

# 여유자유도/여유구동 인체형 로봇의 임피던스 생성방식 (Impedance Modulation of Anthropomorphic robots with Kinematic and Force Redundancies)

이 병 주\* 이 재 훈  
한양대학교 제어계측공학과

김 회 국  
고려대학교 제어계측공학과

**ABSTRACT :** Typical biomechanical systems such as human body and mammals possess abundant muscles which are more than required for motion generation of such systems. We have shown that the excess number of muscles play important roles in spring-like impedance modulation. Redundant kinematic structure, which is another feature of biomechanical systems, allows modulations of inertia and damping properties of such systems. In this work, we propose a frequency modulation algorithm which combines the spring-like impedance with inertia impedance. Also, a load distribution method for frequency modulation is also introduced. The frequency modulation represents a simultaneous control of force and kinematic redundancies, which has not been addressed in the literature.

**KEYWORDS:** Spring-like Impedance, Muscle, Redundant Kinematic Structure, Frequency Modulation

## 1. 서론

일반적으로 인체는 필요 이상으로 많은 관절들과 액추에이터로 구성되어 있는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 기구학적으로 여유자유도를 지니며 여유구동을 지니는 인체형 3 자유도 평면형 로봇에 있어서 여유자유도와 여유구동을 활용하여 시스템의 임피던스를 능동적으로 제어하는 알고리즘에 대한 살펴보고자 한다. 기존의 많은 연구에서는 여유자유도와 여유구동의 경우가 분리된 경우에 대한 연구가 수행되었으나 본 논문에서는 두 경우를 접목한 알고리즘에 대하여 소개하고자 한다. 본 논문에서는 시스템의 운동 주파수를 능동적으로 제어하는 방식을 소개하고 이에 관련된 힘분배 법칙을 소개하며, 시뮬레이션을 통하여 제시된 방식들의 효용성을 입증하고자 한다.

## 2. 기구학 모델링

Figure 1는 3 자유도 인체형 로봇을 나타낸다. 이 시스템은 기구학적으로 모빌리티가 3이기 때문에 3개의 액추에이터로 제어가능하나 첫 번째와 두 번째 관절 주변에 위치한 6개의 근육형 액추에이터와 세 번째 회전관절에 장착한 한 개의 액추에이터를 포함하여 모두 7개의 액추에이터로 여유구동되는 경우를 나타낸다. 또한 이 시스템이 작업공간에서 두 방향의 위치만을 제어한다면 한 개의 기구학적 여유자유도를 가진 시스템이 된다. 인체형 로봇과 같이 여유구동을 지닌 시스템들의 장점은 가반하중을 크게 할 수 있고 내력제어를 통하여 다양한 알고리즘을 구현할 수 있으며, 여유자유도를 활용하여 시스템의 유연성을 증진시키고 장애물회피가 가능하며 특히 작업공간에서의 관성특성을 가변시킬 수 있는 장점이 있다. 소개된 시스템들에 대한 기구학은 두 단계로 구분된다. 첫 번째로는 두 개의 독립관절과 6개의 근육형 액추에이터 관절들 간의 관계를 나타내는 내부기구학이며, 두 번째로는 세 개의 독립관절과

외부관절, 여기서는 작업지점의 위치 간의 관계를 나타내는 외부기구학이다.

### 2.1 내부기구학

Fig. 1에서의 독립관절은 편의상 링크와 링크를 연결하는 회전관절들로 정한다. 따라서,  $\theta_1, \theta_2$ , 그리고  $\theta_3$ 가 독립관절이 된다. 두 시스템에서의 폐쇄체인부는 두 개의 5절 기구와 네 개의 4절 기구로 이루어져 있음을 살펴볼 수 있다. 따라서, 각각의 경우에 있어서 정해진 독립관절들에 대한 종속관절의 위치 및 속도관계식이 구해진다. 특별히 관심대상이 되는 것은 독립관절들과 인체의 muscle에 해당하는 종속관절들 간의 관계식이며 다음과 구한다. 독립관절( $\theta_a$ )과 종속관절( $d$ ) 간의 일차기구학 관계식은 아래와 같이 주어지며[5],

$$\dot{d} = [G_a^d] \dot{\theta}_a, \quad (1)$$

여기서  $[G_a^d]$ 는 독립관절들과 종속관절들 간의 일차 기구학적 영향계수를 나타내며

$$d = (d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5 \ d_6)^T. \quad (2)$$

