

다축 제어 시뮬레이터 링크부의 기구학적 설계

정상화*(조선대 기계공학부), 박용래, 류신호, 김현욱, 나운철(조선대 대학원 기계공학과)

A Study on Kinematic Design of Multi-axis Simulator Linkage

S. H. Jeong(Mech. Eng. Dept., CSU), Y. R. Park, S. H. Ryu, H. U. Kim, U. C. Na(Grad. Mech. Eng. Dept., CSU)

ABSTRACT

As the life cycle of the vehicle become shorter, the method that reduce the development time of new model become more important. In this reason, the development of the simulator that provides similar environment with the actual vehicle road characteristics is increasing. In this paper, the multi-axis simulator is designed and analyzed by kinematic method. The simulator has a function simulating the 3 load elements; vertical, longitudinal, and lateral force respectively and simultaneously. The result of this paper can be used for developing the multi-axis simulator linkage.

Key Words : Multi-axis simulator(다축 제어 시뮬레이터), Road simulation test(로드 시뮬레이션 시험), Stewart platform(스튜어트 플랫폼), Parallel link mechanism(병렬 링크 메카니즘), Dummy wheel(더미 휠)

1. 서론

자동차의 신제품 개발을 보던 설계에서부터 개발, 실험에 이르기까지 막대한 비용이 소모되고 있다 따라서 자동차의 신제품 개발에 있어서 제품 생산비용의 절감뿐만 아니라 제품 설계시간들을 줄일 수 있는 방법을 하고 있는 추세이다. 이 방법 중에서 자동차의 실차 실험을 통해 알 수 있는 자동차의 진동 특성을 그와 유사한 조건으로 제시해 줄 수 있는 다축 제어 시뮬레이터를 이용한 실험실 재현실험은 최근 들어 국내 연구기관에서 많이 적용하고 있다¹⁾.

본 논문에서는 다축 제어 시뮬레이터에 작용하는 4가지 요소 중 3가지 요소인 연직·전후·횡 하중을 복합적으로 재현할 수 있는 링크부의 구조를 설계하여 기구학적으로 해석하며, 추후 있게 될 다축 제어 시뮬레이터의 링크부 제작에 활용하고자 한다.

2. 다축 제어 시뮬레이터의 링크부의 설계

다축 제어 시뮬레이터에서 실험용 차량에 실제 입력되는 로드 데이터는 연직방향 $\pm 80\text{mm}$, 전후 및 횡방향 $\pm 8\text{mm}$ 정도이다²⁾.

본 논문에서는 로드 데이터를 입력변수로 주어 다축 제어 시뮬레이터를 이용한 실험실 재현실험이 가능하도록 로드 데이터에 여유행정을 고려하여 최대 거동행정 범위를 연직방향 $\pm 180\text{mm}$, 전후방향 $\pm 100\text{mm}$, 그리고 횡방향은 $\pm 40\text{mm}$ 로 설정하고, 이 범위를 기초로 하여 다축 제어 시뮬레이터 링크부를 설계하고 기구학적으로 해석하였다

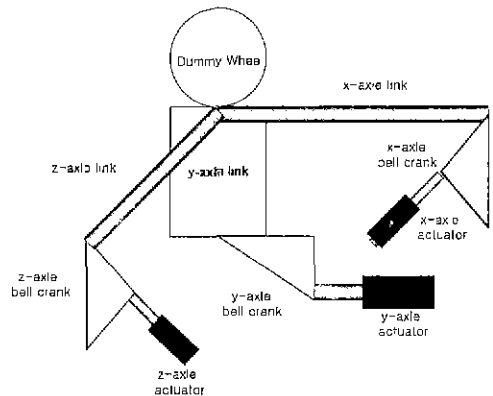


Fig. 2 Schematic diagram for multi-axis simulator

Fig 2는 다축 제어 시뮬레이터의 기본 구조를 나타내었다.

