

관절형 로봇에 있어서의 미지부하에 대한

링크의 균형화와 부하질량의 추정

임 태근, 조 형석

한국과학기술원 생산공학과

Link Balancing and Identification for an Unknown Payload  
in an Articulated Robot

Tae Gyoon Lim , Hyung Suck Cho

Dept. of Production Engineering, KAIST

Abstract

This paper presents a method to balance the links of an articulated robot for an unknown payload using an automatic balancing mechanism. The balancing masses are controlled to move in their appropriate locations so that the joint torques of the links are eliminated. After balancing the mass of the payload is obtained from the balancing conditions. Based upon a series of simulation studies some results are discussed.

1. 서론

최근에 들어 생산 품목이 다양해짐에 따라 프로그램이 가능한 로봇의 산업현장에서의 적용이 많이 늘고 있다. 소형 전자 제품의 자동 조립에서부터 주물제품의 표면처리, 자동차 공장의 저항용접, 아르용접, 도장 공정, 물품의 운반 등 적용분야도 다양하다. 생산성의 향상과 제품의 균일화를 위해 로봇은 다양한 작업과 큰 부하, 고속작업에서도 일정한 성능이 요구된다.

현존하는 산업용 로봇의 제어에서는 대부분 동력학을 무시하고 각 축을 별도로 위치제어하는 방식을 이용한다[1]. 링크 상호간의 동적인 연계와

부하에 의한 동특성의 변화를 무시하므로, 저속, 저부하에서는 별로 문제가 되지 않지만 작업속도가 빨라지거나 부하가 커지면 동특성의 영향이 커져서 위치제어와 궤적 추종 성능이 떨어지게 된다. 그러므로 로봇의 제어기 설계에 있어서 동특성의 고려가 필요하다.

산업용 로봇의 동특성은 매우 비선형적이고 복잡하다. 매개변수가 시변화하고 구조적인 자세와 부하에 따라 변하며 링크들이 상호간에 동적으로 심하게 연계되어 있다. 특히 자세의 유연성이 좋은 관절형 로봇일수록 이러한 복잡성은 심하다. 여기에 부하에 의한 동특성이 더해지면 로봇의 동특성은 더욱 복잡해지고 비선형성이 심해진다.

로봇의 동특성을 고려한 제어방법들이 많이 제시되었는데[1] 로봇 모델의 복잡성과 비선형성때문에 실제로 적용하기 힘들다. 이러한 제어방법들은 로봇의 구조적인 설계를 고려하지 않고 복잡한 소프트웨어에 의존하므로 로봇이 움직일 때 필요한 입력 조인트 토크를 계산하는데 많은 시간이 걸려 로봇의 실시간제어를 어렵게 한다. 따라서 로봇의 동특성을 간단화 시키고 매개변수의 시변화를 줄이는 연구가 많이 진행되어 왔는데 다음과 같이 세가지로 크게 분류할 수 있다.

(1) 동특성식의 간단화[2], (2) 로봇의 구조적 설계[3,4]와 (3) 로봇의 질량균형화[5-11]이다.

정완근[5-9]은 관절형 로봇에 균형화개념을 도입하여 정지상태에서 링크가 균형화되는 조건을

제시하였다. 이 조건에 따라 균형기구를 설계하여 PUMA-760 로봇트에 적용하였다. 이는 링크의 반대쪽에 균형질량을 부착하여 조인트에 걸리는 중력을 제거하여 주는 기계적인 방법이다. 시뮬레이션과 실험을 통해 동특성이 간단하여 지고 요구 입력 토크가 많이 줄어 들었음을 보여 주었다. 또한 로봇트가 부하를 집었을 때 자동균형기구를 이용하여 부하로 인해 생기는 중력을 보상해 주는 방법을 제시하였다[10,11]. 부하 질량을 안다고 가정하고 균형 조건으로부터 균형질량이 움직여야 할 거리를 계산하여 균형질량을 움직여 링크를 균형화시킨다.

