

사각 보행 로봇의 걸음새 제어에 관한 연구

°임 미 섭

임 준 홍

한국항공대학 전자공학과

On Gait Control of a Quadruped Walking Robot

°Meeseub LIM

Joonhong LIM

Hankuk Aviation College

ABSTRACT

The problem of controlling static gaits of a Quadruped Walking Robot is investigated. A theoretical approach to the gait study is proposed in which the static stability margins for periodic gaits are expressed in terms of the kinematic gait formula. The effects of the stride length to the static stability are analyzed, and the relations between the static stability and the initial body configurations are examined. Extensive computer simulations are performed to verify the analysis results.

1. 서론

일반적으로 산업용로봇은 잘 정돈된 작업환경하에서 작업을 하는 것으로서 몸체는 고정된 채 팔과 손을 이용하는 것이 대부분이다. 이와 달리 해저작업, 원자력발전소, 토목공사현장, 벌목작업등 작업환경이 불균형하고 험난한곳에서 사람대신 작업을 하는 두다리 이상을 갖는 다각 보행 로봇의 개발이 필수적이다. 실재지구의 땅중 약50%의 지형만이 바뀌나 무한궤도를 이용하여야만 갈 수 있다 [1,2,3]. 다각 보행 로봇의 개발은 20년전부터 미국, 일본 등지와 영국, 소련 등 유럽권에서 꾸준히 개발되어왔다 [4,5]. 그러나 기계적구조의 복잡성과 제어의 어려움 때문에 아직도 기술수준은 초기단계에 머물러있다 [6]. 현재는 컴퓨터등 관련 기술의 발전에 힘입어 다각 보행 로봇의 개발은 더욱 활발히 진행되고있다.

다각 보행 로봇 개발에 필요한 기술들은 최적의 다리설계기술, 운동계획기능, 많은 Sensor들을 이용한 계측기술, 보행제어기술들이다. 이 중 가장 중요한 것은 걸음새 제어(Gait Control)이다. McChee와 Frank [7]는 다각 보행로봇의 걸음새 표현의 기본적인 틀을 제시하였고, 사각 보행 로봇의 경우 세로안정도 여유를 최대한으로 하는 최적의 걸음새가 있음을 보였다. 육각 보행 로봇의 최적의 걸음새는 물결 걸음새라는 것이 그 후 증명되었다 [8]. 또한, Song [9]은 주어진 안정도 여유값에 대하여 Local Phase라는 개념을 도입 하였고 Lee와 Shih [10]는 Duty Factor 와 Stride Length의 좁은 일정함을 보였다. 이상의 연구들은 안정도 여유와 걸음새의 해석에 속도의 영향을 고려하지 않았으나 실재 로봇은 일정한 속도로 움직이므로 Periodic Gaits을 위한 초기 자세들의 해석이 필수적이라 할 수 있다. 또한, Stride Length에 대한 영향이 분석되어야 한다. 본 논문에서는 걸음새를 수학적으로 표현하는 기구학적 걸음새공식(Kinematic Gait Formula) [8]를 이용하여 평탄지형을 일정한 속도로 이동하는 사각 보행 로봇의 걸음새 제어를 위한 Duty Factor, Stability Margin, Stride Length 와 이동 속도와 기구학적인 상수(parameter)들의 관계를 해석하였으며 Periodic으로 보행하기 위한 Initial Body Configuration이 연구되었다.

각각의 걸음새는 Stride Length 와 Duty Factor 들이 Stability Margin에 영향을 끼침을 알 수 있고, Equal Phase Gaits는 Stride Length만이 세로 안정도 여유에 영향을 미침을 알 수 있으며 Wave Gaits는 Duty

Factor와 Stride Length들이 서로 안정도 여유에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 또한, 안정도 여유 변화없이 Stride Length를 변화시켜서 이동 속도를 제어할 수가 있게 되었다.

2. 걸음새의 표현

다각 보행로봇의 걸음새 제어의 중요한 목적은 안정된 동작을 유지하도록하며 각 다리의 움직임을 제어하는 것이다. 또한, 이동 속도를 제어하면서 부정 지형(irregular terrain)에 유연하게 적응할 수 있어야 한다. 몸체의 자세와 균형을 제어하는 방법으로는 무게 중심(Center of Gravity)의 지면에 대한 투영(projection)이 지지하는 다리들을 연결한 다각형 내부에 존재하도록 하는 정적 안정(static stability)과 순간적으로 정적안정은 이루어지지 않지만 몸체의 속도와 가속도 등에 의해서 안정된 동작을 취 하는 동적 안정(Dynamic Balancing)이 있다. 본 연구에서는 정적안정을 이용하여 자세와 균형을 제어 하였다.

