

특이점 부근의 로봇운동을 효과적으로 제어하기 위한 새로운 방법 개발

정원지*, 최은재⁺⁺, 홍대선⁺, 서영교⁺⁺⁺, 홍형표⁺⁺⁺

(논문접수일 2002. 9. 16, 심사완료일 2002. 11. 6)

Development of A New Efficient Method for Controlling Robot Motion at and near Singularities

W. J. Chung*, E. J. Choi⁺⁺, D. S. Hong⁺, Y. G. Seo⁺⁺⁺, H. P. Hong⁺⁺⁺

Abstract

This paper presents a new motion control strategy for singularity avoidance in 6 DOF articulated robot manipulators, based on a speed limiting algorithm for joint positions and velocities. For a given task, the robot is controlled so that the joints move with acceptable velocities and positions within the reachable range of each joint by considering the velocity limit. This paper aims at the development of a new efficient method to control robot motion near and at singularities. The proposed method has focused on generating the optimal joint trajectory for a Cartesian end-effector path within the speed limit of each joint by using the speed limit avoidance as well as the acceleration/deceleration scheme. The proposed method was verified using MATLAB-based simulations.

Key Words : 6 DOF Articulated Robot Manipulators, Singularity, Speed Limit Avoidance, Trajectory Parameter, Simulation, Sampling Time

1. 서론

산업용 로봇의 발달은 이제 어느 정도의 수준까지 도달

한 상태에서 이제는 번외적인 인간친화와 우주산업에 그 시선을 돌리고 있다. 이 즈음에 재고되어야 하는 것이 로봇의 기본적인 기구학 해석과 그 동작의 제어원리이다. 본 연

* 주저자, 국립창원대학교 기계설계공학과 (wjchung@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

+ 창원대학교 기계설계공학과

++ 창원대학교 기계설계공학과 대학원

+++ 두산메카텍(주) 연구개발부

구의 목적은 로봇이 공작물을 고속으로 핸들링을 할 때 일어나는 특이점에서의 유연한 관절운동을 하도록 하는 것에 있다. 특이점이란, 6 자유도를 가진 수직다관절 로봇의 경우 링크기구학적으로 피할수 없는 부분이다. 즉, 자코비안(Jacobian)의 행렬 값이 0이 되는 것을 말한다⁽¹⁾. 그러나, 피할수 없다 할지라도 소프트웨어 상으로 이것을 회피하여 실제 사용자들로 하여금 로봇의 신뢰성을 높여주어야 한다.

일반적으로 특이점 근처에서는 급속한 관절속도가 유발되어 서보모터에 과부하가 걸리게 됨으로써 유연한 관절운동이 어렵게 된다. 이미 선진국에서는 특이점 부근에서 유연한 관절운동기법이 확립되어 현장에 쓰이고 있다^(5,6). 하지만 국내의 대부분의 로봇들은 특이점회피를 하여 유연한 운동을 하기에는 어려움을 보였다.

2. 본론

6축 수직다관절 로봇(Fig. 1)의 역기구학적 해석을 보면 ⁽²⁾ $\theta_3=0$ or π 일 때, $\theta_5=0$ or π 가 되면 기구학적 해가 존재하지 않게 된다⁽¹⁾. 현재까지 국내외에서 사용되고 있는 특이점 회피방법으로는 다음의 세가지 종류가 있다. 티칭(Teaching)시 로봇 궤적이 특이점 근처에 있게 되면 이를 Operator에게 알려 재(再) 티칭을 하도록 하는 것과 티

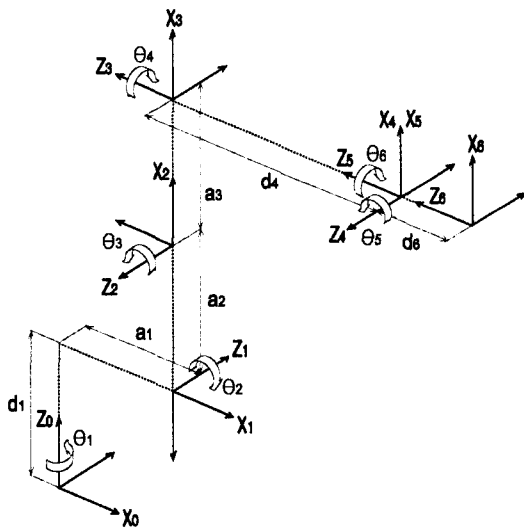


Fig. 1 Doosan Robot (DR6)

