
4족 보행로봇의 자세각 제어에 관한 연구

엄한성*

A Study on Attitude angle control of Quadruped Walking Robot

Han-Sung Eom*

요 약

본 연구에서는 OpenGL 프로그램으로 4족 보행로봇인 TITAN-VIII의 가상로봇을 설계한 후, 실제로봇의 관절각도, 본체 자세각을 가상로봇에 입력하고 벡터 회전과 평행이동을 이용하여 보행 중 본체를 수평으로 유지하는 제어를 10[ms]마다 행하였다. 디딤을 β 를 0.5로 일정하게 하고, 주기가 1.5, 2.0, 3.0[sec]일 때 한주기당 이동거리를 0.2, 0.3[m]로 변경하여 좌우요동보행을 시키면서 가상로봇의 ZMP, 실제로봇의 ZMP, 무게 중심의 이동경로를 구하고 발바닥 좌표 변화와의 관계를 비교 분석하였다.

ABSTRACT

In this paper, we used the quadruped walking robot Titan-VIII in order to carry out this simulation of sway compensation trajectory. The attitude angle ϕ_r and ϕ_b is obtained from 3-D motion sensor that is attached at the center of robot body and the attitude control carried out at every 10[ms] for stable gait of robot. Duty factor, that is fixed at 0.5. When we change period T into 1.5, 2.0, 3.0[sec] each and moving distance per period is changed into 0.2, 0.3[m], we simulate several walking experiment of robot. and then we analyze the experiment results if there are any difference between the imaginary ZMP and actual ZMP of robot and the stable gait of robot is realized.

키워드

sway compensation trajectory(좌우요동보행), quadruped walking robot(4족 보행로봇), TITAN-VIII(로봇 모델명), attitude angle(자세각)

I. 서론

4족 보행로봇이 보행 중 전도되는 것을 피하기 위해서는 적절한 보행방법 선정, 기구학, 정역학 및 동역학적 해석, 주기적인 보행 계획, ZMP(Zero Moment Point) 제어, 안정도 해석 및 외력에 대한 적응 등의 특별한 제어가 필요하다.[1,2] 보행방법은 항상 정적인

평형상태를 유지하는 정적보행(Static walking)과 이동 중에 발생 하는 몸의 불균형을 능동적으로 대처하여 몸의 균형을 유지하는 동적보행(Dynamic walking)으로 나눌 수 있다.[3,4] 보행 중 지지하는 다리들의 평균수가 3개 이상이면 정적보행이고, 지지하는 다리의 수가 3개보다 적은 주기(Period)가 존재하면 동적보행이다. 4족 보행로봇의 경우 이동 속도를 고속화하기 위해서

는 반드시 동적보행이 필요하다. 로봇에서 실제로 움직이는 것은 관절의 각도이므로 로봇본체의 위치, 자세각 및 관절각도와와의 관계를 벡터 회전과 평행이동을 통해서 해석하고, 관절의 이동량을 결정하는 것이 보편적이다.[3,5]

본 논문에서는 OpenGL 프로그램으로 4족 보행로봇인 TITAN-VIII의 가상로봇을 설계한 후, 실제로봇의 관절각도, 본체 자세각을 가상로봇에 입력하고 벡터 회전과 평행이동을 이용하여 보행 중 본체를 수평으로 유지하는 제어를 10[ms]마다 행하였다. 디듀티(Duty factor) β 를 0.5로 일정하게 하고, 주기와 한주기당 이동거리를 변경하면서 동적보행 방법인 R. Kurazume 등이 제안한 좌우요동보행(Sway compensation trajectory)을 시켰을 때,[6,7] 가상로봇의 ZMP, 실제 로봇의 ZMP, 무게중심(Center of weight) 이동경로를 구하고 발바닥 좌표 변화와의 관계를 비교 분석하였다.

