

팬터그래프 기구를 이용한 3차원 수직 직교형 다리 기구를 가진 4각 보행 로봇의 개발

A Development of Quadruped walking Robot with 3-D Orthogonal legs
Using Pantograph Mechanism

* 김인준*, 정경민**

*선문대학교 기계 및 시스템공학부(TEL:+82-418-530-2303;FAX:+82-418-41-7426;E-mail:joun@omega.sunmoon.ac.kr)

**선문대학교 기계 및 시스템공학부(TEL:+82-418-530-2397;FAX:+82-418-41-7426;E-mail:kmjeong@omega.sunmoon.ac.kr)

Abstracts Because the leg mechanism of walking robot affect on the mobility and energy efficiency, we focus on the design of new leg mechanism based on the previous leg mechanisms. We mention the deficiency of the previous leg mechanisms and propose a new leg mechanism that consists of a 2-d.o.f. pantograph mechanism and a vertical linear actuator. The pantograph mechanism is attached to the horizontal plane of the body and the vertical linear actuator is vertical to that plane. In order to design a quadruped walking robot, we consider the kinematics of the 2-d.o.f. pantograph mechanism and the arrangement of two linear motion guides that drive the pantograph mechanism.

Keywords Quadruped Walking Robot, Mobility, Energy efficiency, Pantograph, Orthogonal legs

1. 서론

인간이나 동물과 같이 다리 기구를 이용하여 이동하는 보행 로봇에 대한 연구는 19세기부터 시작되었으며 1960년대 이후 컴퓨터 기술의 발전에 힘입어 많은 연구가 수행되었다[7,8]. 보행 로봇에 대한 연구는 기존 차량의 주요 이동 방식으로 사용된 바퀴나 무한 궤도가 아닌 다리 기구를 사용함으로써 생물체에 근접한 기계를 만들고자하는 지적 호기심으로부터 시작되었다. 하지만 다리 기구를 이용한 보행 방식이 비평탄 지형이나 무른 지형, 장애물이 있는 지형에서는 바퀴나 무한 궤도를 이용한 이동 방식에 비해 유용하기 때문에 기초 연구 수준을 벗어나 실제 적용을 목표로 한 보행 로봇의 개발이 수행되고 있다[2,5,9,10].

보행 로봇 개발의 최종 목표는 원자력 발전소의 유지보수, 심해 및 화산, 우주등의 탐사 및 작업, 화재나 지진과 같은 재난 지역에서의 인명 구조 및 복구 작업, 산악 지형에서의 물자 수송등과 같이 인간이 직접 작업하기 어려운 지형에서 인간을 대신하여 작업하는 것이다.

보행 로봇을 개발하기 위해서는 기계적 설계, 구동 및 제어, 환경 인식 및 자율적 보행 알고리즘에 대한 연구가 필수적이다. 이중 기계적 설계에 관한 연구는 몸통부와 다리부로 구성된 보행 로봇의 기계적 형태를 결정하는 것인데 주로 몸통부의 역할은 다리 기구를 고정시키기 위한 단순 프레임으로 간주되기 때문에 다리 기구에 대한 연구들이 거의 대부분을 차지하고 있으며 보행 로봇의 다리 기구의 구조는 보행 로봇의 실용화의 가장 큰 요소인 이동성 및 에너지 소비 효율면에서 큰 영향을 미치고 있다[2,5].

Hirose는 기존의 로봇 매니퓰레이터와 같이 회전 관절만을 사용한 다리 기구의 경우 기계적 에너지가 외부로부터 유입될 필요가 없는 수평 등속 이동의 경우에도 관절의 구동 방향과 회전 방향이 반대가 되는 경우(Back drive)가 발생하여 이에 따른 음(陰)의 일을 저장하지 않는 한 불필요한 에너지 소모가 발생함을 보였다[5]. 보행 로봇이 수평 등속 이동중 음의 일을 하지 않기 위해서는 그림 1과 같이 수평 구동과 수직 구동을 분리하는 다리 구조를 사용하여야 한다.

