

다각 보행 로봇의 서보 제어기 설계

이 언정, 여 인택, 박 찬 응

한국기계연구소 자동제어실

A servo controller design for a quadruped walking robot

Y. J. LEE, I. T. YEA, and C. W. BAHK

Automatic Control Lab. Korea Institute of Machinery and Metals

Abstract

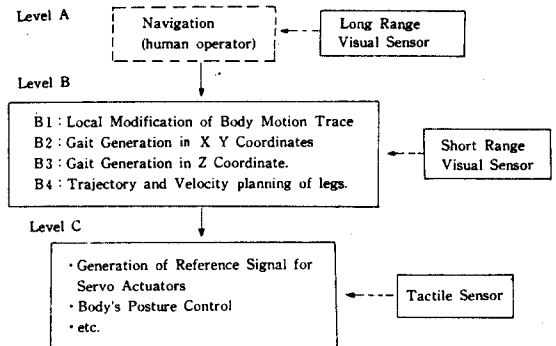
This paper presents a control algorithm of servo controller for a quadruped walking robot as well as its characteristics and requirements. The control algorithm for propelling and terrain adaptive motion is described. The servo controller is being developed as a sub-project of the national project - "Development of a quadruped walking robot". And then, this paper focuses on an overview of the current state and future works of this sub-project.

1. 서론

일반적으로 바퀴나 무한궤도를 갖는 운송기구의 효율성은 습지, 사막, 장애물 지형등에 있어서 평지보다 크게 저하된다. 이를 극복하기 위하여, 부정지면 (irregular terrain)에서의 효율적인 이동이 가능한 다리를 갖는 보행로봇에 관한 연구가 1960년대 이후 계속되어 왔다.

이러한 다각보행로봇은 기구설계, computer응용, vision, 서보제어 및 센서응용기술 등과 같은 다양한 기술의 복합체이다. 이중 서보제어기는 제어부의 기본요소로서 [그림1]에 있어서 level c에 해당한다. 다각보행로봇의 운동은 크게 지면적응운동 (terrain adaptive motion)과 동체 추진운동 (body propelling motion)으로 나뉜다. 지면적응시에는 유각(swing leg)을 안정된 위치에 유연하게

착지시키고, 추진 운동시에는 지지각(support leg)을 동시에 구동시켜 동체를 추진 시키는 것이 서보 제어기가 할 일이다. 이와 동시에 동체의 수평 및 수직 높이 등을 유지하도록 하는 일들이 추가된다. 전체 시스템의 관점에서는 지면적응 운동과 동체추진운동이 같은 시간대에 일어 나게 되므로 다축 동시제어를 행해야 한다.



[그림1] 다각보행로봇 제어부의 계층적구조

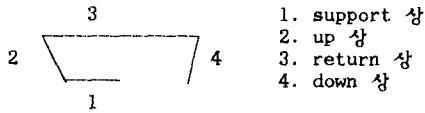
본 논문에서는 Pantographic leg과 Ac servo motor를 갖는 사각 보행 로봇에 있어서의 이상의 문제를 해결하기 위한 서보제어기의 설계에 관계 기술하고자 한다.

이는 국가주도과제-"다각 보행 로봇의 개발"의 하나의 소과제로 수행중인 것으로서 본 연구의 현재 진행 상황을 근거로 기술함을 밝혀둔다.

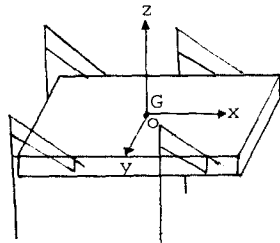
2. 서보제어기의 수행작업 설정

2.1 주요 기호 및 용어

. support, up, return, down 상 : 동계에서 본 한다리의 궤적을 본리한 4 가지 상태.



