

완충기를 가진 로봇다리의 동역학 해석 및 동적 보행제어

오창근 · 강성철 · 이수용 · 김문상 · 유홍희

(1997년 6월 27일 접수)

Dynamic Analysis and Control of a Robot Leg with a Shock Absorber

Changgeun Oh, Sungchul Kang, Sooyong Lee,
Munsang Kim and Honghee Yoo

Key Words : Walking Robot(보행로봇), Robot-Leg(로봇다리), Shock Absorber(완충기), Kinematics(기구학), Dynamics(동역학), PID Control(비례-적분-미분제어), Computed-Torque Control(계산토크제어), Torque Feedforward Control(토크 앞 먹입제어)

Abstract

Human beings usually absorb a shock from terrain during walking through the damping effects of joints, muscles and skin. With this analogy, a robot-leg with a shock absorber is built to absorb the impact forces at its foot during high-speed walking on irregular terrain. To control the hip position while walking, the dynamic controller suitable for high speed walking is designed and implemented based on a dynamic model by Kane's equation. The hip position tracking performances of various controllers (PID controller, computed torque controller and feedforward torque controller) are compared through the experiments of the real robot-leg.

1. 서 론

보행로봇의 고속보행 또는 불규칙 노면보행시, 지면에서 로봇 발에 작용하는 충격이 각 관절에 전달되어 보행 제어성능 및 보행기구의 내구성을 저하시킨다. 본 연구에서는 이러한 충격을 흡수하기 위해서 각 다리의 무릎관절 밑에 완충기(shock-absorber)를 장착하는 방안을 고안하였다. 스프링과 오일 댐퍼로 이루어진 완충기는 착지시 다리의 충격을 완화시키므로, 고속보행시 로봇의 내구성을 증가시키고 착지 안정성을 보장한다. 완충기를 갖

지 않은 보행로봇은 고속보행중, 특히 착지 시지면 으로부터 충격력을 크게 받아 바운싱(bouncing) 문제가 발생하게 되어 착지시 안정성을 보장하기 어렵다. 또한 보행중 각 다리가 정해진 걸음세에 따라 움직일 때, 이러한 바운싱 문제로 인하여 몸체 혹은 다리의 위치오차가 발생하여 보행의 불안정성을 초래한다. 이와 같은 고속보행시 문제를 기계적으로 해결하기 위하여, 본 연구에서는 다리에 완충기를 장착하는 방안을 고안하였다. 그러나 완충기를 장착한 다리는 착지시 완충기에서 변형이 발생하게 되어 각 다리와 몸체를 연결하는 힙-조인트(hip-joint)에서 위치오차가 발생할 수 있다. 이러한 힙조인트의 위치오차는 지지구간(standing phase)에서 힙-조인트가 지지하는 로봇 몸체의 자세에 영향을 주어 몸체의 정확한 자세제어가 어렵

*삼성물산(주)

**회원, 한국과학기술연구원 휴먼로봇연구센터

***회원, 한양대학교 기계설계학과

게 된다. 특히 완충효과를 크게 하기 위해 행정(stroke)이 큰 완충기를 사용하는 경우 완충기의 변위는 몸체의 자세에 더욱 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 착지시의 충격을 완화하기 위해 장착된 완충기에서 발생하는 변위를 고려한 동적 걸음새 제어가 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 완충기가 장착된 다리를 제작하고, 완충기의 변위를 시스템의 자유도로 고려한 동적 제어를 구성하여 그 성능을 실험적으로 검증하고자 한다. 이를 위하여 완충기의 동특성 모델을 포함한 다리의 운동방정식(equations of motion)이 요구되며, Kane 동역학 이론에 의하여 운동방정식을 유도하였다.

보행로봇의 동적 걸음새(dynamic gait)에 관한 연구는 주로 2각, 4각 로봇에 대해서 활발히 진행되고 있다. Fig. 1은 한국과학기술연구원(KIST)에서 개발한⁽¹⁾ 전동식 사각보행기를 나타낸다. 본 연구와 관련 연구로서, 강성철 등⁽²⁾은 Fig. 1의 보행로봇의 각 링크를 강체로 보고 트롯 걸음새에 대한 동적 해석 및 제어기 구성을 위한 7자유도 운동방정식을 Kane 동역학 이론을 이용하여 유도하였다. Nakamura⁽³⁾는 뉴턴-오일러(Newton-Euler) 방법을 이용하여 보행로봇에 대한 일반적인 시뮬레이션 방법을 제안하였고, 보행 중에 발과 지면에서 생기는 구속조건이 변경되는 것을 고려하여 각 발의 적절한 구속조건을 지정하는 방식을 취하였다.

Villard⁽⁴⁾ 연구에서도 뉴턴-오일러방법을 이용하였으며, 보행로봇을 3자유도의 플랫폼부와 2자유도의 다리부분으로 분리하여 운동방정식을 생성한 후, 이의 상호 작용력을 고려하여 전체 시스템의 동역학을 해석하였다. Shih⁽⁵⁾ 연구에서는 스프링과 댐퍼로 구성된 컴플라이언스 조인트 모델을 이용하여 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 이 연구에서 폐연쇄(closed chain)에서 생기는 기구학적 구속조건을 사용하는 대신 조인트와 발바닥에 컴플라이언스를 갖도록 모델링하고 이웃하는 링크간의 상호작용력 관계식을 이용하여 뉴턴-오일러 방법으로 운동방정식을 유도하였다. 서영진과 윤용산⁽⁶⁾의 연구에서는 사각보행기의 동적 걸음새에 대한 설계조건을 제시하고 최적화기법을 이용하여 동적 걸음새를 설계하였고, 충격량과 마찰력을 추가로 고려한 동적 보행 알고리즘을 제시하였다. Sakakibara 등⁽⁷⁾의 연구에서는 사각 보행로봇의 제어를 위한 사전 연구로서 본 논문과 같이 한쪽 다리만을 이용하여 착지시 충격력을 다양한 발운동 궤적에 대하

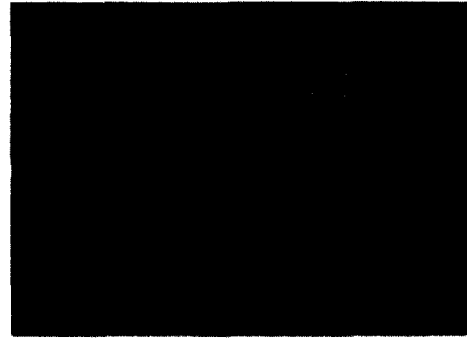


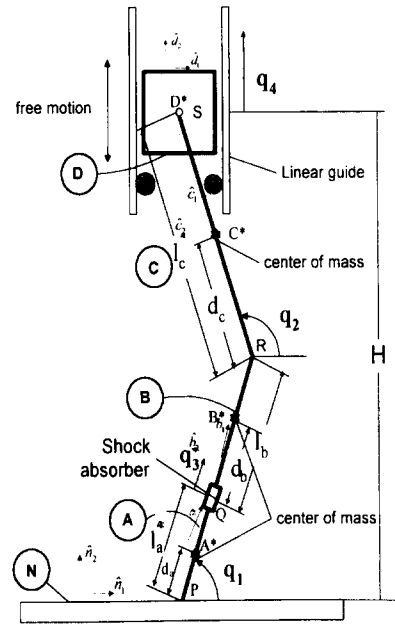
Fig. 1 Quadrupedal walking robot developed in KIST

여 측정하여 타원형 궤적(oval trajectory)이 착지시 충격력을 최소화하는데 적합함을 보였다.

