Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 1 pp. 62~69, 2017
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.1.62

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

외벽등반 로봇의 성능평가 방법 및 응용

김진만[1] · 김헌희[2] · 남택근†

(Received September 30, 2016 ; Revised October 11, 2016 ; Accepted January 18, 2017)

Performance evaluation method for wall-climbing robots and its application

Jin-Man Kim[1] · Heon-Hui Kim[2] · Taek-Kun Nam†

요약: 본 논문은 외벽에 부착하여 이동이 가능한 등반로봇의 성능평가 방법을 다룬다. 등반로봇에 관한 기존의 문헌을 토대로 볼 때, 등반로봇의 성능평가에 관해 일관되고 명쾌한 성능지표 및 방법이 제시되고 있지는 않다. 등반로봇은 부착방식 및 이동방식에 따라 다양하게 구현될 수 있으므로, 형태와 상관없이 보다 일반화된 성능평가 방법이 요구된다. 이에 본 논문은 등반로봇의 성능평가를 위한 2가지 평가지표(수직부착하중, 수직등반속도)와 평가방법을 제안한다. 제안된 방법의 효용성을 검증하기 위하여, 본 논문은 자체 개발된 선체외벽 등반로봇을 대상으로 제안된 성능평가 방법을 적용한다. 보다 구체적으로, 수직부착하중은 등반로봇의 슬립측정을 통해 18.5kg으로 평가되었고, 수직등반속도는 등반로봇의 위치제어시스템을 통해 41cm/s으로 평가되었다.

주제어: 등반로봇, 자석, 성능평가, 선체외벽 등반로봇, 모션추적시스템

Abstract: This paper presents a methodology for evaluating the performance of wall-climbing robots. In the literature on wall-climbing robots, there is little information on indices and evaluation methods for consistent and exact performance. Because various types of wall-climbing robots can be developed with regard to adherence and locomotion, a general method of measuring their performance regardless of type is needed. Therefore, we propose two major performance indices–the vertical adhering weight and vertical climbing speed–and their stepwise evaluation procedures. To verify the effectiveness of the proposed method, we applied it to a hull-climbing robot that we previously developed. The target robot was evaluated to have a vertical adhering weight of 18.5 kg through a slip measurement procedure and a vertical climbing speed of 41 cm/s with a position control system.

Keywords: Wall-climbing robots, Magnet, Hull-climbing robot, Motion tracking system

1. 서 론

최근 산업체 및 재해 현장 등지에서 인간의 접근이 어려운 공간 내의 작업을 수행할 수 있는 필드로봇에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 선박의 안전성 확보를 위한 선박검사에 있어서, 검사관이 직접 순회하며 육안으로 검사를 수행하는 기존 방식**[1]**의 한계(즉, 검사관의 접근이 쉽지 않은 높은 곳, 좁고 어두운 통로 등지에서의 검사)를 보완하기 위해 로봇을 활용한 대체검사 방법들이 연구되고 있다**[2]**. 선박을 건조하는 조선소에서는 용접, 도장 등의 작업을 위해 다양한 형태의 로봇들이 개발되어 활용되고 있다**[3]**. 또한 고층 건물, 풍력 발전기, 교각과 같은 대형 구조물의 벽면 검사나 소제를 목적으로 등반이 가능한 형태의 로봇들도 연구되고 있다**[4]-[6]**.

항해 중인 선박에 있어서 로봇기술의 활용방안 또한 다양하다. 일례로 인간의 접근이 어려운 선체측면 또는 탱크 내부 등의 검사에 있어 로봇을 이용한 원격검사를 들 수 있다. 또한, 선박의 충돌/좌초로 인해 선체일부가 파손되어 2차 피해가 우려되는 파손부위 근처의 상황을 신속·정확하게 파악하기 위해 로봇이 활용될 수 있다. 이러한 경우 오염물질의 해상 유출 등 2차 피해의 확산 방지를 위한 대응전략의 수립과정에 로봇기술은 주요한 정보제공의 용도로 활용될 수 있다**[7]**.

