

# 4각 보행로봇의 무른 지형 보행제어 알고리즘

심 갑 종 · 이 상 희\*

## A Control Algorithm for Quadruped Walking Robot Over Unknown Soft Ground

Gab-Jong Sim, Sang-Hee Lee

---

### ABSTRACT

In this paper, a control algorithm is discussed when the quadruped walking robot walks over the unknown soft ground.

Firstly, it estimated the relationship between the foot force and the ground sinkage at the leg-placing phase. Secondly, the generated soil property is applied to the leg-supporting phase.

If the attitude angle is changed by incorrect ground sinkage compensation, the control algorithm adjusts the attitude angle using simplified orientation matrix.

---

### 1. 서 론

보행로봇은 다리를 이용하여, 인간이나 동물과 유사한 보행동작을 하며 바퀴를 이용한 이동기구(wheeled vehicle)로는 이동하기 어려운 불규칙지형(irregular terrain)까지도 원활하게 보행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 불규칙지형을 보행하며 작업을 수행하기 위해서는 지형에 대한 높은 적응성이 필요한데 계단을 오르거나 굴곡이 있는 지형에서 안정되게 보행하려면 여러가지 센서와 제어 알

고리즘이 필수적이다<sup>4,9,10</sup>. 일본 기계연구소의 6각 보행로봇인 MELWALK-III의 경우는 발바닥 기구에 부착된 힘센서를 이용하여 변형이 있는 무른지형에서 안정된 자세를 유지하며 보행하였다. OSU의 ASV(Adaptive Suspension Vehicle)와 Hexapod에서는 Active compliance 개념<sup>8</sup>을 이용한 제어 알고리즘을 제시하였다. 힘센서를 이용하는 경우 원거리 비주얼(long range visual)센서 즉, CCD 카메라나 레어저를 이용한 원거리센서에서 얻을 수 없는 지형특성을 비교적 정확히 유추할 수 있어서 효과적이다.

---

공과대학 전기공학과 대학원 졸업

\* 공과대학 전자공학과 부교수

## 2. 문제의 설정

지형은 그 외형적인 모양과 표면의 특성에 따라 많은 차이가 있다. 지형은 표면에 가해지는 하중에 의해 변화를 일으키게 되는데, 콘크리트와 같이 단단한 지면은 변화량이 매우 작으며, 진흙과 같은 지면에서는 하중에 대한 변화량이 크다. 지형변화량은 지면에 가해지는 하중에 비례하고 식(1)과 같이 표현된다.

$$F = (K_c/b + K_f) z^n \dots\dots\dots (1)$$

$K_c$ ,  $K_f$ 는 각각 지면의 응집력(cohesion), 마찰력(friction)이며,  $b$ 는 접지면의 면적,  $k$ 와  $n$ 은 각각 지형상수이다. 연구 대상인 4각 보행로보트는 이동속도가 느리므로 접지면과의 미끄러짐에 의한 마찰력은 무시할 수 있으므로 지면 마찰상수  $K_f = 0$ 으로 놓으면,

$$F = (K_c/b) z^n \dots\dots\dots (2)$$

여기에 접지면의 면적은 언제나 일정하다고 가정하면 즉,

$$k = K_c/b \dots\dots\dots (3)$$

따라서, 지형 변형량  $z$ 에 대한 힘값  $F$ 는

$$F = k z^n \dots\dots\dots (4)$$

이고, 지형변형량에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$z = \sqrt[n]{F/k} \dots\dots\dots (5)$$

