

# ADAMS-Simulink 를 이용한 6-자유도 마스터-슬레이브 조작기 시뮬레이션 6-DOF Master-Slave Manipulator Simulation Using ADAMS-Simulink

#강민식<sup>1</sup>, \*김두호<sup>2</sup>, 최선일<sup>3</sup>

<sup>#</sup>M. S. Kang<sup>1</sup>, <sup>\*</sup>D. H. Kim(ddo777@empas.com)<sup>2</sup>, S. I. Choi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 경원대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 경원대학교 기계공학과, <sup>3</sup> 경원대학교 기계공학과

Key words : Simulation, ADAMS, Simulink, 6DOF, Master-Slave, Manipulator, Inverse Jacobian

## 1. 서론

원격 조작기 시스템은 1945 년 미국의 R.Geertz 에 의해 개발된 이래로 우주공간, 심해탐사, 원자력 발전소 내의 해체 및 절단 작업과 같은 인간이 직접 작업할 수 없는 극한 작업환경에서 정교한 작업을 수행하기 위하여 지능형 로봇을 효과적으로 대체할 수 있는 기술적 방안으로 널리 사용되고 있다. 원격 조작기 시스템은 사람에 의해 조종되는 마스터와 마스터의 움직임을 추종하는 슬레이브로 구성되어 있다. 6-자유도 원격 조작기 시스템의 동역학적 특성 해석과 원격 조작기의 제어를 위해 ADAMS 와 MatLab & Simulink 를 이용한 시뮬레이션 프로그램을 고안하여 마스터-슬레이브 제어 성능 검증을 수행하였다. 다음 그림은 조작기 각 관절의 좌표계를 설정한 그림이다.

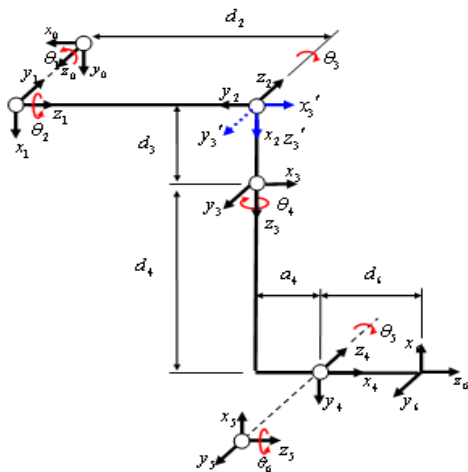


Fig.1 조작기 좌표계 정의

## 2. 역기구학을 이용한 조인트 각과 토크값 결정

Inverse Jacobian 을 이용하여 주어진 End-effector 의 직선 궤적과 회전 궤적을 만족하는 각 조인트 각을 수치해석을 통해 결정할 수 있다. 수치해석 방법을 블록선도로 나타내면 다음과 같다.

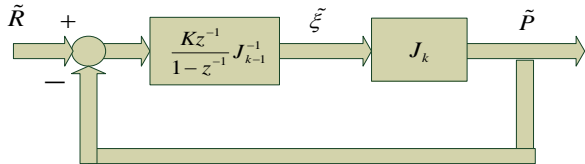


Fig.2 수치해석 알고리즘

이 그림에서  $\tilde{R}$  은 다음 End-effector 의 위치벡터이며,  $\tilde{P}$  는 현재 End-effector 의 위치벡터이다. 여기서 위치벡터는 x, y, z-좌표와 yaw, pitch, roll 각을 포함한다.  $\xi$  은 모든 조인트각으로 이루어진 벡터이다.  $J_k$  은 수치해석에서 갱신된  $\xi(k)$  에서의 Jacobian 이며,  $J_{k-1}^{-1}$  는 이전 갱신된  $\xi(k-1)$  에서의 Inverse Jacobian 이다.  $K$  는 갱신 상수에 해당된다.