칭 궤적이 특이점 근처를 통과하게 되면 실제 운동시에는 그 주위로 우회하도록 하는 궤적 제어, 그리고 로봇 6축외에 별도로 한축을 추가하여 특이점 부근을 통과하지 못하도록 회피제어를 하는 방법이 주가 되었다. 본 논문에서 개발하고자 하는 것은 기구학적 해석을 근간으로 프로그램상의 새로운 특이점회피 알고리즘을 제시하고자 한다.

기존의 특이점 회피에서 티칭된 로봇의 경로가 특이점 부근의 통과 여부를 확인하여야 하는데 이의 확인 방법으로는 다음과 같이 크게 두가지로 나눌 수 있다. Inverse kinematics에서 Jacobian의 Determinant를 구하여 이 값이 0에 가까우면, 그 지점을 특이점으로 인식하는 것과⁽⁶⁾ 각 로봇이 갖고 있는 형태에 따라 특이점 조건을 미리 알 수가 있는데, 이를 미리 설정하여 놓고, 로봇 경로가 이 조건에 부합되면 이를 특이점으로 인식하는 방법이다⁽⁵⁾. 하지만 이 두가지는 Data list화 작업에 있어서 비효율적이고 프로세서의 계산량이 많아 작업시간이 길어지게되어 고속 핸들링이 어렵게 된다.

모터부하에 따른 토크제어의 경우또한 본 연구와 연계하여 사용한다면 안정된 로봇을 완성할 수 있을 것이다⁽⁸⁾.

특이점회피에 대한 알고리즘 분석을 하기 이전에 첫째로 로봇의 기구학적 해석이 뒷받침되어야 한다. 첫째로 순/역기구학(Forward/Inverse Kinematics)를 기초로 로봇의 궤적산출에 이용하고, 또한 로봇의 현재위치와 이동위치에 대한 데이터를 산출하게된다. 둘째로는 자코비안(Jacobian)을 해석하여 특이점의 위치와 특이점 상태를 분석하는데 사용하였다. 여기서 산업용 로봇의 운용에서 오동작을 일으키는 위치를 리스트화 시켜 다음과 같은 특이점회피에 대한 새로운 알고리즘을 개발하였다.

2.1 배경 이론

DR6의 기구학적 파라미터를 보면 Table 1과 같다. 여기서 Danavit-Hatenberg(D-H) 이론을 적용하였다⁽¹⁾.

기구학 해석은 식 (1)을 기본으로 순/역기구학 해석을 하였으며, 실제 프로그램상에 적용을 하였다.

$${}^{i-1}T = Rot(Z, \theta_i) Trans(Z, d_i) Trans(X, a_i) Rot(X, \alpha_i) = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -C_{\alpha_i}S_{\theta_i} & S_{\alpha_i}S_{\theta_i} & a_iC_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\alpha_i}C_{\theta_i} & -S_{\alpha_i}C_{\theta_i} & a_iS_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

DR6와 같은 6축수직다관절 로봇의 경우 각 관절사이에 6개의 Transformation Matrix가 존재한다^(1,3,4). 시뮬레이션

Table 1 D-H parameters of DR6

Joint i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	d_1	a_1	$-\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_2 - \frac{\pi}{2}$	0	a_2	π
3	θ_3	0	a_3	$-\frac{\pi}{2}$
4	θ_4	$-d_4$	0	$\frac{\pi}{2}$
5	θ_5	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
6	θ_6	$-d_6$	0	0

적용시 식 (1)을 기초로 한 Forward/Inverse kinematics를 사용하였다.

