

A Method of Path Planning for a Quadruped Walking Robot on Irregular Terrain

李 然 定* · 卞 增 男**
(Yun-Jung Lee · Zeungnam Biem)

Abstract—This paper presents a novel method of path planning for a quadruped walking robot on irregular terrain. In the previous study on the path planning problem of mobile robots, it has been usually focused on the collision-free path planning for wheeled robots. The path planning problem of legged robots, however, has unique aspects from the point of view that the legged robot can cross over the obstacles and the gait constraint should be considered in the process of planning a path. To resolve this unique problem systematically, a new concept of *the artificial intensity field of light* is introduced. The artificial intensity field of light is numerically constructed over the configuration space of the robot including the transformed obstacles and a feasible path is sought in the field. Also, the efficiency of the proposed method is shown by various simulation results.

Key Words : Quadruped Walking Robot(사각 보행 로봇), Gait(걸음새), Wave-Crab Gait(물결-게 걸음새), Path Planning(경로 계획), Artificial Field(인공 계)

1. 서 론

보행 로봇은 불규칙 지형(irregular terrain)에서 바퀴 구동형 이동 로봇에 비해 이동 능력이 탁월한 점을 중시해서, 원자력 발전소, 우주 개발, 국방 분야와 같은 비평탄, 극한 상황에서 인간을 대신할 수 있는 로봇 중 하나로써 1960년대 이후 그 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 기존의 보행 로봇 관련 연구는 안정되게 걸게 하는데 있어 각 다리 및 몸체의 움직임, 즉 걸음새(gait)를 계획하고 제어하는 것들이 주류를 이루고있다. [1]~[8].

이러한 걸음새 제어 방법들은 상위 레벨 제어기로부터 몸체가 이동해 갈 경로(path)가 주어 진다는 가정하에서, 안정된 보행을 가능케 하기 위한 각 다리의 착지 위치 결정(foothold selection) 및 이동 다리의 선정(swing-leg selection) 등에 초점을

맞추고 있다. 그러나, 보행로봇에 자율 이동 능력을 갖게하기 위하여는 기존의 걸음새 연구에서 가정하고 있는 보행로봇의 경로를 자동적으로 계획하는 문제가 풀어야할 중요한 과제임에도 불구하고 지금까지 이에 관한 연구는 활발하지 못하였다.

본 논문에서는, 시작 위치와 최종 목표 위치, 그리고 이동 지역 전체의 지도가 주어진 경우, 보행 로봇의 경로 계획 문제에 대해 논하고자 하며, 이에 보다 구체적인 동기를 부여할 그림 1과 같은 경우에 대해 생각해 보자. 그림 1에서 빗금쳐 나타낸 착지 금지 지역(forbidden region)은 길이 패인 지형이거나, 디디면 부서지는 장애물이 있는 지역 등의 여러 이유에서 몸체를 지지할 만한 다리의 착지점으로 부적합한 지역을 의미하며, 이는 바퀴 구동형 이동 로봇의 경우는 피해가야할 장애물 지역으로 생각할 수 있다. 이러한 장애물 지역으로 둘러싸인 그림 1(a), 1(b) 두경우 모두에 있어, 바퀴 구동형 이동 로봇은 주어진 시작 위치에서 최종 목표까지 실행 가능한 경로가 없는 반면, 보행로봇은 장애물 지역을 건너 갈 수 있으므로 해서 실

*正 會 員 : KAIST 電氣 및 電子工學科 博士課程

**正 會 員 : KAIST 電氣 및 電子工學科 教授

接受日字 : 1993年 4月 15日

1 次修正 : 1993年 10月 5日

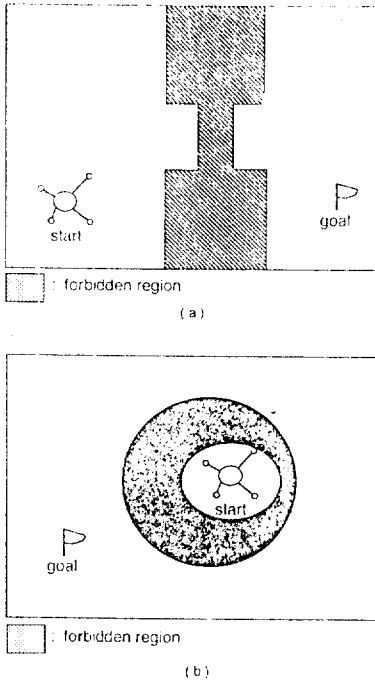


그림 1 보행 로봇의 경로 계획 문제 예
Fig. 1 Examples of path planning problems for walking robots

행 가능한 경로가 있을 수 있다.

보행 로봇의 경로의 실행 가능성은 보행로봇이 주어진 경로를 따라 움직이는 과정에서 각 다리가 착지 금지 지역을 결코 다치지 않고, 안정되게 보행할 수 있다는 보장을 의미한다. 따라서, 실행 가능한 경로를 계획하기 위해서는 물체의 이동 경로 계획시 지형의 조건을 고려한 각 다리의 착지 위치 선정과 주어진 착지위치들에 각 다리를 디디면서 안정된 보행을 가능케하는 걸음새의 계획 및 실행이 가능한지를 함께 고려하여야 하는 복잡성을 해결하여야 한다.

상기한 바와 같이 제기된, 기존의 경로 문제와는 다른 보행로봇의 경로 계획 문제에 대해 본 논문에서는, 하나의 특정한 걸음새 - 물결 - 게 걸음새 (wave-crab gait) [4] - 를 고려한 체계적이고도 간단한 한 해결 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 서론에 이어 문제 설정을 2장에서 하고, 3장에서는 기준 지지 형태를 갖는 물결 - 게 걸음새의 특성에 관해 논하며, 4장에서는 제안된 체계적인 경로 계획 방법을 자세 공간으로의 변환, 새롭게 제안한 가상의 빛 밝기 분포계, 그리고 경로 계획 알고리즘 순으로 기술하고, 제안된

방법의 타당성을 여러 모의 실험 결과를 통해 5장에서 보이고, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 문제 설정

본 논문에서 다루고자하는 보행로봇의 경로 계획 문제는 다음과 같은 가정하에 설정되어진다.

