

여유자유도를 갖는 로봇의 관절변수의 위치 및 속도 제한범위 회피를 위한 기구학적 제어방법

(A Kinematic Control Method of Redundant Manipulator for the Avoidance of Joint Position and Velocity Limits)

韓 碩 均*, 徐 一 弘*, 林 俊 弘**

(Seok Kyun Han, Il Hong Suh and Joon Hong Lim)

要 約

여유자유도를 갖는 로봇트 머니플레이터들에 대한 기구학적 제어방법이 관절의 위치와 속도의 제한을 피하는데 여유자유도가 유용 하도록 제안되었다. 주어진 과제에 대하여, 속도제한을 고려해서 각각의 관절이 관절의 가운데 위치에 가능한 근접하게 위치하도록 구한다. 그러므로 로봇트를 관절들이 운동 가능한 속도로 작동하고 운동가능 영역 내에 위치하도록 제어한다. 제안한 방법의 유용성을 보이기 위하여, 주행축을 장치한 RHINO-XR 로봇트에 대해서 두가지의 예를 들었다.

Abstract

A kinematic control method for the redundant robot manipulator is proposed, where redundancy is utilized to avoid the limit of joint positions and velocities. For the given task, the joint positions are obtained in such a way that each joint is placed as close to its center point as possible by considering the velocity limit. The robot is, therefore, controlled so that the joints move with the acceptable velocities and lie within the reachable ranges.

To show the validities of the proposed method, two examples are illustrated by computer simulations for the RHINO-XR robot with sliding base.

I. 서 론

현재 산업현장에서 사용하고 있는 로봇트 머니플

레이터의 대부분은 로봇트의 베이스를 고정시켜 사용하고 있는 데 이와같이 고정되어 있는 로봇트의 작업영역은 로봇트를 구성하는 각 링크의 길이에 의해 결정 된다. 그러나 전동차를 용접하는 경우와 같이 작업영역이 큰 경우는 각 링크의 길이를 짧게 해야지만 이는 실제 제작상의 문제나 비용, 제어 등의 문제로 인해 효과적인 방법이 되지 못한다. 작업영역이 큰 경우에 기존의 로봇트 머니플레이터를 효과

*正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)

**正會員, 韓國航空大學 航空電子工學科

(Dept. of Avionics, Hankook Aviation College)

接受日字: 1987年 6月 22日

적으로 사용 할 수 있는 방법 중의 하나가 베이스를 고정 시키지않고 주행 운동을 할 수 있도록 주행축 (sliding base)에 로봇트 머니플레이터를 설치하는 방법이다. 이와같은 방법에 의해 로봇트를 사용 할 경우 작업공간의 확장이라는 장점은 있지만 제어상의 어려움이 생기게 된다. 즉 기존의 로봇트는 보통 손목부의 위치를 로봇트 몸체의 3 자유도로 결정 하는데, 여기에서 주행축 (sliding base)를 추가할 경우 손목의 위치를 결정 짓는 자유도는 4 개가 되므로 여유자유도 (redundant degree of freedom)가 존재 하게 된다. 이와같이 여유자유도가 있는 로봇트 머니플레이터의 경로제어에 어려움이 따르므로, 효율적인 제어를 위한 연구가 진행 되어왔다. 대부분의 연구가 경로제어라는 1 차 목표를 달성하고, 부차적인 동작목표가 달성되도록 하는 최적해를 구하는 방법을 사용하고 있다.^[1] [2]에서 제시한 가상역변환 (pseudo inverse) 방법은 관절들의 속도가 최소로 되게 하는 것인데, 반복 작업시에는 초기의 형상이 달라져서, 관절들이 제한범위를 넘어 가게되는 단점이 있다.^[2] 한편 [3]에서는 관절들이 제한범위 이내로 오게하는 성능지수를 제안하였다. 그러나 이 방법은 관절들의 제한된 속도값을 넘을 수가 있다.

본 논문에서는 [3]에서 제시한 관절의 제한 범위 회피를 위한 여유자유도 제어방법의 문제점을 보완 수정하여, 이를 현재 사용되고 있는 주행축 (sliding base)를 갖는 수직관절형 산업용 로봇트에 적용하고자 한다. 성능지수를 최소화하는 해를 구하는 방법으로 [4]에서 이용한 부분초적화 (local optimization)의 방법을 이용하며, 이때에 상수값을 적절히 조정함으로써, 관절의 속도 제한을 넘지 않도록 한다. 또한 제시된 방법의 효율성을 보이기 위하여, 현재 산업용 로봇트에서 사용되고 있는 경로제어 방법과 [2]에서 제시한 가상 역변환 (pseudo inverse) 제어방법 및 [3]에서 제시한 관절각 제한범위 회피를 위한 여유자유도 제어방법 등과 비교 연구를 하고자 한다.

