

병렬형 다리 구조를 가진 2족 보행 로봇의 설계 및 제어

윤정한[†]·연제성^{*}·권오흥^{*}·박종현^{**}

New Parallel Mechanism for Biped Robots

Jung Han Yoon, Je Sung Yeon, Ohung Kwon, Jong Hyeon Park

Key Words : Parallel Mechanism(병렬형 구조), Serial Mechanism(직렬형 구조), Biped Robot (2족 보행 로봇), Asymmetric platform (비대칭 구조), Gravity Inverted Pendulum Mode(중력 보상 역진자 모드)

Abstract

In this paper, we propose new parallel mechanism of a 3 dimensional biped robot whose each leg is composed of two 3-dof parallel platforms linked serially. This proposed parallel mechanism is able to move freely in the man-made environment and is applied to various fields, such as medical, welfare, and so on. And a total weight of each leg is expected to be lighter than serial linked leg. One side leg consists of a 3-dof orientation platform and 3-dof asymmetric parallel platform. The former consists of three active linear actuators and seven passive joints, and the latter of two active linear actuators, one active rotational actuator and eight passive joints. Thus, there are two kinds of parallel platforms each chain's elements and active joint's positions are different for the biped robot to move freely like a serial link without the kinematics constraints. The effectiveness and the performance of the proposed parallel mechanism and locomotion trajectory are shown in computer simulations with a 12-DOF parallel biped robot.

1. 서 론

2족 보행 로봇의 연구의 궁극적인 목표는 인간이 만들어 놓은 인공적인 환경 속에서 인간과 더불어 살아갈 수 있는 능력을 가진 로봇을 만드는 것이다. 즉, 인간의 노동력을 대체하고 인간에게 서비스와 편의를 제공하는 수단으로써 연구의 필요성이 존재하는 것이다.

기존의 시리얼 링크 형태의 2족 보행 로봇은 각 관절에 사용된 액츄에이터에 걸리는 부하를 줄이기 위해 마그네슘 등의 가벼운 링크 재질을 사용하거나 특수가공으로 제작된 링크를 사용하는 등 여러 가지 복잡한 설계를 요구하였다. 이러한 시리얼 링크 구조의 특성으로 인한 요구되

는 재료의 경량화나 모터 크기의 증가는 2족 보행 로봇의 생산 비용을 높이며, 동시에 2족 보행 로봇이 다룰 수 있는 부하도 매우 제한된다. 즉, 무거운 물건을 들어 나르거나, 또는 밀거나 끄는데 많은 제한이 발생한다. 실제로 인간의 다리나 다른 동물의 다리 구조를 살펴보면 다리의 움직임은 병렬 메커니즘이 적용된 근육에 의해 만들어지고 있음을 쉽게 찾아 볼 수 있다.

이러한 병렬 메커니즘의 장점은 작은 액츄에이터를 이용하여 큰 부하를 다룰 수 있는 다리를 만들 수 있다는 것이다. 이것은 시리얼 링크 구조의 로봇 매니퓰레이터와 병렬 링크 구조의 로봇 매니퓰레이터의 특징을 비교하여 보아도 잘 알 수 있다. 한 개의 액츄에이터가 그 다음 단계에 있는 액츄에이터의 무게를 포함한 큰 부하를 다루어야 하는 시리얼 링크 구조는 최상단에 있는 액츄에이터가 결국 모든 액츄에이터의 무게를 다루어야 하는데 반해, 병렬 링크 구조에서는 모든 액츄에이터가 공동으로 모든 부하를 다루게 된다. 이러한 병렬형 근육의 장점으

[†] 한양대학교 정밀기계공학과
E-mail : windy95@ihanyang.ac.kr
TEL : (02)2297-3786 FAX : (02)2297-3786

^{*} 한양대학교 정밀기계공학과

^{**} 한양대학교 기계공학부

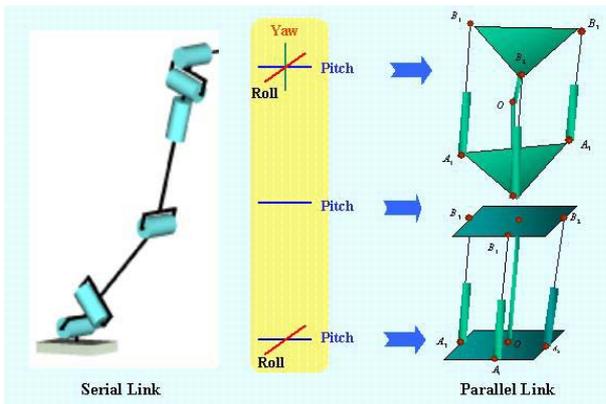


Fig. 1 Comparison with a serial-type mechanism and a parallel-type mechanism.

