

로봇팔의 관절 각속도가 동적 조작도에 미치는 영향 분석

정 용 우, *진 봉 환, 이 지 흥
충남대학교 메카트로닉스공학과, *한국해양연구원,
전화 : 042-821-7783 / 핸드폰 : 011-454-9368

A case study about influence of joint velocity on dynamic manipulability of robot arm

YungWoo Jung, *Bong-IIwan Jeon, and Jihong Lee
*Chungnam National University, Korea Ocean Research and Development Institute
E-mail : jota2@hanafos.com

Abstract

The manipulability of robot provides useful information for the design and path planning of robots. This paper shows an influence of joint velocities to acceleration of robot end-effector using a dynamic manipulability polytope. The main idea of this paper is that the dynamic manipulability polytope of robot can be divided to three intermediate polytope, the torque-dependant polytope, velocity-dependent polytope, and gravity-dependant polytope. The velocity-dependant polytope is made from the limits of robot joint velocities while the torque-dependant polytope is made from the limits of the joint torques. Combining of these two intermediate polytopes and considering the gravity-dependant polytope, the overall dynamic manipulability polytope of robot is obtained. This investigation will be useful on the field of space robot and high-speed application.

I. 서론

로봇의 능력을 정량적인 수치로 표현하는 것은 로봇의 디자인 과정과 로봇 경로 계획에 매우 유용한 도구

로 사용될 수 있다. 이러한 도구들 중에 조작도 해석 방법은 현재 가장 활발히 연구가 진행되고 있는 분야이다.

1984년 Yoshikawa[1]는 조작도 타원에 의한 조작도 해석 방법을 제시하였다. 로봇의 기구학적 특성을 이용한 속도 분석에서 시작한 조작도 해석 연구는 로봇의 동역학적 특성을 고려한 가속도 분석으로 확장되었다[2].

동적 조작도에 관한 많은 연구가 진행되고 있음에도 불구하고, 기존의 동적 조작도 해석 방법[2,3]은 로봇의 관성 및 중력의 영향에 대한 연구를 중점적으로 해석하는데 관심을 가져왔다. 반면에 로봇의 이동 속도가 조작도에 미치는 영향에 대한 연구는 상대적으로 많지 않았다. 이러한 이유는 일반적인 환경에서 로봇의 구동 속도가 동적 조작도에 미치는 영향이 중력이나 관성이 동적 조작도에 미치는 영향에 비하여 상대적으로 적기 때문이었다. 하지만 속도의 영향을 분석하는 것은 중력이 존재하지 않는 우주나, 특수환경에서 빠른 속도로 구동되는 로봇의 경우에 그 영향이 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 이러한 응용 분야에서 조작도 해석을 시도할 경우 고려되어야 한다. 이러한 관점에서 볼 때 Rosenstein[4]의 연구는 매우 흥미로운 결과를 보여주고 있다.

본 논문에서는 3개의 회전축을 가진 평면 로봇에 대하여 로봇의 관성, 속도, 중력이 미치는 영향을 여러 가지 자세에 대하여 조작도 다각형 방법을 이용하여 분석하였다. 조작도 다각형 방법은 타원체를 이용한 조작도 분석에 비하여 계산이 복잡한 단점이 있으나, 관절 제한조건에 대하여 보다 정확한 해석이 가능하다

본 논문은 한국과학재단 기초과학연구사업(과제 : R05-2003-000-10215-0)의 지원하에 이루어졌음

는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 조작도를 로봇의 관절 각속도와 관절 토크의 크기를 제한하여 구하였다.

II. 기본 이론

Lagrange-Euler의 방정식에 의하여 유도되는 로봇의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\tau = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q) \quad (1)$$

여기서 $D(q)$ 는 로봇의 관성행렬, $h(q, \dot{q})$ 는 전향력 및 원심력, $c(q)$ 는 중력에 관련된 영향을 표시한 항이다.

또한 로봇 팔의 속도는 (2)에 의하여 표시할 수 있다.

$$\dot{r} = J\dot{q} \quad (2)$$

이것을 미분하면

$$\ddot{r} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q} \quad (3)$$

이 된다. (3)을 \ddot{q} 로 정리하여 (1)에 대입하여 정리하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\ddot{r} = JD(q)^{-1}(\tau - h(q, \dot{q}) - c(q)) + \dot{J}\dot{q} \quad (4)$$

이것을 다시 정리 표현하면

$$\ddot{r} = JD^{-1}\tau + \ddot{r}_{vel} + \ddot{r}_{grav} \quad (5)$$

이다. 여기서

$$\ddot{r}_{vel} = -JD^{-1}\dot{h} + \dot{J}\dot{q} \quad (6)$$

$$\ddot{r}_{grav} = -JD^{-1}c \quad (7)$$

이 된다.