독립관절들과 종속관절들 간의 힘평형 관계식은 식 (1)의 속도관계와 힘관계의 이중관계로부터

$$T_a = [G_a^d]^T F, \quad (3)$$

와 같이 정의되며, 여기서,

$$F = (F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ F_6)^T, \quad (4)$$

$$T_a = (T_1 \ T_2 \ T_3)^T \quad (5)$$

그리고  $g_i^j$ 가  $\frac{\partial d_j}{\partial \theta_i}$ 를 의미한다면,

$$[G_a^d]^T = \begin{bmatrix} g_1^{d3} & g_1^{d4} & 0 & 0 & g_1^{d1} & g_1^{d2} \\ 0 & 0 & g_2^{d5} & g_2^{d6} & g_2^{d1} & g_2^{d2} \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

마찬가지 방식으로 이차기구학적 영향계수  $[H_{aa}^d]^T$ 이 다음과 같이 구해진다[1].

$$\begin{aligned} [H_{aa}^d]^T_{1::} &= \begin{bmatrix} h_{11}^{d1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, [H_{aa}^d]^T_{2::} = \begin{bmatrix} h_{11}^{d2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ [H_{aa}^d]^T_{3::} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & h_{22}^{d3} \end{bmatrix}, [H_{aa}^d]^T_{4::} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & h_{22}^{d4} \end{bmatrix} \\ [H_{aa}^d]^T_{5::} &= \begin{bmatrix} h_{11}^{d5} & h_{12}^{d5} \\ h_{12}^{d5} & h_{22}^{d5} \end{bmatrix}, [H_{aa}^d]^T_{6::} = \begin{bmatrix} h_{11}^{d6} & h_{12}^{d6} \\ h_{12}^{d6} & h_{22}^{d6} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$h_{ij}^{di} = \frac{\partial^2 d_i}{\partial \theta_i^2} \quad (8)$$

## 2.2 외부기구학

말단장치의 위치와 시스템의 독립관절과의 관계를 나타내주는 외부기구학에 대하여 살펴본다. 본 시스템에서는 링크와 관절을 연결하는 회전관절들을 독립관절로 정했기 때문에 말단장치와 독립관절과의 관계를 다음과 같이 쉽게 정의된다.

$$\dot{\mathbf{u}} = [G_a^u]^T \dot{\boldsymbol{\theta}}_a \quad (9)$$

## 3. 동력학 모델링

Fig. 1의 폐쇄체인 시스템은 일곱 개의 open-chain으로 구성된다. 각 open-chain에 대한 동력학 관계식을 구한 후, 가상 일의 법칙을 활용하여 독립관절에 대한 동력학 식을 구하게 된다. 각 open-chain 시스템에 대한 동력학식은 다음과 같이 정의되며 [6]

$${}_r T_{\phi} = [{}^r I_{\phi\phi}^*] {}_r \ddot{\boldsymbol{\phi}} + {}_r \dot{\boldsymbol{\phi}}^T [{}^r P_{\phi\phi}^*] {}_r \dot{\boldsymbol{\phi}}, \quad r=1-5 \quad (10)$$

