LOS 알고리즘이 적용된다. 추종 로봇은 대형 수준 함수에 의해 선도와 일정한 간격을 유지하면서 움직이도록 제어된다. 이를 위해, 추종 로봇은 선도 로봇의 방위각 정보가 반드시 필요하지만, 자체적으로 얻을 수 없다. 따라서 방송 중계된 대형 수준 함수 값을 기반으로 미지 입력 관측기를 통해 예측하게 된다. 예측된 선도의 방위각, 자신의 방위각, 수신된 대형 수준 함수 값 그리고 로컬 제어치(local control gain)로부터 제어 입력이 최종적으로 결정된다. 이러한 과정은 그림 8과 같이 간략하게 설명된다.

1. 대형수준함수(platoon level function)

식 (1)에 의해 모델링된 차량 로봇 N 개로 구성된 전체

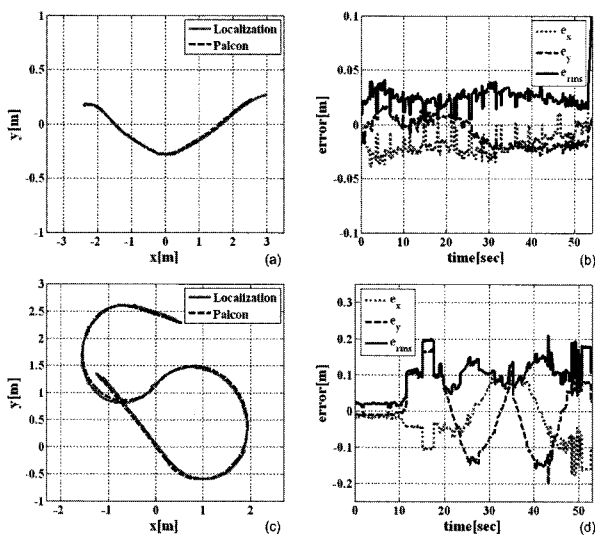


그림 7. 위치 측정 결과.
Fig. 7. Result of localization.

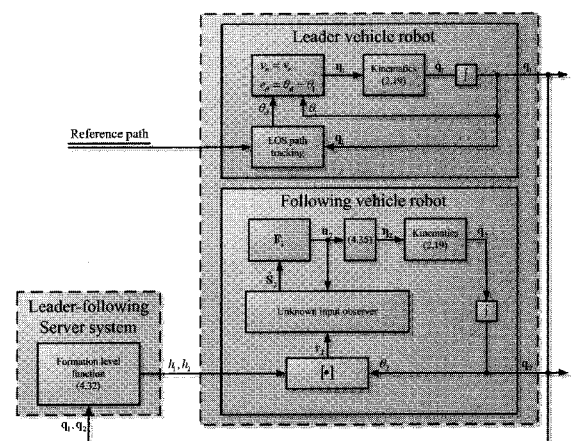


그림 8. 선도-추종 제어의 개념.
Fig. 8. Concept of leader-follower control.

시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$Q = [X_\Sigma, Y_\Sigma, \theta_\Sigma]^T \quad (3)$$

여기서 $X_\Sigma = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$, $Y_\Sigma = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]^T$, $\theta_\Sigma = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ 그리고 $Q_i = [X_i, Y_i, \theta_i]^T$ 는 i 번째 차량 로봇의 좌표와 전진 방위각 정보를 가지는 일반화 좌표 벡터이다. 제어 입력은 다음과 같이 표현된다.

$$u = [v_\Sigma, w_\Sigma]^T \quad (4)$$

여기서, $v_\Sigma = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$ 과 $w_\Sigma = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 그리고 v_i, w_i 는 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 번째 차량 로봇의 전진속도 및 회전각속도를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 차량의 평균 위치와 같은 대형의 특성을 나타내는 함수 $h(X)$ 가 선형이며, 미분가능하다고 가정한다.

