

폐회로 기구학적 구조의 벽면이동 로봇 설계

이정훈* · 류성무** · 최혁렬***
(1999년 12월 22일 접수)

Design of Wall Climbing Robot with Closed Loop Kinematic Chains

Junghoon Lee, Sungmoo Ryew, and Hyoukryeol Choi

Key Words: Wall Climbing Robot(벽면이동 로봇), Closed Loop Linkage(폐회로 기구), Walking Robot(보행 로봇)

Abstract

In this paper, we present a wall climbing robot whose gate pattern takes after those of specialized climbing animals such as spiders. Characteristic features of the biological locomotion are partly realized in the design of the mechanism. The robot has two legs and a trunk. Each one-dof leg with suction pads is driven by a motor which employs a closed loop linkage mechanism, and the trunk with suction pads steers the whole body of the robot using a motor. By generating adequate trajectories of the leg and simultaneously alternating the suction pattern between the legs and the trunk, we can achieve the spider like motion. The proposed idea is implemented in a robot and some tests are performed to evaluate its performance.

1. 서론

최근에 들어서 지금까지 수행되어온 이동로봇에 관한 연구와는 다르게 빌딩, 교량, 대형저장 탱크, 원자력 발전소, 대형 항공기 및 선박 등과 같이 사람이 직접 접근하기 어려운 대상물의 검사, 보수, 청소와 도장 등의 작업에 이동로봇을 이용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 대상물들을 위한 작업의 특징은 위험하고, 작업자의 접근이 용이하지 않거나 원하는 작업을 수행하기에는 부대적인 작업이 필요하므로 경제적 부담이 커진다는 점이라고 할 수 있다. 이와 같은 작업에 로봇을 응용하게 될 경우 작업에 소요되는 비용을 줄일 수 있고 작업자를 위험한 환경에서 벗어나게 할 수 있는 등 다양한 잇점이 있다. 벽면이동 로봇은 작업 수행에 필요한 장비를 탑재하고 벽면에 부착하여 중

력을 극복하며 이동할 수 있는 로봇을 말하며 앞서 나열한 응용분야에 적합한 이동로봇 중의 하나라고 할 수 있다. 지금까지 많은 연구자들이 다양한 형식의 벽면이동로봇을 제안하여 왔다.

벽면이동 로봇은 크게 이동 방법과 부착 방법에 따라 분류할 수 있으며 먼저 이동 방법에 의하여 나누면 무한 궤도형과 보행형 로봇으로 구분할 수 있다. 무한 궤도형^(1~3)은 균용탱크에 사용되는 것과 같은 무한 궤도에 흡착판을 부착한 것으로 빠른 속도로 이동할 수 있으나 거친 환경에 적응할 수 있는 능력이 떨어지는 단점이 있다. 무한 궤도형 로봇으로는 Fukuda등의 Mark I과 Mark II를 들 수 있으며 기계적 밸브를 사용한 것이 특징이다.⁽²⁾ 반면에 보행형^(4~10)은 거친 지형 및 장애물을 쉽게 극복할 수 있으나 일반적으로 이동속도가 상대적으로 느리며 복잡한 제어 시스템을 필요로 하는 단점이 있다. Luk등이 개발한 Robug II는 공압 액츄에이터를 사용한 보행형 벽면이동로봇으로 각 다리와 몸체에 흡착패드를 탑재하여 흡착과 탈착을 교대로 일으킴으로써 이동한다.⁽⁹⁾ 부착 방법에 따른 로봇의 분류로는 자석형, 흡착 패드형, 그리고 추진력형 세가지를 들 수 있다. 자석형^(6,6,12)은 무겁고 로봇이 주행할 수 있는 표면의 재질이 자

* ATI technology 기술연구소

** 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

*** 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hrchoi@mecha.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7449 FAX : (031)290-5849

성체로 제한되는 단점이 있다. 자석형의 예로는 영구자석을 이용한 Mitsubishi 중공업의 도장로봇을 들 수 있다.⁽¹²⁾ 흡착 패드형은 대부분의 벽면이동 로봇이 채택하는 방법으로 가볍고 제어가 쉬운 장점이 있으나 압축공기를 제공해야 하는 문제점을 갖는다. 추진력형은 용도가 매우 제한되며 정지상태의 제어가 어렵다. 이와 같은 형식의 로봇으로는 Nishi의 프로펠러형 로봇⁽¹¹⁾과 Davis대학의 교량검사 로봇⁽¹³⁾이 있다.

지금까지 개발된 벽면이동 로봇은 구동과 부착을 위하여 복잡한 메커니즘과 많은 구동기(actuator)를 필요로 하며 결과적으로 자중이 증가하는 문제점이 있었다. 벽면이동 로봇은 탑재된 장비 및 자체 중량을 지고 이동해야 하므로 가능한 가벼워야 한다. 따라서 메커니즘을 단순화하여 자중을 줄이고 반면에 다양한 환경에서 적용하며 이동할 수 있도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 새로운 보행방법과 메커니즘을 채용한 벽면이동 로봇을 제안한다. 이 로봇의 메커니즘은 거미와 같은 곤충의 이동 방식에서 아이디어를 얻어서 설계되었다. 거미의 관찰을 통해서 거미가 이동시 다리를 들었을 때 몸체가 지면과 가깝게 되며 반대로 다리를 땅에 붙였을 때에는 몸체가 들리는 것을 알 수 있었다. 제안된 로봇은 이와 같은 거미의 보행 형식을 흉내낸 것이며 이 방식은 몸체가 단지 다리를 지지하며 이동에는 기여하지 못하는 일반적인 보행 로봇과는 매우 다르다. 본 연구에서는 거미의 특징적인 보행형식을 수정된 4절 링크 구조의 폐회로 메커니즘을 이용하여 구현하였다. 제안된 로봇은 몸체와 2개의 다리로 구성되며 몸체에는 6개, 다리에는 각각 3개의 흡착 패드를 갖는다. 다리와 로봇의 몸체는 평행 4절 링크 2개가 중첩된 구조의 폐회로 메커니즘 구조를 가지며 적절하게 설계된 커플러 궤적(coupler trajectory)과 반복적인 기구학적 전이(kinematic inversion) 관계에 의하여 거미의 운동을 재현한다. 제안한 아이디어를 구현한 벽면이동 로봇을 개발하였으며 실험을 통하여 로봇의 성능 및 효율성을 검증하였다.