여기서, 관성행렬과 관성을 행렬 (inertia matrix and the inertia power array)은 다음과 같이 주어지고

$$[{}^r I_{\phi\phi}^*] = \sum_{j=1}^N (m_{jk} [{}^j G_{\phi}^c]^T [{}^j G_{\phi}^c] + [{}^r G_{\phi}^*]^T [J^{jk}] [{}^r G_{\phi}^*]) \quad (11)$$

$$[{}^r P_{\phi\phi}^*] = \sum_{j=1}^N \{ m_{jk} ({}^j G_{\phi}^c)^T o [{}^j H_{\phi\phi}^c] + ({}^r G_{\phi}^*]^T [J^{jk}] o [{}^r H_{\phi\phi}^*] + [{}^r G_{\phi}^*]^T [{}^r G_{\phi}^*]^T o [{}^r \Sigma^{jk}] [{}^r G_{\phi}^*] \} \quad (12)$$

윗 식에서  $[{}^j H_{\phi\phi}^c]$ 와  $[{}^r H_{\phi\phi}^*]$ 는  $jk$ 링크의 centroidal과 rotational Hessian을 각각 나타낸다. 오퍼레이터 "o"는 generalized scalar dot product [6]를 의미한다.

다음과 같은 독립관절과 전체관절에 대한 가상 일의 법칙을 적용하면

$$T_{\phi}^T \delta \boldsymbol{\phi} = T_a^T \delta \boldsymbol{\phi}_a \quad (13)$$

독립관절에 대한 시스템의 동력학 관계식이 아래와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} T_a^* &= [G_a^d]^T T_{\phi} \\ &= \sum_{r=1}^5 [{}^r G_a^d]^T ([{}^r I_{\phi\phi}^*] {}_r \ddot{\boldsymbol{\phi}} + {}_r \dot{\boldsymbol{\phi}}^T [{}^r P_{\phi\phi}^*] {}_r \dot{\boldsymbol{\phi}}) \\ &= [{}^r I_{aa}^*] \ddot{\boldsymbol{\phi}}_a + \dot{\boldsymbol{\phi}}_a^T [{}^r P_{aaa}^*] \dot{\boldsymbol{\phi}}_a \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, 독립관절에 대하여 정의된  $[{}^r I_{aa}^*]$ 와  $[{}^r P_{aaa}^*]$ 는

$$[{}^r I_{aa}^*] = \sum_{r=1}^5 [{}^r G_a^d]^T [{}^r I_{\phi\phi}^*] [{}^r G_a^d] \quad (15)$$

$$[{}^r P_{aaa}^*] = \sum_{r=1}^5 \{ ({}^r G_a^d]^T [{}^r I_{\phi\phi}^*] \} \cdot [{}^r H_{aa}^d] \quad (16)$$

$$+ [{}^r G_a^d]^T ([{}^r G_a^d]^T \cdot [{}^r P_{\phi\phi}^*]) [{}^r G_a^d] \}$$

으로 주어지며,  $[{}^r G_a^d]$ 와  $[{}^r H_{aa}^d]$ 는 각각  $i$ 번째 open-chain의 관절들과 시스템의 독립관절 간의 일차 그리고 이차 기구학적 영향계수를 나타낸다.

작업공간에서의 동력학 모델은 좌표변환기법을 활용하여 다음과 같이 구해지며

$$T_u = [I_{uu}^*] \ddot{\mathbf{u}} + \dot{\mathbf{u}}^T [P_{uuu}^*] \dot{\mathbf{u}}, \quad (17)$$

여기서,  $T_u$ 는 작업공간에서의 부하를 의미하며,  $[I_{uu}^*]$ 와  $[P_{uuu}^*]$ 는 작업공간에서 정의된 관성행렬과 관성을 행렬을 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$[I_{uu}^*] = [G_u^d]^T [I_{aa}^*] [G_u^d] \quad (18)$$

$$[P_{uuu}^*] = [G_u^d]^T ([G_u^d]^T o [P_{aaa}^*]) [G_u^d] + ([G_u^d]^T [I_{aa}^*]) o [H_{aa}^d] \quad (19)$$