Forward Kinematics에 의한 점 데이터는 아래의 식에서 구한다.

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} C_1 S_{23} & -C_1 C_{23} & S_1 & C_1 S_2 a_2 + C_1 a_1 \\ S_1 S_{23} & -S_1 C_{23} & -C_1 & S_1 S_2 a_2 + S_1 a_1 \\ C_{23} & S_{23} & 0 & C_2 a_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_6T = \begin{bmatrix} C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6 & -C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6 & -C_4 S_5 & C_4 S_5 d_6 + a_3 \\ S_5 C_6 & -S_5 S_6 & C_5 & -C_5 d_6 - d_4 \\ -S_4 C_5 C_6 - C_4 S_6 & S_4 C_5 S_6 - C_4 C_6 & S_4 S_5 & -S_4 S_5 d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서 $S = \sin$, $C = \cos$ 이고, 숫자 1~6은 $\theta_1 \sim \theta_6$ 를 나타낸다.

$$\therefore {}^0_6T = {}^0_3T {}^3_6T = \begin{bmatrix} \vec{n}_x & \vec{s}_x & \vec{a}_x & \vec{P}_x \\ \vec{n}_y & \vec{s}_y & \vec{a}_y & \vec{P}_y \\ \vec{n}_z & \vec{s}_z & \vec{a}_z & \vec{P}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 $\vec{P} = (P_x, P_y, P_z)$ 로써 로봇운동의 궤적을 나타내는 점데이터이다.

손목의 $\vec{X}_0 - \vec{Y}_0$ 평면상의 위치를 (P_{ux}, P_{uy}) 라고 하면 역기구학에 의한 Sampling time간의 모터회전각은 식 (3)과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \text{atan2}(P_{uy}, P_{ux}) \\ \theta_2 &= \text{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \\ \theta_3 &= \beta - \left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \\ \theta_4 &= \text{atan2}\left(\left({}^3_6T\right)_{a_x}, -\left({}^3_6T\right)_{a_x}\right) \\ \theta_5 &= \text{atan2}(\sin \theta_5, \cos \theta_5) \\ \theta_6 &= \text{atan2}(\sin \theta_6, \cos \theta_6) \end{aligned} \quad (3)$$

단, $\sin \theta_2, \cos \theta_2, \alpha, \beta, \sin \theta_5, \cos \theta_5, \sin \theta_6$, 그리고 $\cos \theta_6$ 는 Fig. 2를 참고하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \sin \theta_2 &= \frac{AC \cdot AG - CW \cdot GW}{AW} \\ \cos \theta_2 &= \frac{CW \cdot AG + AW \cdot GW}{AW} \\ \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{a_3}{d_4}\right) \\ \beta &= \text{atan2}(\sin \beta, \cos \beta) \\ \cos \beta &= \frac{a_2^2 + a_3^2 + d_4^2 - AW}{2 \cdot a_2 \cdot \sqrt{a_3^2 + d_4^2}} \\ \sin \beta &= \sqrt{1 - \cos^2 \beta} \\ \cos \theta_5 &= \left({}^3_6T\right)_{a_x} \\ \sin \theta_5 &= \sin \theta_4 \left({}^3_6T\right)_{a_x} - \cos \theta_4 \left({}^3_6T\right)_{a_x} \\ \sin \theta_6 &= -\left\{\left({}^3_6T\right)_{nx} \cdot \sin \theta_4 + \left({}^3_6T\right)_{nz} \cdot \cos \theta_4\right\} \\ \cos \theta_6 &= -\left\{\left({}^3_6T\right)_{sx} \cdot \sin \theta_4 + \left({}^3_6T\right)_{sz} \cdot \cos \theta_4\right\} \end{aligned}$$

$\left({}^3_6T\right)_{nx}, \left({}^3_6T\right)_{nz}, \left({}^3_6T\right)_{sx}, \left({}^3_6T\right)_{sz}$ 는 3_6T 행렬에서의 식 (2)와 같은 위치의 원소이다.