로봇이 대형구조물 또는 선체의 외벽 등지에서 작업을 원활히 수행하기 위해서는 벽면에 안정적으로 부착하여 이동이 가능해야 한다**[8][9]**. 통상적으로 이러한 형태의 로봇을 등반로봇(wall-climbing robot)이라 한다. 등반로봇은 크

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0432-3504): Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea, E-mail: tknam@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7225
1 Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, E-mail: papa713@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7200
2 Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, E-mail: heonhuikim@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7256

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

게 바퀴를 통해 이동이 가능한 차륜형 로봇과 관절식 보행 구조를 통해 이동이 가능한 보행형 로봇으로 분류될 수 있다. 등반로봇 분야에서 핵심이슈 중 하나는 수직벽면에서도 추락하지 않을 만큼 안정적인 부착력의 생성, 유지, 이동 방법에 관한 것이다. 등반로봇이 철판, 콘크리트, 유리면 등에서 안정적인 부착력을 생성하기 위해, 게코 섬모, 흡착패드, 정전기력, 전자석, 영구자석 등을 이용한 다양한 연구가 수행되고 있다**[4][10][11]**.

등반로봇에 관한 연구가 활발한 반면, 관련문헌을 조사했을 때 등반로봇의 부착 및 주행성능을 평가하기 위한 성능지표가 일관되고 명확하게 제시되고 있지는 않다. 국내의 경우 서비스로봇 분야에서 평지를 주행하는 로봇을 대상으로 성능평가를 위한 지표가 마련되어 있다**[12][13]**. 그러나 등반로봇은 수직등반과 같은 특수한 이동상황이 따르기 때문에, 이러한 성능을 구체적으로 설명할 수 있는 지표가 필요하다.

이에 본 논문은 등반로봇을 대상으로 부착력 및 이동성능이 고려된 평가방법을 제안한다. 특히 등반로봇이 수직벽면을 등반하는 경우, 로봇에 부여된 하중을 유지한 채 중력을 극복하면서 중력에 반하는 방향으로 작업에 필요한 충분한 속도로 이동이 가능해야 한다. 이러한 관점에서 본 논문은 수직부착하중 및 수직등반속도의 평가지표를 제시하고 이를 평가하기 위한 방법론을 제안하고자 한다. 제안된 평가방법의 응용사례로서 자체 개발된 선체등반로봇을 대상으로 성능평가를 위한 실험환경 및 방법을 소개하고, 실험결과를 토대로 제안된 성능지표의 효용성을 검증한다.

2. 등반로봇의 성능평가 방법

2.1 등반로봇의 부착력 해석

선체 및 외부 검사를 안정적으로 수행하기 위하여, 등반로봇은 선체에서 낙하되지 않을 만큼 충분히 강한 부착력(또는 흡착력)을 가질 필요가 있다. 또한 로봇의 형태가 차륜형인 경우 작업수행을 위해 충분한 주행속도를 갖추어야 한다. 사실상 선체 외판에 대한 부착력과 등반능력은 서로 대립되는 특성을 가지고 있다. 부착력이 낮은 경우 접촉부의 마찰저항이 작아지므로 비교적 낮은 출력의 동력으로도 등반로봇의 주행이 가능하겠지만, 접촉부에서 차륜의 슬립(slip)이 발생할 수 있고 자칫 낙하의 위험이 따른다. 반면 부착력이 너무 높은 경우, 슬립 및 낙하위험은 줄어들지만 등반로봇의 주행성을 높이기 위해서 보다 높은 출력의 동력원이 요구된다. 또한 출력 증가에 따라 모터, 배터리 등 추가적으로 자체중량이 증가할 수 있다. 따라서 등반로봇을 설계할 때에는 부착력과 주행성의 적절한 타협점을 찾을 필요가 있다**[9]**.

Figure 1은 등반로봇의 부착력에 따라 주행에 필요한 동력을 산출하기 위한 힘의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, F_M은 자석에 의한 부착력, F_g는 중력, F_{mf}는 최대 정지 마찰력, F는 로봇의 주행에 필요한 힘, N은 수직항력, θ는 로봇의 부착 각도, m은 로봇의 질량을 각각 나타낸다. 부착력을 가지는 등반 로봇의 전진력은 **Figure 1**의 벡터의 상관관계로부터 **식 (1)**과 같이 도출된다.