걸음새란 다각 보행 로봇가 몸체를 이동시키면서 각각의 다리들을 올리고 내리는 순서(event sequence)를 의미하는 것으로 지면에 발이 닿아있는 것과 (support pattern)과 지면에서 발이 떨어져있는 것 (transfer pattern)으로 나눌 수 있다. 사각 보행 로봇가 주어졌을 때 걸음새는 시간과 거리의 함수로써 아래 그림1.은 연속 시간에 대한 발이 지면에 놓여있는 시간을 한 주기에 대하여 표현한 것이다. 정적 안정을 이용한 방법을 위하여 Support Pattern으로 걸음새를 표현하면 그림2.로 표현된다.

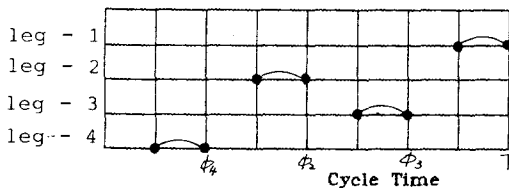


그림 1. 사각 보행 로봇의 Gait Diagram
Fig. 1. Gait Diagram for a Quadruped Walking Robot

다각 보행 로봇의 걸음새 표현에 필요한 파라미터들을 다음과 같이 정의한다.

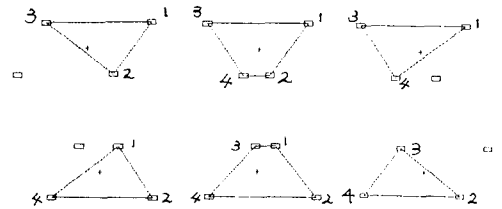


그림 2. Support Pattern
Fig. 2. Support Pattern

Cycle Time(T): i번째 다리가 이동하기 시작하여 같은 다리가 이동 할 때까지의 시간

Duty factor(β_i): i번째 다리가 지면에 놓여 있는 시간의 T에 대한 비

Relative phase(ϕ_i): 기준 다리가 지면에 놓여 있는 것을 기준(0)으로 했을 때의 i번째 다리가 지면에 닿는 시간의 T에 대한 비

Stride Length(λ_i): i번째 다리가 이동하기 시작하여 같은 다리가 이동 할 때까지의 이동한 거리

Stability Margin(S): 정적 안정을 유지하면서 움직일 수 있는 최대 거리

Longitudinal Stability Margin(S_L): 정적 안정을 유지하면서 이동 방향에 대해 움직일 수 있는 최대 거리

ϕ_i : Periodic으로 다리를 이동하기 위한 i번째 다리의 진행 방향에 대한 초기 위치

δ_i : i의 수직 방향의 초기 위치

이름 이용하여 다각 보행 로봇의 걸음새를 결정하는 Parameter는 $4n-1$ 개로 다음의 기구학적 걸음새 공식 K로 나타낼 수 있다 [7].

$$K = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n) \quad (1)$$

n = leg numbers.

이것은 몸체의 이동거리를 1로 Normalize한 것으로 이동 거리에 대한 영향을 고려 할 수가 없다. 본 연구에서는 $\beta_i = \beta$ 로 하나의 값을 갖는 Regular Gaits와 $\lambda_i = \lambda$ 로 일정한 보행 속도를 갖는 걸음새에 관하여 기구학적 걸음새 공식과 λ 의 변화에 따른 여유도 변화를 조사하였다.

3. 걸음새의 정적안정도

3.1 세로 안정도 여유

사각 보행 로봇의 세로 안정도 여유를 Support Pattern으로 나타내면 그림3.과 같다.

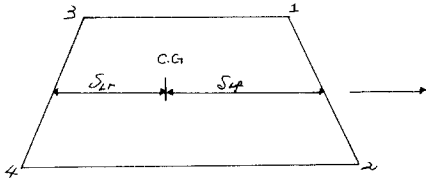


그림 3. 사각 보행 로봇의 세로 안정도 여유
Fig. 3. Longitudinal Stability Margin for a Quadruped Walking Robot.

