

계단 등반을 위한 신개념 로봇 플랫폼의 기구변수 최적화

Kinematic Optimal Design on a New Robotic Platform for Stair Climbing

서병훈¹, 홍승열¹, 이재원¹, 서태원^{1,✉}
Byunghun Seo¹, Sung Yull Hong¹, Jeh Won Lee¹, and TaeWon Seo^{1,✉}

¹ 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)
✉ Corresponding author: taewon_seo@yu.ac.kr, Tel: +82-53-810-2442

Manuscript received: 2012.8.23 / Revised: 2012.12.5 / Accepted: 2013.1.21

Stair climbing is one of critical issues for field robots to widen applicable areas. This paper presents optimal design on kinematic parameters of a new robotic platform for stair climbing. The robotic platform climbs various stairs by body-flip locomotion with caterpillar type main platform. Kinematic parameters such as platform length, platform height, and caterpillar rotation speed are optimized to maximize stair-climbing stability. Three types of stairs are used to simulate typical user conditions. The optimal design process is conducted based on Taguchi methodology, and resulting parameters with optimized objective function are presented. In near future, a prototype is assembled for real environment testing.

Key Words: Stair Climbing Robot (계단등반로봇), Optimal Design (최적설계), Taguchi Methodology (다구찌 방법론), Caterpillar (캐터필러), Kinematic Parameters (기구학 변수)

1. 서론

최근 다양한 필드 로봇들이 건설, 험지 탐험, 선박 용접 등의 목적으로 개발되고 있다.¹⁻³ 이러한 필드 로봇들은 사람이 직접 가서 작업하기가 불가능하거나 어려운 작업 들을 하는 것을 목적으로 한다. 기존 산업용 로봇이 사람의 반복적인 작업을 대신하는 것에 집중되었다면, 이러한 필드로봇의 개발로 사람이 할 수 없는 다양한 작업이 가능할 것으로 예상된다.

다양한 필드로봇 플랫폼들이 제시되어왔으나, 아직 다양한 장애물이 존재하는 사용조건에서는 부족한 점이 많은 실정이다. 최근에 개발된 소방방재로봇은 그 장애물 극복능력이 현저히 떨어져 다양한 화재 현장에 투입이 불가능할 것으로 판단된다.⁴ 중공업 현장 투입을 위해 개발된 등반로봇도 아직 다양한 장애물을 극복하지 못하여 평평한

작업 조건에서만 용접, 도장 등을 수행하고 있다.⁵ 최근 일본 후쿠시마 원자력발전소에 투입되었던 로봇들도 장애물 극복 능력에 한계가 있어 원자력 누출 부위 검사 미션을 완전히 수행하지 못하였던 사례도 있다.⁶

필드로봇을 실제 현장에 투입하기 위해서는 계단을 등반하는 능력이 필수적이다. 바위, 나무 등 다양한 자연 조건을 극복하는 것도 중요하지만, 가장 극복하기 어려운 인공 구조물 중 하나인 계단을 등반하지 못한다면 필드로봇 적용범위에 큰 한계가 생긴다. Kim et al.^{7,8}은 NASA의 라커보기 구조를 이용하여 계단 등반 최적화를 수행하였다. iRobot사의 Packbot⁹도 캐터필러(caterpillar) 형식을 이용하여 계단 등반을 수행하였는데, 이도 좋은 연구 예라 할 수 있다. 하지만, 현재까지도 다양한 계단을 안정되게 등반하는 것에는 많은 연구가 필요한 상황이다.

본 연구에서는 캐터필러 형식의 기본 구조를 바탕으로 body-flip locomotion 을 이용하여 계단을 등반하는 신개념 등반로봇의 최적설계를 다룬다. 위의 body-flip locomotion 을 이용하여 계단을 안정되게 등반하기 위하여 기구학 변수들이 최적화된다. 총 3 종류의 계단을 사용조건으로 다구찌 방법론 (Taguchi methodology)¹⁰ 에 의거하여 최적화가 수행된다. 목적함수로는 무게중심의 궤적과 직선경로와의 차이를 정의하여 안정된 등반이 가능하도록 설계한다.

