

모델변환에 의한 고양이 로봇 시스템의 점프제어

서진호*, MASAKI YAMAKITA**, 김상봉*

*부경대학교 기계공학부, **동경공업대학 기계·제어시스템공학과

Jumping Control of a Cat Robot System by Model Transformation

JIN-HO SUH*, MASAKI YAMAKITA**, AND SANG-BONG KIM*

*PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY, KOREA, **TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY, JAPAN

Abstract - 본 논문에서는, 지붕위로 뛰어오르기 위하여 벽의 반동을 이용하는 고양이의 운동상태를 흉내내어 수직의 방향으로 운동하는 고양이 로봇 시스템을 연구한다. 또한 이러한 로봇 시스템의 3-link 부분시스템의 운동은 slider-link에서 구속되어지고, 또한 singular자세를 쉽게 피할 수 있는 운동계획방법(motion planning method)을 제안한다. 제안되어진 연구결과는 수직 동작에 대한 메카니즘에 유용한 방법이고 이론적 개념, 모델링, 그리고 제어를 논의한다. 마지막으로, 모의실험을 통한 결과로서 제안되어진 방법의 유용성을 설명한다.

있다 :

(1) 관절(joint)들에서 6개의 회전 액추에이터

(2) 발끝이 바닥 또는 벽에 접촉할 때, 발끝과 접촉점 사이에서는 미끄러짐(slip)이 없다고 가정

따라서, 전체 시스템은 Fig. 2의 점 X에서 두 개의 4-link serial link로 분리되어지고 하나의 직선으로서 물체를 유지하는 holonomic body constraint, $C_b(q)=0$ 가 소개되어진다.

1. Introduction

Fig. 1에서 보여지는 것처럼, 고양이가 지붕과 같은 높은 지점으로 이동하기 위해서는 먼저 벽면을 이용하여 점프함을 알 수 있다. 결과적으로, 이러한 동작은 수직 방향으로 움직임을 의미하고 이러한 운동은 매우 효율적이고 능률적일 것이다. 구속적 메카니칼 시스템의 점으로부터 운동을 고려함으로써(바닥에서, 한발로 점프할 때, 공중에서의 경우), 위치를 따라서 그것의 형태를 변형하는 동작을 실현하는 로봇 시스템을 구현할 수 있다.

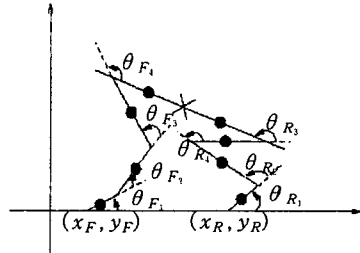


Fig. 2 Robotic system of a cat

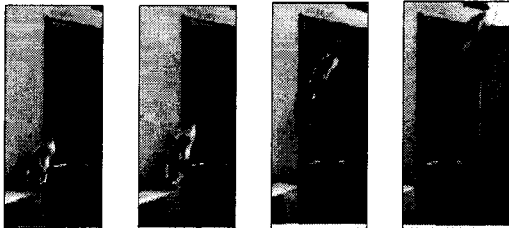


Fig. 1 Motion of the jumping cat

이 연구의 목적은 고양이의 운동을 흉내내는 로봇 시스템을 위한 제어칙(control law)을 해석하고 구성하는 것이다. 고려되어지는 로봇 시스템의 운동은 xy-평면에 구속되어짐을 가정한다. 더구나, 3-link leg 부분시스템들의 운동운동계획방법(motion planning method)는 slider-link에 구속되어지고 그리고 특이자세(singular posture)는 쉽게 피할 수 있음을 보여준다.

2. System Modeling

2.1 System modeling

실제로 고양이가 높은 곳으로 점프하기 위해서는, 점프한 뒤에 몸체가 구부러지지만, 이 논문에서는 로봇 시스템의 앞발내에서 점프운동(jumping-motion)을 제한한다. 바닥에서부터 벽면에 점프하고, 다시 벽면에서 높은 곳으로 점프하는 운동을 실현하기 위하여, 우리는 Fig. 2와 같이 구성되는 7-link 로봇 시스템을 고려한다. 이러한 시스템들의 주요특징은 다음과 같이 요약되어질 수

일반화되어진 좌표 시스템으로서, 우리는 다음의 식

$$q_F = [x_F \ y_F \ \theta_{F_1} \ \theta_{F_2} \ \theta_{F_3}]^T \quad (1)$$

$$q_R = [x_R \ y_R \ \theta_{R_1} \ \theta_{R_2} \ \theta_{R_3} \ \theta_{R_4}]^T \quad (2)$$

$$q = [q_F^T \ q_R^T]^T \quad (3)$$

을 이용한다. 이러한 좌표 시스템이 과다하고 시스템의 표현이 복잡하게 되어지더라도 다음과 같은 장점이 있음에 유의하자.

