

보행공간과 안정성 향상을 위한 병렬기구 보행로봇의 설계

김치효[†] · 박근우^{**} · 김태성^{**} · 이민기^{*}
(2007년 6월 21일 접수, 2008년 2월 18일 심사완료)

Design of Parallel Typed Walking Robot for Improvement of Walking Space and Stability

Chi Hyo Kim, Kun Woo Park, Tae Sung Kim and Min Ki Lee

Key Words: Parallel Typed Walking Robot(병렬기구 보행로봇), Leg Mechanism(다리기구), Walking Space(보행공간), Stability Region(안정성 영역)

Abstract

This paper presents a parallel typed walking robot to improve walking space and stability region. The robot is designed by inserting an intermediate mechanism between upper leg mechanism and lower leg mechanism. The leg mechanism is composed of three legs and base, which form a parallel mechanism with ground. Seven different types of walking robot are invented by combining the leg mechanisms and an intermediate mechanism. Topology is applied to design the leg mechanism. A motor vector is adopted to determine Jacobian and a wrench vector is used to analyze dynamics of the robot. We explore the stability region of the robot from the reaction force of legs and compute ZMP including the holding force to contact the foot to a wall. This investigates a walking stability when the robot walks on the ground as well as on the wall. We examine the walking space generated by support legs and by swing legs. The robot has both a large positional walking space and a large orientational walking space so that it can climb from a floor up to a wall.

1. 서론

보행로봇은 곤충이나 동물의 다리와 같이 관절을 회전해 걷는 다관절형⁽¹⁾과 사람과 같이 두 다리로 걷는 2족형⁽²⁾이 연구되었다. 다리 구동형 로봇은 자유도가 많고 무게가 무거우며 보행의 안정성이 떨어진다. 병렬기구를 보행로봇에 적용하여 자유도를 줄이고 무게를 가볍게 하는 델타형 보행로봇⁽³⁾과 직렬-병렬기구 혼합형 보행로봇⁽⁴⁾이 개발되었다. 이들은 베이스와 플랫폼의 위치와

자세를 제어해 불규칙한 지형에서도 걸을 수 있고 방향까지 전환할 수 있다. 그러나 관절이 없는 고정다리를 장착해 이동성과 지형 적응성이 떨어진다.

우리는 병렬기구의 특징인 높은 강성과 큰 가반중량을 이용해 다양한 형태의 로봇을 개발해왔다.⁽⁵⁻⁷⁾ 본 연구에서는 병렬기구의 안정성과 능수능란성을 이용해 병렬기구 보행로봇(PWR, Parallel typed Walking Robot)을 개발하고자 한다. PWR은 상부와 하부 베이스에 구동다리를 설치하여 적은 자유도로 불규칙한 지형을 걸을 수 있고 넓은 공간에서 베이스를 지지하므로 안정성이 높다. 따라서 소형으로 경사면이나 벽면도 타고 다닐 수 있는 로봇이 개발되어 수중항만공사, 선박도장, 계단 보행 그리고 건물 내·외벽 청소 등에 활용될 수 있다.

[†] 책임저자, 회원, 창원대학교 메카트로닉스공학부

E-mail : chkim@changwon.ac.kr

TEL : (055)275-7553 FAX : (055)262-5064

^{*} 회원, 창원대학교 대학원 제어계측공학과

^{**} 회원, 창원대학교 메카트로닉스연구원

본 논문에서는 3-다리와 베이스 및 지면이 이루는 병렬기구의 토폴로지를 설계하고, 기구학과 동역학을 해석한다. 또한 다리의 반발력과 ZMP의 관계로부터 로봇이 벽면에 붙어 걸을 때의 안정성을 해석한다. 설계치수를 표준화하여 다리기구가 베이스를 제어할 때와 다리가 스윙할 때 보행공간을 해석한다. 다리기구를 2단으로 쌓고 중간에 중간기구를 설치한 PWR은 바닥에서 벽면을 타고 오를 수 있으며 소형으로 설계, 제작이 가능함을 보인다.

2. 병렬기구 보행로봇의 기구설계

PWR은 전방향 이동 및 회전이 가능하고, 불규칙적인 지형과 경사면에서 보행이 가능하며, 벽면과 벽면사이의 이동이 가능하도록 설계한다. 또한, 정적 및 동적으로 안정적이고, 소형으로 접근성이 좋아 좁은 공간도 통과할 수 있도록 한다. 위와 같은 조건을 만족시키기 위해 Fig. 1과 같이 상부와 하부 베이스에 각각 상부다리기구(ULM, Upper Leg Mechanism)와 하부다리기구(LLM, Lower Leg Mechanism)를 설치하고 그 사이에는 중간기구(IM, Intermediate Mechanism)를 설치한다.

다리가 베이스를 지지할 때 지면, 베이스 및 지지다리가 병렬기구를 이루므로 다리기구가 베이스를 임의의 위치와 자세로 이동시킬 수 있고 다리가 지면에서 떨어져 스윙할 때 지형에 맞게 다리의 각도 및 길이를 조절할 수 있다. 따라서 걸음공간이 넓고, 장애물을 용이하게 피할 수 있으며 울퉁불퉁한 지형이나 경사면도 안정적으로

걸을 수 있다. 또한, ULM, IM 및 LLM가 모두 독립적으로 구동되므로 각 기구의 회전 각도를 조합하여 바닥에서 벽면도 타고 오를 수 있다.