- 가정 1. 시작 위치, 최종 목표 위치, 그리고 장애물을 포함한 이동 지역에 대한 정확한 정보가 주어지 있다고 가정한다.
- 가정 2. 이동 지역은 건너갈 수 없을 만큼 높이가 높아 반드시 피해야만하는 장애물은 포함하지 않는다고 가정한다.
- 가정 3. 보행로봇의 몸체는 지면에서 일정한 높이를 수평을 유지한 채 이동하는 것으로 가정한다.

보행 로봇의 움직임은 일반적으로 3차원적으로 표현되어야 하나, 위의 가정 2, 3으로 부터 물체의 움직임은 2차원 평면 상에 투영하여 표현할 수 있으며, 다리의 들고 내리는 움직임도 정해진 높이로 일정하게 할 수 있으므로 역시 2차원적 위치만으로 각 다리의 위치를 나타낼 수 있다. 이러한 관점에서, 본 논문에서는 2차원적인 경로 계획 문제에 대해 다루고자 한다.

- 가정 4. 그림 2와 같이 각 다리의 기구학적 이동 가능 범위가 모두 같이 가로 P , 세로 W 길이의 직사각형 형태를 갖는 4각 보행로봇의 2차원 기하학적 모델을 가정한다.

그림 2에서 각 다리는 각 기구학적 이동 가능 범위내의 임의의 위치에 위치할 수 있으며, 몸체를 지지하는 다리들의 발끝 점이 이루는 다각형을 지지 형태 (support pattern) 이라 부른다. 또한, 그림 2에서와 같이 지지 형태가 몸체 중심에 대해 상호

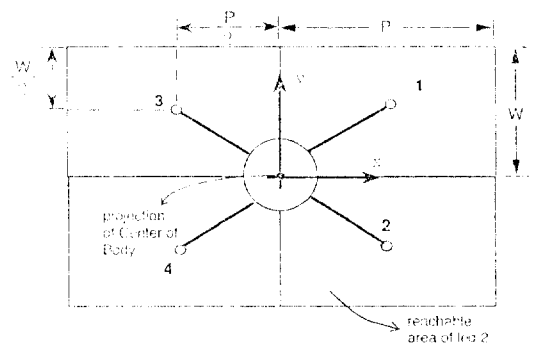


그림 2 4각 보행 로봇의 2차원 기하학적 모델
Fig. 2 The 2-dimensional model of a quadruped

대칭이고, 각 지지점이 이동 가능 범위의 중심에 있는 것을 기준 지지 형태(standard support pattern)로 정의한다. 각 다리의 번호는 그림 2와 같이 x 축에 대해 좌우측 순으로 1부터 정해 나간다.

가정 5. 주기 시작점과 끝점에서 기준 지지 형태를 갖는 물결-게 걸음새를 고려한 경로 계획 문제로 가정 한다.

물결 걸음새(wave gait)는 1968년 McGhee와 Frank의 연구[1]등에 의하여 제안된 후, 1987년 Song과 Waldron[2]에 의해 해석적인 방법을 통해 재 정리되고, 1990년 Song과 Choi[3]에 의해 $2n$ 개의 다리를 갖는 경우로 까지 일반화된 걸음새이다. 물결 걸음새는 선후 직진 보행시 종적 안정 여유도(Longitudinal Stability Margin)을 최적화한뿐 아니라, 자연계의 동물들의 저속 보행시 걸음새와 같은 특성을 갖고 있다.

그러나, 물결 걸음새는 선후 직진 방향으로의 움직임만을 고려한 것으로, 임의의 방향으로의 보행을 위해서 새로운 걸음새가 요구되게 되었다. 이러한 관점에서, 게 걸음새(crab gait), 회전 걸음새 등에 대한 연구가 진행되었다. 이 중 게 걸음새는 임의의 방향으로 직선적인 이동이 가능한 걸음새로, 1984년 Hirose[5]가 기준 게 걸음새(standard crab gait)를 제안한 이후, 1990년 Zhang과 Song[4]이 물결 걸음새와 게 걸음새의 특성을 합한 물결-게 걸음새의 안정도 해석을 하였고, 1993년 Min과 Bien[6]에 의해 물결-게 걸음새보다 큰 안정 여유도를 갖는 canonical-게 걸음새가 제안되기도 하였다.

한편, 이들 주기걸음새는 일반적으로 주기 시작점에서의 로봇 자세(몸체와 각 다리 위치와의 관계)와 주기 끝점에서의 자세가 같은 특성을 갖는다. 이는, 주기 걸음새 종류마다 다르기는 하지만, 자세가 일정한 경우 한주기 동안 안정되게 이동할 수 있는 몸체의 이동 거리의 범위를 정할 수 있음을 의미하며, 몸체의 위치와 일정한 자세로부터 각 다리의 착지 위치도 정할수 있게 된다.

따라서, 하나의 주기걸음새와 특정한 자세를 가정하고 경로 계획을 하는 경우, 각 다리의 착지 위치 선정은 경로를 따라 가정한 주기걸음새의 주기 선후 자세의 상호관계로부터 결정할 수 있다.

이러한 견지에서, 본 논문에서는 모든 방향으로의 보행이 가능한 걸음새이고, 걸음새 조건이 비교적 간단하여 전체적 논지 전개를 효율적으로 할 수 있는 물결-게 걸음새를 가정한 것이다.

상기한 가정들 하에 본 논문에서는 주어진 시작 위치에서 최종 목표 위치까지 4각 보행로봇의 실행 가능한 경로, 즉 몸체 중심의 경로 및 물결-

게 걸음새로 이동 가능한 일련의 연속된 지지 형태(또는, 착지 위치)를 계획하는 방법을 제안하고자 한다.