여기에서  $k$ ,  $n$ 은 다음과 같이 구해진다. 팔호 속의 첨자는 얻어진 힘값과 지형변형량의 번호, 아랫첨자  $i$ 는 다리 번호이다.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{F_i^{(1)}}{F_i^{(2)}}\right)}{\ln\left(\frac{z_i^{(1)}}{z_i^{(2)}}\right)} \dots\dots\dots (6)$$

$$k = \frac{F_i^{(1)}}{(\delta i^{(1)})^n} \dots\dots\dots (7)$$

지형이 어느 정도의 복원량을 가질 경우  $F_i$ 가  $f_i$ 에서 0으로 감소하며  $z_i$ 의 지형복원이 일어난다. 이러한 특성은 실제의 적용에서 지형의 복원량, 기구적 변형의 회복, 그리고 발바닥에 붙이는 완충제의 복원력이 결합된 형태로 볼 수 있다. 힘값이 감소하는 경우에 대한 힘값과 지형 복원량은 아래 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$f = u z_i + c \dots\dots\dots (8)$$

여기에서 복원 계수  $u$ 와  $c$ 는

$$u = \Delta f / \Delta z_i \dots\dots\dots (9)$$

$$c = \delta - (f / \Delta f) \delta_i \\ = \delta - f / u \dots\dots\dots (10)$$

이다. 감소한 힘 값  $\Delta F_i$ 에 대한 복원량  $z_i$ 은 아래와 같이 구해진다.

$$z_i = \Delta f / u \dots\dots\dots (11)$$

몸체의 자세각에 의해 변화하는 각 다리의 하중은 식 (12), (13)과 같이 변화된  $xy$ 좌표를 구하여 부록에 보인 힘 평형방정식에 대입한다. 이를 다리의 착지시기와 동체 추진시기에 필요한 원하는 힘값( $f_d$ )을 구할 때 고려한다.

$$x_i' = \begin{cases} x_i - h \tan\beta & \text{if } i = 1, 2 \\ x_i + h \tan\beta & \text{if } i = 3, 4 \end{cases} \dots\dots(12)$$

$$y_i' = \begin{cases} y_i - h \tan\alpha & \text{if } i = 1, 3 \\ y_i + h \tan\alpha & \text{if } i = 2, 4 \end{cases} \dots\dots(13)$$

여기에서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 각각 roll각과 pitch각이고  $h$ 는 몸체의 높이이다.  $x$ ,  $y$ 는 각 다리의 COG로부터의 좌표, 첨자  $i$ 는 다리의 번호를 표시한다.

### 3. 제어알고리즘

#### 3-1. 개요

제안된 무른지형에 대한 제어 알고리즘의 개념도는 그림 1과 같다. 그림 2와 같이  $f_d$ 에 대해서만 제어하는 경우는 각 다리의 정확한 하중분포를 알고 있어야 하는데 실제의 로봇 몸체는 균일한 질량분포를 보이지 않고 다

리의 움직임에 따라 구동부가 움직이면서 몸체의 무게중심(COG)의 위치도 변하게 되어 정확한 제어가 어려운 단점을 가진다. 또한 이것으로 인해 몸체의 자세각이 기울어지는 것을 막을 수 없다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 힘값에 의한 지형 변형 보상과 함께 자세각보상을 추가하여 안정된 자세를 유지하도록 한다(그림 1). 자세각에 대한 보상을 추가 할 경우 기구적으로 무게중심이 기하학적인 중심과 정확히 같지 않거나 다리의 움직임에 따른 무게중심의 이동 또는 임의의 외부 하중이 가해져도 원하는 자세를 유지 시킬 수 있다.

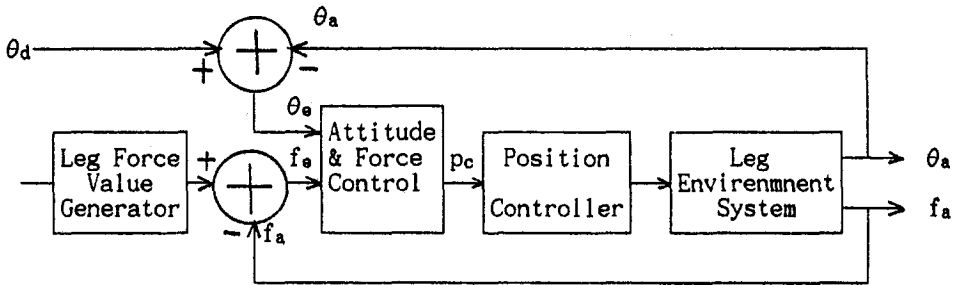


그림 1. 제안된 제어 알고리즘의 개념도

Fig. 1 Flow chart of the proposed control algorithm.