다리기구 및 중간기구를 액추에이터가 없는 단순한 구조(Structure)로 설계하여 다양한 형태의 PWR를 설계할 수 있다. 구조를 간단히 표현하기 위해 액추에이터가 설치된 상부, 하부다리기구 및 중간기구는 ULM, LLM 및 IM로 표기하고 액추에이터가 없는 경우는 ULS, LLS 및 IS로 표기한다. Fig. 1의 3단의 기구에 6종류의 기구 및 구조를 대입하면 8개의 조합이 만들어 진다. 그러나 ULS-IS-LLS는 구동원이 전혀 없는 경우로 이를 제외하면 7 종류의 PWR이 설계된다.

하나의 기구만을 제어하면 ULM-IS-LLS, ULS-IM-LLS, ULS-IS-LLM의 보행로봇이 설계된다. Yusuke Ota et al⁽⁴⁾이 제안한 ParawalkerII는 ULS-IM-LLS으로 IM을 직렬-병렬 조합형 기구를 적용해 상부 베이스와 하부 베이스를 반복적으로 이동시키는 방법이다. ULS와 LLS의 다리가 제어되지 않고 단순히 지면만 지지하므로 보폭이 작다. 두 개의 기구를 제어하면 ULM-IM-LLS, ULM-IS-LLM, ULS-IS-LLS으로 하나의 기구를 제어할 때 보다 자유도는 증가하나 보행공간과 안정성을 높일 수 있다. 또한, 모든 기구를 제어하면 ULM-IM-LLM으로 각 기구가 독립적으로 운동을 생성해 난이도가 높은 보행도 가능하다.

동물다리 형태의 보행로봇은 각 다리마다 3자유도 이상이 필요하며, 2족 보행로봇도 발목, 무릎, 허리, 몸체 등에 각각 2자유도 이상을 필요로 한다. 이들은 단순 평면, 계단 및 장애물을 피하는 보행밖에 할 수 없으나 ULM-IM-LLM은 각 기구를 6자유도로 구성할 경우 18자유도로 비교적 적은 자유도로 기존 보행로봇에 비해 큰 걸음공간과 안정성을 가지고 있으며 바닥에서 벽면을 타고 오르거나 불규칙한 지형을 안정적으로 보행할 수 있다.

2.1 다리기구 토폴로지 설계

다리기구인 ULM과 LLM의 자유도 및 조인트 배치를 같게 하고 다리의 질량과 부피가 베이스의 중심에 대해서 대칭이 되도록 한다. 베이스, 다리기구 및 지면으로 이뤄진 병렬기구의 자유도를 Gruebler의 법칙으로 분석하면

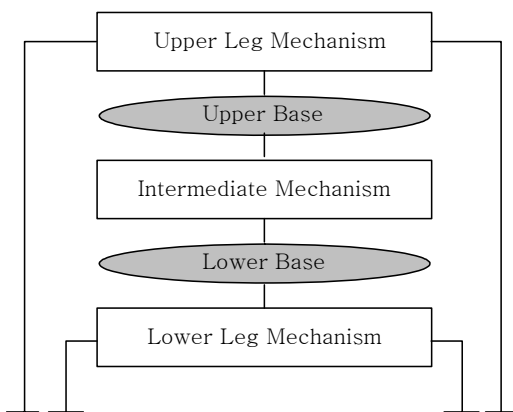


Fig. 1 Design concept of PWR

$$\text{dof} = \lambda(n-j-1) + \sum_{m=1}^j d_m \quad (1)$$

이다. 여기서 dof =자유도, n =링크 수, j =조인트 수, $d_m=m$ -조인트의 자유도, λ =기구의 자유도이다. 베이스의 위치 뿐 아니라 자세도 임의로 이동시키기 위해 $\text{dof}=6$ 으로 하고, 모든 조인트는 1 자유도로 한다. 2자유도 이상의 조인트가 있을 지라도 1자유도로 나누고 조인트 사이의 길이를 "0"으로 한다. 위 조건을 대입하고 식 (1)을 정리하면

$$6n = 5j + 12 \quad (2)$$

이다. 베이스에 다리를 k 개 설치하고 각 다리의 링크 트레인을 6자유도로 하면

$$n = 5k + 2 \quad (3)$$

으로 $k=1$ 일 때 직렬기구, $k \geq 2$ 일 때 병렬기구를 이룬다. 베이스를 안정적으로 지지하기 위해서는 $k \geq 3$ 이나 링크지 수를 최소화하기 위해 $k=3$ 으로 한다. 다리기구는 총 30개의 조인트를 가지고 있으며 그중 6개를 능동 조인트로 택하면 ${}_{30}C_6 = 18,564$ 의 경우의 수가 나올 수 있다. 그러나 대칭성을 고려해 3개의 다리 링크트레인을 동일하게 하고 6개 조인트 중 2개를 능동조인트로 택하면 ${}_{6}C_2 = 15$ 의 경우의 수가 나온다. 여기서 운동량이 크고 액추에이터 설치가 용이한 조인트를 능동조인트로 하고 상대적으로 운동량이 적은 조인트를 피동조인트로 택한다.