## 4. 강성 및 주파수 모델링

### 4.1 강성 모델링

시스템이 정적평형을 이루고 있는 상태에서 식 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$T_a^* = [G_a^d]^T F = 0 \quad (20)$$

이러한 상태에서 시스템에 외란이 발생하면 마치 실제의 스프링처럼 평형상태를 기준으로 하여 진동하는 현상이 발생한다. 기존의 연구에서 식 (20)으로부터 강성 모델은 다음과 같이 유도된다[1].

$$[K_{aa}] = (-F)^T o [H_{aa}^d]^T \quad (21)$$

몸체좌표계 위치와 최소좌표계 간의 강성행렬 관계식은 아래와 같이 주어지며

$$[K_{uu}] = [G_u^d]^T [K_{aa}] [G_u^d], \quad (22)$$

식 (21)을 식 (22)에 대입하여 정리하면

$$[K_{uu}] = (-F)^T o [H_{uu}^d], \quad (23)$$

여기서

$$[H_{uu}^d] = [G_u^d]^T [H_{aa}^d] [G_u^d]. \quad (24)$$

식 (23)을 벡터 형태로 바꾸어 나타내면

$$K_u = -[H_u^d] F, \quad (25)$$

여기서  $K_u$ 와  $[H_u^d]$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_u = ([K_{uu}]_{1:1} [K_{uu}]_{1:2} [K_{uu}]_{2:2})^T \quad (26)$$

$$[H_u^d] = \begin{bmatrix} ([G_u^d]^T [H_{aa}^d] [G_u^d])_{1:1} \\ ([G_u^d]^T [H_{aa}^d] [G_u^d])_{1:2} \\ ([G_u^d]^T [H_{aa}^d] [G_u^d])_{2:2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

### 4.2 주파수 모델링

정적 평형상태에서 시스템에 미소의 변위가 발생하였을 때의 시스템 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} [I_{uu}^*] \delta \ddot{\mathbf{u}} &= \Delta ([G_u^d]^T F) \\ &= (F^T o [H_{uu}^d]^T) \delta \mathbf{u}. \end{aligned} \quad (28)$$

위의 식은 다시 아래의 식으로 표현되며

$$[I_{uu}^*] \delta \dot{\mathbf{u}} + [K_{uu}] \delta \mathbf{u} = 0, \quad (29)$$

여기서,  $[K_{uu}]$ 은 식 (21)에 주어진 강성행렬이다.

식 (29)의 양변에  $[I_{uu}^*]^{-1}$ 을 곱하여 정리하면

$$\delta \dot{\mathbf{u}} + [I_{uu}^*]^{-1} [K_{uu}] \delta \mathbf{u} = 0, \quad (30)$$

여기서, 주파수행렬  $[w_{uu}]$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} [w_{uu}][w_{uu}]^T &= [I_{uu}^*]^{-1} [K_{uu}] \\ &= (-F)^T o ([I_{uu}^*] [H_{aa}^d]). \end{aligned} \quad (31)$$

주파수 행렬을 대각행렬이라고 가정하고, 식 (31)을 벡터 형태로 표현하면

$$\omega_u = [W_u^d] F, \quad (32)$$

여기서  $\omega_u$ 와  $[W_u^d]$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_u = (w_{xx}^2 \ w_{xy}^2 \ w_{yy}^2)^T, \quad (33)$$

$$[W_u^d] = \begin{bmatrix} \{ [I_{uu}^*]^{-1} ([G_u^a]^T [H_{aa}^d] [G_u^a]) \}_{:1:1} \\ \{ [I_{uu}^*]^{-1} ([G_u^a]^T [H_{aa}^d] [G_u^a]) \}_{:1:2} \\ \{ [I_{uu}^*]^{-1} ([G_u^a]^T [H_{aa}^d] [G_u^a]) \}_{:2:2} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