로 인해 현재 일본과 프랑스의 일부 연구자들도 평행링크 구조의 2족 보행 로봇을 시도하고 있다[1-5]. 그러나, 이러한 로봇은 다리의 형상이 자유자재로 움직일 수 있는 6 자유도가 아닌 5 자유도나 3 자유도의 다리를 갖고 있어 보행이 제한되었으며[2,3], 비록 6 자유도의 다리를 갖고 있지만 하나의 스튜어트 플랫폼으로 구성되어 있는 경우는 무릎이 없는 다리의 형상을 갖게 되어[4,5] 보행 시 인간의 보행과 달라 무척 부자연스럽고 어색하게 보이게 된다.

본 논문은 인간의 보행 보조 기구나 운송 수단으로써의 역할을 수행할 수 있도록 강건한 2족 보행 로봇의 설계 및 제어 방법을 연구하는데 있다. 따라서 기존의 로봇이 각 다리의 관절과 링크를 시리얼로 연결하는 구조를 사용하여 왔는데 이러한 구조 대신에 각 다리의 관절과 링크를 병렬형 구조로 연결된 강건한 2족 보행 로봇들을 만드는 것이다. 즉, 3 자유도를 갖는 병렬형 플랫폼 구조를 허벅지(thigh)와 정강이(shank)에 각 1 개씩 사용하는, 2 중 구조의 병렬 링크 구조로 이루어지면서 6 자유도의 자유도를 갖는 다리를 2 개 갖는 2족 보행 로봇을 설계하였다. 이와 같은 2 중 구조는 병렬 링크 구조를 통해 2족 보행 로봇이 다룰 수 있는 부하를 크게 함과 동시에 중간 링크 부위가 다리의 무릎과 같은 기능을 함으로써 좀더 인간의 보행과 흡사한 보행이 가능하게 하기 위함이다. 즉, 전체가 1 개의 6 자유도 스튜어트 플랫폼인 다리를 구성할 경우 다리의 무릎에 해당하는 부분이 없어 사람과 같은 모양의 보행을 할 수가 없다. 그러나 각 다리가 6 자유도를 갖는 구조는 기구학적으로 자유롭고 다양한 보행을 할 수 있게 된다. 이렇게 총 12 자유도를 갖고 큰 부

하를 다룰 수 있는 2족 보행 로봇은 사람을 싣고서 보행을 할 수 있으며, 현재의 2족 보행 로봇으로 불가능한 로봇의 구보나 달리기도 가능할 것이다. 그리고 로봇의 안정성을 유지하면서 걸어가기 위해서 중력 보상 역진자 모드를 기반으로 만들어진 보행 궤적[6]을 병렬형 구조의 무릎과 발에 궤적으로 변형하여 사용하였고, 제어기는 계산 토크 제어 방법을 사용하였다.

2. 새로운 병렬형 다리 구조

2.1 각 다리의 2중 3 자유도 병렬형 플랫폼

기존의 2족 보행 로봇의 각 다리는 일반적으로 여유자유도가 없이 6 자유도를 가진 시리얼 링크의 구조를 사용하여왔다. 이것은 Fig.1 에 나와있듯이 yaw 방향으로 1축, pitch 방향으로 3축, 그리고 roll 방향으로 2축으로 구성된다.

본 논문에서는 이러한 시리얼 링크의 6 자유도의 역할을 수행할 수 있도록 로봇의 허벅지 부위에 각각 pitch, yaw, 그리고 roll 의 방향의 회전이 가능하도록 4 개의 체인을 병렬로 연결된 구조[7,8]로 각각 SPS (Spherical-Prismatic-Spherical joints) 체인을 3 개 사용하고 중앙에는 회전이 가능하도록 Spherical 조인트로 연결된 체인을 사용하는 구조로 변형하였다. 또한 로봇의 정강이 부위에는 pitch 방향으로 2 축과 roll 방향으로 1 축의 회전이 가능하도록 UPS 조인트들로 이루어진 체인을 2 개, RPS 조인트들로 이루어진 체인을 1 개, 그리고 RS 조인트들로 이루어진 체인을 1 개 사용하였다.