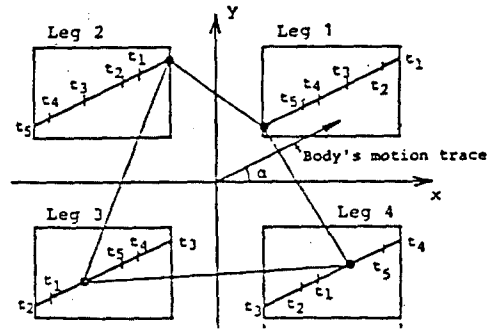
- . v_{ux}, v_{uy}, v_{uz} : 유각의 속도 명령치
- . v_{jx}, v_{jy}, v_{jz} : 지지각의 속도 명령치
- . u : 유각을 나타내는 접자
- . j : 지지각을 나타내는 접자
- . d : desired value를 나타내는 접자
- . m : 측정치를 나타내는 접자
- . i : 임의의 각을 나타내는 접자 ($i = 1-4$)
- . Step : 어떤 유각이 down상을 종료한 시점에서 부터 다음 유각이 down상을 종료한 시점까지를 말한다.
- . 좌표계 (X축, Y축, Z축) : 동계중심(G)를 원점으로 해서 동계의 전후방향을 X축, 좌우방향을 Y축, 그리고 상하방향을 Z축으로 설정한다.



2.2 4각 운동의 시간축상에서의 고찰

[그림 2] 는 기준축행보용 (standard crab gait) 의 예이다. 즉, 세다리 끝이 이루는 삼각형 내에 동계의 무게중심을 두고 한다리만이 유각으로 움직이므로써 정적인 안정성을 유지하면서 보행하는 경우의 예이다. 다만, 정방향의 보행이 아니고 축행각 (crab angle : α)를 갖는 축행 보행임이 특이한 점이다.

이를 각 시간 구간에서 구분하여 보면 [표 1]과 같다. (단, T는 보행 주기)



[그림 2] 4각 보행 로봇의 보행예

leg	leg1	leg2	leg3	leg4	비 고
시간대					
0 - t1	u	j	j	j	유각-leg1
t1 - t2	j	j	j	j	4각 지지상
t2 - t3	j	j	u	j	유각-leg3
t3 - t4	j	j	j	u	유각-leg4
t4 - t5	j	j	j	j	4각 지지상
t5 - T	j	u	j	j	유각-leg2

[표 1] 각 시간대에서의 각 leg의 상태표

[표 1] 에서와 같은 유각의 선택 순서 (1-3-4-2), 4각 지지상의 필요 유무, 각 시간대의 길이 등은 장애물의 유무, 축행각의 크기 등에 따라 달라진다. 이러한 정보에 대한 계산은 상위 level ([그림 1]의 level B) 에서 이루어지며 서보제어기는 이러한 정보를 받아 그에 합당한 모터 구동을 통해 각 leg을 움직이면 된다. 이와 더불어 장애물과 관련한 비상동작을 처리한다.

따라서, 서보제어기의 제어 algorithm은 한 step에 있어서의 각 다리의 구동에 중점을 두어야 한다. 또한, 상위 level의 명령은 한 step 미리 유도되어 각 step이 유연하게 연결 되므로써 다각 보행 로봇의 보행이 이루어지게 된다.

2.3 1 step에서의 수행 작업설정

1 step에서의 서보제어기 수행 작업을 다음과 같이 요약할 수 있다. "서보제어기는 매 step마다 상위 level에서 미리 유도 되어 있는, 임의의 유각과 지지각들에 대한 서보지령을 받고,

절대위치센서로부터 발끝의 초기 위치값을 지령받는다. 또, step을 세분한 일정 간격의 sample 시간 마다, 각 관절의 위치값 측각 센서 및 자세 센서로부터의 신호를 취하여 상위 level에서 주어진 최종 목표치로 유각과 지지각을 구동시킨다. 또한, 안정성 유지 및 장애물 접촉 등에 의한 비상 동작도 함께 처리한다. 이 때, 상위 level의 명령치를 포함하여 입력되어야 할 조건들을 정리하면 다음과 같다.

1) step 시작점에서의 상위 level로부터의 서보지령, 선정된 유각의 각상 (support, up, return, down상)에 있어서의 desired velocity(V_{ux}, V_{uy}, V_{uz})와 지지각에 있어서의 desired velocity(V_{jx}, V_{jy}, V_{jz})를 상위 level로 부터 지령 받는다. 또한, 유각의 각상에 있어서의 유지시간 $tspt, tup, trtn, tdwn$ 을 지령 받는다. 이들 각상의 유지시간의 합 $T(=tspt+tup+trtn+tdwn)$ 은 지지각의 운동시간과 같으며, 한 step의 소요 시간이 된다. 이들 desired velocity와 유지시간으로부터 각 leg의 한 step내에서 궤적(trajjectory)을 얻을 수 있다. 궤적 산출은 본제에서 벗어나므로 생략한다.