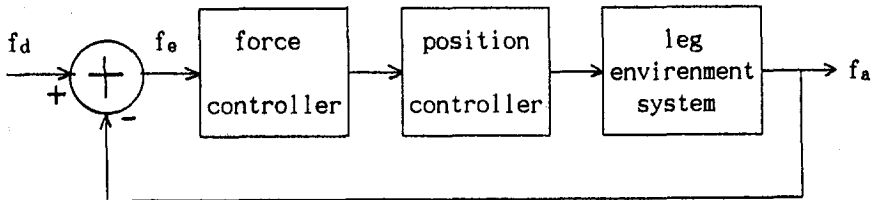


그림 2. 힘 값만을 고려한 보상 제어 알고리즘

Fig. 2 Compensation algorithm with force only.

#### 3-2. 지형변형 보상 알고리즘

지형변형을 보상하기 위해서는 착지시기와 동체 추진시기에 각각 다르게 힘값이 변화하므로 착지시기와 동체 추진시기로 나누어 보상한다.

##### 3-2-1. 착지시기의 동작

다리  $i$ 가 착지시기에 있을 때 다리가 지면에 닿는 순간부터 힘값이  $f_i$ 로 증가하여 지형 변형  $\delta_i$ 가 발생한다. 힘센서 출력  $F_i$ 가 0에서  $f_i$ 로 증가할 때 매 샘플링 간격마다 다리의 내

립량  $\Delta Zi$ 와 힘값의 변화량  $\Delta fi$ 로부터 식 (5)의 지형상수  $k$ 와  $n$ 을 결정할 수 있다. 얻어진 힘값( $f_a$ )이 원하는 힘값( $f_d$ )에 만족되면 다리의 착지시기를 완료한다. 실제로 다리  $i$ 에 인가되는 하중이  $f_d$ 보다 작을 경우에는 착지동작에 의해 지형변형량 이상의 구동이 있게 되어 몸체의 자세각이 변화한다. 이때 자세각 오차  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$ 로부터 다음과 같이 착지 다리의 보상 구동량  $Zi$ 를 구할 수 있다.  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$ 는 미소하므로  $\cos\theta = 1$ ,  $\sin\theta = \theta$ 로 근사화하고 지형의 복원량을 고려하여 식(15)와 같이 표현된다.

$$\Delta Zi = \begin{cases} -(|xi| + |x\bar{i}|)\Delta\beta + (|yi| + |y\bar{i}|)\Delta\alpha + \Delta f/u, & \text{if } i \leq 2 \\ (|xi| + |x\bar{i}|)\Delta\beta + (|yi| + |y\bar{i}|)\Delta\alpha + \Delta f/u, & \text{if } i > 2 \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

여기에서  $x_i, y_i$ 는 착지다리의  $x, y$ 의 좌표이고  $x\bar{i}, y\bar{i}$ 는 착지다리의 대각방향에 존재하는 다리의 좌표이다. 그림 3에서 4번 다리의 착지시기에 생기는 자세각의 변화는 구동다리에 의한 것이므로 4번 다리의 보상량  $\Delta Zi$ 에 의해 보상할 수 있다.