II. 여유자유도 제어문제

n개의 관절을 갖는 로봇트의 관절변수를 n차원 벡터 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ 라하면, 로봇트 위치 및 자세를 나타내는 m 차원 벡터 X는 식(1)의 기구학적 방정식으로 표시된다.

$$X = F(\theta) \tag{1}$$

본 논문에서 적용한 주행축을 갖춘 로봇트 손목의 위치를 식(1)의 관계로 보면 X는 3×1 벡터이고, θ 는 주행축의 자유도를 고려한 4×1 벡터가 된다. 따라서 식(1)은 미지수가 4 개이고 식의 갯수는 3개인 연립방정식 이므로, 주어진 위치 X에 대한 관절의 θ 는 무수히 많이 존재하여 어떤해를 선정해야 할 지가 불분명하게 된다. 이러한 문제를 풀기 위하여 몇가지 해결방법을 포함하여 현재 산업계에서 사용하고 있는 방법에 대하여 실제 응용 면에서 비교, 검토 하기로 한다. 첫번째 방법은 직관적인 방법으로서 4개의 자유도중 한개를 미리 고정값으로 주고 나머지 3개의 자유도에 대하여 역 기구학적 해를 구하는 방법으로서 산업계에서 많이 쓰는 방법이다. 이를 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

주행축 (sliding base)에서의 주행운동에 대한 자유도를 θ_1 , 이라 하고, 작업의 시작점에서의 θ_1 값을 θ_{1i} 작업의 끝점에서 θ_1 값을 θ_{1f} 라하면 θ_{1i} 에서 θ_{1f} 까지의 운동에 대하여

$$\theta_1(k) = \theta_{1i} + \frac{(\theta_{1f} - \theta_{1i})}{N} \times k \quad (k=1, 2, N) \tag{2}$$

와 같이 적당한 상수 N으로 등분하여 매 작업점에서의 θ_1 값을 미리 계산하여 주면 손목부 위치를 결정하는 남은 자유도는 3이되어 잘 알려진 역 기구학적 해에 의해 나머지 3자유도에 대한 각 관절변수들의 값을 구할 수 있다. 이 방법은 직관적으로 생각할 수 있는 손쉬운 방법인데 반하여 일반적인 방법론을 제시하지 못하는 단점을 갖고 있다. 즉 작업을 실제로 하는 부분인 선단부의 자세를 고려하지 않고 주행운동 (traverse motion)에서의 시작점과 끝점을 사용자가 임의로 결정하며 또한 이를 적당한 N에 의해 등분하기 때문에 주행운동이 부드럽지 못하고 심한 경우에 Jerk 현상 등과 같은 바람직하지 못한 운동을 유발할 가능성도 있으며, 전체 로봇트 작업에 소요되는 에너지가 필요 이상으로 커질 수 있다. 그리고 선단부의 운동과 무관하게 주행운동을 결정짓기 때문에 전체적으로는 작업 공간 안에 들어가지만 미리 계산되어 고정된 주행위치에서는 작업영역 밖에 선단부가 있어야 하는 불능의 해가 구해질 수도 있다. 그러나 실제로는 계산이 용이하고 쉽게 다룰 수 있기 때문에 산업 현장에서 많이 사용하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 한 자유도를 고정시키지 않고 전체 자유도를 고정시키지 않자코비안 행렬을 이용하여 제어하는 방법이 있다.^[1] 로봇트 머니플레이

터 선단부의 속도와 각관절 속도사이의 관계는

$$\dot{X} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (3)$$

으로 주어진다. 식(3)에서 X는 m차원 변위속도 및 회전각 속도 성분 벡터이고 θ 은 n차원 관절속도 벡터이다. 또한 J(θ)는 식(1)의 F(θ)를 θ 에 대해 미분함으로써 얻어지는 $m \times n$ 자코비안 행렬이다.^[5] 식(3)의 방정식을 이용한 로봇트 제어 문제는 주어진 X에 대응하는 θ 을 구하여야 한다.

본 논문에서 대상으로 하고 있는 주행축을 갖춘 로봇트의 경우에는 $n=4$ 이고 $m=3$ 이므로 $n > m$ 이되어 방정식의 해는 유일하지가 않다. 이경우 식(3)의 일반해는

$$\dot{\theta} = J^+(\theta) \dot{X} + (I - J^+(\theta)J(\theta))Z(\theta) \quad (4)$$

로 주어진다. 여기에서 I는 $n \times n$ 단위 행렬이고 J(θ)는 가상 역 변환 행렬로

$$J^+(\theta) = J^T(\theta) [J(\theta)J^T(\theta)]^{-1} \quad (5)$$

이며, Z(θ)는 n차원의 임의의 벡터이다. 최소자승의 의미에서 Z(θ)=0 (n차원 영벡터)로 하면 관절의 순간 에너지를 최소로 하는 해가 된다.^[2] 이와 같은 방법은 cartesian 좌표계에서 주어진 경로에서 순간에너지를 최소로 하면서 쫓아가도록 식(4)를 이용하여 쉽게 θ 을 계산해서 사용 할 수 있다는 장점은 있지만 주어진 폐경로를 따라가는 작업을 여러번 반복하여 수행하는 경우 매작업시 마다 초기 설정된 로봇트 configuration 이 달라지는 소위 "Conservative motion"이 보장되지 않기 때문에 작업을 반복함에 따라 각 관절각이 위치제한 영역에 들어갈 수 있어 더이상 반복 작업을 계속 할 수 없다는 단점을 갖고 있다.^[3] 또한 [3]에서는 앞서 기술한 문제를 해결하기 위하여 식(4)의 일반해를 이용하여 관절각 제한 범위 회피와 같은 동작목표를 최대로 달성할 수 있는 제어방법을 제시 하였으나, 주어진 해가 관절속도의 제한된 값을 넘을 수가 있어 그대로 사용하기가 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 주어진 속도제한 범위 내에서 관절변수의 제한 범위를 넘지 않고 주어진 경로를 추적케 하는 제어방법을 제시하고, 주행축을 갖는 수직 관절형 로봇트를 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 그 타당성을 보이고자 한다.