#### 4.3 힘분배 알고리즘

주어진 메커니즘의 평형 위치에서  $[K_{uu}]$ 의 강성행렬을 합성하기 위해서는 식 (20)과 식 (32)를 다음의 행렬식으로 조합하여 힘분배를 수행한다.

$$\begin{bmatrix} [G_u^a]^T \\ -[W_u^d] \end{bmatrix} F = \begin{bmatrix} 0 \\ K_u \end{bmatrix}. \quad (35)$$

식 (32)의 일반 해는 아래와 같다.

$$F = [G_{com}]^+ a + ([I] - [G_{com}]^+ [G_{com}]) \epsilon, \quad (36)$$

여기서,  $[G_{com}]^+$ 는  $[G_{com}]$ 의 pseudo-inverse 해를 나타내며,  $[G_{com}]$ 과  $a$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$[G_{com}] = \begin{bmatrix} [G_u^a]^T \\ -[W_u^d] \end{bmatrix}, \quad a = \begin{bmatrix} 0 \\ K_u \end{bmatrix}. \quad (37)$$

또한, 식 (36)의 두 번째 항은 주파수를 합성하고 남은 여유 액츄에이터를 이용하여 내력을 다른 목적으로 사용할 수 있는 공간을 제공하여 주는 해를 의미한다.

#### 5. 시뮬레이션

본 절에서는 여유구동을 지닌 인체형 로봇을 통하여 상반여유 구동시 개회로 방식으로 운동 주파수를 조절하는 방식에 대한 시뮬레이션을 수행한다. Yi와 Freeman[1]은 일반적인 폐쇄체인 시스템의 상반구동에 의한 스프링효과 생성을 위한 필요조건을 유도하였는데, 이러한 조건에 따르면 주어진 인체형 시스템은 여섯 개의 독립적인 폐쇄체인을 가지고 각 체인은 두 개씩의 비선형 holonomic 방정식을 가지므로 전체적으로 10 개의 비선형 holonomic 방정식을 가지게 되므로 최대 10 개의 강성 요소를 제어할 수 있다. 식 (34)로부터 관성행렬이 단위행렬인 경우에 운동주파수 모듈레이션은 스프링 효과를 생성하는 조건과 운동주파수를 생성하는 기구학적 조건

을 동일하다. 이에 따라, 주어진 시스템은 작업공간에서 2 자유도를 제어한다고 가정하였으므로 가지므로  $w_{xx}$ ,  $w_{xy}$ , 그리고  $w_{yy}$  세 개의 주파수요소를 독립적으로 제어하게 된다. 따라서 두 방향의 운동을 위한 두 개의 액츄에이터와 세 개의 주파수 요소를 제어하기 위한 세 개의 액츄에이터가 필요하므로 전체적으로 최소한 다섯 개의 액츄에이터가 요구된다. 주어진 시스템은 폐쇄체인에서 여섯 개의 액츄에이터가 존재하므로 이를 만족한다.

기구학 그리고 동력학 파라미터는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} l_1 &= 0.2 \text{ m}, \quad l_2 = 0.1 \text{ m}, \quad l_3 = 0.05 \text{ m} \\ a_1 &= a_2 = a_4 = a_6 = 0.1 \text{ m}, \quad a_3 = a_5 = 0.15 \text{ m} \\ b_1 &= 0.08 \text{ m} \quad b_2 = b_3 = b_4 = b_5 = 0.05 \text{ m} \quad b_6 = 0.15 \text{ m} \\ m_1 &= 0.5 \text{ kg} \quad m_2 = 0.3 \text{ kg} \quad m_3 = 0.1 \text{ kg} \\ I_{z1} &= 0.0017 \text{ kg} \cdot \text{m} \quad I_{z2} = 0.00056 \text{ kg} \cdot \text{m} \\ I_{z3} &= 0.000021 \text{ kg} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (38)$$

