

복합 링크기구를 이용한 다족 보행로봇

임상현*, 이동훈*, 강현창*, 김상현*^{#,}

*한성대학교 기계시스템공학과

Multi-legged Walking Robot Using Complex Linkage Structure

Sang-Hyun Im^{*}, Dong Hoon Lee^{*}, Hyun Chang Kang^{*} and Sang-Hyun Kim^{*,#}

^{*}School of Mechanical System Engineering, HANSUNG UNIVERSITY.

(Received 19 August 2021; received in revised form 27 August 2021; accepted 11 September 2021)

ABSTRACT

Generally, multi-legged walking robots have excellent mobility in rough and uneven terrain, and they are deployed for the safety of rescuers in various disaster environments. However, as each leg is driven by a number of actuators, it leads to a complicated structure and high power consumption; therefore, it is difficult to put them into practical use. In this article, a new concept is proposed of a walking robot whose legs are driven by a complex linkage structure to overcome the deficiencies of conventional multi-legged walking robots. A double crank-rocker mechanism is proposed, making it possible for one DC motor to actuate the left and right movements of two neighboring thighs of the multi-legged walking robot. Each leg can also move up and down through an improved cam structure. Finally, each mechanism is connected by spur and bevel gears, so that only two DC motors can drive all legs of the walking robot. The feasibility of the designed complex linkage mechanism was verified using the UG NX program. It was confirmed through actual production that the proposed multi-legged walking robot performs the desired motion.

Keywords : Multi-legged Walking Robot(다족보행로봇), Complex Linkage(복합링크), Double Crank-Rocker Mechanism(이중 크랭크-로커기구), Cam Structure(캠구조), Kinematic Design(기구설계)

1. 서 론

자연재해나 폭발물 테러에 의한 재난환경에서 인체에 해로운 물질이 누출되거나 추가적인 붕괴 위험이 뒤따르므로 재난현장에 투입된 구조인력들은 치명적인 피해에 노출될 수 있다. 따라서 재난현장에서 구조인력을 대신할 수 있도록 바퀴나 다리로 구동되는 이동로봇(mobile robot)에 관한 지속적인 연구가 이루어지고 있다^[1,2].

바퀴로 구동되는 로봇은 이동속도는 빠르지만 자유도가 낮아 거친 작업공간에서 신속한 대처가 늦어진다. 반면, 다리를 이용하는 로봇은 각 다리가 개별 액추에이터에 의해 움직이므로 다양한 지형에서도 보다 높은 이동성을 가진다. 하지만 각 다리 관절을 독립적으로 구동하기 위해서는 다량의 액추에이터가 필요하므로 구조가 복잡하고 빠른 전력 소모로 인해 에너지 효율성이 낮다^[3]. 이에 다양한 보행로봇 구동방법이 연구되고 있으나 소형화 및 제어의 용이성은 여전히 만족할만한 결과를 얻지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 다리를 이용하는 이동

Corresponding Author : shkim@hansung.ac.kr

Tel: +82-2-760-8012, Fax: +82-2-760-4356

로봇이 소량의 액추에이터로 구동될 수 있는 새로운 다족 보행로봇(multi-legged walking robot)을 제안한다. 인접한 다리의 좌우 및 상하 왕복운동을 동시에 제어할 수 있도록 적절한 복합링크기구를 설계하였으며 UG NX 프로그램을 이용하여 제안된 구동방식을 검증하였다. 또한, 실제 제작을 통해 새로운 다족 보행로봇의 성능 작동 여부를 확인하였다.

2. 개념설계

Fig. 1은 기존 다족 보행로봇의 보행방법에 대한 근사적 모델을 나타낸다. 일반적으로 다족 보행로봇의 다리는 조인트 A로 연결된 허벅다리(thigh)와 종아리(calf)로 구성되며 허벅다리는 조인트 B를 통해 몸체와 결합된다. 로봇이 보행할 때 각 다리의 조인트 A는 경로 ①과 ②로 이루어진 폐곡선을 따라 이동한다. 조인트 A가 경로 ①에 있을 때 다리의 끝단은 지면과 접촉해 있으며, 경로 ②에서는 지면과 떨어져 상하로 운동한다. 본 논문에서 고려한 다족 보행로봇은 이웃한 두 다리가 서로 교차하며 움직인다. 이 방식은 하나의 다리가 경로 ②에서 지면과 떨어져 있을 때 이웃한 다리는 경로 ①에서 로봇의 몸체를 앞으로 밀어주며 이동한다. 따라서 원활한 보행을 위해 각 허벅다리 구동에 2개의 액추에이터가 필요하므로 구조가 복잡하고 제작비용이 비싸며 이동 시 많은 전력을 소비한다.

