

오일러 파라미터를 이용한 로봇 손목관절의 특이성 회피제어

전 의 식*, 박 수 흥**, 오 재 응***

Singularity Control of Robot Wrist Joints using Euler Parameters

E. S. Jeon*, S.H. Park**, J.E. Oh***

Abstract

Considering the singularity of robot, singularity avoidance control of robot is very important. Because it is very difficult structurally to exclude the wrist singularity. Then new control policy is needed to overcome wrist singularity.

In this paper, the singularity states of robot wrist was analyzed and control algorithms for 3 and 4 axes robot wrist were proposed. Application results of the proposed control algorithms to the path including singularity showed us their usefulness and validity.

1. 서 론

최근 산업이 고도로 발달됨에 따라 생산성 및 품질향상을 위하여 공장자동화가 요구되고 있다. 이러한 생산자동화 라인에서는 일반적인 작업수행을 위하여 6자유도를 갖는 로봇트가 필요하다. 그러나 실제로 연속경로 작업이나 복잡한 환경에서는 장애물과의 충돌 및 특이상태 등의 문제가 발생하여 작업을 계속 수행할 수 없는 경우가 발생한다. 이러한 문제는 로봇트의 구조 및 제어방법의 개선에 의해 극복되어질 수 있다.

따라서 구조적 측면에서의 개선방법으로 7축 로봇트에 관한 연구가 수행되어져 왔다. Hollerbach¹⁾는 6축 압의 특이성을 분석하였으며 6축 로봇트에 여유자유도를 부가하여 작업영역 내의 특이성을 제어시키기 위한 7축 로봇트설계에 대하여 연구 하였다. 임의의 자세설정을 위하여 R. P. Paul²⁾은 6관절 로봇트의 자세설정 제약 및 그 제약영역 예측에 관하여 연구하였으며 이러한 제약조건의 해소를 위해 H. Asada³⁾ 등은 손목에 end-effector mount를 달아 특이점을 작업영역 밖으로 배출시키는 방법 및 end-effector mount의 최적설계에

관하여 연구하였고 M. M. Stanišić⁴⁾은 4축 손목관절의 non-degenerate solution에 관하여 연구하였다.

특이성 제어방법으로 M. Sampei⁵⁾ 등은 Time scaling법을 이용하여 특이점 근방에서의 로봇트제어를 연구하였다. 또 Yoshikawa⁶⁾, Y. Nakamura⁷⁾, H. Hanfusa⁸⁾, 오재응⁹⁾ 등은 Jacobian행렬을 이용한 가상 역변환법을 이용하여 여유자유도 제어에 관한 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 Time scaling법은 입력속도가 매우 클때는 원하는 출력에 시간지연이 나타나며 자코비안행렬을 이용한 제어방법은 수치제어이므로 해석적이지 못하며 계산시간때문에 실시간대 제어 알고리즘으로 부적당하며 여유자유도를 가진 로봇트의 경우 가상역 변환에 의한 해를 산출하므로 정확한 해를 얻지 못한다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 오일러 파라미터(Euler paramter)를 이용하여 3축 및 4축을 갖는 로봇트 손목관절의 특이성을 분석하고 오일러 파라미터를 이용한 4축 로봇트 손목관절의 제어방법¹⁰⁾을 제시하고자 한다. 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 특이상태를 포함하는 경로에 대해서 3축 및 4축 로봇트 손목관절을 컴퓨터

* 취안공업전문대학

** 생산기술연구원

*** 한양대학교 기계공학과

시뮬레이션하고자 하며 가시적인 검증을 위해 3차원 그래픽을 이용하고자 한다.

2. 손목관절의 기구학적 해석

2.1 Euler angles을 이용한 hand의 자세표현방법

로봇 손의 운동을 표현하기 위해서는 손에 hand Cartesian frame {H}를 부착한뒤 frame {H}를 forearm 끝단의 reference Cartesian frame {F}에 대하여 기술하여야 한다. frame {F}에서 frame {H}로의 회전 matrix "R"는 다음과 같다.

$$R(\psi, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & & \\ \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & & \\ \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi & & \\ \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta & \\ \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & \\ \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & \end{bmatrix} \quad (1)$$

한편, Euler angles는 손목관절의 joint angles에 해당하므로 joint angle rates와 hand의 angular velocity와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{\cos \theta} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2(q_1 q_2 - \eta q_3) \\ 2(q_1 q_2 + \eta q_3) \\ 2(q_1 q_3 - \eta q_2) \\ 2(q_1 q_3 + \eta q_2) \\ 2(q_2 q_3 - \eta q_1) \\ 2(q_2 q_3 + \eta q_1) \\ 2(\eta^2 + q_3^2) - 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \\ \cos \theta \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\theta = \pm 90^\circ$ 이면 $\det(J) = \cos \theta = 0$ 이 되어 joint angle rates를 구할 수 없다. 이 상태를 특이상태(singular state)라 하며 손목관절의 3개의 회전축이 한 평면상에 있을 때 발생한다. 이러한 경우 어떠한 joint angle rates를 주더라도 hand가 움직이지 못하는 방향이 있게 된다. 따라서 3축 손목관절을 Jacobian을 써서 제어할 경우 특이상태에서는 제어가 불가능하다.