III. 관절변수의 속도 및 위치제한 영역 회피를 위한 여유자유도 제어

여유자유도를 갖는 로봇트의 경우 $n > m$ 이기 때문에 식(4)의 일반 해 중에서 Z(θ)를 적절히 조절함으로써 관절변수의 운동제한 범위 회피(joint limit avoidance)와 같은 주어진 동작목표를 최대한 달성 할 수 있는 해를 구할 수 있다. 동작목표 성능지수를 미분가능한 함수 H(θ)로 선정하고, 이 H(θ)를 최소화하는 $\dot{\theta}$ 을 구하므로 우리가 원하는 로봇트의 운동을 할 수 있다.^[3,4] $\dot{\theta}$ 을 H(θ)를 최소화하는 음의 기울기(gradient) 방향 $\dot{\theta}_g$ (즉 $\dot{\theta}_g = -K(\partial H / \partial \theta)$, $K > 0$)에 가능한 가깝게하는 것으로 구하므로 H(θ)를 작게 할 수 있다.^[5] 따라서 식(3)을 만족하는 해 중에서 $\|\dot{\theta} - \dot{\theta}_g\|^2$ 를 최소화하는 $\dot{\theta}$ 을 구하는 문제로되며, 이것은 식(4)에서 Z(θ)를

$$Z(\theta) = -K \left(\frac{\partial H(\theta)}{\partial \theta} \right)^T \quad (K > 0) \quad (6)$$

로 선정하는 것으로 된다. 또한 식(4)에서 $J^+(\theta)$ 는 자코비안 행렬J(θ)의 가상 역 변환으로서

$$J^+(\theta) = J(\theta)^T [J(\theta)J^T(\theta)]^{-1} \quad (7)$$

로 주어진다.

이제 관절각 운동 제한범위 회피를 위하여 H(θ)를

$$H(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \left[\frac{\theta_i - \theta_{ci}}{\theta_{ci} - \theta_{i,max}} \right]^2 \quad (8)$$

로 선정한다. 식(8)에서 θ_{ci} 는 i번째 관절모타 운동 각도 범위 중 가운데 위치이며, $\theta_{i,max}$ 는 i번째 관절모타 각도이다. 또한 W_i 는 가중인자로서 [3]에서 제시한 H(θ)와 다른 점이다. 이때 Z(θ)는 식(6) 및 식(8)로부터

$$Z(\theta) = \frac{2}{n} K \left[\frac{W_1(\theta_1 - \theta_{c1})}{(\theta_{c1} - \theta_{1,max})^2} \cdot \frac{W_n(\theta_n - \theta_{cn})}{(\theta_{cn} - \theta_{n,max})^2} \right]^T \quad (9)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 문제는 K를 θ 의 허용된 최대속도 θ_{max} 보다 작도록 선정 해야하는바, 이를 해결하기 위한 방법을 아래와 같이 제시하기로한다. 먼저 벡터 $\|A\|$ 의 Sup-Norm^[6]으로 정의하고, θ_{max} 를 다음과 같이 정의 한다.

$$\dot{\theta}_{max} \triangleq M_{in} \{ \dot{\theta}_{imax} : \dot{\theta}_{imax} = i \text{ 번째 관절 모타의 최대 허용 각속도, } i=1,2,\dots,n \} \quad (10)$$

그러면, 정의에 의하여 θ 의 허용 각속도 보다 작게되는 충분조건은

$$\|\dot{\theta}\| \leq \dot{\theta}_{\max} \quad (11)$$

가 된다. 그런데 식(4)로부터 $Z(\theta) = K\hat{Z}(\theta)$ 로 놓으면,

$$\|\dot{\theta}\| \leq \|J^+(\theta) \cdot \dot{X}_e\| + K \|(I - J^+(\theta)J(\theta))\hat{Z}(\theta)\| \quad (12)$$

이므로, 식(11)의 조건은 K가 다음의 조건식을 만족하면 성립한다.

$$K < \alpha \frac{(\dot{\theta}_{\max} - \|J^+(\theta)\dot{X}_e\|)}{\|(I - J^+(\theta)J(\theta))\hat{Z}(\theta)\|} \quad (\text{단 } 0 < \alpha < 1) \quad (13)$$

본 연구에서는 K를 식(13)을 만족하는 최대치로 선정하기로 한다. 즉 K는

$$K = \alpha \frac{(\dot{\theta}_{\max} - \|J^+(\theta)\dot{X}_e\|)}{\|(I - J^+(\theta)J(\theta))\hat{Z}(\theta)\|} \quad (14)$$

로 결정한다. 한편 식(14)에서 \dot{X}_e 은 이상적인 경우 \dot{X}_a 을 정하면 되나, 실제로 발생할 지도 모르는 로봇 손목부의 위치 및 자세 오차를 없애도록 하기 위하여, \dot{X}_e 을 다음과 같이 선정하기로 한다.

$$\dot{X}_e = \dot{X}_a + L(X_a - X_a) \quad (15)$$

여기서 \dot{X}_a , X_a 및 X_a 는 로봇 손목부의 원하는 속도, 원하는 위치 및 실제 위치를 나타내며, L은 이득 상수를 나타낸다. 이상에서 주어진 관절각 e 운동 제한 범위 회피를 위한 여유자유도 제어방법은 연속 시간계에서 정의되었는바, 컴퓨터 제어를 위해서는 이산 시간 형태로 바꾸어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 1차 근사화 방법을 이용하여 이산시간 형태로 제어 알고리즘을 변경하였으며, 이를 다음과 같이 제시하기로 한다.