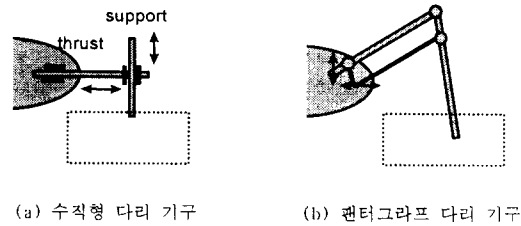


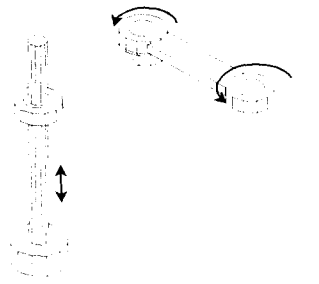
그림 1 2자유도 GDA 다리 기구
Fig 1 2 DOF Gravitationally decoupled Leg mechanisms

그림 1과 같은 다리 기구들은 2개의 직교 방향으로의 구동이 분리되어 있어서 보행 로봇의 자세를 수평으로 할 경우 수평 방향 구동과 수직 방향 구동이 분리될 수 있다. 따라서 등속 수평 이동시에는 중력 방향으로의 구동없이 수평 방향 구동만이 행하여지므로 음의 일을 하지 않게 된다.

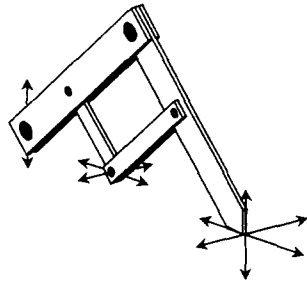
이와 같은 다리 기구들이 가지고 있는 또하나의 장점은 다리 끝점의 운동이 직교 방향으로 분리되어 있어서 기구학식이 간단하기 때문에 제어가 용이하다는 점이다.

다리 끝점을 제한된 3차원 공간내의 임의의 점에 위치시키기 위해서는 다리 기구는 3자유도 이상을 가져야 하며 다리의 수가 3개 이상이면 보행 로봇의 몸체가 6자유도를 가지면서 정적으로 안정된 자세를 취할 수 있다.

그림 2는 2자유도 GDA 다리 기구를 3자유도로 확장한 기존의 다리 기구들의 예이다. 그림 2(a)는 화성탐사용인 로봇인 AMBLER[1]의 다리 기구로서 스카라 로봇과 같이 2개의 회전 관절을 가진 수평 매니퓰레이터에 수직 링크 부착한 구조로서 수직 링크는 몸체에 대해 항상 수직방향을 유지하기 때문에 수직형 다리 기구(Orthogonal leg mechanism)이라 불리며 수직 방향으로의 구동은 독립적이나 수평 방향의 구동은 독립적이지 않다. 그림 2(b)는 PANTOMECH[3]이라 불리는 다리 기구로서 수직으로 세운 팬터그래프 기구에 1개의 직선 구동부를 추가한 구조이며 3 직교 방향으로의 구동이 모두 분리되어있다.



(a) 수직형



(b) PANTOMEK

그림 2 3차원 GDA 다리 기구
Fig 2 3D GDA leg mechanisms

하지만 그림 2(b)와 같은 PANTOMEK 다리 기구는 이동성 측면에서 그림 2(a)와 같은 수직형 다리 기구에 비해서 제한적이다.

그림 3은 PANTOMEK 다리 기구를 사용한 보행 로봇이 돌출 장애물이 있는 지형에서 다리를 착지할 때 돌출 장애물과 충돌할 가능성을 나타내고 있다. 수직형 다리 기구의 경우 하측 링크가 몸체에 대해 항상 수직 방향을 유지하는 것에 반해 PANTOMEK 다리 기구의 경우 착지 위치에 따라 하측 링크의 각도가 변화하기 때문에 착지 불가 영역이 증가한다.

