

로봇과 POSITIONER 시스템의 분석과 제어

(Analysis and Control for Robot - Positioner System)

전의식, 창재원, 오재용, 엄성하

(한양대학교)

1. 서론

최근 산업이 고도로 발달됨에 따라 생산성 및 품질 향상을 위하여 자동화 기기를 포함한 여러가지 기능을 갖는 산업용 로봇과 생산현장에 투입되고 있다. 실제 산업 현장에서는 산업용 로봇의 성능 향상을 위한 방법으로 자유도를 증가 시키거나 보다 효율적인 작업을 위하여 positioner 등의 주변장치와 결합하여 사용하고 있다. 특히 용접작업과 같이 중지 못한 환경에서는 positioner를 이용한 작업이 효과적이다.

그러나 현재 사용되고 있는 작업방식은 로봇과 positioner의 상대적인 위치 및 자세 설정에 의하여 작업효율 및 성능향상을 꾀할 수 있음에도 불구하고 비효율적인 방법으로 사용하고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법중의 하나로 로봇과 positioner 시스템을 하나의 기구학적 모델로 제어하는 방법이 제시된 바 있다. [1]

상기의 연구에서는 로봇과 positioner(이하 R-P 시스템) 간의 협조 제어가 어유자유도 제어 방법을 이용하여 가능한 것임을 보였다. 그러나 용접작업과 같은 positioner 위에서의 연속경로 작업에 있어서는 작업공간과 특이성(singularity)등에 관련된 여러가지 문제점을 안고 있다.

특이성은 외부의 물리적인 제약이나 로봇의 기하학적 구조의 문제로 발생될 수도 있는데 이때 자유도의 손실을 유발하므로 임의의 원하는 방향으로 움직일 수 없게 된다.

이러한 면에서 R-P 시스템의 조작 성능 평가가 중요한 의미를 갖는다. 본 연구에서는 실제 산업 현장에서 이용되고

있는 5 자유도를 갖는 수직 다관절형 로봇과 positioner에 대하여 협조 제어 방법을 검토한다. 그리고 작업공간 내의 조작성능평가를 위하여 Jacobian 행렬을 이용한 조작성지수를 도입하고 주어진 작업단면에 대한 이들의 분포를 등고선 그래프로 시각화 한다.

또한 조작성지수를 최대화 하는 알고리즘을 R-P 시스템에 적용 하고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검토한다.

2. R-P 시스템의 성능 평가

2.1 조작 성능의 평가를 위한 성능지수

일반적으로 n 자유도를 갖는 로봇의 관절변수는 θ 로 나타낼 수 있다. end-effector의 위치 및 자세가 m 자유도로 서술된다면 카르테시안 공간상의 변수는 X 로 표현된다.

θ 와 X 는 다음과 같은 관계식으로 주어진다.

$$X = f(\theta) \quad (1)$$

여기서

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \text{ 는 관절각 벡터}$$
$$X = [X_1, X_2, \dots, X_m]^T \text{ 는 카르테시안 공간상의 벡터}$$

로봇의 작업을 서술하는 변수 X 를 종종 조작성변수라고 하고 (1)식은 비선형방정식이며 이를 선형화한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$dX = J(\theta) d\theta \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } dX &= X \text{의 미분량} && \in R^m \\ d\theta &= \theta \text{의 미분량} && \in R^n \\ J(\theta) &= df / d\theta && \text{Jacobian 행렬} \\ &&& \in R^{m \times n} \end{aligned}$$

(2) 식은 (1)식의 기구학적 방정식을 1차 선형 근사식으로 나타낸 것으로 토포트 end-effector의 동작을 해석하는데 중요한 방정식이며 특성 조사에 효과적이다.

Yoshikawa, Uchiyama 등은 임의의 θ 혹은 $d\theta$ 에 대하여 작업수행을 위한 X 및 dX 를 실현할 수 있는가 하는 의미로 조작성을 설명하였으며 이를 평가하기 위한 기준으로 Jacobian 행렬의 이용을 제안하였다.

이것은 토포트의 조작성능을 정량화한 것으로 조작성지수(Manipulability measure)라고 부른다. 조작성지수는 다음과 같이 정의한다.