이와 같이 보행로봇에 대한 기존의 연구는 다양한 구조의 보행로봇의 정적(static) 혹은 동적 걸음새를 구현하기 위한 기구학, 동역학 해석문제를 주로 다루는 이론적인 연구에 치우친 면이 있다.⁽²⁻⁶⁾ 실제 보행로봇의 개발에 관한 연구^(1,7)가 활발히 진행되었으나, 계산의 복잡성 및 동적 파라미터 추정의 어려움으로 인하여 동적 모델을 효과적으로 이용하는 동적 보행제어를 구현하여 실험에 성공한 예는 아직 드물다. 또한 보행로봇의 발을 제작하여 완충효과를 부여하는 실험적인 연구⁽⁹⁾가 있으나 대부분 완충기의 동적 특성의 모델링 및 해석 없이 단지 완충효과를 위한 수동적인 용도로 사용하였다. 그러나 보행로봇의 고속보행 혹은 비평탄 노면 보행시 착지시의 충격 완화효과를 높이기 위해서는 다리에 완충기를 장착하고 완충기의 변위를 고려한 동역학 모델을 이용하는 동적 보행제어에 관한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 보행성능의 향상을 위해서 기계적인 완충기(shock absorber)를 장착하는 방안을 고안하였고, 고속보행 및 비평탄 노면보행을 원활하게 하기위해서 완충기를 포함한 다리의 실제 동역학 파라미터를 이용하여 동적 제어를 설계하고 이를 실시간 제어기로 구현하여 실험함으로써 그 타당성을 검증하였다. 선정된 동적 제어기는 시스템의 동역학 파라미터를 이용하는 계산토크제어기(computed torque controller)⁽¹⁰⁾와 토크앞먹임 PD 제어기(torque feedforward PD controller)⁽¹¹⁾로서 두 제어기의 성능을 지지구간에서의 협위치 추종성능으로 실험적으로 비교하였다. 즉, 본 연구는 기존의 이론적인 보행로봇 연구와는 달리, 완충기를 가진 실제 로봇 다리를 제작하고,



(a)



(b)

Fig. 2 Robot-leg (a) and the kinematic model (b).

실제 적용 가능한 동적 제어기를 설계 구현함으로써 궁극적으로 사각보행기의 동적 고속보행을 달성하는데 그 주안점을 두고 있다.

본 논문에서는 완충기의 변형을 고려한 동적 걸음새 제어를 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, 완충기가 장착된 3관절을 갖는 다리틀 제작하고 완충기의 역학적 특성을 분석하여 모델링하였다. 또한 동적 제어기에 사용되는 동적 모델을 구성하기 위하여 Kane 동역학에⁽⁸⁾ 의한 기구학, 동역학 모델링을 통하여 운동방정식을 유도하였다. 둘째, 구성된 동적 모델을 이용하는 다양한 제어방식을 적용하여 보행실험을 수행하였다. 즉, 비례-적분-미분제어기(PID controller), 계산토크제어기 그리고 토크 앞먹임 PD 제어기에 대한 보행실험결과와의 비교를 통하여 로봇의 동적 효과를 고려한 토크앞먹임 PD 제어기의 힘위치 추종 성능이 우수함을 보였다.

2. 운동방정식

사각보행 로봇의 1/4 인 한쪽 다리의 운동방정식을 유도하기 위하여 다음과 같은 가정을 세우고 기구학, 동역학 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용

된 기구학, 동역학 파라미터들은 제작된 다리의 실제 측정을 통하여 결정하였다. 동역학 모델링을 위한 가정은 다음과 같다. 첫째, 지면과 접하는 발끝은 충분한 마찰이 작용하여 미끄러지지 않는다. 둘째, 사각 보행로봇의 몸체와 연결되는 힙-조인트의 운동은 로봇 몸체의 안정성에 주된 영향을 주는 상하 방향으로만 움직이도록 제한하였다. 셋째, 로봇 다리를 구동시키는데 사용된 기어의 마찰력과 백래쉬 등으로 인한 오차는 무시하였다. 넷째, 보행로봇의 직진보행만을 대상으로 하므로 다리는 2차원 평면상에서 운동한다. 이상의 가정들은 한쪽다리 로봇의 힘위치제어에 초점을 맞추어 해석 및 실험을 수행하기 위한 것이다.

2.1 기구학

2.1.1 자유도 및 일반좌표

이 절에서는 보행시 지지구간에서 발생하는 완충기의 처짐을 고려한 힙의 위치제어를 위한 기구학적 모델링을 서술한다. 힙은 지면에 고정된 프레임에 지면과 수직방향으로 직선형 가이드에 의해 지지되어 있고, 발끝은 지면에 고정된 로드셀과 접하고 있다. 전체 시스템은 4개의 강체로 구성되어 있고, 각 강체는 1개의 자유도를 가지고 있다(Fig

2(b)). 전체 로봇의 움직임이 평면에서 발생하므로 2차원 링크장치에 대한 Grubler-Kutzbach 조건식에 의하여 보행기의 자유도 n 은 다음과 같이 계산된다.

$$n=3(b-1)-2c=2 \quad (1)$$

여기서, b 는 기준틀(reference coordinartes)을 포함한 링크의 개수 5이며, c 는 조인트의 개수 5이다. 한 이 시스템은 동역학적으로 홀로노믹(holonomic) 시스템이므로, 자유도와 일반좌표의 수가 같으며, 운동방정식 전개를 위해 정의된 일반좌표 (q_3, q_4)와 유사일반좌표 (q_1, q_2)는 다음과 같다.

q_1 : 지면과 접하는 완충기 아래 강체의 지면과의 각도

q_2 : 무릎관절 위 강체의 지면과의 각도

q_3 : 완충기에 의한 강체 A와 강체 B의 상대변위

q_4 : 강체 D의 수직방향 변위

2.1.2 형태구속조건

로봇의 발끝이 지면과 닿는 지지구간(standing phase)에 있을때 폐연쇄구조(closed-chain linkage)를 이루며, 다음과 같은 형태구속조건을 갖는다.

$$\begin{aligned} (l_a + l_b + q_3) \cos(q_1) + l_c \cos(q_2) &= 0 \\ (l_a + l_b + q_3) \sin(q_1) + l_c \sin(q_2) - H - q_4 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

일반좌표로 정의된 q_3, q_4 와 유사일반좌표 q_1, q_2 는 위와 같은 비선형적 관계를 가진다. 따라서 각 조인트각도를 구하기 위해서는 역기구학 루틴이 필요하다. 본 연구에서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 반복적으로 역기구학 해를 구하였다. 실험시 제어변수인 힙의 위치 q_4 는 보행시 몸체의 운동을 적절히 표현하기 위하여 다음과 같이 조화함수로 주어진다.

$$q_4 = m \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

여기서, m 은 조화운동의 진폭(amplitude)이고, f 는 진동수(frequency)를 나타낸다.