2.2 Euler parameters(quaternion)를 이용한 hand의 자세표현 방법

앞에서 논한 Euler angles는 기구학적으로 이해하기 쉬운 장점을 가지나 특이상태 때문에 손목관절을 제어하기에 부적당하다. 본절에서는 Euler parameters를 이용한 자세표현방법에 대하여 논하고자 한다. 회전 matrix R 과 Euler parameters와는 다음과 같은 관계가 있으며,

$$R = \begin{bmatrix} 2(\eta^2 + q_1^2) - 1 & 2(q_1 q_2 - \eta q_3) \\ 2(q_1 q_2 + \eta q_3) & 2(\eta^2 + q_2^2) - 1 \\ 2(q_1 q_3 - \eta q_2) & 2(q_2 q_3 + \eta q_1) \\ 2(q_1 q_3 + \eta q_2) & 2(q_2 q_3 - \eta q_1) \\ 2(\eta^2 + q_3^2) - 1 & \end{bmatrix}$$

joint angle rates 와 Euler parameters 와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \eta \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y \\ \omega_x & 0 & \omega_z \\ \omega_y & -\omega_z & 0 \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리고 첫 번째 회전으로 생기는 자세차이를 나타내는 Euler parameter를 η_1, q_1 이라 하고 두번째 회전으로 생기는 자세차이를 나타내는 Euler parameter를 η_2, q_2 라 하면 두번의 회전이 연속적으로 일어난 뒤에 자세차이를 나타내는 Euler parameters η, \underline{q} 는 다음과 같다.

$$\eta = \eta_1 \eta_2 - \underline{q}_1 \cdot \underline{q}_2 \quad (5)$$

$$\underline{q} = \eta_1 \underline{q}_2 + \eta_2 \underline{q}_1 + \underline{q}_1 \times \underline{q}_2$$

3. Euler parameters를 이용한 손목관절의 특이 상태 회피제어

3.1 3축 손목관절의 제어 방법

Fig. 1은 3축 로봇트 손의 구조를 나타낸다. Fig. 1에서 X_H, Y_H, Z_H 는 로봇트 손을 나타내며 p, q, r 은 hand의 angular velocity w_x, w_y, w_z 를 의미한다. 3축 로봇트

