

# 사각보행로보트의 걸음새 제어를 위한 정적 안정도 해석

## Static Stability Analysis for Gait Control of a Quadruped Walking Robot

任 俊 弘\* · 徐 一 弘\*\* · 林 美 變\*\*\*  
 (Joon-Hong Lim · Il-Hong Suh · Mee-Sub Lim)

### 요 약

다각 보행 로보트의 정적 걸음새를 제어하는 문제를 다루었다. 주기 걸음새에 대한 정적 안정도 여유를 운동학적 걸음새공식으로 표현하여 이론적으로 이동 속도 및 초기 자세가 정적 안정도에 미치는 영향을 해석하였다. 주어진 초기 자세에 대해 정적 안정도 여유의 감소 없이 어느 정도 까지는 속도를 증가시킬 수 있음을 보였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석 결과를 보았다.

**Abstract-** The problem of controlling static gaits for a quadruped walking robot is investigated. A theoretical approach to 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 on static stability are analyzed and the relations between static stability and initial body configurations are examined. It is shown that the moving velocity can be increased to some extent without affecting stability margins for a given initial body configuration. Computer simulations are performed to verify the analysis.

### 1. 서 론

일반적으로 산업용 로보트는 잘 정돈된 작업환경 하에서 작업을 하는 것으로서, 몸체는 고정 된 채로 팔과 손을 이용하는 것이 대부분이다. 이와

는 달리 해저작업, 원자력발전소, 토목 공사현장 등 작업환경이 불균형하고 협난한 곳에서 사람대신 작업을 하는 로보트를 위하여서는 사람과 같이 두다리 혹은 여러개의 다리를 갖는 로보트의 개발이 필수적이다. 실제로 지구의 땅 중 약 50%의 지형만이 바퀴나 무한궤도를 이용하여 갈 수 있고 그 외의 부분은 다리를 이용하여야만 갈 수 있다. [1, 2] 다각보행로보트의 개발의 또 하나의 중요한 동기는 동물이나 사람이 어떻게 다리를 이용하

\*正會員：漢陽大工大電子工學科副教授·工博

\*\*正會員：漢陽大工大電子工學科助教授·工博

\*\*\*正會員：韓國航空大電子工學科碩士課程

接受日字：1989年 8月 14日

一次修正：1989年 11月 25日

여 이동을 하는지를 보다 잘 이해하여 그 결과를 장애자를 위한 재활의학 또는 스포츠공학등에 이용하는 것이다.[3]

다각보행로보트는 20여년 전부터 미국, 일본등지와 영국, 소련 등 유럽권에서 꾸준히 개발되어 왔다.[4] 그러나 기계적구조의 복잡성과 제어의 어려움 때문에 아직도 기술수준은 초기단계에 머물러있다. [5, 6] 현재는 컴퓨터등 관련기술의 급격한 발전에 힘입어 다각보행로보트의 개발은 더욱 활발히 진행되고 있다.[5, 6] 다각보행로보트의 개발에 필요한 기술들은 최적의 다리설계 기술, 운동계획기능, 많은 sensor들을 이용한 계측 기술, 보행제어기술등이다. 이중 가장 중요한 것은 걸음새 제어(gait control)이다.

McGhee와 Frank[7]는 다각보행로보트의 걸음새를 수학적으로 표현할 수 있는 기본적인 틀을 제시하고 사각일 경우 세로 안정도 여유를 최대로 할 수 있는 걸음새가 있음을 보였으며 육각일 경우 최적의 걸음새는 물결 걸음새임을 증명하였다. 또한, Song[8]은 국지 위상(local phase)를 도입하여 걸음새를 해석하였으며 Lee와 Shih[9]는 주어진 안정도 여유값에 대하여 디딤율(duty factor)과 보폭(stride length)의 곱은 일정함을 보였다. 한편 국내에서도 4각보행로보트의 방향 전환[10] 및 비평탄 지형[11]에서의 걸음새 제어등의 연구가 진행되고 있다.

이상의 연구들은 안정도, 여유와 걸음새의 해석에 속도와 초기자세의 영향들을 고려하지 않았지만 실제 보행로보트는 주기적 걸음새(Periodic Gaits)를 구성하기 위한 초기자세에 대한 해석이 필요하며 이동속도의 변화에 따른 안정도에 대한 영향이 해석되어야 한다.