$m = n$ 인 경우

$$\omega(\theta) = |\det J(\theta)| \quad (3)$$

$m < n$ 인 경우

$$\omega(\theta) = \sqrt{|\det (J(\theta)J^T(\theta))|} \quad (4)$$

또한 어떤 θ 에 대하여

$$\text{rank } J(\theta) = m \text{ 이면}$$

토포트의 여유자유도는 $(n-m)$ 이 된다.

여유자유도와 여유성 공간의 개념에 대하여 참고문헌 [5]에 잘 설명되어 있다.

$$\text{rank } J(\theta) < m \text{ 이면}$$

조작성지수 $\omega(\theta)$ 는 0이 되며 dX 에 해당하는 $d\theta$ 를 구할 수 없게 되어 특이상태(Singular State)에 놓이게 된다.

이러한 상태에서는 토포트가 몇개의 자유도를 상실하게되며 여유자유도를 갖는 토포트는 여분의 자유도가 특이성회피에 활용된다.

2.2 작업공간 내의 조작성지수 분포

작업공간내에서 토포트의 조작성능에 관한 평가는 조작성지수에 의존한다. 작업공간내에 조작성지수가 분포되어 있는 양상을 통하여 토포트의 전반적인 구조적 특성을 이해할수 있다. 따라서 토포트의 설계나 제어에 조작성지수를

적용하기 위해서는 그것의 계산 및 시각화가 근본적인 문제이다. 그러나 일반적인 토포트의 Jacobian 행렬은 6개의 자유도로 서술되므로 전체 작업공간에 대하여 조작성지수의 분포를 나타내기란 어렵다.

따라서 몇개의 자유도를 고정하고 주어진 작업단면에 대하여 조작성지수의 분포를 나타낸다.

본 절에서는 5 관절형 RHINO 토포트와 두형태의 positioner시스템에 관한 작업단면 상의 조작성지수 분포를 이용하여 조작성능을 비교한다.

각 positioner와 토포트에 관한 관절 매개 변수 및 좌표계를 각각 표1, 표2 그리고 그림 1, 그림 2에 나타내었다. (이하 RP[I], RP[II] 시스템)

각 R-P 시스템의 관절 공간 상의 벡터는

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r]^T \quad (5)$$

이며 작업공간상의 벡터는

$$X = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T \quad (6)$$

이다.

여기서 x, y, z 는 위치를 서술하는 벡터이며, α, β, γ 는 자세를 나타내는 Euler 각이다.

기준 좌표계에 대한 end-effector의 자세는 그림 3에 나타내었다. 우선 R-P 시스템의 조작성능을 평가하기 전에 토포트만의 기구학적 제한점인 특이점을 고찰한다.

RHINO 토포트의 특이점은 end-effector가 기준 좌표에 대하여 수직한 자세를 가지며 토포트 base 좌표의 z 축상에 end-effector가 위치할 때 발생한다. 토포트만의 특이점을 근거로하여 토포트가 positioner와 하나의 기구학적 모델이 되었을 경우 R-P 시스템의 특이성영역을 조사한다.

R-P 시스템의 작업은 positioner 위의 시험편에 대하여 수행되므로 작업공간 및 작업단면은 positioner 위로 한정한다. 그리고 6 자유도로 서술되는 위치와 자세중에서 자세의 3자유도와 위치중 하나의 자유도를 고정하면 원하는 작업단면에서의 조작성지수 분포를 알 수 있다. 조작성지수의 계산은 tilting 각도를 가정하여 결정된 역 기구학적 해를 (4)식에 대입하여 수치적으로 행한다. 계산에서 얻어진 결과를 등고선 그래프를 이용하여 시각화하며 가시적 판단에 의하여 토포트의 조작성능을 평가한다.