또한 완충기의 변위 q_3 는 로봇의 보행조건에 맞도록 실험을 통하여 로봇의 하중에 따른 시간의 함수로 모델링된다.

2.1.3 속도해석

힙위치의 속도 \dot{q}_3 와 완충기의 처짐속도 \dot{q}_4 를 일반속력 u_1, u_2 로 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{q}_3 = u_1, \quad \dot{q}_4 = u_2 \quad (4)$$

Fig. 2(b)에서 보여지는 각 링크 A, B, C, D의

각속도 $\dot{\omega}^A, \dot{\omega}^B, \dot{\omega}^C, \dot{\omega}^D$ 는

$$\begin{aligned} \dot{\omega}^A &= \dot{q}_1 \hat{a}_3, \quad \dot{\omega}^B = \dot{q}_1 \hat{b}_3, \\ \dot{\omega}^C &= \dot{q}_2 \hat{c}_3, \quad \dot{\omega}^D = \hat{0} \end{aligned} \quad (5)$$

이며, 각 링크의 각속도가 결정되면 링크의 질량 중심 혹은 조인트의 속도는 \vec{v} 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{v}^P &= \hat{0}, \quad \vec{v}^{A*} = d_a \dot{q}_1 \hat{a}_2, \\ \vec{v}^{Aq} &= \dot{q}_3 \hat{a}_1, \quad \vec{v}^Q = \dot{q}_3 \hat{a}_1 + l_a \dot{q}_1 \hat{a}_2 \\ \vec{v}^{B*} &= \dot{q}_3 \hat{a}_1 + l_a \dot{q}_1 \hat{a}_2 + d_b \dot{q}_1 \hat{b}_2, \\ \vec{v}^R &= \dot{q}_3 \hat{a}_1 + l_a \dot{q}_1 \hat{a}_2 + l_b \dot{q}_1 \hat{b}_2 \\ \vec{v}^{C*} &= \dot{q}_3 \hat{a}_1 + l_a \dot{q}_1 \hat{a}_2 + l_b \dot{q}_1 \hat{b}_2 + d_c \dot{q}_2 \hat{c}_2 \\ \vec{v}^S &= \dot{q}_3 \hat{a}_1 + l_a \dot{q}_1 \hat{a}_2 + l_b \dot{q}_1 \hat{b}_2 + l_c \dot{q}_2 \hat{c}_2 \\ \vec{v}^{D*} &= \vec{v}^S \end{aligned} \quad (6)$$

\dot{q}_1, \dot{q}_2 는 일반속력 u_1, u_2 를 이용해서 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\dot{q}_i = \sum_{j=1}^2 \alpha_{ij} u_j, \quad i=1, 2 \quad j=1, 2 \quad (7)$$

여기서, i 는 유사일반좌표의 수이고, j 는 일반좌표의 수를 나타낸다. $[\alpha]_{2 \times 2}$ 는 조인트의 각속도를 일반속력으로 표현하기 위한 계수행렬(coefficient matrix)이고, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= \frac{1}{\tan(q_1 - q_2)(l_a + l_b + q_3)} \\ \alpha_{12} &= \frac{\sin(q_2)}{\sin(q_1 - q_2)(l_a + l_b + q_3)} \\ \alpha_{21} &= \frac{-1}{l_c \sin(q_1 - q_2)} \\ \alpha_{22} &= \frac{\sin(q_1)}{l_c \sin(q_1 - q_2)} \end{aligned} \quad (8)$$

2.1.4 가속도해석

강체의 각가속도는

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}^A &= \dot{q}_1 \hat{a}_3, \quad \ddot{\alpha}^B = \dot{q}_1 \hat{b}_3, \\ \ddot{\alpha}^C &= \dot{q}_2 \hat{c}_3, \quad \ddot{\alpha}^D = \hat{0} \end{aligned} \quad (9)$$

이며, 각 링크질량중심의 가속도 $\ddot{a}^A, \ddot{a}^B, \ddot{a}^C, \ddot{a}^{D*}$ 는 식 (6)을 시간에 대하여 미분하여 구할 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \ddot{a}^{A*} &= -d_a \dot{q}_1^2 \hat{a}_1 + d_a \dot{q}_1 \hat{a}_2 \\ \ddot{a}^{B*} &= (\dot{u}_1 - l_a \dot{q}_1^2) \hat{a}_1 + (\dot{q}_1 u_1 + l_a \dot{q}_1) \hat{a}_2 \\ &\quad - d_b \dot{q}_1^2 \hat{b}_1 + d_b \dot{q}_1 \hat{b}_2 \\ \ddot{a}^{C*} &= (\dot{u}_1 - l_a \dot{q}_1^2) \hat{a}_1 + (\dot{q}_1 u_1 + l_a \dot{q}_1) \hat{a}_2 - l_b \dot{q}_1^2 \hat{b}_1 \\ &\quad + l_b \dot{q}_1 \hat{b}_2 - d_c \dot{q}_2^2 \hat{c}_1 + d_c \dot{q}_2 \hat{c}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{a}^{C*} = & (\dot{u}_1 - l_a \dot{q}_1^2) \vec{a}_1 + (\dot{q}_1 u_1 + l_a \ddot{q}_1) \vec{a}_2 - l_b \dot{q}_1^2 \vec{b}_1 \\ & + l_b \ddot{q}_1 \vec{b}_2 - l_c \dot{q}_2^2 \vec{c}_1 + l_c \ddot{q}_2 \vec{c}_2 \end{aligned} \quad (10)$$

각각속도 (\dot{q}_1, \dot{q}_2)는 식 (7)을 시간에 대하여 미분하여 구할 수 있으며, 다음과 같은 형태로 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{q}_i = & \sum_{j=1}^7 a_{ij} \dot{u}_j + \beta_i \quad i=1, 2, \quad j=1, 2 \quad (11) \\ \beta_1 = & \frac{(l_a + l_b + q_3) \dot{q}_1^2}{l_c \sin(q_1 - q_2)} + \frac{\dot{q}_2^2}{\tan(q_1 - q_2)} \\ \beta_2 = & \frac{-l_c \dot{q}_2^2}{(l_a + l_b + q_3) \sin(q_1 - q_2)} - \frac{\dot{q}_2^2}{\tan(q_1 - q_2)} \\ & - \frac{2 \dot{q}_1 \dot{q}_3}{(l_a + l_b + q_3)} \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 운동방정식

로봇에 작용하는 외력은 지면으로부터의 지지하는 발에 작용하는 반력, 조인트의 모터토크 (τ_1, τ_2) 그리고 중력이다. 또한, 조인트토크는 작용-반작용(action-reaction)토크이고 완충기의 처짐에 의한 힘도 작용-반작용력으로 인접하는 두개 링크에 작용한다. 로봇다리의 동역학적 모델은 Fig. 3와 같다.