[제어 알고리즘]

단계 1 : $X_a(j)$, $j=0,1,2,\dots,n$, α 및 표본 추출시간 ΔT , $\epsilon > 0$ 및 α_{\max} 를 입력한다. 또한 초기관절각도 $\theta_i(0)$ 및 가중인자 W_i , $i=1, 2, \dots, n$ 을 입력한다. $X_a(0) = X_a(\theta(0)) = F(\theta(0))$ 를 만족하도록 하여야 한다. 그리고 $j=0$ 으로 한다.

단계 2 : $J(\theta(j))$ 및 $J^+(\theta(j))$ 를 구한다,

단계 3 : $I - J(\theta(j))J^+(\theta(j))$ 및 식(9)으로부터 $\hat{Z}(\theta)$ 를 구한다.

$$(\text{단, } Z(\theta) \triangleq Z(\theta)/K = \partial H(\theta)/\partial \theta)$$

단계 4 : $\dot{X}_e(j)$ 을 1차 근사식을 이용하여 다음과 같

이 구한다.

$$\dot{X}_e(j) = \frac{X_a(j+1) - X_a(j)}{\Delta T} + L(X_a(j) - X_a(j)) \quad (16)$$

단계 5 : j번째 표본 추출시의 K_j 를 구한다.

$$K_j = \alpha \frac{(\dot{\theta}_{\max} - \|J^+(\theta(j))\dot{X}_e(\theta(j))\|)}{\|(I - J^+(\theta(j))J(\theta(j)))Z(\theta(j))\|} \quad (17)$$

단계 6 : $\theta(j+1)$ 는 다음과 같이 구한다.

$$\theta(j+1) = \theta(j) + J^+(\theta(j))\dot{X}_e(j)\Delta T - K_j(I - J^+(\theta(j))J(\theta(j)))Z(e(j))\Delta T \quad (18)$$

단계 7 : (j+1)번째 로봇 손목부의 실제위치 $X_a(j+1)$ 를 구한다.

$$X_a(j+1) = F(\theta(j+1)) \quad (19)$$

단계 8 : 만약 $\|X_a(j+1) - X_a(n)\| \leq \epsilon$ 이면 중지하고, 아니면 $j=j+1$ 로 하여 단계 2로 가서 반복 수행 한다.

이상과 같이 제시된 알고리즘의 타당성을 보이기 위해 다음 절에서 주행 운동용 자유도를 갖는 수직 관절형 머니플레이터인 RHINO-XR 로봇에 제시된 알고리즘을 적용하기로 한다.

IV. 주행 운동용 자유도를 갖는 수직 관절형 로봇 머니플레이터의 적용에

RHINO 로봇 머니플레이터는 5 자유도를 갖고 있으며, 작업영역 확장을 위하여 주행 운동을 하도록 주행축을 첨가할 경우 전부 6 자유도의 머니플레이터가 된다. 6 자유도 중에서 손목부의 자세를 담당하는 자유도는 2 개이고 나머지 4 개의 자유도는 로봇의 손목부의 위치를 지정하는데에 사용할 수 있다. 따라서 위치 제어의 관점에서 한개의 여유 자유도가 발생하며, 자세의 관점에서는 오히려 한개의 자유도가 부족하다. 그러므로 본 연구에서는, 자세 제어를 위한 자유도가 부족하므로, 2 개의 손목부 자세 제어를 위한 관절 각도는 관절 공간(jointspace)에서 보간(interpolation)하여 결정하는 방법 즉, 앞 절에서 제시한 제어 알고리즘을 사용하고자 한다. 그림 1에 RHINO XR-2의 외양을 보았다. 먼저 그림 1의 로봇 머니플레이터의 기준좌표계(X0, Y0, Z0)에서 평가한 종료 좌표계(X4, Y4, Z4)의 원점의 위치에 대한 자코비안을 구하기로 한다. 표 1은 각 link의 변수를 나타낸 것으로서, 이들 변수에 대한 A-행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.¹⁵⁾