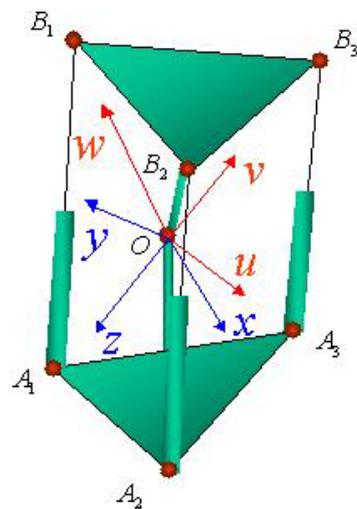


Fig. 3 A 3-DOF orientation platform

2.1.1 로봇의 허벅지 부위용 병렬형 플랫폼

2족 보행 로봇의 보행에서 허벅지 부위의 3자유도를 구현하기 위해서 설계된 병렬형 플랫폼의 적합성을 확인하기 위해서 플랫폼의 자코비안을 구한다. 먼저 Fig.2의 기구학적인 관계로 다음의 식이 구해진다.

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i \quad (= \overline{A_i B_i})$$

여기서,

$$\mathbf{a}_i = [a_{ix}, a_{iy}, a_{iz}]^T$$

$${}^B \mathbf{b}_i = [b_{iu}, b_{iv}, b_{iw}]^T$$

$$\mathbf{b}_i = {}^A \mathbf{R}_B {}^B \mathbf{b}_i$$

이다. 이 식으로부터 역기구학을 구하면,

$$d_i^2 = \mathbf{a}_i^2 + \mathbf{b}_i^2 - 2\mathbf{a}_i^T \mathbf{b}_i$$

$$d_i = \sqrt{\mathbf{a}_i^2 + \mathbf{b}_i^2 - 2\mathbf{a}_i^T \mathbf{b}_i}$$

이 된다. 다음으로 이 시스템의 자코비안을 구하기 위해서 i 번째 체인에 대한 loop-closure 방정식은 다음과 같다.

$$\overline{OB_i} = \overline{OA_i} + \overline{A_i B_i}$$

이 식을 시간에 대하여 미분하면 각 체인에 관한 속도 벡터 루프 방정식이 얻어진다. 즉,

$$\boldsymbol{\omega}_B \times \mathbf{b}_i = d_i \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{s}_i + \dot{d}_i \mathbf{s}_i \quad \text{for } i=1,2,3$$

$$\dot{d}_i = (\mathbf{b}_i \times \mathbf{s}_i) \cdot \boldsymbol{\omega}_B$$

이 된다. 여기서 \mathbf{s}_i 는 기준 좌표계에 대한 $\overline{A_i B_i}$ 방향의 단위 벡터이고, \mathbf{b}_i 는 $\overline{OB_i}$ 이다. 또한 $\boldsymbol{\omega}_i$ 는 고정 좌표계에 관련된 i 번째 체인의 각속도 벡터이다.

따라서 이 시스템의 자코비안은 다음과 같다.

$$J_x \boldsymbol{\omega}_B = J_q \dot{\mathbf{q}}$$

여기서,

$$\dot{\mathbf{q}} = [\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dot{d}_3]^T$$

$$J_x = \begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 \times \mathbf{s}_1)^T \\ (\mathbf{b}_2 \times \mathbf{s}_2)^T \\ (\mathbf{b}_3 \times \mathbf{s}_3)^T \end{bmatrix}$$

$$J_q = I(3 \times 3 \text{ Identity matrix})$$

이다.