그러나 일반적으로 부하는 작업에 따라 수시로 변하거나 그 질량을 알지 못하는 경우가 많다. 따라서 모트는 부하에 대해서 링크를 자동으로 균형화하는 방법이 필요하다. 또한 로봇트의 매개변수는 부하의 기계적 성질에 따라 변하므로 로봇트의 정확한 모델을 구하기 위해 부하의 질량, 질량 중심의 위치, 관성모멘트를 알아낼 필요가 있다.

본 논문에서는 로봇트가 미지의 부하를 집어 들었을 때 자동균형기구를 이용해 링크를 균형화시키고 균형질량의 위치로부터 부하의 질량을 알아내는 방법을 연구하였다.

## 2. 자동균형기구의 동적 모델

본 논문에서는 3 자유도를 갖는 관절형 로봇트를 연구의 대상으로 하였는데 그림 1에 자동균형기구와 함께 나타내었다. 자동균형기구의 설계원리와 이 기구가 부착된 로봇트의 동특성은 참고문헌 [8]에 자세히 기술되어 있다. 부하가 없을 때 균형질량 M3, M2는 각각 L30, L20에 위치해 있다. L30는 링크 3 자체를 균형화하기 위해 균형질량 M3가 놓여져야 할 위치이다. L20는 균형질량 M3가 L30에 놓여 있을 때 링크 2, 3의 질량과 균형질량 M3를 균형화 시키는 M2의 위치이다. 자동균형기구는 로봇트가 부하를

집어 들었을 때 링크 반대쪽에 있는 균형질량 M3, M2를 적당한 위치 (L3, L2)로 움직여 줌으로써 부하로 인한 조인트에서의 중력을 균형화시키기 위한 기계적인 장치이다. 이 때 L3, L2는 부하의 질량에 따라 변한다. 또한 부하를 집고 있는 손목부가 움직일 경우에는 손목부의 변위로부터 링크를 균형화하기 위한 균형질량의 위치 L3, L2를 계산하여, 균형질량을 움직여 줌으로써 부하에 대해 능동적으로 균형화시킨다. 따라서 이러한 기구가 장착된 로봇트는 부하에 대해서도 균형을 유지하므로 자동균형기구가 없는 로봇트에 비해 향상된 동특성을 갖는다. 다시 말하면, 균형화된 로봇트의 동특성과 같이 간단화된 동특성식과 적은 요구 입력 토크를 가진다.

자동균형기구는 균형질량과 이들이 미끄러져 움직일 수 있는 안내봉으로 이루어져 있다(그림 1). 작은 D.C. 모터를 부착하여 균형질량을 움직여 준다.

로봇트의 일반적인 동특성식은 다음과 같다.

$$M(\phi)\ddot{\phi}+C(\phi,\dot{\phi})+G(\phi)=T \quad (1)$$

여기서  $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$  는 각각 조인트의 각위치, 각속도, 각가속도를 나타낸다. 또한  $M(\phi)$  는 관성항,  $C(\phi, \dot{\phi})$  는 Coriolis 토크와 원심 토크의 항이고  $G(\phi)$  는 중력항이다. T는 조인트 토크이다. 로봇트가 정지상태에 있을 때 식 (1)의 관성 항과 속도 관계항은 0이 되고 조인트에 가해지는 토크는 중력 토크만 남는다. 링크 1은 로봇트의 구조상 중력항이 없다.

부하가 없을 때 자동균형기구는 링크 자체를 균형화시키는데 이 때의 균형조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_3 &= 0 = g \cdot S23 \cdot (m_3 L_{3c} - M_3 L_{30}) \\ T_2 &= 0 = g \cdot [S23 \cdot (m_3 L_{3c} - M_3 L_{30}) - S2 \cdot \{(m_2 L_{2c} + M_2 L_{20}) \\ &\quad - (m_3 + M_3) \cdot l_2\}] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 g는 중력상수, m3, m2는 각각 링크 3, 2의 질량이고 L3c, L2c는 링크의 질량중심의 위치이다.