Phase Vu	Support	up	return	down
Vux	- Vx	- Vx	$-V_{rtn}^x$	- Vx
Vuy	- Vy	- Vy	V_{rtn}^y	- Vy
Vuz	v*	vup	V_{rtn}^z	Vdwn

[표2] 유각의 각상에서의 속도지령치

유각의 support상에서는 4각 지지상이 발생되며 이때의 V^* 는 지지각상의 Z방향 속도와 같게 설정한다.

또, support, up, down 상에서의 V_{ux}, V_{uy} 를 같게 하는 것은 속도지령에 연속성을 부여하기 위한 것이다.

2) step 시작점에서 4각 발끝의 초기 위치 $P_{io}(X_{io}, Y_{io}, Z_{io}) (i=1-4)$ 를 potentiometer나 position counter 등으로 부터 입력한다.

3) 각상의 매 sampling 시작점에서의 입력

- 측각 신호... 발끝 측각 센서 (전후, 좌우, 하방)

- 자세 신호... Gyroscope/pendulum(roll각, pitch각)

4) 기계구조에 관한 data(기본조건)

- 동체 중심 좌표계와 각 leg base 좌표계와의 변환식

- 각 leg의 inverse kinematic 변환식

- 전동계의 감속비, 모터의 한 위치 pulse당 실제 움직이는 거리의 비

- pantographic leg의 확대비

- 각 leg의 working volume

3. 제어 Algorithm

3.1 매 sampling time에서의 서보 지령치의 계산
임의의 n번째 sampling time에서의 각 leg의 위치 목표치 계산과 서보 지령치의 계산에 대해 순서적으로 기술한다.

1) 유각의 위치 목표치

시각 $t(n\Delta t \leq t \leq (n+1)\Delta t)$ 에서의 유각의 목표치를 다음과 같이 정할 수 있다.

단, V_{ux}, V_{uy}, V_{uz} 는 [표 2]에 준한다.

$$X_{U}^d(n\Delta t) = X_{U}^d((n-1)\Delta t) + V_{ux}\Delta t$$

$$Y_{U}^d(n\Delta t) = Y_{U}^d((n-1)\Delta t) + V_{uy}\Delta t$$

$$Z_{U}^d(n\Delta t) = Z_{U}^d((n-1)\Delta t) + V_{uz}\Delta t$$

(where, n: sampling횟수

Δt : sampling time duration

V_{ux}, V_{uy}, V_{uz} : 상위 level로부터 입력

$X_{U}^d(0), Y_{U}^d(0), Z_{U}^d(0)$: step 시작점에서 유각의 위치 측정치)

또한, 속도지령치의 변경시점은 각상의 유지시간에 의해 결정한다.

2) 지지각의 위치 목표치

X, Y방향에서는 유각과 같은 형태로 정할 수 있으나 Z방향의 경우는 약간 다르다.

$$\begin{aligned}
 X_j^d(n\Delta t) &= X_j^d((n-1)\Delta t) + V_{jx}\Delta t \\
 Y_j^d(n\Delta t) &= Y_j^d((n-1)\Delta t) + V_{jy}\Delta t \\
 Z_j^d(n\Delta t) &= Z_j^m(n\Delta t) + (Z_j^x(n\Delta t) - \bar{Z}_j^m(n\Delta t)) \\
 &\quad + C_1(-X_j^m(n\Delta t) \cdot \theta_p + Y_j^m(n\Delta t) \cdot \theta_r)
 \end{aligned}$$

(where, $Z_j^*(n\Delta t) = \bar{Z}_j^m(0) \quad n=0$
 $Z_j^*(n\Delta t) = \bar{Z}_j^m((n-1)\Delta t) - V_{jz}\Delta t \quad n \geq 1$
 $\bar{Z}_j^m(n\Delta t)$: 지지각높이 측정치의 평균값)

윗식에 $Z_j^*(n\Delta t)$ 는 높이의 목표치로서 우변 제1항은 중심의 평균 높이의 조정을 위한 항이다. 우변 제2항은 수평면에서의 편차를 roll 및 pitch 각의 측정에 의해 수평 유지를 위한 항이다.

이에 대한 자세한 계산은 부록에서 기술한다. 또, C_1 은 수평조정기능의 감도에 관한 계수이다.

