

궤도추종을 위한 메니플레이터의 적응 추종 제어에 관한 연구

A Study on Adaptive Tracking Control of a Mobile Manipulator for Contour Following

서진호, 이권순
Jin Ho Suh, Kwon Soon Lee

Abstract - In this paper, we propose an adaptive tracking control method of a mobile manipulator for contour following with a kinematic model to have several unknown dimension parameters. Moreover, we will use the decentralized control method to design two independent controllers for two subsystems. The proposed controllers in this paper are based on the Lyapunov function in order to guarantee the stability of whole system for contour following task. The updated laws are also designed to estimated the unknown dimension parameters. Finally, the simulation results are presented to show the validity of the proposed controllers in this paper.

Key Words : Mobile manipulator, Contour following, Adaptive tracking control, Mobile platform, Lyapunov function

1. 서론

일반적으로 해양·조선분야를 포함한 위험한 산업현장에서 널리 사용되고 있는 평면 메니플레이터는 궤도추종을 위하여 3자유도를 가지는 고정식 메니플레이터에 대한 작업공간을 가지므로, 이동식 메니플레이터를 이동식 플랫폼위에 설치함으로써 작업공간을 늘여서 사용할 수 있게 된다. 그러나, 이동식 메니플레이터를 사용하기 위한 문제점으로는 이동식 플랫폼의 선형성과 회전속도의 제한조건 두 가지를 시스템에 조합하는 것이다. 이것은 이동식 플랫폼의 운동이 자유운동이 아니라 구속운동이라는 것을 의미하여, 이러한 두 가지 제한조건의 해결방안은 메니플레이터 상태의 특이성을 피하기 위하여 초기상태로 이동하는 것이다.

따라서, 본 논문에서는 이동식 메니플레이터를 이동 메니플레이터와 이동식 플랫폼인 두 개의 하부조직으로 구분하였고 이러한 비집중화된 운동제어 방법은 두 개의 독립적인 제어를 설계하기 위하여 사용하였다. 특히, 미지차원의 매개변수가 존재하는 운동모델과 함께 이동식 메니플레이터를 위한 적응추종 제어방법을 제안하였다. 본 연구에 대한 유효성은 모의실험 결과로써 간단하게 설명되어진다.

2. 운동 방정식

본 논문에서 고려되어지는 이동 메니플레이터의 운동 방정식은 그림 1과 형태로써 표현되어진다. 여기에서 이동 좌표계에 대한 End-effector의 속도벡터는 다음과 같이 주어진다.

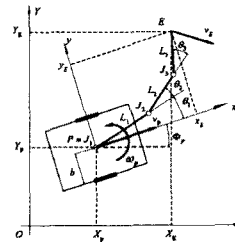


그림 1. Schematic configuration of a mobile manipulator

$$V_E = J\theta \quad (1)$$

여기서, $V_E = (\dot{x}_E \ \dot{y}_E \ \dot{\phi}_E)^T$ 는 이동좌표계에 대한 End-effector의 속도벡터이고, $\theta = (\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3)^T$ 는 메니플레이터 접합부의 각속도벡터이며, J 는 다음과 같이 표현되어지는 야코비안 행렬(Jacobian matrix)을 의미한다.

$$J = \begin{pmatrix} -L_3 s_{123} & -L_2 s_{12} & -L_1 s_1 & -L_3 s_{123} & -L_2 s_{12} & -L_3 s_{123} \\ L_3 c_{123} + L_2 c_{12} + L_1 c_1 & L_3 c_{123} + L_2 c_{12} & L_3 c_{123} & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

단, $s_1 = \sin(\theta_1), s_2 = \sin(\theta_1 + \theta_2), s_3 = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$

$$c_1 = \cos(\theta_1), c_2 = \cos(\theta_1 + \theta_2), c_3 = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

평면위에서 강체의 운동방정식으로부터 전체좌표계에 대한 End-effector의 속도벡터를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_E = V_P + W_P \times Rot_1 p_E + Rot_1 V'_E \quad (2)$$

여기서, V_E 와 V'_E 는 전체좌표계에 대한 End-effector 및 플랫폼 중앙점에 대한 속도벡터, W_P 는 이동좌표계의 회전속도벡터, Rot_1 는 회전변환행렬, p_E 는 이동좌표계에 대한 End-effector의 위치벡터이다.