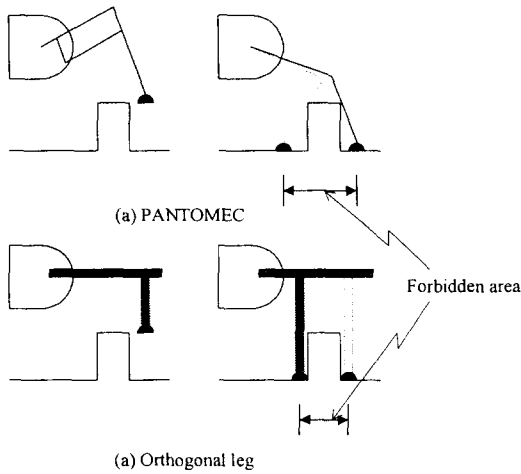


그림 3 착지 불가 영역의 비교
Fig 3 Comparison of forbidden area

그림 4는 보행 로봇이 수평 방향으로 이동할 때 PANTOMEK 다리 기구를 가진 로봇이 수직형 다리 기구를 가진 로봇에 비해 이동량이 줄어들음을 나타내고 있다. PANTOMEK 다리 기구의 경우 보행 로봇의 몸체가 이동함에 따라 하측 링크의 각도가 변

화하여 돌출 장애물과 충돌할 가능성이 있으나 수직형 다리 기구의 경우 하측 링크가 항상 몸체에 대해 수직 방향을 유지하므로 다리 기구의 기구학적 구동 한계까지 몸체를 이동시킬 수 있다.

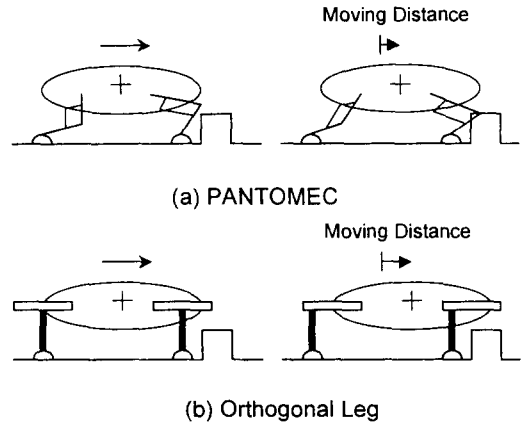


그림 4 이동량의 비교
Fig 4 Comparison of moving distance

이와 같이 PANTOMEK 다리 기구를 사용할 경우 수직형 다리 기구를 사용할 경우에 비해 다리를 착지시킬 때와 몸체를 이동할 때에 추가적인 제한이 발생하므로 이동성이 저하되며 이와 같은 제한을 보행 알고리즘에서 고려해야하는 등의 어려움이 있다.

2. 팬터그래프를 이용한 수직형 다리 기구

본 연구에서는 언급된 기존 다리 기구들의 문제점들을 보완하기 위해 그림 5와 같은 구조를 가진 새로운 다리 기구[6]를 설계 제작하였다.

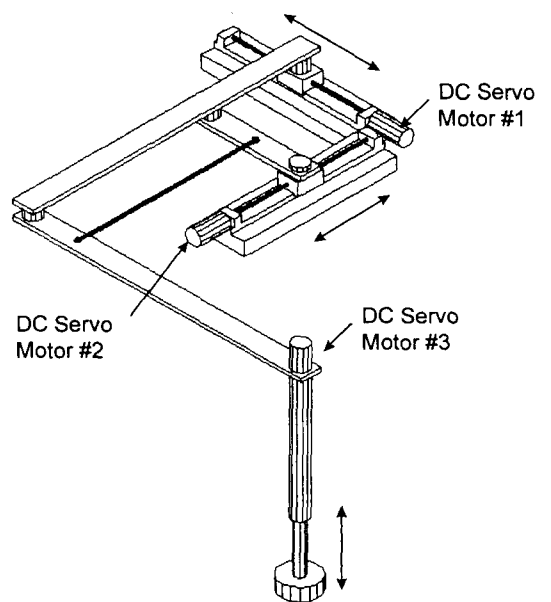


그림 5 제안된 다리 기구
Fig 5 Proposed leg mechanism

PANTOMECH 다리 기구가 팬터그래프 기구를 수직으로 배치하는 것에 반해 본 연구에서 제안하는 다리 기구의 구조는 팬터그래프 기구를 수평으로 배치하고 팬터그래프 기구 끝에 직선 이송 기구를 부착한 형태이다.

