높은 유효하중 능력과 다양한 벽면전환 능력을 가진 다관절 등반로봇의 개발 및 추종제어

Development and Tracking Control of a Multi-Link Climbing Robot with High Payload Capacity and Various Transition Abilities

오 종 균, 이 기 옥, 김 종 원*, 서 태 원*
(Jongkyun Oh¹, Giuk Lee¹, Jongwon Kim¹, and TaeWon Seo²)

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

²School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

Abstract: Payload capacity and transition ability are essential for climbing robots to apply the robots to various applications such as inspection and exploration. This paper presents a new climbing robotic platform with multi-link structure of track-wheel modules to enhance payload capacity and transition ability, and its tracking controller design and experimental results. The compliances between track-wheel modules achieve stable internal and external transitions while the large adhesion area of the track-wheel module enhances the payload capacity of the robot. Kinematic model-based tracking controller is designed and implemented for autonomous internal transition, and the gains of the controller are optimized by experimental design. Experiments on the automatic internal transitions are performed and the results guarantee autonomous internal transition with little tracking error.

Keywords: climbing robot, multi-link robot, transition, tracking control, payload

I. 서론

최근 국내외적으로 고층 외벽 청소, 선박 내부 검사 및 외부 도장과 같이 위험한 작업환경에서의 작업의 안전과 효율의 향상을 위해 등반로봇에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1]. 등반로봇의 다양한 적용을 위하여 게코 섬모, 흡착 패드, 정전기력 등 다양한 부착 힘에 대한 연구와 등반로봇에 대한 메커니즘 연구 등이 활발히 수행 중이다[2-4].

등반로봇이 실제 환경에서 장애물을 극복하고 다양한 작업을 하기 위해서는 벽면전환 능력과 유효하중 능력이 필수적이다. 이러한 벽면전환 능력과 유효하중 능력과 관련하여 다양한 등반로봇 메커니즘들이 제안되었다. Fischer et al. [5]은 영구자석 바퀴를 이용한 등반로봇을 제안하였다. 이 로봇은 다양한 벽면전환을 할 수 있는 장점이 있지만, 유효하중 능력에 한계가 있다. Grieco et al. [6]은 6개의 흡착 다리를 지닌 등반로봇을 제안하였다. 6개의 다리를 이용하여 큰 유효하중을 들 수 있으나, 장애물 극복능력에는 한계가 있다. 최근, Seo and Sitti [7]는 유연한 조인트와 건식 접착을 이용한 다관절 등반로봇을 제안하였다. 제안된 로봇은 다양한 재질에 부착을 하고 높은 벽면전환 능력이 있다는 점에 장점이 있지만, 유효하중 능력에 한계가 있다.

본 논문에서는 다양한 벽면 전환 능력과 높은 유효하중 능력을 동시에 만족시키는 로봇 플랫폼을 제시한다. 로봇의 이름은 Comboto이며 영구자석을 통해 벽면과 흡착을 한다. 다관절 구조로 구성되어 있으며, 유연한 조인트를 이용한 적응형 움직임을 통하여 다양한 벽면전환 능력 및 높은 유효하중 능력이 가능하다. 기존 논문 [8]에서 그 메커니즘 및 수동 조작을 통한 실험 결과가 공개된 바가 있으며, 본 논문의 전반부에서 메커니즘의 특징이 새롭게 요약, 제시된다.

본 논문에서는 기존 연구의 한계점인 수동 조작을 극복하기 위하여 벽면전환의 추종 제어기를 설계, 제시한다. 본 추종 제어를 통하여 로봇은 외부 조작 없이 자율적으로 벽면전환을 수행하게 된다. 기구학 모델을 바탕으로 비례적분 제어기를 통하여 추종 제어기가 설계되며, 제어기의 이득은 실험 방법론을 통하여 최적화된다. 최적화된 추종 제어기의 성능은 2종류의 벽면전환 실험을 통하여 그 성능이 검증된다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 이루어진다. II 장에서는 로봇의 메커니즘 및 성능에 대한 설명이 제시된다. III 장에서는 추종 제어를 위한 기구학 모델 및 비례적분 제어기에 대한 설명이 제시된다. IV 장에서는 비례적분 제어기의 이득 최적화에 대한 내용이 제시된다. V 장에서는 결론이 제시된다.

