

작업영역 확장 가능한 두 팔 서비스 로봇에 관한 연구

Study on a Service Robot Having Two Arms with Extendable Workspace Structures

○배 영 걸, 정 슬*

충남대학교 메카트로닉스공학과 (TEL:042-821-6876, E-mail:jungs@cnu.ac.kr)

Abstract This paper describes a home service robot having structures to extend workspace. The service robot is composed of two arms with two links, the mobile robot system, and the workspace expansion structures. A dynamic equation of the robot system is derived. Simulation studies were performed based on the dynamic equation for controlling the attitude and position of the robot.

Keywords Home service robot, two arms, extendable workspace structures

1. 서론

로봇의 개념이 대중화되고 로봇이 사람들의 삶의 공간에 가까워지면서 로봇에 대해 실질적인 도움에 대한 요구가 커지고 있다. 특히 서비스 로봇 분야에서 실용성에 대한 관심과 요구가 커지면서 가정에서 가사를 도와주는 로봇에 대한 관심이 높아졌다 [1].

이미 매니플레이터가 포함된 구조의 서비스 로봇들이 많이 개발되고 있으며 이동성이 뛰어난 두 바퀴 모바일 구조에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

선행연구에서는 로봇의 크기는 최소화하면서도 작업 공간을 최대화 할 수 있는 작업영역 확장 구조와 이동성을 고려한 두 바퀴 구조를 적용한 가사지원 서비스 로봇을 설계하였다. 서비스 로봇은 두 팔 매니플레이터, 이동 로봇, 작업 영역 확장 구조로 구성되어 있다.

본 논문에서는 양 팔의 구조를 2개의 링크 구조로 간소화하여 서비스 로봇의 동역학 모델을 유도하였다. 동역학 모델을 이용하여 위치 제어 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 작업영역 확장 가능한 서비스 로봇

그림 1은 가사지원 서비스 로봇의 전체 시스템 설계안과 좌표를 나타낸 것이다. 작업 영역 확장 구조의 영향으로 상하 방향으로 약 420mm의 범위가 확장되었으며 로봇의 전후 방향으로로는 약 250mm 범위가 확장되었다.

매니플레이터를 2개의 링크 구조로 간소화하였으며 2자유도의 작업영역 확장구조와 밸런싱 모바일 구조를 포함하고 있다.

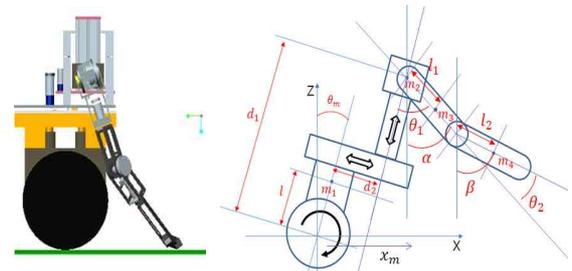


그림 1. 간소화된 시스템의 기구학 좌표계

표 1은 동역학 모델을 정의하기 위한 변수들을 정리한 것이다.

표 1. Parameters of mobile manipulator

x_m	[m]	Position of mobile robot
θ_m	[rad]	Balancing angle of robot
m_i, m_w	[Kg]	Weight of mobile base wheels
l	[m]	Distance to wheel axis from center of mass of mobile
I_i	[Kgm ²]	Inertia moment of link i
τ_{rw}, τ_{lw}	[Nm]	Torque of wheels
l_i	[m]	Distance to center of mass of link i
θ_i	[rad]	Angle of joint i
α	[rad]	Angle between Z axis and $l_1 : (\theta_1 - \theta_m)$
β	[rad]	Angle between Z axis and $l_2 : (\theta_1 + \theta_2 - \theta_m)$

그림 1의 시스템에서 정의된 각 무게 중심점을 기준으로 식(1)과 같이 기구학 식을 정의할 수 있다.