본 논문에서는 걸음새를 수학적으로 표현하는 운동학적 걸음새 공식(kinematic gait formula)[7]을 이용하여 평탄지형을 일정한 속도로 이동하는 사각보행로보트의 걸음새 제어를 위한 디딤율(duty factor), 상대 위상(relative phase), 안정도 여유(stability margin)등의 기구적인 상수들의 관계를 규명하였으며 정적 안정(static stability)을 이용한 주기적 걸음새를 위한 초기자세(initial body configuration)에 대하여 연구하였으며 또한, 이동속도의 변화에 따른 안정도의 영향과 초기자세와의 관계를 해석하였다. 특히 최적으로 알려진 물결걸음새(wave gaits)와 가장 간단한 걸음새인 동상걸음새(equal-phase gaits)를 대상으로 하였다. 이 중에서 물결걸음새는 초기자세와 이동속도에 대하여 안정도 여유가 민감하게 변화하

므로 각 걸음새에 따라서 초기자세의 수정이 필요하게 되며 이동속도에 따른 영향도 크게 받는다. 하지만 동상걸음새는 초기자세에 따른 안정도 여유의 변화가 크지 않고 실제보행로보트의 걸음새 제어에는 용이한 걸음새임을 알 수 있었다. McGhee등[7]은 물결걸음새는 속도가 커지면 안정도 여유가 비례해서 커짐을 보였다. 그러나 이는 속도가 커짐에 따라 이에 적절한 초기자세를 취하여야 한다. 본 논문에서는 주어진 초기자세에 대해 정적 안정도 여유의 감소 없이 어느 정도까지는 증가시킬 수 있음을 보였다.

## 2. 걸음새와 정적 안정도

### 2.1 걸음새의 표현

다각보행로보트의 걸음새 제어는 안정된 동작을 유지하며 각 다리의 움직임을 세어하는 것이다. 또한, 이동속도를 제어하면서 불균형질의 지형(irregular terrain)에 유연하게 적용할 수 있어야 한다. 물체의 자세와 균형을 제어하는 방법으로는 무게중심의 지면에 대한 투영점(projection)이 지지하고 있는 다리들을 연결한 지지다각형(support polygon)의 내부에 존재하도록 하는 정적 안정(static stability)과 순간적으로 정적안정은 이루어지지 않지만 물체의 속도와 가속도 등을 이용하여 안정된 동작을 취하는 동적안정(dynamic stability)이 있다. 동적으로 안정을 유지하는 방법은 이동체의 복잡한 동력학을 고려하여야 하는 어려움이 있어 1다리, 2다리 등 동적안정이 절대적으로 필요한 경우에 제한적으로 연구되고 있다. 본 논문에서는 4각보행로보트를 대상으로 정적안정을 이용하여 안정을 유지하는 방법에 중점을 둔다. 정적안정으로 안정을 유지하며 4각보행로보트가 이동을 하려면 매순간 안정이 유지되어야 하므로 언제나 3다리 이상이 지면에 있어야 한다.

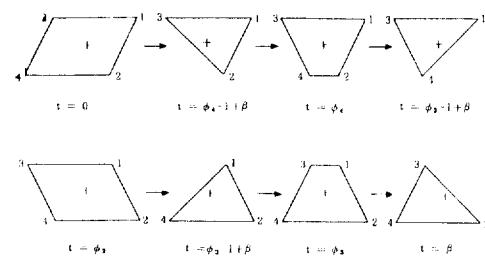


그림 1 4-2-3-1 걸음새의 지지다각형의 움직임  
Fig. 1 The Sequence of Support Polygon of 4-2-3-1 Gaits

표 2 걸음새의 용어 정의

Table 1 Definitions of gait terminology

주기 (cycle time)	한 다리가 이동하기 시작하여 같은 다리가 이동할 때 까지의 시간	$T$
디님율 (duty factor)	$i$ 번째 다리가 지면에 놓여 있는 시간의 한 주기 $T$ 에 대한 비	$\beta_i$
상대 위상 (relative phase)	기준 다리가 지면에 닿아있는 것을 기준으로 했을 때 $i$ 번째 다리가 지면에 닿는 시간의 $T$ 에 대한 비	$\phi_i$
보폭 (stride length)	한 주기 동안 $i$ 번째 다리가 이동한 거리	$\lambda_i$
지지다각형 (support polygon)	지지구간(support phase)에 있는 각 다리의 착지점들을 연결했을 때 형성되는 convex hull 다각형	
안정도 여유 (stability margin)	지지다각형 내부로 몸체의 무게중심의 투영점 (projection)이 지지다각형의 경계선까지의 수직거리 중 최소거리	$S_M$
세로 안정도 여유 (longitudinal stability margin)	몸체의 이동방향에 대한 지지다각형 내부로 투영된 무 게중심이 지지다각형의 경계선 까지의 수직거리 중 최 소거리	$S_L$

따라서 한다리를 움직이는 시점이 중요하게 된다.

