

○ 최 진욱*, 황 원걸**, 나승유***

* 전남대학교 공과대학 기계공학과 대학원

** 전남대학교 공과대학 기계공학과

*** 전남대학교 공과대학 전자공학과

A STUDY ON THE MANEUVERABILITY OF ROBOT MANIPULATORS

Jin-Wook Choi, Won-Gul Hwang, Seung-You Na

Chonnam National University

ABSTRACT

Usually the first three joint variables (major link) and the next three joint variables (minor link) are used to determine the position and the orientation, respectively, of 6 degrees-of-freedom robot manipulators. In this paper, the Jacobians of 20 major links and 6 minor links are calculated to find the positional maneuverability matrices and orientational maneuverability matrices. Then the kinematic characteristics of the major and minor links are examined. Also we gave the measures of maneuverability and the controllability of the links for the figure of merits of robot manipulator design.

1. 서 론

근래 로봇의 급속한 확산은 로봇 팔의 설계와 제어에 좀 더 체계적인 방법을 요구하게 되었으며 로봇 팔의 성능평가에도 구체적인 지표가 필요하게 되었다. 일반적인 6 자유도 로봇의 성능을 평가하는 지수로서 기동성(maneuverability)[1], 조작성(manipulatability), 또는 Jacobian의 조건수의 역수를 사용한 제어성 등이 발표되었으나, 어떤 특정한 형태의 로봇에 대하여 고찰하는데 그치고 여러가지 형태의 로봇에 대한 비교 평가는 되지 못하였다. 한편 [3]에서는 분리 가능한 로봇에 대하여 주링크와 부링크의 개념을 사용하여 위치와

방향을 별도로 조정하였으나 실제로 분리 가능한 로봇은 극히 드물다. 그리하여 본 연구에서는 주링크와 부링크의 개념을 확장하여 로봇의 처음 3개 관절로 이루어진 링크를 주링크, 나머지 관절로 이루어진 링크를 부링크라고 하여 주링크의 위치 기동성과 제어성, 부링크의 방향 기동성과 제어성을 살펴보고 여러 형태의 링크에 대하여 성능을 비교 고찰하였다.

2. 기동성과 제어성

n 자유도 로봇 팔은 개루프 체인(Open-loop chain)으로 연결된 (n+1)개의 강체의 집합으로 구성된다. 각 관절에서의 좌표축은 Denavit-Hartenberg[7]의 방법에 따르며, 이때 각 링크의 구조 및 상대적 위치를 결정해 주는 매개변수로는 $a_i, \alpha_i, s_i, \theta_i, i = 1, \dots, n$, 가 있다. 회전 관절의 경우는 θ_i 가 관절 변수가 되며, 미끄럼 관절의 경우는 s_i 가 관절 변수가 된다.

로봇 손의 위치와 방향은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} r &= (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)^T \\ &= (p^T, \phi^T)^T \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서, $p = (x, y, z)^T$ 와 $\phi = (\alpha, \beta, \gamma)^T$ 는 각각 손의 위치와 방향을 나타낸다.

$q(t)$ 를 n 개 관절의 변위를 나타내는 n 차원 벡터라 하면 일반적으로 r 과 q 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$r = f(q) \quad (2.2)$$

이 식을 시간 t에 관하여 미분하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{r} = J \dot{q} \quad (2.3)$$

여기서 J 는 f 의 Jacobian 행렬이다.

로봇 손의 위치와 방향은 작업공간 내에서 적절히 제어될 수 있어야 한다. 로봇 손의 어떤 위치에서 미소변위 δp 에 대응하는 관절변수의 변화 δq 를 구할 수 있으면 로봇 팔은 국부적으로 위치 기동성이 있다고 하고, 미소각변위 $\delta \phi$ 에 대응하는 δq 를 구할 수 있으면 국부적으로 방향 기동성이 있다고 한다.