2. 거미의 보행형식

벽면을 이동할 수 있는 곤충의 메커니즘은 한가지 공통적인 특징을 가진다. 즉, 움직이는 동안 가능한한 복부를 지면과 가깝게 유지하며 몸체의 균



Fig. 1 Walking of spider

형을 잡으며 안정되게 벽면을 이동한다는 것이다. 딱정벌레의 경우는 다리를 몸체보다 넓게 펴므로써 보행시 안정된 자세를 얻으려고 하며 거미는 무릎보다 지면에 가깝게 몸체가 유지함으로써 안정된 이동을 한다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 벽면을 이동할 수 있는 곤충들 중 거미의 보행형식을 관찰함으로써 벽면 이동 로봇의 메커니즘에 관한 아이디어를 얻을 수 있었다.

거미는 분절형 다리 구조와 복잡한 근육계로 구성된 8개의 다리를 갖는다. 거미의 보행에서 흥미로운 것은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 보행시 거미의 몸체가 위아래로 움직인다는 점이다. 일반적으로 거미는 몸체를 가능한한 지면과 가깝게 유지하면서 보행시에는 물결과 같은 부드러운 상하운동을 한다. 또한 장애물을 만났을 때에는 몸체를 들어올려 장애물을 피하며 상황에 따라 몸체를 지면에 접촉해서 마치 보조 다리와 같은 용도로 몸체를 사용하기도 한다. 이 관찰을 통하여 몸체를 능동적으로 사용함으로써 보행에 많은 이득을 얻을 수 있음을 알게 되었으며 개발하고자 하는 로봇에 구현하였다.

3. 메커니즘 설계

전술한 거미의 모든 기능을 완전히 모방할 수는 없지만, 몇 가지 기본적인 특징을 간단한 기구학적 링크로 구현할 수 있다. 이를 위하여 한 개의 몸체와 두 개의 다리로 구성된 로봇을 구상하였다. 로봇의 다리 구조는 Fig. 2에 나타난 것처럼 폐회로 링크 구조를 채택하고 있으며 기본적으로 평행 4절 링크를 수정한 형태로 볼 수 있다. Fig. 2와 같이 제안된 메커니즘은 식 (1)의 Kutzbach의 방정식⁽¹⁴⁾을 사용하면 각 다리의 자유도가 1임을 간단히 증명할 수 있으며 따라서 각 다리는 1개의 모터로 구동될 수 있는 메커니즘이다.

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (1)$$

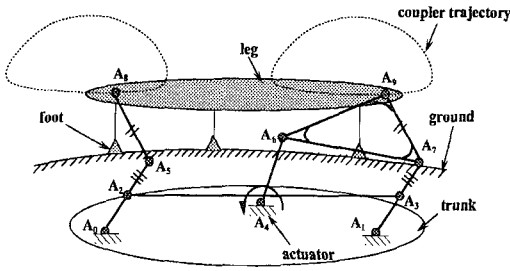


Fig. 2 Schematic of leg mechanism

여기서, n 은 링크의 개수, j_1 은 1자유도를 갖는 대우의 개수와 j_2 는 2자유도 대우의 개수를 나타낸다. 먼저 제한된 메커니즘의 원리를 간단히 설명하여 보자. Fig. 2에 나타난 기구학적 구조에서, 사각형 $A_0A_1A_3A_2$, $A_0A_1A_7A_5$ 와 $A_5A_7A_8A_9$ 는 평행사변형이다. 이것은 커플러 점을 가지는 4절 링크 $A_1A_4A_6A_7$ 의 입력링크 A_4A_6 의 회전에 의해 운동하게 되며 입력링크가 회전하면 4절 링크의 커플러점 A_9 이 Fig. 2에 예시한 커플러 궤적을 따라 움직인다. 커플러점 A_9 의 움직임과 함께 링크 A_8A_9 도 움직이며 이때 $A_5A_7A_8A_9$ 가 평행사변형 구조이므로 A_8A_9 는 회전없이 병진운동을 하게 된다. 아울러 $A_0A_1A_3A_2$ 와 $A_0A_1A_7A_5$ 도 평행사변형이므로 링크 A_2A_3 와 A_5 점과 A_7 점을 연결한 가상의 링크 A_5A_7 도 회전운동 없이 병진운동을 하게 된다.

여기에서 커플러점 A_9 의 궤적은 A_4 점에 위치한 모터를 회전시킬 때 커플러 $A_6A_7A_9$ 의 운동에 의하여 발생한다. 이미 알고 있는 것과 같이 커플러 곡선은 링크의 길이 조합에 따라 다양한 형상을 갖는다. 본 연구에서는 거미의 보행행식을 모방하기 위하여 커플러 궤적이 Fig. 2에 나타난 것과 같이 반원모양을 갖도록 4절 링크를 합성하였다.