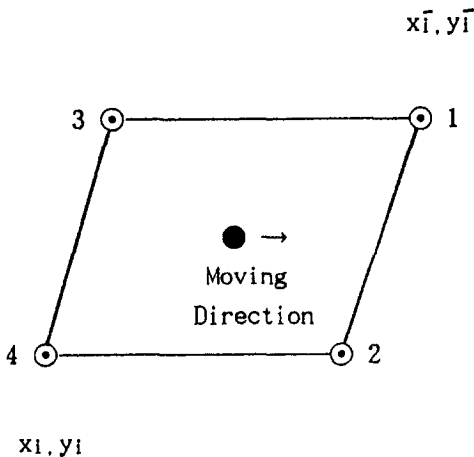


그림 3. 착지시기에 따른 자세각의 변화  
**Fig. 3** Variation of pitch angle.

### 3-2-2. 동체 추진시기의 제어

착지동작 후 동체 추진시기에 각 다리에 분배되는 하중은 달라진다. 하중이 증가되는 다리의 착지점에 지형변형이 생기게 되고 이것에 의해 몸체의 자세각이 달라지므로  $\Delta fi$ 에 대한 착지점의 추가적인 변형의 보상이 필요하다. 동체의 이동에 의한 무게중심의 변화에 의한 각 다리의 힘값 변화량은 다음을 만족한다<sup>1), 8)</sup>.

$$\Sigma Fi = W \dots\dots\dots (17)$$

$$\Sigma (Fi + \Delta Fi) = W \dots\dots\dots (18)$$

여기에  $\Delta Fi$ 는  $\Sigma \Delta Fi = 0 \dots\dots\dots (19)$

이다. 식(19)는 음(-)의 방향의  $\Delta Fi$ 가 적어도 하나 존재함을 나타낸다. 지형이 완전히 복원성이 없다고 가정할 때  $\Delta Fi > 0$ 인 다리의 보상 구동만이 필요하지만 지형에 복원성이 있는 경우 복원량을 고려하여야 한다. 힘값이 증가하는 다리  $i$ 의 보상량은 착지점(supporting point)의 하중에 대한 지형 변형량의 관계를 식(5)로 표현할 수 있으므로 다음과 같이 구해진다<sup>1)</sup>.

$$\Delta zi = \left[ \frac{fi + \Delta fi}{k} \right]^{1/n} - \left[ \frac{fi}{k} \right]^{1/n} \dots\dots (20)$$

그러나 하중 분포의 불균일, 부정확한 지형 특성, 또는 지형특성이 정확하게 생성된 지형 모델을 만족시키지 못할 때에는 보상 구동량  $\Delta zi$ 에 의해 적절한 제어가 이루어지지 않아 생기는 자세각 변화량  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$ 에 대한 보상량  $\Delta zi$ 는 아래와 같다.  $x_i, y_i$ 는  $\Delta fi > 0$ 인 다리의 위치,  $x\bar{i}, y\bar{i}$ 는 대각방향에 존재하는  $\Delta fi < 0$ 인 다리의 위치이다.

$$\Delta zi = -(x_i + x\bar{i} + \Delta fi/u)\Delta\alpha + (y_i + y\bar{i} + \Delta fi/u)\Delta\beta, \text{ if } \Delta fi > 0 \dots (23)$$

$$\Delta z_i = \Delta f_i / u, \text{ if } \Delta f_i < 0 \dots\dots\dots (24)$$

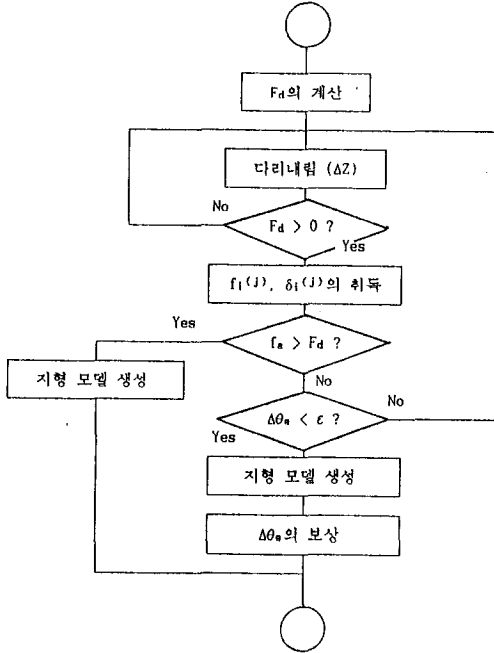


그림 4. 착지시기의 제어 흐름도  
 Fig. 4 Flow chart of the leg-down phase.