일반적으로 로봇의 처음 3개의 관절은 로봇 매니퓰레이터의 전체 운동을 수행하도록 설계하며, 이 결합을 주링크(major linkage) 또는 로봇 팔이라 한다. 그리고 나머지 관절의 결합은 로봇 손의 방향을 조정하며, 이를 부링크(minor linkage) 또는 로봇 손목이라 한다. 이런 형태의 로봇 매니퓰레이터는 가분성이 있다고 한다. 매니퓰레이터가 가분성이 있으면 설계나 제어의 측면에서 극히 유리하나, 실제적으로 가분성이 있는 매니퓰레이터의 종류는 드물다. 그리하여 주링크와 부링크의 개념은 엄밀하게는 가분성이 있는 경우에만 적용이 되나, 처음 3개의 관절을 주링크, 나머지 관절의 결합을 부링크라고 부르고, 주링크와 부링크를 별도로 고찰하자.

그러면 6×3 행렬인 Jacobian 행렬 J 의 처음 3개의 행은 위치 기동행렬 J_p 를 나타내고 나머지 3개 행은 방향 기동행렬 J_ϕ 를 표시한다. 즉

$$J = \begin{bmatrix} J_p \\ J_\phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

이 된다. 그러므로

$$J_p \delta q = \delta p \quad (2.5)$$

$$J_\phi \delta q = \delta \phi \quad (2.6)$$

이 되며, 식 (2.5)를 δq 에 관하여 풀 수 있는 필요 충분조건은 $\text{rank}[J_p] = 3$ 이다. 그러므로 주링크나 부링크가 $\text{rank}[J_p] = 3$ 이면 3 차원 공간에서 위치에 대한 국부적인 기동이 가능하다. 또한 $\text{rank}[J_\phi] = 3$ 이면 방향에 대해서 국부적으로 기동이 가능하다.

로봇 팔의 조정능력의 정량적인 척도로써 기동성 W 는 다음과 같이 정의된다[8].

$$W = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (2.7)$$

또한 위치 기동성 W_p 와 방향 기동성 W_ϕ 는 다음과 같이 정의된다[9].

$$W_p = \sqrt{\det(J_p J_p^T)} \quad (2.8)$$

$$W_\phi = \sqrt{\det(J_\phi J_\phi^T)}$$

주링크와 부링크의 경우 J_p 와 J_ϕ 는 3×3 행렬이 되고 위치 및 방향 기동성은 다음과 같이 된다.

$$W_p = |\det(J_p)| \quad (2.9)$$

$$W_\phi = |\det(J_\phi)|$$

J_p 와 J_ϕ 가 full rank를 갖는 조건은 $W_p \neq 0$, $W_\phi \neq 0$ 이다. 매니퓰레이터가 분리 가능하면 기동성 W 는 W_p 와 W_ϕ 의 곱으로 나타낼 수 있으며 그 관계는 다음과 같이 된다.

$$W = W_p W_\phi \quad (2.10)$$

로봇 팔의 운동학적 제어성의 척도로써는 J 의 조건수 $\text{cond}(J)$ 의 역수를 사용한다[8]. J 의 조건수는 가장 큰 특이치와 가장 작은 특이치의 비이다[10]. 그러므로 $[\text{cond}(J)]^{-1} \leq 1$ 이 되고 $[\text{cond}(J)]^{-1}$ 가 1이 되면 모든 방향으로 동등하게 제어될 수 있다는 것을 의미하며 $[\text{cond}(J)]^{-1}$ 가 0이 되면 어느 한 방향으로의 제어성을 잃는다는 것을 의미한다. 그러므로 $[\text{cond}(J)]^{-1}$ 가 가능한 한 1에 가깝도록 설계되어야 한다.

3. 주링크와 부링크

서로 수직하거나 평행한 관절 축으로서 회전형 관절 또는 미끄럼형 관절만을 사용한 3관절의 단순체인(simple chain)의 기동성을 조사하면 W_p 값이 0이 되지 않는 단순체인은 20개로서 다음과 같고, 이 1 배열은 그림 1과 같다.

