

출력제한을 이용한 이동로봇의 선형 적응순항제어

변상훈\*, 이기룡, 좌동경\*\*, 홍석교  
아주대학교 전자공학부

Linear Output Feedback Adaptive Cruise Control for the Mobile Robot

Sang-Hoon Byun\*, Giroung Lee, Dongkyoung Chwa\*\*, Suk-Kyo Hong  
Ajou University

**Abstract** - 본 논문에서는 센서기반 이동로봇의 적응 순항 제어를 위한 선형 관측기 기반의 출력 제한 제어 방법을 제안한다. 제안된 제어 방법에서는 선도로봇의 속도를 모르는 상태에서 거리센서를 통해 선도 로봇과의 거리를 측정하고 속도와 가속도를 추정하기 위하여 선형 관측기를 이용한다. 마지막으로, 컴퓨터 모의실험과 실제 적용실험을 통해 본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

1. 서 론

적응 순항 제어(Adaptive Cruise Control, ACC) 기법은 차량 간의 안전성 개선을 위해 많은 연구와 투자가 이루어지고 있다. [1] ACC란 자동차 운행 중 센서를 통해 감지한 상황을 인식하여 주행 상황에 맞는 능동적인 대처를 하여 안전성을 높이는 기술을 말한다. 이 기술은 장거리 운전에서 운전자의 편의성을 위하여 일정속도와 거리를 설정하면 설정된 속도를 유지시켜주고 전방의 교통상황을 적극적으로 모니터링하여 엔진과 브레이크를 제어하여 편의성과 안전성을 제공한다.

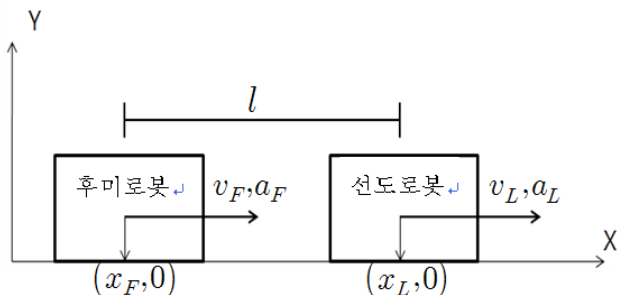
최근에 차량에서는 카메라를 이용한 비전시스템과 레이저 스캐너를 기반으로 선도차량의 위치를 획득하여 ACC를 연구하고 있다. 하지만 비전시스템과 레이저 스캐너의 경우 선도 차량의 위치정보만을 획득할 수 있는 단점이 있다. 따라서 보다 정확한 제어를 위하여 선도 차량의 위치뿐만 아니라 속도 및 가속도 정보를 추정할 필요가 있다.

위와 같이 ACC의 연구는 차량 뿐만 아니라 다개체 로봇시스템에도 적용할 수 있는데 현재 군집제어 분야에서 이동로봇간의 거리와 속도 유지는 통신을 통해 선도로봇의 속도정보를 획득하여 거리와 속도를 유지하는 선도-추종 (Leader-following) 방법과[2], 행동 기반(behavior-based)방법[3] 등을 적용하고 있다. 하지만 선도-추종 방법의 경우 통신 오류 등으로 인해 정확한 제어를 하지 못할 수 있다. 심지어는 통신이 끊어질 경우 제어 불능상태에 빠질 수도 있다. 행동 기반 방법의 경우는 수학적 안정성 해석이 어렵다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 적응 순항 제어를 위한 선형 관측기 기반의 출력 제한 제어 방법을 제안한다. 적응 순항 제어를 하는데 있어 선도로봇의 위치 정보만 알고 있다고 가정하고 선형 관측기를 이용하여 속도와 가속도를 추정한 후 선도로봇과 후미로봇 간의 거리 및 속도를 일정하게 유지한다. 모의실험 통해 제안한 제어기의 성능 및 효율성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 거리-속도-가속도 모델



<그림 1> 거리-속도-가속도 모델

본 논문에서는 x 방향으로만 직진 하는 이동로봇을 가정한다. 이동로봇의 모델식은 다음과 같다.

$$q = [x, v, a]^T \tag{1}$$

$$\dot{q}_1 = x \tag{2}$$

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = v$$

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 = a$$

$$y = Cq = [1 \ 0 \ 0]q \tag{3}$$

여기서  $x$ 는 이동로봇의 중심점의 위치,  $v$ 는 속도  $a$ 는 가속도이고 위치, 속도, 가속도는 서로 미분-적분 관계를 가진다. 이때 로봇의 출력값은 이동로봇의 위치값만 알 수 있다고 가정한다.

