

물류이송 및 제조용 이동형 매니퓰레이터의 경로 추적을 위한 백스테핑 제어 설계와 구현

Design and Implementation of Back-stepping Control for Path Tracking of Mobile Manipulator of Logistics and Manufacturing

진태석^{1*}

Taeseok Jin^{1*}

〈Abstract〉

In this paper, we propose a modified back-stepping control method in view of the dynamic model of mobile manipulator has the nonholonomic constraints, these constraints should be considered to design a tracking controller for the mobile manipulator. The conventional back-stepping controller includes the dynamics and kinematics of the mobile robot systems. and the modified adaptive backstepping method is applied to constructing the controller. The proposed controller can realize the tracking trajectory of the reference path. The efficiency and robustness of this control method is demonstrated by the simulation.

Keywords : Nonholonomic System, Mobile Manipulator, Dynamics, Kinematics, Back-stepping Control

^{1*} 교신저자, 정회원, 동서대학교 메카트로닉스공학과
교수 부산대학교 졸업(공학박사)
E-mail : jints@dongseo.ac.kr

^{1*} Corresponding Author, Professor Dept. of Mechatronics,
Ph.D Dongseo University

1. 서론

최근 물류이송 및 제조공정에서의 이동형 매니플레이터를 이용한 작업공정이 점점 증가하고 있는 추세이다. 기존의 로봇은 그 작업공간의 한계로 인해 그 쓰임이 제한되었지만 최근 이동형 매니플레이터는 주행을 하면서 여러 가지 작업을 할 수 있기 때문에 제조 산업계뿐만 아니라 사무실이나 가정에까지 그 응용범위가 광범위하다. 특히, 작업형 다관절로봇의 작업공간은 이동형 로봇의 협동작업에 의한 작업 효율 극대화의 장점이 있다.

물류이송과 제조 공정을 수행하기 위한 이동형 매니플레이터의 이동 궤적 제어기는 이동 로봇을 구동할 때 필요한 기초적인 부분을 담당한다. 그러나 궤적 제어기는 이동 로봇이 구조적으로 nonholonomic 제약 특성을 가지고 있기 때문에 smooth time-invariant state feedback으로 안정성을 보장 받을 수 없다. 그러므로 이동로봇의 궤적제어기를 설계할 때 안정성 보장에 대한 연구를 중심으로 이루어졌다 [1]. 이동로봇의 궤적 제어를 설계하기 위해서 Kanayama et. al.은 이동로봇의 기구학만을 고려하여 자세(posture) 제어를 제안하였다 [1]. 그리고 Dixeon et. al. [2]은 이동로봇의 동역학을 고려하여 시스템의 안정도를 증명하였다.

이동형 매니플레이터의 기구학과 동역학을 동시에 고려하여 구성한 제어기의 대부분은 back-stepping 제어를 기반으로 이동형 매니플레이터의 nonholonomic 구속 조건을 만족하면서 주어진 기준궤적을 추종하는 제어기 중심으로 연구가 많이 진행되고 있다 [3]-[5]. 본 논문에서는 물류 및 제조공정에서 궤적을 이동하면서 이동 및 적재할 수 있는 작업능력을 갖추기 위한 강인한 제어능력을 back-stepping 제어기 기반으로 실험적 결과를 제시하였다. 제안 방법의 검증은 위하여 기준

궤적이 주어졌을 때, 이동형 매니플레이터의 기구학을 이용한 자세 제어기에서 생성되는 이동 매니플레이터의 속도명령에 따른 실험적 결과를 제시하였다.

2. 이동형 매니플레이터 제어기설계

2.1 로봇의 Nonholonomic 구속조건

그림 1은 전형적인 nonholonomic 이동로봇의 시스템을 나타낸다. 이동로봇은 같은 축상으로 연결되어 있는 2개의 구동바퀴로 구성되어있으며, 독립적인 actuator에 의해서 이동과 방향을 제어한다. 그리고 이동로봇의 위치는 전역 직교 좌표계 $\{O, X, Y\}$ 를 기준으로 이동로봇의 중심점의 좌표 $\{P, X_c, Y_c\}$ 로 나타낼 수 있다.