3. 기준 지지 형태와 물결-게 걸음새

물결-게 걸음새의 특성을 설명하기 위해서는 많은 용어에 대한 정의, 가정 등에 대한 설명이 전제 되어야하나 효율적 논지 전개를 위하여 본 논문에서는 경로 계획 문제의 관점에서 간략히 그 특성을 기술하고자 한다. 걸음새 관련 용어등에 관한 자세한 설명은 참고문헌 [1]~[4] 등에 자세히 기술되어 있다.

물결-게 걸음새는 물결 걸음새와 같이, 한 주기 동안 모든 다리의 몸체 지지 시간(duty factor, β)이 같고, 같은 측(진행 방향 축을 중심으로 좌측 또는 우측)의 인접한 다리 간의 움직임의 위상차가 반 주기이다.[1]-[2].

이러한 특성들로 부터, 한주기 동안 몸체의 이동

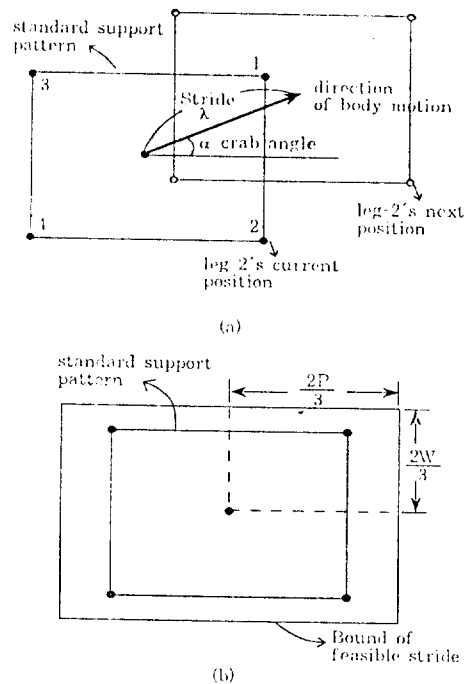


그림 3 기준 지지 형태를 갖는 물결-게 걸음새의 한주기내 이동가능 거리의 범위 (a) 한주기 이동에 (b) 범위

Fig. 3 Bound of stride of wave-crab gait with standard support pattern in one cycle (a) one-cycle locomotion (b) bound

거리(stride, λ)는 지지 구간에서 몸체와 상대적인 다리의 이동 거리(stroke, R) 및 β 와 $\lambda = \frac{R}{\beta}$ 의 관계를 갖는다. 또, 4각 물결 걸음새의 경우 $\frac{3}{4} \leq \beta < 1$ 이며, R 과 β 는 독립적으로 정해진다. 따라서, 위 관계식에서 λ 의 범위는 β 의 최소값 $(\frac{3}{4})$ 과 R 의 최대값으로부터 정해진다. R 의 최대값은 기구학적 가동 범위 내로 제한되므로 기준 지지 형태를 갖는 경우 x 방향으로는 $\frac{P}{2}$, y 방향으로는 $\frac{W}{2}$ 가 R 의 최대값이 된다. 그러므로, 기준 지지 형태를 갖는 물결 걸음새의 한주기내 x 방향 이동 가능 거리의 범위는, $\lambda \leq \frac{2}{3}P$ 이다.

물결-게 걸음새는 임의의 직선 방향으로 물결 걸음새의 특성을 가지므로, λ 의 x, y 방향 성분을 각각 λ_x, λ_y 라 하면, 기준 지지 형태를 갖는 물결-게 걸음새의 한주기내 이동 가능 거리의 범위는

$$|\lambda_x| \leq \frac{2}{3}P, |\lambda_y| \leq \frac{2}{3}W \quad (1)$$

이다. 이는 그림 3(a)에 나타낸 것과 같이 주기 시작점과 끝점에서 기준 지지 형태로 각 다리의 위치 및 몸체 중심의 위치 관계가 주어질 때, 물결-게 걸음새로 안정된 보행이 가능한 한 주기내 몸체 이동 거리의 범위를 의미한다(그림 3(b) 참조).

한편, 식 (1)과 같은 이동 범위는 로봇트의 진행 방향, 즉 게 걸음각(crab angle)에 따른 다리의 이동 순서(swing-leg sequence)를 게 걸음각의 구간

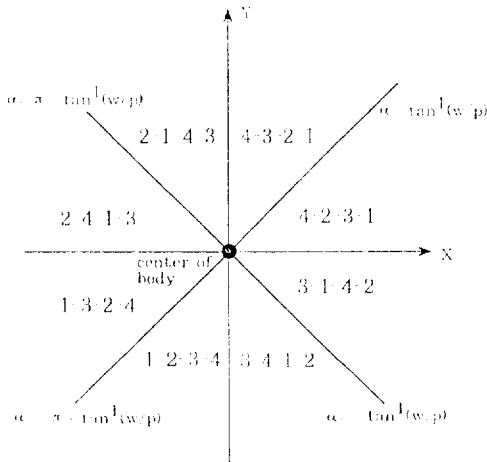


그림 4 물결-게 걸음새의 게 걸음각 구간별 다리 이동 순서

Fig. 4 Swing-leg sequences of wave-crab gait according to crab angle

마다 그림 4와 같이 정하므로써 보장된다.[4],[6]

4. 경로 계획 방법

4.1 자세 공간으로의 변환

전술한 바에 따라, 인접한 두 기준 지지 형태가 식 (1)을 만족하는 범위내에 있으면, 이들간에 물결-게 걸음새를 이용한 안정된 보행이 가능함을 보장한다. 따라서, 경로 계획시에는 인접한 두 기준 지지 형태가 식 (1)을 만족하면서, 각 지지 형태의 꼭지점, 즉 각 다리의 착지 위치가 착지 금지 지역에 포함되지 않도록 하는 것으로서 물결-게 걸음새를 고려한 경로 계획을 하면 된다.

