

병렬기구 보행로봇의 최적설계와 걸음새에 관한 연구

Study on Optimal Design and Walking gait of Parallel Typed Walking Robot

김치효^{1,✉}, 박근우², 김태성², 이민기¹
Chi Hyo Kim^{1,✉}, Kun Woo Park², Tae Sung Kim² and Min Ki Lee¹

1 창원대학교 제어계측공학과 (Department of Control and Instrumentation Eng., Changwon Univ.)

2 (주)ROTOS (ROTOS Co., Ltd., Changwon Univ.)

✉ Corresponding author: chkim@changwon.ac.kr, Tel: 055-275-7553

Manuscript received: 2009.3.31 / Accepted: 2009.7.17

This paper presents a parallel typed walking robot which can walk in omni-direction and climb from a floor to a wall. We design a six D.O.F leg mechanism composed of three legs, which form a parallel mechanism with a base and a ground to generate arbitrary poses. Optimal design is conducted to maximize the walking space and the dexterity, which are normalized by the stroke of leg. Kinematic parameters are found to maximize the weighted optimal objectives. We design a triple parallel mechanism robot by inserting Stewart platform between the upper leg mechanism and the lower leg mechanism and examine the gaits when the robot walks on the ground and climbs from a floor to a wall. The analysis of walking space and dexterity for each gait shows that the triple parallel walking robot has a large walking space with a large stability region. We explore the possibility that the robot can climb from a floor to a wall. Investigating the gaits for the six steps proves that the robot can lift the foot up to the wall by combining the orientational walking space generated by three parallel mechanisms.

Key Words: Parallel Typed Walking Robot (병렬기구 보행로봇), Optimal Design (최적설계), Walking Gait (걸음새), Walking Space (보행 공간), Dexterity (능수능란성)

1. 서론

보행로봇은 주로 다리관절형태로 개발되어왔다. 인간과 같이 2.다리로 걷기 위해 다리 수를 줄이는 연구가 진행되어 뛰고, 계단을 오르내릴 수 있는 휴먼노이드 로봇이 개발되었다.¹ 그러나 다리 타입 보행로봇은 자유도가 많고, 기계적으로 복잡할 뿐만 아니라 좁은 발바닥으로 몸체를 지탱해야 하므로 고도의 기구학적 제어가 필요하다.²

로봇의 적용분야가 확대되면서 단순히 평면이나 불규칙적인 지형을 걷는 것보다 위험한 장소에 접근해 작업을 수행하는 보행로봇이 요구된다. 교각, 안테나, 철 구조물 등을 타고 다니는 로봇,³ 벽

면이나 파이프 면을 걷는 로봇 등이 개발되었다.⁴ 본 연구에서는 바닥면에서 벽면을 타고 오르내릴 수 있는 로봇을 개발하고자 한다. 바닥면에서 벽면을 타고 오르내리기 위해서는 몸체가 90° 이상 꺾여야 하고, 모든 벽면을 걷기 위해 전 방향 이동 및 회전이 가능해야 한다. 이를 만족하기 위해서는 많은 자유도와 복잡한 기계적 구조가 필요하다. 우리는 병렬기구를 적용해 자유도와 복잡성을 최대한 줄이고자 한다.

지난 10 년 동안 병렬기구를 적용한 보행로봇이 개발되었다. Saltaren⁵ 은 스튜워트 플랫폼의 상/하부 베이스에 링을 설치해 3 개의 빔이 교차하는 노드를 피하면서 지나다닐 수 있는 병렬기구 보행

로봇을 개발했다. 병렬기구 보행로봇의 장점을 부각시킨 연구이나 일반 평면지형을 걷기에는 부적합하다. 평면지형을 걸을 수 있는 보행로봇으로 상/하부 베이스에 다리를 설치하고 그 사이에 델타형 병렬기구,⁶ 스튜워트 플랫폼 병렬기구 또는 직렬-병렬혼합형 기구⁷ 등을 삽입한 로봇이 개발되었다. 이들은 베이스와 플랫폼의 위치와 자세를 모두 제어할 수 있으므로 불규칙한 지형에서도 걸을 수 있고 모든 방향으로 방향전환이 가능하다. 그러나 관절이 없는 고정다리를 장착해 발이 디딜 위치가 제한되고 이동성과 지형 적응성이 떨어진다.

본 논문에서는 상/하부 베이스에 구동다리를 설치하고, 그 사이에 스튜워트 플랫폼을 설치한 3단 병렬기구 보행로봇(TPWR, Triple Parallel typed Walking Robot)을 개발한다. 상부 및 하부다리기구의 설계기준을 위해 최적화 작업을 실시하고, 보행공간과 능수능란성을 극대화할 수 있는 설계변수를 찾는다. 최적화된 설계변수를 대입해 평면을 걸을 때와 벽면을 타고 오를 때 걸음새에 따른 보행공간 및 능수능란성을 분석한다. TPWR 은 이동거리가 크고 몸체가 90° 이상 꺾어져 벽면을 타고 오를 수 있음을 보인다.

2.3 단 병렬기구 보행로봇

TPWR 은 Fig. 1 과 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 삽입한다. 다리기구의 발바닥이 지면을 딛고 있을 때 베이스, 지지다리과 지면이 병렬기구 구조를 이뤄 베이스를 임의의 위치와 자세로 이동시키고 다리가 지면에서 떨어져 스윙할 때는 지형에 맞게 디딜 수 있도록 다리의 각도 및 길이를 조절하도록 한다.