N 개의 차량 로봇으로 구성된 그룹의 대형을 제어하는데 있어, 특정 상태 변수와 대형 수준 함수는 전체 목적에 대한 시스템의 상태를 나타낸다. 전체 차량 로봇의 대형에 관한 시스템 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \dot{S}(t) = AS(t) + Bu(t) \\ y(t) = CS(t) \end{cases} \quad (5)$$

여기서, $S(t) = [\theta_\Sigma, h]^T$ 는 상태 벡터이고, θ_Σ 은 전체 시스템의 상태 변수, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^r$ 는 입력과 출력 벡터를 각각 나타낸다. 선형 가능하다는 조건 하에서, $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$ 그리고 $C \in R^{r \times n}$ 는 각각 상수 값을 갖는 행렬이다.

2. 선도 로봇 제어(leader control)

본 연구에서의 선도 로봇은 지정된 경로를 추종하는 임무를 수행한다. 주어진 차량 로봇의 경로는 그림 9와 같은 다수의 경로점(waypoint)의 집합으로 이루어지며, 차량의 목표 지향점 (x_{los}, y_{los}) 과 지향각 ϕ_d 으로부터 차량의 전진방향 속도 v_n 와 방위각이 결정된다. 여기서는 v_n 은 일정하다고 가정한다.

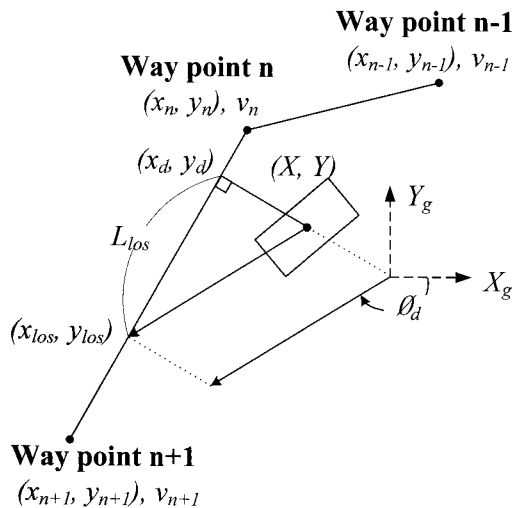


그림 9. 경로점과 LOS 알고리즘 개념도.

Fig. 9. Way point and LOS concept.

고 가정한다.

차량의 현 위치가 (X, Y) 일 때, 차량의 위치와 가장 가까운 경로상의 위치 (x_d, y_d) 가 n 과 $n+1$ 번째 경로점을 잇는 선분을 내분하는 점이라고 하면, 벡터 내적을 구하는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$u_p = \frac{(X-x_n)(x_{n+1}-x_n) + (Y-y_n)(y_{n+1}-y_n)}{(x_{n+1}-x_n)^2 + (y_{n+1}-y_n)^2} \quad (6)$$

이것으로부터 경로상의 가장 가까운 위치는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} x_d &= x_n + u_p(x_{n+1}-x_n) \\ y_d &= y_n + u_p(y_{n+1}-y_n) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 u_p 는 0과 1사이의 값으로 이 값이 1에 가까우면 (x_d, y_d) 가 (x_{n+1}, y_{n+1}) 에 가까이 있음을 선형적으로 나타내는 파라미터이다. 최종 목표 지향점 (x_{los}, y_{los}) 과 최종 목표 지향각 ϕ_d 는 LOS 상수로 불리는 L_{los} 을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} (x_{los}, y_{los}) &= (x_d, y_d) + L_{los} \\ \phi_d &= \arctan 2(y_{los} - Y, x_{los} - X) \end{aligned} \quad (8)$$

최종 목표 지향점 (x_{los}, y_{los}) 가 n 과 $n+1$ 번째 경로점 상에 없을 경우는 다음으로 이동하여 찾는다.

3. 추종 로봇 제어(follower control)

추종 로봇의 경우는 대형수준함수의 변수, 미지 입력 관측기와 자체 센서 정보를 이용하여 선도와 일정한 거리 및 자세를 유지하게 된다.

시스템의 모든 입력을 알고 있을 때, 시스템의 상태를 관측하는 관측기를 일반화 관측기라고 한다면, 외란과 같은 미지의 입력을 포함한 시스템의 상태를 추정하는 것을 미지 입력 관측기(unknown input observer)라고 한다.