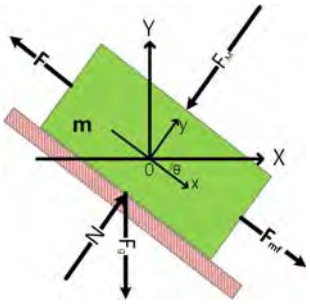

Figure 1: Force on the flat surface

$$F \geq \sqrt{N^2+\mu N^2+F_g^2-2NF_g(\cos\theta-\mu\sin\theta)} \qquad (1)$$

자석에 의한 부착력 F_M이 증가하는 경우 수직항력 N이 증가하며, **식 (1)**에서와 같이 수직항력 N이 증가되면 주행력 F 또한 증가하게 됨을 알 수 있다. 여기서 μ는 마찰계수를 나타낸다.

로봇의 하중이 높아질수록 수직 벽면에서 로봇의 중력에 따른 위치에너지가 증가하며, 이로 인해 로봇의 주행능력이 감소하게 되고, 결국은 로봇의 등반속도가 감소하게 된다. 이러한 경우, 주행 성능을 높이기 위해서는 이를 만족할 수 있는 충분히 높은 출력토크의 모터를 선정해야 할 것이며, 이로 인한 중량의 증가 또한 고려되어야 한다.

2.2 성능지표

본 논문에서는 선체 외벽과 같은 환경에서 이동이 가능한 등반로봇을 대상으로 성능평가를 위한 방법론을 제시하고자 한다. 등반로봇의 성능평가를 위한 척도로서 앞서 설명한 바와 같이 벽면에서의 부착력과 주행능력이 주요 논점이 될 수 있다. 이에 본 논문은 수직부착하중과 수직등반속도를 등반로봇의 성능평가를 위한 성능지표로 제안하고자 한다. 본 논문에서 수직부착하중과 수직등반속도는 다음과 같이 정의한다.

[정의 1] 등반로봇의 전진방향이 지면으로부터 수직방향으로 위치할 때, 로봇이 벽면과 분리되지 않으면서 접촉면에서의 슬립이 발생하지 않을 때의 하중을 **수직부착하중(vertical adhering weight)**이라 한다.

[정의 2] 등반로봇이 벽면과 분리되지 않으면서 중력에 반하는 방향으로 전진 가능한 속도를 **수직등반속도(vertical climbing speed)**라 한다.

본 논문에서 제시된 두 개의 성능지표는 차륜형 등반로봇의 부착력과 주행속도와의 관계를 토대로 정의되었으나,

보행형 등반로봇의 성능평가에도 동일하게 적용될 수 있다. 보행형 등반로봇에 있어 수직부착하중과 수직등반속도는 각각 로봇이 정지해 있는 상태에서의 흡입력/부착력의 정도와 수직방향으로의 이동속도에 대응되기 때문이다. 따라서 본 논문에서 제시된 두 가지의 지표는 등반로봇의 형태에 관계없이 일관된 성능지표로서 활용 가능하다.

2.3 성능지표의 측정법

2.3.1 수직부착하중

실험실 환경에서 수직부착하중의 측정은 비교적 간단히 수행할 수 있다. 우선 지면과 수직인 벽면에 자력이 작용할 수 있는 철판을 부착하거나, 수직방향으로 지면에 철골 구조물을 제작하여 로봇이 부착할 수 있는 공간을 확보한다. 다음으로, 철판 또는 철골 구조물의 벽면에 등반로봇을 **Figure 2**와 같이 부착시킨다. 이때 로봇은 부착된 상태로 유지되어야 한다. 차륜형 로봇의 예를 들어 설명하자면, 브레이크가 있는 모터의 경우 브레이크를 작동시켜 모터의 회전을 정지시킬 수 있다. 이러한 조치가 없다면 로봇의 전진방향이 지면에서 수직으로 향하기 때문에 중력으로 인해 로봇이 지면에 떨어지게 된다. 등반로봇에 폐루프 속도제어기가 내장되어 있는 경우라면, 제어기의 참조값를 0으로 설정하여 모터에 전류가 인가되면서 차륜을 고정된 상태로 유지시키는 것도 하나의 방법이 될 수 있다.