그림의 블록 선도에서 다음 식을 얻게되며,

$$\xi(k) = \frac{Kz^{-1}}{1-z^{-1}} J_{k-1}^{-1} \{ \tilde{R} - \tilde{P}(k) \} \quad (1)$$

$$\tilde{P}(k) = J_k \xi(k) \quad (2)$$

이 두 식으로부터

$$\tilde{P}(k) = \frac{Kz^{-1}}{1-z^{-1}} J_k J_{k-1}^{-1} \{ \tilde{R} - \tilde{P}(k) \} \quad (3)$$

따라서 폐회로의 차분방정식을 쓰면

$$\tilde{P}(k) = (I - KJ_k J_{k-1}^{-1}) \tilde{P}(k-1) + KJ_k J_{k-1}^{-1} \tilde{R} \quad (4)$$

식(4)로부터 이 수치해석의 안정성을 판정할 수 있다. 즉, Liapunov 의 안정성에 의해 다음 부등식을 만족하는 양한정(Positive Definite) 행렬  $R$  이 존재하면 수치해석은 수렴성을 보장할 수 있다.

$$(I - KJ_k J_{k-1}^{-1})^T R (I - KJ_k J_{k-1}^{-1}) - R < 0 \quad (5)$$

만일  $J_k J_{k-1}^{-1}$  가 단위행렬에 가깝고 갱신 이득이 1 보다 작은 상수로 정하면,  $0 < K < 1$ , 식(4)는 안정성이 보장된다.  $J_k J_{k-1}^{-1}$  가 단위행렬에 가깝다는 의미는 위치벡터  $\xi(k)$  에서의 Jacobian 과  $\xi(k-1)$  의 Jacobian 이 동일하다는 의미이므로,  $\xi(k)$  와  $\xi(k-1)$  가 근접한 경우에 해당된다. 이득  $K$  가 1 에 가까울수록 수렴속도는 빠르며, 작을수록 수렴속도가 느리기 쉽다.

식(4)에서 안정성이 보장될 경우 정상상태에서의 특성은  $\lim_{k \rightarrow \infty} \tilde{P}(k) = \tilde{R}$  임을 알 수 있다.

이 방법을 이용하여 주어진 End-effector 의 궤적을 만족하는 각 조인트 각을 구하는 MatLab 프로그램을 구현하였으며, 이 프로그램을 이용하여 얻은 결과를 살펴보도록 하자.

## 3. 시뮬레이션 결과(후진궤적)

End effector 가  $y_0 - z_0$  평면에서  $+x_0$  방향으로 회전 없이 직선운동하는 경우 이 운동을 구현하는 각 조인트각을 앞의 역기구학 방법을 이용하여 구하였다. 직선운동은 초기 정지상태에서  $3m/s^2$  의 가속도로 가속하여  $1m/s$  속도에 도달 후 등속운동하는 궤적을 만들었으며, 운동은 각 조인트의 최대 회전범위에 도달될 때 멈추는 것으로 가정하였다. Fig.3 은 수치해석 결과이다. 그림 (a), (b), (c)는 수치해석에서 얻어진 각 조인트각으로부터 계산된 End effector 의  $(x_0, y_0, z_0)$  좌표를 보인다. 이 그림들에서와 같이 End effector 는 원하는 직선운동 궤적을 따라 운동함을 확인할 수 있다. 그림 (d) ~ (i)는 결정된 각 조인트 각도를 보인다. 궤적이  $+x_0$  방향으로 회전 없이 운동하므로 조인트 각  $\theta_2 = \theta_4 = \theta_6 = 0$  임을 알 수 있다. 궤적은 조인트 5 의 구동 제한 범위인  $\theta_5 = -50^\circ$  에 도달되어 멈춘 것으로 나타났다. 그림 (j), (k), (l)은 End effector 좌표계를 기저좌표계의 Euler Angle 정의에 따라 회전한 좌표계로 나타냈을 경우 Yaw, Pitch, Roll 각으로 원하는 궤적이 End effector 좌표계가 회전 없이 직선운동만을 하므로 Yaw, Pitch, Roll 각이 모두 영임

을 알 수 있다. 이 상의 결과로써 역기구학 및 수치해석 방법을 이용한 궤적의 생성 방법이 후진궤적을 잘 생성함을 확인할 수 있다. 그림 (m) ~ (r)은 End effector가 원하는 궤적을 따라 이동할 때 필요한 각 조인트에서의 토크로, 각 링크의 관성, 중량이 고려되어 구한 토크이다. 이 토크는 MatLab의 Simmechanics를 이용하여 구했다. 이용된 Simmechanics 모델은 Fig.4 과 같다.