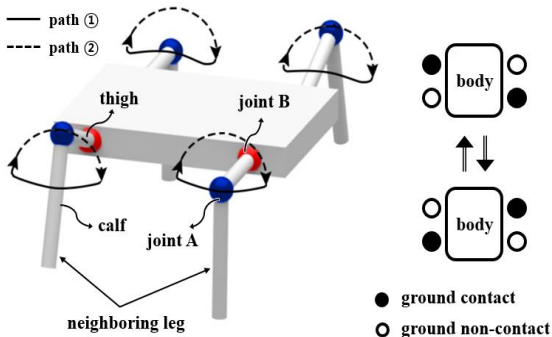


Fig. 1 Schematic drawing of walking mechanism of conventional multi-legged walking robot

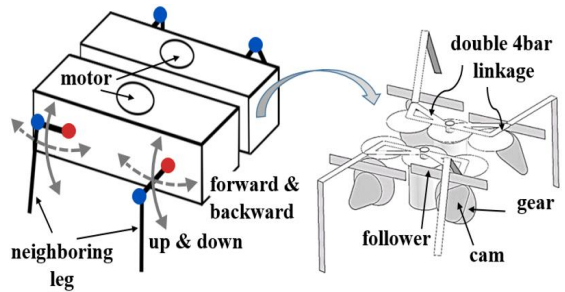


Fig. 2 Conceptual design of multi-legged walking robot with complex linkage structure

이러한 문제점을 해결하기 위해 제안된 새로운 다족 보행로봇의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 다량의 액추에이터를 이용하였던 기존 다족 보행로봇의 움직임을 소량의 DC 모터로 구현이 가능한 새로운 구동방식을 제안하였다. 보행로봇이 진행하는 방향을 기준으로 로봇의 몸체를 반으로 나누었으며 앞뒤로 이웃한 두 허벅다리의 전후운동(forward & backward movement)과 상하운동(up & down movement)을 몸체 내부에 있는 1개의 DC 모터로 동시에 구동시킨다. 각 DC 모터의 출력을 조절해 원하는 속도와 방향으로 이동할 수 있다.

허벅다리의 전후운동은 일반적인 4절링크로 구현할 수 있지만 이웃한 두 허벅다리는 동시에 구동되어야 하므로 4절링크 2개를 적절히 결합한 이중 4절링크(double 4bar linkage)를 사용하였다. 또한 각 허벅다리의 높낮이를 다르게 조정하는 상하운동은 캠 기구를 다리마다 1개씩 배치하여 구현하였다. 제안된 이중 4절링크와 평면캠은 단방향 회전입력을 중동절의 주기운동으로 전환하는 기구이므로 1개의 DC모터로 2개의 허벅다리가 동시에 동작할 수 있도록 두 기구에 회전입력을 전달하는 적절한 기어를 사용하였다.

3. 상세설계 및 제작

본 논문에서는 제안된 다족 보행로봇의 형상을 선정하기 위해 기존 다족 보행로봇인 보스턴 다이내믹스(Boston Dynamics)사 'LittleDog'의 크기와 허벅다리 운동각을 설계에 반영하였으며 그 사양은 Table 1과 같다^[4].

Table 1 Basic dimensions of referred walking robot

Definition	Value
robot body length & width	340, 116mm
distance between leg joints	202mm
maximum driving angle of leg	50°

제안된 다족 보행로봇이 현장에서 안정적으로 보행하기 위해 설계 시 고려한 조건은 다음과 같다^[5]. ① 보행로봇은 지지 다각형을 유지하기 위해 각 다리의 보폭과 길이가 같아야 한다. ② 보행 중 이웃한 다리가 서로 부딪히지 않아야 한다.