이식들을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 각 pitch, yaw, 그리고 roll 축 방향으로 회전을 시켰을 때 Fig.3(a)에 나와있듯이 전후좌우 대칭으로 이동하였다. 이것은 체인들을 연결

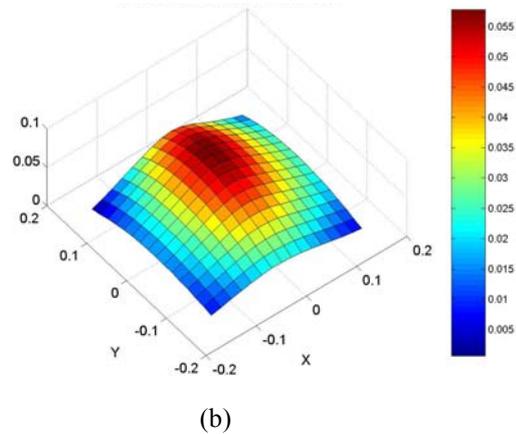
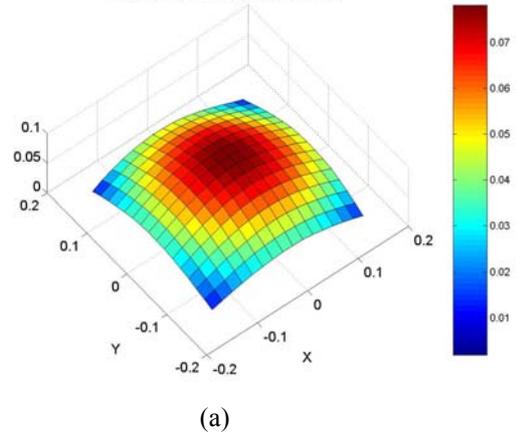


Fig. 2 Isotropic index: (a) When end-effectors of each chain are arranged at the corner position of the regular triangle in the fixed frame. (b) When end-effectors of each chain are arranged at the corner position of the asymmetric triangle in the fixed frame.

하는 두 판 상의 체인의 위치가 중심에 대하여 일정한 각도와 일정한 거리에 있기 때문이다. 여기서 중심에 위치한 체인의 Spherical 조인트의 위치를 변경하여 인간의 허벅지 회전 반경과 비슷한 회전 반경을 갖도록 하였다.

2족 보행 로봇에서는 로봇의 앞뒤 방향으로 큰 변위가 요구됨으로 체인의 위치를 대칭이 아닌 비대칭적인 위치로 이동시킬 경우에 Fig.3(b)에 나와있듯이 로봇의 진행방향으로 넓어지는 것을 볼 수 있다. 대략 roll 축의 각도를 45도로 고정된 경우에 isotropic index는 거의 동일하면서 로봇의 이동에 적합하도록 넓어지는 것을 나타내고 있다.

2.1.2 로봇의 정강이 부위용 비대칭 병렬형 플랫폼

로봇의 정강이 부위용 구조는 로봇의 보행에서

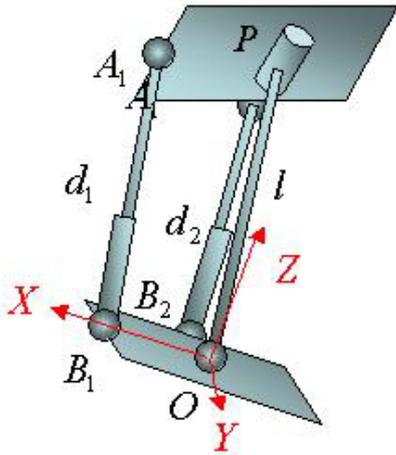


Fig.4 A 3-dof asymmetric platform

필요한 무릎에서의 pitch 방향의 회전과 발목에서 pitch와 roll 방향의 모션을 구현하기 위해서 기존의 대칭형 체인 대신에 6-5-4 자유도를 가진 체인이 두 관을 연결하는 비대칭형 플랫폼으로 구성되었다. 여기서 6 자유도의 체인을 하나 더 사용하였는데 그 것은 로봇의 균형을 맞추기 위하여 사용하였고 passive 조인트로 이루어지기 때문에 분석에는 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 먼저 그림에서 기하적인 관계로부터 다음의 식이 얻어진다.