식 (5)와 같은 N 개의 차량 로봇을 가지는 전체 시스템에서, 미지 입력 항을 가지는 i 번째 차량 로봇의 시스템 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{S}(t) = AS(t) + B_i u_i(t) + B_{ri} u_{ri}(t) \\ y_i(t) = C_i S(t) \end{cases} \quad (9)$$

여기서, $A \in R^{n \times n}$ 는 전체 시스템 행렬이고 $B_i \in R^{n \times m_i}$ 와 $B_{ri} \in R^{n \times (m-m_i)}$ 는 각각 i 번째 차량 로봇 시스템의 입력 행렬과 그것을 제외한 다른 차량 로봇들의 입력 행렬을 나타낸다. 이것이 i 번째 차량 로봇에서 측정할 수 없는 미지의 입력항이다.

위의 식 (9)에 대한 미지 입력 관측기는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_i(t) = \hat{A}_i \hat{z}_i(t) + \hat{B}_i y_i(t) + \hat{J}_i u_i(t) \\ \hat{S}_i(t) = \hat{C}_i \hat{z}_i(t) + \hat{D}_i y_i(t) \end{cases} \quad (10)$$

여기서, $\hat{S}_i(t) \in R^n$ 와 $\hat{z}_i(t) \in R^n$ 는 i 번째 차량 로봇의 추정된 상태 벡터와 관측기 상태 벡터를 각각 나타낸다. $\hat{A}_i \in R^{n \times n}$, $\hat{B}_i \in R^{n \times r_i}$, $\hat{C}_i \in R^{m \times n}$, $\hat{D}_i \in R^{n \times r_i}$ 그리고

$\hat{J}_i \in R^{n \times m_i}$ 는 관측기 행렬들이다. 이러한 미지 입력 관측기가 존재하기 위한 조건은 다음과 같다.

정리: 다음의 조건들을 만족시키는 행렬 $U_i \in R^{n \times n}$ 가 존재하면, 식 (10)의 미지 입력 관측기는 설계 가능하다[13].

$$\begin{aligned} \lambda_i \begin{bmatrix} \hat{A}_i \\ \hat{C}_i \end{bmatrix} < 0, \quad i=1,2,\dots,n_i \\ \hat{A}_i U_i + \hat{B}_i C_i = U_i A \\ \hat{J}_i = U_i B_i \\ U_i D_i = 0, \quad D_i = B_{ri} \\ \hat{C}_i U_i + \hat{D}_i C_i = I_{n_i} \end{aligned} \quad (11)$$

이를 만족하는 U_i 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} U_i &= (I_n - G_i C_i) I_n - D_i (C_i D_i)^+ C_i = I_n - \hat{D}_i C_i \\ \hat{A}_i &= U_i A - K_i C_i \\ \hat{B}_i &= \hat{A}_i \hat{D}_i + K_i \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $\lambda[\cdot]$ 는 행렬 고유치를 나타내며, K_i 는 행렬식 $(U_i A, C_i)$ 를 안정화시키는 것이며, G_i 는 $(I_n - G_i C_i)$ 를 비특이(nonsingular) 행렬로 만드는 행렬이다. ■

전체 시스템이 가제어하다면 제어칙(control law)은 다음과 같이 표현된다.

$$u = -FS(t) \quad (13)$$

여기서 $F \in R^{m \times n}$ 는 상태피드백 게인이다. 따라서 식 (10)의 미지 입력 관측기로부터 추정된 상태와 식 (13)의 피드백 제어칙으로부터, i 번째 차량 로봇의 분산 제어기는 다음과 같다.

$$u_i(t) = -F_i \hat{S}(t) \quad (14)$$

여기서, $F_i \in R^{r_i \times n}$ 는 식 (13)의 F 의 i 번째 로봇의 입력과 관련된 행이다.