#### 4. 결 과

시뮬레이션 프로그램은 C언어로 작성되었으며 제어부와 실행부, 그리고 지형생성을 위한 지형생성부와 모니터상에 정보를 디스플레이하는 부분으로 나뉘어진다. 각 부분들의 매개변수(parameter)들은 구조체(struct)에 등록되어 있다.

그림 6과 7은 추정된 지형계수 k, n이다. 주어진 값은 각각 n=4.0, k=0.1이다. 식 (7)에서 지형계수를 추정하기 위한 힘값 F<sup>(1)</sup>, F<sup>(2)</sup>를 임의의 값으로 주었을 때의 추정된 값이다. 그림 8, 9는 불규칙 무른지형을 보행한 경우의 자세각 변화이다. 원하는 자세를 수평 자세(0°)로 하였을 때 힘제어와 자세각제어가 추가된 결과를 시간축에 대하여 보였다. 제어가 없이 보행한 경우 pitch 자세각이 심하게 변하고, roll각의 경우도 좌우로 상당히 크게

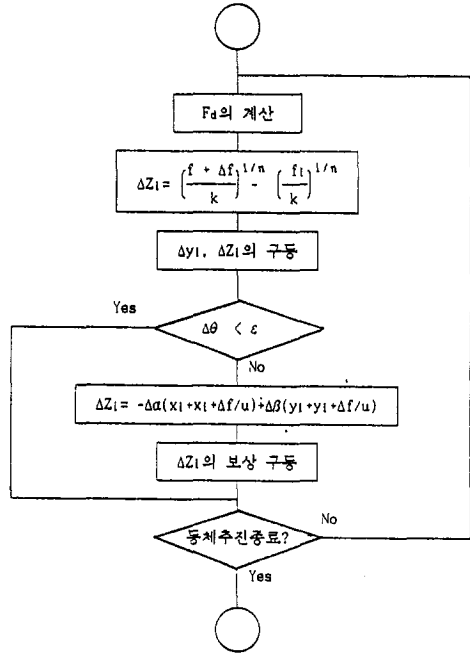


그림 5. 동체 추진시기의 제어 흐름도  
 Fig. 5 Flow chart of the body-propelling phase.

움직이는 것을 볼 수 있다. 힘제어만을 추가시킨 경우 변화의 정도가 급격히 줄어들지만 보행 주기가 반복됨에 따라 자세각 오차가 누적된다. 자세각을 제어를 추가한 경우는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 실제의 구현에서는 자세각센서와 힘센서의 오차가 있으므로 본 논문에서 보인 결과보다 자세각 오차가 클 것으로 생각된다. 그림 10과 11은 외부하중(external load)이 몸체에 가해진 경우에 대하여 힘 제어에 의한 경우와 자세각 제어를 같이 한 경우의 결과이다. 외부하중은 랜덤하게 생성하였고 걸음새 주기에서 지지다리 변경시기와 동체 추진시기에 임의의 다리에 가하는 방법으로 하였다.