3.1 허벅다리 전후운동

다족 보행로봇은 보행을 위해 허벅다리가 앞뒤로 반복적으로 움직이므로 이는 Fig. 3과 같이 크랭크-로커 기구로 구현할 수 있다. 크랭크-로커 기구는 크랭크(A), 프레임(B), 커플러(C) 및 로커(D)로 구성되어 있으며 로커의 구동은 출력링크의 회전범위를 의미한다. 따라서 로커를 연장해 허벅다리로 만들면 DC모터와 연결된 크랭크의 회전운동을 통해 기존 보행로봇의 허벅다리 전후운동을 구현할 수 있다. 보행 중 각 허벅다리의 운동각은 로커의 최대구동각(θ)과 같으며 로커의 위상은 크랭크의 위상에 따라 변한다. 하지만 Table 1에서 다리의 최대운동각은 고정이므로 적절한 링크 형상을 설계하기 위해 로커각(θ_r)에 따른 크랭크각(θ_c)을 역으로 유도하면 식 (1)과 같다^[6].

$$\theta_c = \cos^{-1} \frac{B^2 + s^2 - D^2}{2B \cdot s} \pm \cos^{-1} \frac{A^2 + s^2 - C^2}{2A \cdot s} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{B^2 + D^2 - 2B \cdot D \cdot \cos \theta_r}$$

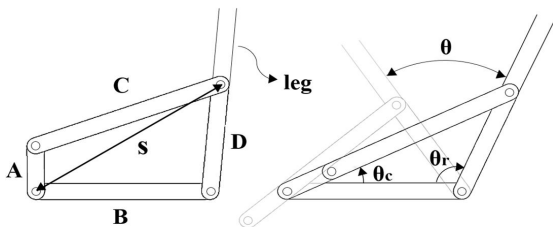


Fig. 3 Configuration of crank-rocker linkage

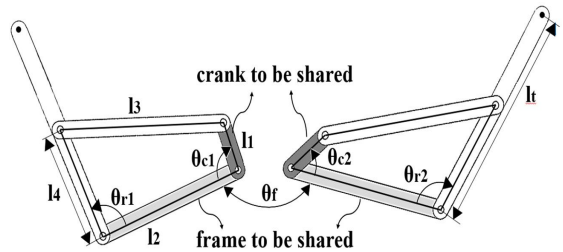


Fig. 4 Schematic drawing of double crank-rocker mechanism

크랭크-로커 기구는 운동성이 1이므로 DC모터의 출력을 받아 로커와 연결된 허벅다리를 앞뒤로 구동시킨다. 하지만 본 논문에서는 DC모터 1개로 이웃한 두 허벅다리를 동시에 구동해야 하므로 Fig. 4와 같이 2개의 4절링크를 결합한 이중 크랭크-로커 기구(double crank-rocker mechanism)를 사용하였다. 조건 ①에 따라 두 크랭크-로커 기구는 동일한 링크길이를 가지며 운동성 1을 만족하기 위해 크랭크와 프레임을 각각 공유함으로써 DC모터 1개로 구동된다. 하지만, 다족 보행로봇은 원활한 보행을 위해 이웃한 두 다리가 서로 교차하며 이동해야 하므로 4절링크는 비대칭으로 결합되어야 한다. 따라서 기구설계 과정을 통해 각 링크의 길이 및 공유링크의 결합 각도를 선정하였다.

먼저 제안된 이중 크랭크-로커 기구는 로봇 내부에 배치되어야 하므로 Table 1의 로봇 크기로부터 로커의 길이(l_4)와 프레임의 길이(l_2)를 정하였다. 다음으로 크랭크 길이(l_1)와 커플러 길이(l_3)는 두 크랭크-로커 기구가 크랭크와 프레임을 각각 공유한다는 점에서 알 수 있다. 공유된 크랭크가 반시계방향으로 회전할 때, 좌측 크랭크-로커 기구의 크랭크각(θ_{c1})이 감소하며 동일한 크기만큼 우측 크랭크-로커 기구의 크랭크각(θ_{c2})이 증가하였다. 이때, 기존 다족 보행로봇의 보행방식처럼 두 로커각(θ_{r1} , θ_{r2})은 동일한 시점에서 최대 또는 최소가 되어야 한다. 이에 따라 두 로커각이 최대에서 최소로 변할 때 크랭크가 180° 회전한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 이를 만족하는 크랭크(l_1)와 커플러(l_3)의 길이는 제2코사인 법칙을 이용해서 유도한 식 (2)와 (3)을 통해 구할 수 있다.

$$l_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} l_4 \sqrt{1 - \cos \theta} \quad (2)$$

$$l_3 = \sqrt{l_2^2 - l_4^2 \cos^2 \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

제안된 다족 보행로봇은 기존 다족 보행로봇의 보행방식과 같아야 하므로 두 프레임 사이의 각 (θ_f)은 식 (4)와 같이 전개된다.