본 연구와 유사한 캐터필러 형식의 다양한 로봇들이 발표되고 있다. 앞서 설명한 Packbot⁹ 은 상용화 된 로봇의 대표적인 예이다. Li et al.¹¹ 은 Amoeba 라는 두 개의 트랙과 하나의 링크로 구성된 로봇을 발표하였다. 이 로봇은 Packbot 과 비교하여 트랙과 계단의 slip 을 줄일 수 있는 장점이 있다. Kim et al.¹² 은 두 개의 body 와 하나의 track 으로 구성된 로봇을 제안하였고, 이 로봇은 track 의 형상 자체를 비대칭형상으로 변형하여 계단을 등반하는 능력을 보인다. 이 로봇은 다양한 형상의 계단에 적응할 수 있는 능력을 보인다. 위에 제시된 기존 로봇들은 계단과 트랙의 마찰력을 이용하여 등반을 하는 특성을 보이는데, 본 논문에서 제시한 로봇은 로봇 body 의 회전을 통하여 계단을 등반한다는 차이점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 로봇 메커니즘에 대한 설명이 소개된다. 3 장에서는 최적화 문제 정의를 통해 목적함수, 설계변수, 사용조건 등이 정의된다. 4 장에서는 다구찌 방법론을 근거로 기구학 시뮬레이션을 통하여 최적화가 수행된다. 5 장에서는 초기값과 최적화 결과를 비교 분석하여 결과를 제시한다. 6 장에서는 본 논문의 결론이 제시된다.

2. 신개념 로봇 메커니즘

2.1 로봇 설계안

본 논문에서 제시되는 로봇 플랫폼은 body-flip locomotion 을 이용하여 계단을 빠르게 등반하는 것을 목적으로 한다. Fig. 1 에 본 로봇 플랫폼의 3 차원 상세설계 모델링이 도시되어 있다. 로봇은 캐터필러 형식의 메인 플랫폼 (main platform)과 끝 단의 꼬리바퀴, 그리고 그 둘을 연결해 주는 링크로 구성되어 있다. 평지에서 로봇은 캐터필러를 이용하여 전후방 이동이 가능하며, skid steering

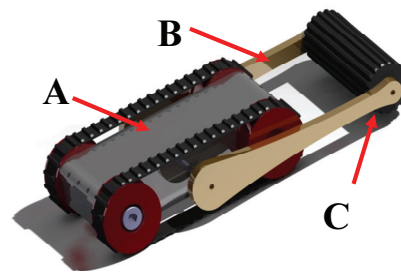


Fig. 1 Mechanism configuration of the robotic platform for stair climbing. A: Main platform using caterpillar mechanism, B: Connecting link to the rear wheel, C: Rear wheel for high-obstacle overcoming

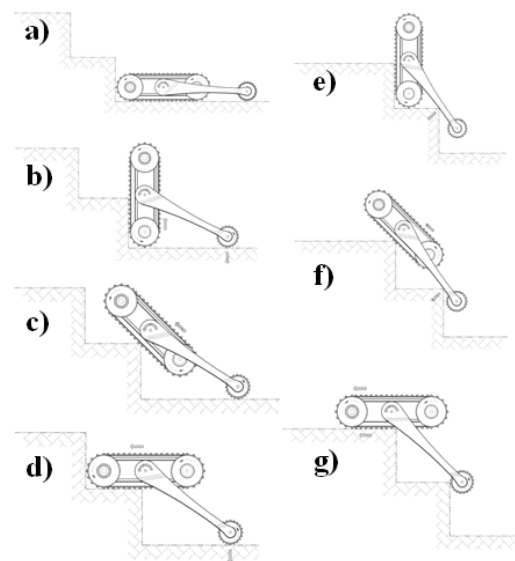


Fig. 2 Body-flip locomotion scenario to climb stairs¹³

을 통하여 조향이 가능하다. 계단 등반은 링크를 지렛대로 하여 메인 플랫폼을 회전하는 body-flip locomotion 을 통하여 이루어지는데 이 부분은 다음 절에서 자세히 설명하겠다.