$$P_{m1} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m + l \sin \theta_m \\ 0 \\ l \cos \theta_m \end{bmatrix}, P_{m2} = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \sin \theta_m + d_2 \cos \theta_m + x_m \\ 0 \\ d_1 \cos \theta_m - d_2 \sin \theta_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_{m3} = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 + l_1 \sin \alpha \\ 0 \\ z_2 - l_1 \cos \alpha \end{bmatrix}, P_{m4} = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 + l_2 \sin \beta \\ 0 \\ z_3 - l_2 \cos \beta \end{bmatrix}$$

위 기구학 식을 미분하여 속도에 관한 방정식을 정의하고 라그랑지안 방정식의 형식으로 정리하여 로봇의 동역학식을 유도하였다. 그림2의 동역학 모델은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + G(q) = E\tau \quad (2)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & M_{66} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \\ H_6 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_{x_m} \\ \tau_{\theta_m} \\ \tau_{d_1} \\ \tau_{d_2} \\ \tau_{I_1} \\ \tau_{I_2} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ -m_1 g \sin\theta + m_3 g (-d_1 s_m - l_1 s_\alpha - d_2 c_m) + m_4 g (-d_1 s_m - d_2 c_m - l_1 s_\alpha + l_2 s_\beta) \\ m_2 g c_\theta + m_3 g c_m + m_4 g c_m \\ -m_2 g \sin\theta - m_3 g s_m - m_4 g s_m \\ m_3 g l_1 s_\alpha + m_4 g l_1 s_\alpha - m_4 g l_2 s_\beta \\ -m_4 g l_2 s_\beta \end{bmatrix}$$

$$M_{11} = \frac{1}{2}m_1 + \frac{1}{2}m_2 + m_w + m_3 + m_4$$

$$M_{12} = \frac{1}{2}m_1 l_{c_0} - \frac{1}{2}m_2 d_2 s_\theta + \frac{1}{2}m_2 d_1 c_\theta + \frac{1}{2}m_3 (-2d_2 s_m + 2d_1 c_m + 2l_1 c_\alpha) + \frac{1}{2}m_4 (-2l_2 c_\beta - 2d_2 s_m + 2d_1 c_m + 2l_1 c_\alpha)$$

$$M_{13} = \frac{1}{2}m_2 s_m + m_3 s_m + m_4 s_m, \quad M_{14} = \frac{1}{2}m_2 c_m + m_3 c_m + m_4 c_m$$

$$M_{15} = m_3 l_1 c_\alpha + m_4 (l_1 c_\alpha + l_2 c_\beta), \quad M_{16} = m_4 l_2 c_\beta$$

$$M_{21} = \frac{1}{2}m_1 l_{c_0} - \frac{1}{2}m_2 d_2 s_\theta + \frac{1}{2}m_2 d_1 c_\theta + m_3 (-d_2 s_m + d_1 c_m - l_1 c_\alpha) + m_4 (-d_2 s_m + d_1 c_m - l_1 c_\alpha - l_2 c_\beta)$$

$$M_{22} = m_1 l^2 + m_2 d_2^2 + m_2 d_1^2 + (I_1 + I_2) + m_3 (d_2^2 + d_1^2 + l_1^2 + 2l_1 d_2 s_1) + \frac{1}{2}m_4 (2d_2^2 + 2d_1^2 + 2l_1^2 + 4l_1 d_2 s_1 + 2l_2 (l_2 - 2d_1 c_{12} + 2d_2 s_{12} + 2l_1 c_2) - I_3 - I_4)$$

$$M_{23} = -m_2 d_2 + m_3 (-d_2 + l_1 s_1) + m_4 (-d_2 + l_1 s_1 - l_2 s_{12})$$

$$M_{24} = m_2 d_1 + m_3 (d_1 + l_1 c_1) + m_4 (d_1 + l_1 c_1 - l_2 c_{12})$$

$$M_{25} = \frac{1}{2}m_3 (-2l_1 + 2l_1 d_1 c_1 + 2l_1 d_2 s_1) + \frac{1}{2}m_4 (-2l_1 + 2l_1 d_1 c_1 + 2l_1 d_2 s_1 - l_2^2 + 2l_2 (d_1 c_{12} - d_2 s_{12} - 2l_1 c_2))$$