이와 같은 다리 기구는 수직형 다리 기구이므로 PANTOMECH과 같은 최하측 링크와 돌출 장애물과의 충돌을 피할 수 있어서 이동성을 향상시킬 수 있다. 또한 AMBLER의 다리 기구에서는 수평 이송 기구부에 회전 관절만을 사용하여 수평 이송을 담당하는 2개의 구동이 독립되지 못하는 것에 비해 제안된 다리 기구에서는 수평 이송 기구부에 팬터그래프를 사용하기 때문에 수평면상의 2 방향 이송이 독립되어 PANTOMECH과 같이 제어가 용이하다는 장점이 있을 뿐 만 아니라 AMBLER 다리 기구에 비해 링크가 추가되므로 구조적인 강성을 향상시킬 수 있다.

또한 수평 이송 기구부에 팬터그래프 기구없이 직선 이송 기구만을 사용하는 다리 기구와 비교할 경우에도 팬터그래프 기구의 운동 확대 특성으로 직선 이송 기구의 이송 거리가 짧아도 되기 때문에 설계가 용이하다.

이와 같은 팬터그래프 다리 기구를 몸체에 부착시킬 때 직선 이송 기구의 배치에 따른 영향을 고려하여야 한다.

팬터그래프 기구를 몸체에 부착시키는 방법은 그림 6과 같이 몸체의 상부에 부착시키는 방법과 몸체의 하부에 부착시키는 방법이 있다.

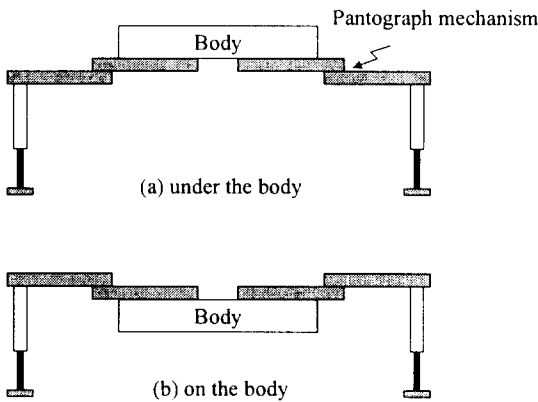


그림 6 다리 기구의 부착

Fig 6 Attachments of the leg mechanism

팬터그래프 기구를 그림 6(b)와 같이 몸체 하부에 부착할 경우 지면과 몸체간의 높이차가 줄기 때문에 돌출 장애물의 높이가 높을 경우 몸체와의 충돌 가능성이 높아지므로 그림 6(a)와 같이 몸체 상부에 부착하는 것이 유리하다.

2개의 직교 방향으로의 독립적인 구동을 위하여 그림 7과 같이 2개의 직선 이송 장치를 수직으로 배치할 경우 점 A의 이송 한도를 $[x_1, x_2]$, 점 B의 이송 한도를 $[y_1, y_2]$ 라 하면 점 A, B가 각각의 이송 한도내에서 자유롭게 이송되기 위해서는 링크 AC의 길이 l_1 , 링크 BC의 길이 l_2 는 식(1)을 만족시켜야 한다.

$$\begin{cases} |l_2 - l_1| < \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)} \\ |l_2 + l_1| > \sqrt{(x_2^2 + y_2^2)} \end{cases} \quad (1)$$

팬터그래프의 두 구동점 A, B의 위치를 각각 x_A, y_B 라 하면 팬터그래프의 끝점 E의 좌표 (x_e, y_e) 는 다음과 같다.