12는 링크 2의 길이이고  $S2=\sin(\phi_2)$ ,  $S23=\sin(\phi_2 + \phi_3)$  이다.

로봇트가 부하를 집어 들면 부하에 대해 링크를 균형화시키도록 균형질량  $M_3$ ,  $M_2$ 가 움직이는데 이 때 균형질량의 동특성식과 조인트 토크는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} T_3 &= g \cdot S23 \cdot \{(m_3 L_{3c} - M_3 L_{30}) + (m_p l_3 - M_3 L_3)\} \\ T_2 &= g \cdot \{S23 \cdot (m_3 L_{3c} - M_3 L_{30}) + (m_p l_3 - M_3 L_3)\} \\ &\quad + g \cdot S2 \cdot \{-(m_2 L_{2c} + M_2 L_{20}) + (m_p l_2 - M_2 L_2)\} \\ &\quad + (m_3 + M_3) l_2 + M_3 \bar{L}_3 l_2 S3 \\ M_3 \bar{L}_3 &= u_3 + M_3 g C23 \\ M_2 \bar{L}_2 &= u_2 + M_2 g C2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $m_p$ 는 부하의 질량,  $l_3$ ,  $l_2$ 는 링크 3, 2의 길이이며  $u_3$ ,  $u_2$ 는 균형질량을 구동하는 구동원의 입력이다. 그림 2에 균형기구의 동특성을 도식화하였다. 그림에서 보면 조인트 3에 가해지는 토크는 조인트 2에 바로 전달되며 균형질량 3의 관성힘이 조인트 2의 토크에 영향을 준다. 또한 균형질량  $M_3$ ,  $M_2$ 에는 로봇트의 자세에 따라 일정한 중력이 가해지고 있다.

식 (2) 의 균형조건으로부터 식 (3)은 다음과 같이 바뀐다.

$$\begin{aligned} T_3 &= g \cdot S23 \cdot (m_p l_3 - M_3 L_3) \\ T_2 &= g \cdot \{S23 \cdot (m_p l_3 - M_3 L_3) + S2 \cdot (m_p l_2 - M_2 L_2)\} \\ &\quad + M_3 \bar{L}_3 l_2 S3 \\ M_3 \bar{L}_3 &= u_3 + M_3 g C23 \\ M_2 \bar{L}_2 &= u_2 + M_2 g C2 \end{aligned} \quad (4)$$

부하가 없을 때 균형질량  $M_3$ ,  $M_2$ 는 각각  $L_{30}$ ,  $L_{20}$  ( $L_3=0$ ,  $L_2=0$ )에 위치해 있다가, 로봇트가 부하를 집으면 적당한 위치로 움직여 링크를 균형화시키는데 이 때 균형질량이 움직이는 거리를  $L_{3f}$ ,  $L_{2f}$ 라 하면 부하가 있을 때 링크 3, 2의 균형조건은

$$\begin{aligned} T_3 &= 0 = g \cdot S23 \cdot (m_p l_3 - M_3 L_{3f}) \\ T_2 &= 0 = g \cdot \{S23 \cdot (m_p l_3 - M_3 L_{3f}) + S2 \cdot (m_p l_2 - M_2 L_{2f})\} \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 다시 쓰면

$$\begin{aligned} m_p l_3 &= M_3 L_{3f} \\ m_p l_2 &= M_2 L_{2f} \end{aligned} \quad (6)$$

부하의 질량을 미리 알고 있는 경우에는 링크를 균형화하기 위해 균형질량이 움직여야 할 거리  $L_{3f}$ ,  $L_{2f}$ 를 식 (6)로부터 계산하여 균형질량을 움직여 주면 된다.

그러나 대부분의 경우 부하의 질량은 작업에 따라 수시로 변하거나 모르는 경우가 많다. 따라서 로봇트가 미지의 부하를 집었을 때 링크를 자동적으로 균형화시키는 방법이 필요하다.

로봇트가 균형화되면 부하질량은 식 (6)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$m_p = M_3 L_{3f} / l_3 = M_2 L_{2f} / l_2 \quad (7)$$

여기서  $L_{3f}$ ,  $L_{2f}$ 는 균형기구를 구동하는 모터의 위치 센서로부터 측정된다.