지면을 딛고 베이스를 안정적으로 지지하기 위해 3-다리로 이뤄진 다리기구를 제안한다. 다리기구는 Fig. 2(a)와 같이 leg_i ($i=1,2,3$)을 베이스 상의 점 B_i 에 핀 조인트로 연결하고 다리가 스윙할 수 있도록 점 N_i 에 핀 조인트를 추가한다. 다리가 지면을 디딜 때 임의의 자세를 취하도록 점 F_i 에 볼-소켓 조인트를 설치하고, 다리의 길이를 조절할 수 있도록 N_i 와 F_i 사이에 슬라이딩 조인트를 설치한다. 따라서 Fig. 2(b)와 같이 leg_i 가 베이스로

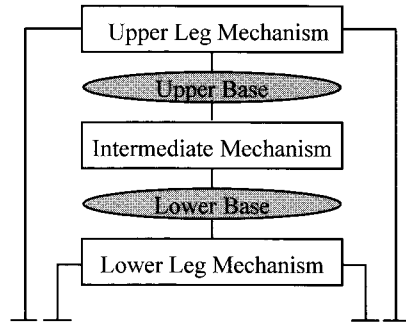
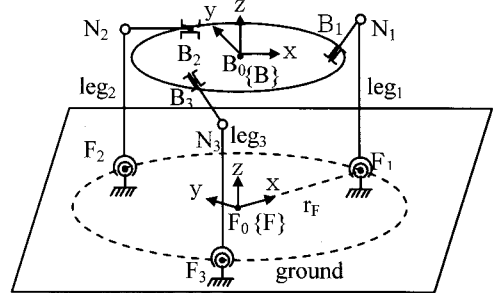
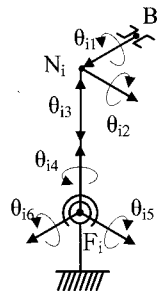


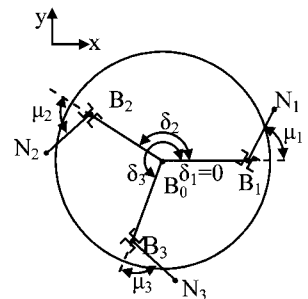
Fig. 1 Design concept of TPWR



(a)



(b)



(c)

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

부터 지면까지 6 자유도의 링크 트레인을 구성하도록 한다. 즉, 상위 2 개의 핀 조인트가 2 자유도 (θ_{i1}, θ_{i2}), 슬라이딩 조인트가 1 자유도(θ_{i3}), 그리고 볼-소켓 조인트가 3 자유도($\theta_{i4}, \theta_{i5}, \theta_{i6}$)를 생성한다. 상기 4 개의 조인트 중 다리의 각도를 조절하는 θ_{i2} 와 길이를 조절하는 θ_{i3} 을 능동 조인트로 하고 나머지는 피동 조인트로 한다. Fig. 2(c)는 베이스에 다리가 설치되는 위치와 각도를 나타낸다. 베

이스의 중심은 B_0 이고, 첨자 $i=1,2,3$ 에 대해서 $\delta_i = \angle B_0 B_i B_i$ 이며 $B_0 B_i$ 와 $B_i N_i$ 이 이루는 각도는 μ_i 이다. 기구학 해석을 위해 베이스와 지면에 좌표계 $\{B\}$ 와 $\{F\}$ 를 부여한다. 좌표 $\{B\}$ 의 원점은 B_0 , $\{F\}$ 의 원점은 $F_i (i=1,2,3)$ 의 중심 F_0 으로 한다.

능동 조인트 $\theta = [\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{22}, \theta_{23}, \theta_{32}, \theta_{33}]^T$ 가 생성하는 베이스의 위치/자세는 아래와 같이 순방향 기구학으로 구할 수 있다.

$${}^F \chi_B = \mathfrak{Z}(\theta) \tag{1}$$

여기서 ${}^F \chi_B = ({}^F x_B, {}^F y_B, {}^F z_B, {}^F \alpha_B, {}^F \beta_B, {}^F \gamma_B)$ 으로 $({}^F x_B, {}^F y_B, {}^F z_B)$ 는 F_0 에서 B_0 까지 위치벡터, $({}^F \alpha_B, {}^F \beta_B, {}^F \gamma_B)$ 는 $\{B\}$ 가 $\{F\}$ 에 대해서 x, y, z-축 방향으로 회전된 각도를 나타내는 오일러 각도이며, \mathfrak{Z} 는 순방향 기구학을 나타내는 함수이다.

베이스 중심의 회전속도와 선속도를 트위스트 (Twist) 벡터 $Vel_{B_0} = [w_{B_0}^T \quad V_{B_0}^T]^T$ 으로 나타낸다. 트위스트 Vel_{B_0} 는 자코비안(J)에 의해 능동 조인트의 속도 $\theta = [\theta_{12} \theta_{13} \theta_{22} \theta_{23} \theta_{32} \theta_{33}]^T$ 로 아래와 같이 변환된다.

$$\theta = J(\theta)Vel_{B_0} \tag{2}$$

식(1)과 (2)를 이용해 안정적으로 최대의 보행공간을 생성할 수 있는 다리기구를 설계한다.