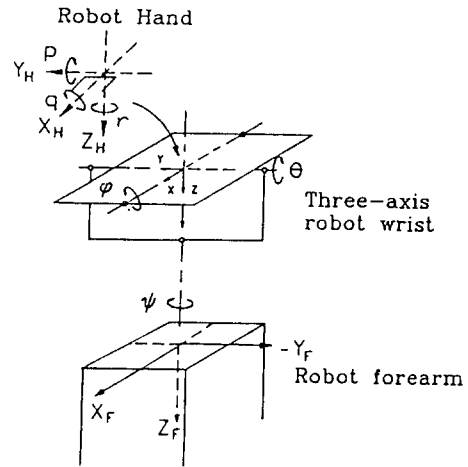


Fig. 1 Robot hand with 3-axis robot wrist

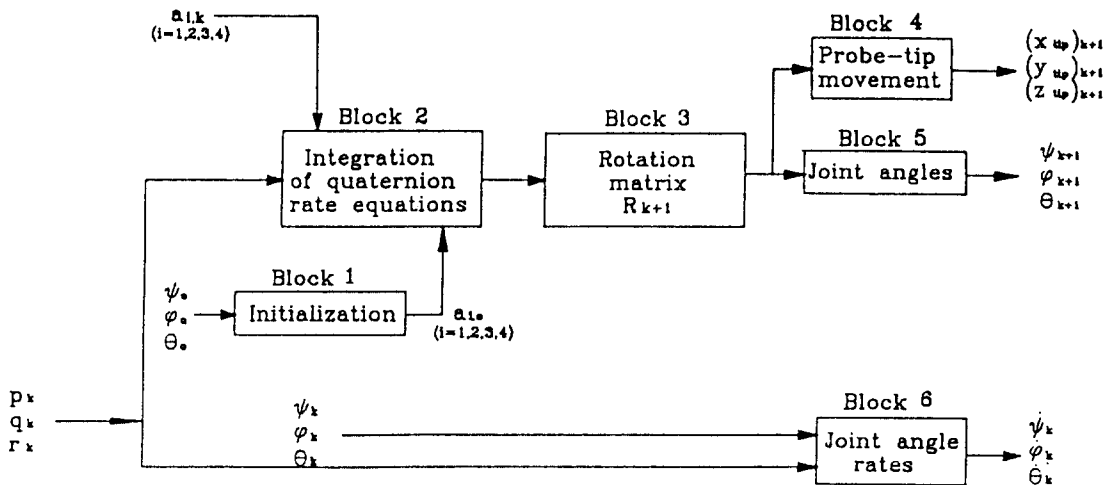


Fig. 2 Block diagram of the control algorithm for 3-axis wrist

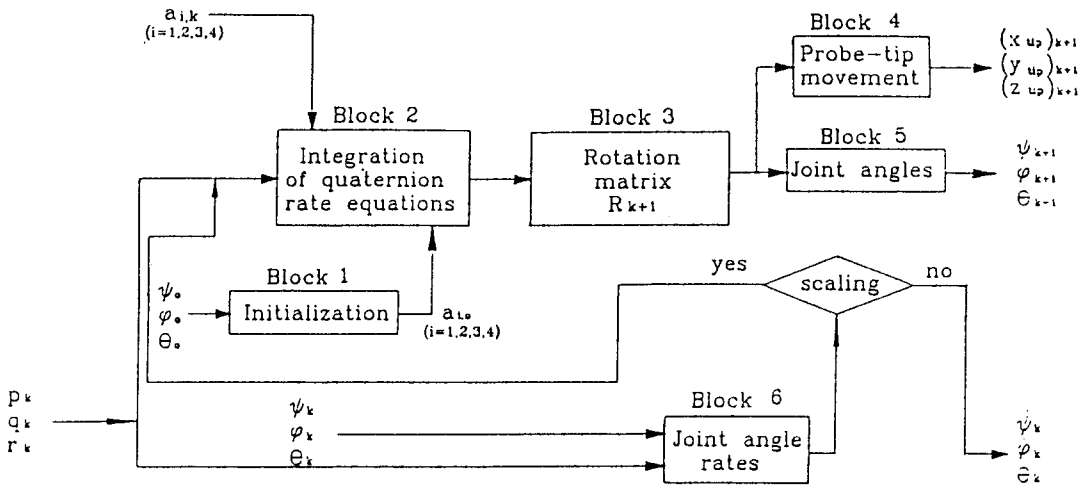


Fig. 3 Block diagram of the control algorithm for 3-axis wrist with scaling procedure

손의 control algorithm을 Fig. 2에 block diagram으로 나타내었다. 그러나 위의 algorithm을 그대로 적용할 경우 특이상태, 즉 θ 가 $\pm 90^\circ$ 근처에 가면 joint angle rate ψ 의 값이 매우 커지므로 구동 actuator의 작동범위를 넘게된다. 이러한 상황을 방지하기 위하여 본 연구에서는 joint angle rates를 scaling하는 algorithm을 제안한다. 이 scaling algorithm이란 계산된 joint angle rates가 각각의 joint actuator의 최대 허용 각속도와 비교되어 같은 비율로 나뉘어지는 것이다. 이 scaling algorithm이 적용된 control algorithm의 block diagram을 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 4축 손목관절의 제어방법

앞에서 언급한 scaling algorithm은 joint actuator에 과부하가 걸리는 것을 방지하나 원하지 않는 시간 지연이 발생한다. 그러므로 3축 손목관절에 제4의 관절을 부착하여 이 여유관절을 이용하여 특이상태를 회피한다. Fig. 4는 4축 로봇 손의 구조를 나타낸다. 4축 손목관절에서의 joint angle rates와 hand의 angular velocity와의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi &= ((\sin \alpha + q \cos \alpha) \sin \phi + (r - \alpha) \cos \phi) / \cos \theta \\ \theta &= (\sin \alpha + q \cos \alpha) \cos \phi - (r - \alpha) \sin \phi \\ \phi &= (p \cos \alpha - q \sin \alpha) + \psi \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