다축 제어 시뮬레이터는 더미 휠에 자동차의 휠을 고정하고, 하중이나 변위를 동시에 복합적으로 구현하는 장치로서 더미 휠을 가진시키기 위해 액츄에이터 끝단을 더미 휠 하단에 직접 연결시키면 링크기구의 크기가 커지고 축간 간섭이 커지는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 더미 휠과 액츄에이터 사이에 각 축마다 링크와 요동절(bell crank)을 설치하여야 한다.

MTS사의 다축 제어 시뮬레이터에 사용되는 액츄에이터의 길이는 955mm이고 최대행정은 $\pm 125\text{mm}$ 이며, 링크길이는 연직축 1020mm, 전후축 1657mm, 횡축 1168mm이다²⁾.

본 논문에서는 설계하고자 하는 다축 제어 시뮬레이터의 구동부인 액츄에이터를 국내에서 보편적으로 사용하는 최대행정 $\pm 80\text{mm}$, 전체길이가 856.2mm인 액츄에이터로 설정하였다.

연직축에는 실험대상인 현가장치와 같은 자동차 부품을 더미 휠에 고정하기 때문에 전반적인 링크들의 구동영역과 부속장치들을 고려하여 링크길이를 1020mm로 설정하였다. 또한, 액츄에이터의 길이의 비를 이용하여 설계하고자 하는 다축 제어 시뮬레이터의 링크길이는 전후축 1550mm, 횡축 1050mm로 하였다.

또한, 요동절은 정적 행정이 $\pm 80\text{mm}$ 인 각 축 액츄에이터를 최대 필요 거동 행정까지 변환하기 위하여 연직축은 액츄에이터 변위행정 대 변환되는 요동절의 변위행정 비가 2:1, 전후·횡축은 1.375:1이 되도록 각각의 요동절을 설계하였다.

3. 다축 제어 시뮬레이터의 기구학적 해석

다축 제어 시뮬레이터 링크부의 길이와 요동절의 설계를 바탕으로, 역기구학적 해석을 통하여 액츄에이터의 길이변화를 구하며, 액츄에이터의 길이변화 조건을 토대로 각 액츄에이터가 구동할때 더미 휠의 변위를 정기구학적으로 해석하였다.

3.1 역기구학적 해석을 통한 액츄에이터의 길이 변화 설정

역기구학적 해석을 위한 모델링은 Fig. 3과 같다. 여기에서 표시된 좌표계는 임의의 기준 원점 좌표계인 (x, y, z) 와 움직이는 더미 휠의 질량중심을 원점으로 하는 이동 좌표계인 (x_{dw}, y_{dw}, z_{dw}) 이다 그리고 각 축의 액츄에이터 말단부 위치 $B_1, B_2, B_3, b_1, b_2, b_3$ 는 기준 원점으로부터 설정된다.

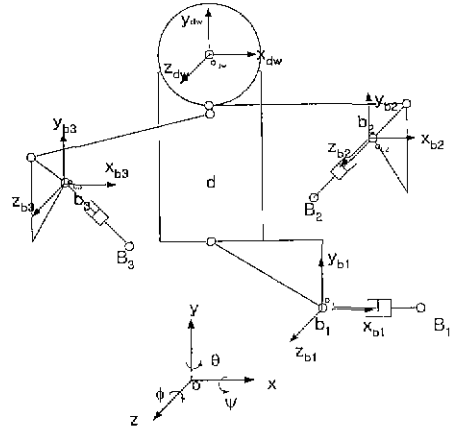


Fig. 3 Schematic diagram for inverse-kinematic analysis

역기구학 해석시 주어진 값은 움직이는 더미 휠의 카테시안 좌표계에 대한 중심위치와 방향이며, 이를 등차변환 행렬 $[T_{dw}]$ 로 나타내면 식(1)과 같다.

$$[T_{dw}] = [\vec{n}, \vec{a}, \vec{a}, \vec{a}] = \begin{bmatrix} n_1 & a_1 & a_1 & X_{dwc} \\ n_2 & a_2 & a_2 & Y_{dwc} \\ n_3 & a_3 & a_3 & Z_{dwc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서 더미 휠의 중심위치 $\vec{a} = (X_{dwc}, Y_{dwc}, Z_{dwc})$ 는 기준 좌표계 (x, y, z) 원점으로부터의 벡터를 나타낸다

$$B_i = [x_{B_i} \ y_{B_i} \ z_{B_i}]^T \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