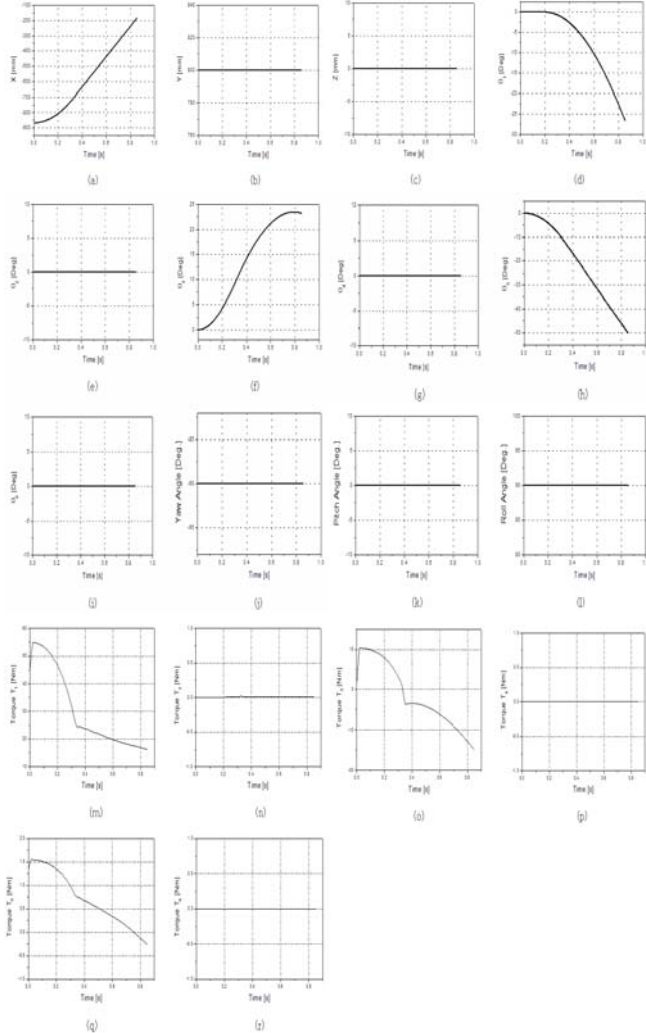


Fig.3 후진 궤적의 시뮬레이션 결과

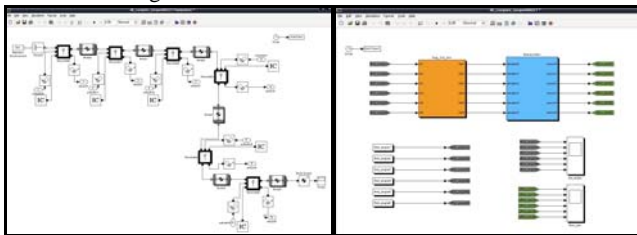


Fig.4 조인트 토크 계산을 위한 Simmechanics Model

#### 4. 6-DOF Master-Slave Manipulator Simulation

Fig.5는 MatLab과 ADAMS의 상호 신호관계를 나타내며 MatLab Simulink를 사용하여 각 Joint마다 원하는 각도 위치의 Torque를 계산하여 ADAMS에 입력하면 ADAMS에서 6축 관절에 입력된 Torque에 의한 각 링크의 운동을 해석하여 각 관절에 대한 Simulation을 수행하게 된다.

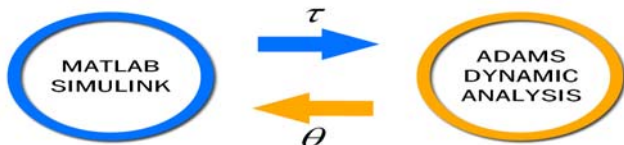


Fig.5 MatLab과 ADAMS의 상호관계 개념도

Matlab Simulink와 ADAMS를 연동한 원격 조작기 시스템의 동역학 시뮬레이션환경을 Fig.6와 같이 구현하였다.