4. 실험 결과(experimental result)

본 연구에서는 두 대의 차량 로봇, 선도(vehicle 1)와 추종(vehicle 2) 그리고 식 (15), (16)과 같이 정의된 두 가지 형태의 대형 수준 함수를 이용하여 대형 제어 실험을 수행하였다.

$$\begin{aligned} h_1 &= x_1 - x_2 + \alpha(\theta_1 - \theta_2) - 0.5 \\ h_2 &= y_1 - y_2 + \beta(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} h_1 &= x_1 - x_2 + \alpha(\theta_1 + \theta_2) \\ h_2 &= y_1 + y_2 + \beta(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, (x_1, y_1, θ_1) 와 (x_2, y_2, θ_2) 는 선도와 추종 로봇의 좌표와 방위각을 각각 나타내며, α, β 는 차량의 선회에 의해 발생하는 거리 오차의 수준을 나타내는 상수이다. 식 (15)에서는 추종 로봇이 선도 로봇의 0.5m 뒤에 위치하게 되며, 식 (16)에서는 선도와 y 축에 대칭을 이루며 이동한다. 전체 대형 함수의 상태 변수는 $S = [\theta_1 \theta_2 h_1 h_2]$ 와 같다.

대형 제어를 위해 식 (15)의 대형수준함수를 이용하면, 전체 시스템 방정식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{cases} \dot{S}(t) = AS(t) + B_1 u_1(t) + B_2 u_2(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} S(t) \\ u_1 = \begin{bmatrix} v_{x1} - v_r \\ \omega_1 - \omega_r \end{bmatrix}, u_2 = \begin{bmatrix} v_{x2} - v_r \\ \omega_2 - \omega_r \end{bmatrix} \\ A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_r - v_r & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & \alpha \\ 0 & \beta \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -\alpha \\ 0 & -\beta \end{bmatrix} \\ C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

여기서 v_r, ω_r 는 차량의 기준 속도와 선회 각속도이다. 대형함수의 특성값은 $\alpha = 0.05, \beta = 0.03, v_r = 0.1237, \omega_r = 0$ 와 같이 선정하였으며, 전체 시스템을 안정화시키는 페루프 제어기는 극 배치법(pole assignment approach)을 이용하여 다음과 같이 설계되었다.

$$F = [F_1 \ F_2] = \begin{bmatrix} -0.0117 & 0.0117 & 0.2 & -0.0253 \\ 0.4348 & -0.0348 & 0 & 0.5053 \\ 0.0117 & -0.0117 & -0.2 & 0.0253 \\ -0.0348 & 0.4348 & 0 & -0.5053 \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 극은 $\gamma = [-0.25 - 0.25j - 0.25 + 0.25j - 0.4 - 0.4]$ 으로 정의하였다. 식 (12)의 G_i 는 식 (19)과 같으며, K_i 는 선형 최적 제어기법(LQR)을 이용하여 식 (20)과 같이 설계되었다.

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 10 & 2.9195 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} 2.9195 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.0711 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.7735 \end{bmatrix} \quad (20)$$

위의 결과들로부터, 추종 로봇의 미지 입력 관측기는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} \hat{D}_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 33.3333 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, U_2 = \begin{bmatrix} 1 & -10 & -33.3333 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \hat{A}_2 &= \begin{bmatrix} -4.1233 & 1.2038 & 0 & 0 \\ 0 & -10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -7.0711 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5.7735 \end{bmatrix} \\ \hat{B}_2 &= \begin{bmatrix} -1.2038 & 0 & -137.4444 \\ 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

차량의 대형 제어를 위한 대형수준함수는 식 (15), (16)의 초기 상태는 식 (21), (22)와 같다. 이때 선도로봇이 추종하는 경로는 $y = \cos(x+3.5)/4, y = \cos(x+3.5)/4+1$ 이다.

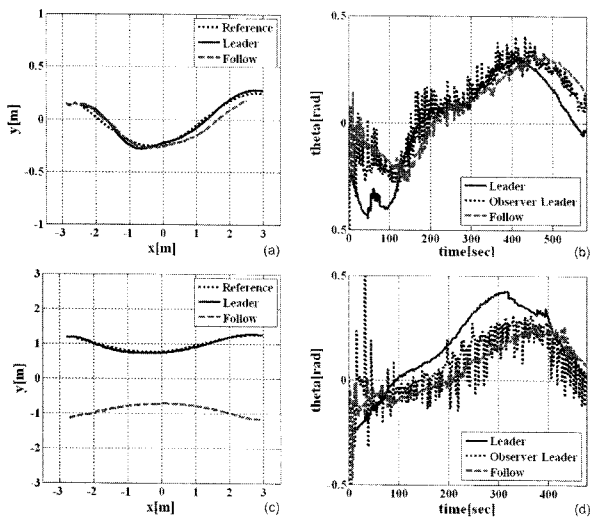


그림 10. 대형 제어 시험 결과.