Kane 동역학 이론을 이용하여 운동방정식을 유도하기 위해서, 먼저 각 링크의 편속도(partial velocity)와 편각속도(partial angular velocity)를 계산

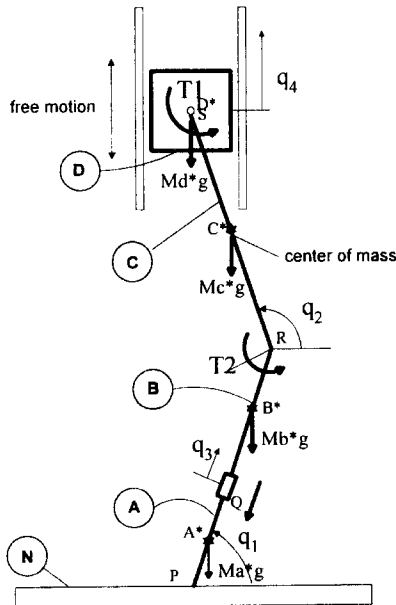


Fig. 3 Dynamic model of robot-leg.

한다. 이를 각각의 작용력 및 관성력에 내적하여 일반작용력(generalized active force)과 일반관성력(generalized inertia force)을 구한 후, 방향 코사인을 이용하여 모든 좌표를 절대좌표계에 대한 값으로 표현함으로써 최종적인 운동방정식을 유도한다.

2.2.1 편속도와 편각속도

4각 보행로봇의 동역학 모델과 같은 홀로노믹 시스템에서 각 링크의 속도 및 각속도는 편속도와 편각속도에 의하여 각각 다음과 같이 기술된다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} \vec{v} = & \sum_{r=1}^n \vec{v}_r u_r + \vec{v}_r \\ \vec{\omega} = & \sum_{r=1}^n \vec{\omega}_r u_r + \vec{\omega}_t \end{aligned} \quad (13)$$

Kane 동역학 이론에 의하여 편속도와 편각속도는 각각 링크질량중심의 속도와 각속도를 일반속력으로 편미분함으로써 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{v}_1^{A*} = & d_a a_{11} \vec{a}_2, \quad \vec{v}_2^{A*} = d_a a_{12} \vec{a}_2 \\ \vec{v}_1^{B*} = & \vec{a}_1 + l_a a_{11} \vec{a}_2 + d_b a_{11} \vec{b}_2, \\ \vec{v}_2^{B*} = & l_a a_{12} \vec{a}_2 + d_b a_{12} \vec{b}_2 \\ \vec{v}_1^{C*} = & \vec{a}_1 + l_a a_{11} \vec{a}_2 + l_b a_{11} \vec{b}_2 + d_c a_{21} \vec{c}_2 \\ \vec{v}_2^{C*} = & l_a a_{12} \vec{a}_2 + l_b a_{12} \vec{b}_2 + d_c a_{22} \vec{c}_2 \\ \vec{v}_1^{D*} = & \vec{a}_1 + l_a a_{11} \vec{a}_2 + l_b a_{11} \vec{b}_2 + l_c a_{21} \vec{c}_2 \\ \vec{v}_2^{D*} = & l_a a_{12} \vec{a}_2 + l_b a_{12} \vec{b}_2 + l_c a_{22} \vec{c}_2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_1^A = & a_{11} \vec{a}_3, \quad \vec{\omega}_2^A = a_{21} \vec{a}_3 \\ \vec{\omega}_1^B = & a_{11} \vec{b}_3, \quad \vec{\omega}_2^B = a_{12} \vec{b}_3 \\ \vec{\omega}_1^C = & a_{21} \vec{c}_3, \quad \vec{\omega}_2^C = a_{22} \vec{c}_3 \\ \vec{\omega}_1^D = & \vec{0}, \quad \vec{\omega}_2^D = \vec{0} \end{aligned} \quad (15)$$

2.2.2 작용력 및 작용토크

Fig. 4에서 보행로봇에 작용하는 작용력은 지면으로부터의 지지하는 발에 작용하는 반력, 조인트의 모터토크, 중력 그리고 완충기의 처짐에 의한 힘이 작용한다. 단, 발에 작용하는 반력은 발과 지면 사이에서 미끄러짐이 없다는 가정에 의하여 작용점에서 운동을 일으키지 않으므로 비공헌력(non-contributing force)이 되어 최종적인 운동방정식에 나타나지 않는다.

중력에 의한 작용력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{A_1} = & -gM_a \vec{n}_2, \quad \vec{F}_{B_1} = -gM_b \vec{n}_2, \\ \vec{F}_C = & -gM_c \vec{n}_2, \quad \vec{F}_D = -gM_d \vec{n}_2 \end{aligned} \quad (16)$$

완충기의 변위에 의한 작용력이 강체 A와 강체 B의 질량중심 사이에서 발생하는 것으로 모델링하

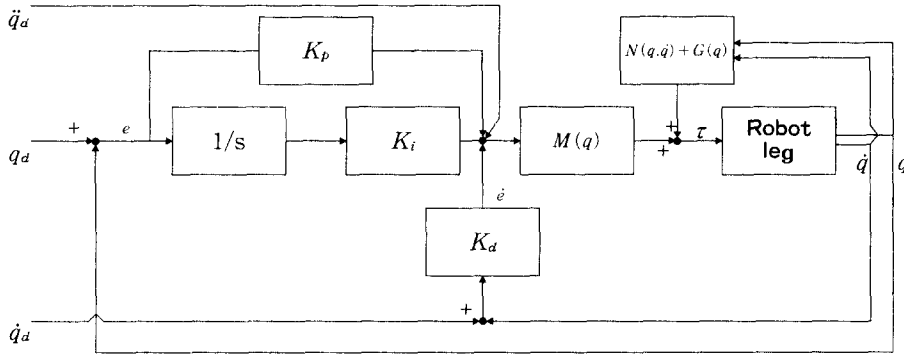


Fig. 4 Block diagram of PID computed torque control method.