여기서, 각 muscle의 origin과 insertion 위치는 인체 팔을 관찰하여 결정하였다. 예제 시뮬레이션에서는  $(x, y) = (0.1, 0.15) \text{ m}$  그리고 마지막 링크의 방향 각이  $-90^\circ$ 인 경우에 지점에서 각각 x와 y방향으로  $4 \text{ rad/s}$ 의 주파수를 가지며  $w_{xy}$ 는 0이 되도록 내력을 제어한다. 시스템 액츄에이터가 원하는 주파수 효과를 내도록 각 액츄에이터를 구동하여 정적평형을 이룬 상태에서 x방향으로  $1 \text{ cm}$  당겨서 놓을 경우의 진동효과를 살펴보고자 한다. Fig. 2로부터 인체형 시스템은 주어진 주파수를 가지고 진동하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 같은 위치에서 방향 각이  $-45^\circ$ 인 경우에 지점에서 마찬가지로 x방향으로  $4 \text{ rad/s}$ 의 주파수를 가지도록 내력을 제어한다. Fig. 3으로부터 인체형 시스템은 주어진 주파수를 가지고 진동하는 현상을 보여주고 있다. Fig. 4는 각 경우에 있어서 x방향으로  $8 \text{ rad/s}$ 의 주파수를 가지도록 내력을 제어한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 시스템의 진동주기는 진동주파수와 다음의 관계식을 가지므로

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (39)$$

각 경우의 진동주기를 예측할 수 있으며, Fig. 2와 3의 경우가 Fig. 4의 경우보다 두 배의 진동주기를 가짐을 살펴볼 수 있다.

이상의 시뮬레이션에서 살펴본 바와 같이 Fig. 1의 인체형 시스템은 정해진 작업지점에서 하나의 여유자유도를 활용하여 핸드의 다양하게 방향 각을 조절하여 장애물 회피나 작업성능을 향상시키는 역할을 하게 되며, 첫 번째 두 관절에 형성된 폐쇄체인에서는 여유구동으로 인한 내력을 활용하여 작업지점에서의 주파수제어의 역할을 원활하게 할 수 있음을 살펴볼 수 있었다.

#### 6. 결론

본 논문에서는 여유구동과 여유자유도를 지닌 인체형 로봇에 대한 임피던스 생성방식에 대하여 살펴 보았다. 인체에서는 여유자유도와 여유구동을 활용하여 운동주파수를 임의로 제어할 수 있는 특성을 지니고 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다. 인체에서와 같이 여유자유도와 여유구동을 동시에 활용하는 알고리즘에 대한 연구는 아직 미진하다고 판단되므로 이에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

**후기**

본 논문은 한국과학재단 핵심전문과제로 지원 받았으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

**참고문헌**

[1] B. J. Yi and R. A. Freeman, "Geometric Analysis of Antagonistic Stiffness in Redundantly Actuated Parallel Mechanisms," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, 1993, pp. 581-603.

[2] H. J. Kang, B. J. Yi, W. Cho, R. A. Freeman, "Constraint-embedding Approaches for General Closed-Chain System Dynamics in Terms of A Minimum Coordinate Set," *Proc. of 1990 ASME Mechanism/Design Conf., DE-Vol. 24*, pp. 125-132.

[3] R. A. Freeman and D. Tesar, "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotic Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," *Proceedings of 20th ASME Mechanisms Conference*, Orlando, FL, 1988.

[4] S.H. Lee, B-J. Yi, and Y.K. Kwak, "Performance analysis and optimal actuator sizing for anthropomorphic robot module with redundant actuation," *Transaction of The Korean Society of Mechanical Engineers Vol. 19*, 181-192, 1995.

[5] P.A. Spence, *Basic human anatomy*. The Benjamin/Cummings Publishing Co. Inc., 1986.