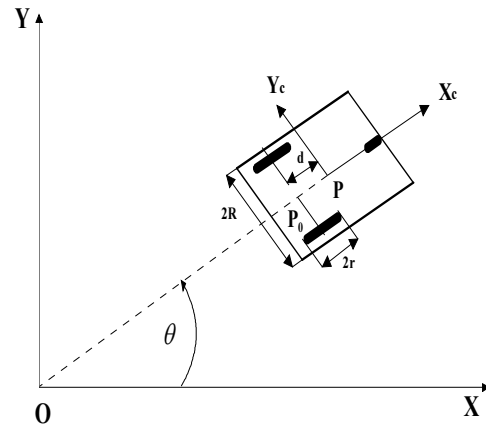


Fig. 1 Nonholonomic mobile manipulator

이동형 매니플레이터의 베이스 부분인 이동로봇은 nonholonomic 구속조건을 가지고 있기 때문에 궤적 제어를 구성할 때 smooth time-invariant state feedback으로는 안정성을 보장

받을 수 없다. 이동형 매니플레이터의 기구학적 구속조건은 로봇구동바퀴의 축을 기준으로 직각으로 순수굴림을 하면서 미끄러지지 않는다는 것으로 가정하여 구속조건을 수식적으로 표현하면 다음과 같다 [1][2].

$$\dot{y}_c \cos \theta - \dot{x}_c \sin \theta - d\dot{\theta} = 0 \quad (1)$$

이동로봇의 운동은 선 속도 v 와 회전 각속도 ω 의 두 가지 제어 입력으로 조정된다. 여기서 $|v| \leq V_{\max}$ 와 $|\omega| \leq W_{\max}$ 을 만족하고, V_{\max} 와 W_{\max} 는 이동 매니플레이터의 최대 선속도와 각속도를 나타낸다. 이동 플랫폼의 조향제어를 위한 자세 제어기는 이동로봇의 기구학 방정식에 따른 자코비안 행렬 J 에 의해서 결정되도록 하였다.

2.2 백스테핑 제어기

2.2절에서는 nonholonomic 구속조건을 만족하면서 이동 매니플레이터의 궤적 제어기로 강건성을 갖는 back-stepping 제어기에 대한 수학적 이론과 이동형 매니플레이터의 주행을 위한 궤적제어를 제시하였다. 그림 2는 back-stepping 제어기의 블록선도를 나타내었다. 제안한 Back-stepping 제어기는 먼저 식 (1)의 자세 제어기를 이용하여 이동형 매니플레이터를 제어하기 위한 속도명령 $q_c(t)$ 를 수식적으로 생성한다. 그리고 생성된 속도명령 $q_c(t)$ 를 입력으로 속도 제어기를 구성한다. 그리고 속도 제어기에서 생성된 속도명령을 이용하여 이동형 매니플레이터의 제어입력을 계산하게 된다 [4][5].

속도명령 $q_c(t)$ 를 구하기 위해서는 그림 3과 같이 기준 로봇 속도 $q_r(t)$ 가 주어지면 식 (1)을 이용하여 기준 로봇의 위치 $P_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ 를 계산

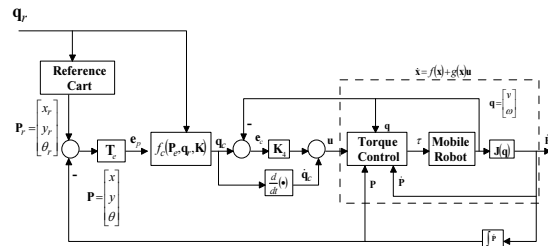


Fig. 2 Back-stepping controller

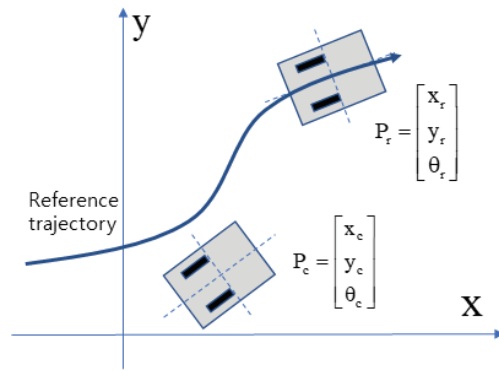


Fig. 3 Positions for reference and current robot manipulator

할 수 있다. 기준로봇의 위치와 현재 이동형 매니플레이터의 위치 $P = [x, y, \theta]^T$ 를 이용하여 이동매니플레이터의 위치오차 P_e 를 구하면 다음과 같다.