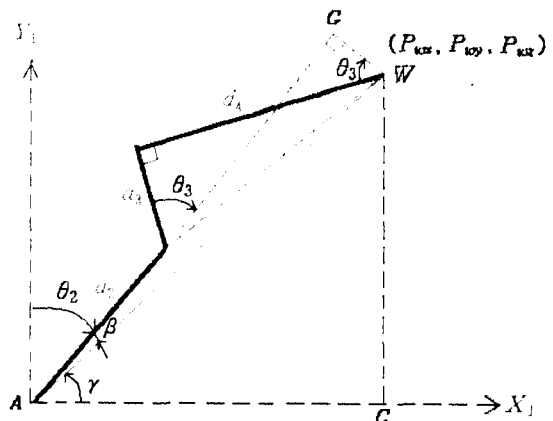


Fig. 2 Position W

구하여진 이동경로에 대해 각 모터의 회전각은 식 (3)에 따라 $\theta_1 \sim \theta_6$ 을 구하여 제어를 한다. 이 경우 궤적산출과 모터의 회전각을 기구학 해석으로부터 구하게 된다. 이때 θ_3 와 θ_5 가 0 또는 π 가 될 때는 모터 회전각이 아주 크게 나온다. 이러한 형태를 특이성(Singularity)이라 한다. 모터 제어의 경우 가,감속 함수를 적용시켜 소음 및 진동을 최소화 하였다⁽⁷⁾.

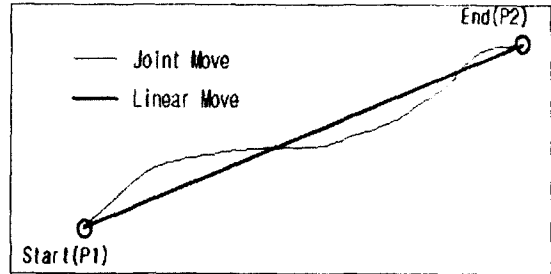


Fig. 3 Linear Trajectory (On teaching)

2.2 새로운 특이점회피

경로의 시작점을 0과 끝점을 1로하여 입력된 좌표의 임의 위치를 정한다(Fig. 2). 입력된 좌표로부터 순기구학을 이용하여 각으로부터의 각 위치와 자세를 입력받는다. Fig. 3에서 보면 입력받은 툴(Tool)의 위치(position), 자세(orientation)로부터 모터 회전각을 구하는 것은 위치 0과 위치 1에서의 위치로부터 역기구학 이용한 해로 각축의 변위각을 이용한 모터회전각을 구한다.

중분값에 대한 단위시간 동안의 이동변위(각)에 따른 각축의 변위각을 계산하고, 계산된 모터회전각으로부터 요구 속도와 가감속도를 구한 뒤 모터의 최대허용속도와 최대허

용선속도(선형보간)를 비교한다.

요구 가감속도와 최대허용가감속도를 비교하여 속도제한을 하게 되는데 여기서 실제요구속도/요구속도의 비를 계산하여 최소값을 해당구간의 비율로 정한다. 비율에 의해 각축별 회전각을 변화시키게 된다. 결과적으로 최대허용속도에 비추어 정해진 이동거리에 맞는 시간(sampling time)이 변경되게 되고 이 변경된 시간에 따른 중분구간의 전체 회전각들을 재계산하여 적용하게 된다.

