

# 모델 변환법을 이용한 점핑 로봇 제어의 운동경로 생성에 관한 연구

서진호<sup>#</sup>, 山北 昌毅<sup>\*</sup>, 이권순<sup>\*\*</sup>

## A Study on Motion Planning Generation of Jumping Robot Control Using Model Transformation Method

Jin-Ho Suh<sup>#</sup>, Masaki Yamakita<sup>\*</sup> and Kwon-Soon Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

In this paper, we propose the method of a motion planning generation in which the movement of the 3-link leg subsystem is constrained to a slider-link and a singular posture can be easily avoided. The proposed method is the jumping control moving in vertical direction which mimics a cat's behavior. That is, it is jumping toward wall and kicking it to get a higher-place. Considering the movement from the point of constraint mechanical system, the robotic system which realizes the motion changes its configuration according to the position and it has several phases such as; i) an one-leg phase, ii) in an air-phase. In other words, the system is under nonholonomic constraint due to the reservation of its momentum. Especially, in an air-phase, we will use a control method using state transformation and linearization in order to control the landing posture. Also, an iterative learning control algorithm is applied in order to improve the robustness of the control. The simulation results for jumping control will illustrate the effectiveness of the proposed control method.

**Key Words** : Nonholonomic(비홀로노믹), Linearization(선형화), Stochastic dynamic manipulability(확률적 동적 조 정력), Iterative learning control(반복학습제어), LQ optimal control(LQ 최적제어)

### 1. 서론

일반적으로 지붕과 같은 높은 목표점으로 이동하기 위한 동작으로서, 고양이가 지붕으로 움직이기 위하여 벽면을 이용하여 점프함을 알 수 있다. 결과적으로, 이러한 점프동작은 수직방향으로 움직임을 의미하고 또한 이러한 운동은 매우 효율적이고 능률적이라는 것을 알 수 있을 것이다. 따

라서, 본 연구에서는 구속적 메카니컬 시스템의 한 점으로부터 두가지의 운동인, 1) 바닥에서 한발로 점프할 경우, 2) 공중에서의 경우를 고려함으로써 위치에 따라서 그것의 형태를 변형하는 동작을 실현할 수 있는 로봇시스템을 구현할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구의 목적은 고양이의 점프운동을 모방한 점핑로봇 시스템의 모델링 구성과 제어칙(control law)을 해석하고 구성하는 것이다. 본

접수일: 2003년 6월 9일; 게재승인일: 2004년 1월 9일

# 교신저자: 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

E-mail suhgang@hanmail.net (051) 200-6950

\* 동경공업대학 제어시스템공학과

\*\* 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 국가지정연구실(NRL)

연구에서 고려되어진 점핑로봇 시스템의 운동은  $xy$ -평면에서 구속되어짐을 가정한다. 더구나, 고려되어진 3-link 의 다리로 구성되는 부분시스템(subsystem)들의 운동계획방법(motion planning method)는 slider-link 에 구속되어지고 특이자세(singular posture)는 쉽게 피할 수 있음을 보여준다.

본 논문은 간략하게 다음과 같이 구성되어진다. 2 장에서는 본 연구에서 고려되어진 점핑로봇 시스템의 모델링을 기술한다. 본 연구에서 제안하는 점핑로봇의 제어방법은 3 장에서 서술되어진다. 특히, 점핑로봇 시스템의 제어책 설계에서는 초기 형태가 매우 중요한 요소이므로 제안하고자 하는 제어방법은 확률적 동적 조정력 측정(stochastic dynamic manipulability measure)에 의하여 결정되어진다. 그리고 제안되어지는 제어방법은 앞에서 언급되어진 것처럼 바닥에서 한발로 점프할 경우와 공중에서의 경우로 나누어서 각각의 제어방법을 제안한다. 4 장에서는, 본 연구에서 제안되어진 제어책의 유효성을 보여주기 위한 수치적 모의실험을 실행한 결과를 기술하고, 더불어서 이용되어진 파라미터의 값들을 표시한다. 마지막으로, 5 장에서는 연구결과를 간략히 요약하여 기술하고 추후의 연구과제에 대한 부분도 간단히 서술하고 있다.

## 2. System Modeling

### 2.1 System modeling

본 연구의 모델이 되었던 고양이가 낮은 곳에서 높은 곳으로 점프하기 위해서는 실제로 몸체가 구부러지지만, 본 논문에서는 로봇 시스템의 앞다리로서 점핑운동(jumping motion)을 제한함을 가정한다. 다시 말하면, 벽면에 점프하고 다시 벽면에서 높은 곳으로 점프하는 운동을 실현하기 위하여, Fig. 1 에서 보여지는 것처럼 7-link 로 구성되어지는 점핑로봇 시스템을 고려한다.

또한, 고려 되어진 시스템의 주요특징은 다음과 같이 요약되어질 수 있다.

1. 점핑로봇의 관절(joint)들에는 6 개의 회전 액추에이터로 구성된다.
2. 발끝이 바닥 또는 벽에 접촉하였을때, 발끝과 접촉점 사이에서는 미끄러짐(slip)이 없음을 가정한다.

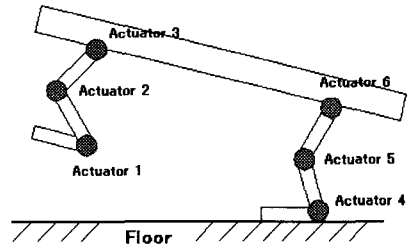


Fig. 1 The considered robot system

따라서, 본 논문에서 고려되어진 점핑로봇 시스템으로부터 기본적인 제어책(control law)을 이끌어내기 위하여, 전체시스템(total system)은 몸통(body) 부분에서 두개의 4 개의 병렬링크(parallel link)로 분리되어질 수 있고 하나의 직선으로서 몸체를 유지하는 위한 것으로서 홀로노믹 몸체 구속(holonomic body constraint)을 의미하는  $C_b(q) = 0$  가 Fig. 2 에서 표현되어진다.