이러한 조건들의 만족 여부를 기준 지지 형태의 꼭지점 모두에 적용해야하는 문제는 기준지지 형태를 그 몸체의 중심점-한점-으로 변환하고, 그 대신 주어진 이동 공간의 착지 금지 지역을 이에 상응하게 변환한 후, 변환된 점 로보트를 고려한 경로 계획 문제로 단순화할 수 있다. 보행로보트의 자세는 몸체와 각 다리의 상호 위치 관계에 의해서 결정되며, 기준 지지 형태는 하나의 로보트 자세를 나타내므로, 위와 같이 한 점이 하나의 로보트 자세에 대응하도록 변환된 공간을 로보트 자세 공간(configuration space)이라 부른다. 이와 유사한 개념의 자세 공간에서의 경로 계획 방법은 Lozano-Perez[9]등에 의해 제안된 후, 바퀴 구동형 로보트나 매니퓰레이터의 경우에 대해 많은 연구가 있어 왔다.

기준 지지 형태를 갖는 4각 보행로보트의 경우, 로보트 자세 공간으로 주어진 이동 공간의 착지 금지 지역의 변환은 다음과 같이 간단히 구할 수 있다. 주어진 하나의 착지 금지점이 원래 주어진 이동 공간에서 (x, y) 좌표에 있을 때, 기준 지지 형태의 4개의 꼭지점중 어느 것도 이 금지점과 일치하면 안된다. 이는 역으로, 몸체 중심점이 다음과 같은 4개의 위치에 있으면 어느 한 다리가 착지 금지점과 일치하는 것을 의미한다.

$$\left(x - \frac{P}{2}, y - \frac{W}{2}\right), \left(x - \frac{P}{2}, y + \frac{W}{2}\right)$$

$$\left(x + \frac{P}{2}, y - \frac{W}{2}\right), \left(x + \frac{P}{2}, y + \frac{W}{2}\right)$$

따라서, 원래 주어진 이동 공간에서의 착지 금지점 한점은 자세 공간에서 4개이 금지점에 대응한다. 이는 착지 금지 지역을 포함한 주어진 이동 공간에 대한 지도를 x 방향으로 $\pm \frac{P}{2}$ 만큼, y 방향으로 $\pm \frac{W}{2}$ 만큼씩 평행 이동 시킨 것을 모든 지도의 착지 금지점을 포함하도록 합치므로써 쉽게 로보

트 자세 공간으로 변환할 수 있음을 의미한다.

4.2 가상의 빛 밝기 분포계(Artificial Intensity Field of Light)

본 절에서는 자세 공간 상에 주어진 시점에서 목표점까지 점 로봇의 경로 계획에 대해 기술하고자 한다. 바퀴 구동형 이동 로봇의 경우는 계획된 경로와 장애물이 만나는 부분에서는 충돌이라고 여겨지므로, 경로와 장애물이 겹쳐지지 않도록 경로를 계획한다. 그러나 보행로봇의 경우는 장애물을 건너갈 수도 있으므로, 2차원상에서 장애물과 몸체의 경로가 겹쳐 질 수도 있다. 이러한 특성에 따라, 보행 로봇 경로 계획 방법으로 기존의 장애물 충돌 회피와 관련되어 연구된 방법 - V 그래프 방법[10], 가상 포텐셜 계 방법(artificial potential field method)[11][12]등 - 을 직접 적용하는 것은 불가능함, 복잡한 지형 조건을 고려할 때 탐색(search)방법은 많은 계산 시간을 필요로 하여 부적합하다.

우선 주어진 자세 공간상의 종점에 일정한 빛의 밝기를 갖는 광원을 놓고, 모든 다른 부분의 밝기는 초기화 한다고 하자. 그 다음, 광원으로부터의 빛은 거리에 따라 그 밝기가 감쇄되고, 식 (1)의 범위내의 장애물 지역 즉, 건너갈 수 있는 지역은 통과하고, 그렇지 못하면 통과하지 못하는 제한을 가지면서, 주어진 공간내에 분포된다고 하자. 이때 반사는 없다고 한다. 그러면, 임의의 한 위치에 시점이 주어지고, 만약 그 시점에서의 빛의 밝기가 초기 상태와 같다면 종점으로부터 빛의 도달이 불가능하다는 것이므로 주어진 시점에서 종점까지의 경로는 없다는 것을 의미하고, 그렇지 않으면 경로가 있음을 의미하고 하나의 경로를 계획할 수 있게 된다.

상기의 조건을 만족하는 가상의 빛 밝기 분포를 구하기 위해, 주어진 자세공간을 x 축 방향으로 N 개, y 축 방향으로 M 개 만큼 등 간격으로 분할하고, 분할된 임의의 점 $P_i(x_i, y_i)$ 에서의 빛 밝기(L_{P_i})의 평형 방정식을 다음과 같이 정한다.

$$L_{P_i} = \max_{P_j} (L_{P_j} - d(P_i, P_j)) \quad (2)$$

여기서, $P_j(x_j, y_j)$ 은 $|x_i - x_j| \leq \frac{2}{3}P$, $|y_i - y_j| \leq \frac{2}{3}W$ 를 만족하고, 점 $P_i(x_i, y_i)$, $P_j(x_j, y_j)$ 은 착지 가능 지역에 속하는 점이다. 또한, d 는 거리 함수이다.

식 (2)의 평형 방정식은 다음과 같은 의미를 내포하고 있다.

임의의 점 P_i 에서 빛의 밝기는 점 P_i 로 한주기만에 이동가능한 범위 내의 점들, 즉 $|x_j - x_i| \leq \frac{2}{3}P$,

$|y_j - y_i| \leq \frac{2}{3}W$ 를 만족하는 점 P_j 들에 대해서 고려하며, 그 계산은 점 P_j 에서의 밝기(L_{P_j})에서 이들 점간의 거리에 해당하는 값($d(P_i, P_j)$)만큼을 감쇄시킨 것들 중에서 최대의 값으로 정하는 것이다. 여기서 최대값(maximum)을 취하는 것은 실제 경로 계획시, 주어진 범위내에 한점이라도 밝은 곳이 있으면 그 곳으로의 이동이 가능하여야하며 각 점의 밝기가 그 점에서 종점까지의 도달 가능성과 관련있기 때문이다.