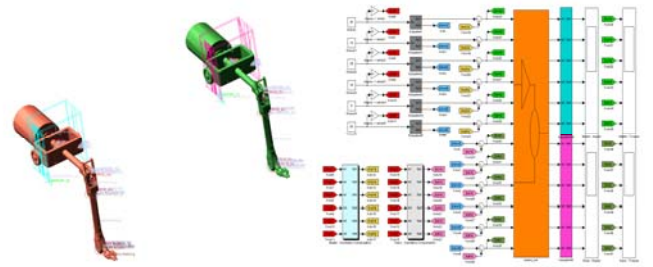


Fig.6 ADAMS-Simulink Model of Master-Slave Manipulator  
다음 그래프는 MatLab Simulink와 ADAMS를 연동한 시뮬레이션 결과로 Master와 Slave Arm의 각도가 MatLab에서 각 조인트 별로 입력한 각도 값과 일치함을 볼 수 있다.

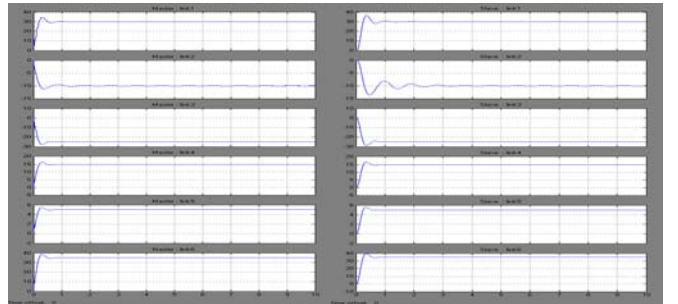


Fig.7 MatLab Simulink에 의한 Master-Slave Joint Angle

#### 5. 결론

조작기의 역기구학을 이용한 수치해석을 통해 End Effector의 병진과 회전운동을 발생시키는 각 조인트의 회전각을 도출하였다. End Effector의 회전은 기준 좌표계를 바탕으로 Yaw, Pit, Roll 각으로 정의하였다. 역기구학을 통한 원하는 End Effector의 직선 및 회전 운동을 발생시키는 각 조인트의 회전각을 수치해석을 통해 구했으며, 수치해석의 안정성 조건을 유도하였다. 수치해석은 MatLab의 Symbolic Math와 Simmechanics를 이용하였다. 얻어진 각 조인트의 회전각으로부터 각 조인트의 토크를 구하였다. 얻어진 각 조인트의 회전각을 다시 기구학 해석을 통해 원하는 End Effector 궤적이 얻어짐을 확인하였으며, 이를 통해 도출된 역기구학 및 역기구학 수치해석 방법의 타당성을 검증하였다. 조작기 전체의 운동학적 특징을 효과적으로 시뮬레이션 하기 위해 제어기는 MatLab Simulink, 조작기 운동은 Adams를 이용한 전체 마스터-슬레이브 운동 해석 통합 시뮬레이션 프로그램을 구현하여 제어기 성능 검증을 수행하였으며, 이 프로그램은 실제 조작기의 힘반영 제어시 각 링크의 운동 검증에 적용할 예정이다.

#### 참고문헌

1. S. B. Niku, Introduction to Robotics Analysis, System, and Applications, Prentice Hall, 2001.
2. SimMechanics User's Guide, MatLab Simulink, The MathWorks, 2007.
3. Basic ADAMS Full Simulation Training Guide, ADAMS, Version 12.0.
4. ADAMS/Controls Training v12, MSC.ADAMS.
5. 안성호, "제어입력 포화를 고려한 원격조작기의 양방향 제어기법", 2000, 충남대학교 박사 논문
6. 최민규, "와이어로 결합된 구동축을 갖는 마스터 슬레이브 매니퓰레이터의 위치제어에 관한 연구", 2004, 충남대학교 석사 논문
7. Frank L. Lewis, Darren M. Dawson, Chaouki T. Abdallah, Robot Manipulator Control, MARCEL DEKKER, INC. 2007