II. 4족 보행로봇의 자세제어

보행로봇의 중심을 원점으로 하고 x, y, z축을 그림 1과 같이 취한 좌표계 G_{xyz} 를 강체좌표계(Body coordinate frame)라 한다. 중력방향과 반대에 Z축, 강체의 x축을 수평면으로 투영한 방향에 X축, 이들과 오른손좌표계를 이루도록 Y축을 취하고, 강체 중심을 원점으로 하는 좌표계 GXYZ를 직교좌표계(Cartesian coordinate frame)라 한다.[8]

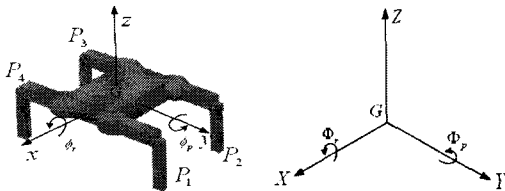


그림 1. 4족 보행로봇의 강체좌표계와 절대좌표계
Fig 1. Body and cartesian coordinate frame of quadruped walking robot

X축으로 Φ_r , Y축으로 Φ_p 회전을 행하는 회전변환 행렬을 A_{rp} , 피칭각 자세센서를 Y축으로 임의의 피칭각도 θ_p 만큼 회전시켰을 때 단위벡터를 g^p 라 하면,

고정한 진동자 벡터 $A_{rp}(g^p)$ 는

$$A_{rp}(g^p) = \begin{bmatrix} -C_{\phi_p}S_{\theta_p} - S_{\phi_p}C_{\theta_p}C_{\phi_r} \\ S_{\phi_p}C_{\theta_p} \\ S_{\phi_p}S_{\theta_p} - C_{\phi_p}C_{\theta_p}C_{\phi_r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

로 된다. 여기서 θ_p 가, ϕ_p 와 일치하기 위한 조건은, 벡터 $A_{rp}(g^p)$ 의 Z성분이 최소 값을 가지면 된다. 이 조건은

$$\partial\{A_{rp}(g^p)\}_z / \partial\theta_p = 0, \quad \theta_p = \phi_p \quad (2)$$

로 쓸 수 있으므로

$$\begin{aligned} \sin\Phi_p \cos\phi_p + \cos\Phi_p \cos\Phi_r \sin\phi_p &= 0 \\ \tan\Phi_p + \cos\Phi_r \tan\phi_p &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

으로 된다.

같은 방법으로 롤링각 자세센서를 X축으로 임의의 롤링각도 θ_r 만큼 회전시켰을 때 그 자세를 나타내는 단위벡터를 g^r 이라 하면, g^r 에 A_{rp} 의 회전변환을 가하면 고정된 진동자 벡터 $A_{rp}(g^r)$ 는

$$A_{rp}(g^r) = \begin{bmatrix} S_{\phi_p}S_{\theta_r}S_{\theta_p} - S_{\phi_p}C_{\theta_r}C_{\theta_p} \\ C_{\phi_p}S_{\theta_r} + S_{\phi_p}C_{\theta_r} \\ C_{\phi_p}S_{\theta_p}S_{\theta_r} - C_{\phi_p}C_{\theta_r}C_{\theta_p} \end{bmatrix} \quad (4)$$

으로 된다. 여기서, $A_{rp}(g^r)$ 의 Z성분을 최소로 하는 각도 θ_r 이 직교좌표계에서 Φ_r , Φ_p 회전이 가해진 경우 롤링각 센서가 취하는 각도 ϕ_r 을 나타낸다. 이 경우 $\theta_r = \phi_r$ 로 된다. 따라서

$$\partial\{A_{rp}(g^r)\}_z / \partial\theta_r = 0, \quad \theta_r = \phi_r \quad (5)$$

를 계산함으로써

$$\begin{aligned} \cos\Phi_p \sin\Phi_r \cos\phi_r + \cos\Phi_p \cos\Phi_r \sin\phi_r &= 0 \\ \tan\Phi_r + \cos\Phi_p \tan\phi_r &= 0 \\ \therefore \Phi_r &= -\phi_r \end{aligned} \quad (6)$$

가 구해진다. (3), (6)식으로부터 로봇 자세신호가 ϕ_r, ϕ_b 로 주어진 경우 강체의 직교좌표계에 대한 기울어진 각 ϕ_r, ϕ_b 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \phi_r &= -\phi_r \\ \phi_b &= \tan^{-1}(-\cos(-\phi_r)\tan\phi_b) \end{aligned} \quad (7)$$