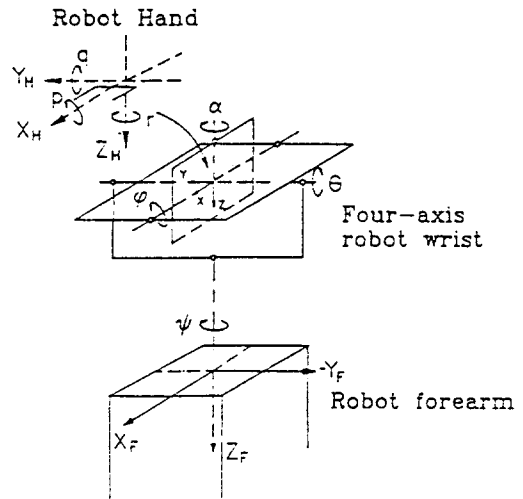


Fig. 4 Robot hand with 4-axis robot wrist

여기서 특이상태 회피제어 알고리즘의 기본원리는 $\cos \theta = 0$ 이 되는 특이상태에 도달하기 전에 θ 의 부호를 바꾸는 것이다. 즉 다음과 같은 α 의 식을 제한한다.

$$\alpha = -\theta \operatorname{sgn}(\sin \phi)$$

여기서, $\operatorname{sgn}(A) = 1$ when $A \geq 0$

$$\operatorname{sgn}(A) = -1 \text{ when } A < 0 \quad (7)$$

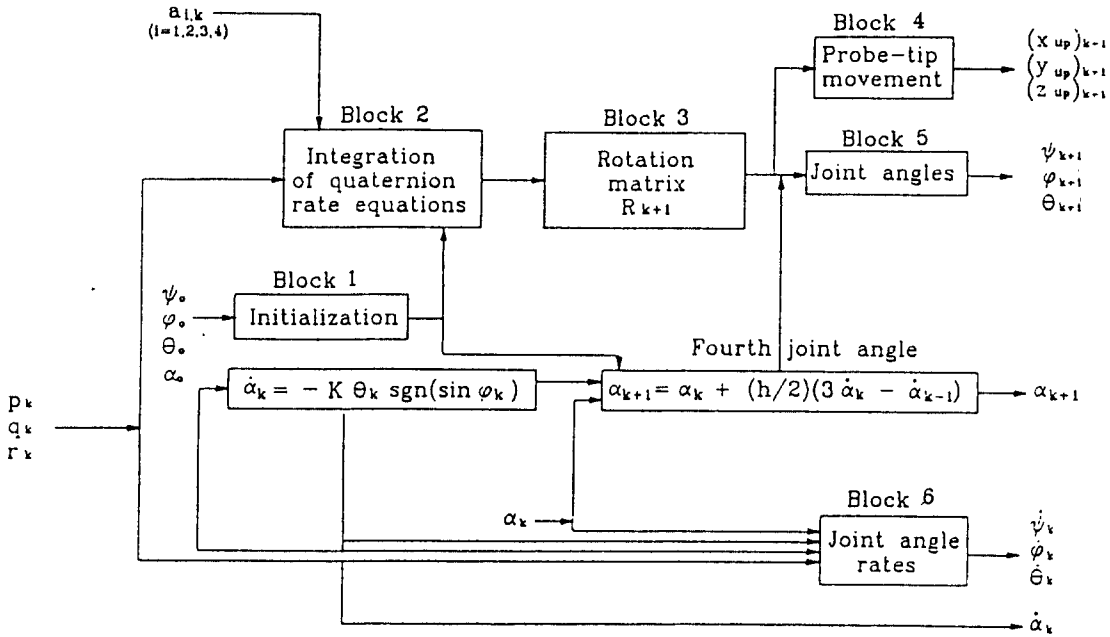


Fig. 5 Block diagram of the control algorithm for 4-axis wrist

Fig. 5에 4축 로봇트 손의 제어 algorithm을 block diagram으로 나타내었다. 4번째 joint angle α_{k+1} 은 Adams-Bashforth second order predictor integration을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k + (h/2) (3\dot{\alpha}_k - \dot{\alpha}_{k-1}) \quad (8)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

컴퓨터 시뮬레이션은

- 1) 3축 로봇트 손의 joint angle rates를 scaling하지 않은 경우
- 2) 3축 로봇트 손의 joint angle rates를 scaling한 경우
- 3) 4축 로봇트 손을 사용할 경우의

3가지 경우로써 특이상태를 포함하는 경로 즉, Probe-tip이 robot forearm axis system (F)의 (0, 6, 0)에서 (0, 0, -6)을 경유하여 (6, 0, 0)으로 움직이게 하였다. 위의 동작을 수행시키기 위하여 샘플링구간 h를 1/30 sec로 하였으며 robot hand rates command를 (0, 6, 0)에서 (0, 0, -6) 구간에서는 $p=0$