걸음새란 다각 보행 로보트가 몸체를 이동시키면서 각각의 다리를 연세, 어떤 순서로 옮리고 내릴 것인가를 의미한다. 예를 들어 그림 1은 4-2-3-1의 순서로 다리를 움직이는 걸음새를 지지다각형으로 무게중심의 투영점과 함께 표현하였다. 걸음새는 시간과 거리의 함수로써 표현되며 걸음새의 표현에 필요한 용어들에 대한 정의는 표 1로 주어진다.

다각 보행 로보트의 걸음새를 정적 안정을 이용하여 세이하기 위한 걸음새의 수학적 표현식은 다음과 같은 운동학적 걸음새 공식(kinematic gait formula) [7]으로 표현된다.

$$K = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, r_1, r_2, \dots, r_n, \\ \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_n) \quad (1)$$

$r_i = i$  번째 다리가 이동하기 시작할 때의 무게중심에 대한 이동 방향으로의 위치

$\delta_i =$  몸체의 이동 방향에 대한 수직방향의  $i$  번째 다리의 위치

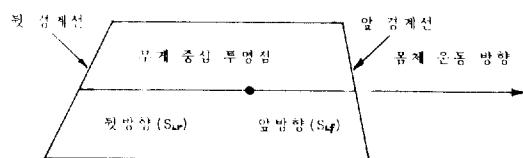
즉, 식 (1)의  $K$ 로 다각 보행 로보트의 이동 및 정적 안정을 나타낼 수 있다.

다각 보행 로보트의 걸음새는  $(4n-1)$  개의 기구적 상수들로써 수학적으로 표현될 수 있다. 예를 들어 육각일 경우 23개, 사각일 경우 15개의 상수들이 걸음새 표현에 이용된다.

## 2.2 세로 안정도 여유

정적 안정을 이용하여 사각 보행 로보트의 안정도 여유를 계산하기 위해서는 각 다리의 위치와 무게중심의 위치를 계산해야 한다. 본 논문에서는 평탄한 지형을 디님율이 일정한 값( $\beta_i = \beta$ )을 갖는 정칙걸음새(regular gaits)이며 각 다리의 보폭이 같으며( $\lambda_i = \lambda$ ) 주기 걸음새를 이루면서 일정한 방향으로 이동하는 사각 보행 로보트의 걸음새를 대상으로 한다. 이 경우 안정도 여유는 그림 2처럼 진행방향에 대한 세로안정도 여유를 구할 수 있다.

한 주기에서 각 다리는 이동구간과 지지구간으로 나누어지며 사각으로 구성되어 있고 일정한 속도로 보행을 하기 때문에 8개의 critical time에서



$$S_L = \min(S_{Lf}, S_{Lb})$$

그림 2 세로 안정도 여유

Fig. 2 Longitudinal Stability Margin

안정도 여유가 경계값이 되고 그 사이에서는 선형으로 바뀐다. 따라서 8개의 critical time에서의 값을 비교하여 세로 안정도 여유를 계산할 수 있다. 세로 안정도 여유는 식 (3)~(6)로 주어진다.

$$S_L = \min(S_{Lf}, S_{Lr}) \quad (3)$$

$$S_{Lf} = A_f X + B_f \quad (4)$$

$$S_{Lr} = A_r X + B_r \quad (5)$$

여기서

$$A_f = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & -\lambda \\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & -\lambda \\ 1/2 & 0 & 0 & 1/2 & -\lambda & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & -\lambda & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1/2 & -1/2 & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & -1/2 & -1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 & -1/2 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 & -1/2 & \lambda & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} \lambda(1-\beta) \\ 0 \\ \lambda(1-\beta) \\ \lambda/2 \end{bmatrix}, \quad B_r = \begin{bmatrix} \lambda(\beta-1) \\ -\lambda/2 \\ \lambda(\beta-3/2) \\ -\lambda/2 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

이고  $S_{Lf}$ 는 앞방향  $S_L$ 이며  $S_{Lr}$ 는 뒷방향  $S_L$ 이다. 안정도 여유에는  $\beta, \lambda, \phi_i, r_i$  등이 영향을 미치게 되며 정적 안정성을 이루기 위해서는  $S_L$ 이 양의 값을 유지해야 한다. 주어진  $\beta$ 에 대하여 세로 안정도 여유를 최대로 하는 걸음새를 물결 걸음새[4, 7]라고 하며 이때  $\phi_2 = 1/2, \phi_3 = \beta, \phi_4 = \beta - 1/2$ 이고 최적 세로 안정도 여유  $S_L^*$ 는 식 (7)로 주어진다.