- A1)R┘R┘R┘R, A2)R┘R┘R, A3)R//R┘R, A4)R┘R┘S
 A5)R┘R//S, A6)R//R//S, A7)R┘S┘R, A8)R┘S//R
 A9)R//S┘R, A10)R//S//R, A11)R┘S┘S, A12)R//S┘S
 A13)S┘R┘R, A14)S//R┘R, A15)S//R//R, A16)S┘R//S
 A17)S//R┘S, A18)S┘S┘R, A19)S┘S//R, A20)S┘S┘S

3 자유도 손목의 방향 기동성의 조건을 만족하는 것은 R┘R┘R 뿐이며, 이 조건을 만족하는 손목의 배열은 그림 2와 같이 6가지 배열이 있다. 표 1은 이 6개 손목의 W_p 로서 방향 기동성을 나타내며, 표 1에서 알 수 있는바와 같이 6개 손목의 방향 기동성은 동등하나 특이점이 다른 것을 알 수 있다. 그림 3에 J 의 조건수의 역수를, 그림 4에 위치 기동성을 나타냈다. 그림 4에 나타나지 않은 $W1$ 과 $W5$ 의 $|J_p|$ 는 0이다. 그림 4에서 알 수 있는바와 같이 $W3$ 과 $W6$ 이 위치 기동성이 크며, 손목으로써 방향만을 조절하고자 할 때는 손의 최종 위치에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 여기서 위치 기동성 $W_p = 0$ 이라는 것은 로봇 손의 위치에 영향을 주지 않는다는 것이 아니고, 어느 1 방향 또는 2 방향으로 위치 변화를 주지