Fig. 10. Experimental results of formation control.

$$\leq \text{ader} : \begin{pmatrix} x_1 = -2.4162 \\ y_1 = 0.1339 \\ \theta_1 = -0.1273 \end{pmatrix}, \text{Follower} : \begin{pmatrix} x_2 = -2.8933 \\ y_2 = 0.1468 \\ \theta_2 = 0.0736 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\leq \text{ader} : \begin{pmatrix} x_1 = -2.7749 \\ y_1 = 1.1617 \\ \theta_1 = -0.0238 \end{pmatrix}, \text{Follower} : \begin{pmatrix} x_2 = -2.7053 \\ y_2 = -1.1545 \\ \theta_2 = 0.0514 \end{pmatrix} \quad (22)$$

지금까지의 설계값을 이용하여 대형 제어 실험을 수행한 결과는 그림 10과 같다. 여기서 (a)는 식 (15)의 대형 수준 함수를 적용하여 실험한 결과이며, (b)는 각 차량의 수신기로부터 측정된 방위각과, 추정 로봇의 관측기로부터 추정된 선도 로봇의 방위각을 각각 나타낸 것이다. 그리고 (c)와 (d)는 식 (16)의 대형수준 함수를 이용하여 얻어진 결과이다. (a)와 (c)에서 ‘짧은 점선’은 지정한 경로를 나타내며, ‘실선’과 ‘긴 점선’은 선도와 추종 로봇의 움직인 경로를 나타낸다. (b)와 (d)에서는 ‘실선’과 ‘긴 점선’은 선도와 추종 로봇에서 자체 계측된 방위각이며, ‘짧은 점선’은 추정된 선도 로봇의 방위각이다.

위의 실험 결과로부터, 선도 로봇의 경로 추적 성능은 최대 오차가 5cm 이내로 매우 뛰어난 것으로 확인되었다. 그러나 추종 로봇의 제어 성능은 오차가 최대 15cm까지 발생하였다. 이것은 다소 부족한 모터 토크와 위치 측정 오차, 그리고 추종 로봇에 실장된 관측기와 제어기의 계인이 적절하게 설정되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 LOS 알고리즘과 미지 입력 관측기를 기반으로 분산 제어법을 이용한 선도-추종 대형 제어 방법을 제안하고 모델 성능 실험을 수행하였다.

대형 실험을 위해 차량 구동부와 임베디드 컨트롤러부로 구성된 두 대의 차량 로봇을 제작하였고, 각각의 로봇 위치 정보는 초음파 위치시스템으로부터 얻었다.

초음파 위치 시스템의 특성 상, 벽면 및 바닥 반사와 같은 환경적 오차와 다소 긴 측정 시간 간격을 극복하기 위

해, 계측된 값과 엔코더-차량 운동학 방정식을 융합한 위치 측정 알고리즘을 제안하였고, 고정밀 카메라 계측 시스템과의 비교를 통해 그 성능을 입증하였다.

선도-추종 방식을 이용하는 대형 제어에 있어서는, 각 차량 로봇에 로컬 제어기를 삽입하여 대형을 제어하는 분산 제어법을 제안하였다. 선도 로봇은 주어진 경로를 LOS 알고리즘에 의해 추종하고, 추종 로봇은 대형수준함수의 변수, 미지 입력 관측기 그리고 자체 센서 정보에 기초하여 선도 로봇을 추종하며 대형을 유지하도록 제어된다. 끝으로, 2대의 차량 모델을 이용한 2가지 형태의 대형 제어 실험을 통해 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