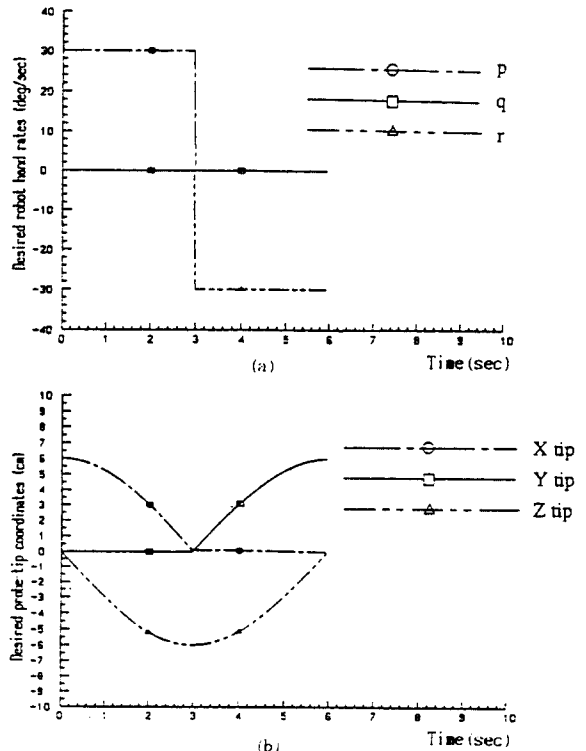


Fig. 6 Desired output

(deg/sec), $q=30$ (deg/sec), $r=0$ (deg/sec)로 하였으며, (0, 0, -6)에서 (6, 0, 0) 구간에서는 $p=0$ (deg/sec), $q=0$ (deg/sec), $r=-30$ (deg/sec)로 하였다. Fig. 6에 얻고자 하는 probe-tip의 위치와 robot hand rates command를 나타내었다.

4.1 3축 로봇 손의 joint angle rates를 scaling하지 않은 경우

joint angle rate을 scaling하지 않은 경우의 commanded robot hand rates와 joint angle rates를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(b)를 보면 3초에서 ψ 의 크기가 무한대가 되고 있음을 알 수 있다. 이것은 손목 관절이 특이상태가 되었음을 의미하여 이러한 joint angle rate가 그대로 joint actuator에 전달될 경우 joint actuator는 과부하를 받게 되어 제대로 동작을 못하게 된다.

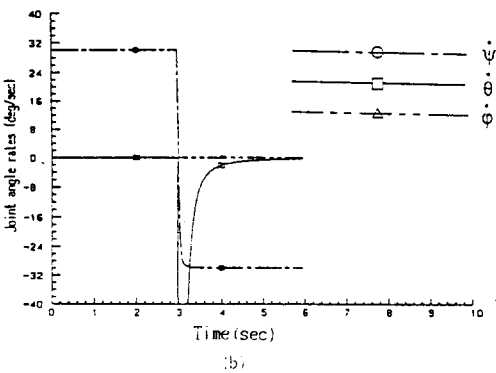
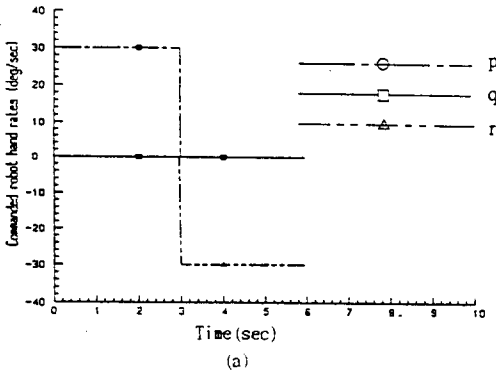


Fig. 7 Simulation with 3-axis robot wrist without scaling of joint angle rates

4.2 3축 로봇 손의 joint angle rates를 scaling한 경우

joint angle rate를 scaling한 경우, scaled robot hand rates, probe-tip의 위치, joint angle rate와 joint angles를 Fig. 8에 나타내었다. 이때 joint actuator의 최대 허용각속도를 60(deg/sec)로 하였다. Fig. 8의 (a), (c)를 보면 scaling 하지않은 경우의 Fig. 8(b)에서 joint angle rates가 같은 비율로 scaling 되었으며 이로인해 특이상태를 통과하는데 시간이 약 1.4초 걸렸다. Fig. 9에서 보면 약 3초에서 4.4초 사이에서는 probe-tip이 거의 움직이지 못한 것을 알 수 있다. 이것은 특이상태로 인하여 원하지 않는 시간지연이 발생한 것이다.

4.3 4축 로봇 손의 경우

Fig. 10(a)의 commanded robot hand rates를 보면 이것은 Fig. 6(a)와 같으며, Fig. 10(c)의 joint angle rates도 무한대의 값이 나오지 않았다. 이것은 4번째 관절의 joint angle rate α 의 작용으로 $\theta \pm 90^\circ$ 에 접근하지 못하게 되어 특이성 회피제어가 됨을 의미한다. Fig. 11은 4축 로봇 손의 probe-tip의 운동을 3차원으로 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 손목관절의 특이상태를 분석하였고 이의 제어를 위하여 Euler parameter와 time-scaling법을 사용하였으며 특이상태를 포함하는 경로에 적용하여 시뮬레이션하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, Euler parameter를 이용하여 로봇 손목관절의 기구학적 해를 구하였다.