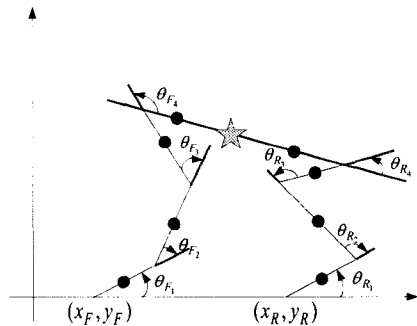


Fig. 2 The coordination of robotic system

먼저, Fig. 2 에서 주어진 점핑로봇 시스템의 일반화되어진 좌표(generalized coordinate)  $q$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = [q_F \quad q_R]^T \quad (1)$$

단,

$$q_F = [x_F \quad y_F \quad \theta_{F_1} \quad \theta_{F_2} \quad \theta_{F_3} \quad \theta_{F_4}]^T \quad (2)$$

$$q_R = [x_R \quad y_R \quad \theta_{R_1} \quad \theta_{R_2} \quad \theta_{R_3} \quad \theta_{R_4}]^T \quad (3)$$

그리고  $C_b(q)$  는 다음과 같이 표현되어진다.

$$C_b(q) = \begin{bmatrix} x_F + l_{F_1}(C_{F_1} + C_{F_2}) + l_{F_3}C_{F_{123}} + (a_{F_4} + r_{F_4})C_{F_{1234}} \\ -x_R - l_{R_1}(C_{R_1} + C_{R_2}) - l_{R_3}C_{R_{123}} - (a_{R_4} + r_{R_4})C_{R_{1234}} \\ y_F + l_{F_1}(S_{F_1} + S_{F_2}) + l_{F_3}S_{F_{123}} + (a_{F_4} + r_{F_4})S_{F_{1234}} \\ -y_R - l_{R_1}(S_{R_1} + S_{R_2}) - l_{R_3}S_{R_{123}} - (a_{R_4} + r_{R_4})S_{R_{1234}} \\ \theta_{F_1} + \theta_{F_2} + \theta_{F_3} + \theta_{F_4} - \theta_{R_1} - \theta_{R_2} - \theta_{R_3} - \theta_{R_4} + \pi \end{bmatrix} \quad (4)$$

단,

$$\begin{aligned} C_{F_1} &= \cos \theta_{F_1}, & S_{F_1} &= \sin \theta_{F_1} \\ C_{F_{12}} &= \cos(\theta_{F_1} + \theta_{F_2}), & S_{F_{12}} &= \sin(\theta_{F_1} + \theta_{F_2}) \\ C_{F_{123}} &= \cos(\theta_{F_1} + \theta_{F_2} + \theta_{F_3}), \\ S_{F_{123}} &= \sin(\theta_{F_1} + \theta_{F_2} + \theta_{F_3}) \\ C_{F_{1234}} &= \cos(\theta_{F_1} + \theta_{F_2} + \theta_{F_3} + \theta_{F_4}), \\ S_{F_{1234}} &= \sin(\theta_{F_1} + \theta_{F_2} + \theta_{F_3} + \theta_{F_4}) \end{aligned} \quad (5)$$

또한 뒷발 부분의 각도를 나타내는  $S_R$  과  $C_R$  도 식(5)와 같은 의미로서 사용되어짐에 유의하자.

물론, 고려되어진 좌표 시스템이 과다하고 또한 시스템의 표현이 복잡하게 되어진다고 하더라도 다음과 같은 장점을 가지고 있음에 유의해야 할 것이다.

1. 4-link 동적 방정식(dynamic equation)이 7-link 동적 시스템보다 더 간단하고, 또한 각각의 링크에 대하여 같은 방정식을 이용할 수 있다.
2. 이러한 좌표 시스템은 발끝에서 구속(constraint)을 연결하는 시간을 판단하는데 매우 유용하다.

더구나, 다음에서 논의되어지는 것처럼, 몸체 구속의 Jacobian 방정식(Jacobian of body constraint)은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\frac{d}{dt}C_b(q) = J_b(q)\dot{q} = 0 \quad (6)$$

단,

$$J_b(q) = \frac{\partial C_b(q)}{\partial q} \quad (7)$$

### 2.2 Variable constraints

이 논문에서, 우리는 발끝이 바닥 또는 벽면에 접촉할 때 충분한 구속력이 발휘되어짐을 가정한다. 그리고 홀로노믹 구속을 의미하는  $C_v(q, mode) = 0$  는 시스템의 상태에 따라서 소개되어진다. 단, mode 는 발끝에 접촉상태를 가리키는 표시(index)을 의미한다.

예를 들면, 단지 뒷발의 발끝이 바닥 또는 벽면에 구속되어질 때,  $C_v(q, mode)$  는 다음과 같이 표현되어진다.

$$C_v(q, mode) = \begin{bmatrix} x_R - X_R(const) \\ y_R - Y_R(const) \end{bmatrix} \quad (8)$$

그리고 우리는 식(5)에 의하여 다음과 같이 Jacobian 을 계산할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}C_v(q) = J_v(q)\dot{q} = 0 \quad (9)$$

단,

$$J_v(q) = \frac{\partial C_v(q)}{\partial q} \quad (10)$$

이와 같이, 우리가 어떻게 mode 을 판정할 것인가가 문제로 주어지게 될 것이고, 따라서 이러한 문제에 대한 응답은 아래의 Fig. 3 에서 보여지는 것처럼, 구속력(constraint force)  $\lambda_v = [\lambda_x \lambda_y]^T$  의 이해로 귀착되어진다.

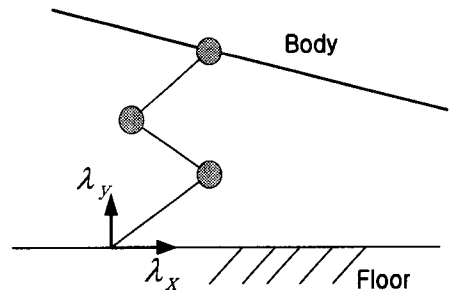


Fig. 3 Constraint force

Fig. 3 에서 표현되어진 구속력(constraint force)에서  $\lambda_x$ 와  $\lambda_y$ 는 각각 수평 구속력과 수직 구속력

을 의미한다. 다시 말하면,  $\lambda_y$ 가 0 이고 위로 향한 가속력이 양수(positive)라고 한다면, 구속은  $\lambda_y=0$ 으로 되어 사라지게 될 것이고 발끝은 위의 방향으로 움직일 수 있을 것임을 의미한다. 또한 발끝이 점프하여 벽면에 있을 때의 스위칭 타이밍 (switching timing)은 벽면을 딱 켜  $\lambda_x$ 에 종속하게 될 것이다.