여 다음과 같이 기술된다.

$$F = Kq_3 + C\dot{q}_3$$

$$\vec{F}_{A,2} = F\vec{a}_1, \vec{F}_{B,2} = -F\vec{b}_1 \quad (17)$$

따라서 각 링크에 작용하는 작용력은 다음과 같다.

$$\vec{F}_A = \vec{F}_{A,1} + \vec{F}_{A,2},$$

$$\vec{F}_B = \vec{F}_{B,1} + \vec{F}_{B,2}, \vec{F}_C, \vec{F}_D \quad (18)$$

또한 작용토크는 각 조인트에서 작용-반작용토크 (action-reaction torque)로 작용한다.

$$\vec{T}_A = \vec{0}, \vec{T}_B = T_2\vec{n}_3, \vec{T}_C = (T_1 - T_2)\vec{n}_3,$$

$$\vec{T}_D = -T_1\vec{n}_3 \quad (19)$$

여기서, 기구는 평면운동을 하므로 \vec{n}_3 와 $\vec{a}_3, \vec{b}_3, \vec{c}_3, \vec{d}_3$ 는 같은 방향의 단위벡터이다.

2.2.3 관성력 및 관성토크

관성력과 관성토크는 각 링크의 질량 및 질량관성모멘트와 기구학 해석에서 결정된 각 링크의 속도, 가속도와 각속도 및 각가속도를 이용하여 다음과 같이 결정된다. 관성력은 다음과 같다.

$$\vec{R}_{A*} = -M_a\vec{a}^{A*}, \vec{R}_{B*} = -M_b\vec{a}^{B*}$$

$$\vec{R}_{C*} = -M_c\vec{a}^{C*}, \vec{R}_{D*} = -M_d\vec{a}^{D*} \quad (20)$$

이고, 관성다이아딕(dyadic of inertia)⁽⁸⁾은 다음과 같이 정의되며,

$$\vec{I}_A = I_{A11}\vec{a}_1\vec{a}_1 + I_{A22}\vec{a}_2\vec{a}_2 + I_{A33}\vec{a}_3\vec{a}_3$$

$$\vec{I}_B = I_{B11}\vec{b}_1\vec{b}_1 + I_{B22}\vec{b}_2\vec{b}_2 + I_{B33}\vec{b}_3\vec{b}_3$$

$$\vec{I}_C = I_{C11}\vec{c}_1\vec{c}_1 + I_{C22}\vec{c}_2\vec{c}_2 + I_{C33}\vec{c}_3\vec{c}_3 \quad (21)$$

관성토크는 다음과 같다.

$$T^{A*} = -\vec{a}^{A*} \cdot \vec{I}_A - \vec{\omega}^A \times \vec{I}_A \cdot \vec{\omega}^A,$$

$$T^{B*} = -\vec{a}^{B*} \cdot \vec{I}_B - \vec{\omega}^B \times \vec{I}_B \cdot \vec{\omega}^B$$

$$T^{C*} = -\vec{a}^{C*} \cdot \vec{I}_C - \vec{\omega}^C \times \vec{I}_C \cdot \vec{\omega}^C,$$

$$T^{D*} = -\vec{a}^{D*} \cdot \vec{I}_D - \vec{\omega}^D \times \vec{I}_D \cdot \vec{\omega}^D \quad (22)$$

2.2.4 운동방정식

각 링크의 작용력 및 관성력이 결정되면 해당하는 편속도 혹은 편각속도를 내적하여 일반작용력 및 일반관성력을 구한다. 유도된 일반작용력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_i = \vec{F}_A \cdot \vec{v}_i^{A*} + \vec{F}_B \cdot \vec{v}_i^{B*} + \dots + \vec{F}_D \cdot \vec{v}_i^{D*}$$

$$+ \vec{T}_A \cdot \vec{\omega}_i^A + \vec{T}_B \cdot \vec{\omega}_i^B + \dots$$

$$+ \vec{T}_D \cdot \vec{\omega}_i^D, i=1, 2 \quad (23)$$

또한 일반관성력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_i^* = \vec{R}_{A*} \cdot \vec{v}_i^{A*} + \vec{R}_{B*} \cdot \vec{v}_i^{B*} + \dots + \vec{R}_{D*} \cdot \vec{v}_i^{D*}$$

$$+ \vec{T}_{A*} \cdot \vec{\omega}_i^A + \vec{T}_{B*} \cdot \vec{\omega}_i^B + \dots$$

$$+ \vec{T}_{D*} \cdot \vec{\omega}_i^D, i=1, 2 \quad (24)$$

최종적으로 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$F_i + F_i^* = 0, i=1, 2 \quad (25)$$

2.3 역동역학방정식

보행로봇의 설계시 모터 선정을 위하여 목표하는 운동조건에 대한 조인트토크를 계산하기 위해서 역동역학방정식이 필요하다. 또한 역동역학 방정식 (inverse dynamic equations)은 계산토크제어 및 토크알림제어기와 같은 동적 제어기를 구성하는데도 이용된다. 역동역학방정식을 구성하기 위해서 운동방정식 (25)를 각 링크의 운동조건, 즉 위치, 속도, 가속도를 입력으로 하고 조인트토크 τ 를 결정하기 위한 운동방정식으로 재구성한다.

식 (28)을 일반속력의 1차 미분항에 대한 선형 방정식의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$[a]\dot{u} = f \quad (26)$$

여기서, $[a]_{2 \times 2}$ 는 \dot{u} 의 계수행렬이고, f 는 \dot{u} 항을 제외한 나머지 항, 즉 작용력, 구심력, 코리올리력, 중력 그리고 완충기에 의한 항에 의한 힘과 관계된 모든 항을 정리한 벡터이다. f 에 조인트토크항이 선형적으로 포함되어 있으므로 다음과 같이 f 에서 토크벡터 τ 를 분리할 수 있다.

$$f = f' - [\gamma]\tau \quad (27)$$

$$\tau = [\gamma]^{-1}(f' - [a]\dot{u}) \quad (28)$$

여기서, $[\gamma]$ 는 지지구간에서 링크의 폐연쇄로 인해 결정되는 τ 의 계수행렬이고, f' 는 토크항이 제외된 나머지 항이다. 식 (28)을 역동역학 과정을 통하여 무릎과 힙관절의 모터에 작용하는 토크를 구한다. 또한 조인트좌표계에서 제어기를 구성하기 위해서 식 (28)을 조인트좌표계에 관한 운동방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\tau = [\gamma]^{-1}(\underline{M}(q)\ddot{q} + \underline{N}(q, \dot{q}) + \underline{G}(q) + \underline{F}(q, \dot{q})) \quad (29)$$

여기서, $\underline{M}(q)$ 는 관성행렬, $\underline{C}(q, \dot{q})$ 는 코리올리력과 원심력벡터, $\underline{G}(q)$ 는 중력, $\underline{F}(q)$ 는 완충기의 처짐에 의한 힘, τ 는 조인트토크벡터이다. 최종적으로 정리된 운동방정식은 식 (30)과 같다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + G(q) + F(q, \dot{q}) \quad (30)$$

3. 동적 제어기 설계

본 연구에서 다리의 동적 보행제어 실험을 위하여 설계된 제어기는 세 가지로서, PID 제어기, PID 계산토크제어기 그리고 토크알먹임제어기이다. 동적 모델을 사용하지 않는 PID 제어기는 나머지 두 가지 동적 제어기와 비교하기 위하여 설계되었다. 여기서는 PID 계산토크제어기와 토크알먹임제어기의 설계에 대해서 서술한다.