요구속도와 가감속도가 최대허용치를 벗어나는지를 비교

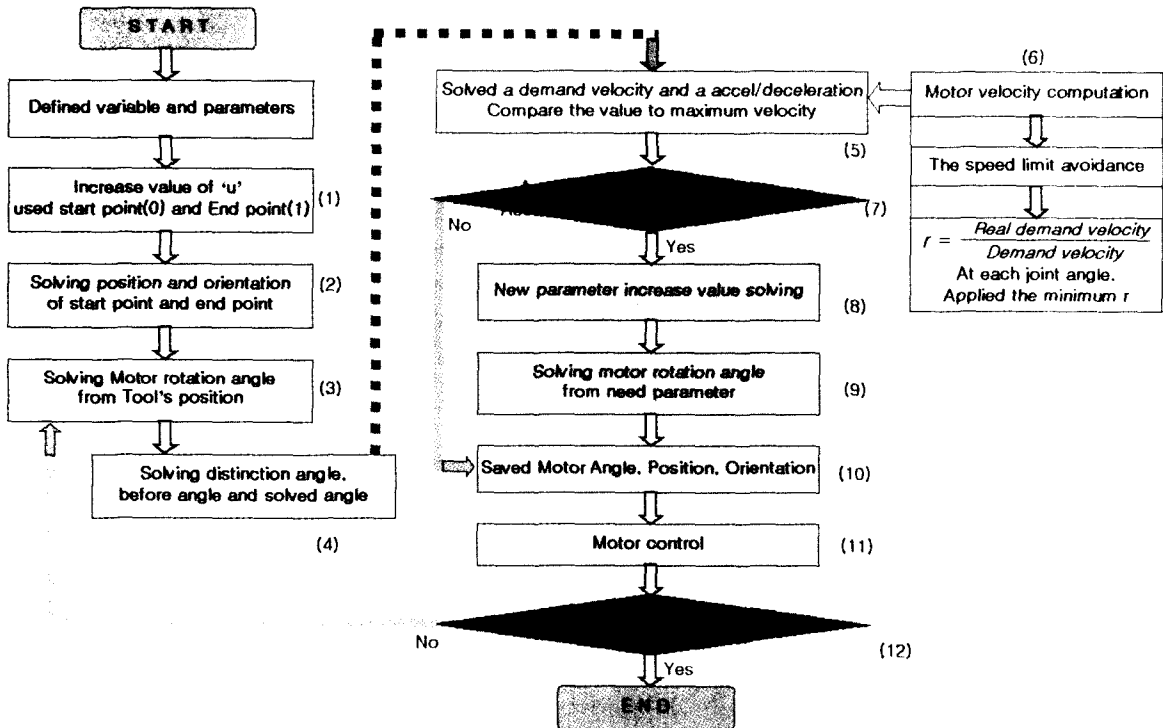


Fig. 4 A speed limit avoidance algorithm

한다(⑦). 최대허용치를 벗어나지 않으면 곧바로 모터회전 각으로 저장, 실행하게 된다. ⑦에서 벗어날 경우 새로운 경로 매개변수 증분 값을 산출·적용시켜 속도와 모터회전 각을 계산하여 이것을 저장하게 된다. 마지막으로 저장된 모터 회전각이 끝점과 일치하는지를 비교하여 끝점에 도달 하지 않을 시에는 ④번부터 반복시행을 하도록 하였다.

고안된 알고리즘(Fig. 4)의 각 단계별 세부설명은 아래와 같다.

- ① 시작점(P_1)과 끝점(P_2)에서의 시간에 따른 증분값(Sampling time) u 를 정한다.
- ② 식 (2)를 사용하여 좌표상의 위치(Position)와 자세(Orientation)를 입력받는다.
- ③ 입력된 툴(Tool)의 위치와 자세로부터 각축의 현재각도를 구한다.
- ④ 현재각과 요구각 사이의 차를 구한다.
- ⑤ 최대요구 각속도와 선속도를 비교분석한다.
- ⑥ 실제 요구각과 허용각과의 비(r)를 구한다.
 r 의 최소값을 기준으로 1보다 큰 경우가 존재하면 u 값을 변경시켜 u' 으로 저장한다.
 여기서 재계산된 u' 을 사용하여 회전각을 구한다.
- ⑦ 요구속도와 계산된 최대허용속도를 비교한다.

- ⑧ Step ⑦에서 요구속도가 모터의 최대허용속도보다 클경우의 단계로 Step ⑥의 과정을 거쳐 모터 회전각을 계산한다.
- ⑨ 새로운 값으로부터 모터회전각을 재계산한다.
- ⑩ 모터각, 위치, 그리고 자세를 저장시킨다. 그리고 Step ⑦에서 "No"일 경우 Step ⑩을 바로 수행하도록 한다.
- ⑪ 모터를 제어한다.
- ⑫ 종점까지 위치했는지를 비교하여 끝점에 이르지 않았다면 Step ③으로 돌아가서 반복수행한다. (이때는 초기 설정된 단위시간 u 를 사용한다.)