둘째, time-scaling법을 이용하여 3축 로봇 손목관절이 특이상태를 통과하는 작업 과정에서도 관절의 최대 허용각속도를 넘지 않는 범위의 관절속도로 특이성을 회피할 수 있었다.

셋째, 제안된 Euler parameter를 이용한 제어방법에 의해 4축 로봇 손목관절이 시간지연 없이 특이상태를 회피할 수 있음을 알았다.

4축 로봇 손목관절의 여유자유도를 제어하기 위하여 성능지수함수의 도입이 요망되며 속도제어 뿐만이 아닌 가속도 제어, 동역학 특성이 고려되는 토크 제어방법등이 더 연구 진행되어야 할 것이다.

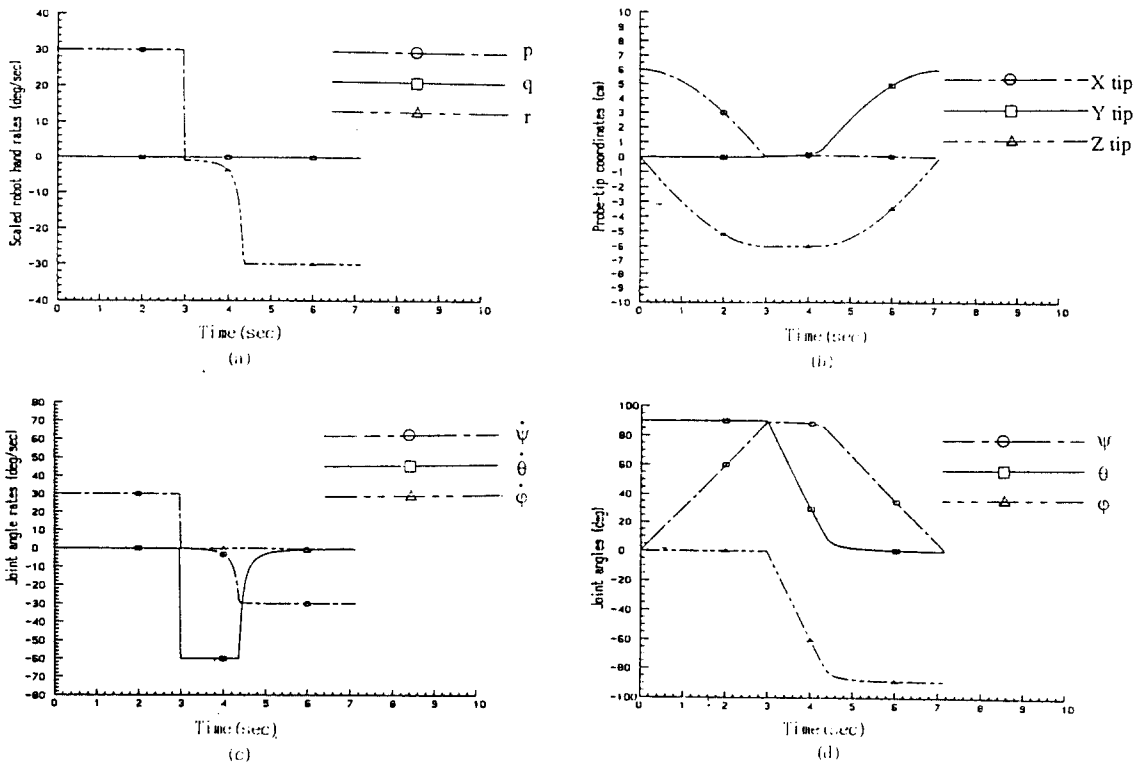


Fig. 8 Simulation with 3-axis robot wrist with scaling of joint angle rates

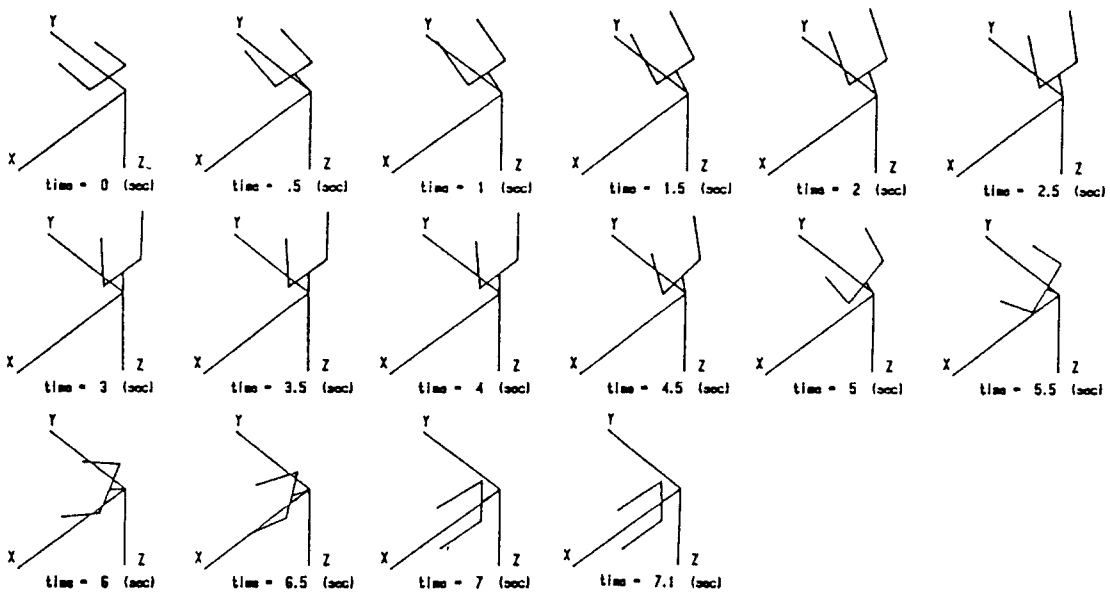


Fig. 9 Probe-tip movement of 3-axis robot wrist with scaling of joint angle rates