$$S_L^* = \beta - 3/4 \quad (7)$$

또한  $\phi_1 = 1/2, \phi_3 = 3/4, \phi_4 = 1/4$ 로  $\beta$ 에 무관하게 상대 위상이 결정되는 동상 걸음새[8]에서는 최적 세로 안정도 여유  $S_L^*$ 은 식 (8)로 주어진다.

$$S_L^* = 1/2(\beta - 3/4) \quad (8)$$

### 3. 초기자세와 이동속도의 영향

#### 3.1 초기자세의 영향

일정한 속도로 보행을 하면서 주기 걸음새를 구성하기 위해서는 각 다리의 초기위치와 무게중심의 위치에 대한 해석이 필요하다. 각 다리의 초기위치는 무게에 대한 상대적인 값으로 구할 수 있다. 운동학적 걸음새 공식에 의한 사각 보행 로보

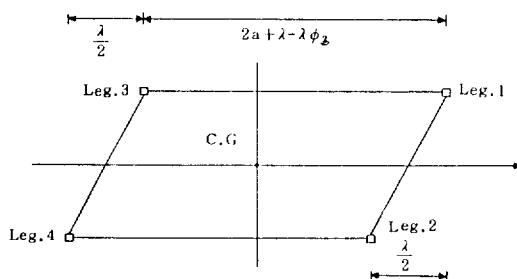


그림 3 주기 걸음새를 위한 초기 자세

Fig. 3 Initial Body Configuration for Periodic Gaits

트의 걸음새 표현에서 각 다리는

$$r_1 = r_2 = a + \beta/2, \quad r_3 = r_4 = -a + \beta/2 \quad (9)$$

단(단  $a$ 는  $a \geq \beta/2$ 인 상수이다).의 다리 위치를 가질 때 안정도 여유는 최대가 됨을 [7]에서 보였다. 여기서  $r_i$ 들은 다리가 이동할 때를 기준함으로 이들 초기 위치(각 주기가 시작할 때의 다리 위치)로 바꾸어 주어야 한다.

$i$ 번째 다리의 초기 위치를  $\bar{r}_i$ 라고 하면, 몸체는  $\lambda/T$ 라는 일정한 속도로 움직이고 있으므로 식[9]에 해당하는 초기 위치를 다음의 식으로 됨을 쉽게 알 수 있다.

$$\bar{r}_1 = a + \beta/2 \quad (10)$$

$$\bar{r}_2 = a + \beta/2 - \lambda + \lambda\phi_2 \quad (11)$$

$$\bar{r}_3 = -a + \beta/2 - \lambda + \lambda\phi_3 \quad (12)$$

$$\bar{r}_4 = -a + \beta/2 - \lambda + \lambda\phi_4 \quad (13)$$

윗 초기 위치로 부터 다리들의 상대적 위치를 보면 다리 1과 2의 간격은  $\lambda(1-\phi_2)$ , 다리 3과 4의 간격은  $\lambda(\phi_3-\phi_4)$ , 다리 1과 3의 간격은  $2a + \lambda(1-\phi_3)$ , 다리 2와 4의 간격은  $2a + (\phi_2-\phi_4)$ 로 된다. 주기 걸음새는  $\phi_2 = 1/2, \phi_3 = \phi_4 = 1/2$ 이므로 다리 1과 2, 3과 4의 간격은  $\lambda/2$ 이고 다리 1과 3 및 2와 4의 간격은  $2a + \lambda(1-\phi_3)$ 로 된다. (그림 3)

따라서 물결 걸음새에서는 앞과 뒤의 다리 간격을  $2a + \lambda(1-\beta)$ 로 하여야 최적의 안정도 여유를 얻을 수 있게 된다. 또한 동상 걸음새에서는  $2a + \lambda/4$ 가 되어야 한다.

결국, 사각 보행 로보트가 주기 걸음새로 보행하기 위해서는 보폭( $\lambda$ ), 디딤율( $\beta$ ), 상대위상( $\phi$ ) 등을 고려한 걸음새에 맞는 초기자세를 설정해야 하며 초기자세를 만족할 때 최적 세로 안정도 여유를 얻을 수 있다.