II. 로봇 메커니즘 및 성능

1. 로봇 메커니즘

Comboto는 그림 1과 같이 3개의 자석 트랙 모듈과 이를 연결하는 링크, 그리고 능동적으로 구동하는 1개의 꼬리로 이루어져 있다. 3개의 자석 트랙 모듈은 각각 능동 및 수동 회전 관절로 연결되어 있다. 로봇은 자석 트랙의 회전을 통하여 이동을 하며, 능동 및 수동 회전관절을 이용하여 벽면전환을 한다. 능동형 꼬리는 수직 벽 등반 시에 피치 백 모델

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received April 12, 2013 / revised August 19, 2013 / accepted September 2, 2013

오종균, 이기옥, 김종원: 서울대학교 기계항공공학부

(jkoh@rodel.snu.ac.kr/gulee@rodel.snu.ac.kr/jongkim@snu.ac.kr)

서태원: 영남대학교 기계공학부(taewon_seo@yu.ac.kr)

※ 본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0009596)의하여 연구되었음.

※ 이 논문은 2013 제 28회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음.

그림 1. 로봇 기구구조: 자석벨트를 구비한 메인 트랙 모듈 (A, C, E), 토크센서 (B, D, F), 능동구동 꼬리 (G) 및 비틀림 스프링으로 구동되는 수동관절 (J1, J3) 과 토크-컨트롤 모터로 구동되는 능동관절 (J2, J4, J5).

Fig. 1. Robot configuration: main module with magnetic tread (A, C, E), torque sensor (B, D, F), active tail (G), passive joints with torsion springs (J1, J3), and torque-controlled active joints (J2, J4, J5).

트를 줄여주는 역할을 한다.

로봇의 꼬리를 제외한 전체 크기는 폭 216 mm, 길이 522 mm, 높이 38 mm 이며, 무게는 6.4 kg 이다. 로봇은 외부의 실시간 제어기(cRIO-9024, NI)와 전원 공급장치에서 유선으로 제어신호와 에너지를 공급받는다. 로봇에는 총 3개의 트랙의 회전을 위한 BLDC motor와 3개의 토크 제어용 BLDC 모터 (EC-max22, Maxon)로 구성되어 있으며, 토크 제어용 BLDC 모터는 토크 센서 (TRT-50, Transducer)와 연동되어 사용된다. 자석벨트는 polymer magnet (HXP2.0, Misumi)을 120 X 20 mm의 크기로 재단한 후 벨트에 등 간격으로 붙여 사용하였다.

Combot의 장점을 정리하면 다음과 같다. 우선, Combot은 3 개의 트랙 모듈의 큰 접착 면적을 이용하기 때문에 큰 유효 하중 능력을 가진다. 둘째로 유연성 관절을 이용하여 힘 분배를 적절히 이용하면, 각 모듈의 피치 백 모멘트를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 이런 장점을 이용하면 수직 벽 등반을 안정적으로 수행할 수 있다. 셋째로 유연성 관절을 이용하여 간단한 제어로 다양한 벽면전환을 할 수 있다는 점이 있다. 외력과 외부조건에 의하여 유연성 관절 값이 변하기 때문에 복잡한 제어 없이 다양한 벽면전환이 가능하다. 다음 절에서 이러한 성능을 테스트한 결과를 제시한다.

2. 유효하중 및 벽면전환 성능

Combot의 유효하중 능력에 대한 실험 사진이 그림 2에 도시되어 있다. 실험은 수직 벽 상승 시, 하강 시 및 천장 부착 시에 대하여 진행되었다. 실험 결과, 큰 부착 면적을 이용하여 10kg 이상의 유효하중 능력이 가능함을 검증하였으며, 이는 다른 등반 로봇들에 비해 매우 큰 유효하중 능력이다. 이러한 높은 유효하중 능력은 다양한 장치를 로봇에 부착할 수 있게 하여, 로봇을 다양한 적용 분야에 사용 가능하게 한다.

Combot의 벽면전환 실험이 수행되었으며 그 결과가 그림 3에 도시되어 있다. 로봇의 벽면전환 능력에 대한 실험은 2

그림 2. 로봇의 유효하중 능력: (a) 수직 벽 상승 시 10 kg, (b) 수직 벽 하강 시 15 kg 유효하중 능력 및 (c) 천장 부착 시 10 kg 유효 하중 능력.

Fig. 2. Payload capacity: (a) Vertical upward climbing, (b) Vertical downward climbing, (c) On the ceiling.

그림 3. 내각 벽면전환 그림: 0°에서 90° (a - c), 270°에서 0° (d - f), 외각 벽면전환 그림: 0°에서 270° (h - j), 90°에서 0° (k - m).