### 2.3 Dynamic equation

본 단원에서는, 감소되어진 좌표 시스템에 대한 동적 방정식(dynamic equation)에 대하여 기술되어진다. 먼저, 구속을 무시한다면, 두개의 4-link manipulator 들의 동적 방정식은 다음과 같은 식으로 표현되어질 수 있다.

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=\tau \quad (11)$$

단,

$$M(q)=\begin{bmatrix} M_F & 0 \\ 0 & M_R \end{bmatrix}, \quad C(q,\dot{q})=\begin{bmatrix} C_F & 0 \\ 0 & C_R \end{bmatrix}$$

$$G(q)=\begin{bmatrix} G_F \\ G_R \end{bmatrix}, \quad \tau=\begin{bmatrix} \tau_F \\ \tau_R \end{bmatrix}$$

위치구속(position constraint)을 가속구속(acceleration constraint)으로 변환하기 위하여, 우리는 식(5)와 식(8)을 미분함으로서 구할 수 있고 또한 구속을 유지하기 위하여 구속력(constraint force)을 나타내는  $J_b^T \lambda_b$ 와  $J_v^T \lambda_v$ 가 소개되어진다. 그리고 다음의 식들은 동시에 일어나는 모든 구속들을 포함하는 시스템을 표현하는데 이용되어진다.

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=\tau-J_b^T \lambda_b-J_v^T \lambda_v \quad (12)$$

$$J_b \ddot{q}=-\dot{J}_b \dot{q} \quad (13)$$

$$J_v \ddot{q}=-\dot{J}_v \dot{q} \quad (14)$$

위의 식들로부터, 가속벡터(acceleration vector)  $\ddot{q}$ 와 구속력(constraint force)  $\lambda_b$ 와  $\lambda_v$ 가 각각 계산되어질 수 있다. 그러므로, 가속벡터와 구속력은 mode의 변화를 판단하는데 이용되어질 수 있다. 벽이나 다른 것들에 대한 충돌은 완전히 탄력성이 없음을 가정하고 그리고 상태는 충돌 후에 구속조건

아래에서 방향을 바꿀 것이다. 이것은 충격력(impulse force)들의 결과로서 mode 되어진다.

두 개의 구속력  $\lambda_b$ 와  $\lambda_v$ 에 대하여, 전체 동적 방정식(whole dynamic equation)은 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=\tau-J_r^T \lambda_r \quad (15)$$

$$J_r \ddot{q}=-\dot{J}_r \dot{q} \quad (16)$$

단,

$$J_r=[J_b \quad J_e]^T, \quad \lambda_r=[\lambda_b \quad \lambda_e]^T$$

그리고 충돌(collision)의 표현은 새로운 구속조건  $J_i \dot{q}=0$ 으로서 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=\tau-J_r^T \lambda_r-J_i^T \lambda_i \quad (17)$$

$$J_r \ddot{q}=-\dot{J}_r \dot{q} \quad (18)$$

$$J_i \ddot{q}=-\dot{J}_i \dot{q} \quad (19)$$

그러므로, 우리는 식(17)과 식(18)을 이용하여 다음 방정식을 유도할 수 있다.

$$\lambda_r=X^{-1}\{\dot{J}_r \dot{q}+J_r M^{-1}(\tau-C\dot{q}-G-J_i^T \lambda_i)\} \quad (20)$$

단,

$$X=J_r M^{-1} J_r^T$$

따라서, 식(17)로부터 다음 방정식을 유도할 수 있다.

$$M\ddot{q}+C\dot{q}+G=\tau-J_r^T X^{-1}\{\dot{J}_r \dot{q}+J_r M^{-1}(\tau-C\dot{q}-G-J_i^T \lambda_i)\}-J_i^T \lambda_i \quad (21)$$

### 3. Jumping Control Design

본 연구에서 제안되어진 시스템에 대한 컨트롤러 설계에서, 점핑로봇 시스템의 초기조건(initial condition) 매우 중요한 요소로서 확률적 동적 조정력(stochastic dynamic manipulability)으로 알려져 있는 것에 의하여 결정되어진다<sup>5,6</sup>. 그러므로 점핑로봇의 동적제어(dynamic control)을 위하여, 우리는 주로 질량중심(mass center)의 운동에 착안하여 설

계한다. 따라서, 제안되어진 설계방법은 중력중심이 마치 가상의 벽면에 연결되어진 스프링에 의하여 움직이게 되는 것처럼하여 유도되어진다.

### 3.1 Model transformation

점핑로봇의 경로설계(pass design)에 있어서, 중력중심의 속도에 대하여 목표값을 어떻게 결정해야 하는지가 가장 중요한 문제이며, 이것은 또한 매우 복잡한 문제이다. 또한 같은 상황의 문제를 점핑로봇의 뒷발의 목표값에 대해서도 고려해야 할 것이다. 더불어서 이전의 연구에서<sup>5,6</sup>, 우리는 3-link 다리의 모델을 고려한 점핑 로봇에 관한 연구결과를 제안했었다.

본 연구에서, 우리는 각속도 목표값에 대한 설정문제를 해결하기 위한 방법으로서, 가상의 수직 액츄에이터 모델로서 기존의 모델을 변형하는 모델 변환법을 제안하고자 한다. 아래에서 보여지는 Fig. 4 와 같이, 가상의 선형 액츄에이터(virtual linear actuator)를 사용하여 3-link 다리의 움직임으로서 구속되어짐을 적용시킨 시스템을 고려하고자 한다.

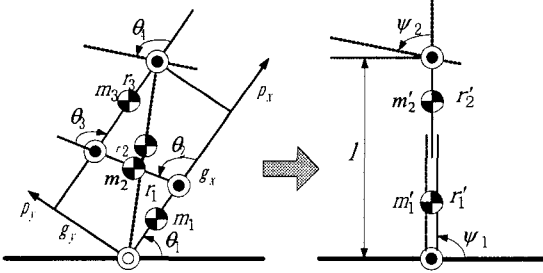


Fig. 4 Model transformation

이러한 모델 변형법을 이용함으로써, 점핑로봇의 특이자세에 대한 회복과 더불어 기존에 제안되었던 점핑로봇에 대한 모델링을 더욱 간단하게 할 수 있으므로, 점핑로봇의 위치제어에 관한 연구목표를 보다 쉽게 성취할 수 있다.