Fig. 2(a)와 같이 $leg_i(i=1,2,3)$ 를 베이스 상의 점 B_i 에 핀 조인트로 연결하고 다리가 스윙을 할 수 있도록 점 N_i 에 핀 조인트를 추가한다. 다리의 길이를 조절할 수 있도록 N_i 와 F_i 사이에 슬라이딩 조인트를 설치하고 다리가 지면을 디딜 때 임의의 자세를 취하도록 점 F_i 에 볼-소켓 조인트를 설치한다. 따라서 Fig. 2(b)와 같이 leg_i 가 베이스로부터 지면까지 6자유도의 링크 트레인을 구성한다. 즉, 상위 2개의 핀 조인트가 2자유도 (θ_{i1}, θ_{i2}), 슬라이딩 조인트가 1자유도(θ_{i3}), 그리고 볼-소켓 조인트가 3자유도($\theta_{i4}, \theta_{i5}, \theta_{i6}$)를 생성한다. 상기 4개의 조인트 중 다리의 각도를 조절하는 θ_{i2} 와 길이를 조절하는 θ_{i3} 에 액추에이터를 설치해 능동 조인트로 하고 나머지 조인트는

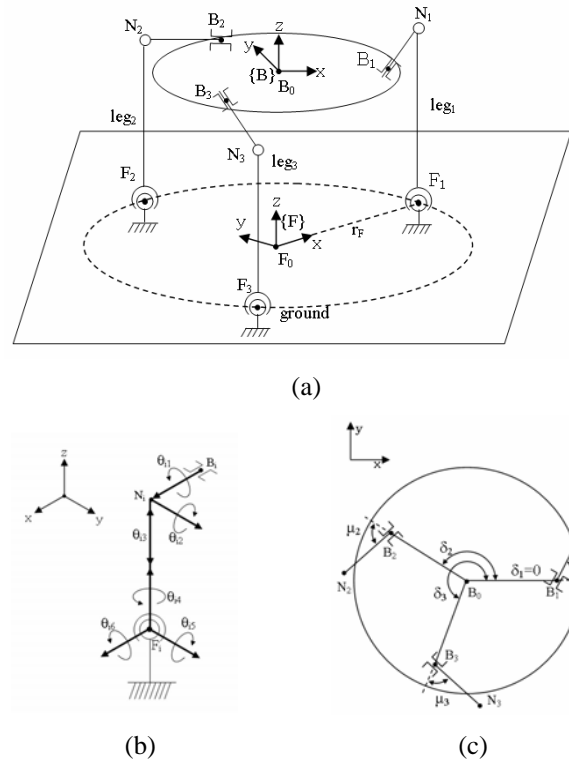


Fig. 2 Leg Mechanism. (a)Parallel mechanism composed of base, $leg_i(i=1,2,3,4)$ and ground, (b)Link train of a leg_i , (c)Arrangement of leg_i on the base

피동 조인트로 베이스, 다리기구, 지면이 이루는 병렬기구의 구속운동에 의해 회전하도록 한다.

Fig. 2(c)에서 베이스 중심은 B_0 이고 점 $i=1,2,3$ 에 대해서 $\angle B_1B_0B_i = \delta_i$ 이며 $\overrightarrow{B_0B_i}$ 와 $\overrightarrow{B_iN_i}$ 이 이루는 각도는 μ_i 로 정의한다. 기구학 해석을 위해 좌표계 $\{B\}$ 와 $\{F\}$ 를 정의한다. 좌표 $\{B\}$ 의 원점은 B_0 으로 하고, B_z -축은 점 B_i 가 이루는 평면에 수직방향, B_x -축은 $\overrightarrow{B_0B_1}$ 의 방향과 일치시키며, B_y -축은 오른손 나사의 법칙에 의해 결정한다. 좌표 $\{F\}$ 의 원점은 $F_i(i=1,2,3)$ 의 중심 F_0 으로 하고, F_z -축은 점 F_i 이 이루는 평면의 수직방향, F_x 축은 $\overrightarrow{F_0F_1}$ 의 방향과 일치시키며, F_y 는 오른손 나사의 법칙에 의해 결정한다.

2.2 다리기구의 기구학 해석

베이스의 위치(${}^F\overrightarrow{F_0B_0}$)와 자세(FR_B)가 $\{F\}$ 에 대한 $\{B\}$ 의 위치벡터와 회전행렬로 주어질 때 역기구학은 이를 생성하기 위한 능동 조인트 값

${}^d\Theta = [\theta_{12} \theta_{13} \theta_{22} \theta_{23} \theta_{32} \theta_{33}]^T$ 을 계산한다. 여기서, 위첨자는 벡터 또는 행렬을 나타내는 좌표이다. ${}^F\overrightarrow{N_i B_i}$ 와 ${}^F\overrightarrow{N_i F_i}$ 를 벡터의 연산에 의해 아래와 같이 구할 수 있다.

$${}^F\overrightarrow{N_i B_i} = {}^F R_B {}^B\overrightarrow{N_i B_i} \quad (4a)$$

$${}^F\overrightarrow{N_i F_i} = -{}^F\overrightarrow{F_0 B_0} - {}^F R_B ({}^B\overrightarrow{B_0 B_i} + {}^B\overrightarrow{B_i N_i}) \quad (4b)$$

다리의 각도는 상위 두 벡터가 이루는 각도이므로

$$\theta_{i2} = \cos^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{N_i B_i}}{\|N_i B_i\|} \cdot \frac{\overrightarrow{N_i F_i}}{\|N_i F_i\|} \right) \quad (5)$$