### 3.2 이동속도의 영향

정적안정을 유지하며 이동하는 사각 보행 로보트의 이동 속도는  $\lambda/T$  이므로 주기  $T=1$ 로 normalize하면 이동 속도는 보폭( $\lambda$ )에 의해 결정된다. 여기서는 디딤울과 상대 위상, 초기위치가 주어진 주기 걸음새에서 이동 속도(즉 보폭)을 변화시킬 때 안정도 여유에 미치는 영향을 보고자 한다. 이동속도를 증가, 감소시켰을 때의 안정도 여유의 변화는 주기 걸음새를 이루고 있으므로 반주기( $T/2$ )에 대해 4개의 critical time으로 안정도를 구하면 되고 각 시간에서의 안정도는

$$S_{L1} = (\phi_4 - 1 + \beta) - 1/2(\beta + \phi_2 + \phi_3 - 2) \quad (14)$$

$$S_{L2} = 1/2(2\alpha + \beta + \phi_2 - 1) - \lambda(\phi_2 - 1 + \beta) \quad (15)$$

$$S_{L3} = 1/2(\beta + \phi_4 + \lambda - 1) - \lambda\phi_2 \quad (16)$$

$$S_{L4} = \lambda\phi_2 - 1/2(-2\alpha + \beta + \phi_3 + \phi_4 + \lambda - 2) \quad (17)$$

로 된다.[12] 여기서 초기 자세는  $\lambda=1$ 일 때 최적이 되는 것으로 취한 것이다. 위의 식에서  $S_{L4}$ 는  $S_{L1}, S_{L2}, S_{L3}$ 보다 항상 큰 값을 유지하므로 이동 속도에 따른 세로 안정도 여유는

$$S_L = \min(S_{L1}, S_{L2}, S_{L3}) \quad (18)$$

로 된다. 따라서 걸음새가 주어지면 세로 안정도 여유는 보폭  $\lambda$ 에 의해 결정되어 다음의 3가지 경우로 되게 된다.

$$\text{Case 1 : } 0 < \lambda < 1 \quad \text{일 때 } S_L = S_{L1} \quad (19)$$

$$\text{Case 2 : } 1 \leq \lambda \leq \frac{2\alpha + \phi_2 - \phi_4}{2\beta - 1} \quad \text{일 때 } S_L = S_{L3} \quad (20)$$

$$\text{Case 3 : } \lambda \geq \frac{2\alpha + \phi_2 - \phi_4}{2\beta - 1} \quad \text{일 때 } S_L = S_{L2} \quad (21)$$

따라서 초기자세가 주어졌을 때 이동속도의 증가, 감소에 따른 세로안정도 여유의 변화는 그림 4와 같이 된다. 일반적으로 물결 걸음새등의 세로 안정도 여유는 보폭에 비례하여 커지게 된다.[7, 9] 그러나 이는 초기 자세를 보폭에 맞게 바꿔 주어야 하는 것이고, 초기 자세를 그대로 하여도 그림 4와 같이 보폭(즉 이동 속도)을 증가 하면 안정도 여유는 증가 하지 않지만 어느 정도 까지는 속도를 증가 시켜도 안정을 유지하며 보행이 가능함을 의미한다.

주어진 걸음새에서 이동속도의 변화에 따른 정적안정도가 최적 세로안정도 여유를 갖는 최적 걸음새를 구성하기 위해서는 이동속도에 일맞게 초기자세를 설정해야하며 또한, 주어진 초기자세에서 어느정도의 이동속도의 증가, 감소는 가능하며

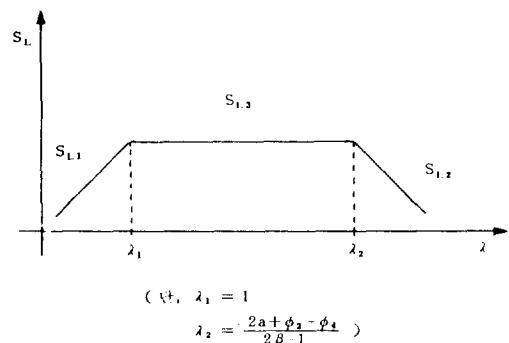


그림 4 이동 속도에 따른 세로 안정도

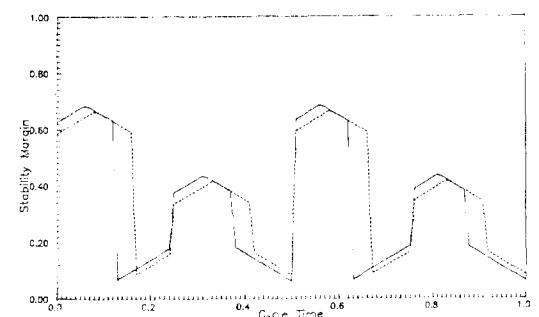
Fig. 4 Longitudinal Stability Margin to the Moving Velocity

안정도 여유의 감소없이 정적안정을 유지하며 보행을 할 수가 있다.