(1) 4-link 동적 방정식이 7-link 동적 시스템보다 더 간단하고, 각각의 link에 대하여 같은 방정식을 이용할 수 있다.

(2) 이러한 좌표 시스템은 발끝에서 구속을 연결하는 시간을 판단하는데 매우 유용하다.

몸체구속(body constraint)의 Jacobian은 다음과 같이 정의되어진다.

$$\frac{d}{dt} C_b(q) = J_b(q) \dot{q} = 0 \quad (4)$$

우리는 발끝이 바닥 또는 벽면에 접촉할 때 충분한 구속력이 발휘되어진다고 가정한다. 그리고 holonomic constraint, $C_v(q, mode) = 0$ 는 시스템의 상태에 따라 소개되어진다. 간단히, 뒷발의 발끝이 바닥 또는 벽면에 구속되어질 때, $C_v(q, mode)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$C_v(q, mode) = \begin{bmatrix} x_R - X_R const \\ y_R - Y_R const \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 우리는 식 (4)에 의하여 Jacobian을 계산할 수 있다.

2.2 Dynamic equation

구속을 무시하면, 두 개의 4-link 동적 시스템들은 다음과 같이 기술되어진다

$$M(q)\dot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (6)$$

단,

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

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

3. Jumping Control Design

고양이 로봇 시스템의 컨트롤러 설계에서, 초기형태는 점핑운동을 위하여 매우 중요한 것으로서 Stochastic dynamic manipulability measure에 의하여 결정되어진다. 그러므로, 로봇의 동적 제어를 위하여, 우리는 주로 질량중심의 운동에서 주의하고 그리고 제안되어진 방법은 중력중심이 마치 가상의 벽면에 연결되어진 스프링에 의하여 움직이게 되는 것처럼 유도되어진다.

3.1 Model transformation.

경로설계(path design)에서, 중력중심의 속도에서 무슨 목표값을 어떻게 결정해야 할 것이지는 매우 복잡한 문제이다. 또한 같은 상황에서 뒷발의 목표값에 대해서도 고려해야 할 것이다. 그러므로 우리는 다음의 Fig. 3에서 보여지는 것처럼 가상의 선형 액추에이터(linear actuator)를 사용하여 3-link leg을 움직임으로서 구속됨을 적용시킨 제어를 고려한다.

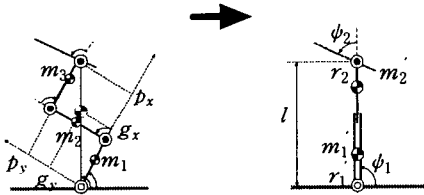


Fig. 3 Model transformation

이제, 우리는 새로운 다음과 같은 새로운 좌표를 고려한다 :

$$s = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ 1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 + \tan^{-1}(\frac{p_y}{p_x}) \\ \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \\ -\theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \pi + \tan^{-1}(\frac{p_y}{p_x}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

단, $\theta_2 > 0$ 이다.

더구나 일대일 대응에 대하여, 우리는 link들의 중력중심의 위치가 가상의 선형 액추에이터 위에 있는 구속을 고려한다. 다음의 식에서 주어지는 새로운 파라미터, ε 를 이용함으로써,

$$\varepsilon(q) = g_x p_y - g_y p_x \quad (8)$$

구속조건은 $\varepsilon = 0$ 이다. 즉, $x = [\phi \ l \ \varepsilon]^T$ 와 s 와 ε 를 이용함에 의한 새로운 좌표이다. 각의 좌표와 속도에 대한 관계에 의하여, 상태는 다음과 같이 주어진다 :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} J_s(q) \\ J_\varepsilon(q) \end{bmatrix} \dot{q} = J_x(q) \dot{q} \quad (9)$$

단, 특이점을 제외하고는 J_x^{-1} 가 존재한다. 식 (9)을 이 요함으로서, \dot{q} 는 다음과 같이 쓰여진다 :

$$\dot{q} = J_x^{-1}(\dot{x} - J_\varepsilon^{-1}\dot{\varepsilon}) \quad (10)$$

3.2 Jumping control

제안되어진 점핑제어는 뒷다리로 서 있는 경우와 공중에 있을 경우, 두가지를 고려한다.