그림 4와 그림 5는 RP[I]과 RP[II]

시스템의 주어진 작업단면에 대한 조작성지수의 분포를 등고선 그래프로 나타낸 것이다. 그림 4 (a)로부터 $Y = 0$ 에 end-effector가 위치할 때 특이점에 있게 되며 이 경우 시스템의 형상은 3번째 관절이 0° 일 때이다. 그림 4 (b)는 tilting 관절이 관절값을 갖는 경우이며 $X = Y = 0$ 일 때 특이점을 갖는다. 이것은 end-effector가 positioner base 원점에 위치할 때이다. 그림 4 (c), (d) 는 end-effector 가 Positioner base 에 대하여 수평한 자세로 tilting 관절값이 0° 인 경우와 -15° 인 경우의 등고선그래프 이다. 두 경우 모두 높은 조작성 지수가 positioner의 전영역에 넓게 분포하고 있다. RP[II] 시스템에 대한 그림 5 (a)에서 $Z = 0$ 일때 즉, 3번째 관절이 0° 일 때 특이상태가 되며, 그림 5 (b)의 경우 특이점은 존재하지 않는다. 따라서 동일한 자세와 tilting 각도를 갖는 경우 RP[I] 시스템에 비하여 RP[II]시스템이 조작성능면에서 향상되어 있다. 그림 4 의 (c), (d) 와 그림 5 의 (c), (d)는 모두 높은 조작성지수의 분포를 보이므로 positioner에 대하여 수평한 end-effector의 자세는 큰 조작성능을 갖을 수 있다. 이 상에서 RP[II]시스템이 조작성능면에서 우수함을 알 수 있다.

3. 여유자유도를 이용한 R-P 시스템의 최적제어

본 절에서는 R-P 시스템에 여유자유도 제어방법의 적용이 가능함을 검토하고 R-P 시스템이 갖는 여유자유도를 최적 제어하는 방법에 대하여 논한다.

의사 역변환을 이용하여 선형 대수 방정식 (2)의 일반해를 구하면 다음과 같다.

$$d\theta = J^+(\theta)dX + (I - J^+(\theta)J(\theta))dP \quad (7)$$

여기서 $J^+(\theta) = J(\theta)$ 의 의사 역변환

$I = n \times n$ 단위 행렬

$(I - J^+(\theta)J(\theta))$ 사영작용소

(Projection Operator)

$dP =$ 임의의 미소 벡터

사영작용소 $(I - J^+(\theta)J(\theta))$ 는 dP 를 $J(\theta)$ 의 영공간으로 사영시키는 작용을 한다.

본 절에서는 성능지수를 최적화하는 문제의 일환으로 조작성지수를 최대화하도록 여유자유도를 이용한다.

(7) 식에서 $(I - J^+(\theta)J(\theta))dP$ 항은 end-effector가 원하는 주 작업을 수행한후 여유분(Redundancy)을 나타내고 있으며 성능지수 P 를 최대화하는데 이용된다. 성능지수 P 는 다음과 같이 정의 한다.

$$P = H(\theta) \quad (8)$$

P 의 미소량 dP 는 다음과같이 주어진다.

$$dP = \xi k, \quad \xi = \frac{\partial H(\theta)}{\partial \theta} \quad (9)$$

여기서 k 는 상수이다.

부차적인 작업의 성능 지수를 다음과 같이 설정한다.

$$H(\theta) = k_1 \omega(\theta) + k_2 \theta_1 \quad (10)$$

여기서 k_1, k_2 는 상수

(10) 식의 첫째항은 성능지수를 최대화하도록 하며 둘째항은 tilting 운동이 증가되도록 해준다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

이상과 같은 여유자유도를 이용한 최적제어 문제를 R-P 시스템에 적용하고 그 타당성을 검토하기 위하여 RP[II] 시스템을 대상으로 시뮬레이션 하였다.

RP[II]시스템의 초기 위치 및 자세 X_i 와 최종 위치 및 자세 X_f 는 각각 다음과 같다.

$$X_i = [2, 1, 4, 0, 0, 0]^T$$

$$X_f = [2, 1, -4, 0, 0, 0]^T$$

직선작업에 대한 시뮬레이션으로 그림 6 은 조작성지수의 궤적을 나타낸 것이며 \square 표의 선은 조작성지수를 최대화하는 알고리즘에 의한 것으로 실선으로 나타낸 $dP=0$ 로 제어했을 경우 발생하였던 특이상태도 부터 멀어져 가고 있음을 알 수 있다. 그림 7 은 시뮬레이션 결과를 3차원 그래픽 시뮬레이터를 이용하여 나타낸 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째 등고선 그래프를 이용하여 두형태의 로봇과 positioner 시스템의 조작성능을 비교하였다.