2.2 로봇의 계단등반 시나리오

앞 절에서 간략히 설명한 바와 같이 로봇은 링크를 지렛대로 하여 메인 플랫폼을 회전하는 body-flip locomotion 을 통하여 계단을 등반한다. Fig. 2 에 그 시나리오가 도시되어 있다. 이러한 locomotion 을 통하여 로봇은 계단을 빠른 속도로 등반할 수 있다. 캐터필러의 회전속도를 조절하면 계단 등반시에 계단에 대한 메인 플랫폼의 상대적인 위치를

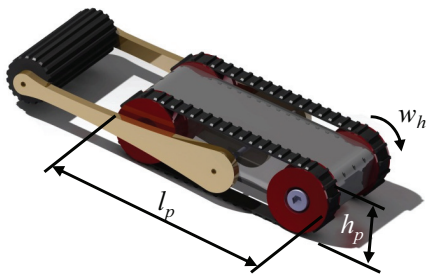


Fig. 3 Design parameters of the robotic platform. A: Length of the main platform. B: Height of the main platform, C: Angular velocity of the track

제어할 수 있으며 다양한 높이의 계단 또한 등반이 가능할 것이라 예상된다. 현재 한국 특허가 출원 중이다.¹² 이러한 locomotion 을 가정하고, 다양한 설계 변수를 최적화하여 안정된 계단 등반을 실현하는 것이 이 논문의 목적이다.

3. 문제 정의

3.1 최적화 설계변수

본 연구의 목적은 앞 장에서 설명된 신개념 계단 등반 로봇의 기구변수를 안정된 등반을 위해 최적화하는 것이다. 메인 플랫폼의 길이 (l_p), 메인 플랫폼의 높이 (h_p), 캐터필러의 회전속도 (ω_h)의 총 3 개의 설계변수를 정의하였다. 정의된 설계변수가 Fig. 3 에 도시되어 있다. 로봇의 pivoting point 는 symmetric 한 locomotion 의 구현을 위하여 메인 플랫폼의 중심으로 고정하였다. 연결링크는 주행 중 지렛대 역학을 하는데 이의 길이는 기구학적인 회전 문제에는 영향이 없어 해석에서 제외하였다. 연결링크의 길이는 추후 큰 장애물을 넘는 동작을 할 때 중요한 변수로 작용할 것이라 예상된다.

계단 등반 시에, Fig. 2 에 도시된 바와 같이, 연결링크는 지지점이 변화하게 된다. 연결링크의 지지점이 몸체의 평면 기준으로 회전 중심의 뒤쪽에 존재하게 되면 앞으로 구르는 토크가 발생하는데 이 조건이 연결링크 길이를 결정하는 중요한 제한 조건이 될 것이다.

캐터필러의 회전속도는 실제로 동적조건(시간에 따른 목표궤적, 로봇 무게, actuator 의 토크 등)이 고려되어야만 하는 제어변수에 가깝다. 본 논문에서는 이 회전속도가 정적 평형 상태에서 일정한 속도로 제어할 수 있다는 가정을 통해 연구를 진행하였다.

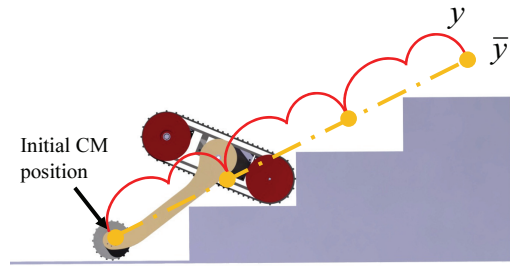


Fig. 4 Geometric meaning of the objective function

제시된 3 개의 설계변수는 두 종류로 구분할 수 있다. 길이와 높이에 대한 변수 l_p, h_p 는 기구학적 설계변수로 상세설계 시에 결정 되어지는 값이고, 회전 속도에 관한 변수 ω_h 는 실시간으로 제어가 가능한 값이다. 즉, l_p, h_p 는 다양한 조건에 대한 건실(robust)한 값을 찾아야 되며, ω_h 는 조건에 대하여 변수값을 도출하면 된다.

3.2 목적함수

안정된 등반을 위한 목적함수를 정의하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 식 (1)과 같은 목적함수를 이용하여 최적화를 수행한다.

$$J_i = \int |y - \bar{y}| dx \tag{1}$$

여기서 y 는 질량 중심(center of mass)의 높이를 나타내며 \bar{y} 는 로봇의 초기조건과 최종조건의 y 값을 직선으로 연결한 값을 의미한다. 위의 식에 제시된 목적함수의 기하학적 의미가 Fig. 4 에 도시되어 있으며 실선이 y 를 나타내고, 일점쇄선이 \bar{y} 를 나타낸다. 질량 중심은 로봇의 대칭성을 고려하여 메인 플랫폼의 중심으로 가정하였다. 이 목적함수는 질량 중심의 궤적과 직선경로의 차이의 누적값을 정의한 것으로, 이 값이 작을수록 안정된 등반을 할 수 있다. 이는 기존 Kim et al.⁶의 연구에서도 검증된 목적함수이다.