다음 장에서는 로봇트가 미지의 부하를 집었을 때 링크를 균형화시키는 자동균형기구의 제어방법을 소개한다.

### 3. 자동균형기구의 제어기 설계

시스템의 상태변수를 다음과 같이 놓으면

$$\begin{aligned} x_1 &= L_{3f} - L_3 \\ x_2 &= \dot{x}_1 \\ x_3 &= L_{2f} - L_2 \\ x_4 &= \dot{x}_3 \\ \delta_1 &= u_3 + M_3 \cdot g \cdot C23 \\ \delta_2 &= u_2 + M_2 \cdot g \cdot C2 \\ y_1 &= T_3 \\ y_2 &= T_2 \end{aligned} \quad (8)$$

시스템의 상태방정식은

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\delta_1 / M_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= -\delta_2 / M_2 \\ y_1 &= M_3 g S23 x_1 \\ y_2 &= M_3 g S23 x_1 + M_2 g S2 x_3 + I_2 S3 \delta_1 \end{aligned} \quad (9)$$

과 같다. 시스템의 상태변수  $x$ 는 모두 측정가능하다. 균형질량을 구동하는 모터의 엔코더(encoder)와 주파수-전압 변환기(F/V converter)로부터 측정된다. 제어를 설계함에 있어서 제어기의 입력을 상태변수  $x$ 로 선정하였다. 일반적으로 로봇의 조인트 모터 전류에는 소음이 많이 있으므로 이를 제어기의 입력으로 하는 경우 소음에 의해 제어 시스템의 성능이 영향을 받게 된다. 자동균형기구의 제어목적은 로봇트가 부하를 집었을 때 정상상태에서 링크가 균형을 이루는 것이다.

즉,

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} T_3 &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} T_2 &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

시스템의 출력  $y$ 를 적분하여 시스템을 확장시켜서, 확장된 시스템을 안정화하도록 게환 이득(feedback gain)을 선정하여 제어하면, 확장된 시스템의 출력은 정상상태에서 식(10)을 만족하게 된다[12].

부가적인 상태변수  $x_5, x_6$ 를

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= y_1 \\ \dot{x}_6 &= y_2 \end{aligned} \quad (11)$$

와 같이 선정하면 확장된 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_3 g S23 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_3 g S23 & 0 & M_2 g S2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/M_3 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1/M_2 \\ 0 & 0 \\ I_2 S3 & 0 \end{bmatrix} \delta$$

$$y = \begin{bmatrix} M_3 g S23 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_3 g S23 & 0 & M_2 g S2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ I_2 S3 & 0 \end{bmatrix} \delta$$

성능지수를

$$J = \int_0^{\infty} (\hat{x}^T Q \hat{x} + \delta^T R \delta) dt \quad (13)$$

여기서

$$\text{diag } Q = (q1, q2, q3, q4, q5, q6)$$

$$\text{diag } R = (r1, r2)$$

와 같이 선정하여 최적제어를 설계하면 제어입력은

$$\delta = -R^{-1} \hat{B}^T K \hat{x} = -P \hat{x} \quad (14)$$

이 된다. 여기서  $K$ 는 Riccati equation

$$K \hat{A} + \hat{A}^T K + Q - K \hat{B} R^{-1} \hat{B}^T K = 0 \quad (15)$$

의 해이고  $\hat{A}, \hat{B}$ 는 각각 확장된 계(12)의 동특성 행렬과 입력 행렬이다.