이다. 여기서 $0 < \theta_{i2} < \pi$ 이므로 식 (5)는 단일 해를 가진다. 다리의 길이는 ${}^F\overrightarrow{N_i F_i}$ 의 크기 이므로

$$\theta_{i3} = \| {}^F\overrightarrow{N_i F_i} \| \quad (6)$$

이다. 역으로 능동 조인트 값 ${}^d\Theta$ 가 주어질 때 {F}에 대한 {B}의 위치와 자세는

$$({}^F\overrightarrow{F_0 B_0}, {}^F R_B) = \mathcal{J}({}^d\Theta) \quad (7)$$

으로 여기서 \mathcal{J} 는 순방향 기구학을 나타내는 함수이며 수치해석으로 해를 구한다.⁽⁸⁾

속도제어를 위해 자코비안 행렬을 구한다. 베이스 회전속도와 중심(B_0)의 선속도를 6×1 배열인 트위스트(Twist) 벡터 $Vel_{B_0} = [\omega_{B_0}^T \ V_{B_0}^T]^T$ 으로 나타낸다. 여기서 ω_{B_0} 와 V_{B_0} 는 각각 회전속도와 선속도이다. 트위스트 Vel_{B_0} 를 leg_i 의 조인트 속도와 모터 벡터로 나타내면

$$Vel_{B_0} = \dot{\theta}_{i1} {}^{B_0}M_{i1} + \dot{\theta}_{i2} {}^{B_0}M_{i2} + \dots + \dot{\theta}_{i6} {}^{B_0}M_{i6} \quad (8)$$

이다. 여기서 $\dot{\theta}_{ij}$ 는 j 번째 조인트의 속도이고, ${}^{B_0}M_{ij} \in R^{6 \times 1}$ 는 모터벡터로, i -번째 링크 트레인의 j 번째 조인트가 단위 속도로 구동될 때 베이스의 회전속도와 중심의 선속도로 정의된다. 각 링크 트레인의 모터 벡터를

$${}^{B_0}J_i = [{}^{B_0}M_{i1}, {}^{B_0}M_{i2}, \dots, {}^{B_0}M_{i6}] (i=1,2,3) \quad (9)$$

으로 정의하면 링크 트레인 leg_i 의 능동 및 피동 조인트의 속도벡터 $\dot{\Theta}_i = [\dot{\theta}_{i1}, \dot{\theta}_{i2}, \dots, \dot{\theta}_{i6}]^T$ 는

$$\dot{\Theta}_i = {}^{B_0}J_i^{-1} Vel_{B_0} \quad (10)$$

이다. 능동 조인트로 이뤄진 자코비안을 유도하기 위해 벡터 ${}^{B_0}S_{ij} \in R^{1 \times 6} (j=1,2,\dots,6)$ 를

$$[{}^{B_0}S_{i1}^T \ {}^{B_0}S_{i2}^T \ \dots \ {}^{B_0}S_{i6}^T]^T = {}^{B_0}J_i^{-1} \quad (11)$$

으로 정의하면 각 leg_i 의 능동 조인트의 속도는

$$\dot{\theta}_{ij} = {}^{B_0}S_{ij} Vel_{B_0} (j=2,3) \quad (12)$$

이다. 따라서 트위스트 Vel_{B_0} 는 역자코비안에 의해 능동 조인트의 속도 ${}^d\dot{\Theta} = [\dot{\theta}_{12} \ \dot{\theta}_{13} \ \dot{\theta}_{22} \ \dot{\theta}_{23} \ \dot{\theta}_{32} \ \dot{\theta}_{33}]^T$ 로 아래와 같이 변환된다.

$${}^d\dot{\Theta} = {}^dJ({}^d\Theta)^{-1} Vel_{B_0} \quad (13)$$

여기서 ${}^dJ({}^d\Theta)^{-1} = [{}^{B_0}S_{12}^T \ {}^{B_0}S_{13}^T \ {}^{B_0}S_{22}^T \ {}^{B_0}S_{23}^T \ {}^{B_0}S_{32}^T \ {}^{B_0}S_{33}^T]^T$ 으로 ${}^dJ \in R^{6 \times 6}$ 는 능동 조인트로 이뤄진 자코비안 행렬이다.

2.3 다리기구의 동역학 해석

다리가 지면을 딛고 베이스를 이동시킬 때는 병렬기구의 동역학 해석방법⁽⁹⁾을 적용하고, 다리가 스윙할 때는 직렬기구 동역학 해석방법⁽¹⁰⁾을 적용한다. 직렬기구 동역학 해석은 뉴턴-오일러 방법으로 쉽게 구해지므로 다리가 지면을 디딜 때 동역학에 대해서만 기술한다. 병렬기구의 동역학을 간단히 표현하기 위해 힘과 모멘트를 아래와 같은 렌치좌표로 나타낸다.⁽¹¹⁾

$$[\Phi]_F = [W_1, W_2, W_3]^T \quad (14a)$$

$$[\Phi]_N = [W_4, W_5, W_6]^T \quad (14b)$$

여기서 W_1, W_2, W_3 는 힘의 요소이고 W_4, W_5, W_6 는 모멘트 요소로 $\Phi = ([\Phi]_F^T \ [\Phi]_N^T)^T$ 으로 정의한다. 베이스의 질량과 관성 모멘트가 각각