$$M_{26} = m_4 l_2 (-l_2 + d_1 c_{12} - d_2 s_{12} - l_1 c_2)$$

$$M_{31} = m_2 s_m + m_3 s_m + m_4 s_m, \quad M_{32} = -m_2 d_2 + m_3 (-d_2 + l_1 s_1) + m_4 (-d_2 + l_1 s_1 - l_2 s_{12})$$

$$M_{33} = m_2, \quad M_{34} = 0, \quad M_{35} = m_3 l_1 s_1 + m_4 (l_1 s_1 + l_2 s_{12})$$

$$M_{36} = m_4 l_2 s_{12}, \quad M_{41} = m_2 c_m + 2m_3 c_m + 2m_4 c_m$$

$$M_{42} = m_2 d_1 + m_3 (d_1 + l_1 c_1) + m_4 (d_1 + l_1 c_1 - l_2 c_{12}), \quad M_{43} = 0$$

$$M_{44} = m_2 + 2m_3 + 2m_4, \quad M_{45} = m_3 l_1 c_1 + m_4 (l_1 c_1 + l_2 c_2)$$

$$M_{46} = m_4 l_2 c_{12}, \quad M_{51} = m_3 l_1 c_\alpha + m_4 (l_1 c_\alpha + l_2 c_\beta)$$

$$M_{52} = m_3 (l_1 d_1 c_1 - l_1 d_2 s_1) + m_4 (l_1 d_1 c_1 - l_1 d_2 s_1 - l_2^2 - l_2 l_1 c_2 + l_2 d_1 c_{12} - l_2 d_2 s_{12})$$

$$M_{53} = m_3 l_1 s_1 + m_4 (l_1 s_1 + l_2 s_{12}), \quad M_{54} = m_3 l_1 c_1 + m_4 (l_1 c_1 + l_2 c_2)$$

$$M_{55} = m_3 l_1^2 + m_4 (l_1^2 + l_2 (l_2 + l_1 c_2) + \frac{1}{2} I_3), \quad M_{56} = m_4 (l_2 (l_2 + l_1 c_2) + \frac{1}{2} I_4), \quad M_{61} = m_4 l_2 c_\beta$$

$$M_{62} = m_4 l_2 (-l_2 - d_2 s_{12} + d_1 c_{12} - l_1 c_2), \quad M_{63} = m_4 l_2 s_{12}$$

$$M_{64} = m_4 l_2 c_{12}, \quad M_{65} = m_4 l_2^2, \quad M_{66} = m_4 (l_2^2 + \frac{1}{2} I_4), \quad \alpha = \theta_1 - \theta_m, \quad \beta = \theta_1 + \theta_2 - \theta_m$$

$$H_1 = H_{m_1} + \frac{1}{2}m_3 A_{17} + \frac{1}{2}m_4 (A_{17} + A_{27})$$

$$H_2 = H_{m_2} + \frac{1}{2}m_3 B_{17} - \frac{1}{2}m_3 h_{12} + \frac{1}{2}m_4 (B_{17} + B_{27}) - \frac{1}{2}m_4 (h_{12} + h_{22})$$

$$H_3 = H_{m_3} + \frac{1}{2}m_3 C_{17} - \frac{1}{2}m_3 h_{13} + \frac{1}{2}m_4 (C_{17} + C_{27}) - \frac{1}{2}m_4 (h_{13} + h_{23})$$

$$H_4 = H_{m_4} + \frac{1}{2}m_3 D_{17} - \frac{1}{2}m_3 h_{14} + \frac{1}{2}m_4 (D_{17} + D_{27}) - \frac{1}{2}m_4 (h_{14} + h_{24})$$

$$H_5 = H_{m_5} + \frac{1}{2}m_3 E_{17} - \frac{1}{2}m_3 h_{15} + \frac{1}{2}m_4 (E_{17} + E_{27}) - \frac{1}{2}m_4 (h_{15} + h_{25})$$