Soil Parameter K

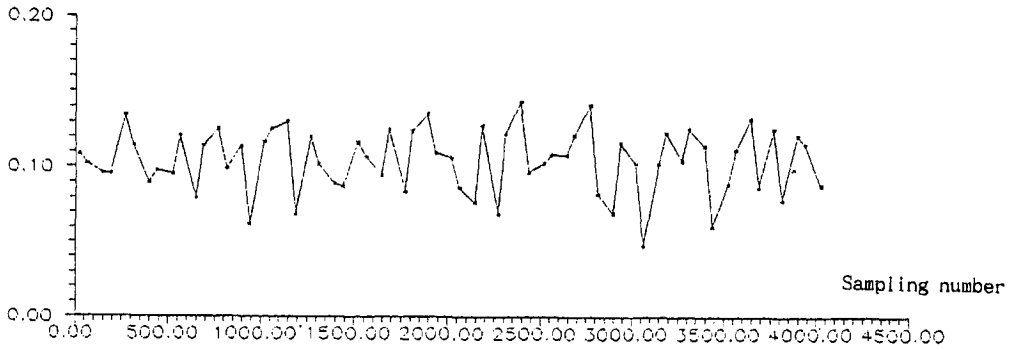


그림 6. 지형계수 K의 추정 값(K=0.1)

Fig. 6 Estimated value of soil parameter K.

Soil Parameter N

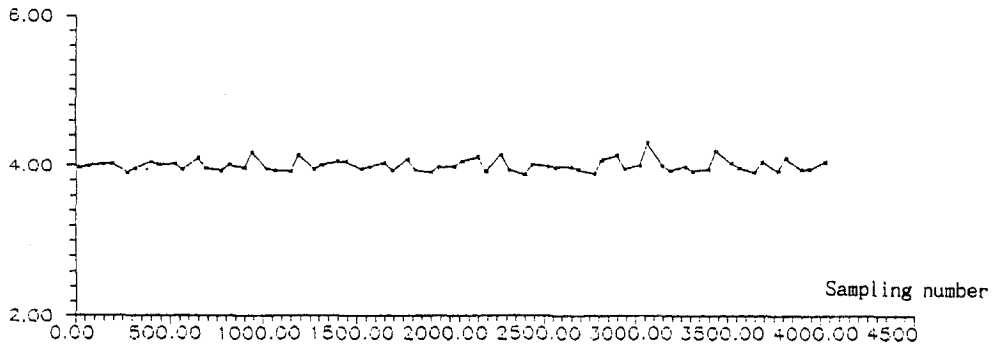


그림 7. 지형계수 N의 추정 값(N=4.0)

Fig. 7 Estimated value of soil parameter N.

Pitch angle(degree)

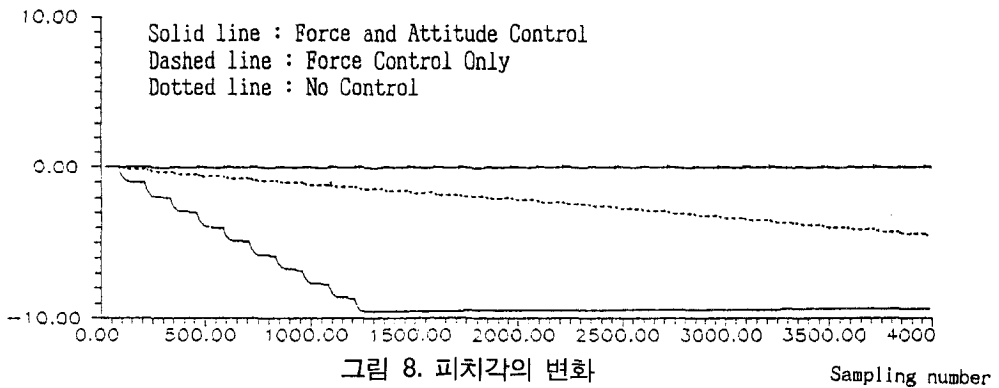


그림 8. 피치각의 변화

Fig. 8 Variation of pitch angle.