Fig. 2에 나타난 커플러 궤적에서 직선부분은 거미의 몸체가 이동하는 구간, 곡선부분은 다리를 들어올리는 구간으로 생각할 수 있다. 따라서 반원형상의 커플러 궤적을 생성할 수 있는 메커니즘을 합성할 수 있다면 한 개의 구동기만으로 보행을 할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 궤적을 생성하는 링크기구를 합성하기 위하여 일반적인 기구 합성 기법을 응용하여 보자. Fig. 2에서 개념적으로 제안된 링크기구는 Fig. 3에서 왼쪽의 실선으로 표기된 다이애드(Z_2, Z_3)와 오른쪽 부분의 점선으로 표기된 다이애드(Z_4, Z_6)로 모델링할 수 있다.

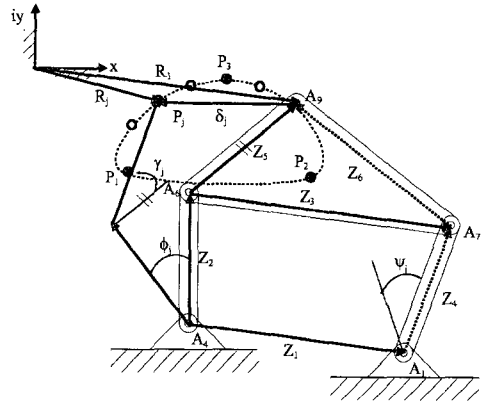


Fig. 3 4-bar linkage

이때 한 개의 모터로 구동되는 제한된 메커니즘으로는 반원 형상의 주어진 궤적상에 존재하는 무한히 많은 점들을 만족하는 것은 불가능하다. 또한 실제로 다리의 궤적이 이 모든 점들을 만족할 필요는 없으므로 반원상의 형상을 규정지을 수 있는 몇 개의 중요한 점들만은 반드시 지나가도록 메커니즘을 합성한다. 그림 3에 나타난 것과 같이 본 연구에서는 반원상의 점 P_1, P_2, P_3 세 개를 정밀점 (precision point)로 선택하였으며 이중 P_1, P_2 는 직선 구간을 P_3 는 원호구간을 나타내는 궤적상의 최소한의 점이다. 모든 벡터의 회전은 시작점으로부터 측정되며 반시계 방향을 양으로 잡는다. Fig. 3에서 각도 ϕ_j 와 ψ_j 는 첫번째 위치로부터 j 번째 위치로의 회전각이며, 같은 방법으로 γ_j 는 첫번째 위치로부터 j 번째 위치로의 벡터 Z 의 회전각을 의미한다. R_i, R_j, ϕ_j 와 γ_j 의 값을 규정지음으로써 알려지지 않은 다이애드에 대한 두 위치를 지정할 수 있다. 또한 알려지지 않은 시작위치의 다이애드 벡터들 Z_2, Z_3, Z_4, Z_6 를 구하기 위해 루프폐쇄 방정식을 다음과 같은 식을 구할 수 있으며

$$Z_2 e^{i\phi_j} + Z_5 e^{i\gamma_j} - R_j + R_1 - Z_5 - Z_2 = 0 \quad (2)$$

$$Z_4 e^{i\phi_j} + Z_6 e^{i\gamma_j} - R_j + R_1 - Z_6 - Z_4 = 0 \quad (3)$$

이를 정리하면

$$Z_2(e^{i\phi_j} - 1) + Z_5(e^{i\gamma_j} - 1) = \delta_j \quad (4)$$

$$Z_4(e^{i\phi_j} - 1) + Z_6(e^{i\gamma_j} - 1) = \delta_j \quad (5)$$

가 얻어진다. 여기에서 P_1 로부터 P_j 까지 정밀점 사이 변위 δ_j 다음과 같이 구할 수 있으며

$$\delta_j \equiv R_j - R_1 \quad (6)$$

식 (4)와 식 (5)에서 γ_j 는 임의로 규정되고, ϕ_j

Table 1 Links dimension

Link	Dimension	Link	Dimension
Z ₁	268.7	Z ₄	99.6
Z ₂	75.5	Z ₅	185.7
Z ₃	281.5	Z ₆	123.0

와 ψ_j 는 Chebyshev 분배⁽¹⁵⁾를 이용해 구할 수 있다. 반원형 커플러 궤적상의 3개의 정밀점(j=2,3)을 선택할 경우, 식 (4)와 식 (5)로부터 각 링크의 치수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$Z_2 = \frac{\delta_2 e^{i\gamma_3} - \delta_3 e^{i\gamma_2} + \delta_3 - \delta_2}{e^{i(\phi_2 + \gamma_3)} - e^{i(\phi_3 + \gamma_2)} - e^{i\phi_2} - e^{i\gamma_3} + e^{i\phi_3} + e^{i\gamma_2}} \quad (7)$$

$$Z_5 = \frac{\delta_3 e^{i\phi_2} - \delta_2 e^{i\phi_3} - \delta_3 + \delta_2}{e^{i(\phi_2 + \gamma_3)} - e^{i(\phi_3 + \gamma_2)} - e^{i\phi_2} - e^{i\gamma_3} + e^{i\phi_3} + e^{i\gamma_2}} \quad (8)$$

$$Z_4 = \frac{\delta_2 e^{i\gamma_3} - \delta_3 e^{i\gamma_2} + \delta_3 - \delta_2}{e^{i(\phi_2 + \gamma_3)} - e^{i(\phi_3 + \gamma_2)} - e^{i\phi_2} - e^{i\gamma_3} + e^{i\phi_3} + e^{i\gamma_2}} \quad (9)$$

$$Z_6 = \frac{\delta_3 e^{i\phi_2} - \delta_2 e^{i\phi_3} - \delta_3 + \delta_2}{e^{i(\phi_2 + \gamma_3)} - e^{i(\phi_3 + \gamma_2)} - e^{i\phi_2} - e^{i\gamma_3} + e^{i\phi_3} + e^{i\gamma_2}} \quad (10)$$