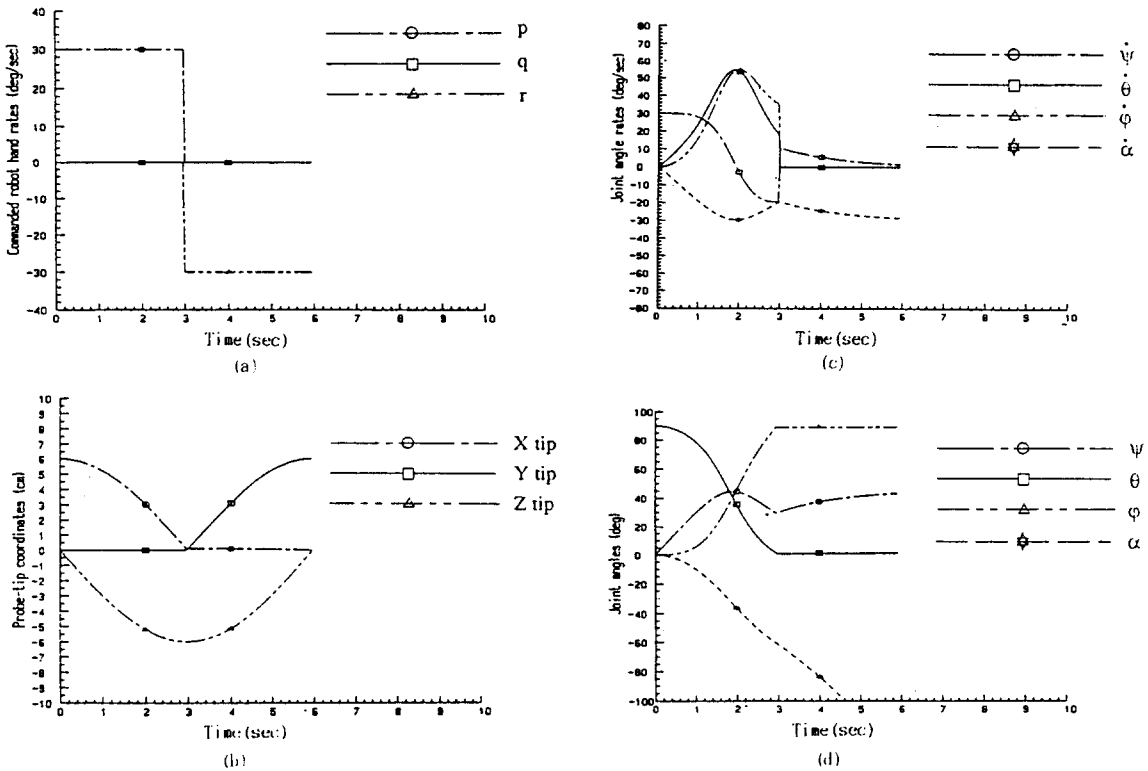


Fig.10 Simulation with 4-axis robot wrist

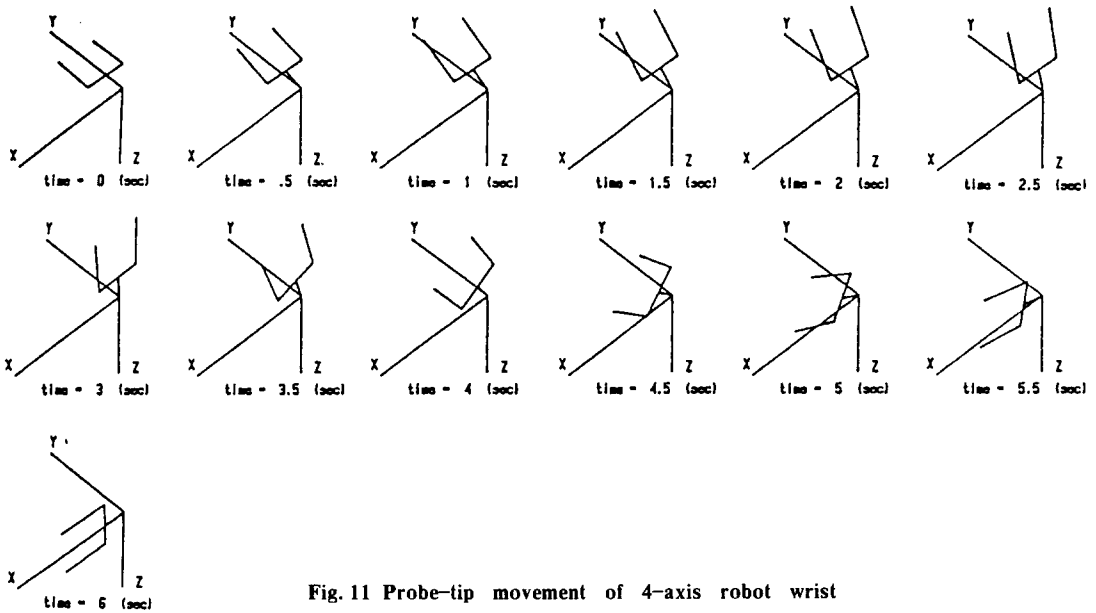


Fig.11 Probe-tip movement of 4-axis robot wrist

참 고 문 헌

1. John M. Hollebach, "Optimum Kinematic Design for a Seven Degree of freedom Manipulator", The 2nd Int. Symp., P.P. 215-222, 1985
2. R. P. Paul, C. N. Stevenson, "Kinematics of Robot wrists", Int. Journal of Robotics Research, Vol. 2, No. 1, P.P. 31~38, 1983
3. H. Asada, J. A. Cro Granito, "Kinematic and Static Characterization of Wrist Joints and their Optimal Design", IEEE Int. Conf. on R & A, P.P. 244~250, 1985
4. M. M. Stanišić, G. R. Pennock, "A Non-Degenerate Orientation Solution of a Four-Jointed Wrist", Int. J. of Robotics Research, Vol. 4, No. 2, P.P. 10~20, 1985
5. M. Sampei, K. Furuta, "On Time Scaling for Nonlinear Systems: Applications to Linearization", IEEE Trans. on A.C., Vol. AC-31, No. 5, P.P. 459~462, 1986