먼저 우리는 다음의 식과 같이 표현되어지는 새로운 좌표(new coordinate)를 고려한다.

$$s = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ l \\ \psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 + \tan^{-1}\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \\ \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \\ -\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \pi + \tan^{-1}\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \end{bmatrix} \quad (22)$$

단,  $\theta_2 > 0$ 이다.

더구나 일대일 대응(one-to-one correspondence)에 대하여, 우리는 link 들의 중력중심의 위치가 가상의 선형 액츄에이터 위에 있는 구속을 고려하여, 식 (23)에서 주어지는 새로운 파라미터  $\varepsilon$ 을 이용함으로써

$$\begin{aligned} \varepsilon(q) &= g_x p_y - g_y p_x \\ &= \xi_1 s_2 + \xi_2 s_3 + \xi_3 s_{23} \end{aligned} \quad (23)$$

구속조건은  $\varepsilon = 0$ 이다. 즉,  $x_s = [\phi \ l \ \psi \ \varepsilon]^T$ 는 새로운 좌표  $s$ 와 새로운 파라미터  $\varepsilon$ 을 이용함으로써 나타내어지는 새로운 좌표를 의미한다. 각도좌표와 속도관계에 의하여

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} J_s(q) \\ J_\varepsilon(q) \end{bmatrix} = J_{x_s}(q) \dot{q} \quad (24)$$

단,

$$J_{x_s} = \begin{bmatrix} 1 & J_2 & J_3 & 0 \\ 0 & \frac{-l(l_2 s_2 + l_3 s_{23})}{l} & \frac{-l_3(l_2 s_3 + l_3 s_{23})}{l} & 0 \\ 0 & -1 + \frac{J_2}{a} & -1 + \frac{J_3}{a} & -1 \\ 0 & \xi_1 c_2 + \xi_3 c_{23} & \xi_2 c_3 + \xi_3 c_{23} & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

그리고 위의 식들에서 주어진 변수들은 다음 식에 의하여 계산되어진다.

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{m_2 a l_3 + m_3 l_2 (l_2 - a_1)}{M}, & \xi_2 &= \frac{m_2 a_2 l_3 + m_3 l_2 (l_3 - a_3)}{M} \\ \xi_3 &= \frac{m_1 a l_3 + m_2 l_3 + l_1 l_3 (m_2 + m_3)}{M} \\ p_x &= l_1 + l_2 c_2 + l_3 c_{23}, & p_y &= l_1 + l_2 s_2 + l_3 s_{23} \\ a &= l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_1 l_2 c_2 + 2l_2 l_3 c_3 + 2l_1 l_3 c_{23} \\ J_2 &= l_2^2 + l_3^2 + l_1 l_2 c_2 + 2l_2 l_3 c_3 + l_1 l_3 c_{23} \\ J_3 &= l_3^2 + l_2 l_3 c_3 + l_1 l_3 c_{23} \\ s_2 &= \sin \theta_2, & s_3 &= \sin \theta_3, & s_{23} &= \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ c_2 &= \cos \theta_2, & c_3 &= \cos \theta_3, & c_{23} &= \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

이러한 모델변환법을 위한 좌표변환에서 특이점(singular point)  $\theta_2 = 2n\pi$ 와  $\theta_3 = 2n\pi$  이외에서는

$$\text{rank } J_x = 4$$

가 성립하도록 하기 위하여, 특이점 이외에서는  $J_x^{-1}$ 가 존재한다고 가정하면 식(24)의 미분식을 이용함으로써  $\ddot{q}$ 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\ddot{q} = J_x^{-1}(\ddot{x} - \dot{J}J_x^{-1}\dot{x}) \quad (26)$$

### 3.2 Jumping control

본 단원에서는, 점핑로봇 시스템이 두 다리로 점프하는 문제에 대하여 언급한다. 제안되어진 로봇 시스템은 고양이의 운동자세를 모방한 것으로서 다리의 자세는 다음 점프를 준비하기 위한 방법에 의하여 미리 결정되어진 목표값에 수렴하기 위하여 피드백 제어(feedback control)을 이용한다. 또한 제안되어진 제어 알고리즘(control algorithm)을 유도하기 위하여, 우리는 질량중심(mass center)과 몸체 각도(body angle)에 유의하여 시스템을 기술하도록 한다.

#### 3.2.1 Standing with a hind leg

주어진 목표방향으로 경로를 설계하기 위해서는, 먼저 적당한 각도의 방향을 결정해야 할 것이다. 그러므로, 우리는 제안되어진 시스템의 특징들로부터 under-actuator link 을 제어함을 고려한다. 본 연구의 제어목적은 다음과 같이 요약되어질 수 있다.

1. 뒷발의 절대각으로 점프하기 위한 각도조절
2. 가능하다면, 목표위치에 대한 다리의 각도조절

첫째로, 우리는 다리의 길이가 Fig. 5 에서 보여지는 것처럼,  $l_f$  와  $l_h$  와 같이 결정되어진 3-link 다리를 고려하도록 한다.

다리의 각도  $\psi_{F_2}$  와  $\psi_{H_2}$  에 대한 몸체의 각도  $\theta_b$  를 이용함으로써, 우리는 새로운 상태  $x$  을 다음과 같이 고려되어진다.

$$x = [x_p \quad x_{a_1} \quad x_{a_2}]^T = [\psi_{H_1} \quad \psi_{H_2} \quad \psi_{F_3}]^T \quad (27)$$

그러므로, 운동량  $L(t)$  에 대한 관계식은 다음과 같이 유도되어질 수 있다.