나머지 링크 Z₃와 Z₁의 치수는 아래와 같은 페루프 방정식에 의해 결정되며

$$Z_3 = Z_5 - Z_6 \quad (11)$$

$$Z_1 = Z_2 + Z_3 - Z_4 \quad (12)$$

이와 같은 과정을 통하여 구해진 링크의 치수비는 다음과 같다.

$$\frac{3.56}{Z_1} = \frac{1}{Z_2} = \frac{3.73}{Z_3} = \frac{1.32}{Z_4} = \frac{2.46}{Z_5} = \frac{1.63}{Z_6} \quad (13)$$

위 식으로부터 Z₁의 길이를 임의의 적당한 값으로 고정하면 나머지 링크의 길이도 비례적으로 구한다. 실제 링크 치수를 결정하기 위하여 Z₁=268.7로 놓고 구한 결과 Table 1에 나타낸 치수를 얻을 수 있었으며 결정된 링크의 치수를 사용하여 동역학 시뮬레이션 프로그램인 ADAMS를 이용하여 시뮬레이션한 결과 Fig. 4와 같은 커플러 궤적을 얻을 수 있었다. 커플러 궤적이 정확한 반원 형상과는 약간의 차이가 있으나 실제 로봇을 설계하기에는 충분한 결과라고 생각된다. 앞으로 설계될 로봇의 주요 링크 치수는 이와 같은 과정을 통하여 선정되었으며 결과는 Table 1에 수록된 것과 같다. Fig. 4에서 ab구간은 다리가 땅에 접지하고 몸통이 전진하는 구간이며 bcda구간은 다리가 들려져서 앞으로 이동하는 구간이다.

제안된 디자인에서 몸체가 지면에 붙어있는 동

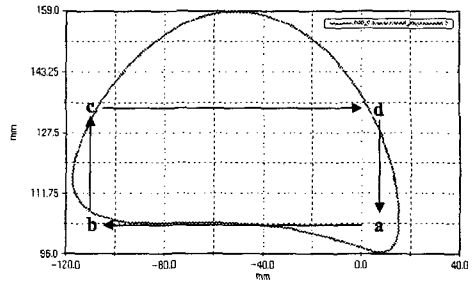


Fig. 4 Coupler curve of 4-bar linkage

안 Fig. 2에서 링크 A₈A₉는 모터의 회전으로 반원을 따라 움직이며 로봇의 다리도 반원의 궤적을 그린다. 한편 궤적 ab를 따라 움직이는 동안 로봇의 다리가 표면에 고정되며, 구동 링크의 회전으로 상대적으로 몸체가 전진하게 된다. 곡선 bc는 다리가 들어 올려지는 구간이며 곡선 da에서는 다리가 아래로 내려진다. 곡선 cd에서는 몸체가 지면에 고정되고 다리는 공중에 위치하는 구간이다. 따라서, 궤적(ab, bc, cd와 da)에 따라서 다리와 몸체의 지면 흡착 상태를 교환함으로써 병진운동하게 된다.

로봇이 병진운동을 하게 되는 a에서 b까지의 구간은 로봇 보행시 안정도와 관계가 있으므로 직선 운동이 반드시 이루어져야 하나 다른 구간(bc, cd와 da)은 로봇의 다리가 공중에 있으므로 정확하게 반원을 그릴 필요는 없다. 회전운동은 곡선 cd 동안 몸체가 지면에 부착되었을 경우에 일어나며 회전 모터가 몸통의 방향을 변화시킨다.

제안된 메커니즘으로 거미의 상하보행 운동과 최소 모터로 벽면에서 병진운동을 구현할 수 있었다. 설계된 로봇은 몸체와 2개의 다리로 구성되나, 다리의 수를 4, 6 또는 8 개로 확장한다면 거미와 더욱 유사한 거동을 얻을 수 있을 것이다.

4. 보행제어

벽면 보행을 위하여 로봇 몸체의 양옆에 위치한 다리에는 흡착패드가 있다. 흡착패드는 가반중량과 진공도를 고려하여 다리에 각 3개씩과 몸체에 6개 총 12개를 탑재하고 있으며 로봇은 각 흡착패드의 진공상태를 다리의 위치에 따라 조절함으로써 보행할 수 있다. 본 절에서는 로봇의 병진 운동과 회전 운동의 보행 알고리즘과 제어기에 대해서 기술한다.

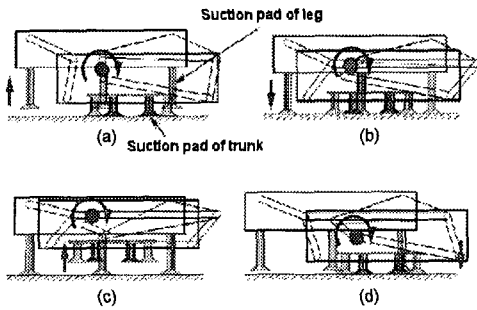


Fig. 5 Translational motion

4.1 병진운동

Fig. 5는 2절에서 설명한 로봇의 메커니즘을 가진 로봇의 병진운동 과정을 ADAMS를 이용하여 시뮬레이션한 것이며 Fig. 6 (a)는 병진운동 동안 흡착 패드의 상태변화를 나타낸 것이다. 이를 이용하여 병진운동은 다음과 같이 4단계로 나누어 설명할 수 있다.