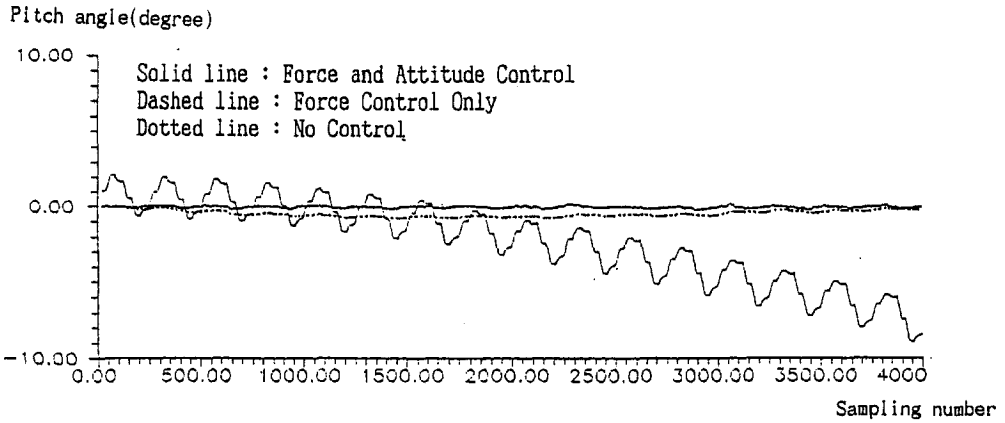


그림 9. 롤각의 변화  
Fig. 9 Variation of roll angle.

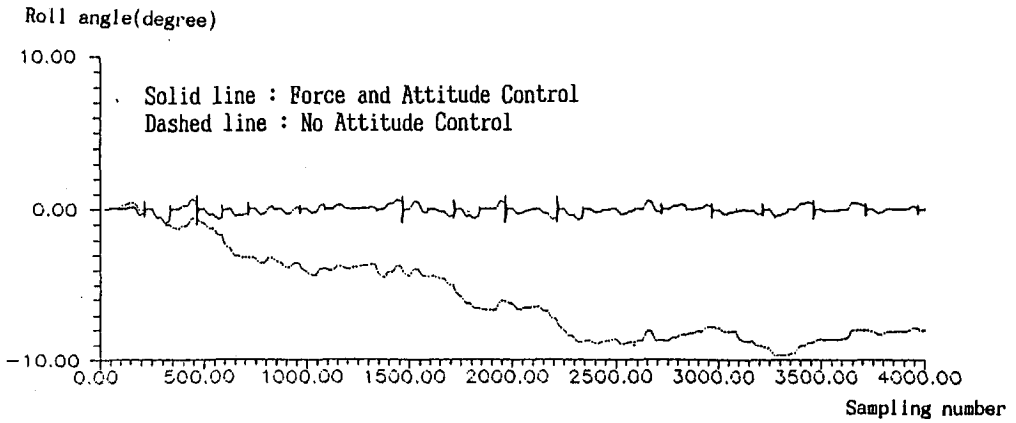


그림 10. 임의의 외부하중(15kg)에 의해 무게중심이 바뀌는 경우의 피치각의 변화  
Fig. 10 Variation of pitch angle (displacement of COG with external load)

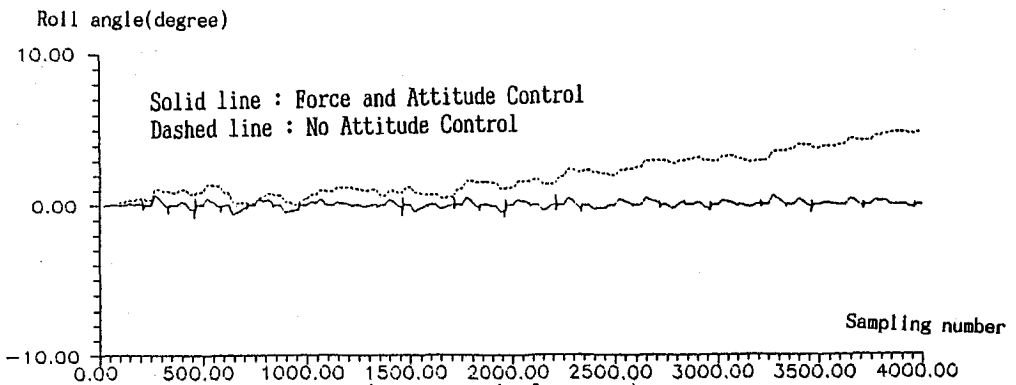


그림 11. 임의의 외부하중(15kg)에 의해 무게중심이 바뀌는 경우의 롤각의 변화  
Fig. 11 Variation of roll angle (displacement of COG with external load)