역기구학 해석시 알려진 값 및 구속조건은 각 링크의 길이와 더미 휠과 3개의 요동절의 크기이며, 역기구학 해석은 주어진 더미 휠의 위치와 방향으로부터 액츄에이터의 길이변화를 구하는 것이므로 기준 좌표계에서 Fig 3에 나타난 지그에 연결되는 액츄에이터의 말단부인 B_i 의 좌표를 계산하면 식(2)와 같다

$$[T_{b_i}] = [\vec{n}_{b_i}, \vec{a}_{r_i}, \vec{a}_{b_i}, \vec{b}_i] \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} n_{b_i1} & a_{b_i1} & a_{b_i1} & X_{bwc} \\ n_{b_i2} & a_{b_i2} & a_{b_i2} & Y_{bwc} \\ n_{b_i3} & a_{b_i3} & a_{b_i3} & Z_{bwc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{for } i = 1, 2, 3$$

기준 좌표계에서 주어진 값을 이용하여 Fig. 3에 나타난 각 요동절에 연결되는 액츄에이터의 말단부의 좌표 b_i 를 계산할 수 있는데, 이를 위하여 우선

더미 휠에서 각 요동절에 연결되는 액츄에이터의 말단부의 좌표 b_i 까지의 동차변환행렬 $[T_b^*]$ 를 계산하면 식(3)과 같다.

여기서, $\vec{b}_i = (X_{b_i}, Y_{b_i}, Z_{b_i})$ 는 더미 휠에서 각 요동절에 연결되는 액츄에이터의 말단부인 b_i 까지의 벡터를 나타낸다.

$$[T_b] = [T_{a_i}] \cdot [T_b^*]$$

$$= \begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 & X_{d_{inc}} \\ n_2 & o_2 & a_2 & Y_{d_{inc}} \\ n_3 & o_3 & a_3 & Z_{d_{inc}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{b1} & o_{b1} & a_{b1} & X_{b_{inc}} \\ n_{b2} & o_{b2} & a_{b2} & Y_{b_{inc}} \\ n_{b3} & o_{b3} & a_{b3} & Z_{b_{inc}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

for $i = 1, 2, 3$

역기구학 해석시 주어진 값인 동차변환 행렬을 이용하여 기준 좌표계 (x, y, z) 로부터 볼 조인트 b_i 점까지의 동차변환행렬 $[T_b]$ 는 식(4)와 같다.

식(4)을 전개하면 기준 좌표계 (x, y, z) 에 대한 볼 조인트 b_i 점까지의 좌표를 식(5)와 같이 구할 수 있다

$$b_i = \begin{bmatrix} X_{b_i} \\ Y_{b_i} \\ Z_{b_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 X_{b_{inc}} + o_1 Y_{b_{inc}} + a_1 Z_{b_{inc}} + X_{d_{inc}} \\ n_2 X_{b_{inc}} + o_2 Y_{b_{inc}} + a_2 Z_{b_{inc}} + Y_{d_{inc}} \\ n_3 X_{b_{inc}} + o_3 Y_{b_{inc}} + a_3 Z_{b_{inc}} + Z_{d_{inc}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

for $i = 1, 2, 3$

여기서, 구하고자 하는 액츄에이터의 길이 L_i 는 각 액츄에이터의 말단부인 b_i 와 B_i 의 차의 노름(norm)으로써 식(6)과 같다

$$L_i = \|b_i - B_i\| \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

식(6)을 정리를 하면 식(7)과 같고, 이 식을 이용하여 액츄에이터의 길이를 구할 수 있다.

$$L_i^2 = [n_1 X_{b_{inc}} + o_1 Y_{b_{inc}} + a_1 Z_{b_{inc}} + X_{d_{inc}} - X_{B_i}]^2 + [n_2 X_{b_{inc}} + o_2 Y_{b_{inc}} + a_2 Z_{b_{inc}} + Y_{d_{inc}} - Y_{B_i}]^2 + [n_3 X_{b_{inc}} + o_3 Y_{b_{inc}} + a_3 Z_{b_{inc}} + Z_{d_{inc}} - Z_{B_i}]^2 \quad (7)$$

for $i = 1, 2, 3$

식(7)를 이용하여 더미 휠에 최대 거동범위를 각 축에 각각 주어 역기구학적 해석을 통해 구한 액츄에이터의 길이변화량을 구할 수 있으며 결과값은 Table 1에 나타내었다.