또한, 두 점 $P_i(x_i, y_i)$, $P_j(x_j, y_j)$ 간의 거리는 $d_i(P_i, P_j) = |x_j - x_i| + |y_j - y_i|$ $d_2(P_i, P_j) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ 나 $d_3(P_i, P_j) = \max(|x_j - x_i|, |y_j - y_i|)$ 등으로 정의될 수 있다.

평형 상태를 유지하고 있는 계에, 일단 광원이 한 점(종점)에 놓이면 평형이 깨지게 되며 빛이 퍼져나가게 된다. 따라서, 주어진 자세공간상에서 가상의 빛 밝기는 종점이 광원에 놓인후 전체계가 평형상태를 유지할때까지 반복적으로 각점의 밝기를 계산하므로써 구할 수 있다. 종점의 위치를 P_0 라 할때, 임의의 점 P_i 에 대해서 반복적 계산을 위한 평형 방정식은 식 (2)로부터 간단히 다음과 같이 성한다.

$$L_{P_i}(k+1) = \max_{P_j} (L_{P_j}(k) - d(P_i, P_j)) \quad (3)$$

여기서, k 는 반복 횟수(iteration number)이고,

$P_j(x_j, y_j)$ 은 $|x_j - x_i| \leq \frac{2}{3}P$, $|y_j - y_i| \leq \frac{2}{3}W$ 를 만족하고, 점 $P_i(x_i, y_i)$, $P_j(x_j, y_j)$ 은 착지 가능 지역에 속하는 점이다.

또한, $L_{P_i}(0) = 0$ ($0 \leq x_i \leq N$, $0 \leq y_i \leq M$ 에 대해서)으로 초기화 하고, 종점의 밝기 $L_{P_0}(0)$ 는 주어진 공간의 전체 크기를 고려해 거리에 따라 감쇄되더라도 선역에 퍼질 수 있을만큼 충분히 큰 값으로 정한다.

다음은 식 (3)과 같이 반복적으로 정해지는 임의의 점 P_i 에서의 밝기(L_{P_i})의 수렴성에 대해 살펴본다. 수렴성의 보장은 임의의 주어진 공간에서 빛 밝기 분포 계를 반복적으로 계산함에 있어 전체계가 평형 상태로 가게됨을 의미한다.

보조 정리 1 : 식 (3)과 같이 정해지는 임의의 점 P_i 에서의 밝기(L_{P_i})는 반복횟수 k 에 따라 단조 증가한다.

증 명 : $L_{P_i}(k+1) = \max_{P_j} (L_{P_j}(k) - d(P_i, P_j))$ 에서 $P_i = P_j$ 일때 $L_{P_i}(k) - d(P_i, P_j) = L_{P_i}(k)$ 이므로

$$L_{P_i}(k+1) = \max_{P_j \neq P_i} (L_{P_j}(k) - d(P_i, P_j))$$

이다. 따라서, $L_p(k+1) \geq L_p(k)$ 이다. 즉, $L_p(k)$ 는 k 에 따라 단조 증가한다.(증명 끝)

보조 정리 2 : 한 점 P_0 의 초기 밝기 $L_{p_0}(0) = l_0$ (> 0)이고, 주어진 계내의 임의의 점 P_i 의 초기 밝기가 $L_{p_i}(0) = 0$ ($P_i \neq P_0$ 에 대하여)일 때, 모든 k ($k \geq 0$)에 대하여 $L_{p_i}(k) \leq l_0$ 이다.

증명 : $L_{p_i}(k+1) = \max_{p_j} (L_{p_i}(k) - d(P_i, P_j))$ 에서
 $L_{p_i}(k+1) \leq \max_{p_j} (L_{p_i}(k)) (\because \forall P_j, d(P_i, P_j) \geq 0)$

초기 조건에서 $L_{p_i}(1) \leq \max_{p_j} (L_{p_i}(0)) \leq l_0$
 또, $L_{p_i}(2) \leq \max_{p_j} (L_{p_i}(1)) \leq l_0 (\because \forall P_j, L_{p_i}(1) \geq l_0)$
 그러므로 귀납적으로,

$L_{p_i}(k) \leq \max_{p_j} (L_{p_i}(k-1)) \leq l_0$
 즉, $L_{p_i}(k) \leq l_0 (k \geq 0)$ 이다. (증명 끝)

또한, 보조 정리 2와 관련하여 살펴보면, 광원이 놓인 한 점 P_0 에서의 밝기는 모든 $k (\geq 0)$ 에 대하여, $L_{p_0}(k) = l_0$ 이며, 이는 전체 계의 최대 밝기가 된다.

정리 1 : 식 (3)에 의하여 정해지는 임의의 점 P_i 의 밝기 $L_{p_i}(k) (k \geq 0)$ 는 k 가 증가함에 따라 수렴(converge)한다.

증명 : 보조 정리 1과 2에서 $L_{p_i}(k)$ 는 단조 증가하며, 그 크기가 제한(bound)되어 있으므로 $L_{p_i}(k) (k \geq 0)$ 는 k 가 증가함에 따라 수렴(converge)한다[13].(증명 끝)

모든 점의 밝기가 수렴하면, 전체 계가 평형 상태, 즉 모든 점의 빛의 밝기가 더 이상 변화하지 않는 상태가 된다. 이와같이, 전체 계가 평형 상태로 수렴하였는지에 대한 여부는 다음 식과 같이 모든 점의 밝기의 변화량의 합이 일정 범위 내의 값을 가지는지 여부로 판단되어 질 수 있다.

$$\sum_{x_i=0}^N \sum_{y_i=0}^M |L_{p_i}(k+1) - L_{p_i}(k)| \leq \epsilon \quad (4)$$

여기서, $P_i(x_i, y_i)$ 이고, $\epsilon \geq 0$ 이다.
 ϵ 은 밝기 분포의 반복 계산 과정에 있어 연산 오차 허용 범위로 정할 수 있다.