사각 보행 로봇의 한 주기(T)에 대한 State를 각각의 다리가 지지하고 있는 것과 이동하는 것으로 구분되며 3 다리 이상은 항상 지면에 지지해야 함으로 8개의 Critical Time에 대하여 세로 안정도 여유 S 을 구하면 아래의 행렬식으로 표현된다.

$$S_f = A_f X + B_f \quad (2)$$

$$S_r = A_r X - B_r \quad (3)$$

$$A_f = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.5 & -\lambda & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & -\lambda & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & -\lambda & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & -0.5 & 0 & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & -0.5 & -0.5 & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & -0.5 & -0.5 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 & -0.5 & \lambda & 0 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 & -0.5 & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_r = \begin{bmatrix} \lambda(1-\beta) \\ \frac{1}{2}\lambda \\ \lambda(\frac{\lambda}{2}-\beta) \\ \frac{1}{2}\lambda \\ \lambda(\frac{\lambda}{2}-\beta) \\ \lambda \\ \lambda \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} \lambda(1-\beta) \\ 0 \\ \lambda(\frac{\lambda}{2}-\beta) \\ \frac{1}{2}\lambda \\ \lambda(\frac{\lambda}{2}-\beta) \\ \frac{1}{2}\lambda \\ \lambda \\ \lambda(1+\beta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$X^T = (\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 \phi_1 \phi_2 \phi_3 \phi_4)$$

여기서 S_f 는 Front Margin 이며 S_r 는 Rear Margin이다. 안정도 여유에는 $\beta, \gamma, \lambda, \phi$ 등이 영향을 미치게 되고 정적 안정을 이루기 위해서는 $S_f > 0, S_r > 0$ 이 되어야 한다. 또한, Periodic으로 보행하기 위해서는 초기 조건에 대한 규명이 필요하다.

3.2 초기 자세의 영향

사각 보행 로봇이 등속도로 Periodic 보행을 할 때 안정도 여유에는 $\beta, \gamma, \lambda, \phi$ 값들이 영향을 미치게 되며 특히, Initial Foot Position인 γ 에 대한 해석이 있어야 한다. 각 다리의 초기값들을 무게 중심(C.G)에 대한 상대적인 값으로 구할 수 있다. 기구학적 결음새 공식 K에 대해서 Longitudinal Optimum 일때의 사각 보행 로봇의 결음새의 표현은 식(4)으로 주어진다.

$$K = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) \quad (4)$$

$$v = \frac{\lambda}{T} t \quad (5)$$

$$r_1 = a + \frac{\beta}{2} \quad (6)$$

$$r_2 = a + \frac{\beta}{2} - \lambda + \lambda\phi_2 \quad (7)$$

$$r_3 = -a + \frac{\beta}{2} - \lambda + \lambda\phi_3 \quad (8)$$

$$r_4 = -a + \frac{\beta}{2} - \lambda + \lambda\phi_4 \quad (9)$$

여기서 $a > \frac{\beta}{2}$ 이다.

그림 4.에서는 Initial Body Configuration을 나타냈다. r_1 과 r_2 의 간격은 $\lambda(1-\phi_2)$ 의 값을 갖게되고 무게 중심에 대해서 대각선으로 마주보는 두쌍의 다리의 간격은 $2a + \lambda(1-\phi_2)$ 의 값을 갖게 된다.

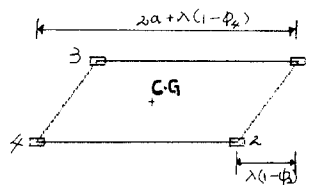


그림 4. Periodic 보행을 위한 초기 자세
Fig 4. Initial Body Configuration for Periodic Gaits.

따라서 등속도, Periodic Gait를 이루면서 정적 안정을 유지 하기 위해서는 식 (6 ~ 9)의 condition을 만족해야 하며 Equal Phase Gaits일때는 안정도 여유는 β 에 무관함을 알 수 있으며, Wave Gaits일때는 초기자세가 β 와 λ 의 함수이므로 β 에 의해서 크게 영향을 받게 된다. Wave Gaits 일때는 β, λ 를 모두 고려해서 초기자세를 선택해야 함을 알 수 있다.

3.3 Stride length의 영향

Stride Length는 사각 보행로봇의 이동 속도를 결정하는 중요한 Parameter로써 Periodic Gaits를 이루기 위한 식 (6 ~ 9)에서 알 수 있듯이 안정도 여유에 λ 가 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 Stride Length의 크기를 고려하여 초기 자세를 선택해야 한다. 즉, λ 를 크게 함으로써 속도를 증가시키기 위해서는 λ 에 따른 초기 자세를 조정 해야 하며 이때에 안정도 여유를 maximize 할수가 있다. 결국, 정적 안정을 유지하면서 주어진 속도로 등속도, 직선 보행을 하기 위해서는 초기 자세를 이동 속도에 맞게끔 조정해야 한다. 그림 5.에서는 각 걸음새에 대하여 초기 자세가 Optimum 일때의 안정도 여유와의 관계를 나타냈다.