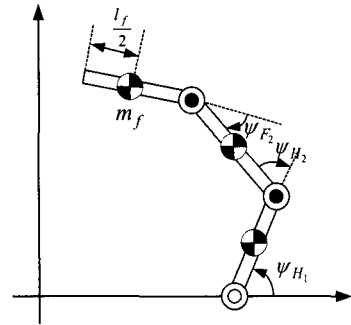


Fig. 5 Coordinate configurations with one leg system

$$L(t) = L_0 - \int_0^t G(x) dt = H_p \dot{x}_p + H_{a_1} \dot{x}_{a_1} + H_{a_2} \dot{x}_{a_2} \quad (28)$$

단,

$$H_p(x) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + 2\beta_1 C_1 + 2\beta_2 C_2 + 2\beta_3 C_3$$

$$H_{a_1}(x) = \alpha_2 + \alpha_3 + \beta_1 C_1 + 2\beta_2 C_2 + \beta_3 C_3$$

$$H_{a_2}(x) = \alpha_3 + \beta_2 C_2 + \beta_3 C_3$$

$$G(x) = \frac{1}{2} \{ (m_h + 2m_b + 2m_f) l_h \cos x_p + (m_b + 2m_f) l_b \cos(x_p + x_{a_1}) + m_f l_f \cos(x_p + x_{a_1} + x_{a_2}) \} g$$

특히,  $\alpha_i$  와  $\beta_i$  ( $i=1,2,3$ ) 는 시스템에 의하여 결정되어지는 상수들이고 이러한 파라미터들은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\alpha_1 = J_h + \{4(m_b + m_f) + m_h\} l_h^2$$

$$\alpha_2 = J_b + (m_b + 4m_f) l_b^2, \quad \alpha_3 = J_f + m_f l_f^2$$

$$\beta_1 = 2(m_b + 2m_f) l_h l_b$$

$$\beta_2 = 2m_f l_f l_b, \quad \beta_3 = 2m_f l_f l_h$$

$$C_1 = \cos(x_{a_1}), \quad C_2 = \cos(x_{a_2})$$

$$C_3 = \cos(x_{a_1} + x_{a_2})$$

비구동링크(under-actuated link)의 각속도를 입력으로 고려함으로써, 주어진 시스템은 다음과 같이 표현되어진다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{L(t)}{H_p(\psi)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{H_{a1}(q)}{H_p(\psi)} & -\frac{H_{a2}(q)}{H_p(\psi)} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u \quad (29)$$

$$\frac{L(t)}{dt} = G(x) \quad (30)$$

따라서, 비구동링크의 목표속도  $\dot{x}_{pd}$  에 관한 제어 입력  $u(t)$ 은 다음의 식(31)과 같이 주어진다.

$$u(t) = J_a^+ \left\{ \dot{x}_{pd} - \frac{L(t)}{H_p} \right\} + (J_a^+ J_a - I) \varepsilon \quad (31)$$

단,

$$J_a = \begin{bmatrix} -\frac{H_{a1}}{H_p} & -\frac{H_{a2}}{H_p} \end{bmatrix} \quad (32)$$

이고  $J_a^+ J_a$ 는  $J_a$ 의 영화공간(zero space)에 있고,  $\varepsilon$ 는  $\dot{x}_a$ 의 목표속도  $\dot{x}_{ad}$ 라고 할때,  $\|\dot{x}_{ad} - u\|^2$ 가 최소화 되도록 하는 것을 결정한다.

이러한 여러가지 조건들을 고려한 모의실험 결과가 Fig. 6에서 보여진다. 이러한 모의실험에서, 초기자세(initial posture)  $x_0$ 와 목표자세  $x_f$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$x_0 = [1.42 \quad 1.09 \quad 1.70]^T$$

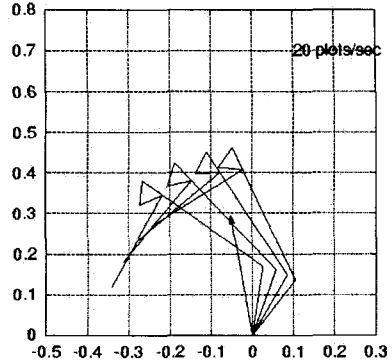
$$x_f = [1.75 \quad 0.10 \quad 1.57]^T$$

또한 초기각운동량  $L_0 = 1.57$ 이라고 주어진다. 그리고 목표속도  $\dot{x}_d = K_p(x(t) - x_f)$ 에 의하여 결정되어지고,  $K_p = \text{diag}(20, 30, 20)$ 으로 주어진다.

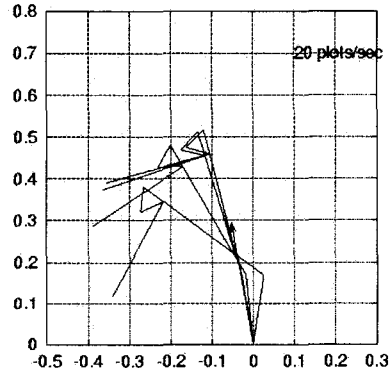
### 3.2.2 In an air

공중에서의 제어를 위해서, 우리는 바닥에 착지하기 위한 임의의 위치를 제어할 준비를 해야한다. 더구나, 중력중심은 공중에서의 포물선 움직임에 의하여 고려되어질 수 있으므로, 점프하기 위한 순간동작이 보존되어지고 점핑은 공중에서 실행되어진다. 이 논문에서, 우리는 편류항(drift term)들을 가지는 시스템을 제어하기 위하여 이전의 연

구<sup>7</sup>에서 소개되어진 방법을 고려할 것이다.



(a) Without any control



(b) With control

Fig. 6 Movement of the robot standing with a hind leg

제안되어지는 제어알고리즘의 순서는 다음과 같이 간단하게 요약되어진다.

1. 좌표변환(coordinate transformation)
2. 시불변 비선형시스템으로의 변환
3. 목표상태의 경계에 의한 근사

더구나, 우리는 강인성(robustness)의 향상을 위하여 학습제어(learning control)을 적용할 것이다<sup>1</sup>. Fig. 7에서 보여지는 것처럼, 우리는 두 개의 고정된 길이  $l_F$ 와  $l_H$ 을 가지는 3-link 모델을 고려한다. 다리의 각도  $\psi_{F2}$ 와  $\psi_{H2}$ 에 대한 몸체의 각도  $\theta_b$ 를 이용함으로써, 우리는 새로운 상태  $x$ 을 다음과 같이 고려되어진다

$$x = [\psi \quad \theta_b^T]^T = [\psi_{F2} \quad \psi_{H2} \quad \theta_b]^T \quad (33)$$

간략성을 위하여, 우리는 중력중심이 각 링크의 중심에 있음을 가정한다. 공중에서 중력중심의 위치는 다음과 같이 기술되어진다.

$$L(t) = H_{aF}(\psi)\dot{\psi}_{F2} + H_{aB}(\psi)\dot{\theta}_b \quad (34)$$

더구나, 입력  $u = [u_F \ u_H]^T$  가 되는 링크의 속도를 고려하면 시스템은 다음과 같이 주어진다.