3. 기구학적 변수의 최적화

로봇의 적용목적에 따라 다양한 최적화 기법⁸이 적용될 수 있다. 우리는 넓은 보행공간에서 베이스의 위치와 자세를 자유자제로 생성하길 원한다. 따라서 최적화 목적을 보행공간과 능수능란성으로 한다.

위치보행공간과 자세보행공간을 함께 최적화하기 위해 오일러 각도가 모두 $\pm 30^\circ$ 이상 회전되는 위치공간(V)을 아래와 같이 구한다.

$$V = W(\theta) \tag{3}$$

여기서 W 는 Gauss Divergence 원리를 이용하여 보행공간⁹을 구하는 함수이다.

병렬기구의 취약점은 특이점이 보행공간 내에 존재한다는 것이다. 특이점의 존재여부는 능수능

란성(Dexterity)¹⁰으로 해석되는데 이는 로봇이 임의 방향으로 속도와 힘을 적용할 수 있는 능력이다. 베이스와 액추에이터 사이에 속도와 힘을 변환하는 자코비안이 능수능란성의 측정값으로 사용된다.

능수능란성을 나타내는 조건수 k 는

$$k(J(\theta)) = \delta 1 / \delta 6 \tag{4}$$

으로 자코비안의 최대 특이값($\delta 1$)과 최소 특이값($\delta 6$)의 비로 정의된다. 조건수가 “1”에 가까우면 힘과 속도를 임의 방향으로 골고루 변환시키고 값이 커지면 불균형을 이루며 “ ∞ ”가 되면 특이점으로 제어불능상태가 된다. 최적화를 위해 조건수의 역수 $0 \leq 1/k \leq 1$ 을 사용한다. 이 값은 특정 θ 에 대한 값으로 베이스의 위치와 자세에 관계없이 모든 보행공간 내의 값으로 나타낼 수 있는 측정값이 필요하다. 따라서 국소적인 측정값을 보행공간에 대해 적분하고 전체 보행공간으로 나눈 평균값을 능수능란성을 나타내는 지수로 사용한다.¹⁰

$$D_g = \frac{\int_w 1/\kappa(J^d(\theta))dw}{\int_w dw} \tag{5}$$

여기서 $0 < D_g < 1$ 으로 전체 능수능란성을 나타낸다.

결정해야 할 설계 값은 $\delta_i, \mu_i, \overline{B_i N_i}, \overline{B_0 B_i}, \overline{F_0 F_i}$ 으로 설계변수를 줄이기 위해 $r_B = \overline{B_0 B_i}$, $r_F = \overline{F_0 F_i}$ 으로 한다. r_F 는 설계변수는 아니지만 다리가 다닐 최적의 위치를 제시해 준다. μ_i 와 δ_i 는 베이스에 다리가 설치되는 각도로 서로 같은 성질을 갖는다. 따라서 다리가 120° 등간격으로 설치되게 $\delta_1 = 0^\circ, \delta_2 = 120^\circ, \delta_3 = 240^\circ$ 으로 고정하고 μ_i 를 설계변수로 한다. 또한, $\overline{B_i N_i}$ 와 r_B 도 베이스 중심으로부터 다리가 설치되는 위치를 나타내는 값으로 서로 상관관계를 갖는다. 실제 설계치수를 감안해 $\overline{B_i N_i} = 0.5 \times r_B$ 으로 고정하고 r_B 만 설계변수로 한다. 길이단위를 다리실린더의 스트로크인 l 로 나눠 무차원화 하고 설계변수벡터 $X = \{r_B/l, r_F/l, \mu_1, \mu_2, \mu_3\}$ 으로 한다.

식(3)과 (5)에서 정의한 목표값은 차원이 다르므로 통일할 필요가 있다. 다리의 길이가 크기를 결정하는 가장 중요한 요소가 되므로 l^3 으로 보행

Table 1 Numerical Results for optimized leg mechanism

c	$\frac{r_B}{l}$	$\frac{r_F}{l}$	μ_1	μ_2	μ_3	D_g	$\frac{V}{l^3}$
0	0.82	1.20	0.1	0.4	-0.1	0.001	15.21
0.1	0.81	1.21	30.7	26.2	26.8	0.012	11.37
0.2	0.79	1.28	37.2	34.9	38.6	0.021	9.23
0.3	0.76	1.34	41.2	42.1	46.7	0.032	7.56
0.4	0.70	1.39	61.2	64.1	63.2	0.045	5.98
0.5	0.62	1.48	65.7	66.7	65.9	0.068	4.11
0.6	0.54	1.81	90.0	88.3	92.6	0.087	3.02
0.7	0.42	2.56	92.4	92.1	92.1	0.102	2.05
0.8	0.39	3.27	105.0	105.0	105.0	0.128	2.01
0.9	0.36	4.45	128.0	128.2	128.0	0.159	1.79
0.99	0.02	7.22	130.6	130.9	130.7	0.201	1.24

공간을 나눠 무차원화 시키고 능수능란성과 보행 공간에 가중치를 두어 목적 함수를

$$F(X) = cD_g + (1-c)\frac{V}{l^3} \quad (6)$$

으로 정의한다. 여기서 $0 \leq c \leq 1$ 로 $c=1$ 이면 능수능란성만 강조하고, $c=0$ 이면 보행공간만 강조하는 경우가 된다. 액추에이터의 작동범위와 간섭을 고려해 능동조인트의 범위는 $-40^\circ < \theta_{i2} < 40^\circ$, $1.3 \times l < \theta_{i3} < 2.3 \times l$ 으로 한다.