역기구학적 해석을 통해 구한 액츄에이터의 길이 변화량은 액츄에이터의 최대 동적거동 범위인 $\pm 80\text{mm}$ 를 모든 축의 액츄에이터에서 만족함을 알 수

있다.

Table 1 Displacement of actuators for inverse kinematic analysis

Displacement of dummy wheel	x-axis actuator	y-axis actuator	z-axis actuator
+180mm (y-axis direction)	-	+76.21mm	-
-180mm (y-axis direction)	-	-75.96mm	-
-100mm (x-axis direction)	+41.65mm	-	-
-100mm (x-axis direction)	-46.26mm	-	-
+40mm (z-axis direction)	-	-	-76.35mm
-40mm (z-axis direction)	-	-	-73.11mm

3.2 정기구학적 해석을 통한 더미 휠의 길이 변화 설정

각 액츄에이터를 $\pm 80\text{mm}$ 로 구동할 때의 동차변환행렬을 정기구학적 해석을 통하여 구하고, 이를 각각의 액츄에이터가 $\pm 80\text{mm}$ 로 구동할 때의 회전하는 각도의 범위로 주어 시뮬레이션을 하여 다축 시뮬레이터의 최대 거동범위가 더미 휠에서 구현되는지를 검토하였다.

Fig. 4는 다축 시뮬레이터의 연직 액츄에이터에 $\pm 80\text{mm}$ 의 거동을 주었을 때의 변화되는 연직방향의 고정 좌표계와 이동 좌표계를 나타낸 것이다.

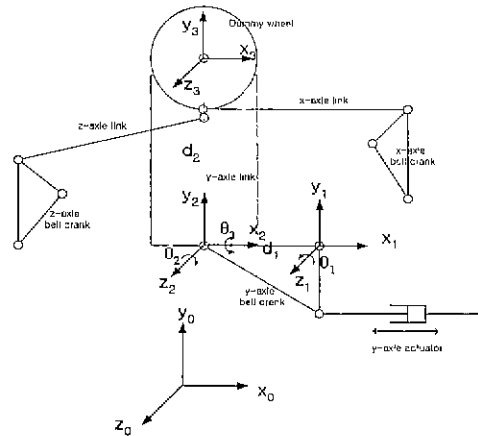


Fig. 4 Schematic diagram of frames at operating y-axis actuator

Fig. 4에 나타낸 기준 좌표계 (x_0, y_0, z_0) 에서부터 더미 휠 (x_3, y_3, z_3) 까지의 동차변환행렬(T_3^0)을 구하면 식(8)과 같다

$$T_0^3 = T_0^1 T_1^0 T_2^1 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & dw_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & dw_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & dw_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)의 각각의 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ r_{12} &= -\cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ r_{13} &= \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ dw_x &= -d_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ &\quad - d_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ &\quad - d_1 \cos \theta_1 + a \\ r_{21} &= \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ r_{22} &= -\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ r_{23} &= \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 \\ dw_y &= -d_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \\ &\quad + d_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ &\quad - d_1 \sin \theta_1 + b \\ r_{31} &= 0 \\ r_{32} &= \sin \theta_1 \\ r_{33} &= \cos \theta_1 \\ dw_z &= d_2 \sin \theta_2 \end{aligned}$$

식(8)의 동차변환행렬에서 연직 액츄에이터에 $\pm 80\text{mm}$ 의 거동시 일어나는 각도변화를 링크간의 간섭이 일어나지 않는 범위로 1Hz의 정현파형으로 주어 더미 휠의 연직방향의 거동 변위량을 시뮬레이션하였다.