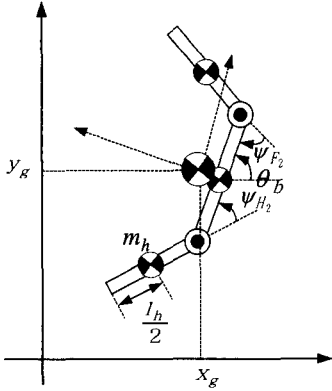


Fig. 7 Coordinate configuration in an air

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{L}{H_{ab}(\psi)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{H_{aF}(\psi)}{H_{ab}(\psi)} & -\frac{H_{aH}(\psi)}{H_{ab}(\psi)} \end{bmatrix} u \quad (35)$$

$$:= f(x) + g(x)u$$

단,

$$H_{aF}(\psi) = h_F + h_1 C_{a1} + h_3 C_{a3} \quad (36)$$

$$H_{aH}(\psi) = h_H - h_2 C_{a2} - h_3 C_{a3} \quad (37)$$

$$H_{ab}(\psi) = h_B + 2h_1 C_{a1} + 2h_2 C_{a2} + 2h_3 C_{a3} \quad (38)$$

여기서  $h_F, \dots, h_3$  은 시스템에 의하여 결정되어지는 상수이고 다음과 같이 주어진다.

$$h_F = J_f + \frac{I_f^2 m_f (m_b + m_h)}{4M}$$

$$h_H = J_h - \frac{I_h^2 m_h (m_b + m_f)}{4M}$$

$$h_B = J_f + J_b + J_h + \frac{I_b^2 (m_b m_f + m_h m_h + m_f m_h)}{4M} + \frac{I_f^2 m_f (m_b + m_h) + I_h^2 m_h (m_b + m_f)}{4M}$$

$$h_1 = \frac{I_b I_f m_f (m_b + 2m_h)}{4M}, h_2 = \frac{I_b I_h m_h (m_b + 2m_f)}{4M}$$

$$h = \frac{I_f I_h m_f m_h}{4M}, M = m_f + m_b + m_h$$

$$C_{a1} = \cos \psi_{F2}, C_{a2} = \cos \psi_{H2}$$

$$C_{a3} = \cos(\psi_{F2} + \psi_{H2})$$

착지시에 실현하고 싶은 상태를  $x_f$  라고 할 때, 오차는  $\bar{x} = x - x_f = (\bar{q}, \bar{\phi})$  이 되고, 이때 상태방정식의 오차시스템을 식(35)을 이용하여 나타낼 수 있고 따라서 다음과 같은 시변의 좌표변환과 입력 변환을 고려할 수 있다.

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_\psi \\ \xi_{\theta_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\psi} \\ \bar{\theta}_b - \frac{L}{H_b(0)} \times (t - t_f) \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mu = [\mu_1 \ \mu_2]^T = u \quad (40)$$

여기서,  $t_f$  는 초기상태벡터이고, 초기상태  $x_i$  와 목표상태  $x_f$  로부터 계산되어지는 착지시간이다. 따라서, 오차시스템은 다음의 시불변선형시스템으로 변환되어진다.

$$\frac{d\xi}{dt} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{L}{H_{ab}(\psi)} - \frac{L}{H_{ab}(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{\bar{H}_{aF}(\xi_\psi)}{\bar{H}_{ab}(\xi_\psi)} & -\frac{\bar{H}_{aH}(\xi_\psi)}{\bar{H}_{ab}(\xi_\psi)} \end{bmatrix} \mu \quad (41)$$

$$:= f(\xi) + g(\xi)\mu$$

주어진 시스템에 대한 제어를 실행하기 위하여, 목표상태 주위에서 선형화(linearization)하고 LQ 최적제어에 의한 상태피드백을 실행하면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d\xi}{dt} = f(0) + \left. \frac{\partial f}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} + g(0)\mu$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \left. \frac{\partial}{\partial \xi_F} \left( \frac{L}{H_{ab}(\xi_\psi)} \right) \right|_{\xi=0} & \left. \frac{\partial}{\partial \xi_H} \left( \frac{L}{H_{ab}(\xi_\psi)} \right) \right|_{\xi=0} & 0 \end{bmatrix} \xi$$



$$+ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{\bar{H}_{aF}(0)}{\bar{H}_{aB}(0)} & -\frac{\bar{H}_{aH}(0)}{\bar{H}_{aB}(0)} \end{bmatrix} \mu \quad (42)$$

하중행렬은 다음과 같이 정의되어짐으로서, 지정되어진 영역내에 극배치가 수행되어진다.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, d = 3 \quad (43)$$

그리고 이러한 결과에 의하여, 다음과 같은 모의 실험 결과를 얻을 수 있다.

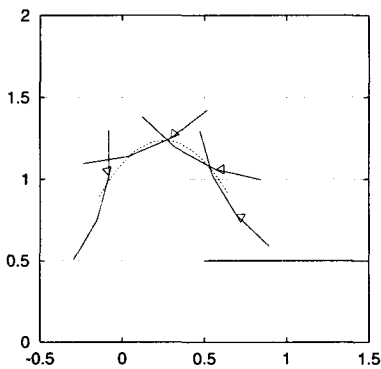
공중에서 점핑로봇에 대한 모의실험에서 목표 상태와 초기상태는 다음과 같이 정의되어진다.

$$x = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.1 & -\frac{\pi}{2} \end{bmatrix}^T, x_0 = \begin{bmatrix} -\frac{\pi}{12} & \frac{\pi}{12} & -\frac{5\pi}{12} \end{bmatrix}^T$$

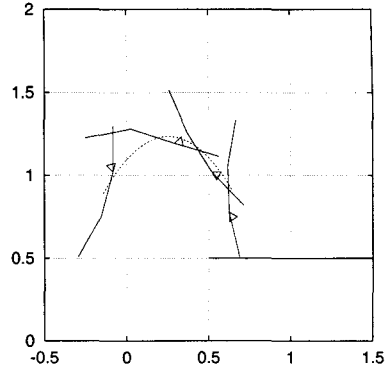
또한 중심의 초기각속도는 60[deg]의 방향에 3[m/sec] 이고,  $L_0 = -0.4$  로 지정되어진다. 이때의 모의실험에 이용되는 파라미터들은 Table. 1 과 같고, 실험결과는 Fig. 8 과 같이 나타내어진다.