3.2.1 Standing with a hind leg

목표 방향으로 경로를 준비하기 위하여, 각이 방향내에서 변화함이 필요하다. 그러므로, 우리는 시스템의 특징으로부터 underactuator link를 제어하도록 고려한다. 제어목적은 다음과 같이 간단히 요약되어진다 :

- (1) 뒷다리의 절대각에 점프하도록 하는 각
- (2) 가능하다면, 그것이 목표 자세의 각이다

우리는 다리의 길이가 각각 l_F 와 l_H 로 고정되어진 3-link 모델을 고려한다.

3.2.2 In the air

공중에서의 제어에서, 우리는 바닥에 착지하기 위하여 제어할 임의의 자세를 준비해야 할 것이다. 더구나, 중력중심은 공중에서 포논선 운동에 의하여 고려되어질 것이므로, 그것이 바깥으로 점프할 때의 움직임이 보존되어질 때, 고양이 로봇 시스템의 점프는 공중에서 실현되어질 것이다. 이 논문에서, 우리는 이동항(drift term)들을 가지는 시스템을 제어하기 위하여 [4]에서 소개되어진 방법을 고려할 것이다. 제안되어진 제어 방법의 순서는 간단히 다음과 같이 요약되어진다 :

- (1) 좌표변환
- (2) 시불변 비선형 시스템에서 변환

(3) 목표상태의 근방(neighborhood)에 의한 근사치 더구나, 우리는 로버스터(robustness)의 향상을 위하여 학습제어(learning control)를 적용할 것이다^[1].

실제 시스템의 많은 경우들에서, 입력은 토오크 입력내에서 주어지므로, 충분한 입력이 주어지지 않거나 또는 파라미터 오차가 존재할 때 ε 의 수렴이 보증되어지 않는다. 그러므로, 우리는 다음과 같이,

$$\frac{d\xi}{dt} = f(0) + \frac{\partial f}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} \xi + g(0) \mu \quad (11)$$

선형화된 시스템에 대하여 반복학습제어(repetitive learning control)를 실현할 것이다. 그때, 시스템은 Fig. 4에서 보여지는 것처럼, 이러한 시스템내의 오차신호에 의하여 생성되어지는 학습항(learning term)들이 증가되어지는 선형화, $u^i(t)$ 에 관한 minor loop feedback controller에 의하여 실현되어질 것이다.

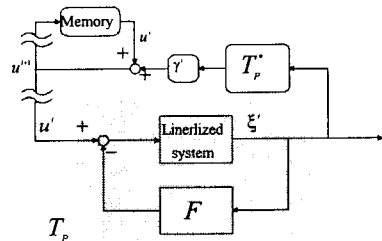


Fig. 4 Learning system

$$\dot{\xi}(t) = (A + FB)\xi(t) + u^i(t) \quad (12)$$

$$u^{i+1}(t) = u^i(t) + \gamma z^i \quad (13)$$

단, $\xi_\Delta(t)$ 는 목표상태이고 오차, $e^i(t)$ 는 다음과 같이 정의되어진다 :

$$e^i(t) = \xi_\Delta(t) - \xi^i(t) \quad (14)$$

L. Numerical Simulations

이 단원은 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 고양이 로봇 시스템에 대하여 제안되어진 제어 알고리즘의 성능을 설명한다. 이러한 시뮬레이션에서, 앞다리와 뒷다리는 같은 파라미터를 가지고 있음을 가정하고, 또한 벽과 지붕의 위치를 각각 $x = -0.4[m]$ 와 $y = 0.5[m]$ 위치한다고 가정한다. 더구나, link들의 제한된 각도들은 Fig. 5에서 보여주는 것처럼 고양이 로봇의 실험적 시스템을 고려함으로써 설계되어진다. 또한 최적화를 위해 사용되어진 시스템 파라미터들과 시뮬레이션 파라미터들은 다음의 Table. 1과 같이 결정된다.