4.3 경로 계획 알고리즘

본절에서는 미리 주어지는 임의의 빛의 밝기 분포계 상에서 주어진 시점에서 종점까지의 경로 계획에 관해 기술한다.

평형 상태를 이룬 빛 밝기 분포계 상에 한 시점

이 주어졌을 때, 그 시점에서의 빛의 밝기가 0(초기값)과 같지 않으면 종점에 놓인 광원으로부터 빛이 도달했다는 것을 의미한다. 이때, 반복 횟수를 l , l 번째 결정되는 점 로보트의 자세공간상에서의 위치를 $G(l) = ([G_x(l), G_y(l)]')$ 라 하고, 시점의 위치를 $G(0)$ 라 하자. 시점에서 시작하여 매번 다음 이동 위치를 결정해 나가는데 있어, 현재 l 번째 위치에서 식(1)을 만족하는 범위 내의 점들 중 최대의 밝기 값을 갖는 점을 $l+1$ 번째 위치로 결정해 나가는 방법을 이용하면 결국 종점에 이르게 되고 실행 가능한 하나의 경로를 계획할 수 있다. 만일, 최대 밝기 값을 갖는 점이 2점 이상이면 그 중 종점과의 거리가 최소인 것으로 결정한다. 이러한 과정을 종점에 이를 때까지 반복하면, 하나의 유한한 점들의 시퀀스 $\{G(0), G(1), \dots, G(l), \dots\}$ 가 결정되며 이들 각각의 인접한 점들을 직선으로 연결한 선분의 집합으로 경로가 구해진다.

여기서 주목할 점은, 매 보행 주기에 대해 주어지는 몸체의 이동 거리(인접한 두 경유점 사이 거리)가 달라짐에 따라 하위 제어기에서는 이에 적절한 물결-계 걸음새를 계획하고 수행하여야 한다는 점이다. 즉, 주어진 두 경유점에 따라 정해지는 계걸음각에 따라 한 주기 동안에 몸체는 정해진 방향으로 직선 이동하며, 각 다리는 각각 정해진 다음 착지점으로 다리 이동 순서에 따라 움직이게 된다. 따라서, 경유점 수가 많을수록 걸음 수가 많아지게 되어 보행 시간이 길어지게 되므로, 많은 경유점을 가진 짧은 경로보다는 적은 경유점을 가진 긴 경로가 더 효율적일 수 있다.

위와 같은 방법을 통해 구해진 경로는 시점에서 종점까지 최단 거리를 보장하지는 못하나, 매주기 이동가능한 최대 보폭과 종점까지의 거리를 고려한 경유점을 선정하므로 적절한 수의 경유점과 길이를 갖는 경로가 결정된다.

그리고, 구해진 자세공간상의 경로는 원래 주어진 이동 공간상의 경로와 일치하며, 각 점은 기준 지지 형태를 갖는 하나의 로보트 자세로 다시 변환할 수 있다.

5. 모의 실험 결과

본 절에서는 앞서 기술한 체계적인 보행로보트의 경로 계획 방법이 단계적으로 적용되 나가는 것을 대표적인 3가지 문제에 대해서 살펴본다.

본 모의 실험에 있어서, 로보트 각 다리의 이동 가능 범위는 $P=100\text{cm}$, $W=50\text{cm}$, 전체 이동 지역의 크기는 x 축 방향으로 10m , y 축 방향으로 7.5m 으로 하고, 이동 지역의 등간격 분할은 x 축 방

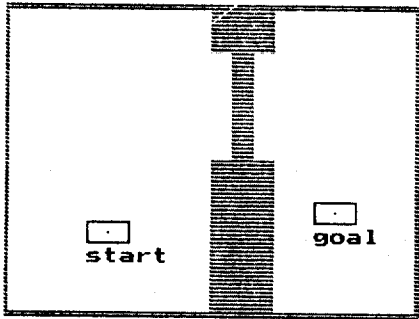
향으로는 $N=200$, y 축 방향으로로는 $M=150$ 으로 하였다.

그림 5(a), 그림 6(a), 그림 7(a)와 같이 불규칙 이동 지역과 시작 위치 및 목표 위치가 주어지면, 이들은 그림 5(b), 그림 6(b), 그림 7(b)와 같이 기준 지지 형태를 갖는 로봇 자세 공간상으로 변환된다. 그리고, 각각에 대한 가상의 빛 밝기 분포계는 식(3), 식(4)를 이용하여 그림 5(c), 그림 6(c), 그림 7(c)와 같이 구해진다. 이 때, 식(4)의 전체계 평형 조건에서 $\epsilon=0$ 으로 하였다. 이 밝기 분포 그림에서, 밝을 수록 검게 나타나도록 표시하였으며, 굵은 띠 형태로 밝기 분포가 보여지는 것은 흑백 농도의 표현상 세분화 정도의 제한에 의한 것일 뿐이고, 실제로는 같은 농도의 띠 내부의 밝기도 연속적으로 변화한다.

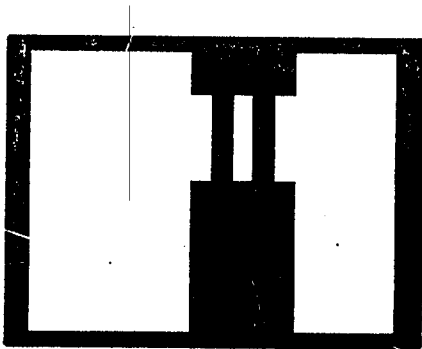
또한, 거리 함수는 $d_1(P_i, P_j) = |x_j - x_i| + |y_j - y_i|$ 을 사용하였으며, 이에 따라 빛이 퍼져나가는 형태가 마름모꼴인 것을 볼 수 있다.