6. M. Sampei, K. Furuta, "Robot Control in the Neighborhood of Singular Points", IEEE J. of R & A, Vol. 4, No. 3, P.P. 303~309, 1988
7. T. Yoshikawa, "Analysis and Control of Articulated Robot Wrist with Redundancy", Robotics Research: The First Int. Symp. 735~748, 1988
8. Y. Nakamura, H. Hanafusa, "Optimal Redundancy Control of Robot Manipulators", Int. J. of Robotics Research, Vol. 6, No. 1, P.P. 32~42, 1987
9. 오재웅, 전의식, 장재원, 서일홍, 염성하, "로봇과 포지셔너 시스템의 특이성 분석과 여유자유도 제어", 한국 기계 학회 논문집, 제 12권, 제6호, P.P. 1252~1264, 1988
10. 오재웅, 염성하, 전의식, 박수홍, "Euler parameter를 이용한 로봇 손목관절의 특이성 분석과 여유자유도 제어", 한국 자동제어 학술 논문집, 1989
11. John J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics & Control", Addison-Wesley Publishing Company, 1986

- 알 림 -

한국정밀공학회지 제8권 4호 (1991년 12월호)에 게재된 논문 「제목: 自己回歸-移動平均모델에 의한 시스템 파라미터 推定」을 인쇄에 착오가 있으므로 이 논문에 관심이 있으신 분은 전남대학교 기계공학과 황원걸 교수 (Tel: 062-520-6343)에게 연락하시면 별쇄본을 보내드립니다.