3.3 제한조건 (사용조건)

건축법에 의거해 다양한 크기의 계단이 건물에 존재한다.¹⁴ 로봇의 다양한 응용을 위하여 이런 다양한 크기의 계단을 안정되게 등반하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 Table 1 과 Fig. 5 에 제시된 3 종류의 계단 크기를 사용조건으로 정의하였다. 제시된 3 종류의 계단에 대해 식 (1)의 목적함수를

Table 1 User condition of stairs

Parameters	Values		
	Stair 1	Stair 2	Stair 3
Width (mm)	300	310	240
Height (mm)	100	160	200
Slope (degree)	18.4	27.3	39.8

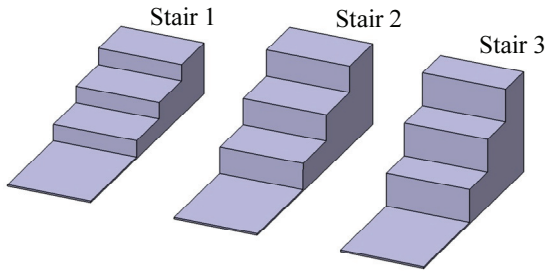


Fig. 5 Three stairs of user condition

최소화하는 설계변수를 찾는 것이 본 논문의 목적이라 할 수 있다.

4. 최적 설계 수행 및 결과

4.1 다구찌 방법론

다구찌 방법론은 다양한 사용조건이 존재할 때에 건설한 설계변수를 실험 또는 시뮬레이션을 통하여 도출하는 방법이다.¹¹ 목적함수가 산술적인 계산이 어렵거나, 다양한 사용조건이 존재할 때, 또한 실험을 통하여만 목적함수 도출이 가능할 때 효과적이다. 다구찌 방법론의 과정은 다음과 같이 요약된다.

- 최적화 문제의 정의: 설계변수, 목적함수, 사용조건 등
- 수직행렬(orthogonal array)과 선형 그래프(linear graph)를 이용한 실험 설계
- 신호잡음비(Signal to noise (SN) ratio)를 이용한 민감도 분석
- 최적값이 도출될 때까지 b, c 의 반복 수행

위와 같은 과정을 통하여 다양한 사용조건에서 안정된 성능을 보이는 건설한 설계변수들을 도출할 수 있다.

4.2 최적설계 중간결과

최적화를 수행하기 위하여 수직행렬을 선정하여야 한다. 총 3 개의 설계변수를 최적화 하기 때문에 $L_9(3^4)$ 를 사용한다.¹¹ 3 개의 설계변수 중 ω_h 는 조건에 따른 변수로 볼 수 있기 때문에 다음과 같은 과정으로 최적값을 도출한다.

- ω_h 는 각각의 계단에 대해 연속적인 등반이 가능하도록 선정 한다. 즉, 반복적인 계단 등반 중 초기조건이 유지되도록 ω_h 를 선정 한다.
- 3 개의 계단에 대하여 나머지 2 개의 설계변수의 건설 최적값을 다구찌 방법론을 통하여 도출한다.

위와 같은 과정을 통해 최적화를 수행한다.

$L_9(3^4)$ 수직행렬에 의거한 실험계획 및 결과가 Table 2 에 도시되어 있다. 초기값은 설계가능성을 고려하여 $l_p = 340$ mm 와 $h_p = 120$ mm 로 선정하였다. 레벨의 차이는 초기값을 고려하여 $l_p = 30$ mm 와 $h_p = 20$ mm 로 정하였다. 기구학적인 계산 결과값은 상용 Computer Aided Design (CAD) 프로그램인 AutoCAD (Autodesk, <http://www.autodesk.com>)을 이용하여 수행하였다. Fig. 6 에 AutoCAD 를 이용한 시뮬레이션 예가 도시되어 있다. ω_h 를 조절하여 연속적인 계단 등반이 가능하게 하였음을 알 수 있다. ω_h 는 계단을 하나 올라 서는데 1 초가 걸리는 것을 기준으로 계산하였으며, 이 결과값은 Table 2 에 도시되어 있다.