특히, 이동식 플랫폼(mobile-platform)이 수평면을 움직일

저자 소개

*東亞大學校 電氣工學科 Post-Doctor · 工博

**東亞大學校 電氣工學科 教授 · 工博

때, 선속도 v_P 와 각속도 ω_P 에 대한 바퀴의 좌우 각속도 ω 및 ω_r 는 다음과 같은 관계로써 표현되어진다.

$$\begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_P \\ \omega_P \end{pmatrix} \quad (3)$$

3. 적응 추종제어기 설계

3.1 메니플레이터를 위한 적응제어기

본 논문에서 고려되어지는 이동식 메니플레이터의 좌표와 기준궤도와와의 관계는 그림 2에서 나타내어진다.

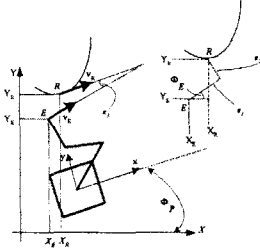


그림 2. Schematic configuration of a mobile manipulator

우리의 목적은 좌표 E 를 가지는 End-effector가 기준점 R 로 가기 위한 제어기를 설계하는 것이므로, 추종오차 e_E 를 다음과 같이 정의한다.

$$e_E = (e_1 \ e_2 \ e_3)^T = A(p_R - p_E) \quad (4)$$

여기서, $p_P = (X_R \ Y_R \ \phi_P)^T$, $p_E = (X_E \ Y_E \ \phi_E)^T$, A 는 ϕ_E 에 대한 회전행렬(Rotation matrix)을 의미한다. 또한 식(1)과 식(2)을 식(4)의 도함수에 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 단, $\dot{p}_R = \dot{V}_R$ 이고 $\dot{p}_E = \dot{V}_E$ 이다.

$$\dot{e}_E = \dot{A}A^{-1}e_E + A(V_R - (V_P + W_P \times Rot_1 p_E + Rot_1 J \dot{\theta})) \quad (5)$$

링크 L_i 의 길이가 미지(unknown)일 때, 우리는 L_i 의 추정값을 이용하여 제어목표를 얻기 위한 적응제어기를 설계하고자 한다. 먼저, 추종오차벡터를 다음과 같이 정의하자.

$$\tilde{L} = L - \hat{L} \quad (6)$$

단, $L = (L_1 \ L_2 \ L_3)^T$ 이고 \tilde{L} 는 L 의 추정값을 의미한다. 따라서, 식(1)은 다음과 같이 표현되어진다.

$$\hat{V}_E = J \theta_d \quad (7)$$

여기서, $\theta_d = (\theta_{1d} \ \theta_{2d} \ \theta_{3d})^T$, $J = J(\theta_i, \hat{L}_i)$ 는 J 의 추정행렬 그리고 θ_{id} 는 θ_i 의 목표값이다. 따라서 \hat{J} 는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\hat{J} = J - \tilde{J} \quad (8)$$

여기서,

$$\tilde{J} = \begin{pmatrix} -L_3^s c_{123} - L_2^s c_{12} - L_1^s c_1 & -L_3^s c_{123} - L_2^s c_{12} & -L_3^s c_{123} \\ L_3^s c_{123} + L_2^s c_{12} + L_1^s c_1 & L_3^s c_{123} + L_2^s c_{12} & L_3^s c_{123} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

식(8)을 식(7)에 대입함으로써, 우리는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\hat{V}_E^i = (J - \tilde{J}) \theta_d \quad (9)$$

만약 L_i 가 추정되어진다면, End-effector의 위치벡터는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\hat{p}_E = \hat{L} \hat{p}_E \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \hat{p}_E = \begin{pmatrix} L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} \\ L_1 s_1 + L_2 s_{12} + L_3 s_{123} \\ 0 \end{pmatrix}$$

따라서, 식(5)는 식(9)와 식(10)을 대입함으로써 다음과 같이 다시 표현되어진다.

$$\dot{e}_E = \dot{A}A^{-1}e_E + A(V_R - (V_P + W_P \times Rot_1 p_E + Rot_1 J \dot{\theta})) + (A_P + A) \tilde{L} \quad (11)$$

여기서,

$$A_P = \omega_P \begin{pmatrix} -\cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos \theta_3 & -1 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_J = \begin{pmatrix} -\dot{\theta}_1 \cos \theta_2 + \theta_3 & -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_3 & -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\ \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 + \theta_3 & (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Lyapunov 후보함수(Lyapunov function candidate)를 다음과 같이 선택하자.

$$V_1 = \frac{1}{2} e_E^T e_E + \frac{1}{2} \tilde{L}^T \gamma \tilde{L} \quad (12)$$

여기서, $\gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ 이고 $\gamma_i (i=1, 2, 3)$ 을 의미한다.