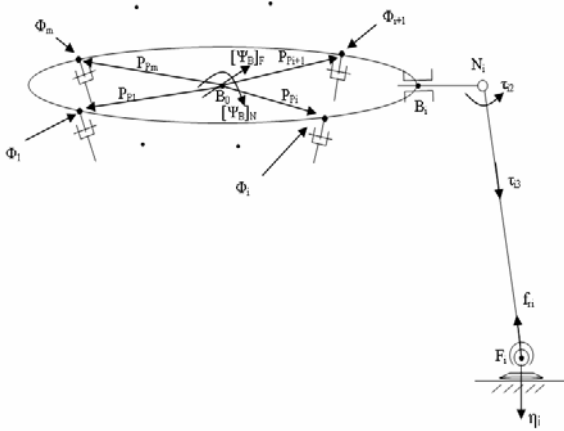


Fig. 3 Wrench and reaction force acting at a leg mechanism

m_B 와 I_B 이고 무게 중심의 가속도, 각속도 및 각 가속도가 각각 \ddot{P}_B , ω_B 및 $\dot{\omega}_B$ 일 때 관성력과 관성 모멘트를 렌치로 나타내면

$$[\Phi_B]_F = m_B \ddot{P}_B \tag{15a}$$

$$[\Phi_B]_N = \omega_B \times I_B \omega_B + I_B \dot{\omega}_B \tag{15b}$$

이다. 상부 베이스와 하부 베이스 사이에 설치된 중간기구 링크지가 베이스에 전달하는 렌치, Φ_i 를 동역학 해석으로 구한다. 위 식에서 구한 Φ_B 와 $\Phi_i (i=1,2,\dots,m)$ 을 Fig. 3에 나타내고 베이스의 무게중심에 대한 렌치로 환산하면

$$[\Psi_B]_F = \sum_{i=1}^m [\Phi_i]_F + [\Phi_B]_F \tag{16a}$$

$$[\Psi_B]_N = \sum_{i=1}^m P_{p_i} \times [\Phi_i]_F + [\Phi_B]_N \tag{16b}$$

이다. 여기서 P_{p_i} 는 베이스 중심에서 중간기구 조인트까지의 벡터이다. 위에서 구한 Ψ_B 는 자코비안에 의해 3-다리기구의 능동조인트로 아래와 같이 변환된다.

$$T = {}^d J(d\Theta)^{-1} \Psi_B \tag{17}$$

여기서 $T = [\tau_{12} \ \tau_{13} \ \tau_{22} \ \tau_{23} \ \tau_{32} \ \tau_{33}]^T$ 으로 τ_{i2} 는 핀 조인트에 부과되는 토크이고 τ_{i3} 는 슬라이딩 조인트에 부과되는 힘이다.

안정성 판별을 위해 다리가 발에 미치는 힘을 구한다. 마그네팬드나 흡착패드가 다리를 $\eta_i = (\eta_{xi}, \eta_{yi}, \eta_{zi})$ 의 힘으로 끌어당기고, 다리의 질량이 M_i 이며 중력 가속도를 포함한 무게 중심의 가속도가 \ddot{P}_i 일 때 발의 반발력 f_{ri} 을 구한다.

$$f_{ri} = \tau_{i3} + (M_i \ddot{P}_i + \eta_i) \cdot \frac{\overline{N_i F_i}}{\|N_i F_i\|} \tag{18}$$

반발력 f_{ri} 가 양이면 지면을 눌러 베이스를 지지하는 경우이나 음이면 발이 지면으로부터 떨어지는 경우가 된다. 따라서 로봇이 안정적으로 걷기 위해서는 f_{ri} 가 모두 양의 값을 가져야한다.

3. 다리기구의 안정성 해석

대부분의 연구⁽¹⁻³⁾는 로봇이 지면을 걸을 때 모멘트의 합이 “0”이 되는 ZMP(Zero Moment Point)가 안정영역 안에 있는지 판별해 안정성을 해석했다. 본 연구에서는 발을 벽면에 붙이고 보행할 때 안정성을 해석한다. Z-축 방향으로 중력이 작용하고 발에 설치된 패드가 3-다리를 힘 η_j 로 당기면서 Y-Z 수직벽면을 걸을 때 ZMP는

$$y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \ddot{P}_x P_y - \sum_{i=1}^n m_i \ddot{P}_y P_x + \sum_{i=1}^n I_{iz} \dot{\omega}_z - \sum_{j=1}^3 P_{yF_j} \eta_{xj}}{\sum_{i=1}^n m_i \ddot{P}_x - \sum_{j=1}^3 \eta_{xj}} \tag{19a}$$

$$z_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (g - \ddot{P}_z) P_x + \sum_{i=1}^n m_i \ddot{P}_x P_z - \sum_{i=1}^n I_{iy} \dot{\omega}_y - \sum_{j=1}^3 P_{zF_j} \eta_{xj}}{\sum_{i=1}^n m_i \ddot{P}_x - \sum_{j=1}^3 \eta_{xj}} \tag{19b}$$

이다. 여기서 m_i 는 로봇을 이루고 있는 링크의 질량으로 n개가 있고, (P_x, P_y, P_z) 와 $(P_{x_{F_j}}, P_{y_{F_j}}, P_{z_{F_j}})$ 는 각각 월드 좌표로부터 링크의 질량중심과 힘 η_j 까지 거리이며, (I_{ix}, I_{iy}, I_{iz}) 는 관성 모멘트, $(\ddot{P}_x, \ddot{P}_y, \ddot{P}_z)$ 는 가속도, $(\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z)$ 는 각속도이다. 2족 보행로봇의 경우 ZMP가 발바닥 안에 존재하면 발바닥 가장자리가 넘어지지 않도록 지지하므로 안정적이다. 위의 개

념을 PWR에 적용하면 점 F_i 을 연결한 삼각형 영역을 얻을 수 있다. 로봇은 두 점을 잇는 선분 $\overline{F_1F_2}$, $\overline{F_2F_3}$, $\overline{F_3F_1}$ 을 회전축으로 넘어지게 되는데 ZMP가 삼각형 영역 안에 있으면 안쪽으로 넘어지려는 모멘트가 크므로 반대편 다리가 지지해 안정성을 유지한다. PWR은 3-다리로 이뤄진 넓은 안정영역을 갖게 된다. ZMP가 삼각형의 중심에 가까울수록 안정적이며 경계에 가까워지면 불안정해진다. 따라서 ZMP와 세 경계선 사이의 최단거리를 안정성의 정도를 나타내는 안정여유로 정의할 수 있다.