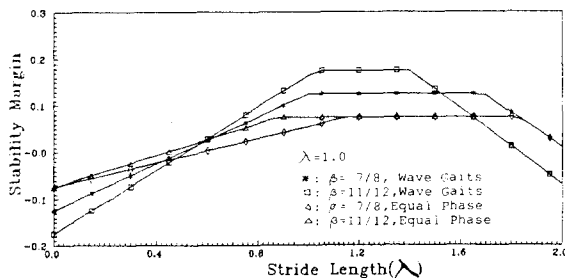


그림 5. 초기 자세의 안정도 여유에 대한 영향
Fig. 5. The effects of the initial body condition to the Stability Margin.

안정도 여유는 λ 에 따른 초기 자세의 조정 없이 λ 만 변화시킬 경우 안정도 여유를 Maximize 할 수 있는 초기 자세는 Optimum 뿐임을 알 수 있다. 또한, 안정도의 변화없이 어느 정도의 속도는 증가시킬 수가 있다 이는 안정도 여유는 변화가 8 개의 Critical Time에서 크게 변화함으로 어느 정도의 임계값까지는 안정도 여유는 변화없이 속도의 증가, 감소가 가능하게 된다.

4. Simulation 및 검토

본 절에서는 T=1 인 한 주기에 대해서 사각 보행 로보트의 안정도 여유에 영향을 미치는 모든 파라미터들의 관계를 Computer Simulation으로 조사하였다. 초기 자세와 무게 중심의 위치가 안정도 여유에 미치는 영향을 그림 6.에서 보여주고 있다.

초기 자세가 주어졌을때 무게 중심 (C.G)의 위치는 Wave Gaits가 Equal Phase Gaits 보다 Rear Boundary 방향으로 뒤로 이동했을 경우에 안정도 여유가 Maximize됨을 알 수가 있다. 그림 7.에서는 초기 자세의 위치에 따라서 안정도 여유의 변화를 해석한 것이다. 초기 자세가 모든 Parameter들에 만족 되었을때 안정도 여유가 Maximize 되며 안정도 여유는 초기 자세에 민감해짐을 알 수 있다. 그림 8 과 그림 9, 10에서는 각 걸음새와 Duty Factor 에 따른 안정도 여유의 변화를 나타낸 것이다.

Duty Factor에 따라서 안정도 여유는 크게 영향을 받으며 특히, Wave Gaits의 경우는 더욱 그 영향이 크다. 또한 Wave Gaits의 경우에는 한 주기 동안 Singular 부분이 두곳에서 생기게 되는데 이는 실제의 사각 보행로봇의 걸음새 구현에는 어려움이 뒤 따를 것이며 이 보다는 안정도 측면에서는 떨어지지만 Equal Phase Gaits 가 오히려 걸음새의 구현과 응용에 손쉬울 수 있으며 초기 자세가 Duty Factor에 무관하므로 Periodic 보행을 위한 걸음새 재어가 훨씬 간단하다.

5. 결론

본 논문에서는 사각 보행 로봇의 걸음새의 표현과 걸음새 재어에 필요한 파라미터들의 관계들이 해석 되었으며, 또한 등속도, Periodic Gait를 이루기 위한 Initial Body Configuration 이 규명 되었으며 초기 자세와 안정도 여유와의 관계를 해석하였다.

따라서 사각 보행 로봇가 등속도, Periodic Gait를 유지하기 위해서는 β, r, λ, ϕ 등의 모든 관계를 고려해서 초기 자세를 선택해야 한다. 특히 Equal phase Gaits 일때는 β 에 무관하게 초기 자세를 선택할 수가 있고 Wave Gaits의 경우에는 모든 파라미터들을 고려해서 초기 자세를 선택해야 한다.

이상의 결과로써 사각 보행 로봇의 정적 안정을 이용한 직선, 등속도 보행의 모든 걸음새의 제어가 가능하게 되며 이를 기초로 해서 불균형 지형인 계단이나 경사지형은 물론 회전 걸음새, 후퇴 걸음새의 제어에도 응용이 가능할 것이며, 나아가서는 가속도를 갖는 걸음새 제어로의 확장에 기초가 될 것이다.

참고 문헌

[1] R.B.McGhee, " Vehicular legged locomotion", in Advances in Automation and Robotics., vol.1,ed, by G.Surodis,JAI Press Inc,1985.

[2] T.A.McMahon,"Mechanics of Locomotion",Int'l J. of Robotics Research,vol.3,no.2,1984.