일단 로봇이 벽면에 부착되어 있으면, 로봇에 탑재할 부하의 하중 범위를 고려하여 하중을 인가하고 접촉부에서의 슬립을 측정한다. 부착력과 하중이 경계선 상에 있는 경우에는 미세한 슬립이 발생할 수 있으므로, 하중 인가 후 충분한 시간동안 지연시킨 후 슬립량을 측정할 필요가 있다. 본 논문에서는 이 지연시간을 슬립측정 지연시간이라 정의한다. 슬립의 측정은 외부에 별도의 위치추적시스템 또는 위치측정기를 통해 측정한다. 측정이 완료되면 측정치를 기록하고, 점진적으로 하중을 늘린 후 앞서 언급한 과정을 반복한다.

이러한 과정을 통해 수집된 하중 대비 슬립데이터를 분석하여 슬립이 발생하지 않은 범위에서의 최대하중을 본 논문에서는 **최대수직부착하중**이라 한다.

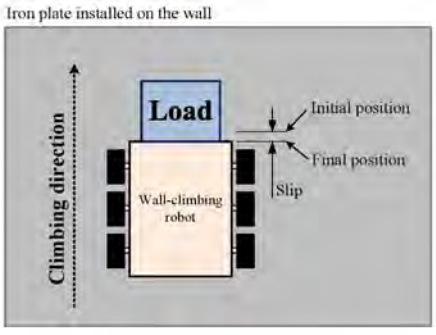

Figure 2: An example of measuring vertical adhering weight

2.3.2 수직등반속도

수직등반속도는 하중과 관계가 되므로, 필요에 따라 무부하 하중에서의 수직등반속도와 최대수직부착하중에서의 수직등반속도를 고려할 수 있다. 여기서 무부하 하중은 등반로봇의 자체중량을 의미하며, 최대수직부착하중은 등반로봇 자체의 중량과 추가적으로 탑재 가능한 중량을 합한 총중량이라 간주할 수 있다.

실험실 수준의 실험환경에서 로봇의 등반속도를 측정하는 것은 공간적으로 한계가 있다. 이는 충분히 긴 주행거리를 가지는 주행벽면을 수직으로 설치할 수 있는 높은 공간이 필요하기 때문이다. 이를 위해 본 논문에서는 **Figure 3**과 같이 위치제어시스템(point-tracking control system) 및 비전기반의 자세추정시스템(vision-based pose estimation system) 기반의 피드백제어시스템의 구축을 통한 등반로봇의 속도측정 방법을 제안한다. 자세추정시스템은 등반로봇의 현재위치(x,y)와 방위각(ϕ)을 실시간으로 추정하기 위한 시스템이다. 또한, 위치제어시스템은 자세추정시스템으로부터 실시간 자세정보를 얻고 2차원 공간 상의 특정위치로 로봇을 위치시키기 위한 시스템이다.

로봇의 위치제어시스템은 내부적으로 2개의 제어기로 구성된다. 첫 번째 제어루프는 로봇의 선속도(linear velocity)를 제어하기 위한 것이다. 특히 자체중량이 큰 등반로봇의 경우, 등반속도 측정 시 급작스런 동작이나 정지는 구동부에 무리를 주거나 자칫 추락의 위험이 있을 수 있다. 이를 방지하기 위해, 본 논문에서는 가속, 등속, 감속 구간이 있는 속도 프로파일(velocity profile)을 우선 생성한 후, 이를 토대로 등반로봇의 속도제어를 수행한다. 위치제어시스템을 구성하는 두 번째 제어기는 로봇의 조향각 제어기로, 로봇이 원하는 지점으로 정확히 이동할 수 있도록 차륜의 조향각을 실시간적으로 제어한다. 두 개의 제어기를 통해 등반로봇은 시작점에서 점진적으로 가속하여 일정속도에 다다르면 등속주행을 하고, 목표점에 근접하게 되면 감속하여 목표점에서 정지하게 된다.