Table 1 Variable parameters

	$h_F$	$h_B$	$h_H$	$h_1$	$h_2$	$h_3$
[m <sup>2</sup> g]	0.011	0.037	-0.004	0.011	0.011	0.004



(a) Without any control



(b) With control

Fig. 8 Movement of robot in an air

### 3.3 Iterative learning control

실제 시스템에 대해서, 입력은 토크입력(torque input)으로 주어지는 경우가 많으므로 충분한 입력이 발생하지 않는 경우를 포함한 파라미터 오차에 의하여  $\xi$ 의 안정성이 보증되지 않는다.

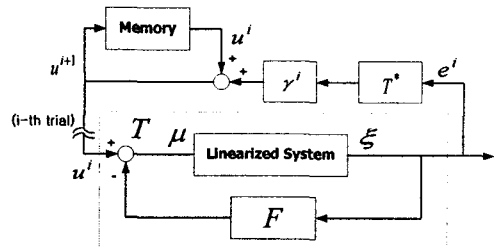


Fig. 9 Iterative learning control

그러므로, 우리는 선형화되어진 시스템 식(42)에 대하여 반복 학습제어(iterative learning control)을 실행할 것이다<sup>6</sup>. 이때, 주어진 시스템은 Fig. 9 에서 보여지는 것처럼, 학습항(learning term)이 오차신호에 의하여 생성되어지는  $u^i(t)$ 의 선형화에 대한 피드백 제어에 의하여 실현되어진다. 즉,

$$\xi(t) = (A + FB)\xi(t) + u^i(t) \quad (44)$$

$$u^{i+1}(t) = u^i(t) + rz^i \quad (45)$$

이때,  $e^i(t)$ 는 다음과 같이 정의되어진다.

$$e^i(t) = \xi_d(t) - \xi^i(t) \quad (46)$$

단,  $\xi_d(t)$  는 목표상태이고 여기서는  $\xi_d(t) = 0$  이라고 지정되어진다.

최종시간의 오차를 없애기 위하여 하중필터  $T_f$  에 의하여 오차를 곱하면, 하중함수(criterion function)  $J^i$  는 다음과 같이 정의되어진다.

$$e_w^i(t) = W_{e\beta} e^{-(t_f-t)W_{e\alpha}} e^i(t) = T_f e^i \quad (47)$$

$$J^i = \int_0^{t_f} e_w^{iT}(t) e_w^i(t) dt = \|e_w^i(t)\|^2$$

단,

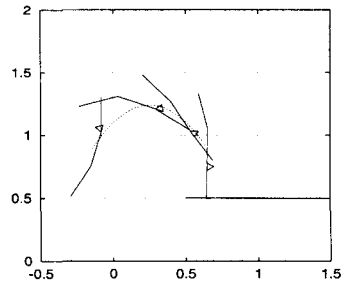
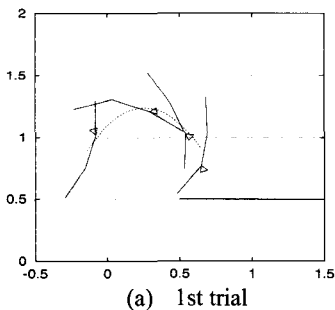
$$W_{e\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_F & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_H & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{\theta_b} \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$W_{e\beta} = \begin{bmatrix} \beta_F & 0 & 0 \\ 0 & \beta_H & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{\theta_b} \end{bmatrix} \quad (49)$$

따라서, 식(35)로 주어지는 공중에서의 시스템에 대하여 다음의 식(50)과 같이 외란을 가한 모의실험을 실행한다.

$$\dot{\xi}(t) = f(\xi) + g(\xi)u + w(t), \quad |w(t)| < 5 \quad (50)$$

단,  $\alpha = 5$  이고  $\beta = 1$  이다.



(b) 10th trial

Fig. 10 Movement of jumping control in an air

Fig. 10 은 1 회재의 회전과 10 회재의 회전 부분을 각각 나타내고 있고, 평가함수치는 외란을 가하지 않는 상태로 0.1 정도에 있음을 알 수 있다. 더불어서 Fig. 11 에서는, 착륙에 성공적이며, 또한 평가함수가 약 30%정도의 감소 되어짐을 알 수 있다.

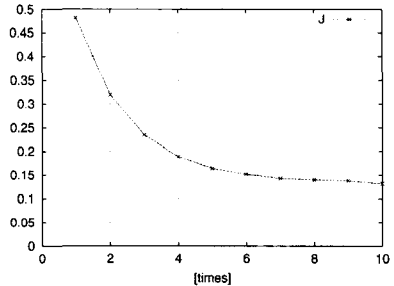


Fig. 11 Criterion function

#### 4. 모의실험

본 단원에서는, 모의실험을 통하여 점핑로봇에 대하여 제안되어진 제어알고리즘의 성능을 설명한다. 모의실험에서는, Fig. 12 에서와 같이 나타내어지는 앞발과 뒷발은 같은 파라미터들을 가짐을 가정한다. 또한, 링크의 제한각도는 실제 시스템을 고려하여 설계되었다.

더불어서, 최적화를 위한 모의실험 시스템 파라미터들은 Table 2 와 같이 나타내어진다. 더구나, 우리는 바닥과 벽이 각각  $x = -0.4[m]$  와  $y = 0.5[m]$  라고 가정하면, Fig. 13 와 Fig. 14 의 실험결과를 얻을 수 있다.