$$H_6 = H_{m_6} + \frac{1}{2}m_3 F_{17} - \frac{1}{2}m_3 h_{16} + \frac{1}{2}m_4 (F_{17} + F_{27}) - \frac{1}{2}m_4 (h_{16} + h_{26})$$

$$A_{17} = 2\dot{d}_1 \dot{\theta}_m c_m - 2\dot{d}_2 \dot{\theta}_m s_m - 2\dot{d}_2 \dot{\theta}_m^2 c_m - 2\dot{d}_2 \dot{\theta}_m^2 s_m + 2\dot{d}_1 \dot{\theta}_m c_m - 2\dot{d}_1 \dot{\theta}_m^2 s_m + 2l_1 (-\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_m + \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_m^2) s_\alpha$$

$$A_{27} = -2l_2 s_\beta (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_m)^2$$

$$C_{17} = -2\dot{d}_2 \dot{\theta}_m + 2\dot{x}_m \dot{\theta}_m c_m + 2l_1 \dot{\theta}_1^2 c_1 + 2l_1 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 c_1$$

$$D_{17} = 2\dot{d}_1 \dot{\theta}_m - 2\dot{x}_m \dot{\theta}_m s_m - 2l_1 \dot{\theta}_1^2 s_1 - 2l_1 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 s_1$$

$$E_{17} = -2\dot{d}_2^2 \dot{\theta}_m - 2l_1 \dot{x}_m \dot{\theta}_1 s_\alpha + 2l_1 \dot{x}_m \dot{\theta}_m s_\alpha + 2l_1 \dot{d}_1 \dot{\theta}_m c_1$$

$$-2l_1 \dot{d}_1 \dot{\theta}_m s_1 - 2l_1 \dot{d}_2 \dot{\theta}_m s_1 - 2l_1 \dot{d}_2 \dot{\theta}_m^2 s_1 - 2l_1 \dot{d}_2 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 c_1$$

$$F_{27} = -2l_2 \dot{x}_m (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_m) s_\beta + 2l_2 (d_1 c_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - \dot{\theta}_2 s_{12} (\dot{\theta}_m + \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2))$$

$$+ 2l_2 (\dot{\theta}_2 c_{12} (\dot{d}_2 - d_2 \dot{\theta}_1) - \dot{\theta}_m s_{12} (d_2 \dot{\theta}_2 + d_1 \dot{\theta}_1 + d_1 \dot{\theta}_2) - l_1 \dot{\theta}_2 s_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_m))$$

$$h_{12} = 2\dot{x}_m \dot{d}_1 c_m - 2\dot{x}_m \dot{d}_2 s_m - 2\dot{x}_m \dot{d}_1 \dot{\theta}_m s_m + 2l_1 (\dot{x}_m \dot{\theta}_1 s_\alpha - \dot{x}_m \dot{\theta}_m s_\alpha)$$

$$h_{13} = 2\dot{d}_2 \dot{\theta}_m + 2\dot{d}_1 \dot{\theta}_m^2 + 2\dot{x}_m \dot{\theta}_m c_m + 2l_1 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 c_1 + 2l_1 \dot{\theta}_m^2 c_1$$

$$h_{14} = -2\dot{d}_1 \dot{\theta}_m + 2\dot{d}_2 \dot{\theta}_m^2 - 2\dot{x}_m \dot{\theta}_m s_m - 2l_1 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 s_1 - 2l_1 \dot{\theta}_m^2 s_1$$

$$h_{15} = 2l_1 (-\dot{x}_m \dot{\theta}_1 s_\alpha + \dot{x}_m \dot{\theta}_m s_\alpha + \dot{d}_1 \dot{\theta}_1 c_1 - d_1 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 s_1 - d_2 \dot{\theta}_1 s_1 - d_2 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 c_1 + \dot{d}_1 \dot{\theta}_m c_1 - d_1 \dot{\theta}_m^2 s_1 - d_2 \dot{\theta}_m s_1 - d_2 \dot{\theta}_m^2 c_1)$$