제안된 제어시스템을 통해, 평가자는 간단히 수직벽면 상에서 시작점과 출발점을 설정하여 로봇을 주행시킬 수 있다. 또한, 로봇의 주행 시 위치 및 방향 데이터는 실시간

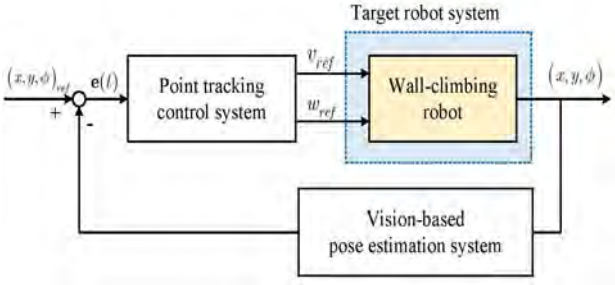

Figure 3: Configuration of control system for a target robot

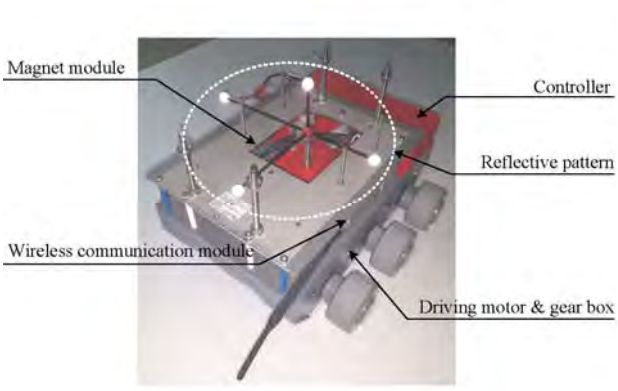

Figure 4: The target wall-climbing robot

으로 수집된다. 따라서 수집된 데이터 중에서 등속구간에 해당하는 데이터만을 선별하여 분석하면 간단히 수직등반 속도를 산출할 수 있다. 특히, 이와 같은 제어시스템을 이용하는 경우, 비교적 좁은 공간에서도 성능평가를 위한 실험환경을 구축할 수 있다는 장점이 있다. 다만, 제안된 방법을 적용하기 위해서, 대상로봇은 선속도(v_{ref})와 각속도(w_{ref})에 대한 참조값(reference)을 전송받고 속도 및 조향제어가 가능하도록 기능적으로 미리 구현되어 있어야 한다.

3. 성능 평가 사례

3.1 대상 로봇

제안된 성능지표에 기반한 평가 사례로서, 본 논문에서는 **Figure 4**에 나타난 바와 같은 자력부착형 선체외벽 등반로봇(hull-climbing robot)의 성능을 평가하고자 한다. 본 연구에서 구현된 로봇은 높은 강도를 위해 스테인리스강 재질의 베이스프레임을 기반으로 설계되었다. 또한 수직벽면에서 구동륜의 슬립을 줄이기 위한 목적으로 6개의 구동륜이 장착되도록 설계되었다. 보다 구체적으로, 좌·우 구동륜은 독립적인 두 개의 모터로 구동되며, 각각 기어를 통해 3개의 구동륜에 직접 동력이 전달된다.

자석 모듈이 자속차폐 구조물 없이도 자속의 방향이 철판에 집중될 수 있도록 영구자석을 할박 배열로 구성하였고, 이를 등반로봇의 무게 중심부에 배치하였다. 할박 배열은 특수한 자기배열로 자기부상 스테이지와 효율적인 잠금장치 등에 사용되고 있다**[14][15]**. 본 논문에서 등반 로봇의 자석 모듈에 사용된 할박 배열은 Hilton *et al.* **[16]**이 제안한 모델을 기반으로 구현되었다. 할박배열 자석 모듈이 장착됨으로써, 철판과 자석 모듈 간의 거리에 따른 자속이 증가될 수 있었다. 또한, 기존의 자석 배열 로봇에 비하여 자속 차폐를 위한 구조물이 불필요하므로 모듈의 구조가 단순화될 수 있었다.

본 논문에서 성능평가 실험에 이용된 대상로봇의 세부적인 제원은 **Table 1 ~ Table 3**에 열거되어 있다. 여기에는 로봇 자체의 제원을 비롯하여 로봇을 구성하는 구동모터 및 영구자석의 제원을 각각 포함한다.