(7)식에 의해 강체의 경사각 ϕ_r, ϕ_b 둘 모두 관측이 가능하게 된다. 마지막으로, 로봇의 경사각을 이용하여 자세제어를 위한 다리의 이동량을 산출한다.

i 개의 다리를 가진 로봇에서 다리 i 의 강체좌표는 $P_i(x_i, y_i, z_i)^T$ 로 한다. 강체좌표계가 직교좌표계와 일치하고 있으며, P_i 는 그대로 직교좌표를 나타낸다. 그러나, 강체가 A_{rp} 로 표시되는 경사각을 이루는 경우에는 다리 i 의 강체좌표계로의 위치 P_i 는 직교좌표계로 관측하면 다른 값으로 된다. 이것은 이후, $P'_i(x'_i, y'_i, z'_i)^T$ 로 표시한다. 문제는 A_{rp} 만큼 기울어져 있는 로봇이 자기 자신의 강체 좌표계에 대하여 어느 정도 다리 i 를 앞으로 움직이면 그 자세를 수평으로 유지할 수 있는가, 즉 강체좌표계를 직교좌표계와 일치시킬 수 있는가 하는 것이다. 이를 위해서는 모든 다리 i 를 고정하고, 직교좌표계와 일치하는 수평인 기준자세를 취할 때까지 움직이는 가상 실험을 생각하는 것이 좋은 방법이다. 이 경우 지면 등에 장애물 없으면, 다리 i 의 선단은 직교좌표계 P_i 의 위치에 당연히 도달하게 된다. 그러나 다리 i 는 지면에 접지한 상태를 유지하고 처음의 위치에 머물러 움직일 수 없다면, 그 위치는 P_i 를 직교좌표계로부터 표기한 P'_i 로 된다. 즉 다리 i 의 다리선단은 강체좌표계상에서 P_i 에서 P'_i 로 이동해야만 하게 한다. 반대로 다리를 강체좌표계에 있어서 P_i 에서 P'_i 로 구동하면, 강체가 직교좌표계로 수평 기준자세로 되돌리는 것은 쉽게 추측할 수 있다. P'_i 는

$$P'_i = A_{rp}(P_i) \quad (8)$$

이다. 따라서 자세를 수평으로 하기 위한 다리 i 의 이동량 $\Delta P_i(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)^T$ 는

$$\Delta P_i = P'_i - P_i \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{\phi_r} - 1)x_i + S_{\phi_r}S_{\phi_b}y_i + S_{\phi_r}C_{\phi_b}z_i \\ (C_{\phi_r} - 1)y_i - S_{\phi_r}z_i \\ -S_{\phi_r}x_i + C_{\phi_r}S_{\phi_b}y_i + (C_{\phi_r}C_{\phi_b} - 1)z_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

으로 된다. (7)식을 (10)식에 대입하면, 임의의 자세각 ϕ_r, ϕ_b 가 검출된 경우 다리 i 의 이동량 ΔP_i 가 구해지게 된다. 만일 자세제어가 보행중 항상 실시되고 ϕ_r, ϕ_b 모두 매우 작은 경우에는 (7)식은

$$\begin{aligned} \phi_r &= -\phi_r \cong 0 \\ \phi_b &= -\phi_b \cong 0 \end{aligned} \quad (11)$$

과 같이 센서출력과 직교좌표계에서의 각도가 직접적으로 대응한다. 이 때문에 자세각 ϕ_r, ϕ_b 에 대응하는 다리의 이동량은

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\phi_b z_i \\ \phi_r z_i \\ \phi_b x_i - \phi_r y_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

로 된다.[8]

III. 보행 장치

그림 2는 4족 보행로봇인 TITAN-VIII의 사진을 나타내고 있다. 각각의 다리는 3자유도를 가지고 있어 로봇은 12자유도를 가지고 있다.