Fig. 4는 로봇이 지면을 걸을 때 ZMP와 반발력 f_{r1} 의 관계를 나타낸다. ZMP가 안정 영역 안의 점 a에 있으면 f_{r1} 는 모두 양의 값을 가지며 지면을 눌러 로봇을 지지하게 된다. 경계선 상의 점 b에 존재하면 $f_{r1}=0$ 이 되며 안정 영역 밖의 점 c에 있으면 f_{r1} 은 음의 값으로 다리가 지면에서 들려 넘어지게 된다.

Fig. 5는 로봇이 Y-Z 벽면에 붙어 걸어 다닐 때 패드가 끌어당기는 힘 η_i 와 ZMP의 관계를 나타낸다. 힘 $\eta_i=0$ 일 때 ZMP는 안정영역에서 무한대 아래에 위치한다. 각 힘 η_i 를 증가시키면 ZMP

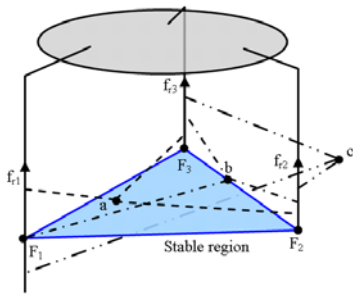


Fig. 4 Reaction force with respect to ZMP

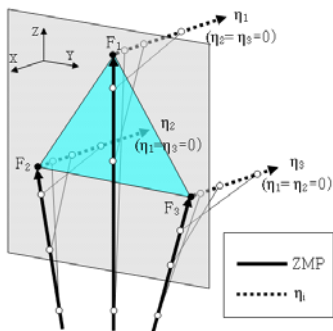


Fig. 5 ZMP movement as η_i increases

는 위로 올라와 각 발의 위치인 F_i 로 접근하고 η_i 를 모두 증가시키면 안정영역의 중심으로 이동한다. 따라서 η_i 를 적절히 조절해 ZMP를 안정영역 안으로 들어오게 함으로써 벽면에서 안정적으로 걸을 수 있다.

4. 다리기구의 보행공간 해석

PWR은 다리가 지면을 짚은 상태에서 베이스의 위치와 자세를 변화시켜 걷고 다리가 지면에서 들린 상태에서는 스윙하여 걷게 된다. 이러한 걸음공간은 좌표 {F}에 대한 {B}의 포즈 ${}^F\chi_B = ({}^F x_B, {}^F y_B, {}^F z_B, {}^F \alpha_B, {}^F \beta_B, {}^F \gamma_B)$ 와 {B}에 대한 {F}의 포즈 ${}^B\chi_F = ({}^B x_F, {}^B y_F, {}^B z_F, {}^B \alpha_F, {}^B \beta_F, {}^B \gamma_F)$ 로 나타낸다. 여기서 (x, y, z) 은 두 좌표 사이의 위치 좌표 값이고 (α, β, γ) 은 두 좌표 사이의 회전량을 나타내는 오일러 각도이다. 각 능동 조인트가 최단에서 최장까지 움직일 때 베이스의 위치공간과 자세공간을 분리해서 해석한다. 표준화된 수치를 얻기 위해 다리의 스트로크를 “1”로 하고, $\overline{B_0B_i} = 0.7$, $\overline{B_iN_i} = 0.3$, $1 \leq \overline{N_iF_i} \leq 2$ 로 한다. 각 핀 조인트의 각도는 $\pm 45^\circ$ 로 제한하고 $\delta_1 = 0^\circ$, $\delta_2 = 120^\circ$, $\delta_3 = 240^\circ$, $\mu_1 = 40^\circ$, $\mu_2 = 40^\circ$, $\mu_3 = 40^\circ$ 으로 한다.

다리가 지면을 짚는 위치에 따라 보행공간은 달라진다. 넓게 짚으면 안정성은 높아지나 보행공간이 줄어들고 좁게 짚으면 안정성은 떨어지나 보행공간이 늘어난다. Fig. 6은 $\theta_{i1} = 0^\circ$, $\theta_{i2} = 90^\circ$ 상태에서 다리가 지면을 짚었을 때 위치와 자세 공간이다. Fig. 6(a)는 ${}^F \alpha_B = {}^F \beta_B = {}^F \gamma_B = 0$ 에서 z축 변화에 따른 위치 이동공간을 나타낸다. 높이는 ${}^F z_B = 1.0 \sim 2.0$ 이고 ${}^F z_B = 1.0$ 일 때 ${}^F x_B = -0.8 \sim 2.6$, ${}^F y_B = -1.5 \sim 1.9$ 의 최대 이동거리를 가진다. Fig. 6(b)는 ${}^F x_B = {}^F y_B = 0$ 이고 ${}^F z_B = 1.5$ 일 때 자세 이동공간으로 ${}^F \alpha_B = -32^\circ \sim 32^\circ$, ${}^F \beta_B = -36^\circ \sim 36^\circ$, ${}^F \gamma_B = -43^\circ \sim 43^\circ$ 의 경사 각도를 생성한다.