$$\theta_f = 180^\circ - 2\cos^{-1}\left(\frac{l_3}{l_2}\right) \quad (4)$$

이중 크랭크-로커 기구의 로커각(θ_{r1} , θ_{r2})이 최대이거나 최소일 때의 크랭크각(θ_{c1} , θ_{c2})은 식 (1)로부터 알 수 있다. 이때, 두 크랭크의 공유 각도 ($\theta_f + \theta_{c1} + \theta_{c2}$)는 항상 180° 이며 식 (4)를 이용해 구한 두 프레임 사이의 각(θ_f)은 148.4° 가 된다. 위 과정을 통해 설계된 이중 크랭크-로커 기구의 최종형상은 Fig. 5와 같다. 각 허벅다리의 길이(l_t)는 안정적인 보행을 위한 조건 ⑥에 따라 보행 중 서로 부딪히지 않도록 선정하였다.

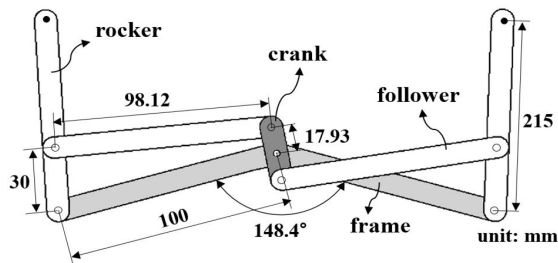


Fig. 5 Configuration of double crank-rocker structure

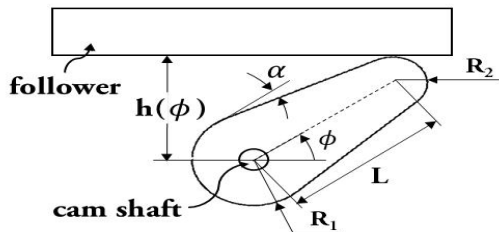


Fig. 6 Approximate model of plate cam

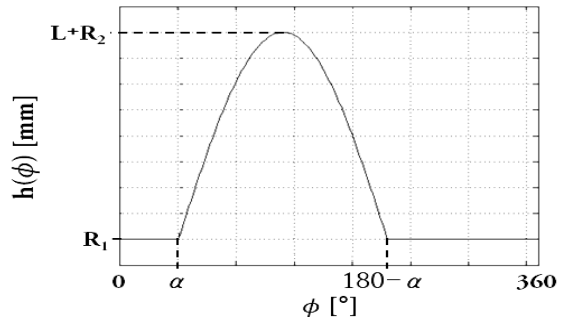


Fig. 7 Vertical distance between plate cam and follower when camshaft rotates

3.2 허벅다리 상하운동

보행 중 장애물을 극복하기 위해 다리는 동일 평면에서 상하로 움직이므로 허벅다리의 높낮이 움직임을 평면캠(plate cam)을 이용하여 구현할 수 있다. 일반적인 평면캠과 수직 왕복운동을 하는 중동절(follower)의 근사적 모델을 Fig. 6에 나타내었다. 이때, 캠의 회전각(ϕ)에 따른 캠축과 중동절 사이의 수직거리(h)는 식 (5)와 같다⁶⁾. 여기서, L 은 캠의 길이, R_1 은 캠 기초원(base circle)의 반경, R_2 는 캠 노즈(nose)의 반경, 그리고 α 는 캠 플랭크(flank)와 캠 중앙선 사이의 각을 나타낸다.

$$h(\phi) = \begin{cases} R_1 & , 0 \leq \phi < \alpha \\ R_2 + L \sin \phi & , \alpha \leq \phi < 180^\circ - \alpha \\ R_1 & , 180^\circ - \alpha \leq \phi < 360^\circ \end{cases} \quad (5)$$

캠의 형상은 다족 보행로봇의 허벅다리 상하운동 양상과 지면 접촉상태의 전환에 따라 결정된다. 또한, 제안된 다족 보행로봇은 1개의 입력으로 두 허벅다리의 전후운동과 상하운동이 동시에 구동되므로 크랭크축과 캠축은 항상 일정한 비율로 회전해야 한다. 따라서 이중 크랭크-로커 기구의 로커 끝단이 Fig. 1의 joint A처럼 경로 ①과 경로 ②를 지날 때 크랭크축은 각 경로에서 180° 회전하므로 캠축도 각 경로에서 180° 만큼 회전한다는 사실을 알 수 있다.