3.1 PID 토크계산 제어방법

PID 토크계산 제어방법(PID computed torque control method)⁽¹⁰⁾은 동역학 모델을 이용하는 제어방법으로서 널리 사용된다. 이 방법은 PD 토크계산 제어방법(PD computed torque control method)에 지속적인 외란에 의한 적분오차를 보정하기 위한 적분제어 기능이 추가된 것이다. 운동방정식의 코리올리력, 원심력 그리고 중력 등의 비선형요소를 되먹임 선형화(feedback linearization)하고 상태변

수를 되먹임하여 PID 제어하는 방법이다. PID 토크계산제어 시스템의 블록선도는 Fig. 4와 같다. 관절각도의 오차는 다음과 같이 정의된다.

$$e(t) = q_a(t) - q(t) \quad (31)$$

식 (31)을 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{e}(t) = \dot{q}_a(t) - \dot{q}(t) \quad (32)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_a(t) - \ddot{q}(t) \quad (33)$$

식 (30)과 식 (33)으로부터 식 (34)가 유도된다.

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_a(t) + M(q)^{-1}\{N(q, \dot{q}) + G(q) + F(q, \dot{q}) - \tau\} \quad (34)$$

식 (34)를 τ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\tau = M(q)\{\ddot{q}_a(t) - \ddot{e}(t)\} + N(q, \dot{q}) + G(q) + F(q, \dot{q}) \quad (35)$$

PID 제어기에서 계산되는 제어입력은 다음과 같다.

$$v = -K_a \dot{e} - K_p e - K_i \int e \cdot dt \quad (36)$$

제어입력토크 τ 는

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_a + v) + N(q, \dot{q}) + G(q) + F(q, \dot{q}) \quad (37)$$

식 (35)와 식 (37)를 같게 놓으면 오차 동역학방정식(error dynamic equation)은 다음과 같다.

$$\dot{e} + K_a \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt = 0 \quad (38)$$

여기서, 계인행렬 K_p, K_i, K_d 가 대각행렬인 경우, 비연성형태(decoupled form)로 선형화된다.

3.2 토크알먹임 PD 제어방법

제어하고자 하는 시스템의 동역학이 복잡하여 운동방정식을 이용한 토크연산의 실시간처리가 불가능한 경우, 운동에 필요한 토크를 오프라인(off-line)으로 계산하여 PD 제어기에 의한 출력토크와 중첩하는 토크알먹임 PD 제어방법(torque feedforward PD control method)⁽¹¹⁾ 있다. 이 방법은 보행로봇 전체 시스템과 같이 동역학이 매우 복잡한 시스템의 동적제어에 유리한 방법이다. 그러나 이 방법은 로봇의 관성효과를 고려한 동적제어가 가능하나 식 (39)와 같이 $M^{-1}(q)$ 가 일반적으로 대각행렬이 아니므로 연성을 가지는 형태로 표현되어 오

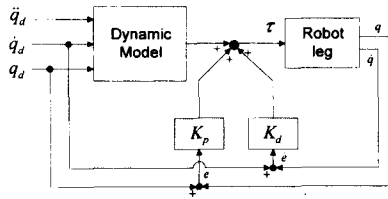


Fig. 5 Block diagram of torque feedforward PD control method.

차 동역학방정식이 비연성 선형시스템으로 표현되지 않는다. 따라서 페루프 시스템의 동역학이 다리 위치에 따라 변하게 되어 페루프 시스템의 극점(pole)이 복소평면 상에서 이동하게 되므로 제어기의 안정도(stability)를 보장하기 어렵다. 이 문제를 해결하기 위하여 극점이 복소평면상에서 이동하더라도 페루프 시스템의 안정도를 보장하기 위한 상수계인을 결정하거나, 다리의 위치에 상관없이 극점이 일정한 위치에 있도록 페루프 계인을 변화시켜 주는 방법이 가능하다. 본 연구에서는 첫번째 방법을 취하여 보행을 위한 속도 및 가속도 범위 내에서 다리의 운동에 관계없이 안정도를 보장하는 상수계인을 실험적으로 결정하였다. 토크앞먹임 PD 제어시스템의 블록선도는 Fig. 5와 같다.

$$\ddot{e} + M^{-1}(q)K_d\dot{e} + M^{-1}(q)K_p e = 0 \quad (39)$$

4. 보행실험

4.1 제어시스템의 구성

Fig. 6은 다리의 동적 보행을 위한 제어시스템의 구조를 보여준다. 다리의 각 조인트에 장착된 모터는 구동 전원부(drive unit)를 통해서 TMS 320 C30 DSP 보드와⁽¹²⁾ 연결되어 있고, 지지구간에서 지면의 반력을 측정하기 위한 로드셀(load cell)은 DSP 보드의 아날로그 입력 단자에 연결되어있다. PC 환경에서 C언어로 작성되어 컴파일된 제어 프로그램은 XDS510 에뮬레이터(emulator)를 통해 DSP 보드로 로드되어 실행된다. DSP 보드는 KVME041 CPU보드가 탑재된 랙(rack)에 VME-bus 방식으로 병렬연결되어 Dual-Port RAM(DP-RAM)을 통하여 CPU 보드와 통신한다. CPU 보드는 이더넷(ethernet)을 통하여 SUN SPARC 워크스테이션으로부터 실시간 운영체제인 Vxworks 환경⁽¹³⁾으로부터 실행된다. 보행실험시 다리에서 측정된 각종 데이터가 DSP 보드의 DP-RAM에 저장되면,

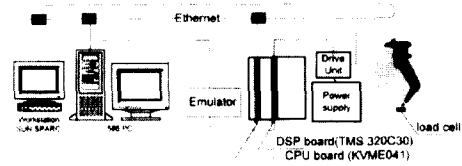


Fig. 6 Robot-leg control system.

이더넷을 통해서 워크 스테이션에 전송되어 ASCII 파일로 저장되어 성능평가에 이용된다. 실험에서 측정되는 데이터는 각 조인트의 엔코더 값, 로드셀 신호 그리고 모터구동을 위해 구동전원부에 공급되는 출력 전압값이다.

보행실험시 로드셀의 신호를 이용하여 발끝의 지면과의 접촉여부를 확인한다. 착지한 순간부터 완충기의 처짐이 발생하는데 시간에 따른 완충기의 처짐량은 Fig. 7에서와 같이 실험데이터를 이용하여 모델링하였다. 1 msec의 샘플링시간마다 입력되는 힘의 운동역적은 역기구학(inverse kinematics) 과정을 거쳐 각 조인트의 위치, 속도, 가속도로 변환된다. 실험에서 서보앰프의 전달함수는 DSP 출력전압과 모터에 인가되는 전류간의 비례관계로 가정한다. 최종힘 위치는 모터의 엔코더신호로부터 나온 조인트각도를 순기구학(forward kinematics) 과정을 통해서 힘의 위치로 변환하여 결정한다.