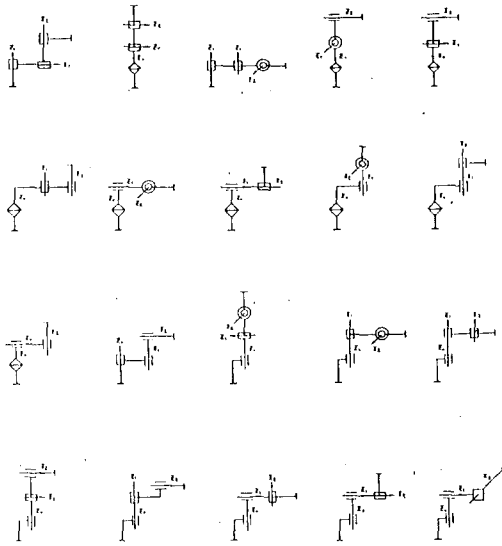


Fig. 1. Major Linkages

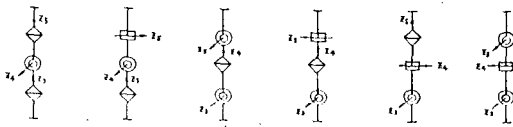


Fig. 2. Arrangements of Wrist

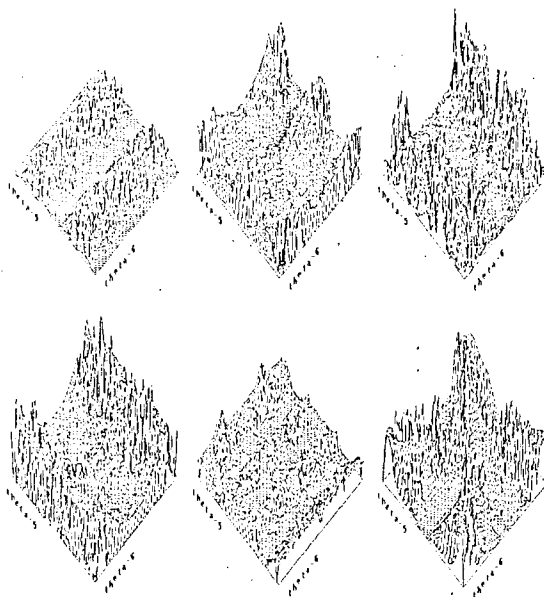


Fig. 3. $[\text{Cond}(J)]^{-1}$ of Wrist

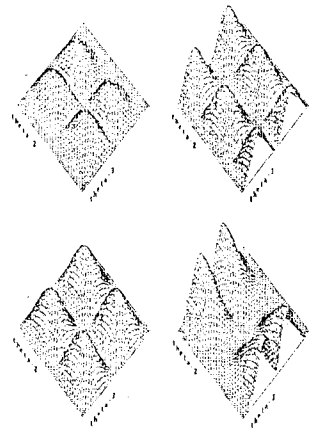


Fig. 4. Positional Maneuverability of Wrist

않는다는 것을 의미한다. 그림 3에서 제어성을 살펴보면 W2, W3, W4, W6가 전반적인 제어성이 좋다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 로봇 팔의 조건수의 역수들, 그림 6은 위치 기동성 W_p 를 나타냈다. 로봇 팔을 설계하고자 할 때는 W_p 가 클 뿐만 아니라 $[\text{cond}(J)]^{-1}$ 가 큰 형태를 골라야 한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 A20인 SLSLS의 형태가 기동성이나 제어성이 가장 뛰어나고 방향에 미치는 영향도 없어 기동성과 제어성의 측면에서 보면 이상적인 형태인 것을 알 수 있다. 또한 SCARA형 로봇인 A15의 경우 특이점 $\theta_3 = 0$ 인 점 부근을 제외한 다른 점에서 제어성이나 기동성이 양호함을 확인할 수 있다. 그림에서 A11, A12와 같이 기동성은 좋으나 제어성이 낮은 경우는 위치 기동성이 각 방향으로 균일하지 않고 어느 한 방향으로 편중되는 경우이다.

표 1. 손목의 방향 기동성

W1	$ J_\phi = \sin \theta_5 $
W2	$ J_\phi = \cos \theta_5 $
W3	$ J_\phi = \sin \theta_5 $
W4	$ J_\phi = \cos \theta_5 $
W5	$ J_\phi = \cos \theta_5 $
W6	$ J_\phi = \sin \theta_5 $