캠의 윤곽과 관련된 식 (5)는 Matlab을 이용하여 Fig. 7처럼 나타낼 수 있다. 다족 보행로봇은 자신의 위치를 이동시키기 위해 Fig. 7과 같이 접

선 캠의 회전각(ϕ)이 α 와 $180^\circ - \alpha$ 사이일 때 발끝이 지면에서 떨어지며 다리와 연결된 중동절이 경로 ②를 따라 일정 변위까지 수직상승한 후 다시 원래 위치로 돌아온다. 다른 각도에서는 로커 끝단이 경로 ①에 위치하고 발끝을 지면에 유지해야 하며 이 경우 중동절의 움직임은 없다. 각 경로에서 캠이 180° 씩 회전하므로 α 는 0이 되며 이 때 노즈의 반경(R_2)은 기초원의 반경(R_1)과 같다. 캠의 길이(L)는 보행 중 벽돌 높이의 장애물(60mm)을 극복할 수 있도록 선정하였다.

또한, 다리의 상하 왕복운동 도중 로봇 자중에 의해 바닥에 접촉한 다리에 반력이 가해지며 이는 허벅다리과 연결된 중동절의 경로를 이탈시킬 수 있다. 따라서 보행 시 캠이 가하는 힘 이외의 외력에 의해 중동절의 위치가 임의로 변경되는 것을 막을 수 있도록 캠에 홈캠(grooved cam) 일부 형상을 결속하였으며 중동절에 돌출부를 만들어 연결하였다. Fig. 8(a)에 캠의 회전각에 따른 캠축과 돌출부 사이의 거리를 극좌표계로 표현하였으며 이는 캠에 결속되는 홈캠의 형상과 같다. 캠에 홈캠을 결합한 개선된 캠 구조의 최종형상을 Fig. 8(b)에 나타내었다. 캠축을 중심으로 캠의 길이만큼 중동절과 연결된 다리가 상하로 움직이며 외력이 가해지더라도 중동절의 돌출부가 외부로 나가지 않도록 홈캠이 감싸주고 있으므로 경로 이탈 없이 다리의 상하운동이 유지된다.

3.3 기구 결합 및 검증

인접한 두 허벅다리가 동시에 동작하기 위해서는 앞에서 설계된 두 기구에 모터의 회전입력을 전달할 수 있는 연결 기구가 필요하다. 따라서 평기어(spur gear)를 배치해 1개의 DC모터가 크랭크축뿐만 아니라 2개의 캠축에도 출력을 전달할 수 있도록 하였다. 또한, 캠축은 DC모터 회전축 방향과 수직이므로 수직 방향으로 출력을 전달해 줄 수 있는 베벨기어(bevel gear)를 사용하였다.

Fig. 9는 UG NX 프로그램을 적용하여 구현된 다족 보행로봇의 모델링 형상이다. 각 허벅다리가 동일한 높이만큼 상승하도록 모든 허벅다리에 동일한 캠을 사용하였으며 이웃한 두 다리는 서로 교차하며 이동해야 하므로 두 캠의 회전각이 서로

180° 만큼 위상차가 생기게 하였다. 또한, 방향 제어를 위해 좌우에 각각 DC모터를 배치하였으며 1개의 DC모터는 3개의 평기어와 4개의 베벨기어를 통하여 1개의 이중 크랭크-로커 기구와 2개의 개선된 캠에 동력을 전달한다. 사용되는 모든 기어는 기존 다족 보행로봇의 보행방식을 구현하기 위해 피치원 직경과 모듈을 동일하게 설정하였다.

위에서 제안된 복합링크기구를 이용한 다족 보행로봇이 원활한 거동을 수행하는 지 검증한 결과를 Table 2에 나타내었다. 결합한 기구의 캠축 회전각(ϕ)이 각각 45° 와 225° 일 때 인접한 두 허벅다리가 최대 좌우운동을 하면서 번갈아가며 상하로 움직이는 것을 UG NX로 확인하였다. 또한 실제 제작을 통해 복합링크기구가 설계한 대로 잘 보행하는지 검증하였다. 최종형상은 ABS로 제작하였으며 보행 중 이웃한 두 다리가 서로 부딪치지 않으며 기존 다족 보행로봇의 보행방법과 동일하게 거동함을 확인하였다.