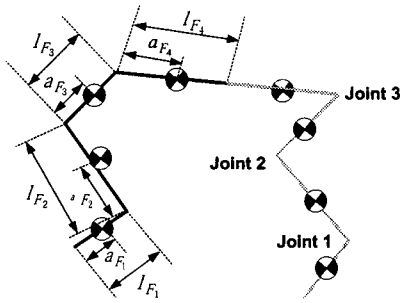


Fig. 12 Parameters of the considered robotic system

Table 2 Parameters of the considered robotic system

Link 1	Link 2	Link 3	Link 4
$m_1 = 0.15$	$m_2 = 0.15$	$m_3 = 0.195$	$m_4 = 0.32$
$l_1 = 0.09$	$l_2 = 0.12$	$l_3 = 0.09$	$l_4 = 0.15$
$a_1 = 0.045$	$a_2 = 0.06$	$a_3 = 0.045$	$a_4 = 0.075$
$J_1 = \frac{m_1 l_1^2}{12}$	$J_2 = \frac{m_2 l_2^2}{12}$	$J_3 = \frac{m_3 l_3^2}{12}$	$J_4 = \frac{m_4 l_4^2}{12}$
$V_1 = 0.02$	$V_2 = 0.34$	$V_3 = 0.34$	$V_4 = 0.34$

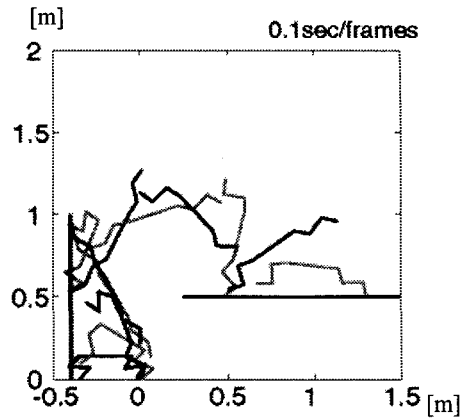


Fig. 14 Movement of a jumping robot system

### 5. 결론

이 논문에서, 우리는 고양이를 모방한 로봇시스템의 점핑제어 알고리즘을 제안하기 위하여 기존의 3-link 점핑로봇을 모델 변환법을 이용하여 더욱 간단하게 점핑로봇 시스템을 모델링하였다. 또한, 본 연구에서는 구속적 메카니컬 시스템의 한 점으로부터 두 가지의 운동인, 1) 바닥에서 한 발로 점프할 경우, 2) 공중에서의 경우를 고려함으로써 위치에 따라서 그것의 형태를 변형하는 동작을 실현할 수 있는 로봇시스템을 구현할 수 있었다. 따라서, 본 연구의 목적은 고양이의 점프운동을 모방한 점핑 로봇 시스템의 모델링 구성과 제어칙(control law)을 해석하고 구성하는 것이다.

더구나, 모델변환법에 의하여 고려되어진 3-link의 다리로 구성되는 부분시스템들의 운동계획 방법(motion planning method)은 slider-link에 구속되어지고 특이자세는 쉽게 피할 수 있음을 보여준다. 더구나, 반복학습 알고리즘의 이용은 제어의 강인성을 항상 시키기 위하여 적용되어졌다. 마지막으로, 제안되어진 제어방법의 유효성은 모의실험 결과를 통하여 보여진다.

추후의 연구과제로서는, 본 연구에서 제안되어진 알고리즘의 유효성을 검증하기 위한 실제 시스템 설계를 통한 실험으로서 정확한 위치제어에 관한 연구결과를 수행하고자 한다.

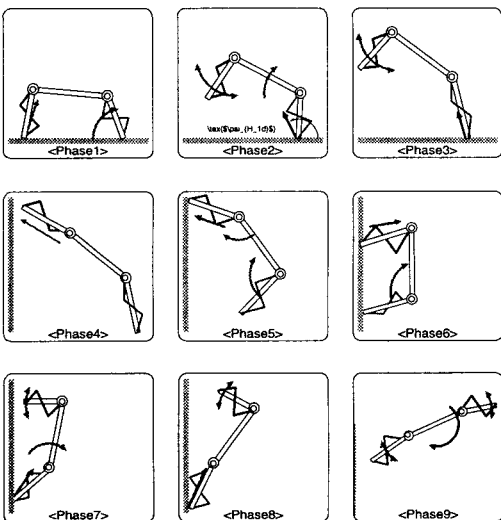


Fig. 13 Jumping control for cat-like robotic system

## 후 기

본 연구는 한국과학기술부(MOST)의 국가지정 연구실사업(NRL)의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. Yamakita, M. and Furuta, K., "Iterative Generation of Virtual Reference for a Manipulator," *Journal of Robotica*, Vol. 9, pp. 71-80, 1991.
2. Yamakita, M. and Furuta, K., "A Design of Learning Control System for Multivariable Systems," *Asia-Pacific Engineering Journal*, Part A, Vol. 2, No. 1, pp. 97-118, 1992.
3. Tadokoro, S. and Takamori, T., "An Evaluation Method for Dexterity of Robot Manipulators considering Deviation of Direction of Motions," *Trans. on SICE*, Japan, Vol. 29, No. 6, pp.668-676, 1993.
4. Honda, K., "A Control of Nonholonomic Bounce Gait Systems," A Master's thesis, Dept. of Control and System Eng., Tokyo Institute of Technology, Japan, 1999.
5. Yamaita, M. and Omagari, Y., "Jumping Cat Robot with Kicking a Wall," In *Proceedings of Adaptive Motion of Animals and Machines*, 2000.
6. Suh, J. H., Omagari, Y., Yamakita, M. and Kim, S. B. "Jumping Control Design for a Cat Robotic System," In *Proceedings of the International Conference on Science-Technology*, pp. 89-97, 2002.
7. Suh, J. H., Yamakita M. and Kim, S. B., "Jumping Control of Cat Robotic System by Model Transformation Method," 2002 the Annual Conference of KIEE, pp. 2427-2429, 2002.
8. Kam, B. O., Jeon, Y. B., Suh, J. H., Oh, M. S. and Kim, S. B., "Motion Control of Two-Wheeled Welding Mobile Robot with Seam Tracking Sensor," *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 30-38, March, 2003.
9. Moon, B. Y., Son, K., Park, J. H. and Suh, J. T., "A Method to Describe and Analyze Human Knee Joint Motion," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 10, pp. 233-239, 2003.