최종 시뮬레이션 결과는 식 (2)에 도시된 망소(smaller-the-better) 신호잡음비로 분석된다. 시뮬레이션 결과와 신호잡음비 계산 결과가 Table 2 의 오른쪽에 도시되어 있다.

$$SN = -10 \log \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 J_i^2 \quad (2)$$

망소 신호잡음비를 이용한 민감도 분석 결과가 Fig. 7 에 도시되어 있다. 그래프에 도시된 내용은 Table 2 에 도시된 신호잡음비를 바탕으로 각 변수의 민감도를 분석한 결과이며, 이 신호잡음비가 최대인 경우가 최적값이 된다. 결과적으로 2 개의 설계변수 모두 3 번의 레벨의 경우가 최적값으로 도출되었으며 민감도는 유사하게 분석되었다. 길이의 경우 초기값이 최저값을 보였으며, 높이의

Table 2 Simulation plan and results of 1st stage optimization based on $L_9(3^4)$ orthogonal array

Simulation number	Design parameters					Noise Factors			SN ratio (dB)
	Value (level)					Stair 1	Stair 2	Stair 3	
	l_p (mm)	h_p (mm)	ω_h (rad/s)			J_i			
Stair 1			Stair 2	Stair 3					
1	310 (1)	100 (1)	7.87	4.76	3.71	23022.2	22064.5	11530.6	-85.84
2	310 (1)	120 (2)	8.41	5.56	3.71	22890.3	21043.5	11796.4	-85.67
3	310 (1)	140 (3)	8.96	6.46	3.71	22677.8	19709.7	12649.2	-85.49
4	340 (2)	100 (1)	5.83	3.06	2.86	22612.5	23337.5	11121.8	-85.95
5	340 (2)	120 (2)	6.73	3.98	2.86	22752.2	22486.1	11582.5	-85.86
6	340 (2)	140 (3)	7.49	4.84	2.86	22580.2	21329.6	11196.9	-85.60
7	370 (3)	100 (1)	4.00	1.00	2.00	21905.1	23080.5	11180.5	-85.79
8	370 (3)	120 (2)	4.00	1.00	2.00	21225.5	21778.9	10985.3	-85.42
9	370 (3)	140 (3)	4.00	1.00	2.00	20747.8	20693.6	10899.0	-85.13

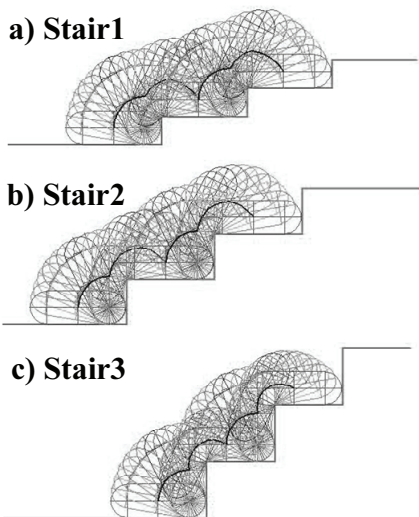


Fig. 6 Photo of simulation by using AutoCAD. a) Stair 1, b) Stair 2, and c) Stair 3 when $l_p = 340$ mm and $h_p = 120$ mm

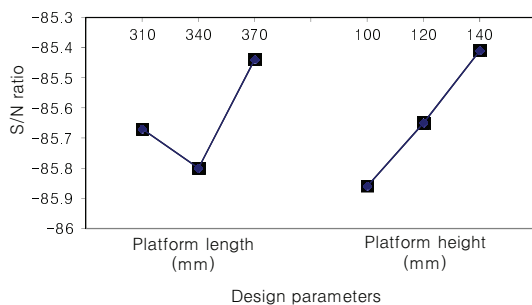


Fig. 7 Sensitivity analysis of the 1st stage

경우 증가할 수록 신호잡음비도 상승하는 경향을 보였다. 1 차 최적설계에서 결정된 중간 최적값을 바탕으로 추가 최적화가 설계, 수행된다.