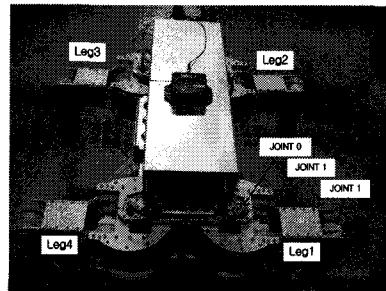


그림 2. TITAN-VIII의 사진
Fig 2. Photograph of the TITAN-VIII

그림 3은 보행로봇의 전압 극성에 따른 관절의 회전방향을 나타내고 있다. (a)는 위에서 내려다본 로봇의 모습으로 M1(Motor 1) 모터에 가한 +, - 전압에 따른 회전방향을 나타내고 있으며 (b)는 정면에서 본 모습으로 M2, M3 모터의 회전에 따른 관절의 움직임은 모습을 나타내고 있다. 앞다리과 뒷다리 사이의 간격은 0.4[m]이고, 정면에서 본 폭이 0.6[m], M3에 의해서 동작하는 관절의 높이가 0.243[m]이다.

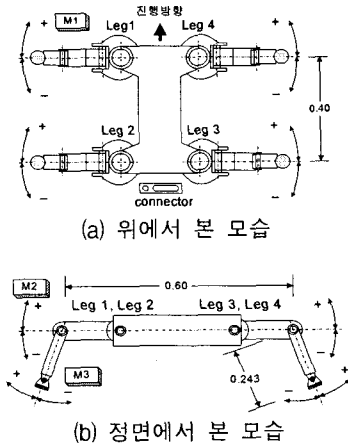


그림3. TITAN-VIII의 관절 회전방향
Fig 3. Rotating direction of the TITAN-VIII joint

그림 4는 로봇의 무게중심을 G_{xyz} 로 하는 강체좌표계에서 네발이 모두 접지하고 있을 때 Leg1을 기준으로 하는 발바닥 좌표를 나타낸 것으로 각각 Leg1은 (0.20, 0.30, -0.243), Leg2는 (-0.20, 0.30, -0.243), Leg3은 (-0.20, -0.30, -0.243), Leg4는 (0.20, -0.30, -0.243)이다. (12)식에서 구해지는 다리의 이동량은 G_{xyz} 에 직접 대응하는 좌표이다.

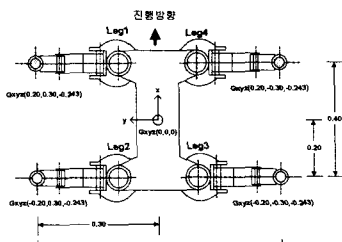


그림 4. TITAN-VIII의 발바닥 좌표
Fig 4. Foot position of the TITAN-VIII

IV. 보행실험 및 결과

4족 보행로봇인 TITAN-VIII을 Feed Forward 제어 하고 보행실험을 행하였다. 시간 경과에 따른 Time Step을 각각 $t-1$, t , $t+1$ 이라고 했을 때, t 에서 지령된 다리의 이동량을 기준으로 t 에서 실현된 상태량을 계산하고, $t+1$ 에서 실현되어야 할 다리의 이동량을 가상로봇이 계산하여 TITAN-VIII에 출력한다. 좌우요동보행에서 로봇의 질점을 고려할 때 ZMP 위치는 (G_x , G_y , G_z)로 한다. 바닥 면이 수평이라고 가정하고, 바닥으로부터의 높이 G_z 가 일정하다고 하면, 바닥 면 위에서의 위치 (G_x , G_y , G_z)는

$$G_x = x_0 + vt + \frac{1}{2} at^2 \quad (13)$$

$$G_y = C_1 e^{\sqrt{A}t} + C_2 e^{-\sqrt{A}t} + a_2 \frac{1}{2} t^2 + a_1 t + a_0 \quad (14)$$

$$G_z = 0 \quad (15)$$

이다.[7]