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (P_r - P) = T_c (P_r - P) \quad (2)$$

이동로봇의 자세 오차 P_e 를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{P}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

이동로봇의 궤적을 제어하기 위한 목적은 기준 위치 P_r 과 현재 이동로봇의 위치 P 를 일치시켜 위치 오차 P_e 를 0으로 만드는 것이 목적이 되겠다. 이와 같은 제어 목적을 위해서 다음과 같은 기구학적 자세 제어를 식(4)와 같이 제안할 수 있다.

$$q_c = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + K_1 x_e \\ \omega_r + K_2 v_r y_e + K_3 v_r \sin \theta_e \end{bmatrix}$$

$$q_c = f_c(P_e, q_r, K) \quad (4)$$

여기서, 제어게인 $K_1, K_2, K_3 \geq 0$ 을 만족하면 시스템은 안정적으로 제어가능하다. 그리고 그림 2에서 이동형 매니퓰레이터의 제어입력을 구하기 위한 비선형 궤환 속도제어기 입력은 다음과 같이 설정하였다.

$$u = \dot{q}_c + K_4(q_c - q) \quad (5)$$

여기서, $K_4 = K_4 I$

식 (5)에서 생성된 속도 명령 u 는 이동형 매니퓰레이터의 동역학 방정식을 이용하여 제어입력을 계산하게 된다.

이동매니퓰레이터의 주행에 따른 위치 정밀도는 설계된 Back-stepping 제어기의 자세 제어를 위한 내부 게인 K_1, K_2, K_3 의 값들을 실시간으로 변화를 시킴으로써, 고정된 내부 게인값과의 비교를 통하여 성능결과를 제시하고자 한다.

3. 이동매니퓰레이터 시뮬레이션

본 논문에서는 이동 매니퓰레이터의 기준 궤적을 임의의 곡선 형태로 제시하여 Back-stepping

제어기의 강인성을 증명하고자 한다. 시뮬레이션에서는 실제 산업용 이동형 매니퓰레이터 형상과 동일한 Square-Type 형태를 사용하였다.

Square-Type 형태의 이동 매니퓰레이터는 제조공정에 사용하는 이동형 로봇과 같은 형태로 그림 1에서 이동로봇의 구동축과 중심점사이의 거리 d 를 300mm으로 설정하였다. 그리고 동역학 방정식에서 centripetal/coriolis 항렬(V_m)와 중력성분(G)의 값은 0으로 설정하였다. 시뮬레이션에 사용한 이동 매니퓰레이터의 동역학 방정식의 파라미터는 $m = 10 [kg]$, $I = 5 [kg - m^2]$, $R = 0.5 [m]$, $r = 0.05 [m]$, $F = \text{diag}\{10, 10\}$ 이다.

본 실험에서는 아래와 같은 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. back-stepping 방법과 기존의 내부 게인값을 고정된 back-stepping 방법과 제어 성능을 비교하였다.

[조건] : 기준 속도가 $x = 1$, $y = 2$ 그리고 각도 26.56° 의 전역 직교 좌표계 초기위치에서 선 속도 $v_r = 0.5 [m/s]$ 와 각 속도 $\omega_r = 0.5 [rad/s]$ 의 속도로 반시계 방향으로 회전하는 궤적이 주어지고, 현재의 이동 매니퓰레이터의 위치는 $x = 2$, $y = 1$, 그리고 각도 10° 의 초기위치에 있다고 가정하였다.

그림 4, 5, 6, 그리고 7은 시뮬레이션 조건에서 수행한 결과를 나타낸다. 그림 4는 auto-gain 값에 의한 추종궤적은 실시간 게인값의 반영에 의해서 보다 가까운 내부 궤적으로 움직이고 고정된 게인값에서는 외부 궤적으로 이동하는 특성을 보였다. 그림 5는 궤적에러를 각각 나타내었다.

그림 4와 그림 5에서 기준궤적의 변화에서 고정 게인값을 갖는 back-stepping 방법은 시스템이 궤적을 추적하는 안정성을 보여주고 있지만, 본 논문에서 auto-gain 방법으로 게인 값을 변화시킴으로써 보다 빠른 수렴속도를 나타냄을 알 수

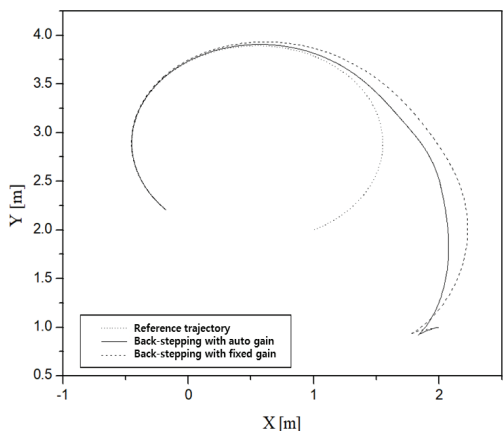
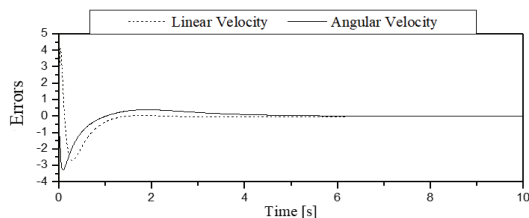
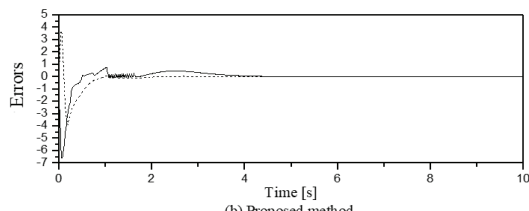