3) 각 leg의 위치목표치가 1), 2)에서 결정되면, 이들 좌표 $\bar{P}_i(X(n\Delta t), Y_i(n\Delta t), Z_i(n\Delta t)) (i=1-4)$ 는 동체 중심으로부터의 값이므로, coordinate transformation을 통해 ($\bar{P}_i = A^{-1} P_i$ A:trans. matrix) 각 leg의 base coordinate에 대한 위치 목표치를 구한다.

4) \bar{P}_i 값으로부터, 기구적인 특성 data, inverse kinematic해법 통해 각 다리의 관절을 구동하기 위한 모터의 구동 pulse 지령치를 구한다.

5) 속도 서보기로의 지령 :

비례제어를 가정할 경우 다음과 같이 속도 서보기에 대한 속도지령치를 n번째 sampling 시간에서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{ix}^d(n\Delta t) &= (\theta_1^x(n\Delta t) - \theta_1^{xm}(n\Delta t)) / \Delta t \\
 V_{iy}^d(n\Delta t) &= (\theta_1^y(n\Delta t) - \theta_1^{ym}(n\Delta t)) / \Delta t \\
 V_{iz}^d(n\Delta t) &= (\theta_1^z(n\Delta t) - \theta_1^{zm}(n\Delta t)) / \Delta t
 \end{aligned}$$

(where, $\theta_1^{xm}(n\Delta t)$: nΔt에서의 X축 측정위치값

$\theta_1^{ym}(n\Delta t), \theta_1^{zm}(n\Delta t)$: 동양

6) 반복 수행 :

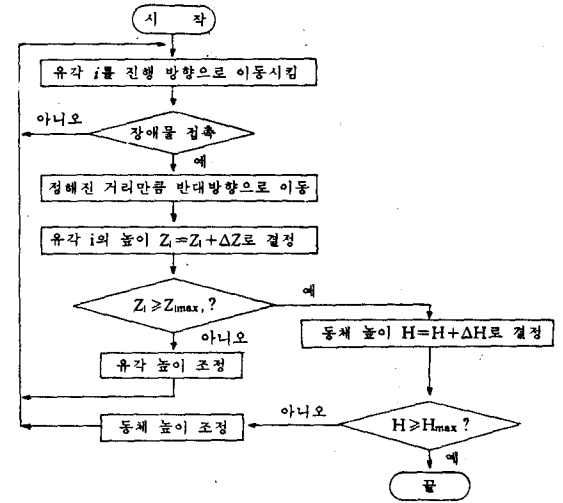
1 step 주기(T) 동안에 매 sampling마다 1) - 5)를 반복 하므로써 보행로봇의 이동속 이룰 수 있게 된다.

3.2 비상동작의 수행

비상동작은 유각에 대하여서만 고려하는 것이 일반적이며 return, down상에서만 고려한다.

1) return상에서의 장애물 접촉

: 계단과 같은 장애물을 가정할 경우 [그림3]의 흐름도와 같은 Algorithm을 제시할 수 있다.



[그림 3] return상에서의 장애물 회피 Algorithm

2) down상에서 비상동작

● 유각이 down상에서의 목표지에 다다랐어도 지면에 접촉하지 않는 경우

: 동체의 높이와 유각을 하향조정한다. 단, 이때 동체 높이의 제한치를 고려하여야 한다.

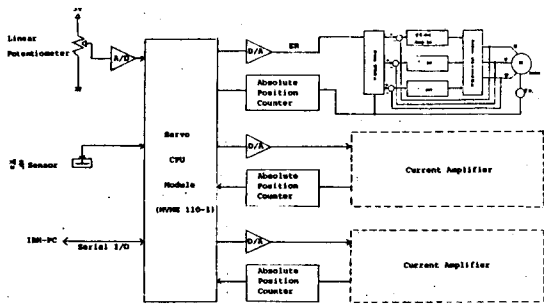
● 유각이 down상 목표지 이전에 지면에 접촉한 경우
 : 착지와 더불어 동체의 높이를 상향조정한다.

● 유각의 착지점이 불안정할 때

: 이는 계단 모서리에 착지한 경우와 같은 매우 특수한 상황으로 이를 감지하기 위하여는 분포적인 촉각센서를 다리의 발바닥에 설치해야 한다. 물론, 위의 2가지 경우도 상황에 따라 정지후 상위 level로부터 다른 착지점을 지정받을 수 있다.