Time Step 10[ms]마다 가상로봇의 보행계획에 의해서 각 다리의 이동량을 D/A 보드로 출력하고, A/D 보드를 통해서 관절 각도를, 3D Motion Sensor 3DM-G로부터 실제로봇 본체의 자세각 ϕ_x , ϕ_y 와 각속도를 입력받아 로봇본체의 실제 ZMP를 구하고, 이 값을 다음 Time Step의 보행계획에 반영하였다. 디딤을 β 는 0.5로 일정하게 하고, 주기 T가 1.5, 2.0, 3.0[sec]일 때, 한주기당 이동거리 L을 0.2, 0.3[m]로 변경하여 보행 실험을 하였다. 매 Time Step마다 자세제어에 의한 발바닥 좌표와 가상로봇의 ZMP, 실제로봇의 ZMP 및 로봇본체 무게중심 이동경로를 구해서 결과를 비교 분석하였다. 그림 5는 주기 T가 2.0[sec], 한주기당 이동거리 L이 0.2[m]일 때, 보행 중 한 주기 동안 발바닥 좌표변화를 나타낸 것이다. 초기 자세는 진행방향에 대해서 서로 대각선상에 있는 Leg1과 Leg3은 접지상태, Leg2와 Leg4는 들어 올려져있는 상태이다. 보행이 진행되는 동안 발바닥은 화살표 방향으로 이동하게 된다.