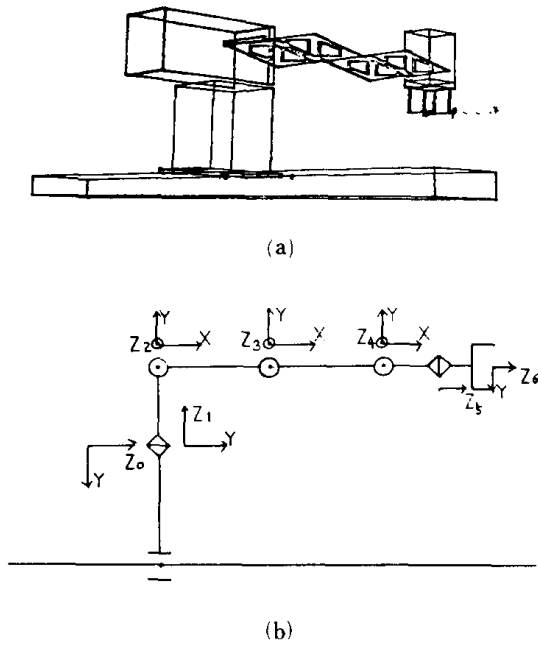


그림 1. 적용대상 로봇의 외관도
 (a) 3-D 외관도
 (b) 기구학적 구조 및 link 좌표계
 Fig. 1. The configuration of the robot to be applied.
 (a) 3-D configuration.
 (b) The kinematic structure and link coordinates.

표 1. 그림 1의 로봇트 머니플레이터의 link 매개 변수들
 Table 1. The link parameters of robot manipulator in Fig. 1.

Link	변수	α	a	d	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$
1	d_1	90	0	d_1	0	1
2	θ_2	90	0	65	0	1
3	θ_3	0	1.9	0	1	0
4	θ_4	0	1.9	0	1	0

(1 = 12.7cm)

$$A1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A2 = \begin{bmatrix} C2 & 0 & S2 & 0 \\ S2 & 0 & -C2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A3 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & 1.903 \\ S3 & C3 & 0 & 1.993 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A4 = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & 1.904 \\ S4 & C4 & 0 & 1.994 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A5 = \begin{bmatrix} C5 & 0 & S5 & 0 \\ S5 & 0 & -C5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A6 = \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0 \\ S6 & C6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서 $S_i = \sin(\theta_i)$, $C_i = \cos(\theta_i)$ 이며 $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ 를 나타낸다.

한편 기준 좌표계에서 본 종로 좌표계 (P_x, P_y, P_z) 를 구하면 $T4 = A1 A2 A3 A4$ 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_x &= 1.9 C2 (C34 + C3) \\ P_y &= -1.9 (S34 + S3) - 0.65 \\ P_z &= 1.9 (C34 + C3) + d1 \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 기준 좌표계에서 평가한 Jacobian 행렬 0J_4 는

$${}^0J_4 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_x}{\partial D} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_x}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial P_y}{\partial D} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_y}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial P_z}{\partial D} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_z}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (22)$$

로서, 다음 식으로 주어진다.

$${}^0J_4 = \begin{bmatrix} 0 & -1.9S2(C34 + C3) & -1.9C2(S34 + S3) \\ 0 & 0 & -1.9C34 - 1.9C3 \\ 1 & 1.9C2(C34 + C3) & -1.9S2(S34 + S3) \\ & -1.9C2S34 \\ & -1.9C34 \\ & -1.9S2S34 \end{bmatrix} \quad (23)$$

그런데 식(23)을 이용하여 전 절에서 제시한 제어 알고리즘을 적용하려면 P_{4x}, P_{4y}, P_{4z} 를 로봇트 손목부의 끝점 P_{dx}, P_{dy}, P_{dz} 로부터 구하여야 한다. 이를 구체적으로 설명하면 로봇트의 기준 좌표 축에서와 같이 로봇트 머니플레이터의 기준 좌표축에 대해서 $Y-R (R = \sqrt{X^2 + Y^2})$ 평면에 대해서 로봇트를 투영시키면 주어진 점 (R, Y) 에 대하여 구하고자하는 점 $A(P_{4x}, P_{4y}, P_{4z})$ 는 R_a 와 Y_a 가 다음 식으로 주어진다(그림 2 참조).

$$\begin{aligned} R_a &= R - 0.65 \cos(\theta_5^*) \\ Y_a &= -(Y - 0.65 \sin(\theta_5^*)) \end{aligned} \quad (24)$$

그러므로 P_{4x}, P_{4y}, P_{4z}

$$\begin{aligned} P_{4x} &= R_a \cos(\theta^*) \\ P_{4y} &= Y_a \\ P_{4z} &= R_a \sin(\theta^*) \end{aligned} \quad (25)$$

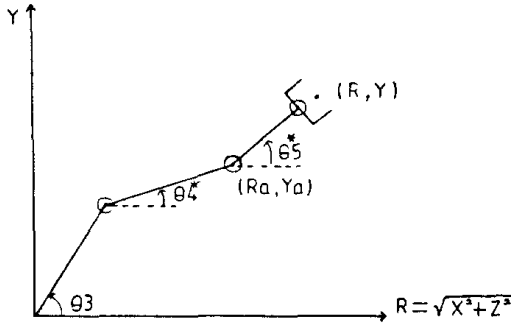


그림 2. R 축을 기준으로한 각 관절각 표현
Fig. 2. Each joint angle with respect to the R axis.