$$\begin{cases} x_e = -mx_A \\ y_e = (m+1)y_B \end{cases} \quad (2)$$

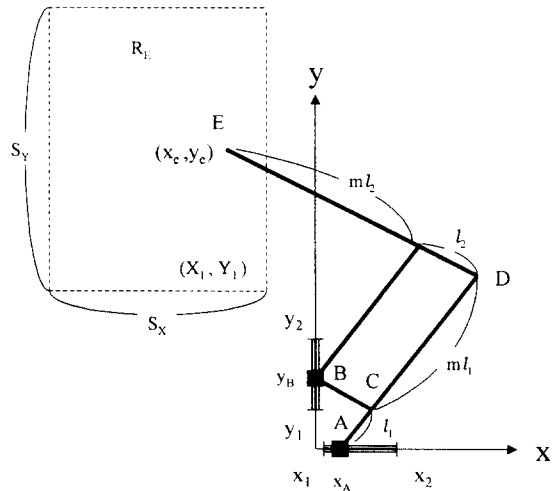


그림 7 팬터그래프 기구학

Fig 7 Kinematics of pantograph

팬터그래프의 끝점 E가 위치할 수 있는 작업 공간 R_E 는 직사각형 형태이며 만약 2개의 직선 이송 장치가 교차한다면 R_E 내에 원점이 포함되며 팬터그래프를 몸체위에 부착하는 경우 팬터그래프의 끝점 E에 위치한 수직 링크와 이송장치간의 기구적 간섭을 초래하게되므로 2개의 직선 이송장치는 교차하는 경우는 고려하지 않는다.

2개의 직선 이송 장치가 서로 교차하지 않을 경우 R_E 는 항상 점 B가 존재하는 직선쪽이면서 점 A점이 존재하는 직선의 반대쪽에 존재함을 알 수 있다. 또한 항상 점 A 구동의 확대비는 m , 점 B 구동의 확대비는 $m+1$ 임을 알 수 있다.

원점에서 가장 가까운 모서리 점 (X_1, Y_1) 과 폭과 높이 S_X, S_Y 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{cases} X_1 = -mx_1, Y_1 = (m+1)y_1 \\ S_X = |m(x_2 - x_1)| = ml|(x_2 - x_1)| = mS_x \\ S_Y = |(m+1)(y_2 - y_1)| = (m+1)|(y_2 - y_1)| = (m+1)S_y \end{cases} \quad (3)$$

따라서 2개의 직선 이송 장치 L_1, L_2 를 같은 형태로 배치한 경우에도 그림 8의 (a),(b)와 같이 점 A와 점 B의 위치를 바꾸면 다른 R_E 를 얻을 수 있으며 점 A, 점 B의 위치가 같은 경우에도 팬터그래프 기구는 ADE와 AD'E의 2가지 형태로 배치할 수 있음을 알 수 있다.

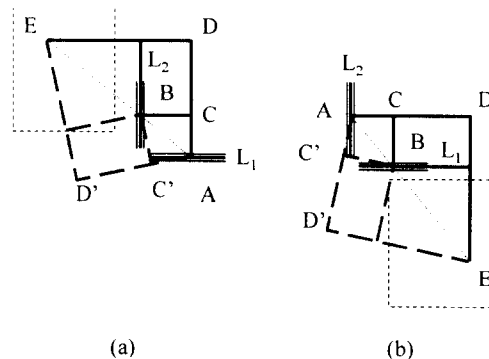


그림 8 점 A, B의 지정 방법

Fig 8 Assignments of Points A and B

위와 같은 고찰을 통하여 본 연구에서는 그림 9과 같이 직선 이송 장치들을 배치하였으며 전방과 후방 다리 기구간의 간섭을 피하기 위해서 높이차를 두었다.

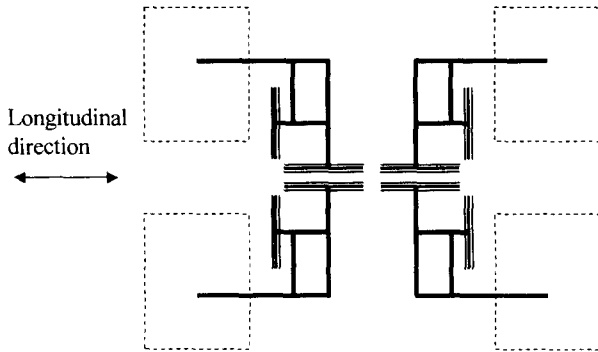


그림 9 직선 이송 장치의 배치

Fig 9 Arrangement of linear motion guides

수직링크의 직선 이송 장치에는 그림10과 같이 볼 스크루와 중공축 볼 스플라인을 사용하였다.