반주기가 실현 되었을 때, Leg1과 Leg3의 G_x 좌표 변화량에 의해서 로봇본체가 0.1[m] 전진하게 되고,

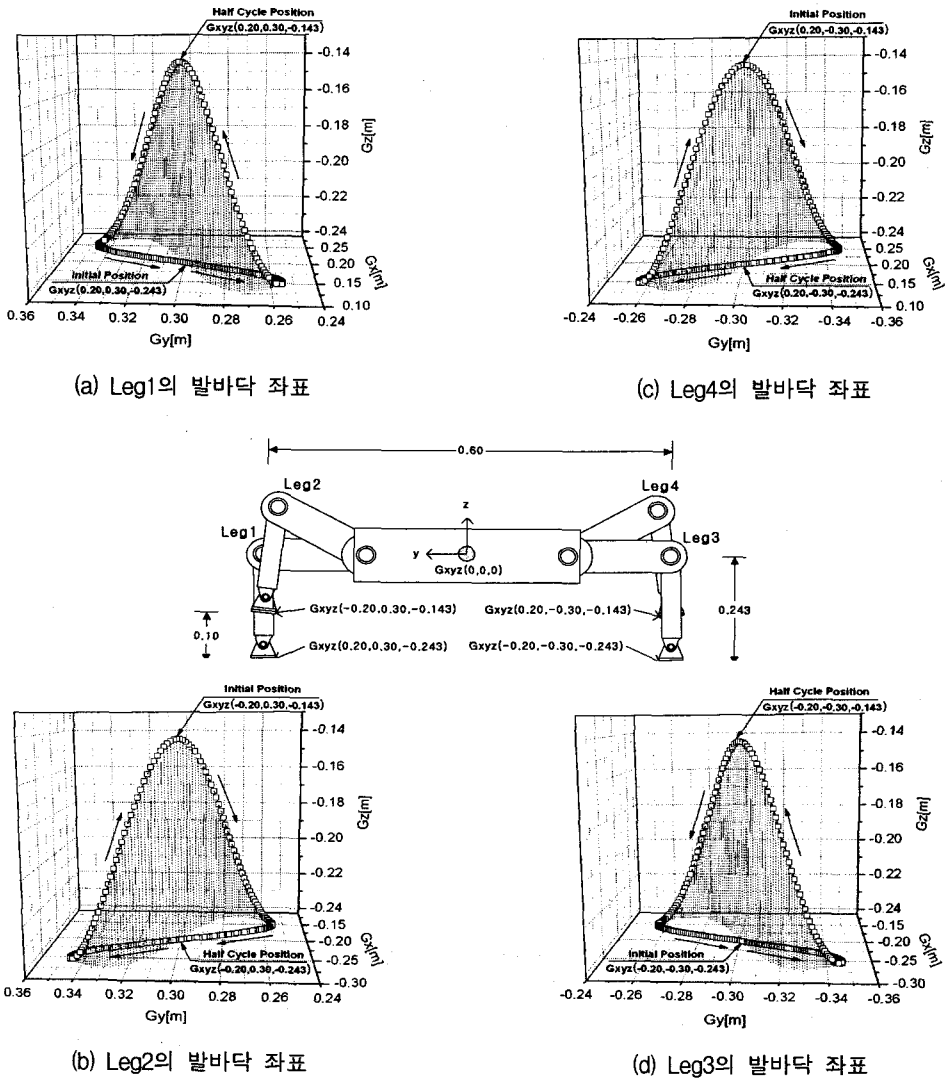


그림 5. T=2.0[sec], L=0.2[m]에서 TITAN-VIII의 발바닥 좌표
 Fig 5. Foot position of the TITAN-VIII at T=2.0[sec], L=0.2[m]

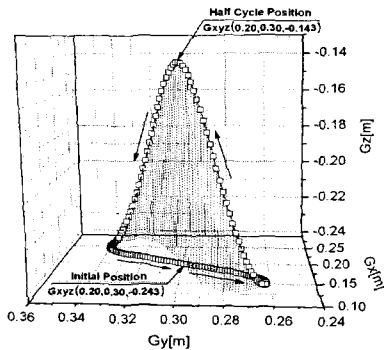
Leg2와 Leg4가 접지상태, Leg1과 Leg3은 들어 올려져 있는 상태가 된다. 다음 반주기를 실현 했을 때는 Leg2과 Leg4의 Gx좌표 변화량에 의해서 로봇본체가 0.1[m] 전진하게 된다. 결과적으로 한 주기를 완전히 실현 했을 때, 로봇본체는 0.2[m] 전진한 상태가 되고 각각의 발바닥은 초기위치에 다시 돌아오게 된다. 발바닥이 들어올러지는 높이, 즉 Gz방향 좌표를 0.1[m]로 제한을 하였는데 이것은 반복실험에 의해서 구해진

값으로 안정여유를 두기 위함이다. 4개다리는 각각 Gx와 Gy 값은 서로 방향이 다르지만, 그 크기는 같으므로 실험결과에서 Leg1의 좌표만 비교 분석하였다.

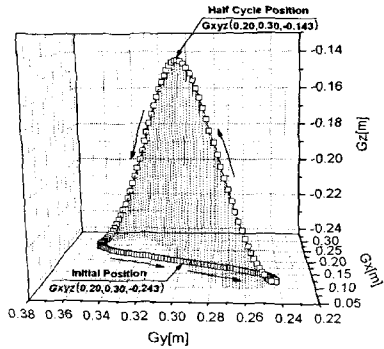
그림 6은 주기 T가 1.5[sec], 한주기당 이동거리 L이 0.2[m]와 0.3[m] 일 때 Leg1의 이동 좌표와 로봇본체 무게중심 이동을 나타낸 것이다. 보행 중 로봇본체를 수평으로 유지하기 위해서는 L값이 클수록 무게중심 이동이 많이 이루어져야 하는데, 무게 중심이동에 영

향을 미치는 G_y 좌표 변화량이 0.3[m]일 때가 많음을 알 수 있다. 본체 전진에 영향을 미치는 G_x 좌표 변화량은 0.3[m]일 때가 0.2[m] 일 때 보다 1.5배 크다는 것을 알 수 있다. 가상로봇의 ZMP를 실제로봇의 ZMP가 잘 추종하고, 무게중심 이동도 전형적인 좌우요동 보행의 특성을 나타내고 있다.

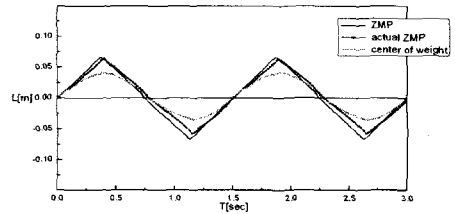
그림 7과 8은 각각 주기 T 가 2.0[sec]와 3.0[sec]일 때, 한주기당 이동거리 L 이 0.2[m]와 0.3[m]에서 Leg1의 이동 좌표와 로봇본체 무게중심 이동을 나타낸 것이다. 각 주기에 대해서 한주기당 이동거리가 클수록 G_y 좌표 변화량이 많아 무게중심 이동이 많이 이루어지고, G_x 좌표 변화량은 0.3[m]일 때가 0.2[m] 일 때 보다 1.5배 크다는 것을 알 수 있다. 위 실험조건에서도 가상로봇의 ZMP를 실제로봇의 ZMP가 잘 추종하고, 무게중심 이동도 전형적인 좌우요동 보행의 특성을 나타내고 있다.