- (1) 몸체의 흡착패드가 벽에 붙어있고 다리는 반원형 궤적을 그리며 이동한다(Fig. 5(a)).
- (2) 몸체의 흡착패드와 다리의 흡착패드가 동시에 벽에 붙는다(Fig. 5(b)).
- (3) 몸체의 흡착패드는 벽에서 떨어지면서 양쪽 다리는 몸체를 밀어 올리고 병진운동한다(Fig. 5(c)).
- (4) 다시 다리가 벽에서 떨어져서 반원형 궤적을 그리기 시작한다(Fig. 5(d)).

위 과정을 반복하면서 병진하게 된다.

보행을 위해서 로봇은 지면에서 몸체와 다리 흡착패드의 부착과 탈착을 반복해야 한다. 이것은 각 포텐서미터와 진공 센서를 이용하여 공급 솔레노이드 밸브, 진공 과파 솔레노이드 밸브를 ON/ OFF 제어한다. 양쪽 다리와 몸체의 흡착패드가 부착 및 탈착이 교차할 경우 진공 센서에 의해서 탈착된 진공패드가 다음 부착지점에 완전히 부착되었을 때, 이전에 부착된 흡착패드가 탈착된다. Fig. 7은 각 다리 흡착패드의 상태변화를 도식화한 것이다. 진공 센서가 흡착패드내의 진공도를 측정하여 부착 및 탈착이 교차할때 다리와 몸체의 흡착패드가 일시적으로 모두 흡착되어 로봇이 안전하게 주행할 수 있다.

4.2 회전운동

Fig. 6 (b)는 방향 전환시 흡착 패드의 상태변화

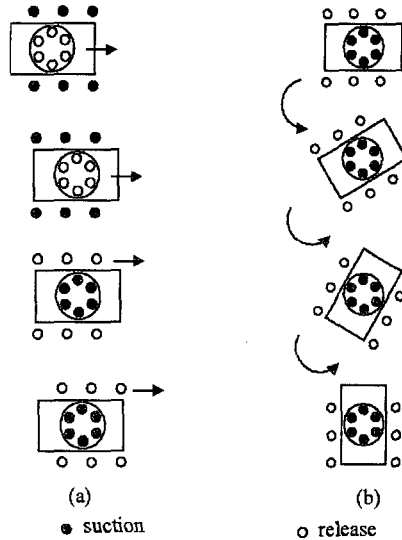


Fig. 6 Suction pattern

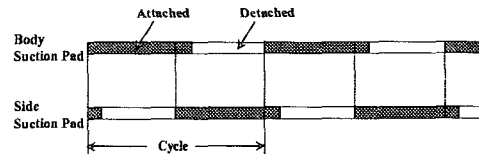


Fig. 7 Suction pad condition diagram

를 나타낸 것이다. 로봇의 몸체에 있는 흡착 패드가 벽에 부착되고 양 다리는 공중에 있을때, 몸체는 회전하게 되며 따라서 다리가 탈착되어 있을 때에만 회전할 수 있다.

로봇의 전체적인 보행 제어 과정을 Fig. 8과 같이 요약할 수 있다.

5. 벽면이동로봇

Fig. 9는 개발된 로봇의 구성요소를 나타낸다. 개발된 로봇은 1주기 동안 약 12cm정도 평행 이동 가능하고 최대 2cm높이의 장애물을 극복할 수 있도록 설계되었다. 로봇의 사양에 관하여 Table 2에 정리된 것과 같으며, 로봇을 구성하는 요소들에 대해서 기술한다.

5.1 메커니즘

벽면이동로봇은 크게 2개의 다리와 몸체부로 나눌 수 있다. 각 다리는 1개의 DC모터(Japan Servo: DHE44S6HPB, 감속비600:1)로 구동되며 조향을 위