#### 4. 시뮬레이션, 결과 및 논의

앞에서 설계한 자동균형기구 제어기의 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였는데 시뮬레이션에서 사용한 링크의 매개변수는 다음과 같다:  $M3=40\text{kg}$ ,  $l3=0.6\text{m}$ ,  $M2=60\text{kg}$ ,  $l2=0.65\text{m}$ . 로봇트의 자세가  $\phi3=45^\circ$ ,  $\phi2=90^\circ$  일 때 식(13)의 가중 행렬  $Q, R$ 을

$$\begin{aligned} \text{diag } Q &= (10000, 1000, 100, 100, 0.1, 0.001) \\ \text{diag } R &= (0.001, 0.001) \end{aligned}$$

와 같이 선정하면 식(14)의 게환 이득  $P$ 는

$$P = \begin{bmatrix} -4052 & -1152 & -18.80 & -2.378 & -9.986 & -0.05341 \\ -44.73 & -19.94 & -786 & -440.8 & 0.5341 & -0.9986 \end{bmatrix}$$

이 된다.

그림 3은 로봇트가 질량이 10kg인 부하를 집었을 경우 균형질량의 위치와 조인트 토크의 변화상을 보여 준다. 그림에서 균형질량의 최종 위치는  $t=6\text{초}$ 일 때  $L3f=0.1505\text{m}$ ,  $L2f=0.1077\text{m}$ 이 되었다. 이때 조인트 3,2의 조인트 토크는 0이다. 즉, 링크 3,2가 정확하게 균형을 이루었음을 보여 준다.

식 (7)을 이용하여 균형질량의 위치로부터 부하의 질량을 알아낼 수 있다. 균형질량  $M_3$ 가 0.1505m만큼 움직였으므로 부하의 질량은 10kg으로 정확하게 구해진다.

그림 4에는 로봇트가 초기에 5kg의 부하를 집고 있다가  $t=0$ 초에 부하를 놓았을 경우 균형질량의 움직임과 조인트 토크의 변화를 보여 준다. 균형질량의 최종 위치는  $L_3f=0$ ,  $L_2f=0$ 이 되었다. 이 위치는 부하가 없을 경우 링크 자세를 균형화시키는 균형질량  $M_3$ ,  $M_2$ 의 위치이다. 이 때 조인트 토크  $T_3$ ,  $T_2$ 는 0이 되어 링크가 정상상태에서 균형화되었음을 나타낸다. 식 (7)로부터 부하의 질량은 0이다.

### 5. 결론

본 논문에서는 미지의 부하에 대해 링크를 균형화시키고 링크가 균형화된 후 부하의 질량을 알아내는 방법을 연구하였다. 자동균형기구를 이용하여, 로봇트가 미지의 부하를 집었을 때 조인트 토크가 0이 되는 위치로 균형질량이 움직이도록 제어기를 설계하였다. 설계된 제어계에서 링크는 임의의 부하에 대해 균형을 이루었다. 정상상태에서 링크가 균형화 된 후 링크의 균형 조건으로부터 부하의 질량을 알아내었다.