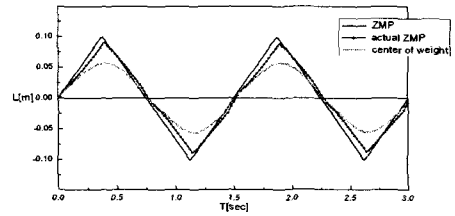
(a) $L=0.2[m]$ 에서 발바닥 좌표



(b) $L=0.3[m]$ 에서 발바닥 좌표



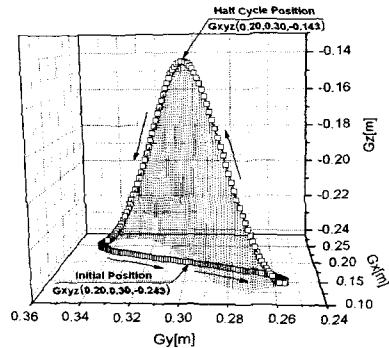
(c) $L=0.2[m]$ 에서 무게중심 이동



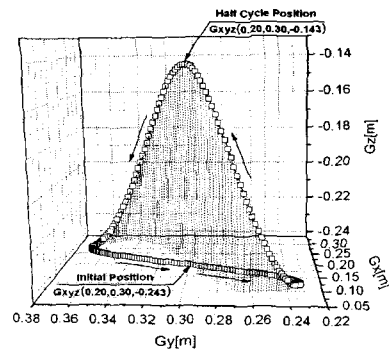
(d) $L=0.3[m]$ 에서 무게중심 이동

그림 6. $T=1.5[sec]$ 에서 발바닥 좌표와 무게중심의 이동

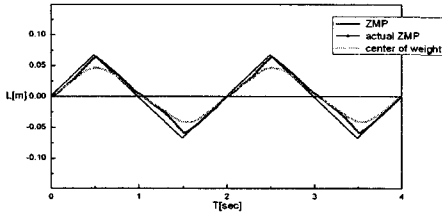
Fig 6. Movement of foot position and weight center at $T=1.5[sec]$



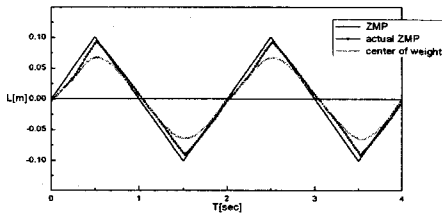
(a) $L=0.2[m]$ 에서 발바닥 좌표



(b) $L=0.3[m]$ 에서 발바닥 좌표



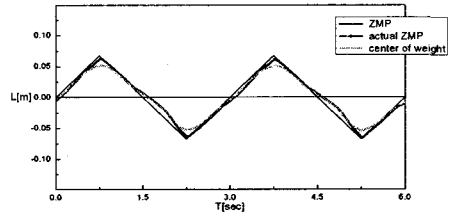
(c) L=0.2[m]에서 무게중심 이동



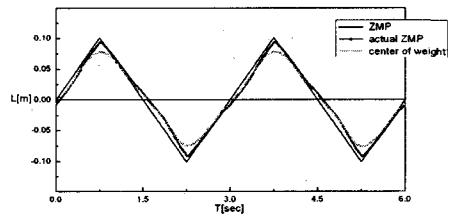
(d) L=0.3[m]에서 무게중심 이동

그림 7. T=2.0[sec]에서 발바닥 좌표와 무게중심의 이동

Fig 7. Movement of foot position and weight center at T=2.0[sec]