$$d_i = b_i - a_i$$

여기서,

$$b_i = {}^A R_B {}^B b_i$$

이다. 이 식으로부터 역기구학을 구하면,

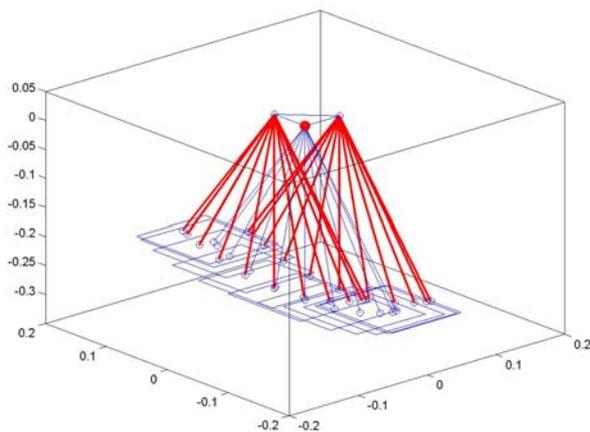


Fig.5 The 3-d displacement of a asymmetric platform in the sagittal plane

$$d_i^2 = a_i^2 + b_i^2 - 2a_i^T b_i$$

$$d_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2 - 2a_i^T b_i}$$

이 된다. 역기구학 식을 이용해서 로봇의 정강이 부위용 구조로써의 타당성을 알아보기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다. Figure 5 에서 위판을 고정하고 밀판을 지면에 나란하게 진행방향으로 움직였을 때 밀판이 지면에 대하여 수평을 유지하면서 이동한다는 것을 볼 수 있다. 기존의 3 자유도의 병렬형 플랫폼으로는 구현하기 어려운 모션으로써 이 비대칭형 구조가 적합함을 알 수 있다.

다음으로 이 시스템의 자코비안을 구하기 위하여 i 번째 체인에 대한 loop-closure 방정식을 구한다.

$$\overline{OP} + b_i = a_i + \overline{A_i B_i}$$

이 식을 시간에 대해 미분을 하면 각 체인에 관한 속도 벡터 루프 방정식을 얻을 수 있다. 즉,

$$V_p + \omega_p \times b_i = \dot{d}_i s_i + d_i \omega_i \times s_i$$

$$s_i V_p + (b_i \times s_i) \omega_p = \dot{d}_i$$

이 된다. 이 시스템은 무릎을 대신하는 Pitch-joint 에 의해 V_p 가 결정되고, 각속도는 두 개의 방향에 의해 결정된다. 즉,

$$V_p = \begin{bmatrix} 0 \\ -l \cos(\theta) \dot{\theta} \\ l \sin(\theta) \dot{\theta} \end{bmatrix},$$

$$W_p = \dot{\alpha} X + \dot{\beta} Y' = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \cos \alpha \\ \dot{\beta} \sin \alpha \end{bmatrix}$$

이 된다. 따라서 이 시스템의 자코비안은 위의 식으로부터 다음과 같이 표현되어 진다.

$$\begin{bmatrix} J \\ \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

2.2 6 자유도 각 다리의 구조

로봇의 허벅지 부위용 플랫폼과 로봇의 정강이 부위용 병렬형 플랫폼을 시리얼로 연결하게 되면 Fig.6 와 같이 6 자유도를 가진 플랫폼으로 만들어진다. 무릎을 가진 구조이며 로봇의 제작이나 가공에 어려움이 없으며 인간과 같은 자연스러운 보행 및 자세를 구현할 수 있는 구조이다.