Fig. 4 Robot manipulator trajectory for gain conditions

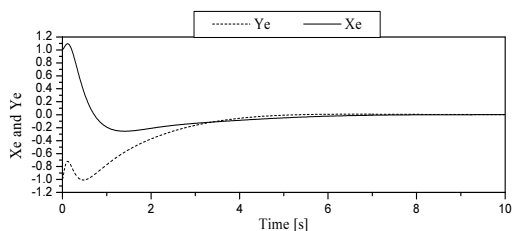


(a) Conventional back-stepping method.

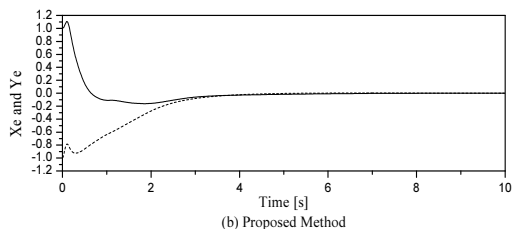


(b) Proposed method.

Fig. 6 Velocity errors of Robot manipulator for simulation condition



(a) Conventional back-stepping method



(b) Proposed Method

Fig. 5 Trajectory errors of mobile robot

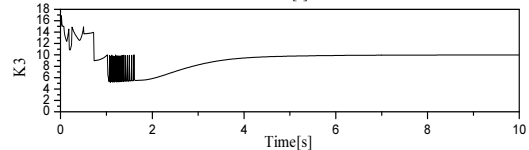
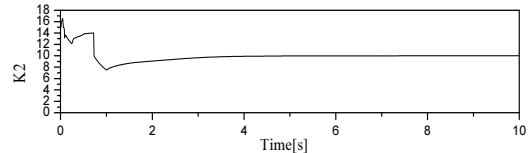
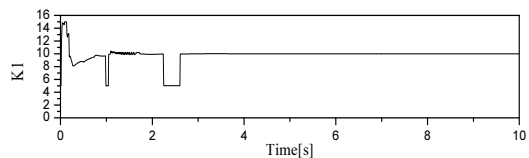


Fig. 7 Trend of the posture controller gains

있다. 그리고 그림 6은 이동로봇의 속도에러, 그림 7은 자세 제어기의 게인 변화 추이를 나타내었다.

그림 7은 시뮬레이션 보여준 모의 주행실험에서 속도 및 각속도의 변화에 의한 K1, K2, K3이 변경되는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 제조공정에서 사용되는 이동형 매니퓰레이터의 활용성을 높이고자 Back-stepping 제어를 적용한 성능 결과를 제시하였다. Back-stepping 제어기에서 사용되는 기구학적

자세 제어기의 auto-gain값 적용에 따른 이동 매니퓰레이터의 주행결과의 실시간 변화를 제시하였다. 시뮬레이션을 통하여 변화하는 기준 궤적이 주어졌을 때 자세 제어기의 게인값을 실시간으로 적절하게 변화시킴으로써 Back-stepping 제어를 사용하여 물류 및 제조 환경에서의 실현 가능성을 제시하였다.

사 사

본 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B04932124).

참고문헌

[1] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki and T. Noguchi, "A stable tracking control method for

an autonomous mobile robot," in Proc. IEEE Int. Conf. Robot and Automation, pp. 384-389, 1990.

[2] W. E. Dixon, D. M. Dawson, E. Zergeroglu and A. Behal, Nonlinear Control of Wheeled Mobile Robots," Springer, 2001.

[3] F.L. Lewis, "Robust Backstepping Control of a Class of Nonlinear System Using Fuzzy Logic," Information Sciences, 123(2), pp. 223-240, 2000.

[4] Menon P. K., Vaddi S. S., Ohlmeyer E. J. "Finite-Horizon robust integrated guidance-control of a moving-mass actuated kinetic warhead," Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. pp.2006-6787, 2006.

[5] Vaddi S. S., Menon P. K., "Multi stepping approach to finite-interval missile integrated control." Journal of Guidance, Control and Dynamics, 29(4), pp. 1015-1019, 2006.

[6] Jonathan Rogers, Mark Costello. Control authority of a projectile equipped with a controllable internal translating mass. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 31(5), pp. 1323-1333, 2008.

(접수: 2021.04.18. 수정: 2021.05.06. 게재확정: 2021.05.12.)