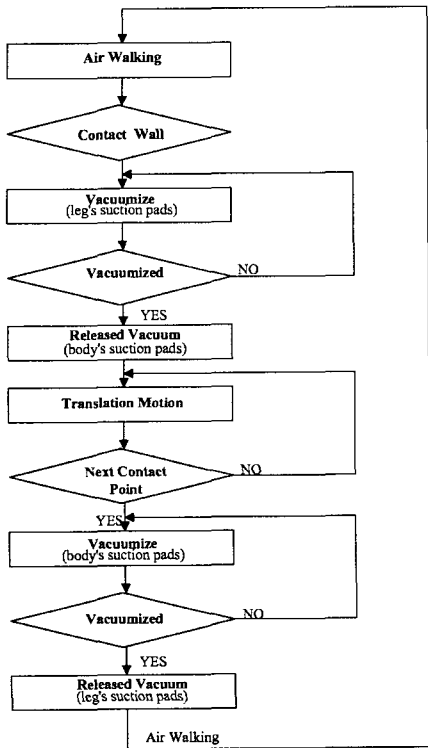


Fig. 8 Control sequence

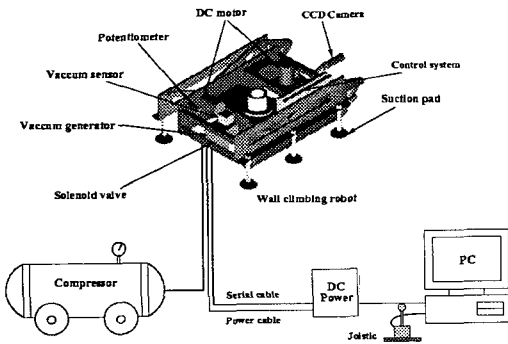


Fig. 9 Sketch of wall climbing robot system

한 모터(감속비360:1)가 몸체에 1개 부착되어 있다. 로봇의 몸체는 중량을 감소시키기 위하여 두랄루민으로 제작되었으며 모터의 위치 및 회전속도를 측정하기 위하여 소형 포텐시오테터(Sakae: FSCB- 22A)를 사용하였다. 기타 흡착패드, 진공발생기, CCD카메라, 마이크로프로세서가 포함된 내장형 제어기는 모두 몸체에 탑재된다.

5.2 흡착 메커니즘

Table 2 Specifications of the prototype robot

Items	Specifications
Dimension	540(L) × 380(W) × 220(H) mm
Weight	12.4kg
Velocity	V _{max} =50cm/min
Payload	16kg(variable)
Air Suply	Air compressor (8kg _r ~ 10kg _r)
Actuator	DC Motor (15W)
Reduction Ratio	Motor1,2 600:1, Motor3: 360

벽면을 주행하기 위해서는 적당한 흡착이 필요하며 이는 로봇의 자중에 비례한다. 진공 흡착력은 진공도와 흡착패드의 면적과의 관계로부터 구할 수 있다.

$$W = \frac{P \times A}{760} \times f \quad (14)$$

여기에서, W 는 흡착력(kg), P 는 진공도(mmHg), A 는 진공패드의 면적(cm²)과 f 는 안전계수(1/안전율)를 나타낸다. 위 식 (14)에 의해 안전계수(f)가 1일 때, 계산된 흡착력은 정지상태하의 이론적인 것이나 실제적인 적용에 있어서는 작용방향, 작용완급, 표면의 조도 및 효율등 여러 가지 요인을 고려해야 하므로 안전계수는 $0 < f < 1$ 이다. 일반적으로 안전계수는 표면에 수직방향으로 힘이 작용할 경우 3 ~ 4이며, 수평방향으로 작용할 경우 5 ~ 7정도이다.

본 연구에서는 진공도가 약 650mmHg, 직경이 50mm인 패드, 안전율을 7로 선정하였으며 이때 흡착력은 식 (14)에 의해 약 2.4kg_r이다. 따라서 로봇의 하중이 약 12.4kg_r이므로 최소 6개의 패드를 사용하면 흡착력이 14.4kg_r으로 충분하다. 따라서 벽면이동로봇에는 직경 50mm인 상용 흡착패드를 양쪽 다리에 각각 3개씩, 몸체에 6개 사용했다.

특히 양쪽 다리에 사용된 흡착패드는 스프링이 장착되어 표면에 약간의 곡률이 있을 지라도 주행할 수 있다.

진공발생기는 솔레노이드 밸브, 진공발생기, 진공센서가 한 조로 구성되며 3개가 사용되었다. 2개는 각각의 양쪽 다리에 부착된 흡착패드와 연결되며, 나머지는 몸체의 흡착패드와 연결된다. 흡착한 후 탈착용 솔레노이드 밸브를 열지 않으면 진공이 파괴되지 않는다. 이것은 공압의 소모를 줄일 수 있는 특징이 있다.

진공센서는 흡착패드가 표면에 흡착되었을 때

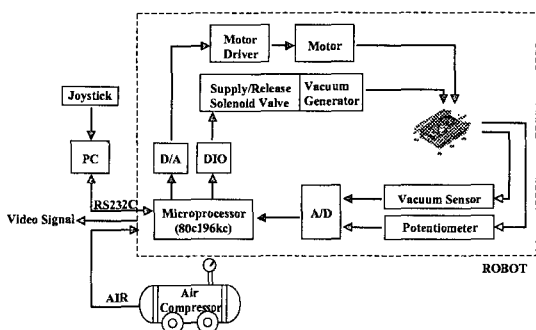


Fig. 10 Control system architecture

흡착여부를 알 수 있게 하며, 흡착정도를 조절할 수 있다. 진공센서를 사용함으로써 안정된 벽면이동이 가능하게 된다.

5.3 제어 시스템

로봇은 원격조작에 의하여 이동되며 힘·토크 센서를 이용해 벽면이동 로봇의 조작을 위한 조이스틱을 구현하였다. 힘·토크 센서의 출력은 주컴퓨터를 통하여 로봇의 제어를 위한 명령으로 입력된다. Fig. 10은 전체적인 제어 시스템의 개요를 나타낸 것이다. 로봇에 탑재된 내장형 제어기는 80c196kc 마이크로프로세서를 사용하여 구현하였다.

로봇에게는 외부에서 전원, 공압이 공급되며 비디오 케이블, 로봇의 제어 시스템과 주컴퓨터간의 통신을 위한 RS-232C 통신 케이블이 로봇과 연결되어있다. 주컴퓨터에서는 속도와 조이스틱으로부터 전송된 조향 명령, 솔레노이드 밸브의 ON/OFF 명령을 로봇에 내장된 제어기로 전송하며 제어기는 조향, 다리의 위치, 솔레노이드 밸브의 ON/OFF를 제어한다. 또한 제어기는 포텐서미터에 의한 위치정보와 진공센서의 압력정보를 주컴퓨터에 전송한다. 주컴퓨터와 제어기 사이의 통신은 RS-232C 직렬통신 방법을 사용해 19200bps의 전송 속도로 상호 통신한다. 로봇에 내장된 제어기에는 두 개의 통신 포트가 있으며 이 중 하나는 수신, 다른 것은 송신으로 사용하여 통신의 신뢰성을 향상시켰다.