위에서 주어진 V_1 의 도함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{e}_E^T e_E + e_E^T \dot{e}_E - \tilde{L}^T \gamma \dot{\tilde{L}} \\ &= e_E^T \dot{e}_E + e_E^T (A_P + A) \tilde{L} - \tilde{L}^T \gamma \dot{\tilde{L}} \end{aligned} \quad (13)$$

그러므로, 식(13)을 음수(negative value)이도록 하기 위한, 파라미터 제어칙(update law)은 다음과 같이 선택되어진다.

$$\dot{\tilde{L}} = J^{-1} Rot_1^{-1} (A^{-1} (\dot{A}A^{-1} + K) e_E + \dot{V}_R - \dot{V}_P - \dot{W}_P \times Rot_1 p_E) \quad (14)$$

$$\tilde{L}^T = \hat{L} (A_P + A) \gamma^{-1} \quad (15)$$

3.2 이동식 플랫폼을 위한 적응제어기

이동식 플랫폼의 작업은 메니플레이터 구조상의 특이성을 피하기 위하여 움직이는 것이므로, 본 논문에서는 이러한 이동식 플랫폼이 궤도추종 중에 초기구성을 유지하면서 특이성을 피할 수 있는 알고리즘을 제안하고자 한다. 먼저 우리는 그림 3과 같은 메니플레이터의 초기상태를 선택한다.

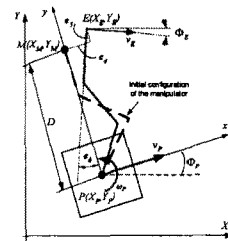


그림 3. Schematic configuration of mobile-platform

먼저 출발할 때 End-effector의 위치 E 와 일치하는 위치 M 을 가정하자. 만약 E 와 M 이 일치하지 않으며, 그때 오차가 존재하게 된다. 이때, 우리는 오차벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$e_M = (e_4 \ e_5 \ e_6)^T = B(p_E - p_M) \quad (16)$$

여기서, $p_M = (X_M \ Y_M \ \Phi_M)^T$, B 는 Φ_M 에 대한 회전행렬이다. 특히, 매니퓰레이터의 위치가 특이성으로부터 벗어나도록 하기 위해서는 이동식 플랫폼의 M 이 E 으로 추종할 수 있도록 움직여야 한다. 따라서, 매니퓰레이터의 초기상태는 궤도추종 전체에서 유지되어지게 되면 특이성은 나타나지 않게 됨으로, 매니퓰레이터의 초기상태를 다음과 같이 선택한다.

$$\theta_1 = \frac{3\pi}{4}, \theta_2 = -\frac{\pi}{2}, \theta_3 = \frac{\pi}{4} \quad (17)$$

또한 그림 3의 기하학적 관계로부터 다음과 같은 결과를 표현할 수 있다.

$$X_M = X_P - D \sin \Phi_P, Y_M = Y_P + D \cos \Phi_P, \Phi_M = \Phi_P \quad (18)$$

여기서,

$$D = L_1 \sin\left(\frac{3\pi}{4}\right) + L_2 \sin\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{2}\right) + L_3 \sin\left(-\frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{4}\right)$$

따라서, 식(16)의 도함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e}_M = \begin{pmatrix} v_E \cos e_6 \\ v_E \sin e_6 \\ \omega_E \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & e_5 + D \\ 0 & -e_4 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_P \\ \omega_P \end{pmatrix} \quad (19)$$

식(2)을 식(19)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{e}_M = \begin{pmatrix} v_E \cos e_6 \\ v_E \sin e_6 \\ \omega_E \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & e_5 + D \\ 0 & -e_4 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2a_1} & \frac{1}{2a_1} \\ \frac{1}{2a_2} & \frac{1}{2a_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_{rr} \end{pmatrix} \quad (20)$$

여기서, $a_1 = 1/r$ 이고 $a_2 = b/r$ 라고 하자. 만약 b 와 r 을 미지(unknown)라고 할 때 식(3)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_{rr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}_1 & \hat{a}_2 \\ \hat{a}_1 & -\hat{a}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{rr} \\ \omega_{rr} \end{pmatrix} \quad (21)$$

여기서, v_{rr} 와 ω_{rr} 는 v_P 와 ω_P 의 목표값이고, \hat{a}_1 와 \hat{a}_2 는 a_1 와 a_2 의 추정값을 의미한다.