여기서 $\theta^* = \tan^{-1}(X/Y)$ 로서, θ_5^* 및 (R, Y) 즉, $(P6_x, P6_y, P6_z)$ 에 대해서 식(24)와 식(25)를 이용하여 $P4_x, P4_y, P4_z$ 를 구할 수 있고 앞서 기술한 제어방법에 의해 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 를 구할 수 있다. 따라서 θ_6 는 주어진 값을 사용하며 θ_5 는 주어진 θ_5^* 및 θ_3, θ_4 로부터 다음과 같이 구한다.

$$\theta_5 = \theta_5^* - \theta_3 - \theta_4 \quad (26)$$

이제 관절각 제한 범위회피를 위한 성능지수인 식(8)을 사용하기 위하여 각 관절 모터의 제한 범위를 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} -4 \leq d1 (= \theta_1) \leq 4 & \quad (27) \\ -135^\circ \leq \theta_2 \leq 135^\circ \\ -45^\circ \leq \theta_3 \leq 135^\circ \\ -135^\circ \leq \theta_4 \leq 135^\circ \end{aligned}$$

식(24)로부터 $\theta_{c1}, \theta_{c2}, \theta_{c3}, \theta_{c4}$ 는 $\theta_{c4} = (\theta_{1max} + \theta_{1min})/2$ 의 관계에서,

$$\theta_{c1} = 0^\circ, \theta_{c2} = 0^\circ, \theta_{c3} = 45^\circ, \theta_{c4} = 0^\circ \quad (28)$$

$$\theta_{1max} = 4, \theta_{2max} = 135^\circ, \theta_{3max} = 135^\circ, \theta_{4max} = 135^\circ$$

로 주어진다. 따라서 $H(\theta)$ 는

$$H(\theta) = [W1(d1/4)^2 + W2(\theta_2/135^\circ)^2 + W3((\theta_3 - 45^\circ)/90^\circ)^2 + W4(\theta_4/135^\circ)^2]/4 \quad (29)$$

가되며, $Z(\theta)$ 는 식(30)이 된다.

$$Z(\theta) = \left[W1 \frac{d1}{32} \quad W2 \frac{\theta_2}{2(135^\circ)^2} \quad W3 \frac{\theta_3 - 45}{2(90^\circ)^2} \quad W4 \frac{\theta_4}{2(135^\circ)^2} \right] \quad (30)$$

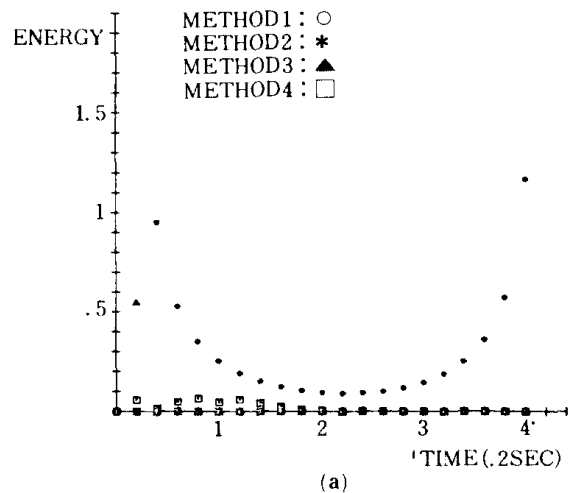
또한, K 는 [3]에서와 같이 고정된 경우와 변하는 경우 각각에 대해서 시뮬레이션하였고, X_e 은 식(16)을 사용하였다. $J^+(\theta)$ 는 $J(JJ^T)^{-1}$ 으로서, 식(23)을 이

용하여 직접 구하여 사용하였고, $X_e = F(\theta)$ 는 식(21)을 사용했다. 이제 식(21), 식(23), $J^+(\theta)$, 식(30)등을 이용하여 첫째, 기존 산업용 로봇에서 사용하는 방법, 둘째, [2]에서 제시한 가상 역변환 제어 방법, 셋째, [3]에서 제시한 관절각 제한범위 회피방법, 넷째, 본 연구에서 제시한 관절각 및 관절각 회피 등에 대하여 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 구하고자 한다.

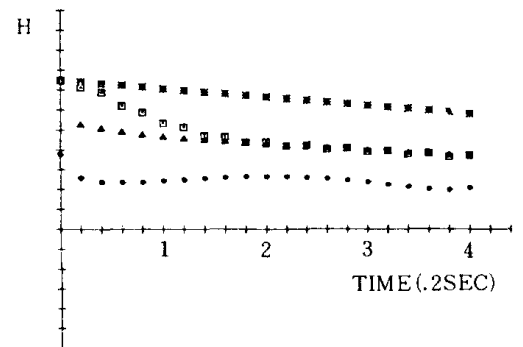
(예제 1)

직교좌표공간에서 주어진 경로가 $A(41.78, 0, 24, 13)$ 에서 $B(41.78, -6.35, 24, 13)$ 까지 Y축에 평행한 직선인 경우에 대하여, 상기 기술한 4 가지 방법을 적용한 시뮬레이션 결과를 그림 3, 그림 4에서 보였다.