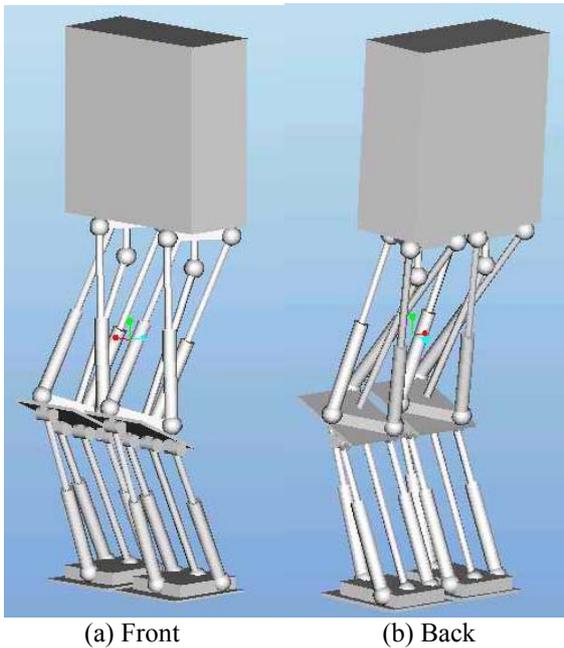


Fig. 6 Architecture of a 12-dof parallel-type biped robot

3. 병렬형 보행 로봇의 궤적 생성

3.1 로봇의 보행 궤적 생성

로봇의 궤적을 생성하기 위해서 사용된 방법은 기존의 시리얼 2 축 보행의 궤적 생성 방법인 중력 보상 역진자 모드[6]를 수정하여 사용하였다. 먼저 제어의 대상으로 로봇의 엉덩이 부위와 발

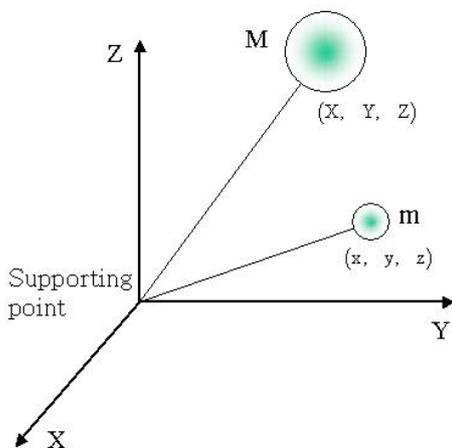


Fig.7 Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode

을 잡았으며 로봇의 전체 질량이 로봇의 엉덩이 조인트에 집중되어있는 것으로 가정한다. Fig.7 은 로봇의 보행 궤적을 얻어내기 위한 기본적인 모델을 나타내고 있다. 여기서 M 은 로봇의 전체 질량을 의미하며, m 은 스윙하는 다리의 질량을 의미한다. 이 모델로부터 진행방향의 발과 엉덩이의 보행 궤적을 얻어내고 측면방향의 발과 엉덩이의 궤적은 단순 역진자 모드를 사용하여 유도하였다. 이렇게 유도된 보행 궤적을 병렬형 구조에 적용하기 위해서 무릎과 발에 대한 궤적으로 다시 분해하여 각각 적용하였다.

Table 1 Locomotion parameters for a biped robot

Parameters	Symbol	Dimension
Step Time	T	0.5 (sec)
CG Height	H_z	0.62 (m)
Stride	S	0.2 (m)
Maximum Foot Height	h_f	0.05 (m)

4. 시뮬레이션

제안된 병렬형 이족 보행 로봇의 타당성과 적합성을 알아보기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 사용된 보행의 스펙을 Table 1 에 나타내었다. 그리고 엉덩이 부위와 정강이 부위의 플랫폼의 길이는 각각 0.3m 로 사용하였다.

실제로 로봇의 보행 궤적을 로봇에 적용해서 3 차원으로 보행을 수행 했을 경우에 보행 궤적을 나타내는 Fig.8 과 9 에 나타내었다. 각각 측면방향과 정면 방향에서의 보행 궤적 및 3 차원 공간에서의 이동을 나타내는 그림이다. 이러한 그림에서 알 수 있듯이 기존의 시리얼 2 축 보행 로봇의 동일한 모션을 구현하면서 무릎을 가진 자연스러운 모션을 하고 있음을 알 수 있다. 그리고 실제 각 다리에 걸리는 하중을 알아보기 위해서 정적 하중을 각 다리에 걸었을 때 시리얼 조인트에 필요한 힘보다 작은 힘과 토크가 active 조인트에 걸리는 것을 확인할 수가 있다.