또한 세로 안정도 여유를 양의 값으로 유지하면서 이동속도를 변화할 수 있는 범위는 다음의 식 (22)로 주어진다.

$$\frac{\beta + \phi_2 + \phi_3 - 2}{2(\phi_4 - 1 + \beta)} < \lambda < \frac{2\alpha + \phi_2 - \phi_4}{2\beta - 1} \quad (22)$$

즉 위의 식 (22)을 만족 할 수 있는 이동속도의 범위에서는 세로안정도 여유는 항상 양의 값을 가지며 정적안정을 유지할 수 있다.

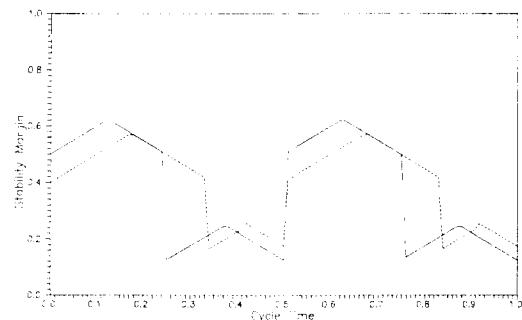


$$K = \left( \begin{array}{ccccccccc} \frac{7}{8}, & \frac{7}{8}, & \frac{7}{8}, & \frac{7}{8}, & 1.0, & 0.5, & -0.375, & -0.875, & \delta, -\delta, \delta, \\ -\delta, & \frac{1}{2}, & 3/4, & 1/4 \end{array} \right)$$

$$K = \left( \begin{array}{ccccccccc} \frac{11}{12}, & \frac{11}{12}, & \frac{11}{12}, & \frac{11}{12}, & 1.0, & 0.5, & -0.35, & -0.85, & \delta, -\delta, \delta, \\ -\delta, & \frac{1}{2}, & 3/4, & 1/4 \end{array} \right)$$

그림 5 동상 걸음새의 세로안정도 여유

Fig. 5 Longitudinal Stability Margin for Equal Phase Gaits

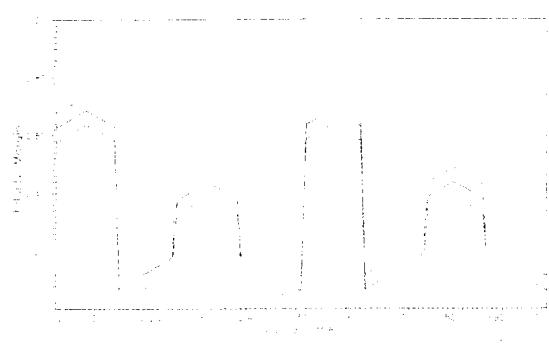


$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.5, -0.25, -0.75, \delta, -\delta, \delta, -\delta, -\frac{1}{2}, \beta, \beta - 1/2 \right)$$

$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1.0, 0.5, -0.15, -0.65, \delta, -\delta, \delta, -\delta, 1/2, \beta, \beta - 1/2 \right)$$

그림 6 물결 걸음새의 세로 안정도 여유

Fig. 6 Longitudinal Stability Margin for Wave Gaits



$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.5, -0.375, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, 3/4, 1/4 \right)$$

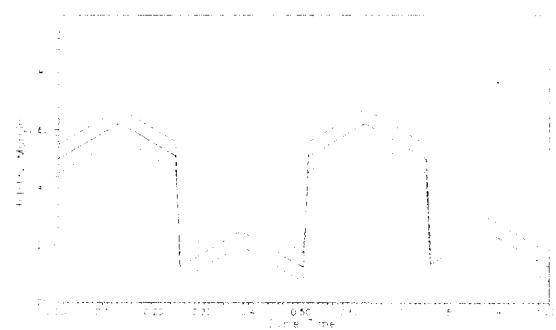
$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.4, -0.375, -0.775, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, 3/4, 1/4 \right)$$

$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.6, -0.375, -0.975, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, 3/4, 1/4 \right)$$

그림 7 초기자세에 따른 동상걸음새의 세로 안정도

Fig. 7 Longitudinal Stability Margin for Equal Phase Gaits to Initial Body Configuration

사각보행로보트의 걸음새제어를 위한 정적안정도 해석



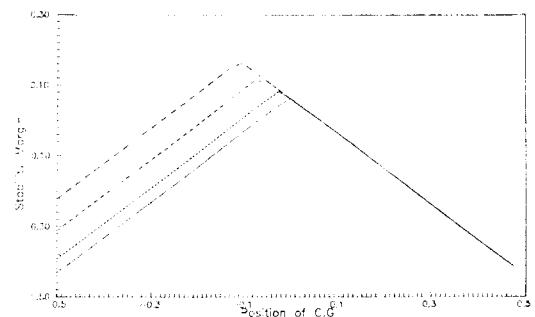
$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.5, -0.25, -0.75, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta - 1/2 \right)$$