4.3 최적설계 최종결과

앞 절에서 도출된 최적 설계변수를 기준으로 2 차 최적설계를 수행하였다. 그 결과가 Table 3 과 Fig. 8 에 도시되어 있다. Fig. 8 에 도시된 바와 같이 두 단계의 최적화를 통해 더욱 증가된 신호잡음비를 가지는 최적 설계변수를 도출하였다. 민감도 분석의 결과 최적값에 수렴하는 결과를 보이기 때문에 두 단계의 실험으로 최적화를 마무리하였다.

4.2 절 초반에 언급된 바와 같이, ω_h 는 각각 계단의 형상에 따라 제어 가능한 값이다. 따라서 각각의 레벨 및 계단형상에 대해 ω_h 값을 조정하여 같은 초기조건에서 반복되는 계단 등반이 가능하도록 선정하였다. 선정된 ω_h 값은 Table 3 의 중앙 컬럼에 도시되어 있다.

5. 최적 설계 결과 분석

설계 초기값과 최종 설계변수값을 Table 4 에 정리하였다. 결과적으로 두 번의 수직행렬을 이용한 시뮬레이션과 ω_h 조정을 통해 0.89 dB (22.7 %) 의 성능향상을 확인할 수 있었다. Fig. 9 에 초기값과 최적값의 세 종류의 계단에 대한 등반 시뮬레이션 결과를 도시하였으며, 각각의 설계 변수에 대한 궤적 오차의 차이를 확인할 수 있다. 결과적으로 다양한 계단 조건에서 무게중심의 변동이

Table 3 Simulation plan and results of 2nd stage optimization based on $L_9(3^4)$ orthogonal array

Simulation number	Design parameters					Noise Factors			SN ratio (dB)
	Value (level)					Stair 1	Stair 2	Stair 3	
	l_p (mm)	h_p (mm)	ω_h (rad/s)			J_i			
		Stair 1	Stair 2	Stair 3					
1	355 (1)	140 (1)	4.57	3.77	2.43	22474.8	21766.6	11122.2	-85.653
2	355 (1)	150 (2)	4.67	3.77	2.27	22427.9	21107.9	10965.3	-85.518
3	355 (1)	160 (3)	2.88	1.13	2.13	21273.2	19085.7	11199.6	-84.970
4	370 (2)	140 (1)	2.86	0.86	2.00	21524.0	21537.0	10788.6	-85.414
5	370 (2)	150 (2)	2.67	2.13	1.87	20412.5	21004.1	10750.6	-85.112
6	370 (2)	160 (3)	3.79	3.29	1.75	23220.3	22161.8	10760.5	-85.821
7	385 (3)	140 (1)	2.43	0.43	1.57	27908.1	22084.3	10648.6	-86.627
8	385 (3)	150 (2)	2.27	0.40	1.47	21179.2	21493.2	10563.6	-85.324
9	385 (3)	160 (3)	2.13	0.38	1.38	20911.8	20922.6	10479.2	-85.163

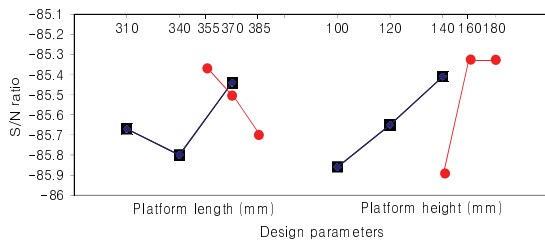


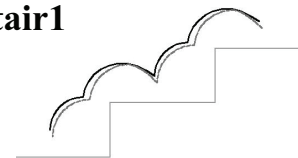
Fig. 8 Sensitivity analysis of the 1st and 2nd stages: blue: 1st stage, red: 2nd stage

Table 4 Initial design parameters and optimal design parameters

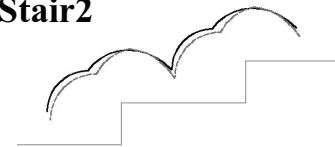
Parameters (units)	Values	
	Initial	Optimal
l_p (mm)	340	355
h_p (mm)	120	160
Stair 1	6.73	2.88
ω_h (rad/s) Stair 2	3.98	1.33
Stair 3	2.86	2.13
SN ratio (dB)	-85.86	-84.97

적은 설계변수를 도출하였으며, 이 설계변수는 계단 등반 안정성이 최적화된 기구학 변수라 볼 수 있다. Table 4 에 도시된 바와 같이 ω_h 는 계단의 형상에 따른 변수로 제어를 해야 한다.