III. 조작도 다각형

식 (5)에서 \ddot{r} 은 로봇의 관성 특성과 속도 특성 그리고 중력 특성의 선형조합임으로 표현됨을 알 수 있다. 이 관계를

$$\ddot{r} = A(\tau) + B(\dot{q}) + C \quad (8)$$

로 다시 표현할 수 있다. 결국 로봇의 조작도 다각형은 $A(\tau)$, $B(\dot{q})$, C 각각의 다각형의 조합으로 표현이 가능하다.

토크와 관련된 $A(\tau)$ 의 조작도 다각형을 그리기 위하여 τ 를 (9)식을 이용하여 다시 표현하면 식(10)과 같다.

$$\tau = L\bar{\tau} \quad (9)$$

$$A(\tau) = JD^{-1}L\bar{\tau} \quad (10)$$

여기서

$$L = \text{diag}(\tau_1^{\max}, \dots, \tau_n^{\max}) \quad (11)$$

같은 방식으로 관절 각속도와 관련된 $B(\dot{q})$ 를 다시 표현하면 식(12)에 의하여 식(13)으로 나타난다.

$$\dot{q} = K\bar{\dot{q}} \quad (12)$$

$$B(\dot{q}) = KB(\bar{\dot{q}}) \quad (13)$$

여기서

$$K = \text{diag}(\dot{q}_1^{\max}, \dots, \dot{q}_n^{\max}) \quad (14)$$

$\bar{\tau}$ 와 $\bar{\dot{q}}$ 의 제약조건으로 각각 식(15), 식(16)을 사용한다.

$$\|\bar{\tau}\|_{\infty} \leq 1 \quad (15)$$

$$\|\bar{\dot{q}}\|_{\infty} \leq 1 \quad (16)$$

결국 로봇의 조작도 다각형은 식(15)를 이용하여 그려진 토크와 관련된 동적조작도 다각형과 식(16)을 이용하여 그려진 관절 각속도와 관련된 동적조작도 다각형의 조합에 바이어스처럼 작용하는 중력 관련 조작도의 합하는 방법으로 표현할 수 있다.

IV. 3개의 회전축을 가진 2차원

평면로봇의 조작도 다각형 해석 예제

3개의 회전축을 가진 2차원 평면 로봇의 파라미터를 [4]와 동일한 조건으로 설정하였다.

링크	길이(m)	질량(kg)
1	1.0	4.0
2	0.8	2.0
3	0.5	0.6

표 1. 시뮬레이션에 사용된 로봇의 파라미터

로봇의 최대 관절 토크 τ 는 다음과 같이 설정한다.

$$L = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}$$

이때 관절 각속도 \dot{q} 는 다음과 같이 설정한다.

$$K = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 \end{bmatrix}$$

그림 1과 같은 로봇의 형태에서 각 관절 각속도를 $\omega = \omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ 와 같이 동일하게 설정하고 ω 를

1rad/s로 설정하면 그림 2와 같은 조작도 다각형이 생성된다.

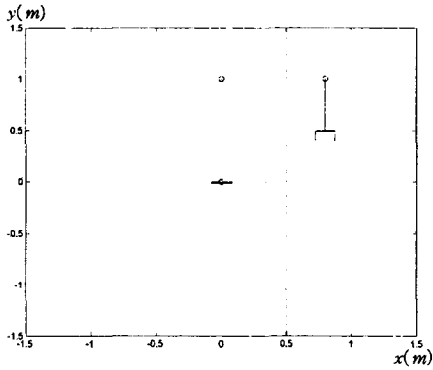


그림 1. 로봇 관절각 $q = [+ \pi/2, - \pi/2, - \pi/2]^T$

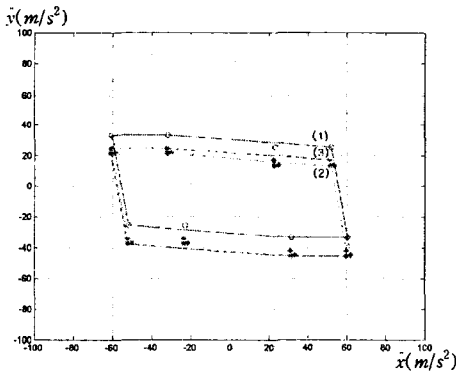


그림 2. (1) 토크만을 고려한 다각형 (2) 토크와 중력을 고려한 다각형 (3) 토크, 중력, 각속도를 고려한 다각형.

그림 2에서 토크만을 고려한 다각형이 중력이 고려되면서 밑으로 쳐지게 되는 것을 볼 수 있으며, 각속도가 고려되면서 조작도 다각형이 커짐을 알 수 있다.