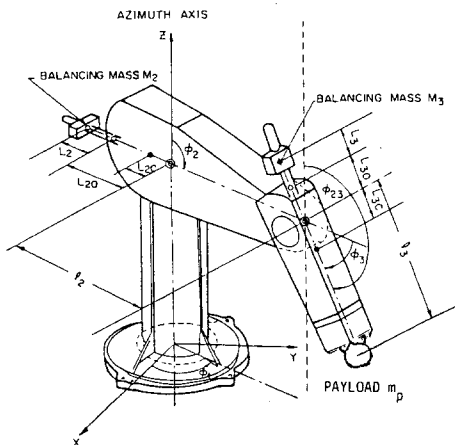


Fig.1 A balanced manipulator

### 6. References

- [1] C.S.G.Lee, R.C.Gonzalez and K.S.Fu, Tutorial on Robotics, IEEE Computer Society Press, 1983.
- [2] A.K.Bejczy and R.P.Paul, "Simplified robot arm dynamics for control", IEEE Conference on Decision and Control, pp.261-262, 1981.
- [3] H.Asada, "A geometrical representation of manipulator dynamics and its application to robot arm design", Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.105, pp.131-135, 1983.
- [4] H.Asada and K.Youcef-Toumi, "Analysis and design of a direct drive arm with a five-bar-link parallel drive mechanism", Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.106, pp.225-230, 1984.
- [5] W.K.Chung, H.S.Cho, M.J. Chung and Y.K. Kang, "On the dynamic characteristics of balanced robotic manipulators ", Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Osaka, Japan, pp.119-126, 1986.
- [6] W.K.Chung and H.S.Cho, "On the dynamic characteristics of a balanced PUMA-760 robot", Trans. IEEE, IE-35, No.2, pp.222-230, 1988.
- [7] W.K.Chung and H.S.Cho, "Sensitivity analysis of balanced robotic manipulators ", Robotica, Vol.6, pp.53-62, 1988.
- [8] W.K.Chung, On the dynamic characteristics and control of balanced robotic manipulators, Ph.D. Dissertation, Dept. of Production Engineering, KAIST, 1987.
- [9] T.G.Lim, H.S.Cho and W.K.Chung, "The effects of wrist motions on the dynamic characteristics of balanced robotic manipulators", International Conference on Computer-Aided Technology, Hong Kong, 1988.
- [10] W.K.Chung, H.S.Cho, C.W.Lee and H.J. Warnecke, "Performance of robotic manipulators with an automatic balancing mechanism", ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, U.S.A., pp.111-121, 1984.
- [11] W.K.Chung and H.S.Cho, "On the dynamics and control of robotic manipulators with an automatic balancing mechanism", Proc. Institution of Mechanical Engineers, Vol.201, No.B1, pp.25-34, 1987.
- [12] B.Porter and A.Bradshaw, "Design of linear multivariable continuous-time tracking systems", Int. J. Systems Sci., Vol.5, No.12, pp. 1155-1164, 1974.