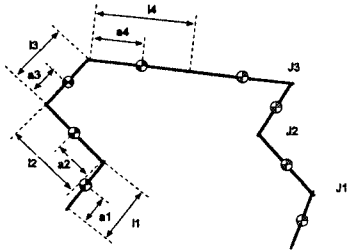


Fig. 5 Parameters of a cat robot

Table. 1 Parameters of a cat robot

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

이러한 시뮬레이션 결과들은 Fig. 6과 Fig. 7에서 보여진다. 더구나, 실험을 위해 구성되어진 로봇 시스템을 Fig. 8에서 간단히 나타낸다.

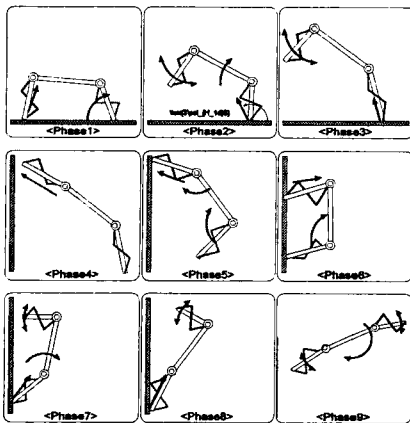


Fig. 6 Jumping control of a cat robot

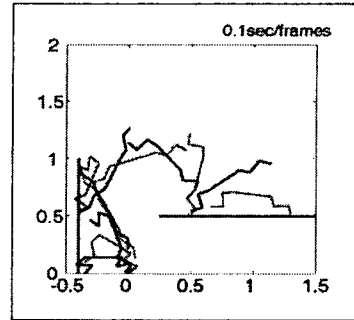


Fig. 7 Movement of a cat robot

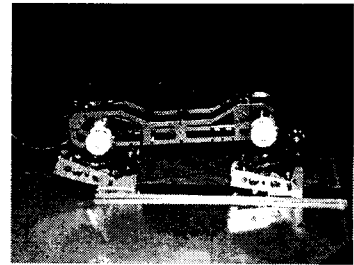


Fig. 8 Cat robot system

S. Conclusions

이 논문에서, 우리는 spring-mass model matching 을 이용하여 고양이 로봇 시스템의 점핑제어 방법을 제안하였고 그리고 3-link leg subsystem의 움직임에서 운동계획방법이 slider-link에서 구속되어진다. 더구나, 특이자세(singular posture)가 쉽게 피해될 수 있었고 반복학습 알고리즘은 또한 제어의 로버스터를 개량하기 위하여 적용되어졌다. 우리는 수치적 시뮬레이션 결과들에 의하여, 고양이 로봇이 벽면으로 점핑한 후 다시 바닥쪽으로 점프되어지는 결과를 보여줌으로써 제어책의 유효성을 실행하였다.

[참고 문헌]

- [1] M. Yamakita, K. Furuta, "Iterative of Virtual Reference for a Manipulator", Robotica, Vol.9, pp.71-80, 1991
- [2] L. S. Crawford, S. S. Sastry, "Biological Motor Control Approaches for a Planar Driver", in Proceedings of 34th CDC, pp.3881-3886, 1991
- [3] D. T. Greenwood, Classical Dynamics, Prentice Hall, 1977
- [4] K. Honda, "A Control of Nonholonomic Bounce Gait Systems", A Master's thesis, Dept. of Control & Systems Eng., Tokyo Institute of Technology, Japan, 1999
- [5] M. Yamakita, Y. Omagari, Y. Taniguchi, "Jumping Cat Robot with Kicking a Wall", in Proceedings of Adaptive Motion of Animals and Machines, 2000
- [6] M. Yamakita, Y. Omagari, J. H. Suh, "Jumping Control of a Cat Robot", in Proceedings of TITech COE/Super Mechano Systems Symposium, Nov, 2001
- [7] Jin-Ho Suh, M. Yamakita, Sang-Bong Kim, "Jumping Control Design for a Cat Robotic System", in Proceedings of 8th Conf. on Science & Technology, April, 2002