3.3 Hardware 구성

추진 중인 서보제어의 1각을 위한 hardware 구성은 [그림 4]와 같다.



[그림 4] 1각에 대한 서보제어기의 H/W 구성도

4. 앞으로의 방향 및 결론

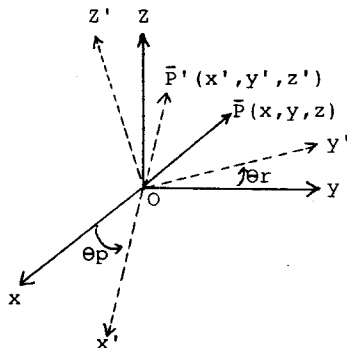
현재 연구 상황은 hardware 및 제어 algorithm의 정립단계이므로 상위 level 과의 정보 수신, 센서 interface, 고속화를 위한 hardware 구조 등 많은 사항에 대한 구체적인 설계 및 구현은 계속 연구되어야 할 것이다.

그러나, 본 논문에서는 그간의 논문조사와 기본연구를 통한 다각보행로봇에 있어서의 서보제어기 설계에 관하여 미흡하나마 기술하였다. 앞으로 연구가 진행됨에 따라 관심을 가지고 추진하려는 사항들을 요약 하면 다음과 같다.

- 1) 1 leg (3축)의 서보제어기 설계
- 2) 4 leg (12축)의 서보제어기 설계
- 3) 접촉 및 자세 센서의 응용

부 록

- 자세 센서로부터의 roll 각(θ_r), pitch 각(θ_p)에 대한 정보를 입력후 동체의 수평 유지를 위한 자세 조정치의 계산에 대해 알아보자.



옆그림은 좌표계 자체의 변화로 인한 임의의 벡터 (중심에서 발끝을 가리키는 벡터)의 변화를 나타낸다.

단, 여기서의 Z방향은 동체의 추진방향과 같다.

$$\bar{P}' = \text{rot}(X, \theta_r) \text{rot}(y, \theta_p) \bar{P}$$

$$X' = X \cos \theta_p + Z \sin \theta_p$$

$$Y' = X \sin \theta_r \sin \theta_p + Y \cos \theta_r - Z \sin \theta_r \cos \theta_p$$

$$Z' = -X \cos \theta_r \sin \theta_p + Y \sin \theta_r + Z \cos \theta_r \cos \theta_p$$

만일, $\theta_p, \theta_r \approx 0$ 라면

$$X' = X, (X \gg Z \theta_p)$$

$$Y' = Y, (Y \gg Z \theta_r)$$

$$Z' = -X \theta_p + Y \theta_r + Z$$

참고 문헌

[영 문 논 문]

1. S. Hirose, "A study on design and control of a quadruped walking vehicle", Int. J. Robotics Res., vol.3, no.2, pp.113-133, 1984.
2. M. Kaneko et al., "A hexapod walking machine with decoupled freedoms", IEEE J. of Robotics and Automation, vol.RA-1, no.4, pp.183-190 Dec. 1985.
3. S. Hirose et al., "TITAN III : A quadruped walking vehicle", in Proc. 2nd. Int. Sym. on Robotics Research, chapter 6. pp.325-331, 1985.
4. Tsu-Tian Lee and Ching-Long Shih, "Real time computer control of a quadruped walking robot", ASME J. of Dynamic systems, Measurement, and control, vol.108, pp.346-353, Dec. 1986.
5. M. H. Raibert and I. E. Sutherland, "Machines that walk", Scientific America, vol.13, no.1, pp.32-41, 1983.
6. Shi Zhimin and Gan Dongying, "Kinematics of six-legged vehicle on irregular terrain", ICAR, pp.389-396, 1985.

7. 廣瀬茂男, "4족 보행기계의 제어 시스템", 일본로봇학회지, vol.3 No.4 aug, 1985
8. 金子真, "보행기계의 Hybrid Actuator", 일본로봇학회지, vol.2 No.4 aug, 1984

[일 문 논 문]

7. 廣瀬茂男, "4족 보행기계의 제어 시스템", 일본로봇학회지, vol.3 No.4 aug, 1985
8. 金子真, "보행기계의 Hybrid Actuator", 일본로봇학회지, vol.2 No.4 aug, 1984