<그림 1>에서  $x_L, v_L$ 와  $a_L$ 은 각각 선도 로봇의 중심점의 위치, 속도 그리고 가속도이다.  $x_F, v_F$ 와  $a_F$ 은 각각 후미 로봇의 중심점의 위치, 속도 그리고 가속도이다. 본 논문에서 제안한 적응 순항 제어의 목적은 선도로봇과 후미로봇간의 거리  $l$ 을 일정하게 유지하고 선도로봇과 후미로봇간의 속도와 가속도가 일치하도록 하는 것이다.

거리-속도-가속도 오차  $e$ 를 식(3)과 같이 설정한다.

$$e = \begin{bmatrix} e_x \\ e_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L - x_F \\ v_L - v_F \end{bmatrix} \tag{3}$$

오차  $e$ 를 0으로 만드는 것이 제어 목적이지만 선도로봇의 속도  $v_F$ 를 모르기 때문에 이를 추정할 수 있는 제어기를 설계하여야 한다. 이를 위해 출력 제한 선형 관측기를 설계한다.

2.2 제어기 설계

식 (3)을 시간에 대하여 미분하면 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{e}_x = v_L - v_F \tag{4}$$

$$\dot{e}_v = a_L - a_F = u$$

제어입력은  $\dot{e}_v$ 로 갖는 모델을 정의한다. 이 오차 모델을 제어하기 위한 제어기 입력은 식 (5)와 같이  $u = -ke$ 로 제한한다.

$$u = -k_1 e_1 - k_2 e_2 \tag{5}$$

후미로봇의 입력 가속도는 주어진 제어입력으로 부터

$$a_F = a_L - (-kx) = a_L + k_1 e_1 + k_2 e_2 \tag{6}$$

와 같이 계산되지만 선도로봇의 가속도인  $a_L$ 을 모르기 때문에 이를 추정하기 위한 상태 관측기를 설계한다. 선도로봇 상태추정을 위한 상태변수  $\hat{q}_L$

$$\hat{q}_L = \begin{bmatrix} \hat{x}_L \\ \hat{v}_L \\ \hat{a}_L \end{bmatrix} \tag{7}$$

로 설정하고 선도로봇의 상태를 추정하기 위한 관측기를

$$\dot{\hat{q}}_L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{q}_L = Aq_L \tag{8}$$

$$\dot{\hat{q}}_L = A\hat{q}_L + L(x_L - \hat{x}_L) \tag{9}$$

로 설계한다.  $L$ 은 모두 양의 상수이다. 선도로봇의 상태변수와 관측기의 상태변수의 차이를  $q_L - \hat{q}_L = \tilde{q}_L$ 과 같이 정의하면

식 (8)과 (9)는

$$\dot{\tilde{q}}_L = (A + LC)\tilde{q}_L \tag{10}$$

과 같이 나타낼 수 있다. 따라서  $(A + LC)$ 가 Hurwitz 가 되도록 관측기 이득  $L$ 을 설정하면 선도로봇의 속도와 가속도를 알 수 있고 이를 식 (5)에 대입하여 후미로봇의 제어입력을 얻는다.

$$u = \hat{a}_L + k_1(\hat{x}_L - x_F) + k_2(\hat{v}_L - v_F) \quad (11)$$

식 (11)의 제어이득인  $k$ 는 최적레귤레이터(LQR : Linear Quadratic Regulator) 제어기법을 이용하여 구한다. LQR 제어기법은 시스템의 상태방정식을 만족하고 가중된 상태 변수의 제곱과 가중된 제어 입력신호의 합으로 표현한 평가함수

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (12)$$

를 최소화하는 제어법칙을 구하는 것이다. 여기서  $Q$ 와  $R$ 은 대칭행렬로서 각각 양반정( $Q \geq 0$ ) 및 양한정행렬( $R > 0$ )이다. 임의의 초기값  $x(0)$ 에 대하여 평가함수 식 (12)을 최소로 하는 안정화 이득행렬  $k$ 는