5. 결론

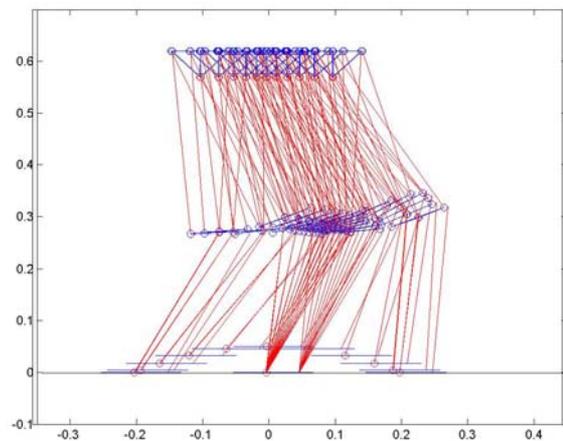
시리얼 구조형 보행 로봇의 단점을 보완하기 위해서 2 중 3 자유도 병렬형 플랫폼으로 이루어진 강건한 6 자유도의 다리를 갖는 2 족 보행 로봇을 설계하고 중력 보상 역진자 모드에 근거하여 얻어진 보행 궤적을 수정하여 사용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 구조의 적합성과 다양한 적용성을 확인할 수 있었다.

후 기

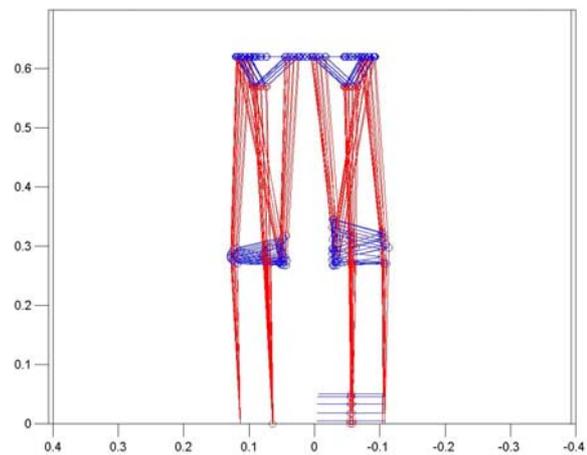
이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-041-D00056)

참고문헌

- (1) M. Morisawa, T. Yakoh, T. Murakami and K. Ohnishi, , 2000, "An Approach to Biped Robot with Parallel Mechanism," 6th Int. Workshop on Advance Motion Control, pp. 537-541.
- (2) M. Morisawa, T. Yakoh, T. Murakami and K. Ohnishi, 2000, "A Comparison Study Between Parallel and Serial Linked Structures in Biped Robot System," 26th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2614-2617.
- (3) R. Sellaouti, A. Konno, and F. B. Ouezdou, 2002, "Design of a 3 DOFs Parallel Actuated Mechanism for biped hip joint," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1161-1166.
- (4) Y. Sugahara, T. Endo, H. O. Lim and A. Takanishi, 2002, "Design of a Battery-powered Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism," IEEE /RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2658-2663.
- (5) Y. Sugahara, T. Endo, H. O. Lim and A. Takanishi, 2003, "Realization of Stable Dynamic Walking by a Parrallel Bipedal Locomotor on Uneven Terrain Using a Virtual Compliance Control," EEE /RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 595-600.
- (6) J. H. Park and K. D. Kim, 1998, "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated inverted Pendulum Mode and Computed-Torque Control," IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3528-3533.
- (7) Lung-Wen Tsai, 1999, "Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators," JOHN WILEY & SONS.
- (8) S. Joshi and L.W. Tsai, 2003, "A Comparison Study of Two 3-DOF Parallel Manipulators: One With Three and the Other With Four Supporting Legs," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 19, no. 2, pp. 200-209.



(a) Sagittal plane



(b) Frontal plane

Fig.8 Motion of a parallel biped robot in the sagittal and frontal plane

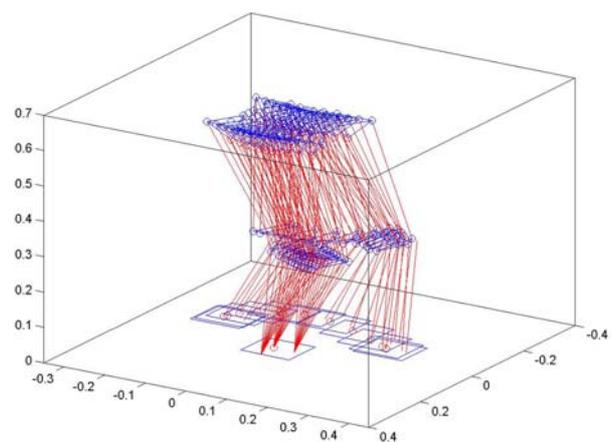


Fig.9 3D trajectories for a biped robot with two parallel legs