$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1.0, 0.4, -0.25, -0.65, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta - 1/2 \right)$$

$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.6, -0.25, -0.85, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta - 1/2 \right)$$

그림 8 초기자세에 따른 물결걸음새의 세로 안정도

Fig. 8 Longitudinal Stability Margin for Wave Gaits to Initial Body Configuration



$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.5, -0.375, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \right)$$

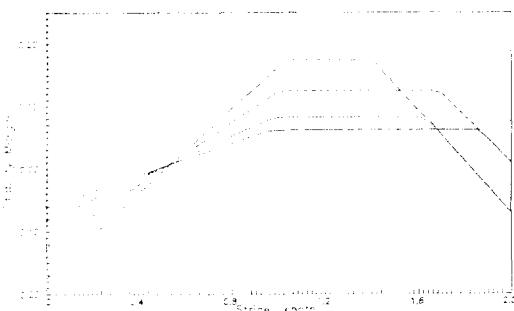
$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1.0, 0.5, -0.375, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \right)$$

$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1.0, 0.5, -0.375, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta - 1/2 \right)$$

$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1.0, 0.5, -0.375, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta - 1/2 \right)$$

그림 9 무게 중심의 이동에 따른 세로 안정도 여유

Fig. 9 Longitudinal Stability Margin to the Position Change of the Center of Gravity



$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1, 0, 0, 0.5, -0.375, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \right)$$

$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1, 0, 0, 0.5, -0.35, -0.85, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \right)$$

$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1, 0, 0, 0.5, -0.25, -0.75, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta, \frac{1}{2} \right)$$

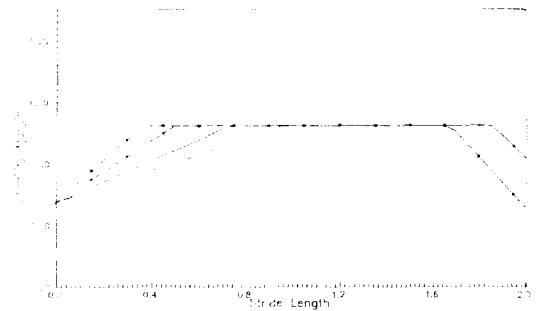
$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1, 0, 0, 0.5, -0.15, -0.65, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta, \frac{1}{2} \right)$$

그림 10 이동 속도에 따른 Optimum Gaits의 세로 안정도

Fig. 10 Longitudinal Stability Margin for Optimum Gaits to the Moving Velocity

#### 4. 시뮬레이션 및 검토

정적안정을 이용하여 운동학적 걸음새 공식으로 표현된 걸음새들에서 디딤율이 일정하고 등속도로 보행하는 주기적 걸음새에 대한 각 걸음새의 안정도 여유는 그림 5과 그림 6에서 보여주고 있다. 물결 걸음새가 동상 걸음새보다 안정도는 뛰어난 걸음새임을 알 수 있다. 또한, 주어진 걸음새에 대하여 초기자세를 만족한 걸음새와 만족치 않은 걸음새의 초기자세에 따른 안정도의 영향은 그림 7과 그림 8에서 보여 주고 있는데 여기에서 최적 세로안정도를 얻기 위해사는 반드시 기구적인 상수들을 고려한 초기자세의 설정이 필요함을 알 수 있다. 초기자세의 수정없이 몸체의 무게 중심을 이동시켜서도 안정도를 개선할 수 있음을 그림 9에서 보여주고 있다. 이는 초기자세가 주어졌을 때 물결 걸음새가 동상 걸음새보다 뒷 경계선 방향으로 무게중심을 더 많이 이동시킴으로써 안정도를 최대화 할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 10과 그림 11에서는 주어진 초기자세에서 이동 속



$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1, 0, 0, 0.5, -0.375, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \right)$$

$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1, 0, 0, 0.5, -0.35, -0.85, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4} \right)$$

$$K = \left( \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, \frac{7}{8}, 1, 0, 0, 0.5, -0.375, -0.875, -\delta, \delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta, \frac{1}{2} \right)$$

$$K = \left( \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, \frac{11}{12}, 1, 0, 0, 0.5, -0.35, -0.875, \delta, -\delta, \delta, -\delta, \frac{1}{2}, \beta, \beta, \frac{1}{2} \right)$$