그림 3은 에너지 및 $H(\theta)$ 를 나타낸 것이고, 그림 4는 각 제어방법에 대한 속도변화를 나타낸 것이다. 여기서, 첫번째 방법을 위해서는 $d1$ 을 0에서 3.6까지 20등분 하였고, [3]에서 제시한 관절각제한 범위



(a)



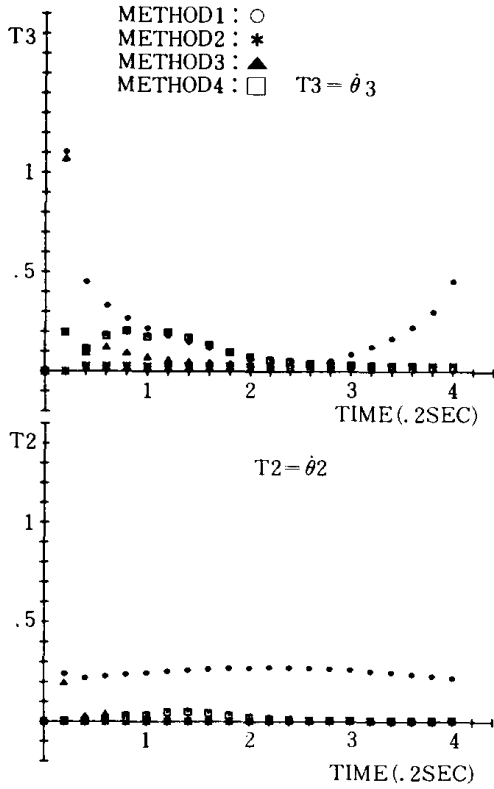
(b)

그림 3. (a) 각 제어 방법에 대한 에너지

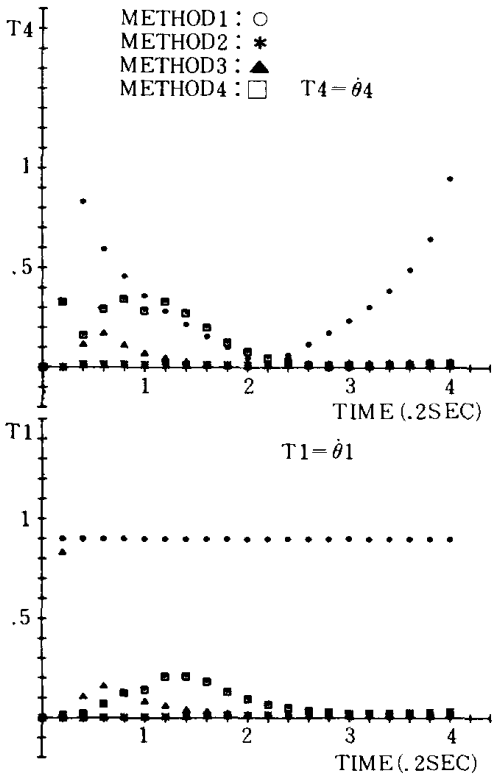
(b) 각 제어 방법에 대한 $H(\theta)$

Fig. 3. (a) Energies for each control method.

(b) $H(\theta)$ for each control method.



(a)



(b)

그림 4. (a) 각 제어 방법에 대한 속도(θ_2 & θ_3)

(b) 각 제어 방법에 대한 속도(θ_1 & θ_4)

Fig. 4. (a) Velocities for each control method (θ_2 & θ_3).

(b) Velocities for each control method (θ_1 & θ_4).

회피방법에 대해서는 K를 10으로하였고, 본 논문에서 제시한 방법을 위해서는 $W_1=1, W_2=1, W_3=1, W_4=1$ 으로 하였고, L은 5, α 는 0.6, θ_{max} 수렴성을 좋게 하기 위하여 K(j)가 10을 넘지 않도록 제한을 두었다. 그리고 ΔT 는 0.2로 선정하였다. 시뮬레이션 결과를 고찰해 보면, 그림3(a)에서 보는 바와 같이 에너지의 관점에서 우수하고, 첫번째 방법인 역기구학적 방법이 다른 방법에 비해 현저히 성능이 떨어짐을 알수 있다. 그림3(b)에서 보는 바와 같이 H(θ)의 관점에서는 [3]에서 제시한 3번째 방법이 다른 방법들 보다 우수하다. 그렇지만 [3]에서 제시한 방법은 그림4에서 보는 바와 같이 첫번째 시간에 3번째 관절에서 관절의 운동속도가 제한 속도인 0.321rad/sec와 0.392rad/sec를 넘게되어 실제로 사용할 수가 없는 반면에 본 연구에서 제시한 방법은 제한속도를 넘지 않는다. 이는 본 연구에서 제시한 방법이 그림5에서 보는 바와 같이 초기운동 기간에는 K를 방법3과 같이 조정하기 때문이다. 자코비안 가상 역 변환 방법은 본 예제에서는 에너지 관점이나 제어 알고리즘의 단순성 등의 면에서 앞서 기술한 바와 같이 폐경로 추적을 반복적으로 수행할 경우에 폐경로 시작 위치에서의 로봇트 관절각도가 위치 제한범위를 침범할 수 있다는 점에서 일반적이지 못하다. 이를 다음 예제에서 보이기로 한다.

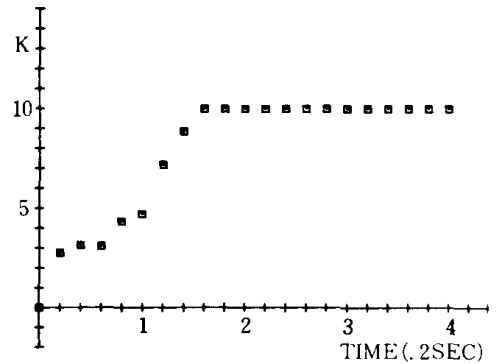


그림 5. 본 연구에서 제시한 이득상수 변화

Fig. 5. Variations of the proposed gain k in Eq(14).