Fig. 3. Internal transitions: from 0° to 90° (a - c), and from 270° to 0° (d - f), and external transitions: from 0° to 270° (h - j), and from 90° to 0° (k - m).

가지의 내각 (0°에서 90°, 270°에서 0°) 및 2 가지의 외각 (0°에서 270°, 90°에서 0°)에 대해 진행되었다. 실험을 통해 내각 및 외각 측면주행에 대한 벽면전환도 가능함도 검증하였다. 실험 결과 다양한 벽면전환을 복잡한 제어 알고리즘 없이 수동 조작으로 가능함을 증명하였다.

앞서 설명된 바와 같이 다양한 벽면전환이 가능함을 실험으로 증명하였다. 하지만 본 실험은 수동 조작으로 수행된 것으로, 실제 로봇이 자율적으로 벽면전환을 할 수 있게 하는 알고리즘이 필수적이다. 다음 장에서 로봇이 자율적으로 내각 벽면전환을 할 수 있게 하는 제어기 설계에 대해 설명한다.

III. 추종 제어기 설계

앞 장에서 설명된 바와 같이 Combot의 수동조작을 통해 다양한 벽면전환 가능성을 실험적으로 증명하였다. 하지만

이러한 수동조작은 작업자에 따라 그 결과가 달라져 일관된 결과를 예상하기 어렵다. 또한 작업자가 실제 동작을 관측하지 못하는 경우 사용이 불가능하다. 따라서 Combob의 자율 주행 제어가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 기구학을 바탕으로 한 추종 제어기를 사용하였다. 등반로봇의 경우 다른 로봇들에 비해 외력이 예측하기 어려워 동역학 분석이 어렵고, 속도가 느려 동역학적 특성의 영향이 작다. Combob과 같은 다관절 로봇의 특성을 고려하여 기구학 모델링을 한 후 그 기구학을 바탕으로 한 추종 제어기를 설계한다. 그리고 추종 제어기의 이득을 최적화하여 건설한 성능을 달성하는 두 단계의 제어기 설계 단계를 수행한다.

1. 모델링을 위한 가정

위치 추종제어기를 설계하기 위해서 내각 벽면전환을 하는 Combob에 대한 모델링이 필요하다. Combob은 6개의 링크와 5개의 관절을 가진 평면 로봇으로 고려할 수 있다. 다른 제한 조건이 없을 때 Combob은 기구학적으로 11자유도를 갖지만 6개의 모터만을 가지고 있으므로 *under-actuated system*이다. 이러한 이유 때문에 벽면의 종류와 로봇의 위치에 따라 제어가 불가능한 링크가 생길 수 있다. 따라서, 제어가 항상 가능하도록 모델링 하는 것이 중요하다. 이를 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 본 연구에서 고려하는 내각 벽면각도는 90° 로 정하며, 모델링은 이 각도에 대해 내각 벽면전환을 수행하는 Combob에 대해 수행한다.
- 이 내각 벽면전환의 시작과 끝 위치를 포함 벽면전환 주행과정을 그림 4와 같이 4단계로 구분한다.
- Combob의 벽면전환 시의 기구학을 단계별로 나누어 해석한다. 그림 4에 노란색으로 표시된 메인 모듈과 링크에 대해서 기구학 해석을 수행하며, 나머지 링크는 노란색으로 표시된 링크의 움직임에 종속되어 움직인다.
- 벽면에 접촉 중인 링크는 슬립이 발생하지 않으며, 벽면에서 떨어지지 않는다.
- 내각 벽면전환에서는 꼬리의 영향은 무시한다.

위와 같은 가정을 바탕으로 기구학 모델이 도출된다. 가정에서 가장 중요한 포인트는 가정 b), c)인데, 이렇게 단계별로 나누어 해석함으로써 복잡한 다관절 등반로봇의 모델링을 단순화할 수 있다.

2. 기구학 모델링

그림 4에 노란색으로 도시되었던 바와 같이, 각 벽면전환 단계에서 중요 역할을 하는 링크들은 항상 그림 5와 같이 간단한 2자유도 모델로 표현할 수 있다. 이 2자유도 모델의 x, y 좌표는 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$x_i = l_{i+1} \cos \theta_i + l_i \cos(\theta_i + \theta_{i+1}), \quad (1)$$

$$y_i = l_{i+1} \sin \theta_i + l_i \sin(\theta_i + \theta_{i+1}). \quad (2)$$

여기서 l_i 는 각 링크의 길이, θ_i 는 각 링크의 각도를 의미한다. 위의 x, y 좌표는 초기 위치 (x_0, y_0) 에 대한 자석트랙의 회전으로도 정의 되는데 이를 표현하면 아래와 같이 정리된다.

$$x_i = x_0 + r\varphi_i, \quad (3)$$

그림 4. 내각 벽면전환 과정의 4단계.