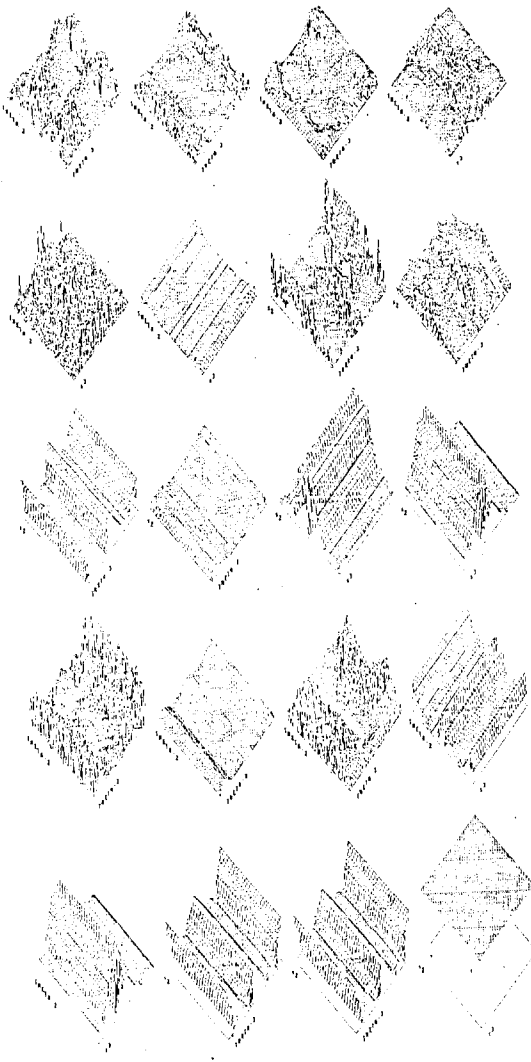


Fig. 5. $[\text{Cond}(J)]^{-1}$ of Arms

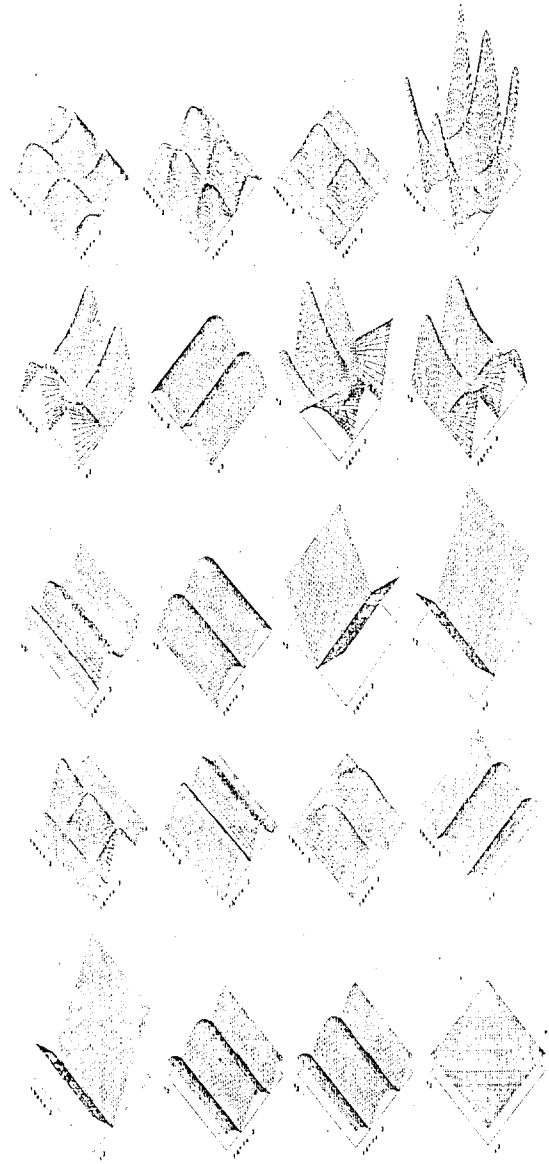


Fig. 6. Positional Maneuverability of Arms

4. 결론

본 연구에서는 주링크와 부링크의 개념을 확장하여 로봇의 처음 3개 관절로 이루어진 링크를 주링크, 나머지 관절로 이루어진 링크를 부링크라고 하여, 주링크의 위치 기동성과 제어성, 부링크의 방향 기동성과 제어성을 살펴보고 여러 형태의 링크에 대하여 비교 고찰하였다.

3 자유도 손목의 방향 기동성의 조건을 만족하는 것은 RLR₁LR₂의 형태로서 6개 손목의 특이점은 다르나 방향 기동성은 동등하다는 것을 알 수 있다. 또한 W2, W3, W4, W6가 전반적인 제어성이 좋다는 것을 알 수 있었다.

로봇 팔을 설계하고자 할 때는 W_p가 클 뿐만 아니라

$[\text{cond}(J)]^{-1}$ 가 큰 형태를 골라야 한다. 20가지의 주링크 형태중 S₁S₂S₃가 기동성이나 제어성이 가장 뛰어나고 방향에 미치는 영향도 없어 기동성과 제어성의 측면에서 이상적인 형태인 것을 알 수 있다.

5. 참고문헌

1. G. Kinoshita, "The Maneuverability of a Manipulator with Multi-Joints," Proc. 11th ISIR, Tokyo, Japan, Oct., 1981, pp.325-332.

2. J.C. Colson and N. Duke Perreira, "Kinematic Arrangements Used in Industrial Robots," Proc. 13th ISIR, Chicago, Ill., Apr., 1983, pp.20-1 - 20-18.
3. V. Milenkovic and B. Huang, "Kinematics of Major Robot Linkage," Proc. 13th ISIR, Chicago, Ill., Apr., 1983, pp.16-31 - 16-47.
4. M.S. Konstantinov, "Structural and Kinematical Analysis of Robots and Manipulators," Proc. 4th ISIR, Tokyo, Japan, Nov., 1974, pp.311-327.
5. Y. Hasegawa and K. Tamaki, "Robot Module Application for Complicated Construction Systems," Proc. 15th ISIR, Tokyo, Japan, Sep., 1985, pp.61-70.
6. R.P. Paul, "Robot Manipulators: Programming and Control," The MIT Press, Cambridge, Mass., 1981.
7. J. Denavit and R.S. Hartenberg, "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices," J. Applied Mechanics, June 1955, pp.215-221.
8. K. Kosuge and K. Furuta, "Kinematic and Dynamic Analysis of Robot Arm," IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, Vol. 2, pp.1039-1044, 1985.
9. W.G.Hwang, "Kinematic Structures of Manipulators," Trans. KSME, Vol. 10, No. 6, pp.959-965, 1986.
10. V.C. Klema and A.T. Laub, "The Singular value Decomposition : Its Computation and Some Applications," IEEE Trans. Aut. Control, AC-25, pp.164-176, 1980.