[3] 임준홍, "다각보행로봇의 개발", 전자통신 종합학술대회논문집,1987.

[4] Special Issue in legged locomotion,Int'l J.of Robotics Research,vol.3,no.2,1984.

[5] " 보행로봇특집", 대한전기학회지, vol.36,no.5, 1987.

[6] D.J. Todd, Walking Machines:An Introduction to legged Robots, Anchor Press,1985.

[7] R.B. McGhee and A.A. Frank," On the Stability Properties of a Quadruped Creeping Gaits ", Math. Biosci.,vol. 3, pp. 331-351,1968.

[8] A.P. Bossonov and N.V. Umnov, "The Analysis of Gaits in Six Legged Vehicles according to their static stability ", Proc. Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp. 1-10,1973.

[9] S. Song and K.J. Waldron, " An Analytical approach for Gaits Study and It's Application on Wave Gaits", Int'l J. of Robotics Research,vol. 6, no.2,pp.60-71,1987.

[10] T. Lee and C.Shih,"A Study of the gait control of a Quadruped Walking vechicle", IEEE J. of Robotics and Automation vol. RA-2,no.2,pp 61-69, 1986.

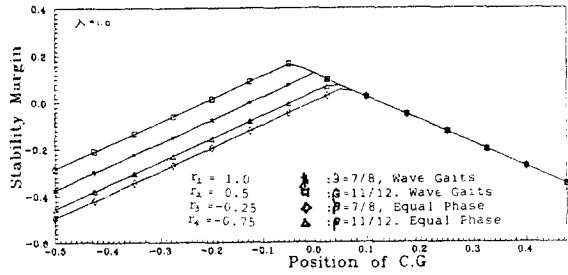


그림 6. 무게 중심의 위치와 안정도 여유와의 관계
Fig. 6. The effects of the position of C.G to the Stability Margin.

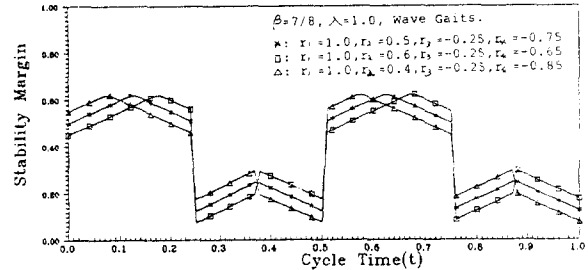


그림 7. 초기 자세에 따른 안정도 여유의 변화
Fig. 7. The effect of the initial foot position to the Stability Margin.

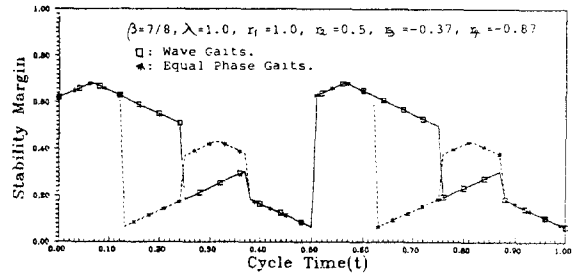


그림 8. 걸음새에 따른 안정도 여유의 변화
Fig 8. The effects of the Gaits to the the Stability Margin.

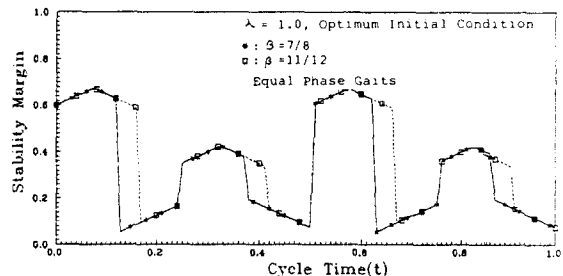


그림 9. Equal Phase Gaits의 안정도 여유
Fig.9. Stability Margin for Equal Phase Gaits.

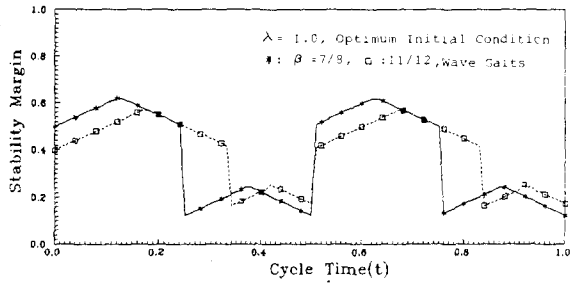


그림 10. Wave Gaits의 안정도 여유
 Fig.10. Stability Margin for Wave Gaits.