

## 최대속도제한 알고리즘을 이용한 6축 수직다관절 로봇의 새로운 특이점 회피방법 개발

최은재\*(창원대 대학원 기계설계공학과), 정원지(창원대 기계설계공학과)  
홍대선(창원대 기계설계공학과), 서영교(두산메카텍(주)), 홍형표(두산메카텍(주))

### A New Method for Singularity Avoidance of 6 DOF Articulated Robot Manipulators using Speed Limiting algorithm

E. J. Choi(Mech. Design & Manufacturing Dept. CNU), W. J. Chung(School of Mechatronics. CNU)  
D. S. Hong(School of Mechatronics. CNU), Y. G. Seo(Doosan mecatec. co., Ltd.)  
H. P. Hong(Doosan mecatec. co., Ltd.)

#### ABSTRACT

This paper presents a new motion control 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. The proposed method was verified using MATLAB-based simulations..

**Key Words** : 6 DOF Articulated Robot Manipulators(6 자유도 수직다관절 로봇), Singularity(특이점), Speed Limit Avoidance(최대속도제한), Trajectory Parameter(경로 변수), Simulation(모의실험),

#### 1. 서론

산업용 로봇의 발달은 이제 어느정도의 수준까지 도달한 상태에서 이제는 번외적인 인간친화와 우주 산업에 그 시선을 돌리고 있다. 이 즈음에 재고되어야 하는 것이 로봇의 기본적인 기구해석과 그 동작의 제어원리이다. 본 연구의 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, Jacobian이 0이 되는 것을 말한다. 하지만, 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.<sup>[6][7][8][9]</sup> 하지만 국내의 대부분의 로봇들은 특이점회피를 하여 유연한 운동을 하기에 는 어려움이 보였다.

#### 2. 본론

6축 수직다관절 로봇의 역기구학적 해석을 보면<sup>[1][2]</sup>  $\theta_4=0$ 일 때  $\theta_5=0$  이 되면 기구학적 해가 존재하지 않게 된다. 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 티칭 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 추가 되었다.<sup>[5]</sup> 본 논문에서 개발코자하

는 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 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. 하지만 이 두가지는 Data list화 작업에 있어서 비효율적이고 프로세서의 계산량이 많아 작업시간이 길어지게되어 고속 핸들링이 어렵게 된다.

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 산출하게 된다. 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.1 과 같다.

기구학 해석은 식(1)을 기본으로 순/역기구학 해

table. 1 DR6의 D-H parameters

Joint i	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	$d_1$	$a_1$	$-\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_2 - \frac{\pi}{2}$	0	$a_2$	$\pi$
3	$\theta_3$	0	$a_3$	$-\frac{\pi}{2}$
4	$\theta_4$	$-d_4$	0	$\frac{\pi}{2}$
5	$\theta_5$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
6	$\theta_6$	$-d_6$	0	0

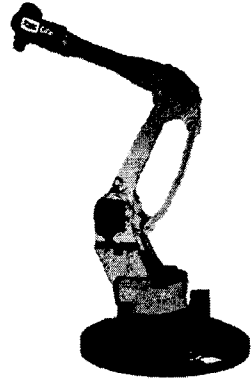


fig. 1 Doosan Robot (DR6)

석을 하였으며, 실제 프로그램상에 적용을 하였다.

$${}^{i-1}T = \text{Rot}(Z, \theta_i) \text{Trans}(Z, d_i) \text{Trans}(X, a_i) \text{Rot}(X, \alpha_i)$$

$$= \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -C_{a_i}S_{\theta_i} & S_{a_i}S_{\theta_i} & a_iC_{\theta_i} & & \\ S_{\theta_i} & C_{a_i}C_{\theta_i} & -S_{a_i}C_{\theta_i} & a_iS_{\theta_i} & & \\ 0 & S_{a_i} & C_{a_i} & d_i & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & & \end{bmatrix} \dots \dots (1)$$

DR6와 같은 6축수직다관절 로봇의 경우 각 관절 사이에 6개의 Transfer Matrix가 존재한다.<sup>[1][3][4]</sup> 시뮬레이션 적용시 (1)식을 기초로 한 forward/Inverse kinematics를 사용하였다.