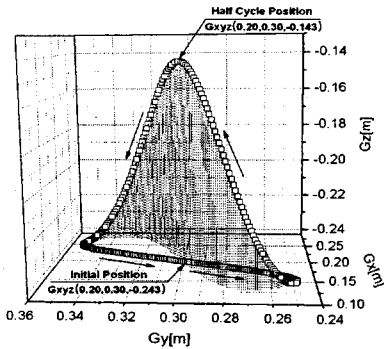
(c) L=0.2[m]에서 무게중심 이동



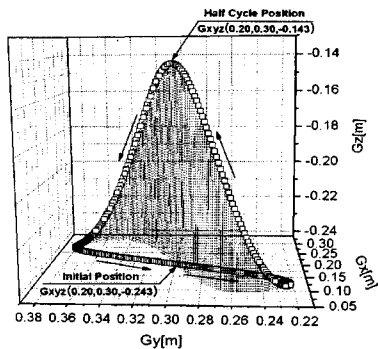
(d) L=0.3[m]에서 무게중심 이동

그림 8. T=3.0[sec]에서 발바닥 좌표와 무게중심의 이동

Fig 8. Movement of foot position and weight center at T=3.0[sec]



(a) L=0.2[m]에서 발바닥 좌표



(b) L=0.3[m]에서 발바닥 좌표

V. 결론

본 논문에서는 OpenGL 프로그램으로 4족 보행로봇인 TITAN-VIII의 가상로봇을 설계한 후, 실제로봇의 관찰각도, 본체 자세각을 가상로봇에 입력하고 벡터 회전과 평행이동을 이용하여 다리의 이동량을 결정하였다.

디딤을 β 는 0.5로 일정하게 하고, 주기와 한주기당 이동거리를 변경하면서 TITAN-VIII을 보행 실험한 결과 주기가 같을 때는 이동거리가 클수록 Gy좌표 변화량이 많았는데, 이동거리가 클수록 로봇본체의 수평을 유지하기 위해서는 무게중심 이동이 많이 이루어져야 하기 때문이다. 이동거리가 같을 때는 주기가 길어질수록 Gy좌표 변화량이 많은데, 이것은 주기가 길어지면 상대적으로 한주기당 Time Step이 많아져 ZMP와 무게중심 이동이 많이 이루어져야 로봇본체의 수평을 유지할 수 있기 때문이다. 주기를 다르게 하고 이동거리를 같게 했을 때는 Gx좌표 변화량이 모두 동일했다. 모든 실험 조건에서 보행 중 로봇본체는 수평을 잘 유지했고 양호한 좌우요동 보행의 특성을 나타냈다.

참고문헌

- [1] Hiroshi Kimura 外二人, "四足動歩行ロボットの力學的解析", 日本ロボット工學會誌, Vol.6, No.5, pp.367~379, 1988.
- [2] Shigeo Hirose 外二人, "4足歩行機械のスカイフックサスペンション制御", 日本ロボット工學會誌, Vol.12, No.7, pp.1066~1071, 1994
- [3] K. Yoneda, H. Iiyama and S. Hirose, "Intermittent trot gait of a quadruped walking machine dynamic stability control of an omnidirectional walk", Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3002-3007, 1996.
- [4] Kan Yoneda 外三人, "4足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御", 日本ロボット工學會誌, Vol.19, No.3, pp.380~386, 2001.
- [5] R. Kurazume, K. Yoneda, and S. Hirose, "Feed-forward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle" Autonomous Robots, Vol.12, No.5, pp.157-172, 2002.
- [6] H. Taekeuchi, "Development of MEL HORSE", Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1057~1062, 1999.
- [7] R. Kurazume 外二人, "4足歩行機械の 3D搖動 歩容", 日本ロボット工學會誌, Vol.19, No.5, pp.632~637, 2001.
- [8] Shigeo Hirose, "Vector Analysis Mechanical system", Shokabo Tokyo, pp.23~43, pp.138~156, 1987.

저자소개

엄한성(Han-sung Eom)



1997년 2월 목포해양대학교 기관공학과 학사
 2003년 2월 목포해양대학교 기관공학과 석사
 2003년 3월~현재 : 목포해양대학교 기관시스템공학과 박사과정

※관심분야 : 로봇제어, 시스템 프로그래밍