가중치 c 를 변화시켜 최적화를 실시하면 Table 1 와 같은 결과를 얻는다. 능수능란성과 보행공간은 서로 상반된 관계를 가지므로 절충 값을 찾아야 한다. 가중치 $c=0$ 으로 두어 보행공간을 중요시하면 $r_B/l=0.82$, $r_F/l=1.20$ 그리고 $\mu_i \cong 0^\circ$ 에 수렴한다. $\|B_i N_i\| = 0.5 \times r_B$ 이므로 Fig. 3(a)와 같이 다리가 지면에 수직으로 닿는 경우가 되어 보행공간을 넓게 확보한다. 그러나 다리가 Z-축 방향의 모멘트를 지지하기에는 취약한 구조가 된다. 역으로 능수능란성을 강조하면 $r_B/l=0.02$, $r_F/l=7.22$ 그리고 $\mu_i \cong 130^\circ$ 에 수렴한다. 이 경우 Fig. 3(b)와 같이 다리를 넓게 디더 베이스를 지지하기에 좋은 구조가 되나 넓은 보행공간을 확보하기에는 취약한 구조가 된다.

가중치 c 에 대해 보행공간과 능수능란성을 나타내면 Fig. 4 와 같다. 두 곡선은 $c=0.47$ 에서 교차하며 이 근방이 서로 상반되는 목적을 절충할 수 있는 곳이다. 따라서 $c=0.5$ 에서 최적화하여 $X=\{0.62, 1.48, 65^\circ, 65^\circ, 65^\circ\}$ 를 구한다.

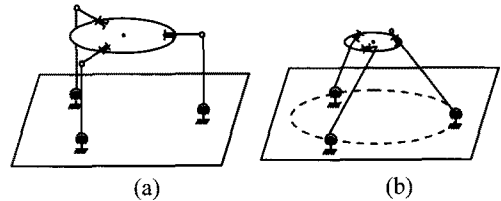


Fig. 3 Optimized design (a) emphasizing the walking workspace, (b) emphasizing the dexterity

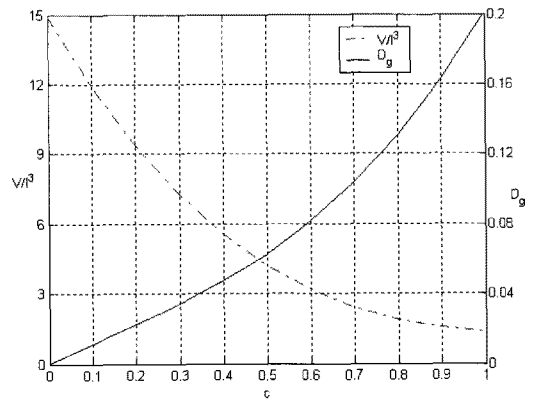


Fig. 4 Dexterity and walking space as c is changed

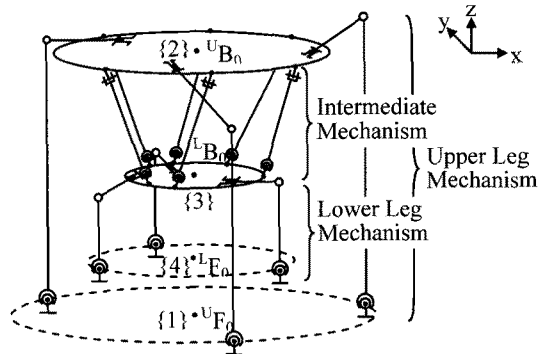


Fig. 5 Walking parameters

4. TPWR 의 걸음새

TPWR 의 걸음새에 따른 보행공간과 능수능란

성을 분석하기 위해 3 장에서 구한 최적화 변수로 ULM 과 LLM 을 설계하고, 중간기구 IM 를 삽입하여 Fig. 5 와 같이 TPWR 을 설계하였다. TPWR 의 운동을 기술하기 위해 ULM 의 점 ${}^U F_0$ 와 ${}^U B_0$ 에 각각 좌표 {1}과 {2}를 부여하고, LLM 의 점 ${}^L B_0$ 와 ${}^L F_0$ 에는 각각 좌표 {3}과 {4}를 부여한다. ULM 의 실린더 스트로크 $l_U=600$, LLM 의 실린더 스트로크 $l_L=300$ 으로 한다. IM 은 Stoughton 와 Tatsuo Arai⁽¹⁰⁾가 제시한 최적화 수치를 사용한다. 즉, 실린더의 스트로크, $l_I=450$ 으로 하고 상부베이스와 하부베이스에 설치되는 실린더 설치반경은 각각 300 과 150 으로 한다.