Fig. 4. Procedure during internal transition divided by four steps.

그림 5. 단계별 해석을 위한 2 자유도 모델. 현재는 Step 2의 해석 단계임.

Fig. 5. 2-degrees of freedom model for kinematic analysis. (Example of Step 2).

$$y_i = y_0 + r\varphi_i. \quad (4)$$

여기서 φ_i 는 자석트랙의 회전각도이며, r 은 트랙휠의 반경을 의미한다. 식 (1)-(4)를 이용하여 자석트랙의 회전각도를 벡터 형식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_{i+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} l_{i+1} \sin \theta_i + l_i \sin(\theta_i + \theta_{i+1}) - y_0 \\ l_{i+1} \cos \theta_i + l_i \cos(\theta_i + \theta_{i+1}) - x_0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

위 식을 시간에 대해 미분하여 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_i \\ \dot{\varphi}_{i+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} J \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \\ \dot{\theta}_{i+1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

위 식에서 J 는 자코비안 행렬이며 그 식은 아래와 같다.

$$J = \begin{bmatrix} l_{i+1} \cos \theta_i + l_i \cos(\theta_i + \theta_{i+1}) & l_i \cos(\theta_i + \theta_{i+1}) \\ -l_{i+1} \sin \theta_i - l_i \sin(\theta_i + \theta_{i+1}) & -l_i \sin(\theta_i + \theta_{i+1}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 J 는 Combob이 주어진 궤적을 단계별로 따라간다고 가정하면 항상 역행렬이 존재한다. 결과적으로 식 (6)을 이용해 단계별 회전 링크의 각도와 각속도에서 자석트랙의 회전 속도를 계산해 낼 수 있다.

3. 추종 제어기의 구성

앞에서 수립한 기구학 모델링을 기반으로 비례적분 제어

기 형태의 위치 추종제어기를 설계한다. 제어기는 센서로부터 로봇의 위치(θ_i)에 대한 정보와 주어진 위치 입력(θ_i^d)을 토대로 계산된 자석벨트의 속도 값($\dot{\phi}_i$)을 구동모터에 인가하게 되며 그 식은 아래와 같다. 본 식을 유도하기 위하여 식 (6)의 관계식이 사용된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_i \\ \dot{\phi}_{i+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} J \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i^d - K_p^{i,i}(\theta_i - \theta_i^d) - K_I^{i,i} \int (\theta_i - \theta_i^d) dt \\ \dot{\theta}_{i+1}^d - K_p^{i,i+1}(\theta_{i+1} - \theta_{i+1}^d) - K_I^{i,i+1} \int (\theta_{i+1} - \theta_{i+1}^d) dt \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 K_p 는 비례이득, K_I 는 적분이득을 의미한다. 이 제어기 이득에 따라 추종 성능이 많이 변하게 되는데, 시스템이 단계별로 변하는 Combobot과 같은 경우 제어기의 이득을 변화시켜 추종 성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 제어기 이득을 실험 계획법을 통해 단계별로 최적화 하여 추종 성능을 향상 시킨다.

IV. 제어기 이득 최적화

본 연구의 목적은 Combobot의 위치 추종 제어기를 설계하여 그 성능을 향상시키는 것이다. 본 절에서는 앞 장에서 설계된 위치 추종 제어기의 이득을 실험계획법을 통해 최적화 [9]하는 과정 및 결과를 다룬다.

1. 문제정의

추종 성능을 정의하기 위하여 목적함수를 아래와 같이 정의하였다. 경로는 임의로 주어진다고 가정한다.

$$\min E = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\theta_i^d - \theta_i| \right) \quad (9)$$

여기서 n 은 전체 데이터의 개수를 의미한다. 계산된 E 는 모든 링크의 위치오차의 평균값을 의미한다. k 변수는 링크의 번호를 표시하며, 총 5개의 링크 각도를 평균한다.