$$k = R^{-1} B^T P \quad (13)$$

과 같이 주어진다. 여기서  $P$ 는 양한정 대칭행렬이며

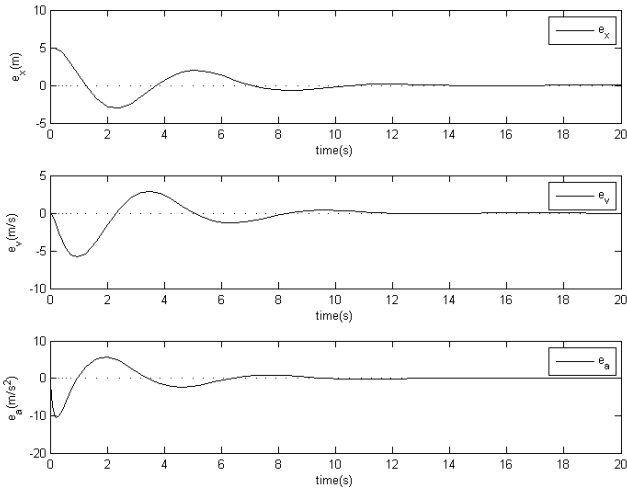
$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (14)$$

과 같은 대수리카티방정식(ARE : Algebraic Riccati Equation)[4]으로부터 얻어진다.

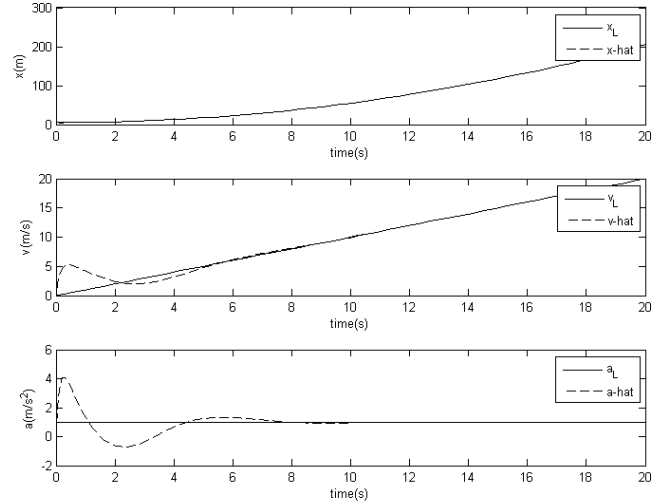
### 3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 방법에 의해 설계된 제어기의 성능을 검증하기 위해 2대의 이동로봇으로 구성된 모의실험을 수행하였다. 후미 로봇의 위치는 (0, 0)이고 선도 로봇의 위치는 (5(m), 0)이다. 선도로봇의 속도는 1m/s로 하고 20초 동안 응답을 관찰하였다. 모의실험에서 선정한 이득은  $k_1 = 1, k_2 = 1$ 이고 관측기의 이득은  $l_1 = 10, l_2 = 10, l_3 = 10$ 로 선정하였다. 결과는 <그림2>와 <그림3>에 나타나 있다.

<그림 2>는 로봇간의 거리, 속도와 가속도의 오차를 나타내며 8초 이내에 오차가 0근처로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. <그림 3>은 선행로봇의 상태와 추정된 상태를 비교하여 나타낸 것이다. 실제 상태와 추정값이 같아짐을 확인할 수 있다.



<그림 2> 거리-속도-가속도 오차



<그림 3> 선행로봇의 실제 상태와 추정 상태

### 3. 결 론

본 논문에서는 적응 순항 제어를 위한 선형 관측기 기반의 출력 궤환 제어 방법을 제안하였다. 제안한 제어 방법에서는 거리센서를 기반으로 선도로봇의 속도와 가속도를 추정하고 적응순항제어를 하였다. 제안한 제어기는 비전시스템을 이용하여 정보공유를 하는 군집제어의 경우 능동적으로 정보를 획득할 수 있는 장점을 가진다. 이를 응용하여 보다 다양한 시스템에 적용 가능하다.

### 감사의 글

본 논문은 2009년도 정보(교육과학기술부)이 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2009-0069742)

### [참 고 문 헌]

- [1] P. Ioannou, Z. Xu, S. Eckert, D. Clemons, T. Sieja "Intelligent cruise control: theory and experiment", IEEE. Decision and Control, Proceedings of the 32nd IEEE Conference on, page 1885, 1993.
- [2] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer and C. J. Taylor, "A Vision-Based Formation Control Framework", IEEE. Trans. Robotics. Automation, vol. 18, no. 5, pp. 813-825, 2002.
- [3] P. Vadakkepat, Ooi Chia Miin, Xiao Peng, T.H. Lee "Fuzzy behavior-based control of mobile robots", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 12, no. 4, pp. 559-564, 2004
- [4] Peter Lancaster, Leiba Rodman "Algebraic Riccati equations" Oxford University Press, pp. 504, 1995