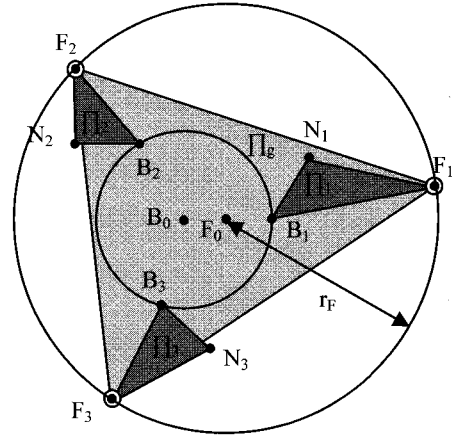


Fig. 9 Constrained planes when the legs of LLM

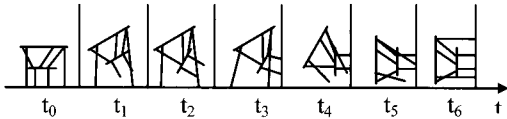


Fig. 6 Walking cycle for lever-ground

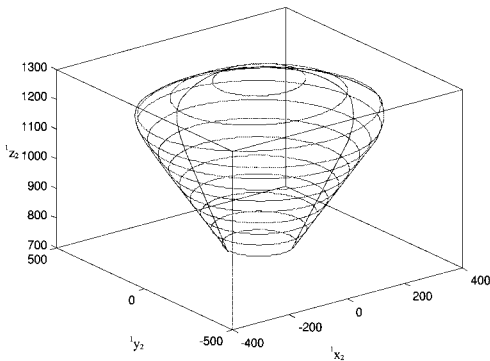


Fig. 7 Positional walking space generated by ULM

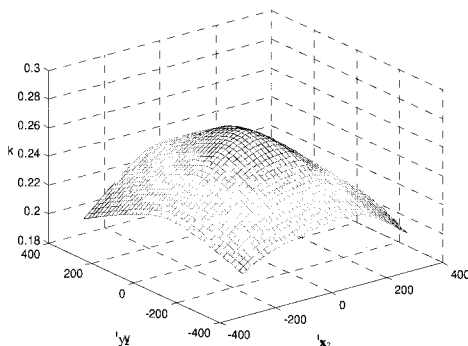


Fig. 8 Condition number(k) in positional walking workspace

4.1 평면을 걸을 때

평면을 보행할 경우 한 주기는 Fig. 6 과 같이 6 단계로 나눌 수 있다.

1 단계: $t=(t_0 \sim t_1)$ 동안 ULM 의 다리가 진행방향으로 뻗은 상태에서 상부베이스를 들어 올려 앞으로 이동시키면 상부베이스에 연결된 IM 와 LLM 도 같이 이동한다. ULM 에 의해 생성되는 {1}에 대한 {2}의 포즈는 아래와 같다.

$${}^1\chi_2 = {}^U\mathfrak{R}({}^U\theta) \tag{7}$$

여기서 위치차(U)는 ULM 의 순방향 기구학 함수와 능동 조인트 값을 나타낸다. 베이스의 각도를 ${}^1\alpha_2 = {}^1\beta_2 = {}^1\gamma_2 = 0$ 으로 일정하게 유지하면서 진행방향에 따라 위치만 변화시키면 보행공간은 Fig. 7 과 같다. 높이의 변화는 ${}^1z_2 = 707 \sim 1239$ 이고, ${}^1z_2 = 1194$ 일 때 ${}^1x_2 = -361 \sim 361$, ${}^1y_2 = -395 \sim 395$ 의 최대 보폭을 가진다. Fig. 8 은 ${}^1z_2 = 1080$ 일 때 x-y 보행공간 내에서 조건수를 나타낸다. 중앙에서 가장 큰 값을 가지고 경계로 갈수록 점점 작아진다. 그러나 모든 보행공간 내에서 조건수는 0.193 이상으로 특이점은 존재하지 않는다.

2 단계: $t=(t_1 \sim t_2)$ 동안 상부베이스 밑에 설치된 IM 이 하부베이스를 진행방향으로 옮긴다. 실린더의 길이를 조절해 상부베이스에 대한 하부베이스의 포즈 ${}^2\chi_3$ 을 변화시킨다.

$${}^2\chi_3 = {}^L\mathfrak{R}({}^L\theta) \tag{8}$$

여기서 \mathfrak{R} 은 IM 의 순방향 기구학을 나타내는 함

수이며 위치자(°)는 IM 의 순방향 기구학 함수와 능동조인트 값을 나타낸다. 자세를 고정시키고, 위치만 변화시켜 보행을 할 때 IM 은 ${}^2z_3=512$ 에서 ${}^2x_3=-360\sim 360$, ${}^2y_3=-360\sim 360$ 의 최대보폭을 가진다.

3 단계: $t=(t_2\sim t_3)$ 동안 LLM 의 다리가 진행방향으로 뻗는다. 이때 피동조인트 ${}^1\theta_{01}$ 은 조인트에 장착된 스프링에 의해 구속이 되어 항상 홈 위치에 고정된다. 볼-소켓 조인트 ${}^1\theta_{ij}$ ($j=4,5,6$)은 발의 중력 방향에 따라 자세가 고정된다. Fig. 9 는 다리가 스윙 할 때 구속평면을 나타낸다. 평면 Π_g 는 다리가 디딜 평면이고 Π_i 는 $\overline{BN_i}$ 와 $\overline{NF_i}$ 가 이루는 평면이다. 점 F_i 은 Π_g 과 Π_i 상에 존재해야 하므로 두 평면이 교차하는 선상에 있게 된다. 능동 조인트 ${}^1\theta_{02}$ 과 ${}^1\theta_{03}$ 의 작동범위 내에서 Π_g 와 Π_i 가 교차하는 선상에 존재하면서 최적화로부터 최대 보폭을 가지는 $r_F=445$ 가 되는 점 F_i 을 찾는다. LLM 의 베이스 좌표 {3}에 대해 다리가 디디는 지면의 좌표 {4}의 포즈를 나타내면

$${}^3\chi_4 = {}^L\mathcal{N}({}^L\theta) \quad (9)$$

이다. 여기서 ${}^L\mathcal{N}$ 는 평면과 반경구속에 의해 포즈를 찾는 함수이다. LLM 이 스윙 할 때 ${}^3z_4=-1080$ 에서 ${}^3x_4=-225\sim 280$, ${}^3y_4=-180\sim 300$ 의 최대 보폭을 갖는다. 위치공간은 평면 Π_i 에 제한을 받으나 다리가 지면을 딛고 베이스를 이동시킬 때 평면의 방향을 조절할 수 있다. 단계 1~3 에서 보행공간은 각 포즈의 변화량을 더한 값이 된다.