설계변수는 식 (8)에 제시된 제어 이득이며, 단계별 제어 이득을 정리하면 표 1과 같다. 도시된 바와 같이 단계별 총 16개의 제어 이득이 존재한다. 이 16개의 설계변수 중 상대적으로 영향이 적은 8개의 비례 이득은 사전 실험을 통하여 결정한다. 그리고, 남은 8개의 적분 이득에 대하여 최적화를 수행하는데, 민감도 실험을 하여 주요 설계변수를 선정한 후, 이 설계변수에 대하여 최적화를 수행한다. 이런 단계별 해석을 통해 실험 횟수를 줄이고 건실한 설계변수 값을 도출한다.

2. 최적화 과정 및 결과

최적화 실험을 수행하였다. 각 관절에 대한 위치 입력으로는 관절마다 3차 스플라인 곡선을 선정하였다. 메인 트랙 모듈과 링크에는 각각 기술기 센서(SA2 and MSSENS-IN)를 부착하여 각도 값을 측정하였다. 벽면전환 방향은 그림 3에 도시된 두 방향의 내각 벽면전환 중 0°에서 90°의 방향을 실험 대상으로 하였다.

우선 $L_{12}(2^{11})$ 직교배열 [10]을 기반으로 한 민감도 실험을 수행하였다. 실험 데이터를 이용하여 민감도 분석을 한 결과가 그림 6에 도시되어 있다. 실험 결과 Step 2와 4의 $K_I^{2,2}$, $K_I^{2,3}$, $K_I^{4,4}$, $K_I^{4,5}$ 의 이득이 상대적으로 높은 민감도를 보였다. 이 결과를 바탕으로 민감도가 높은 4개의 이득의 최적화를 수행한다.

표 1. 설계변수인 단계별 제어 이득.

Table 1. Controller gain for each step (design parameters).

	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
ϕ_1	$K_p^{1,1}, K_I^{1,1}$	$K_p^{2,2}, K_I^{2,2}$		
ϕ_2	$K_p^{1,2}, K_I^{1,2}$	$K_p^{2,3}, K_I^{2,3}$	$K_p^{3,3}, K_I^{3,3}$	$K_p^{4,4}, K_I^{4,4}$
ϕ_3			$K_p^{3,4}, K_I^{3,4}$	$K_p^{4,5}, K_I^{4,5}$

그림 6. 8개의 적분이득에 대한 민감도 실험 결과.

Fig. 6. Sensitivity analysis on 8 integral gains.

표 2. $L_9(3^4)$ 행렬 기반의 실험 결과.

Table 2. Experimental results based on $L_9(3^4)$ array.

#	$K_I^{2,2}$	$K_I^{2,3}$	$K_I^{4,4}$	$K_I^{4,5}$	E
1	1	1	1	1	3.37
2	1	2	2	2	2.43
3	1	3	3	3	4.34
4	2	1	2	3	4.12
5	2	2	3	1	3.98
6	2	3	1	2	3.85
7	3	1	3	2	6.54
8	3	2	1	3	5.65
9	3	3	2	1	5.42

표 3. 최적화 결과 이득 (표 1에 맞춰 기입함).

Table 3. Initial and optimized gains (refer Table 1 for the symbols).

Initial gains				
	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
ϕ_1	6000, 0.1	3100, 1.2		
ϕ_2	5000, 0.8	6500, 0.2	3000, 0.8	6000, 1.0
ϕ_3			5000, 0.5	5000, 2.0
Optimized gains				
	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
ϕ_1	6000, 0.3	3100, 0.9		
ϕ_2	5000, 0.5	6500, 1.1	3000, 0.4	6000, 0.5
ϕ_3			5000, 0.8	5000, 1.8

민감도가 높은 4개의 이득을 $L_9(3^4)$ 직교배열 [10]을 기반으로 최적화를 수행하였다. 그 실험 결과가 표 2에 도시되어 있다. 실험 결과의 민감도 분석 결과 4개의 설계변수가 레벨 (1, 2, 2, 2) 일 때 최적값을 가지게 되고, 이는 수직행렬의 2번 실험과 일치한다. 결과적으로 표 3의 아래에 표시된 바와 같은 최적값에서 평균 추종 오차는 2.43°가 된다.

최적 이득을 이용한 추종 실험 결과가 그림 7에 도시되어 있다. 총 30초의 시간 동안 추종 실험이 수행되었으며, θ_1 부터 θ_5 까지 총 다섯 각도가 순차적으로 이동하게 된다. 그림 4에도 도시된 바와 같이 θ_1 이 30°일 때부터 Step 1이 시작되며, θ_5

그림 7. 추종 실험 데이터.

Fig. 7. Experimental results of path tracking.