$$d_2(P_i, P_j) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

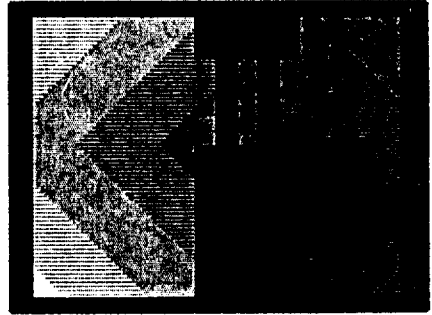
$$d_3(P_i, P_j) = \max(|x_j - x_i|, |y_j - y_i|)$$



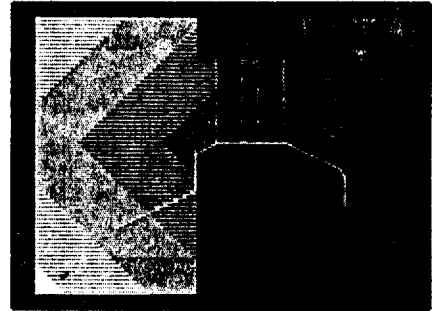
(a)



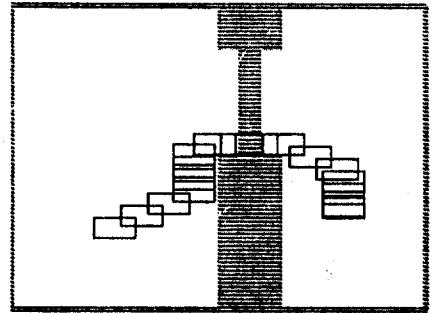
(b)



(c)



(d)



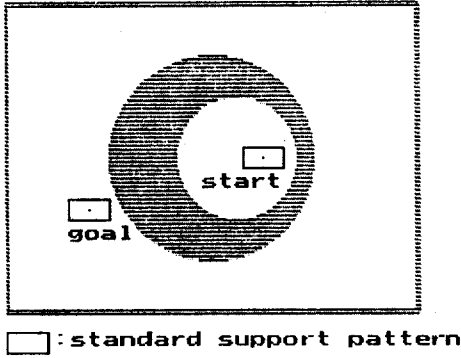
(e)

그림 5 불규칙 지형에 대한 경로 계획과정 (I)

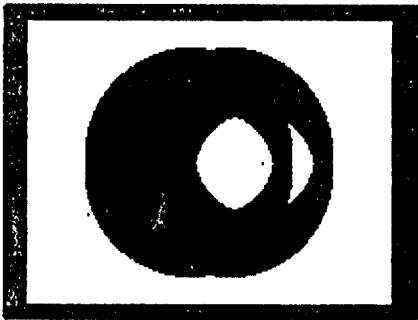
- (a) 주어진 불규칙 이동 지역
- (b) 자세 공간상으로 변환
- (c) 가상 빛 밝기 분포계
- (d) 계획된 몸체 이동 경로
- (e) 계획된 경로와 착지 위치

Fig. 5 Path planning procedure for an irregular terrain (I)

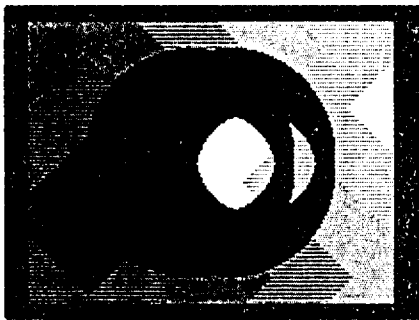
- (a) given irregular terrain
- (b) configuration space mapping
- (c) artificial intensity field of light
- (d) planned path of body
- (e) planned path and footholds



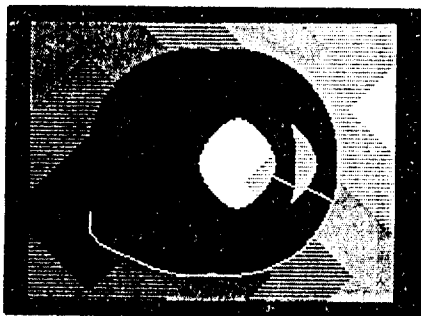
(a)



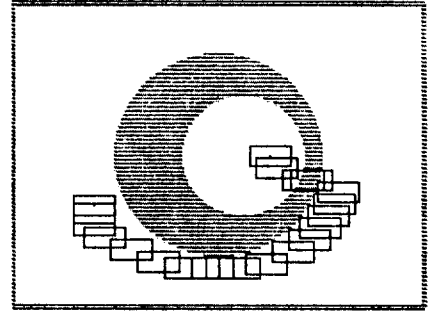
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 6 불규칙 지형에 대한 경로계획 과정 (II)

Fig. 6 Path planning procedure for an irregular terrain (II)

함수를 정의할 때는 빛이 퍼져나가는 형태가 각각 원형과 직사각형이 되며, 이렇게 달라진 분포계로 인해 계획된 경로가 서로 약간 다르게 되는 정도의 차이만을 갖는다.

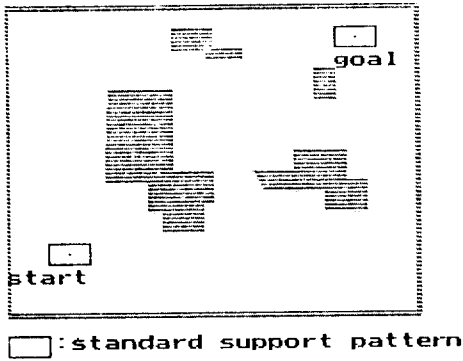
경로 계획의 결과는 자세 공간 상에서 점 로봇에 관해서는 그림 5(d), 그림 6(d), 그림 7(d)와 같이 구해지고, 이들을 원래 주어진 이동 지역으로 변환하면 몸체의 이동 경로 및 기준 지지 형태를 갖는 각 다리의 착지 위치가 그림 5(e), 그림 6(e), 그림 7(e)와 같이 계획된다.

이상의 모의 실험으로부터, 본 논문에서 제안한 보행로봇의 경로 계획 방법은 임의의 복잡한 착지 금지 지역을 포함하는 이동 지형에 대해서 적용 가능한 뿐 아니라, 합당한 경유점과 길이를 갖는 경로를 구할 수 있으며, 그 접근 방법이 체계적이고 간단한 장점을 가지고 있음을 알 수 있다.