로봇은 포텐시오펜터의 위치정보를 통해 양쪽 다리를 제어한다. 다리의 위치제어를 위해 다음과 같은 비례적분 제어기와 앞먹임 제어기를 사용하였다.

$$u = K_F \cdot \theta_d + K_p(\theta_d - \theta_m) + K_i \int (\theta_d - \theta_m) dt \quad (15)$$

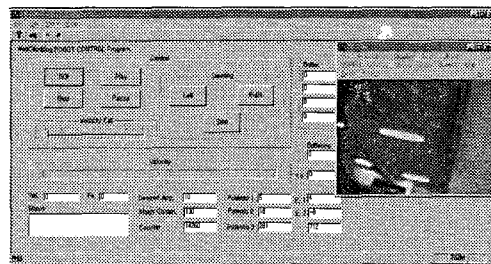


Fig. 11 Graphic user interface

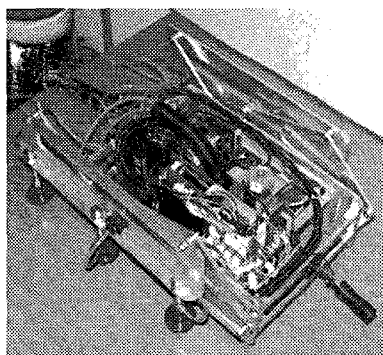


Fig. 12 Prototype

여기서, u 는 제어입력, θ_d 는 기준입력, θ_m 은 측정된 위치정보, K_F 와 K_p 는 비례계인 그리고 K_i 는 적분계인을 나타낸다. 로봇에 위치명령(θ_d)이 입력되고, 비례적분 제어기와 앞먹임 제어기를 거쳐 모터에 속도명령이 입력되며 포텐시오펜터로 측정된 위치 정보(θ_m)가 피드백된다.

5.4 사용자 인터페이스

로봇을 제어하기 위한 사용자 인터페이스는 Fig. 11와 같으며, Windows환경에서 Visual C++로 프로그래밍 되었다. 사용자 인터페이스 부분에서는 벽면이동 로봇의 속도 조절과 조향을 가능하게 한다. 그리고 포텐시오펜터의 위치 정보, 진공센서의 압력 정보, 위치 오차와 CCD 카메라로부터 전송된 영상을 화면에 출력하며 마이크로프로세서 보드에서 주컴퓨터로 전송된 각종 자료를 저장할 수 있다.

6. 실험

Fig. 12는 개발된 벽면이동 로봇의 실제모습이며 이 로봇의 주행실험을 통하여 성능을 평가하였다. 로봇의 병진운동시 다리의 입력 링크 위치변화를

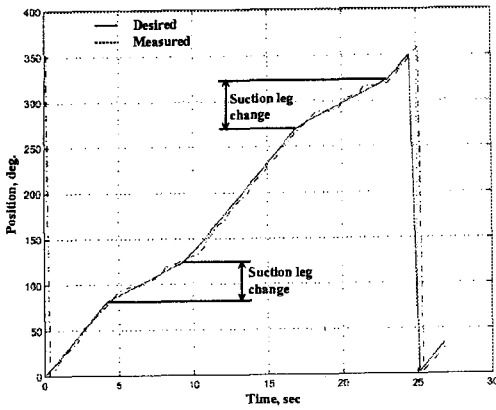


Fig. 13 Position change of side leg

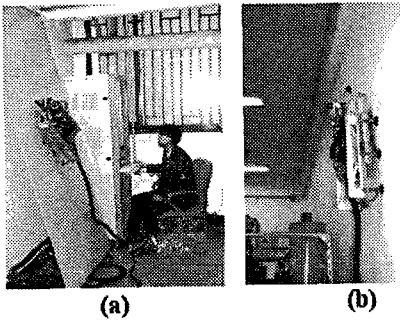


Fig. 14 Test on the wall

나타낸 것이 Fig. 13이다. Fig. 13에서 실선은 목표 값이며 점선은 측정값을 나타낸 것으로 위치제어는 잘 수행됨을 알 수 있다. 여기에서 기울기가 변화하는 구간은 몸체와 양쪽 다리의 흡착패드에서 진공상태가 변화하는 구간을 나타낸 것으로 이 구간에서는 천천히 이동하며, 나머지 구간은 빠르게 병진운동 함으로써 안정된 보행과 빠른 이동성을 구현할 수 있었다.

벽면이동로봇의 적용 가능성을 시험하기 위해 실험 대상을 표면이 비교적 고른 철판 벽과 상대적으로 거친 콘크리트 벽에서 주행실험을 수행했다. Fig. 14에서 (a)는 철판으로 만든 경사면을 이동하는 실험과정을 나타낸 것이고, (b)는 콘크리트 벽면을 이동하는 모습을 나타낸 것이다.

제작된 로봇이 다소 거친 콘크리트 수직벽도 자유롭게 이동할 수 있다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. Fig. 15는 로봇의 병진운동 과정을 나타낸 것이며, Fig. 16는 회전운동 과정을 나타낸 것이다. 로봇의 최대 이동 속도는 약 50cm/min정도이며 조향은 360도 회전 가능하다.