## 2.2 새로운 특이점회피

경로의 시작점을 0과 끝점을 1로 하여 입력된 좌표의 임의 위치를 정한다.(fig.2) 입력된 좌표로부터 Forward Kinematics를 이용하여 각으로부터의 각 위치와 자세를 입력받는다. fig.3에서 보면 입력받은 툴 (Tool)의 위치(position), 자세(orientation)로부터 모터 회전각을 구하는 것은 위치0과 위치1에서의 위치로부터 Inverse Kinematics를 이용한 해로 각축의 변위각을 이용한 모터회전각을 구한다.

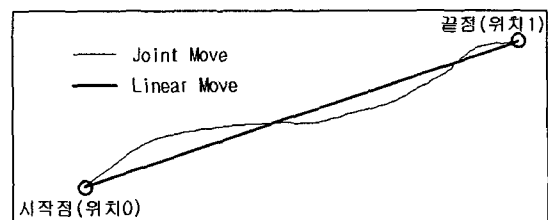


fig. 2 Linear Trajectory(on teaching)

증분값에 대한 sampling time 동안의 이동변위(각)에 따른 각축의 변위각을 계산을 하고, 계산된 모터회전각으로부터 요구속도와 가감속도를 구한 뒤 모터의 최대허용속도와 최대허용선속도(선형보간)를 비교한다.

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

요구속도와 가감속도가 최대허용치를 벗어나는 것을 비교한다.(⑦) 최대허용치를 벗어나지 않으면 곧바로 모터회전각으로 저장, 실행하게 된다.

⑦에서 벗어날 경우 새로운 경로 매개변수 증분값을 산출, 적용시켜 속도와 모터회전각을 계산하여

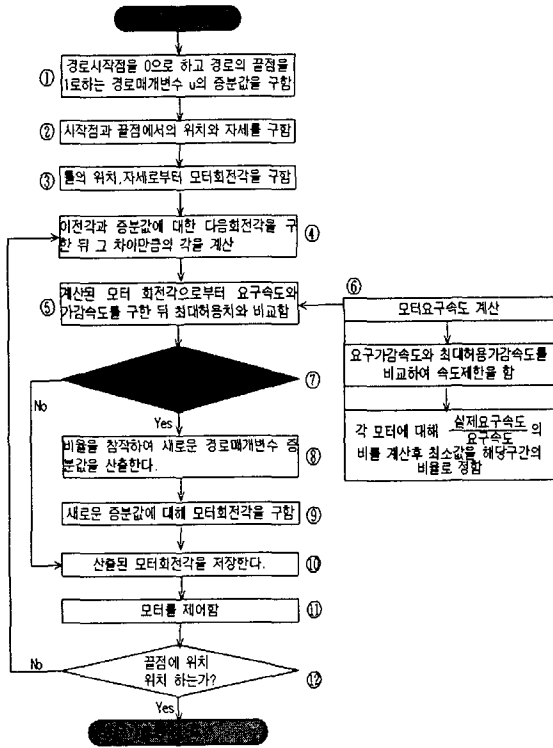


fig. 3 A speed limit avoidance algorithm

이것을 저장하게 된다. 마지막으로 저장된 모터 회전각이 끝점과 일치하는지를 비교하여 끝점에 도달하지 않을 시에는 ④번부터 반복시행을 하도록 하였다.

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

개발된 알고리즘의 검증을 위한 시뮬레이션으로 Matlab을 이용하여 경로계획을 생성하여 보았다.

### 3. 시뮬레이션

알고리즘 fig.3의 검증을 위해 Matlab에 실제적으로 적용을 하였다.

우선 단순한 선형보간의 경우 fig.4와 같은 결과 같이 나오게 되는데 이것을 살펴보면 실제 로봇의 경우 모터회전속도가 180deg/sec임을 감안하면 모터속도를 넘어서는 것을 볼 수 있다. 그리고, 선속도의 경우에도 로봇의 실제 선속도 1500mm/sec의 속도가 최대허용속도인데 반해 요구속도는 1500의 수치를 훨씬 넘고 있음이 확인된다.