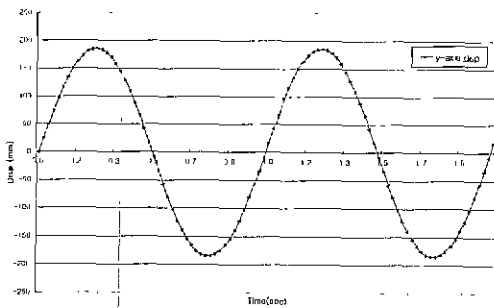


Fig. 5 Displacement of dummy wheel y-axis at simulation

Fig. 5는 각도변화를 줄 때의 시뮬레이션 결과로서 x축은 정현파의 입력 시간을 나타내며, y축은 더미 휠의 연직방향의 변위량을 나타낸 것으로서 $\pm 185.29\text{mm}$ 의 변위량을 가짐을 알 수 있는데 이는 다축 제어 시뮬레이터의 연직방향 최대 거동범위 $\pm 180\text{mm}$ 를 만족하는 결과이다.

같은 방법으로 전후, 횡축 액츄에이터를 $\pm 80\text{mm}$ 로 구동할 때의 동차변환행렬을 정기구학적 해석을 통하여 구하고, 이를 각각의 액츄에이터가 $\pm 80\text{mm}$

로 구동할 때의 회전하는 각도의 범위를 주어 시뮬레이션하였다. 그 결과는 Table 2와 같으며, 다축 제어 시뮬레이터의 최대 거동범위인 연직방향 $\pm 180\text{mm}$, 전후 방향 $\pm 100\text{mm}$, 그리고 횡방향 $\pm 40\text{mm}$ 를 더미 휠에서 구현됨을 알 수 있었다.

Table 2 Displacement of dummy wheel for kinematic analysis

Direction	X axle(mm)	Y axle(mm)	Z axle(mm)
Disp of dummy wheel for kinematic analysis at $\pm 80\text{mm}$	± 163.18		
Disp of x-axis actuator			
Disp. of dummy wheel for kinematic analysis at $\pm 80\text{mm}$		± 185.29	
Disp of y-axis actuator			
Disp of dummy wheel for kinematic analysis at $\pm 80\text{mm}$			± 44.59
Disp. of z-axis actuator			

4. 결론

본 논문에서 역기구학 및 정기구학을 기반으로 다축 제어 시뮬레이터 링크부를 설계, 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다

(1) 역기구학적 해석을 통해 구한 액츄에이터의 구동 길이식에 다축 시뮬레이터의 최대 거동범위를 주어 각 액츄에이터의 구동영역을 구했는데 이는 본 논문에서 사용되는 액츄에이터의 사양을 만족하였다.

(2) 정기구학적 해석을 통해 구한 더미 휠의 변위식에 각 액츄에이터의 거동범위 $\pm 80\text{mm}$ 를 주어 더미 휠의 변위변화량을 구했는데 이는 설계하고자 하는 다축 제어 시뮬레이터의 요구사양인 더미 휠의 최대 거동범위인 연직방향 $\pm 180\text{mm}$, 전후방향 $\pm 100\text{mm}$, 그리고 횡방향은 $\pm 40\text{mm}$ 를 만족하였다.

참고문헌

- 1) 우준규, 김경찬, 김수현, 박운근, "6자유도 가진 시뮬레이터 개발을 위한 시뮬레이션", 한국자동차 공학회 춘계학술대회 논문집, pp 509-514, 1998.
- 2) 김규하, "車軸 시뮬레이터용 6軸 링크機構의 十少 最小化 設計", 전남대학교 석사 학위논문, 2000.
- 3) D. Stewart, "A Platform With Six Degree of Freedom", Proc. Institute of Mechanical Engineering, Vol. 180, pp. 371-386, 1965
- 4) 박주연, "6자유도를 갖는 정밀 위치제어용 병렬 매니플레이터의 모델링과 제어", 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1996