4.2 완충기의 처짐량 모델링

완충기를 일정한 K와 (spring constant) C로 (damping constant) 나타내면 변위에 따른 작용력은 Fig. 7(a), Fig. 7(b)로 나타낼 수 있다. 이는 상용화된 완충기의 특성곡선으로서, Fig. 7(b)의 경우는 댐퍼의 한쪽 끝에 힘센서를 부착하여 측정할 일반적인 경우이다. C가 클수록 완충기가 흡수하는 충격에너지는 증가하나, 지면과 충돌시 발생하는 충격력이 크다(Fig. 7(b)). 따라서 착지시 충격력을 최소화하고 충격에너지 흡수를 최대화하기 위해서는 Fig. 7(c)와 같은 특성을 지니도록 해야 하는데 이 경우 C의 값이 하중에 따라 변하는 특성을 가진다.

일반적으로 완충기의 선정기준은 주기, 하중 그리고 행정(stroke)길이이다. 본 실험의 경우 주기 1~4초, 하중 7.3 kg중, 제한된 길이(10~20 mm)가 정해지므로 이 조건에 맞는 완충기 모델로서 ACE M225을⁽¹⁴⁾ 선정하였다. Fig. 8은 다리의 자중에 대한 완충기의 처짐곡선을 나타낸다. 완충기의

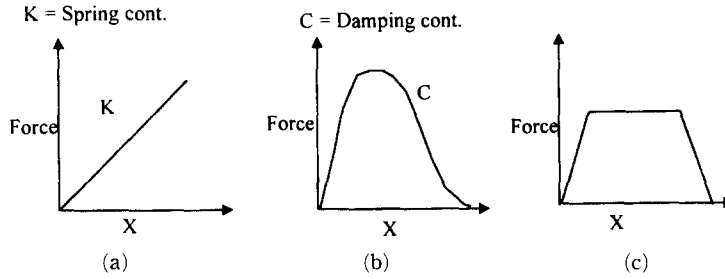


Fig. 7 Characteristics of shock absorber with constant parameter K and C versus displacement (x).

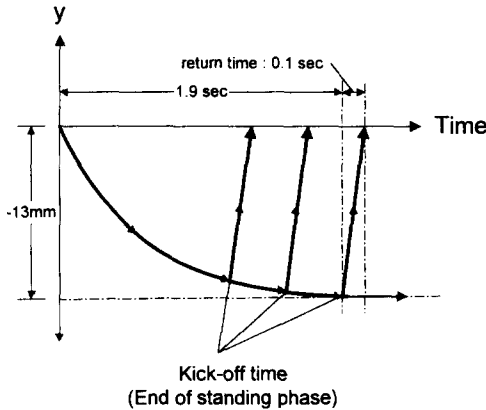


Fig. 8 Deflection of shock absorber versus time.

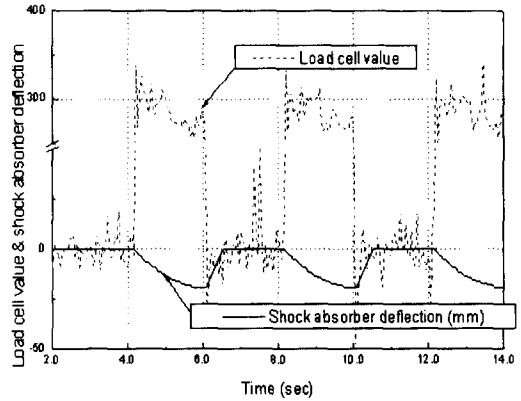


Fig. 9 Relation between road cell signal and deflection of shock absorber.

행정은 조절너트를 통해서 13 mm의 행정을 갖도록 하였다. 또한 발끝이 지면과 착지시 착지각도에 따른 완충기의 처짐속도에는 차이가 없는 것으로 가정한다.

지면과 착지시 로봇의 하중에 의한 신호가 로드셀로부터 입력되면 로봇은 발끝이 지면과 닿은 것으로 인식하여 실험데이터에 의한 처짐량이 발생한 것으로 인식한다. Fig. 9는 지지구간에서 완충기의 변위와 로드셀에서 측정된 반력을 나타낸다. 로봇은 발끝이 지면에서 완전히 떨어진 후 로드셀의 신호로부터 발끝이 지면과 분리됐음을 인식한다.

4.3 힙의 수직방향 저속운동(주기=3초)

Fig. 10은 저속보행, 즉 주기가 4초인 경우로서 지지대에 의해 몸체가 정지해 있는 초기상태에서 발이 상하로 움직이는 이동구간(swing phase)을 거쳐, 발이 지면에 닿아 힘이 상하로 움직이는 지지구간(standing phase)이 반복됨을 나타낸다. 이 실험에서 주된 관찰범위는 완충기가 작용하는 지지구간에서의 운동이다. 이동구간에서의 운동은 실험의 주된 관찰대상은 아니나, 다리가 지면과 떨어진

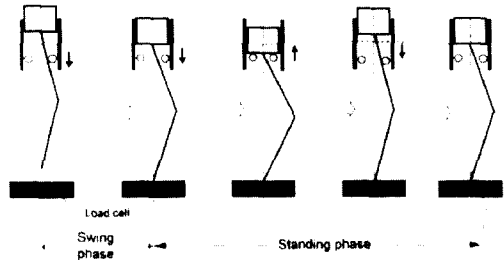


Fig. 10 Motion of hip joint versus time.

상태의 개연쇄구조(open-chain linkage)로서 완충기의 작용을 고려하지 않은 2자유도 로봇의 운동방정식을 이용하는 PID 토크계산 제어기와 토크값먹임 PD 제어기를 구성하였다.

본 실험의 주요점이 완충기가 장착된 다리의 동적 보행제어 성능을 검증하기 위한 것이므로, 힙의 수평방향 운동을 위한 직선가이드가 생략된 수직방향 운동을 위한 가이드만을 제작하여 실험을 수행하였다. PID 제어기, PID 토크계산제어기를 이용하여 실험하였으며, 그 결과는 Fig. 11과 같다.

실험에서 2초 동안은 다리가 이동구간에 해당되

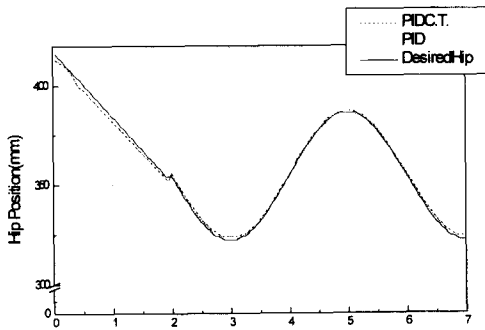


Fig. 11 Experimental results of hip position(T=3 sec).