a) Stair1



b) Stair2



c) Stair3

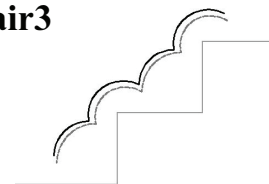


Fig. 9 Comparison between initial and optimized design parameters for climbing stairs. Solid bold line denotes the optimized path and dashed gray line denotes the initial path

6. 결론

본 연구에서는 계단 등반을 위한 새로운 개념의 body-flip locomotion 을 하는 로봇 플랫폼에 대한 기구학적 변수의 최적화를 수행하였다. 다구찌 방법론을 기반으로 2 개의 기하학적 길이 변수와 1 개의 각속도 변수를 최적화 하였다. 3 종류의 계단형상을 로봇 사용 조건으로 선정하였으며, 그

사용 조건을 기반으로 기구학 시뮬레이션을 통해 견실 최적값을 도출하였다. 결과적으로 질량 중심의 요동을 최소화하여 총 0.89 dB (22.7 %)의 성능을 향상시켰다. 각속도 변수는 다양한 사용조건에 따라 변수로 처리하여 계산하였다.

본 논문의 계속 연구로서 최적설계 변수를 이용한 로봇 플랫폼 제작이 진행 중이다. 실제 로봇 시제품(prototype)을 제작, 실험 함으로서 본 연구의 신뢰성을 높일 수 있다. 센서를 이용한 자율주행 제어(autonomous control)과 소요 에너지를 줄이는 최적 제어(optimal control)가 새로운 로봇 플랫폼에 대하여 연구될 예정이며, 최종 로봇 플랫폼은 소방 방재, 방산능 누출 탐지, 가정용 서비스 작업 등의 기본 로봇 플랫폼으로 사용될 예정이다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력기술개발사업, No. 2012043785).

참고문헌

1. Lee, J. I., Lee, S. Y., Yu, S. J., Lee, S. H., and Han, C. S., "Intuitive OCU (Operator Control Unit) of Field Robot for Installing Construction Materials," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 83-84, 2007.
2. Seo, T. and Sitti, M., "Tank-Like Module-Based Climbing Robot Using Passive Compliant Joints," IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 18, No. 1, pp. 397-408, 2013.
3. Lee, D., Seo, T., and Kim, J., "Optimal Design and Workspace Analysis of a Mobile Welding Robot with 3P3R Serial Manipulator," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 59, No. 10, pp. 813-826, 2011.
4. KBS News, <http://news.kbs.co.kr/tvnews/news9/2011/12/29/2411945.html>
5. Lee, G., Seo, K., Kim, H., Kim, S. H., Jeon, D. S., Kim, H. S., and Kim, J., "Design of a Transformable Track Mechanism for Wall Climbing Robots," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 2, pp. 178-184, 2012.
6. IEEE Int'l Conf. on Rob. and Auto., <http://www.icra2011.org/show.asp?id=12>
7. Kim, D., Hong, H., Kim, H. S., and Kim, J., "Optimal Design and Kinetic Analysis of a Stair-Climbing Mobile Robot with Rocker-Bogie Mechanism," Mechanism and Machine Theory, Vol. 50, pp. 90-108, 2012.
8. Hong, H., Kim, D., Lee, S., Kim, J., Kim, H. S., and Seo, T., "Development of a Rocker-Bogie Robot for Climbing Stairs," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 895-896, 2011.
9. iRobot, <http://www.irobot.com/>
10. Kim, J., "Engineering Design: Creative New Product Development," Moonundang, 2008.
11. Li, N., Ma, S., Li, B., Wang, M., and Wang, Y., "An Online Stair-Climbing Control Method for a Transformable Tracked Robot," IEEE Int'l Conf. on Rob. and Auto., pp. 923-929, 2012.
12. Kim, J., Lee, C., and Kim, G., "Study of Machine Design for a Transformable Shape Single-Tracked Vehicle System," Mechanism and Machine Theory, Vol. 45, pp. 1082-1095, 2010.
13. Seo, T. and Seo, B., "Robots for stairs climbing," KR Patent, No. 10-2012-0043572, 2012.
14. The National Assembly of the Republic of Korea, http://likms.assembly.go.kr/law/jsp/Law.jsp?WORK_TYPE=LAW_BON&LAW_ID=B2766&PROM_NO=22626&PROM_DT=20110117&HanChk=Y