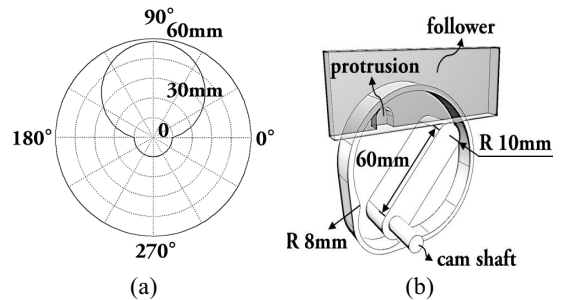


Fig. 8 (a) cam profile in polar coordinate system (b) final shape of developed cam

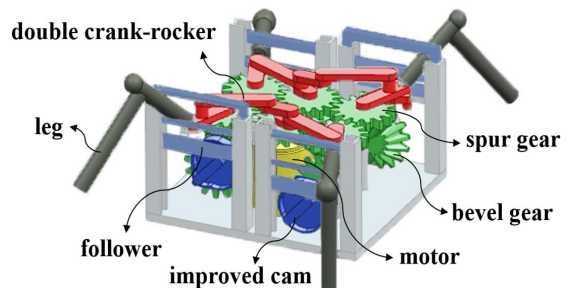
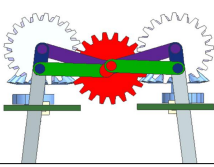
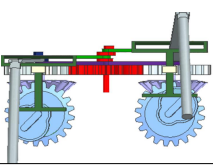


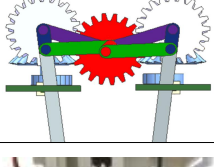
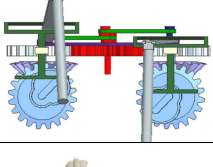

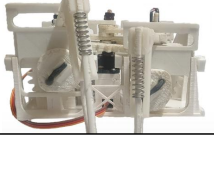


Fig. 9 Final configuration of multi-legged walking robot with complex linkage structure

Table 2 Driving results of final walking robot

ϕ	type	top view	side view
45°	NX		
	real		
225°	NX		
	real		

4. 결 론

본 논문에서는 복합링크기구를 이용하여 기존의 다족 보행로봇보다 적은 수의 액추에이터로 구동되는 새로운 다족 보행로봇을 제안하였으며 제작을 통해 성능 작동 여부를 확인하였다. 먼저 이웃한 다리의 전후운동을 동시에 구동할 수 있도록 운동성이 1이면서 링크 6개와 조인트 7개를 가진 이중 크랭크-로커 기구를 사용하였으며 원활한 보행을 고려한 기구설계 과정을 통해 각 링크의 길이 및 공유링크의 결합 각도를 선정하였다. 또한 평면캠에 홈캠의 일부 형상을 결속한 개선된 캠을 설계하여 허벅다리의 상하운동을 구현하였으며 1개의 DC모터로 인접한 허벅다리가 동시에 동작할 수 있도록 두 기구에 회전입력을 전달하는 적절한 기어 형상을 제시하였다.

본 논문에서 제시된 다족 보행로봇은 기존 제품과 동일한 기능을 수행하면서도 사용되는 모터 개수가 줄어들어 보다 낮은 가격으로 제작이 가능

하다. 또한 각각의 모터를 개별적으로 제어할 필요가 없으므로 소프트웨어 구성과 제어시스템 설계 시간이 단축되며 전력 소모가 줄어들어 장시간 사용해야하는 다족 보행로봇에 효과적이다. 따라서 본 결과물은 추후 다족 보행로봇이 사용되는 재난 지역이나 험지 탐사와 같은 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임.”

REFERENCES

1. Kang, J. I., Choi, H. S., Jun, B. H., Ji, D. H., Oh, J. Y. and Kim, J. Y., "Design and Control of Robot Arm for Inspection and Rescue Operations," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 22, No. 11, pp. 888-894, 2016.
2. Faigl, J. and Cizek, P., "Adaptive locomotion control of hexapod walking robot for traversing rough terrains with position feedback only," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 116, pp. 136-147, 2019.
3. Kim, B. H., "Analysis on Effective Walking Pattern for Multi-Legged Robots," Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 19, No. 5, pp. 622-628, 2009.
4. Murphy, M. P., Saunders, A., Moreira, C., Rizzi, A. A. and Raibert M., "The LittleDog robot," The International Journal of Robotics Research, Vol. 30, No. 2, pp. 145-149, 2011.
5. Kim, M. J., Kang, D. M., Kang, H. H., Kwak, D. W., Nam, D. W. and Park, C. J., "Study on the design and control of quadruped walking robot mechanism," 2018 33rd ICROS Annual Conference, pp. 540-541, 2018.
6. Uicker, J. J., THEORY OF MACHINES AND MECHANISMS, ITC, 2010.