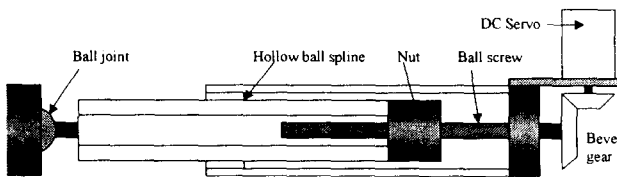


그림 10 수직 이송부의 구조

Fig 10 Structure of vertical linear actuator

3. 결과

본 연구에서 제안한 다리 기구를 적용한 보행 로봇의 설계 사양은 다음과 같다.

표 1 설계 사양

Table 1 Design spec. of walking robot

Item	Specification
Weight	180kg
Body Dimension	Width : 1.5m Length : 1.2m Height : 0.3m
Leg Dimension	1st Link : 1.05m 2nd Link : 1.05m 3rd Link : 0.6m
Working Volume	0.6m x 0.9m x 0.25m
Max. Inclination	30°
Actuator	60W DC Servo Motor 3:1 Bevel Gear
Power Supply	20V 50A DC
Walking Speed	1Km/H

그림11은 제작된 보행 로봇의 사진이다. 다리 기구부의 링크에 중력에 의한 과도한 굽힘 모멘트가 작용하여 제작후 보강 작업을 추가 수행하였다.

4. 결론

본 논문에서는 보행 로봇의 이동성과 에너지 효율을 향상시키기 위하여 새로운 다리 기구를 제안하였으며 이를 몸체에 배치하는 방법에 대한 고찰을 수행하였다. 제안된 다리 기구는 링크의 굽힘 모멘트 강성을 크게 증가시켜야 하는 단점을 가지고 있다.

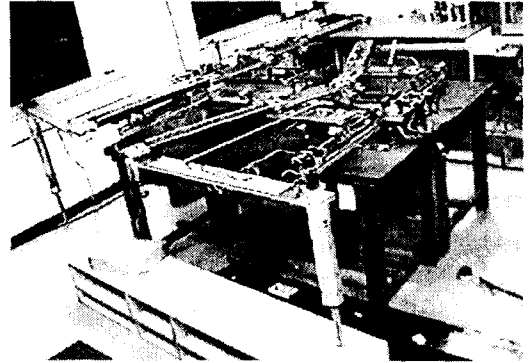


그림 11 제작된 보행 로봇

Fig 11 Overview of the walking robot constructed

감사의 글

본 연구는 1995년 선문대학교 교내 학술 연구비의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J. E. Bares, W. L. Whittaker, "Configuration of Autonomous Walkers for Extreme Terrain," *Int. J. of Robotics Research*, 12(4), pp.535-559,1993.
- [2] C.C. Brown,J.P.Huissoon,"Design and Simulation of a Legged Robot for Operation on Vertical Surfaces," '96 ICARCV,pp.1466- 1470,1996.
- [3] S. Hirose, "A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle," *Int. J. of Robotics Research*, 3(2), pp.113-133,1984.
- [4] S. Hirose, O. Kunieda, "Generalized Standard Foot Trajectory for a Quadruped Walking Vehicle," *Int. J. of Robotics Research*, 10(1), pp.3-12,1991.
- [5] S. Hirose, K. Yoneda, and H.Tsukagoshi,"TITAN VII : Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope," Proc. of the 1997 ICRA,pp.494-500.
- [6] K.M.Jeong,T.S.Yang,J.H.Oh, "A Study on the Support Pattern of Quadruped Walking Robot for aperiodic Motion," *Intelligent Robotics and System*,pp.308-313,1995.
- [7] S. M. Song, K. J. Waldron, *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*, MIT Press, 1989.
- [8] D. J. Todd,*Walking Machine-Introduction to Legged Robots*,Anchor Press,1985.
- [9] D. Wettergreen, C Thorpe, "Developing planning and reactive control for a hexapod robot," Proc. of ICRA, pp.2718-2723.
- [10] J. Zhang, J.Wang,"Gait Planning and Control of a Legged Robot for Trussed Wall-Climbing," 4th ICARCV, pp.1490-1494, 1996.