Table 1: Specifications of the mobile robot

Items	Details
size	300 × 300 × 120 [mm]
weight	10 ± 0.5 [kg]
wheel diameter	60 [mm]

Table 2: Specifications of driving motor

Items	Details
model	BLDC PGM32L-3260E
working voltage	24 [V]
nominal RPM	138 [rpm]
efficiency	80 [%]
power output	93 [W]
gear ratio	70 : 1
encoder resolution	512 [PPR]

Table 3: Specifications of permanent magnet

Items	Details
model	NdFeB 35
size	50 x 25 x 20 [mm]
adhesive force	40 [Kg]

3.2 모션캡처시스템 기반의 성능평가환경 구축

3.2.1 실험 세트 및 속도 프로파일

본 논문에서는 성능 평가를 위해 가로 1.2m, 세로 2.4m, 두께 6mm의 철판을 **Figure 5**와 같이 수직 벽면에 부착하고, 등반로봇이 철판 위에 부착된 상태로 주행할 수 있는 실험환경을 구축하였다. 또한, 주어진 실험환경 내에서 등반로봇의 주행 가능 거리를 산출하여 거리에 따른 속도 프로파일을 설계하였다. 속도 프로파일은 **Figure 5**에서 나타난 바와 같이 사다리꼴 형태로서, 가속구간, 등속구간, 감속구간으로 구분된다. 본 실험에서 등반 로봇은 철판의 최하단부를 원점으로, 0.4m 위치에서 출발하여 1.7m를 주행한 후 2.1m 지점에서 정지하도록 설정되었다.

3.2.2 성능 평가 시스템의 하드웨어 구성

본 논문에서 제안된 성능평가 방법은 등반로봇의 폐루프 위치제어시스템을 기반으로 구현된다. 이를 위해서는 로봇의 위치와 방향정보를 실시간으로 획득할 수 있어야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 NaturalPoint사의 OptiTrack 모션캡처시스템(motion capture system)**[17]**을 이용하여 자세추정 시스템을 구현하였다.

등반로봇의 내부 제어기에는 추측항법을 통해 로봇의 현재좌표를 실시간으로 산출하도록 구현되어 있다. 그러나 로봇이 등반과정에서 발생하는 슬립으로 인해 위치 정확도가 현저히 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 로봇의 외부에 설치된 6대의 모션캡처 카메라를 이용하여 로봇의 위치 및 방향정보를 추정하고, 추정된 정보를 토대로 등반로봇의

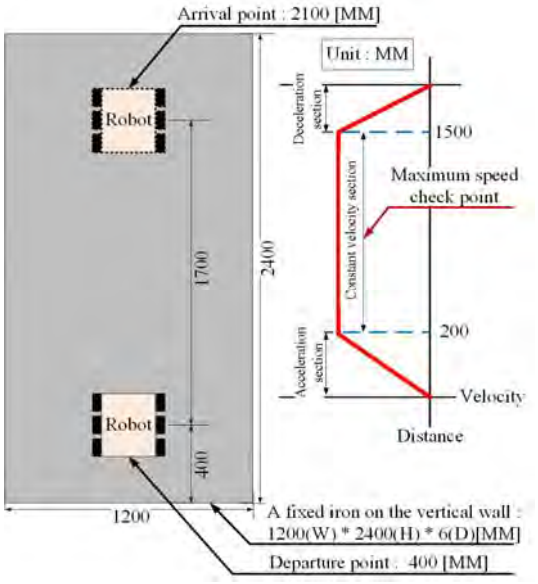

Figure 5: Experiment conditions and speed profiles

속도제어를 수행하도록 시스템을 구성하였다. **Figure 6**은 수직등반속도를 평가하기 위한 제어 및 모니터링 시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다. 전체 시스템은 크게 로봇부, 모션캡처부, 제어부로 구성되어 있으며 이들은 **Figure 3**에서 나타난 바와 같이 페루프 위치제어시스템으로 구성된다. 여기서 모션캡처시스템을 구성하는 카메라의 제원은 **Table 4**와 같다.

Table 4: Specifications of motion capture camera

Items	Details
model	Flex 13
resolution	1.3 MP(1280 * 1024)
frame rate	120 FPS
FOV	56°
interface	USB 2.0
latency	10 ms

Figure 7은 로봇의 성능실험을 위해 구현된 실험 환경을 나타내고 있다. 여기에는 등반로봇의 주행실험을 위한 철판과 6대의 카메라가 각각 위치해 있다. 실제 등반로봇의 위치추적은 다수의 카메라로부터 획득된 영상에서 적외선 반사구(reflecting sphere)의 잔영을 추적하는 방식으로 이루어진다. 본 연구에서는 **Figure 4**에서와 같이 4개의 반사구를 배치한 반사패턴(reflective pattern)을 등반로봇의 상단에 부착하고, 모션캡처 전용프로그램(MOTIVE)을 통해 이 반사패턴의 3차원 위치와 자세를 실시간 추적하도록 구현하였다.