고, $t=2$ 일 때 착지가 일어나며, 이때 완충기의 작용에 의하여 착지시의 충격을 완화한다. $t=2$ 에서 $t=5$ 까지는 지지구간으로서 힙위치 궤적을 삼각함수로 주었을 때의 힙위치 추종성능 결과를 나타낸다. PID 방법과 PID 토크계산방법의 경우 모두 힙위치 추종성능이 양호하며 완충기의 변위가 포함된 힙위치 오차는 $+1 \sim -2$ (mm)이다. PID 제어기와 PID 계산토크 제어기의 힙 추종성능에는 크게 차이가 없다. 모터에 인가되는 제어입력을 비교하기 위하여 DSP 보드의 아날로그 출력 단자의 출력전압을 비교해 보면, PID 토크계산방법이 PID 제어 방법에 비해 출력전압의 변화가 많은 것을 알 수 있었다.

4.4 힙 조인트의 수직방향 고속운동(주기=1초)

KIST에서 개발된 사각보행기의 경우 고속보행이라 함은 몸체의 속도가 $1.38 \text{ m/s}(=5 \text{ km/h})$ 이고 이때 힙에서 본 다리 끝의 진행방향 속도는 1.6 m/s , 보폭이 30 cm , 전체 주기가 2 초이다.⁽¹⁾ 이 경우 사각보행기에서 지지구간과 주기의 비로 정의되는 디듀티(duty factor)이 0.5 인 트롯 걸음새 보행을 하는 경우 한쪽 다리의 주기 T 는 1 초가 된다. 이 실험에서는 PID 제어방법, PID 토크계산제어방법, 토크 앞먹임 PD 제어방법을 이용하였다.

제어방식에 따른 힙위치제어 추종 성능은 토크 앞먹임 PD 제어, PID 제어, PID 토크계산 제어방법 순으로 나타났다. 실험데이터의 오차원인인 로봇의 기구 요소들간의 마찰, 강체 사이의 기어 백래쉬, 측정된 링크의 관성질량의 오차, 전체 다리 로봇의 진동영향으로 더 많은 오차가 발생한다. 동적인 특성이 고려된 로봇의 토크 앞먹임 PD 제어기의 경우 PID보다 적은 토크의 출력으로 우수한

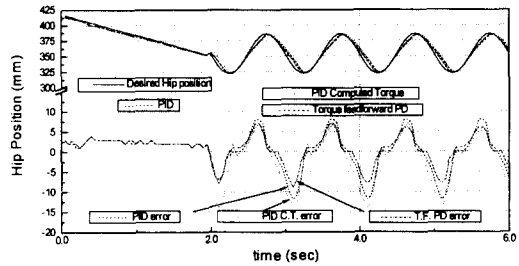


Fig. 12 Experimental results of hip position(T=1 sec).

힙위치 추종성능을 나타내고 있다. PID 제어기와 토크 앞먹임 PD 제어기의 경우 무릎관절의 베벨기 어부 제작시 오차에 의한 강한 마찰력과 백래쉬로 인한 위치오차가 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 보행로봇의 동적 보행을 위한 착지 안정성 및 내구성 향상을 위하여 무릎과 발 끝 사이에 완충기가 장착된 로봇 다리를 제작하였다. 또한 제작된 로봇다리의 동적 보행제어를 위하여 Kane 동역학 이론을 이용하여 운동방정식을 유도하였고, 이를 이용하여 PID 제어기, PID 계산토크 제어기 그리고 토크앞먹임 PD 제어기를 구성하였다. 설계된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 실제 보행조건과 유사한 운동조건을 갖도록 한 쪽 다리의 보행실험장치를 구성하여, 지지구간에서 완충기의 변위를 고려한 힙의 상하운동 제어실험을 수행하였다. 이 실험결과 고속보행시, 완충기의 특성에 의하여 착지시 충격이 완화되었고, 토크앞먹임 PD 제어기가 힙위치 추종 성능에 있어서 우수하였다. 토크앞먹임 PD 제어기는 역동역학 과정을 오프라인으로 계산하는 것이 가능하여, 보행로봇과 같이 복잡한 동역학을 갖는 시스템의 제어에 적합하므로 전체 사각 보행로봇 시스템의 동적 보행제어에도 적용할 수 있게 되었다.

참고문헌

- (1) 이종원, 김문상, 홍예선, 박종오 외 다수, 1996, "휴먼 로봇 시스템 개발 연차 보고서," 한국과학기술연구원.
- (2) 강성철, 유홍희, 김문상, 이교일, 1997, "사각 보행기의 고속보행 제어를 위한 동적 모델링 및

- 해석," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제5호, pp. 756~768.
- (3) Nakamura, T., Koyachi, N. and Adachi, H., 1991, "Simulation Technology for Evaluation of Walking Robots," *Proc. International Symposium of Advanced Robot Technology*, pp. 417~424.
- (4) Villard, C., Gorce, P. and Fontaine, J., G., 1993, "Study of Dynamic behavior of RALPHY," *Proc. International Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1765~1770.
- (5) Shih, L., Frank, A. A. and Ravani, B., 1987, "Dynamic Simulation of Legged Machines Using Compliant Joint Model," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 6, No. 4, pp. 33~46.
- (6) 서영진, 윤용산, 1995, "사각 보행로봇의 동적 걸음새 설계와 시뮬레이션을 위한 알고리즘의 개발," 대한기계학회논문집, 제16권, 제11호, pp. 2721~2735.
- (7) Sakakibara, Y., Hosoda, Y., Kan, K., Hattori, M., Fujie, M. and Sugiyama, S., 1991, "Quadrupedal Walking Mechanism and Its Intelligent Control," *Proc. International Symposium of Advanced Robot Technology*, pp. 389~396.
- (8) Kane, T. R. and Levinson, D. A., 1985, *Dynamics*, McGraw-Hill, pp. 45~50.
- (9) 홍예선, 이순걸, 황동환, 1995, "비평탄 노면에서의 보행을 위한 로봇용 발의 설계와 실험," 한국자동제어학술회의, pp. 875~878.
- (10) Lewis, F. L., 1993, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan.
- (11) Liegeois, A., Fournier, A. and Aldon, M., 1980, "Model-Reference Control of High Velocity Industrial Robots." *Proc. The Joint Automatic Control Conference*, San Francisco, pp. 584~590.
- (12) 유범재, 1995, "DSP manual : DSP TMS320 C30-30/33 Motion Controller," 한국과학기술연구원 정보전자연구부.
- (13) WindRiver Systems, 1995, *VxWorks Programmer's Guide 5.2*
- (14) 세양(주), 1995, *ACE Industrial Shock Absorbers*, pp. 4~13.