다리기구가 들려 스윙할 때 피동조인트 θ_{i1} 은 구속되지 않아 제어불능 상태가 되므로 스프링을 이용하여 항상 홈 위치($\theta_{i1} = 0^\circ$)에 고정시키고 볼-소켓 조인트는 발의 중력 방향에 따라 자세를 잡도록 한다. Fig. 7(a)은 다리가 스윙할 때 걸음공간을 나타낸다. Π_g 는 다리가 디딜 평면이고

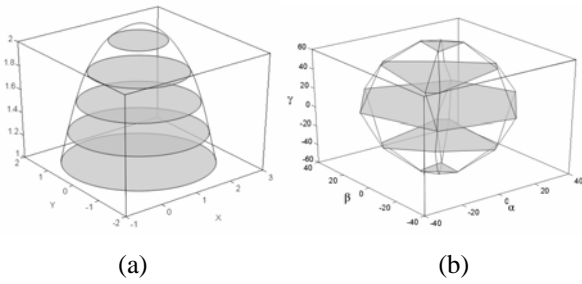


Fig. 6 Walking space generating by support legs, (a)Positional walking space and (b)Rotational walking space

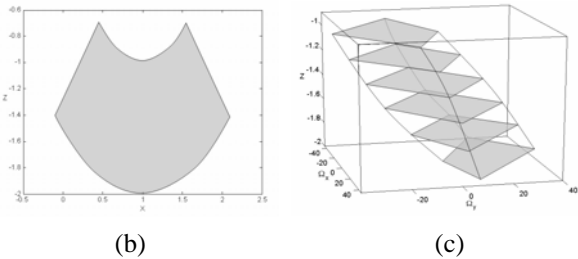
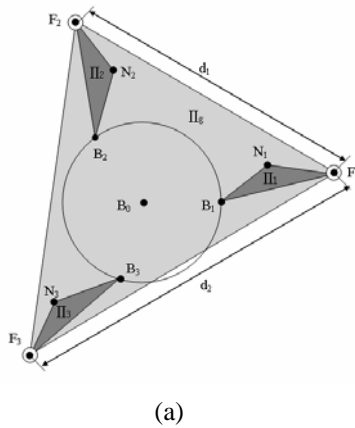


Fig. 7 Walking space generating by swing legs, (a) planes that F_i is constrained (b)Position walking space and (c)Rotation walking space

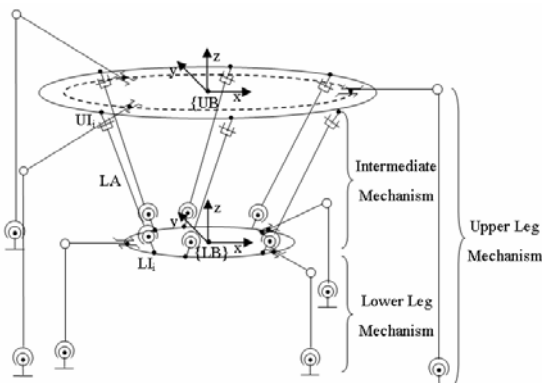


Fig. 8 PWR designed by ULM-IM-LLM

Π_i 는 $\overline{B_i N_i}$ 와 $\overline{N_i F_i}$ 가 이루는 평면이다. 각 다리의 F_i 은 Π_g 과 Π_i 상에도 존재해야하므로 두 평면이 교차하는 선상에 있게 된다.

안정성을 유지하기 위해 두 다리 사이의 거리를 $\overline{F_1 F_2} = \overline{F_1 F_3} = 1$ 로 유지하면서 능동조인트(θ_{i2} , θ_{i3})의 스트로크 범위 내에서 Π_g 와 Π_i 가 교차하는 선상에 존재하는 점 F_i 를 찾아 좌표 {F}를 정하고 ($B_{x_F}, B_{y_F}, B_{z_F}, B_{\alpha_F}, B_{\beta_F}, B_{\gamma_F}$)를 구한다. Fig. 7(b)는 $B_{\alpha_F} = B_{\beta_F} = B_{\gamma_F} = 0$ 일 때 위치 보행공간으로 Π_i 평면에 제한되어 $z = -1.4$ 에서 $x = 0.15 \sim 1.65$ 의 최대 이동거리를 가진다. Fig. 7(c)는 $B_{x_F} = B_{y_F} = 0$ 에서 자세 이동 공간을 나타내며 $B_{z_F} = -1.5$ 에서 $B_{\alpha_F} = -20^\circ \sim 20^\circ$, $B_{\beta_F} = -25^\circ \sim 25^\circ$ 의 최대 자세 공간을 가지고 $B_{\gamma_F} = -25^\circ \sim 25^\circ$ 까지 변화시킬 수 있다. 위치공간이 Π_i 평면에 제한되므로 총 5자유도의 걸음공간을 가지게 된다. 그러나 다리가 지면을 짚고 베이스를 이동시킬 때 Π_i 를 적절한 방향으로 회전시키면 임의 위치에 점 F_i 를 위치시킬 수 있으므로 어떠한 위치와 자세도 생성할 수 있다.

5. 다리기구와 중간기구의 조합에 의한 PWR 설계

다리기구와 중간기구의 조합으로 7종류의 PWR를 설계할 수 있다. 중간기구는 상부 베이스와 하부 베이스를 연결하는 기구로 다양한 형태의 병렬기구를 적용할 수 있다. 액추에이터가 하나도 없는 단순구조(IS) 이거나 자유도를 줄여 베이스의 위치 또는 자세만 변화시킬 수 있는 구조가 될 수도 있다. 본 연구는 Fig. 8과 같이 베이스의 위치와 자세를 모두 변화시킬 수 있는 6자유도의 스텐더트 플랫폼을 중간기구로 적용한다. 상부 베이스의 반지름을 1.4, 하부 베이스의 반지름을 0.7로 하고 $1 \leq \overline{U_i L_i} \leq 2$ 로 하였을 때 이동공간을 해석하면 $x = -0.98 \sim 0.98$, $y = -0.98 \sim 0.98$, $z = -0.7 \sim 1.8$ 이며 $\alpha = -34^\circ \sim 34^\circ$, $\beta = -34^\circ \sim 34^\circ$, $\gamma = -38^\circ \sim 38^\circ$ 이다.