이와 같은 경우가 특이성이라고 하는데 이런 경

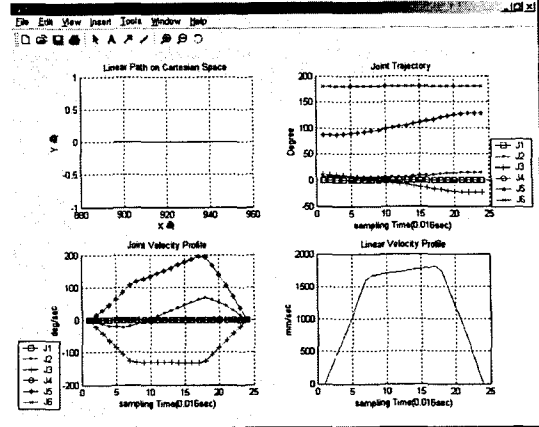


fig. 4 A general linear trajectory

우 로봇은 작동을 멈추거나 모터의 부하가 커져 모터의 수명을 단축, 혹은 고장의 원인이 된다. 아울러 사용자의 경우 로봇의 신뢰성이 떨어지게 되는 것이다.

여기에 개발된 알고리즘의 적용으로 보다 정확하고 실제적인 특이점 회피를 fig.5 에서와 같이 하게 됨을 알 수 있었다. fig.5는 제안된 알고리즘을 최종적으로 적용한 것으로서 각축의 허용속도를 넘지않고 경로계획이 이루어졌음을 볼 수 있다. 선속도 또한 1500을 넘지않아 전체적으로 로봇의 부드러운 동작을 할 수 있는 것이다.

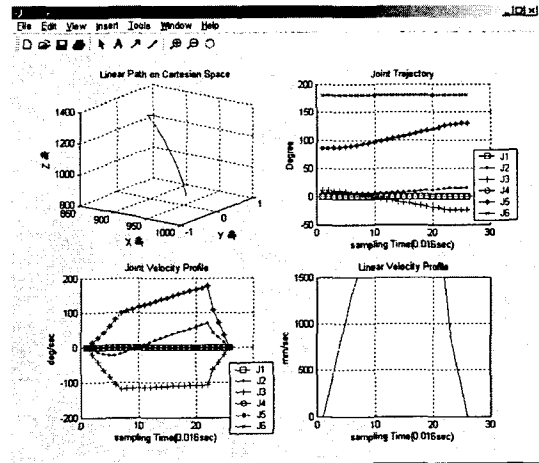


fig. 5 The result of a new algorithm

### 4. 결론

실제로 Matlab을 이용한 위 알고리즘의 시뮬레이

선을 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 진동이 최소화 시킬수있다는 것을 나타낸다. 그리고, 이것은 어디까지나 off-line 상의 시뮬레이션에 불과한 것이다. 실제 로봇에 적용한다면 현장에서의 진동과 소음의 최소화와 로봇의 신뢰성을 높일수 있는 효과가 있다.

### 후기

본 연구는 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구센터(RRC)와 두산메카텍(주)의 지원에 의한 것이다.

### 참고문헌

1. K.S.Fu, "ROBOTICS" McGRAW-HILL, 1987.
2. John J.Craig, "로보틱스", 형설출판사, 1996.
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. J.Kieffer, "Manipulator inverse kinematics for untimed end-effector trajectories with ordinary singularities," The International Journal of Robotics Research, Vol.11, No.2, pp.225-237, 1992
6. 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.
7. M.V.Kircanski, "Inverse kinematics problem near singularities for simple manipulator: symbolical damped least-square solution," Proceedings of IEEE International Conf.on Robotics and Automation, pp.974-979, 1993.
8. S.Chiaverini, B.Sicilano, and O.Egeland, "Review of the damped least-squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulators," IEEE Trans.on Control System Technology, Vol.2, No.2, pp.123-134, 1994.
9. J.E.Snell, "Method for controlling the movement of an industrial robot at and near singularities," USA Patent 5590034, 1996.