4 단계: $t=(t_3\sim t_4)$ 동안 LLM 의 다리가 진행방향으로 뻗은 상태에서 하부베이스를 들어 올려 앞으로 이동시키면 하부베이스 위에 설치된 IM 과 ULM 도 같이 이동한다. 1 단계와 같이 지면과 LLM 의 3-다리 및 하부베이스가 병렬기구를 이뤄 {4}에 대한 {3}의 포즈 ${}^4\chi_3$ 가 생성된다. LLM 의 크기가 ULM 의 50%로 (${}^4x_3, {}^4y_3, {}^4z_3$)의 범위도 (${}^1x_2, {}^1y_2, {}^1z_2$)의 50%이다. 보행공간과 능수능란성은 ULM 과 동일한 경향을 가진다. 다만 로봇의 무게중심이 LLM 보다 상부에 있어 ULM 보다 안정성이 떨어지므로 속도와 높이를 낮춰야 한다.

5 단계: $t=(t_4\sim t_5)$ 동안 하부베이스 위에 설치된 IM 이 상부베이스를 진행방향으로 옮긴다. 2 단계와 반대로 IM 의 실린더 길이를 조절해 하부베이스에 대한 상부베이스의 포즈, ${}^3\chi_2$ 를 생성한다. 자세를

고정시키고, 진행방향에 따라 위치만 변화시키면 2 단계와 같은 보행공간을 갖는다.

6 단계: $t=(t_5\sim t_6)$ 동안 ULM 의 다리는 지면에서 들어 올려 진행방향으로 뻗는다. 3 단계와 같이 ULM 의 스윙 포즈 ${}^2\chi_1$ 는 평면 Π_g 와 Π_i 및 반경 $U_{r_F}=890$ 의 구속에 의해 결정된다. ULM 의 크기가 LLM 보다 50%만큼 크므로 스윙공간도 50%로 증가한다.

로봇이 x-y 평면을 걸을 때 단계 1~3 은 ULM 이 지면을 지지하고 LLM 의 다리를 이동한 경우로 기준좌표 {0}에 대한 {4}의 포즈는

$${}^0\chi_4 = {}^0\chi_1 + {}^1\chi_2 + {}^2\chi_3 + {}^3\chi_4 \quad (10)$$

이고, 단계 4~6 은 LLM 이 지면을 지지하고 ULM

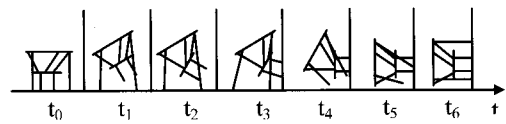


Fig. 10 Walking cycle for climbing up to a wall

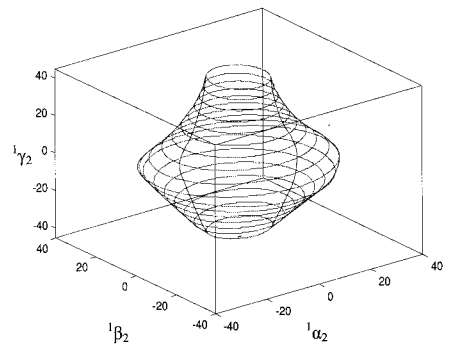


Fig. 11 Orientational walking space generated by ULM

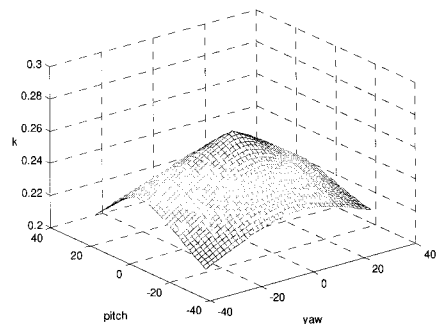


Fig. 12 Condition number(k) in orientational workspace

의 다리를 이동한 경우로 좌표 {0}에 대한 {1}의 포즈는

$${}^0\chi_1 = {}^0\chi_4 + {}^4\chi_3 + {}^3\chi_2 + {}^2\chi_1 \quad (11)$$

이다. 보폭 χ_s 은 ${}^0\chi_4$ 와 ${}^0\chi_1$ 의 변화량을 더한 것으로

$$\chi_s = \Delta^0\chi_4 + \Delta^0\chi_1 \quad (12)$$

이며 $\Delta^0\chi_4$ 와 $\Delta^0\chi_1$ 는 3-기구에 의해 독립적으로 생성되며 한 주기 동안 최대 2051mm의 보폭을 갖게 된다.

4.2 벽면을 타고 오를 때

지면으로부터 벽면 Π_{ω} 을 타고 오르는 걸음새는 Fig. 10과 같이 6단계로 나눌 수 있다.