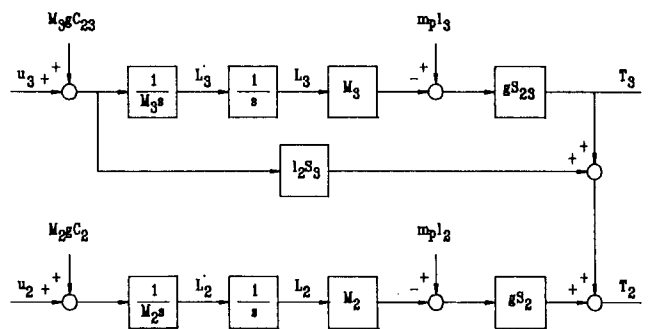


Fig.2 Block diagram of the automatic balancing mechanism

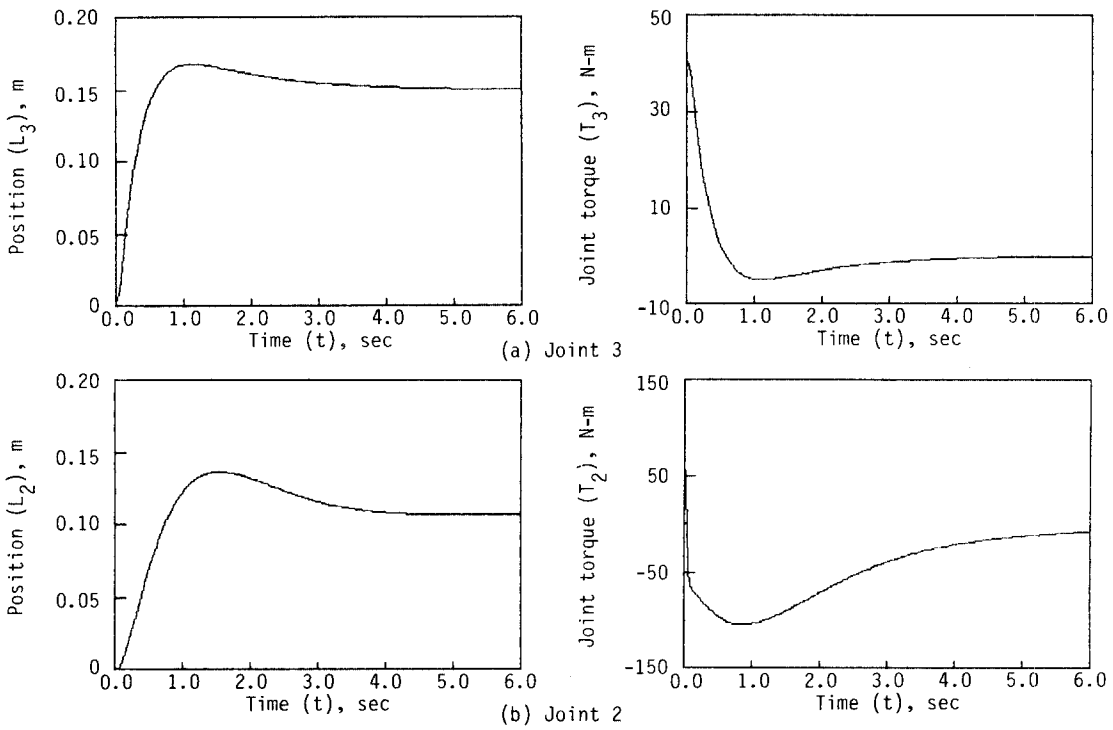


Fig.3 Position trajectories of the balancing masses and joint torque variations;  $m_p=10\text{kg}$  ( $t=0\text{sec}$ )

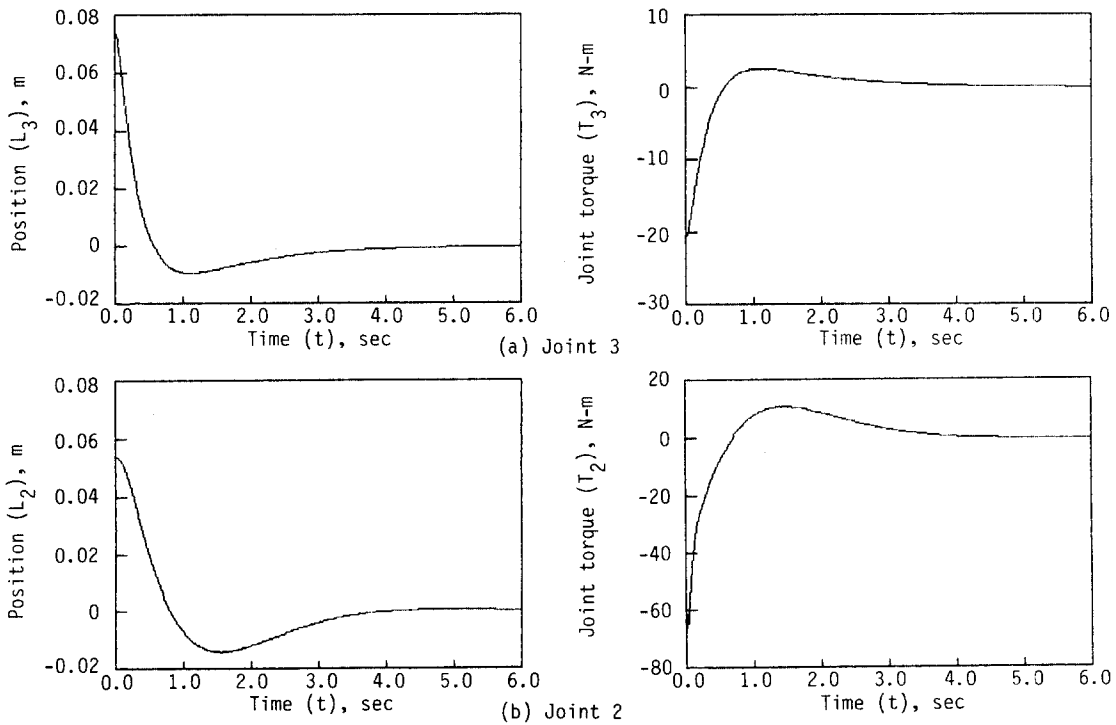


Fig.4 Position trajectories of the balancing masses and joint torque variations; initially loaded with 5kg payload,  $m_p=0\text{kg}$  ( $t=0\text{sec}$ )