개발된 알고리즘은 6축 매니플레이터의 특이성위치에서의 부드러운 경로추적이 가능하며 모터회전각의 최대속도를 넘지 않기 때문에 특이점위치에서도 로봇이 멈추지 않고 이동을 할 수 있다.

개발된 알고리즘의 검증을 위한 시뮬레이션으로 Matlab 을 이용하여 경로궤적을 생성하여 보았다.

3. 시뮬레이션

알고리즘(Fig. 3)의 검증을 위해 Matlab에 실제적으로 적용을 하였다.

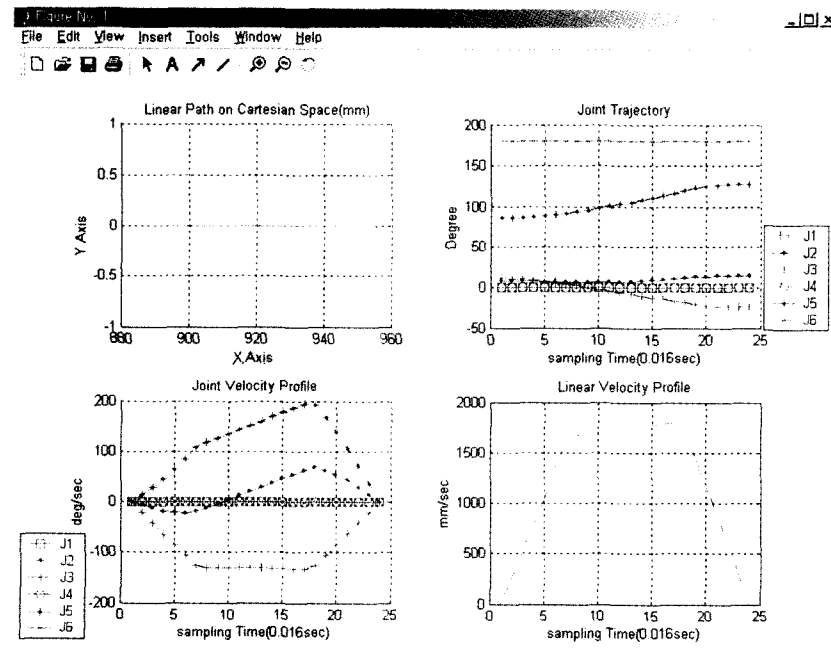


Fig. 5 A General Linear Trajectory

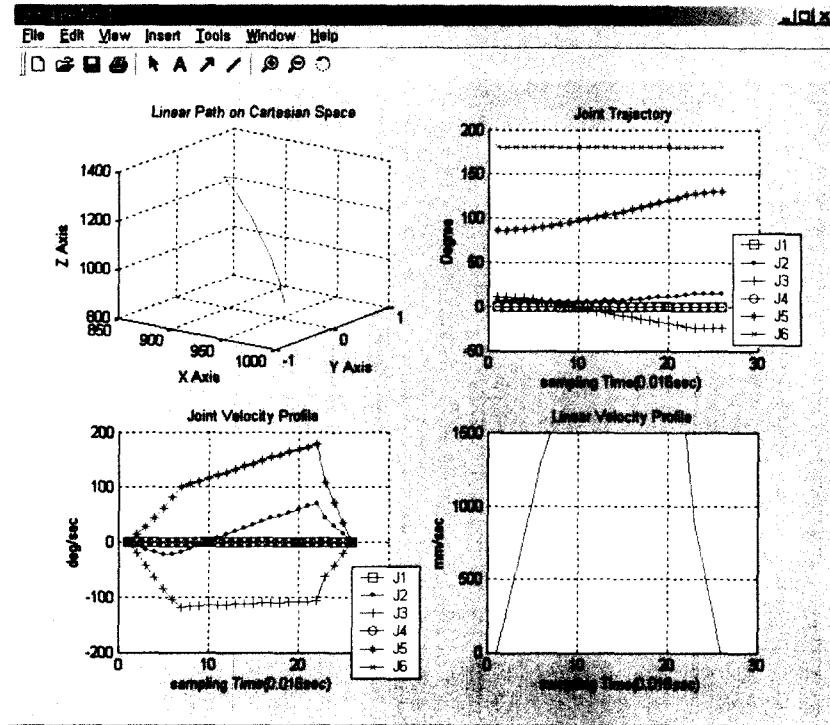


Fig. 6 The result of a new algorithm

우선 단순한 선형궤적의 경우 Fig. 5와 같은 결과로 나오게 되는데 이것을 살펴보면 실제 로봇의 경우 모터회전속도가 180deg/s임을 감안하면 모터속도를 넘어서는 것을 볼 수 있다. 그리고, 선속도의 경우에도 로봇의 실제 선속도 1500mm/s의 속도가 최대허용속도인데 반해 요구속도는 1500mm/s의 수치를 훨씬 넘고 있음이 확인된다. 이와 같은 경우가 특이성이라고 하는데 이런 경우 로봇은 작동을 멈추거나 모터의 부하가 커져 모터의 수명을 단축, 혹은 고장의 원인이 된다. 아울러 사용자의 경우 로봇의 신뢰성이 떨어지게 되는 것이다. DR6의 경우 특이점 통과시 모터의 부하를 막기위해 정지하도록 되어있다.

여기에 개발된 알고리즘의 적용으로 보다 정확하고 실제적인 특이점 회피를 Fig. 6에서와 같이 하게됨을 알 수 있었다. Fig. 6은 제한된 알고리즘을 최종적으로 적용한 것으로서 각축의 허용속도를 넘지않고 경로궤적이 이루어졌음을 볼 수 있다. 선속도또한 1500mm/s를 넘지않아 전체적으로 로봇의 부드러운 동작을 할 수 있는 것이다.

4. 결론

실제로 Matlab을 이용한 위 알고리즘의 시뮬레이션을 하여본 결과 주목할 것은 서두에 제시한 것처럼 속도제한이 두드러지게 나타나며, 특히 각축의 변위량을 살펴보면 4축의 경우 특이성을 나타내는 부분에서의 속도편차가 작음을 알 수 있다. 이것은 로봇의 동작시에 진동을 최소화 시킬수 있다는 것을 의미한다. 그리고, 이것은 어디까지나 Off-line 상의 시뮬레이션이지만 실제 로봇에 적용한다면 현장에서의 진동과 소음의 최소화와 로봇의 신뢰성을 높일수 있는 효과가 있다.

후기

본 연구는 한국과학기술부, 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구센터(RRC)와 두산메카텍(주)의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) Lung-Wen Tsai, *Robot Analysis : The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 218~219, 1998.
- (2) K.S.Fu, *ROBOTICS : Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGraw-Hill Book Company, pp. 12~75, 1987.
- (3) L.Sciavicco, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Springer, 2000.
- (4) C.W.Wampler II, "Manipulator inverse kinematics solutions based on vector formulations and damped least-squares method," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-16, No. 1, pp. 93~101, 1986.
- (5) D.N.Nenchev, "Tracking manipulator trajectory with ordinary singularities: a null space-based approach," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 2, pp. 225~237, 1992.
- (6) J.E.Snell, "Method for controlling the movement of an industrial robot at and near singularities," USA Patent 5590034, 1996.
- (7) 이수중, "자율이동로봇의 실시간 제어를 위한 가,감속 함수의 개발", *한국공작기계학회논문집*, Vol. 10, No. 6, pp. 36~41, 2001.
- (8) 안경관, 조용래, 양순용, 이병룡, "전기유압 매니플레이터의 강건 힘제어", *한국정밀공학회지*, 제19권, 제4호, pp. 202~208, 2002.