$$h_{22} = 2l_2 \dot{x}_m (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_m) s_\beta$$

$$h_{23} = 2l_2 \dot{\theta}_m c_m (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_m) c_\beta + 2l_2 (-\dot{\theta}_m s_m) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_m) s_\beta$$

$$h_{24} = -2l_2 (\dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 s_{12} + \dot{\theta}_m \dot{\theta}_2 s_{12} - \dot{\theta}_m^2 s_{12})$$

$$h_{25} = 2l_2 (\dot{d}_1 \dot{\theta}_1 c_{12} + \dot{d}_1 \dot{\theta}_2 c_{12} - \dot{d}_1 \dot{\theta}_m c_{12} - d_1 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 s_{12} - d_1 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_2 s_{12} + d_1 \dot{\theta}_m^2 s_{12} - \dot{d}_2 \dot{\theta}_1 s_{12} - \dot{d}_2 \dot{\theta}_2 s_{12} + \dot{d}_2 \dot{\theta}_m s_{12} - d_2 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 c_{12} - d_2 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_2 c_{12} + d_2 \dot{\theta}_m^2 c_{12})$$

$$h_{26} = ((d_1 - d_2 \dot{\theta}_m) s_m c_{12} - (d_1 \dot{\theta}_m + d_2) c_m s_{12} + (l_1 \dot{\theta}_1 - l_1 \dot{\theta}_m) c_1 s_2 - \dot{x}_m s_\beta) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_m)$$

여기에서, $q = [x_m \ \theta_m \ d_1 \ d_2 \ \theta_1 \ \theta_2]^T$ 이며 $M(q) \in R^{5 \times 5}$ 은 관성행렬, $H(q, \dot{q}) \in R^{5 \times 1}$ 은 코리올리스 및 원심력 행렬, $G(q) \in R^{5 \times 1}$ 는 중력행렬, $E(q) \in R^{5 \times 4}$ 는 제어 입력 변환 행렬, $\tau \in R^{4 \times 1}$ 는 제어 토크 벡터이다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 2는 로봇의 팔이 고정된 상태에서 모바일 시스템의 경로가 변화했을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 0.4m의 초기값을 갖는 허리 리프팅 구조를 제외한 로봇을 구성하는 모든 구조의 초기값은 0이다.

모바일의 경로 변화에 따른 밸런싱 자세의 변화가 로봇팔의 제어에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

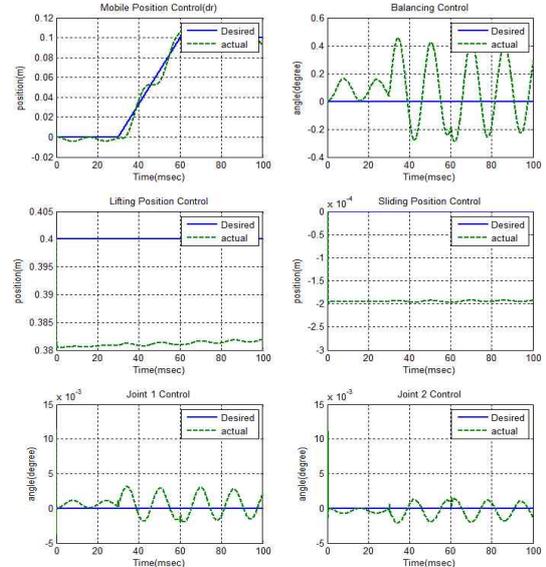


그림 2. 시뮬레이션 결과

4. 결론

본 논문은 작업영역의 범위를 조절할 수 있는 모바일 매니플레이터 구조의 가정용 서비스 로봇의 동역학식을 유도하도 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 각 구조간의 동적 영향을 확인하였다.

참고문헌

[1] H. Iwata and S. Sugano, "Design of Human Symbiotic Robot TWENDY-ONE", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 580-586, 2009.