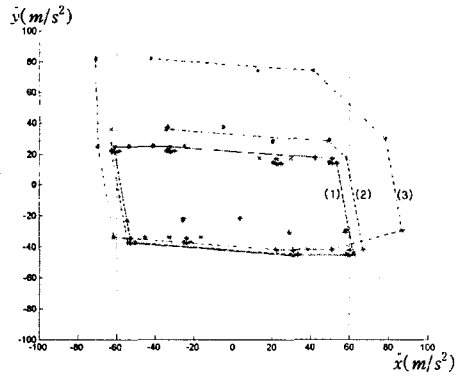


그림 3. (1) $\omega = 1$ (2) $\omega = 2$ (3) $\omega = 4$

그림 3은 그림1의 위치에서 조작 관절 각속도를 1rad/s, 2rad/s, 4rad/s로 변화시키면서 토크, 중력, 각속도의 영향으로 변화되는 다각형을 표시하였다.

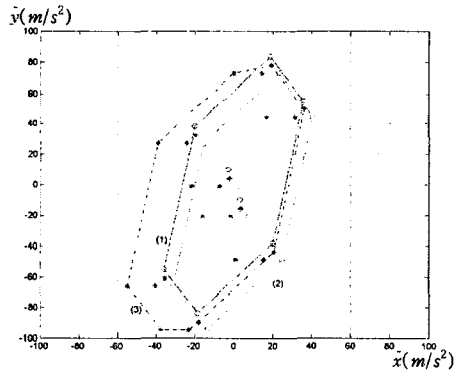


그림 4. (1) 토크만을 고려한 다각형 (2) 토크와 중력을 고려한 다각형 (3) 토크, 중력, 각속도를 고려한 다각형.

그림 4는 $q = [+ \pi/2, - \pi/4, - \pi/4]$, $\omega = 2$ rad/s로 설정하였을 때 조작도 다각형의 형태를 나타내고 있다. 이 경우 다각형의 변화를 보면 주어진 자세에서 관절 각속도 \dot{q} 가 모두 양의 방향으로 2rad/s로 회전하고 있다. 따라서 원심력과 전향력이 양의 방향으로 영향을 미치고 있고 조작도 다각형 역시 속도 성분의 영향으로 각속도가 발생되는 방향으로 더욱 확대됨을 알 수 있다.

참고문헌

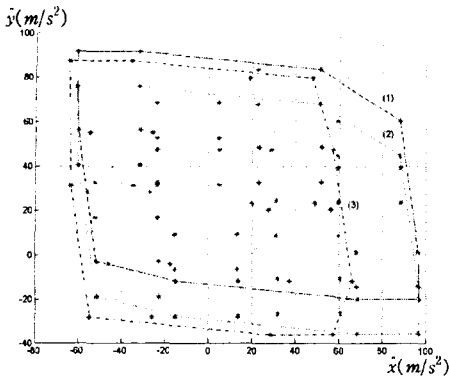


그림 5. (1) $\omega_1=4, \omega_2=1, \omega_3=1$ (2) $\omega_1=1, \omega_2=4, \omega_3=1$ (3) $\omega_1=1, \omega_2=1, \omega_3=4$

그림 5는 각 관절 구동능력에 따른 조작도의 변화를 보기 위하여, 그림 1의 자세에서 관절 구동 능력을 변화시켜 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 관절의 구동능력이 각각 차이를 보임을 알 수 있다. 자세에 따라 그 특징이 변화되지만, 로봇 End-Effector에서 먼 관절일수록 회전 반경이 크기 때문에 조작도 다각형에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 조작도 다각형을 이용하여, 일반적인 조작도 연구에서 무시되는 속도에 관련된 영향을 분석하였다. 특히 관절 각속도가 증가하면서 조작도 다각형의 크기가 각속도의 방향으로 증가되는 것을 알 수 있었다. 또한 각 관절의 각속도 능력이 조작도에 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서도 고찰하였다. 이러한 조작도 분석을 위하여 로봇의 동적 특성을 토크, 속도, 중력으로 구분된 각각의 조작도를 구하고 그들을 조합하여 최종 조작도를 산출해 내었다. 이와 같은 속도에 대한 분석은 중력이 작용하지 않는 우주와 같은 특수 환경에서 구동되는 로봇의 디자인, 경로 계획을 수행할 경우 고려해야 할 것으로 보인다. 추후로 현재 연구가 3개의 회전축을 가진 2차원 평면 로봇에 한정되어 이루어졌는데 추후에 다차원의 다축 로봇에 대한 분석이 필요하다고 생각된다. 또한 속도의 영향에 대한 연구를 확장하여 보다 해석적인 정리가 필요하다고 생각된다.

[1] Tsuneo Yoshikawa, "Manipulability of robot mechanisms", The International Journal of Robotics Research, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, 1985.
 [2] Tsuneo Yoshikawa, "Dynamic manipulability of robot manipulators", Journal of Robotics Systems, vol. 2, no. 1, pp. 113-124, 1985.
 [3] P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciavicco, and B. Siciliano, "Influence of gravity on the manipulability ellipsoid for robot arms", Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, vol. 114, no. 4, pp. 723-727, 1992
 [4] Rosenstein, M.T, Grupen, R.A., "Velocity-dependent dynamic manipulability", Proc. ICRA '02 IEEE, vol.3 pp. 2424-2429, 2002