둘째 R-P 시스템에 여유자유도 제어 방법이 유효함을 보였으며 조작성지수를 최대화하도록 여유자유도를 이용한 결과 positioner의 tilting 관절의 운동으로 경로 추적시 조작성지수가 증가됨을 알 수 있었다.

앞으로 자세를 고정한 3 차원 작업공간 내의 성능평가를 위하여 3 차원 등고선 그래프가 요망되며 작업성능을 고려한 positioner의 설계가 기대된다.

참 고 문 헌

1. 전 의 식 " 하나의 기구학적 모델을 이용한 로봇 시스템의 경로제어 ", 대한정밀기계학회 추계 학술대회 초록집 : 47~51 (1986)
2. Uchiyama, M., Shimizu, K., and Hakomori, K. "Performance Evaluation of Manipulators using the Jacobian and its Applications to trajectory Planning." , 2nd Robotics Research, ed. Hanafusa, H. and Inoue, H. : PP.447~454, MIT Press 1984
3. Yoshikawa, T., " Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy." , Robotics Research : The First Int. Symposium, ed. Brady, M., Paul, R.P., PP 735~748 1984
4. Yoshikawa, T., "Manipulatability of Robotic Mechanisms." , 2nd Robotics Research, ed. Hanafusa, H. and Inoue, H., PP 439~446 , MIT Press, 1984
5. Nakamura, Y., and Hanafusa, H., "Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators." 2nd Robotics Research, PP 155~162 , 1984
6. Hollerbach, J.M., "Optimal Kinematic Design for a Seven Degree of Freedom Manipulator." 2nd Robotics Research , ed. Hanafusa, H., and Inoue, H., PP 215~222 MIT Press, 1984
7. Shahinpoor, M., "The Exact Inverse Kinematics Solutions for RHINO XR-2 Robot Manipulator." , Robot Age, PP 6~14, Aug. 1985
8. P.K.Khosla, C.P.Neuman, F.B Prinz " An Algorithm for Seam Tracking Application" The Int. Journ. of Robotics Vol 3, pp 27~41, 1986

표 1. RP[I] 시스템의 관절 매개 변수

| link | θ_i | α_i | a_i | d_i |
|------|---------------------|-------------|--------|-------|
| 1 | θ_1 | 90° | 0 | 3.03 |
| 2 | θ_2 | -90° | -11.80 | 0 |
| 3 | θ_3 | -90° | 0 | 5.04 |
| 4 | θ_4+90° | 0° | 9.00 | 0 |
| 5 | θ_5-90° | 0° | 9.00 | 0 |
| 6 | θ_6 | -90° | 0.35 | 0 |
| 7 | θ_7 | 0° | 0 | 6.30 |

(단위 : inch)

표 2. RP[II] 시스템의 관절 매개 변수

| link | θ_i | α_i | a_i | d_i |
|------|---------------------|-------------|-------|-------|
| 1 | θ_1 | -90° | 0 | 0 |
| 2 | θ_2 | 0° | -11.8 | 3.03 |
| 3 | θ_3 | -90° | 0 | 5.04 |
| 4 | θ_4+90° | 0° | 9.00 | 0 |
| 5 | θ_5-90° | 0° | 9.00 | 0 |
| 6 | θ_6 | -90° | 0.35 | 0 |
| 7 | θ_7 | 0° | 0 | 6.30 |

(단위 : inch)