그림 11 주어진 초기자세에서의 이동속도에 따른 세로 안정도

Fig. 11 Longitudinal Stability Margin for given Initial Body Configuration to the Moving Velocity

도를 증가, 감소시켰을 때의 안정도의 변화를 보여주고 있다. 이는 주어진 걸음새에서 안정도 여유의 간소없이 빠른 보행을 가능케하며 동상 걸음새가 물결 걸음새보다 안정도 여유의 간소없이 더 빠른 보행이 가능한 걸음새임을 나타내고 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 평탄한 지형을 일정한 속도로 보행하는 사각 보행 로보트를 대상으로 운동학적 걸음새 공식으로 걸음새를 표현하고 걸음새 세어에 필요한 기구적 상수들의 관계를 규명하고 정적안정을 이용하여 걸음새를 세어하였다.

사각 보행 로보트가 정적 안정을 유지하기 위해 지지다각형을 이용하여 세로안정도 여유에 영향을 미치는 모든 파라미터들의 관계를 규명하였다. 주어진 걸음새가 주기 걸음새를 구성하여 최적이 되기 위해 필요한 초기 자세에 대한 일반식을 유도하고 해석하였다. 또한, 각 다리의 초기 자세가

고정된 채 즉, 초기자세의 수정없이 이동 속도를 증가, 감소할 때에 세로 안정도여유에 미치는 영향이 해석되었으며 주어진 초기 자세에 대하여 이동 속도를 증가, 감소시킬 수 있는 범위와 세로 안정도 여유에 대한 관계식들이 규명되었다. 특히 물결 걸음새와 동상 걸음새의 두 가지 걸음새를 비교 분석하였다. 물결 걸음새는 초기 자세에 대해 초기 자세의 수정이 필요하지만 동상 걸음새는 초기 자세에 따른 세로 안정도 여유의 변화가 근소하기 때문에 걸음새 제어에는 용이한 걸음새라고 할 수 있다. 또한, 초기자세의 수정없이 몸체의 무게중심을 이동시키지 세로 안정도여유를 개선할 수도 있음을 보였다.

이상의 결과로써 사각 보행 로보트의 정적 안정을 이용한 직선, 등속보행의 모든 걸음새의 제어가 가능하게 되며 이 결과의 응용으로 평탄한 지형만이 아닌 험난한 지형, 즉, 계단이나 산악지형에서의 걸음새 연구들을 수행할 수 있을 것이다.

이 논문은 1988년도 문교부 지원 한국 학술 진흥재단의 자유 공모 과제 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었음

## 참 고 문 헌

- [1] R.B. McGhee, "Vehicular Legged Locomotion," in Advances in Automation and Robotics., vol. 1, ed. by G. Saridis, JAI Press Inc., 1985.
- [2] D.J. Todd, Walking Machines : An Introduction to legged Robots, Anchor Press, 1985.

- [3] T.A. McMahon, "Mechanics of Locomotion," Int'l J. of Robotics Research, vol. 3, no. 2, 1984.
- [4] A.P. Bessenov and N.V. Umnov, "The Analysis of Gaits in Sixlegged Vehicles according to Their static Stability," Symp. Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp. 1-10, 1973.
- [5] Special Issue in legged Locomotion, Int'l. J. of Robotics Research, vol. 3, no. 2, 1984.
- [6] 보행로보트 특집, 대한전기학회지, vol. 36, no. 5, 1987.
- [7] R.B. McGhee and A. Frank, "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," Math. Biosci., vol. 3, pp. 331-351, 1968.
- [8] S. Song and K.J. Waldron, "An Analytical Approach for Gait Study and Its Applications on Wave Gaits," Int'l J. of Robotics Research, vol. 6, no. 2, pp. 60-71, 1987.
- [9] T. Lee and C. Shih, "A study of the Gait Control of a Quadruped Walking Vehicle," IEEE J. of Robotics and Automation, vol. RA-2, no. 2, pp. 61-69, 1986.
- [10] 박성혁, 황승구, "보행 로보트의 방향 전환을 위한 걸음새 제어 알고리즘," '88 한국 자동제어 학술 회의 논문집, pp. 103-108, 1988.
- [11] 민병의, 황승구, "다각 보행 로보트의 비평탄 지형에서의 걸음새 제어," '88 한국 자동제어 학술 회의 논문집, pp. 131-136, 1988.
- [13] 임 미섭, "사각 보행 로보트의 걸음새 제어에 관한 연구," 한국 항공 대학 석사 학위 논문, 1989.