(예제 2) 폐경로 반복 추적 제어

직교좌표 공간에서 점 A(3.290,0,5.699). 점 B(3.290, -1,5.699), 점 C(3.290, -1,5.599), 점 D(3.290,0,5.699)의 4 점을 잇는 4 각형의 폐경로를 그림 1의 로봇트 머니플레이터의 손목부 끝점이 반복적으로 추적하는 작업에 대하여, 본 논문에서 제

시한 방법은 반복 작업시 설정된 관절각 위치 제한 범위를 넘는 것을 보이고자 한다. 이를 위하여 먼저, 첫째 관절인 sliding 축의 운동 가능범위를 $-4 < d1 < 4$ 에서 $-3.8 < d1 < 3.8$ 로 설정함 이는 통상 산업용 로봇에서 관절 운동 범위를 비상시를 대비해서 최대 범위 보다도 작게 되도록 소프트웨어적으로 조정하는 것에 해당된다.

한편 본 논문에서 제시한 방법을 적용 하는 데에 있어서 $W1=25, W2=0.2, W4=0.2$ 로 하였다. 그리고 첫번째 작업시의 로봇 관절 각은 $d1=3.799, \theta2=30, \theta3=\theta4=\theta5=\theta6=0$ 로 선정하였다. 그림 6 은 각각 자코비안 가상 역 변환방법을 적용한 경우와 본 논문에서 제시한 방법을 적용한 경우에 매 작업시의 $d1$ 의 위치를 나타낸 것으로서 자코비안 가상 역 변환의 경우 $d1$ 이 3.8 을 넘어가는 경우가 발생하는 반면에 본 논문에서 제시한 방법은 $d1$ 이 운동 제한 범위를 넘지 않음을 알 수 있다.

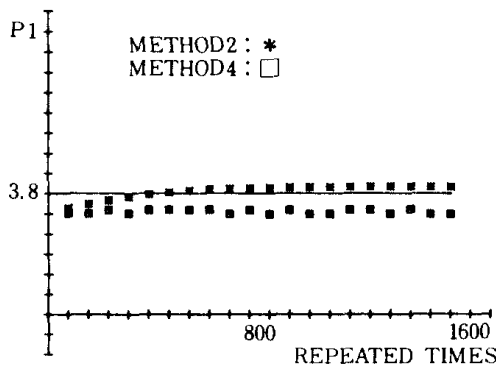


그림 6. 매 작업시 sliding base 의 초기위치 (Method2 및 Method4)

Fig. 6. Initial position of sliding base at each task(Method2 and Method4).

V. 결 론

본 논문에서는 여유 자유도를 갖는 로봇트 머니폴레이터의 경로제어시에, 기.설정 되어있는 관절의 위치 및 속도의 제한범위를 회피할 수 있는 제어방법에 대하여 연구 하였다. 구체적으로, 역 기구학적

방법과 가상 역변환 방법, 자코비안의 일반해를 이용하는 방법에 대해 비교, 검토 하였으며 특히, 자코비안 일반해를 이용하는 방법에서 이득 상수인 K 를 고정시킬 경우 주어진 해가 관절속도 제한에 위배되는 문제점을 해결하기 위하여 관절속도 제한 회피와 관절의 위치 제한범위 회피를 동시에 만족 시킬 수 있도록 이득 상수를 가변하는 방법을 제시하였다. 또한 개선된 방법이 기존의 방법 보다 우수함을 주행축(sliding base) 를 갖춘 RHINO-XR ROBOT 을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 보였다.

參 考 文 獻

- [1] 서일홍, 변중남, “여유자유도를 갖는 로봇트 머니폴레이터의 제어 방법에 관한 조사연구,” ‘86한국 자동제어 학술회의 논문집, KIT,1986.
- [2] D.E. Whitney, “The mathematics of coordinated control of prosthetic arms manipulators,” ASME J. Dynamic Systems. Meas., Control, pp. 303-309, 1972.
- [3] C.A. Klein, and C.H. Huang, “Review of pseudo inverse control for use with kinematically redundant manipulators,” *IEEE Trans. Syst. Man . Cybern.*, vol. SMC-13, no. 3, pp. 245-250, 1983.
- [4] A. Liegeois. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms,” *IEEE Trans. Sys. Man. Cybern.*, SMC-7, no. 12, Dec. 1977.
- [5] R.P. Paul Robot Manipulators, MIT Press: Cambridge, Mass., 1981.
- [6] G. Strang, Linear algebra and its applications, New York, NY. Academic Press, Inc, 1980.
- [7] 한석균, “여유자유도를 갖는 로봇트의 관절변수의 위치 및 속도 제한 범위 회피를 위한 기구학적 제어방법,” 한양대학교 석사학위 논문 1987.
- [8] C.W. Wampler, II, “Manipulator Inverse Kinematic Solutions Based on Vector Formulations and Damped Least-Squaree Methods,” *IEEE Trans. on SMC*, vol. SMC-16, no. 1, pp. 93-101, 1986.