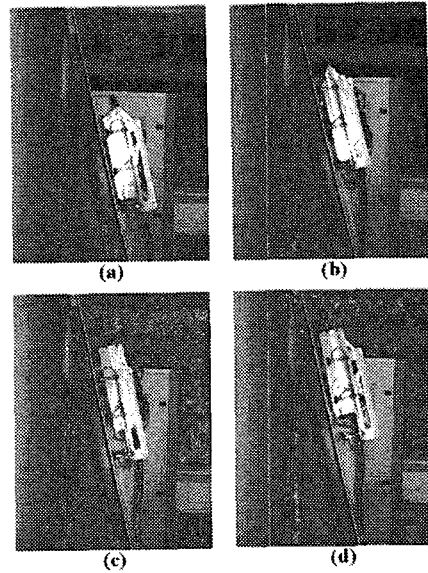


Fig. 15 Translational motion

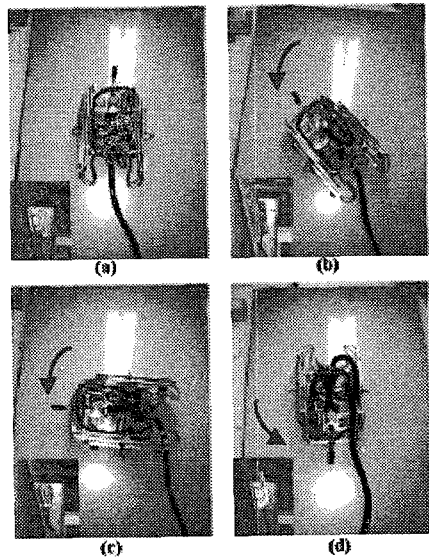


Fig. 16 Rotational motion

7. 결 론

본 논문에서는 보행형 벽면이동로봇의 일반적인 문제점인 메커니즘의 복잡함과 제어의 어려움을 해결하기 위하여 중복된 평형 4절 링크 구조의 단순한 폐회로 메커니즘의 보행형 벽면이동 로봇을 개발하였다. 벽면이동로봇은 세개의 구동기로 병진과 회전운동을 구현하였으며 각종 검사 장비등을

탐재할 수 있는 충분한 가반하중을 가진다. 또한 개발된 벽면이동 로봇은 제어 시스템과 진공발생기를 로봇에 내장함으로써 이동성을 높이고 넓은 작업영역을 확보할 수 있었다. 흡착력 실험과 주행 실험을 통해서 제안된 메커니즘의 성능을 검증하였으며 응용가능성을 제시하였다.

본 연구에서 개발된 벽면이동 로봇은 검사작업을 위한 기본적인 CCD 카메라만을 탑재하고 있으나, 추후 비파괴 검사 및 여타의 작업에 필요한 장비 등을 탑재함으로써 다양한 응용분야에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 지원으로 수행되어진 것으로 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Oomichi, T., Ibe T., Nakajima, M., Hayashi, K., and Takemoto, Y., 1992 "The Wall Inspection Robot with Adaptive Mechanism for Wall Surface," *International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms*, pp. 336~341.
- (2) Fukuda, T., Arai, F., Matsuura, H., and Nishibori, K., 1992, "Wall Surface Mobile Robot Having Multiple Suckers on Variable Structural Crawler," *International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms*, pp. 707~712.
- (3) Schempf, H., Chemel, B., and Everett, N., 1995, "Neptune: Above-Ground Storage Tank Inspection Robot System," *IEEE Robotics and Automation Society Magazine*.
- (4) Yano, T., Numao, S., and Kitamura, Y., 1998, "Development of a Self-Contained Wall Climbing Robot with Scanning Type Suction Cups," *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 249~254.
- (5) Yano, T., Suwa, T., Murakami, M., and Yamamoto, T., 1997, "Development of a Semi-Contained Wall Climbing Robot with Scanning Type Suction Cups," *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 900~905.
- (6) Hirose, S. and Tsutsumitake, H., 1992, "Disk Rober: A Wall-Climbing Robot Using Permanent Magnet Disks," *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2074~2079.
- (7) Pack, R. T., Christopher, J. L. Jr., and Kawamura, K., 1997, "A Rubbertuator-Based Structure Climbing Inspection Robot," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1869~1874.
- (8) Backes, P. G., Bar-Cohen, Y., and Joffe, B., 1997, "The Multifunction Automated Crawling System(MAC- S)," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 335~340.
- (9) Luk, B. L., Collie, A. A., and Billingsley, J., 1991, "ROBUG II: An Intelligent Wall Climbing Robot," *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2342~2347.
- (10) Nagakubo, A. and Hirose, S., 1994, "Walking and Running of the Quadruped Wall-Climbing Robot," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1005~1012.
- (11) Nishi, A., 1992, "Mechanism and Control of Wall-Climbing Robot," *International Symposium on Theory of Mechanisms*, pp. 260~264.
- (12) Mitsubishi Heavy Industry, web site, http://www.mitsubishi.or.jp/e/monitor_old/97version/monitor6/New_E.html
- (13) The University of California, Davis, web site, http://www.ahmct.ucdavis.edu/AHMCT_projects/aerial.html
- (14) Shigley, J. E. and Uicker, J. J. JR., 1997, *Theory of Machines and Mechanisms*, McGraw-Hill Book Co..
- (15) Erdman, A. G. and Sandor, G. N., 1991, *Mechanism Design Analysis and Synthesis V.1*, Prentice Hall.