단원 4에서 다리기구의 보행공간 해석으로부터 상부 다리가 지지할 때 상부 베이스를 최대 36° 까지 회전할 수 있고 중간 기구가 하부 베이스를 34° 까지 회전할 수 있으며 하부다리가 스윙



Fig. 9 ULM-IM-LLM constructed by pneumatic cylinders

할 때 디딜 지면의 각도를 최대 25° 까지 생성할 수 있다. 따라서 상부다리가 지면을 지지하면서 하부다리가 디딜 수 있는 지면의 경사각은 90° 이상이 된다. 같은 방법으로 하부다리가 벽면에 붙어있는 상태에서 상부다리를 지면에서 벽면으로 옮길 수 있다. 따라서 발바닥에 흡착패드나 마그네틱패드를 부착할 경우 지면에서 벽면을 타고 올라갈 수 있는 로봇이 설계된다.

하부 다리와 상부 다리의 스트로크를 각각 150mm과 300mm로 하고 중간기구의 리니어 액추에이터의 스트로크를 150mm로 하면 Fig. 9와 같이 최대 높이와 폭이 600mm인 소형로봇 제작이 가능하다.

6. 결론

다리기구를 두 단으로 쌓고 그 사이에 중간기구를 설치해 보행로봇을 설계하였다. 다리기구의 토폴로지 설계를 통해 대칭을 이루면서 3개의 다리가 베이스를 지지하도록 하였으며 각 다리에 2개의 능동 조인트와 4개의 피동조인트를 설치해 다리기구, 베이스 및 지면이 6자유도의 병렬기구를 이루도록 하였다. 모터백터를 이용해 자코비안을 구하고, 렌치백터를 이용해 동역학을 해석하였다. 다리의 반발력으로부터 로봇이 넘어지지 않는 안정성 영역을 찾고 발바닥을 끌어당기는 힘이 포함된 ZMP를 구해 지면뿐 아니라 수직벽

면을 오를 때 안정성을 해석하였다. 또, 보행공간 해석을 통해 다리가 지면을 지지할 때 보폭은 스트로크의 170%, 회전 각도는 36° 이며 스윙할 때 보폭은 스트로크의 180%, 회전 각도는 25° 로 넓은 보폭과 큰 경사각이 생성됨을 보였다. 다리기구와 중간기구에 액추에이터를 설치한 구조와 액추에이터가 없는 구조를 3단으로 쌓아 7종류의 PWR을 제시했다. 스텔트 플랫폼을 중간기구로 적용한 조합 ULM-IM-LLM은 90° 이상의 경사각을 생성할 수 있어 지면에서 벽면을 타고 올라갈 수 있었다. 다리기구와 그 사이의 중간기구의 조합으로 기존 보행로봇이 할 수 없는 보행이 가능함을 보였다.

참고문헌

- (1) Garcia, E. and de Santos, P., Gonzalez, 2006, "On the Improvement of Walking Performance in Natural Environments by a Compliant Adaptive Gait," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, No. 6, pp. 1240~1253.
- (2) Qiang Huang, Kazuhito Yokoi, Shuuji Kajita, Kenji Kaneko, Hirohiko Arai, Noriho Koyachi and Kazuo Tanie, 2001, "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 280~289.
- (3) Dunlop, G. Reg, 2003, "Foot Design for a Large Walking Delta Robot," *Experimental Robotics VIII*, STAR 5, pp. 602~611.
- (4) Yusuke Ota, Kan Yoneda, Fumitoshi Ito, Shigeo Hirose and Yoshihiko Inagaki, 2001, "Design and Control of 6-DOF Mechanism for Twin-Frame Mobile Robot," *Autonomous Robots*, Vol. 10, No. 3, pp. 297~316.
- (5) Lee, M. K. and Kim, T. S., 2003, "Constraint Operator for the Kinematic Calibration of a Parallel Mechanism," *KSME Int. J.*, Vol. 17, No. 1, pp. 23~31.
- (6) Tae Sung Kim, Kun Woo Park and Min Ki Lee, 2006, "Study on Observability of a Parallel-Typed Machining Center Using a Single Planar Table and Digital Indicators," *IEEE Int. J. Mechanism and Machine Theory*, Vol. 41, No. 10, pp. 1147~1156.

- (7) Kim, T. S., Park, K. W., Kim, C. H., Park, J. H. and Lee, M. K., 2005, "Development of a Parallel Typed Robot with a Sensorless Observer for Harbor Construction," *IEEE Int. Conf. on Information Acquisition*, pp. 187~192.
- (8) Raghavan, M., 1993, "The Stewart Platform of General Geometry has 40 Configurations," *ASME J. of Mech. Design*, Vol. 115, pp. 277~282.
- (9) Codourey, A., 1998, "Dynamic Modeling of Parallel Robots for Computed-Torque Control Implementation," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 17, No. 12, pp. 1325~1336.
- (10) Luh, J. Y. S., Walker, M. W. and Paul, R. P., 1980, "On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators," *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Contr.*, Vol. 102, pp. 468~474.
- (11) Hunt, K. H., 1978, "Kinematic Geometry of Mechanisms," *Oxford Univ. Press*.