1 단계: $t=(t_0-t_1)$ 동안 ULM의 다리가 지면을 딛고, 상부베이스를 들어 회전시키면 상부베이스에 연결된 IM과 LLM도 따라 회전한다. LLM의 다리가 지면이나 벽면에 닿지 않도록 위치를 변화시키면서 자세를 생성한다. ${}^1x_2 = {}^1y_2 = 0$, ${}^1z_2 = 1080$ 일 때 액추에이터의 작동범위 내에서 $({}^1\alpha_2, {}^1\beta_2, {}^1\gamma_2)$ 의 범위를 구하면 Fig. 11과 같다. 각 축 방향으로 ${}^1\alpha_2 = -32.6^\circ \sim 32.6^\circ$, ${}^1\beta_2 = -30.5^\circ \sim 30.5^\circ$, ${}^1\gamma_2 = -42^\circ \sim 42^\circ$ 의 각도를 생성할 수 있다. 이때 능수능란성은 Fig. 12와 같이 모든 공간 내에서 0.209 이상이며 특이점은 존재하지 않는다.

2 단계: $t=(t_1-t_2)$ 동안 상부베이스 밑에 설치된 IM이 하부베이스를 벽면방향으로 회전시킨다. 위치가 ${}^2x_3 = {}^2y_3 = 0$, ${}^2z_3 = 512$ 일 때 각 축 방향의 자세공간은 ${}^2\alpha_3 = -36^\circ \sim 36^\circ$, ${}^2\beta_3 = -36^\circ \sim 36^\circ$, ${}^2\gamma_3 = -42^\circ \sim 42^\circ$ 이다.

3 단계: $t=(t_2-t_3)$ 동안 LLM의 ${}^iF_i(i=1,2,3)$ 가 이루는 평면이 벽면과 일치해야 LLM의 발바닥을 벽면에 붙일 수 있다. 식 (9)로부터 LLM의 다리가 지면과 벽면에 부딪치지 않으면서 벽면에 접근하도록 위치를 변화시키면서 $({}^3\alpha_4, {}^3\beta_4, {}^3\gamma_4)$ 를 생성한다.

다리가 2 자유도로 스윙하므로 발바닥 평면이 생성하는 자세도 2 차원 공간을 이룬다. 좌표 {3}의 x-축과 y-축 방향으로 발바닥 평면을 회전시킬 때 ${}^3z_4 = -1080$ 에서 ${}^3\alpha_4 = -47^\circ \sim 47^\circ$, ${}^3\beta_4 = -52^\circ \sim 52^\circ$ 의 공간을 생성한다. z-축 방향의 회전은 불가능하므로 필요에 따라 다리가 지면을 디뎠을 때 원하는 각

도로 베이스를 들어놓는다. 단계 1~3에서 LLM의 다리가 디디는 평면이 Π_g 에서 Π_{ω} 으로 변하므로 $\Delta^1\beta_2 + \Delta^2\beta_3 + \Delta^3\beta_4 = 90^\circ$ 이어야 한다. 이러한 각도는 각 기구의 자세공간으로부터 충분히 확보됨을 알 수 있다. 나머지 단계는 ULM의 다리를 평면 Π_g 에서 평면 Π_{ω} 로 끌어오는 과정으로 위 단계와 동일한 방법으로 이뤄진다.

4 단계: $t=(t_3-t_4)$ 동안 LLM이 하부베이스를 회전시켜 ${}^4\alpha_3$, ${}^4\beta_3$, ${}^4\gamma_3$ 를 생성한다.

5 단계: $t=(t_4-t_5)$ 동안에는 IM이 하부베이스에 대한 상부베이스를 회전시켜 ${}^3\alpha_2$, ${}^3\beta_2$, ${}^3\gamma_2$ 를 생성한다.

6 단계: $t=(t_5-t_6)$ 동안 평면 Π_i 의 구속으로 ULM이 스윙을 하여 ${}^2\alpha_1$ 와 ${}^2\beta_1$ 을 생성한다. 단계 4~6 동안에 각 기구가 생성하는 회전공간은 단계 1~3 동안에 생성된 공간과 동일하다. ULM의 발바닥이 지면으로부터 벽면에 붙기 위해서는 $\Delta^4\beta_3 + \Delta^3\beta_2 + \Delta^2\beta_1 = 90^\circ$ 가 되어야 하며 각 기구의 자세공간으로부터 충분히 가능하다.

위에서는 중량 및 동특성을 고려하지 않은 보행공간만 검토했다. 향후 동적인 상태에서 무게중심 이동과 이에 따른 걸음새 및 안정성 등은 더 연구되어야 한다. 벽면을 타고 오를 때 무게중심이 바닥면에서 벽면으로 이동해야 하고, 세 발바닥 안에 있어야 한다. 기존 연구는 바닥면에서만 무게중심과 안정성을 분석했다.¹¹ 바닥면은 로봇을 중력방향으로 지지하므로 발바닥을 끌어당기는 흡착력이 필요 없다. 발바닥에 흡착패드와 마그넷을 부착하고 중력방향에 수직인 벽면을 오를 때 안정성 및 무게중심에 대한 연구는 미비한 실정이다. 향후 로봇이 바닥면에서 벽면으로 타고 오를 수 있도록 동적, 정적 안정성에 대한 연구가 심도 있게 이뤄져야 한다.