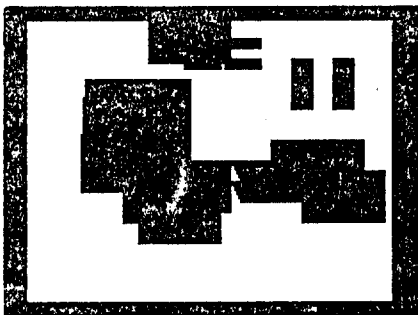
6. 결 론

본 논문에서는 기존의 장애물 회피 경로를 계획하는 것과는 매우 다른 보행 로봇의 경로 계획 문제를 제기하고, 이를 해결하기 위한 하나의 방법을 제시하였다. 보행 로봇의 경로 계획 문제는 걸음새의 조건과 밀접한 관계가 있음을 인지하고, 기준 지지 형태를 갖는 물결-계 걸음새를 고려한 경로 계획 문제를 다루었다.

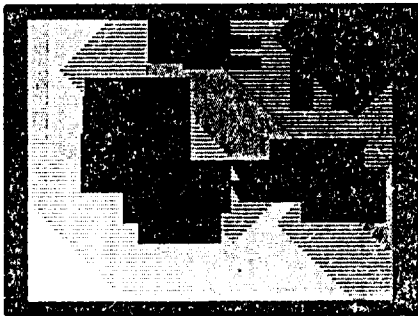
그 구체적인 방법에 있어서는, 먼저 주어진 이동 지역을 로봇 자세공간 상으로 변환하고, 다음으로 목표 위치에 하나의 광원을 놓고 그로인한 전체 계의 빛 밝기 분포를 구한 후, 주어진 시작 위치부터 빛이 밝은 곳을 따라 이동하여 경로를 찾



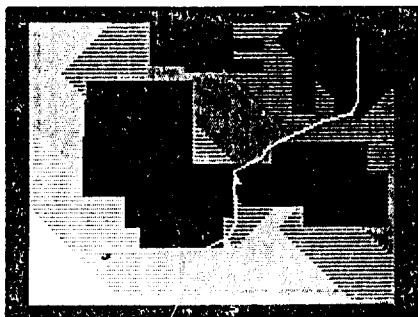
(a)



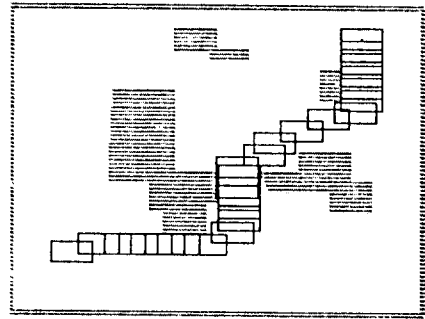
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 7 불규칙 지형에 대한 경로 계획 과정 (III)
Fig. 7 Path planning procedure for an irregular terrain (III)

는 체계적이고도 간단한 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 본 논문에서 고려한 기준 지지 형태가 아닌 다른 지지 형태, 또는 물결-계 걸음새가 아닌 다른 걸음새인 경우의 경로 계획 문제에 적용하기 위한 변형 및 확장이 용이하다.

참 고 문 헌

- [1] R. B. McGhee and A. A. Frank, "On the Stability Properties of Quadruped Creeping Gaits," *Math. Biosciences*, Vol. 3, pp.331-351, 1968.
- [2] S. M. Song and K. J. Waldron, "An Analytical Approach for Gait Study and Its Application on Wave Gaits," *Int. J. Robotics Res.* Vol. 6, No. 2, pp.60-71, 1987.
- [3] S. M. Song and B. S. Choi, "The Optimally Stable Ranges of $2n$ -Legged Wave Gaits," *IEEE Trans. SMC*, Vol. 20, No. 4, pp.888-902, 1990.
- [4] C. D. Zhang and S. M. Song, "Stability Analysis of Wave-Crab Gaits of a Quadruped," *J. Robotics Systems*, Vol. 7, No. 2, pp.243-276, 1990.
- [5] S. Hirose, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle," *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 3, No. 2, pp.113-133, 1984.
- [6] B. Min, Z. Bien and S. Hwang, "Basic Characteristics and Stability Properties of Quadruped Crab Gaits," *J. Robotica*, Vol. 11, pp.233-243, 1993.
- [7] R. B. McGhee and G. I. Iswandhi, "Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain," *IEEE Trans. SMC*, Vol. SMC-9, No.

- 4, pp.176-182, 1979.
- [8] P. K. Pal and K. Jauarajan, "Generation of Free Gait-A Graph Search Approach," IEEE Trans. Robotics Automat., Vol. RA-7, No. 3, pp.299-305, 1991.
- [9] T. Lozano-Perez, "Spatial Planning: A Configuration Space Approach," IEEE Trans. Computers, Vol. C-32, No. 2, pp.108-120, 1983
- [10] T. Lozano-Perez and M. A. Wesley, "An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles," Communications of the ACM, Vol. 22, No. 10, pp.560-570, 1979.
- [11] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," Int. J. Robotics Res. Vol. 5, No. 1, pp.90-98, 1986.
- [12] J. Kim and P. K. Khosla, "Real-Time Obstacle Avoidance Using Harmonic Potential Functions," IEEE Trans. Robotics Automat., Vol. 8, No. 3, pp.338-349, 1992.
- [13] S. C. Malik, *Introduction to Convergence*, John Wiley & Sons, 1984.

저 자 소 개



이연정(李然定)

1961년 9월 10일생. 1984년 한양대 공대전자공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1986-90년 한국기계연구원 자동제어실 연구원. 1990- 현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사과정 재학중



변중남(卞增男)

1943년 10월 11일생. 1969년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1972년 미국 Iowa대학 전기과 및 수학과 졸업. 1975년 Iowa대학 전기과 졸업(공학박). 1981년~82년 동 객원 교수. 현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수.