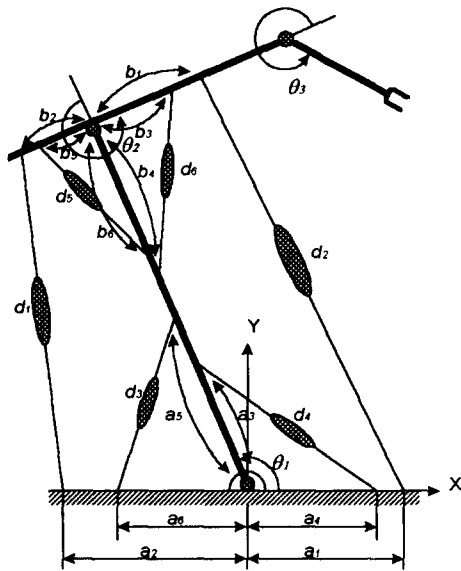


Figure 1 : Anthropomorphic Robot

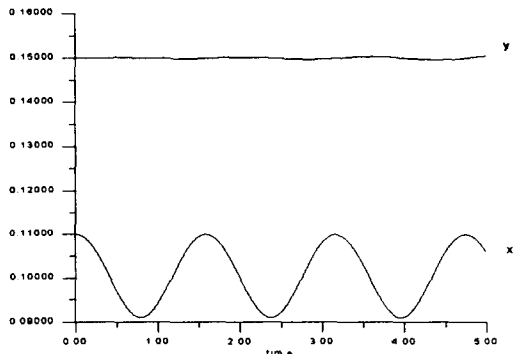


Figure 2 : Frequency Modulation  
( $\Phi = -90^\circ$   $\omega_x = \omega_y = 4 \text{ rad/s}$ )

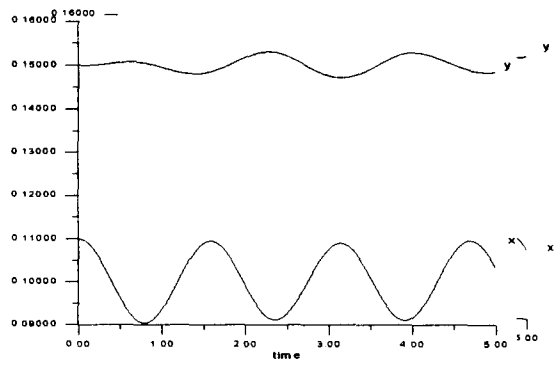
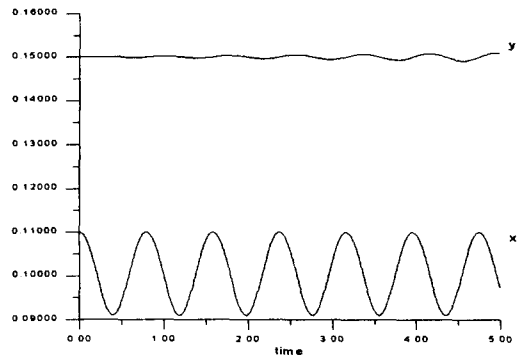
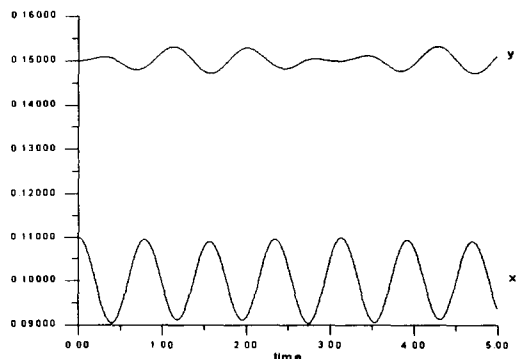


Figure 3 : Frequency Modulation  
( $\Phi = -45^\circ$   $\omega_x = \omega_y = 4 \text{ rad/s}$ )



(a)  $\Phi = -90^\circ$



(b)  $\Phi = -45^\circ$

Figure 4 : Frequency Modulation  
( $\omega_x = \omega_y = 8 \text{ rad/s}$ )