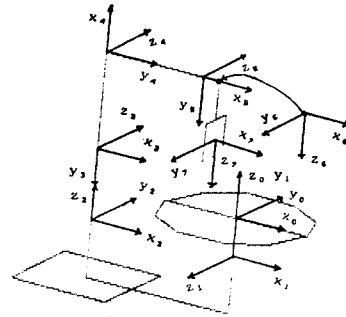


그림 1. RP[I] 시스템의 좌표계

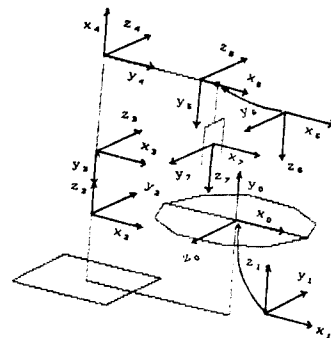


그림 2. RP[II] 시스템의 좌표계

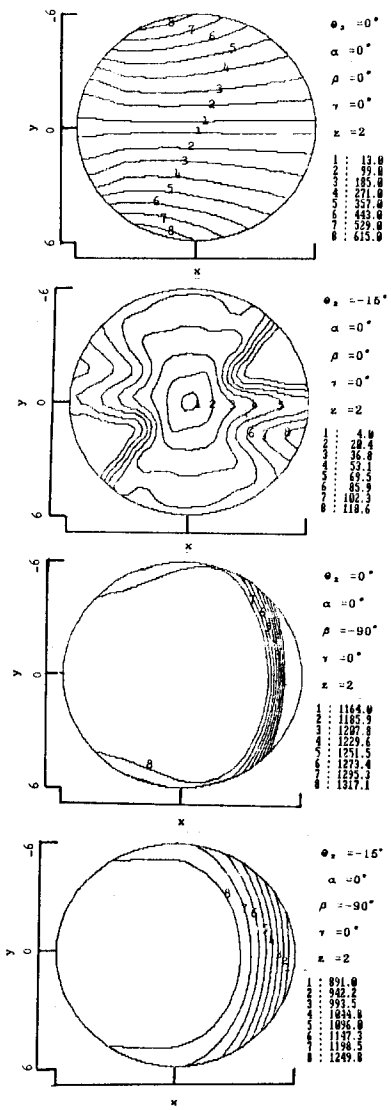


그림 4 RP[1] 시스템에 대한 조작성지수 분포

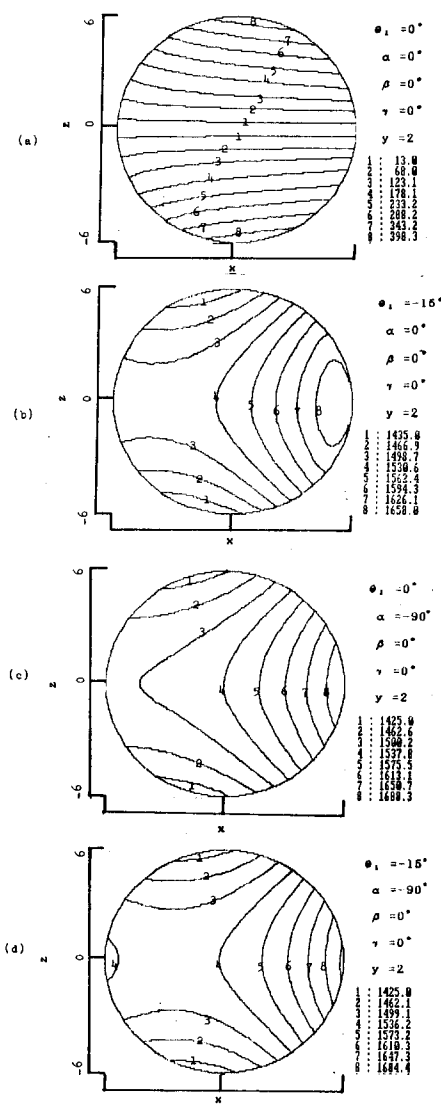


그림 5 RP[11] 시스템에 대한 조작성지수 분포

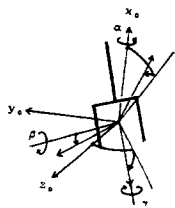
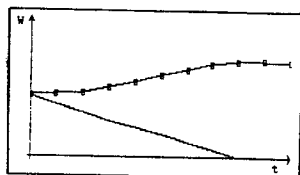


그림 3 end-effector의 자세를 나타내는 Euler 각



— :
(7) 식의 $dP=0$ 로 한 알고리즘
- - - :
소작성지수분 최내의 하는 알고리즘

그림 6 제어 알고리즘에 따른 조작성지수의 비교

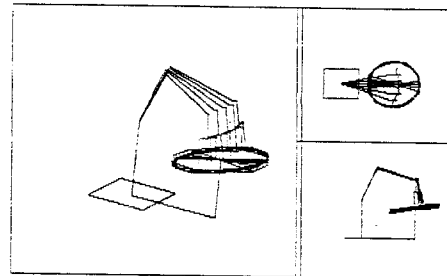


그림 7 제어 알고리즘에 따른 R-P 시스템의 3차원 그래픽