식(21)을 식(20)에 대입함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{e}_M = \begin{pmatrix} v_E \cos e_6 \\ v_E \sin e_6 \\ \omega_E \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & e_5 + D \\ 0 & -e_4 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{a}_1/a_1 & 0 \\ 0 & \hat{a}_2/a_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_r \\ \omega_{rr} \end{pmatrix} \quad (22)$$

여기서, \hat{D} 는 식(18)에서 나타내어진 D 의 추정값을 의미한다. 또한, 추정오차를 정의하자.

$$\tilde{a}_1 = \hat{a}_1 - a_1, \tilde{a}_2 = \hat{a}_2 - a_2 \quad (23)$$

Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정의하자.

$$V_2 = \frac{1}{2}(e_4^2 + e_5^2 + e_6^2) + \frac{1}{2\gamma_R a_1} \tilde{a}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_R a_2} \tilde{a}_2^2 \quad (24)$$

또한, 식(43)의 도함수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\dot{V}_3 = \dot{e}_4 e_4 + \dot{e}_5 e_5 + \dot{e}_6 e_6 + \frac{\tilde{a}_1}{a_1} (e_4 v_{rr} - \frac{1}{\gamma_R} \tilde{a}_1)$$

$$+ \frac{\tilde{a}_2}{a_2} (e_5 \omega_{rr} - \frac{1}{\gamma_R} \tilde{a}_2 - e_4 D \omega_{rr}) \quad (25)$$

따라서, 식(25)을 음수로서 구성하여 Lyapunov 안정성을 만족시키기 위한 제어칙은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_P = v_E \cos e_6 + D e_6 + k_4 e_4 \quad (26)$$

$$\omega_P = \omega_E + v_E \sin e_6 + k_5 e_5 + k_6 e_6 \quad (27)$$

$$\tilde{a}_1 = \gamma_R e_4 v_{rr}, \tilde{a}_2 = \gamma_R \omega_{rr} (e_5 - e_4 D) \quad (28)$$

여기서, k_4, k_5, k_6 는 양수(positive value)이다.

4. 모의실험

본 모의실험에서, 실제값과 추정값은 차이가 있으나 오차 부분에 대한 제어칙이 존재하기 때문에 여전히 0에 수렴함을 보여주고 있다. 여기에서 사용되어진 각 계수값은 다음과 같다.

$$\gamma_R = 4640, \gamma_{R2} = 12.4$$

$$\gamma_1 = 0.265, \gamma_2 = 0.1875, \gamma_3 = 0.1635$$

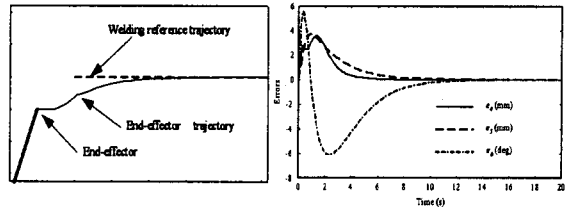


그림 4. Simulation results of errors

모의실험 결과로부터, 매니퓰레이터 트랙의 End-effector가 추종궤도라는 것과 이동식 매니퓰레이터가 초기상태를 유지하기 위하여 이동한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 미지 파라미터가 존재하는 이동식 플랫폼을 위한 적응추종 제어방법을 제안하였고, 두 개의 독립적인 제어기들은 두 개의 하부조직을 제어하기 위하여 제안되어졌다. 특히, 제안되어진 제어기들은 이동식 매니퓰레이터의 추종 안정성을 보장하기 위하여 Lyapunov 함수에 의거하여 제어칙을 구성하였고 모의실험 결과로서 제안되어진 제어기의 유효성을 보여주고 있다.

후기

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] T. Fukao, et. al., "Adaptive Tracking Control of Non holonomic Mobile Robot", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 16, No. 5, pp. 609-615, 2000.
- [2] T. Phan, et. al., "Decentralized Motion Control of Mobile Manipulator", Proc. of ICCAS, pp. 1841-1846, 2003.