참고문헌

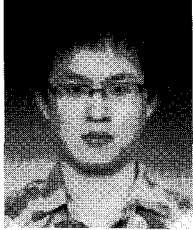
- [1] T. Arai, E. Pagello, and L. E. Parker, "Editorial: advances in multi-robot systems," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 655-661, 2002.
- [2] M. Egerstedt, X. Hu, and A. Stotsky, "Control of mobile platforms using a virtual vehicle approach," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 46, no. 11, pp. 1777-1782, 2001.
- [3] J. Fredslund and M. J. Mataric, "A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 5, pp. 837-846, 2002.
- [4] J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar, "Controlling formation of multiple mobile robots," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2864-2869, 1998.
- [5] K. Wesselowski and R. A. Fierro, "A dual-mode model predictive controller for robot formations," *Proc. of IEEE International Conference on Decision and Control*, pp. 3615-3620, 2003.
- [6] J. Sanchez and R. Fierro, "Sliding mode control for robot formations," *Proc. of IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 438-443, 2003.
- [7] S. C. Liu, D. L. Tan, and G. J. Liu, "Robust leader-follower formation control of mobile robots based on a second order kinematics model," *Acta Automatica Sinica*, vol. 33, no. 9, pp. 947-955, 2007.
- [8] R. W. Beard, J. Lawton, and F. Y. Hadaegh, "A coordination architecture for spacecraft formation control," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 777-790, 2001.
- [9] D. J. Stilwell and B. E. Bishop, "A framework for decentralized control of autonomous vehicles," *Proc. of IEEE International Conference Robotics & Automation*, pp. 2358-2363, 2000.
- [10] D. J. Stilwell, "Decentralized control synthesis for a platoon of autonomous vehicles," *Proc. of IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp.

744-749, 2002.

- [11] A. Nguyen, Q. Ha, S. Huang, and H. Trinh, "Observer-based decentralized approach to robotic formation control," *Proc. of the 2004 Australasian Conference on Robotics & Automation*, Australia, pp. 1-8, 2004.

- [12] 이동환, 김수용, 이만형 "유비쿼터스 컴퓨팅의 실내 측위 기술을 위한 U-SAT 시스템의 적용에 관한 연구," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지*, 제 11권 제 8호, 2006.

- [13] T. K. Yeu, W. S. Kim, and S. Kawaji, "Fault detection, isolation and reconstruction for descriptor systems," *Asian Journal of Control*, vol. 7, no. 4, pp. 1-15, 2005.



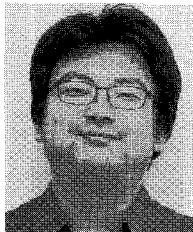
윤 석 민

2006년 부경대 지능기계공학과 졸업. 2008년 부경대 메카트로닉스공학 대학원 석사. 2009년~현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 지능시스템, 분산 제어, 임베디드 시스템.



여 태 경

1998년 부경대 기계공학과 졸업. 2000년 동 대학원 석사. 2003년 일본 쿠마모토대학 시스템정보공학 박사. 2005년~현재 한국해양연구원 해양시스템연구부 선임연구원. 관심분야는 수중 로봇 제어, 분산 제어, 최적 제어.



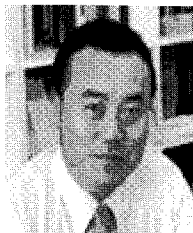
박 성 재

2001년 부경대 기계공학과 졸업. 2003년 동 대학 메카트로닉스 공학 석사. 2005년 동 대학원 박사 수료. 2005년~현재 한국해양연구원 해양시스템연구부 연구원. 관심분야는 자동 제어 및 응용, 모니터링 시스템.



홍 섭

1983년 서울대 조선공학과 졸업. 1985년 서울대 조선해양공학과 대학원 석사. 1992년 독일 아헨공대 해양공학 박사. 1994년~현재 한국해양연구원 해양시스템연구부 책임연구원. 관심분야는 해양구조물 및 장비 동역학, 설계.



김 상 봉

1978년 부산수산대 기관공학과 졸업. 1980년 동 대학원 석사. 1988년 동경공업대 제어시스템공학과 박사. 1988년~현재 부경대 기계공학과 교수. 관심분야는 메카트로닉스, 비선형제어.