## 5. 결 론

무른지형의 변형에 대한 보상 알고리즘에 자세각 보상을 추가한 결과, 변형이 비교적 큰 지형에서 자세각을 일정한 범위내에서 유지시켰다. 로보트의 하중분포를 단일 하중분포로 단순화 한 경우에는 자세각의 변화가 작지만 외부하중이 몸체에 인가된 경우 힘값에 의한 지형변형에 대한 보상만으로는 안정된 자세를 유지시키기 어렵다. 따라서 불균일 하중분포와 힘센서의 오차등을 감안할 때 실제의 구현에서는 자세각센서와 그에 대한 자세 제어 알고리즘이 필수적이라 하겠다.

본논문의 대상으로 고려한 4각 보행로보트의 경우 보행속도가 작은 정적걸음새(static gait)이므로 동적특성을 생각하지 않고 정적인 경우로 가정하여 알고리즘을 제안하였다. 그러나 보행속도가 증가할 경우 가감속에 대한 관성과 미끄러짐등 동적으로 작용하는 힘을 무시할 수 없으므로 이를 고려한 무른지형에 대한 제어 알고리즘의 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Makoto Kaneko, Kazuo Tanie, Mohamad Nor Mohamad Than, "A Control Algorithm for Walking Machine over Soft Ground", IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. 4, No. 3, June, 1988.
2. Seung-Ha Lee, "Force Sensor Based Locomotion Control of a Quadruped Walking Vehicle over Unknown Terrain", KAIST, Master Thesis.
3. S. Hirose, Y. Fukuda and H. Kikuchi, "Control System for Quadruped Walking Robot", JRSJ, Vol. 3, No. 4, August, 1985.
4. D. J. Todd, "Walking Machines, An Introduction to Legged Robots", Kogan Page Ltd., 1985.
5. D. E. Orin, "Supervisory Control of a Multilegged Robot", Int. J. of Robotics Res., Vol. 1, No. 1, pp. 79~91, Spring, 1982.
6. Wha-Joon Lee, D. E. orin, "The Kinematics of Legged Locomotion over Uneven Terrain", IEEE Proc. of Robotics and Automation, pp. 90~95, 1986.
7. Tsu-Tian Lee, Chiag-Ming Liao and Ting-Kou Chen, "On the Stability Properties of Hexapod Tripot Gait", IEEE J. of Robotic and Automation, Vol. 4, No. 4, August, 1988.
8. Charles A. K., Karl W. O., Dennis R. P., "Use of Force and Attitude Sensors for Locomotion of a Legged Vehicle over Irregular Terrain", Int. J. of Robotics Res., Vol. 2, No. 2, Summer, 1983.
9. Wesley E. S., "Industrial Robots", Prentice Hall Inc., 1985.
10. KAIST, "다각 보행로보트의 개발(1차년도 최종보고서)", 과학기술처, 1988.
11. KIMM, "다각 보행로보트를 위한 서보제어기 및 제어 알고리즘의 개발", 과학기술처, 1990.
12. Chi-Keng Tsai, David E. O., "Using Proximity Sensing in Robot Control", IEEE Proc. of Robotics and Automation, pp. 1502~1507, 1986.
13. Byung S. Choi, Shin-Min Song, "Fully Automated Obstacle-Crossing Gaits for Walking Machines", IEEE Proc. of Robotics and Automation, pp. 802~807, 1988.