가 30°에 도달하면 벽면전환이 완료된다. 실험 결과 전체 평균 추종오차는 2.43°로 측정되었고, 최대 오차는 8.22°로 측정되었다. 이는 표 3의 위쪽에 표시되어 있는 초기 이득으로 실험했을 때의 오차인 6.61° (평균 추종오차), 9.62°(최대 오차) 보다 각각 63 %와 13 % 감소한 수치이다. 결과적으로 안정한 벽면전환이 가능하며, 추종오차는 최적화를 통하여 감소시킬 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 신개념 다관절 등반로봇을 제시하였다. 제시된 로봇은 3개의 자석 트랙 모듈과 이를 연결하는 링크, 그리고 능동적으로 구동하는 1개의 꼬리로 이루어져 있다. 자석 트랙 모듈과 링크를 연결하는 조인트는 능동, 수동 유연성 관절로 설계되어 복잡한 제어 없이 벽면전환이 가능하도록 하는 역할을 한다. 제작된 로봇은 다양한 내각, 외각 벽면전환이 가능하며 10kg의 유효하중 능력이 있다는 점에서 큰 장점을 가진다.

제시된 다관절 등반로봇의 자율 주행을 위하여, 내각 벽면 전환시의 추종 제어기 설계를 제시하였다. 복잡한 다관절 등반로봇을 단계별로 나누어 간단한 기구학식을 도출하였으며, 이를 바탕으로 비례 적분 제어기를 설계하였다. 추종 성능 향상을 위하여 단계별 이득을 실험계획법을 통하여 결정하였다. 결과적으로 안정한 벽면전환이 가능하였으며, 63 %의 추종오차 성능 향상을 실험을 통하여 검증하였다.

REFERENCES

- [1] W. Shen, J. Gu, and Y. Shen, "Proposed wall climbing robot with permanent magnetic tracks for inspecting oil tanks," *Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2072-2077, 2005.
- [2] J. R. Kim, J.-W. Kim, J. H. Park, and J. Kim, "Movement analysis of waist and tail of lizard for controlling yawing for motion in slow trotting," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 7, pp. 620-625, 2013.
- [3] M. Lee, S. Yoo, J. Park, and S. Kim, "Modular type robot for

field moving and tree climbing," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 2, pp. 118-125, 2012.

- [4] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, D. Santos, and M. R. Cutkosky, "Smooth vertical surface climbing with directional adhesion," *IEEE Transaction on Robotics*, vol. 24, no. 1, pp. 65-74, 2008.
- [5] W. Fischer, G. Caprari, and R. Siegwart, "Compact magnetic wheeled robot for inspecting complex shaped structures in generator housings and similar environments," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4116-4121, 2009.
- [6] J. C. Grieco, M. Prieto, and M. Armada, "A six-legged climbing robot for high payloads," *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Control Applications*, 1998, Trieste, Italy, pp. 446-450.
- [7] T. Seo and M. Sitti, "Tank-like module-based climbing robot using passive compliant joints," *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, vol. 18, no. 1, pp. 397-408, 2013.
- [8] G. Lee, G. Wu, J. Kim, and T. Seo, "High-payload climbing and transitioning by compliant locomotion with magnetic adhesion," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 10, pp. 1308-1316, 2012.
- [9] T. Seo, "Control gain tuning of the 3-DOF micro parallel mechanism platform via design of experiment methodology," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 29, no. 11, pp. 1207-1213, 2012.
- [10] G. S. Peace, *Taguchi Methods: A Hands-on Approach*, Addison-Wesley, 1993.
- [11] G. Lee, J. Oh, J. Kim, and T. Seo, "Development of a multi-link climbing robot with high-payload and various transitioning ability," *Proc. of 2013 28th ICROS Annual Conference (in Korean)*, pp. 330-331, May 2013.

오 종균

2011년 충남대학교 기계공학부(공학사). 2011년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 등반로봇 및 필드로봇 제어.

이 기 욱

2010년 서울대학교 기계항공공학부(공학사). 2010년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정 재학중. 관심분야는 과구동 병렬기구, 등반 로봇.

김 종 원

1978년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1990년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1987년 위스콘신대학교 기계공학과(공학박사). 1993년~현재 서울대학교 기계항공공학부 교수. 관심분야는 로봇 플랫폼 설계 및 건설 설계 방법론.

서 태 원

2003년 서울대학교 기계항공공학부(공학사). 2008년 서울대학교 기계항공공학부(공학박사). 2010년~현재 영남대학교 기계공학부 조교수. 관심분야는 수중로봇, 등반로봇, 필드로봇 설계 및 제어.