5. 결론

병렬기구를 적용해 적은 자유도로 전방위 보행이 가능하고 벽면을 타고 오를 수 있는 로봇을 설계했다. 이를 위해 3개의 다리로 구성된 6 자유도의 다리기구를 제안했다. 베이스, 3개의 다리, 지면이 병렬기구를 이뤄 다리의 길이와 각도 조절로 임의의 위치/자세를 생성한다. 능수능란성, 보행공간을 극대화할 수 있는 최적화 작업을 실시했다. 각 목표값의 차원을 통일하기 위해 다리 길이로 표준화하고, 각 목표값에 가중치를 두어 기구학적 설

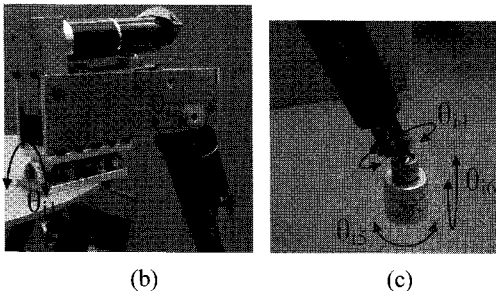
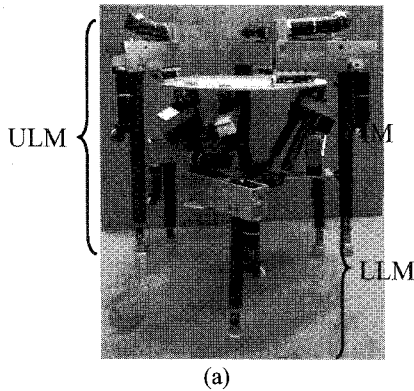


Fig. 13 (a)TPWR composed of ULM, IM and LLM (b)Revolute joints for θ_{11} and θ_{12} (c)Cylinder for θ_{13} , ball-socket joint for θ_{14} , θ_{15} and θ_{16} and foot

계치수를 찾았다.

다리기구를 2 단으로 쌓고 그 사이에 스텔워트 플랫폼을 삽입한 3 단의 병렬기구 보행로봇을 설계했다. 평면을 걸을 때와 벽면을 타고 오르는 주기 동안 걸음새를 분석했다. 3-다리가 지면을 디디고 있을 때 보행공간과 능수능란성을 분석하였으며 3-기구의 조합으로 이동거리가 크고, 바닥에서 벽면으로 로봇이 오를 수 있음을 입증했다. 실제 TPWR 을 Fig. 13(a)와 같이 제작하였다. 다리가 스윙 할 때 피동조인트 θ_{11} 을 구속하기 위해 Fig. 13(b)와 같이 스프링을 이용해 홈 위치에 고정되도록 하였다. 또, Fig. 13(c)와 같이 볼-소켓 조인트에 전자석을 장착하여 철판에 발을 부착시킬 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 중량 및 동특성을 고려하지 않은 보행공간만 검토했으나 향후 동적인 상태에서 무게 중심 이동과 이에 따른 걸음새 및 안정성 등은 더 연구되어야 한다. 특히, 벽면을 타고 오를 때 발바닥의 부착력과 안정성은 연구되어야 할 과제이다.

후 기

이 논문은 2008~2009 년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y. and Takenaka, T., "The development of honda humanoid robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1321-1326, 1998.
- Zheng, Y. F. and Shen, J., "Gait synthesis for the SD-2 biped robot to climb sloping surface," IEEE Trans. Robotics Automation, Vol. 6, No. 1, pp. 86-96, 1990.
- Abderrahim, M., Balaguer, C., Gimenez, A., Pastor, J. M. and Padron, V. M., "Roma. A climbing robot for inspection operation," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2303-2308, 1999.
- Ryu, S. W., Park, J. J., Ryew, S. M. and Choi, H. R., "Self contained wall-climbing robot with closed link mechanism," Proc. Int. Conf. Intelligent Robots Systems, Vol. 2, pp. 839-843, 1996.
- Saltaren, R., Aracil, R., Reinoso, O. and Scarano, M. A., "Climbing Parallel Robot: A Computational and Experimental Study of its Performance Around Structural Nodes," IEEE Trans. on Robotics, Vol. 21, No. 6, pp. 1056-1066, 2005.
- Reg Dunlop, G., "Foot Design for a Large Walking Delta Robot," Experimental Robotics VIII, Vol. 5, pp. 602-611, 2003.
- Ota, Y., Yoneda, K., Ito, F., Hirose, S. and Inagaki, Y., "Design and Control of 6-DOF Mechanism for Twin-Frame Mobile Robot," Autonomous Robots, Vol. 10, No. 3, pp. 297-316, 2001.
- Fox, R. L. and Gupta, K. C., "Optimization technology as applied to mechanism design," J. Eng. Industry, Vol. 95, No. 2, pp. 657-663, 1973.
- Lee, M. K., Choi, B. O., Lee, S. H. and Park, K. W., "Workspace Analysis of a Double Parallel Manipulator," Trans. of the KSME(A), Vol. 22, No. 12, pp. 2247-2255, 1998.
- Stoughton, R. S. and Arai, T., "A Modified Stewart Platform Manipulator with Improved Dexterity," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 2, pp. 166-173, 1993.

11. Huang, Q., Yokoi, K., Kajita, S., Kaneko, K., Arai, H., Koyachi, N. and Tanie, K., "Planning Walking Patterns for a Biped Robot," IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 3, pp. 280-289, 2001.