본 연구에서는 MOTIVE의 기능 중 서버(server)기능과 스트리밍(streaming)기능을 활성화시켜 실시간 모션정보를 네트워크를 통해 클라이언트(client)에 전송되도록 구현하였다. **Figure 8**은 MOTIVE의 실행 장면으로 6대의 카메라로부터 획득된 영상을 분석하여 3차원 공간상에 놓인 반사패턴의 위치와 자세를 추정하는 사례를 보여주고 있다.

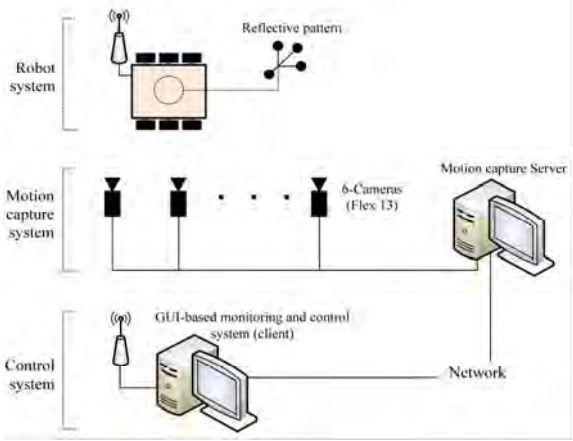

Figure 6: Overall system configuration for evaluating vertical climbing speed of a wall-climbing robot

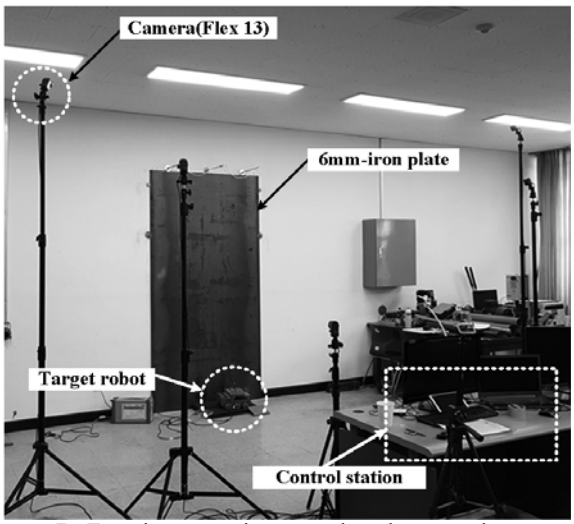

Figure 7: Experiment environment based on motion capture system

3.2.3 성능 평가용 제어 시스템

본 연구에서는 성능 평가 시 사용자 편의성을 위하여 GUI기반의 등반로봇 제어 프로그램을 구현하였다. 등반로봇 제어 프로그램은 독립된 PC상에서 구동되며 하나의 클라이언트 프로그램으로서 서버와 연동되어 반사패턴의 위치와 자세정보를 실시간으로 전송받을 수 있도록 구현되었다. 제어 프로그램의 주된 기능은 등반로봇의 주행 시작점과 목표점의 간단한 설정만으로 자동적으로 로봇이 주행하도록 하고, 주행이 끝나면 실시간 위치 및 방향정보를 텍스트 파일 형태로 저장하는 것이다. **Figure 9**는 제어프로그램의 실행 장면을 나타내는 것으로서, 로봇의 초기위치(0cm, 40cm)에서 목표위치(0cm, 210cm)로 이동하는 동안의 등반속도를 그래프로 출력하고 있다.

등반로봇 제어 프로그램은 무선 통신을 통해 등반로봇과 연동되며, 매 샘플시간마다 로봇의 선속도 및 각속도에 대한 참조값을 산출하여 등반로봇에 전송한다. 일단 GUI화면을 통해 이동명령이 입력되면, 로봇은 원하는 목표위치를 향해 주행하며 목표위치에 도달하게 되면 로봇은 정지한다.

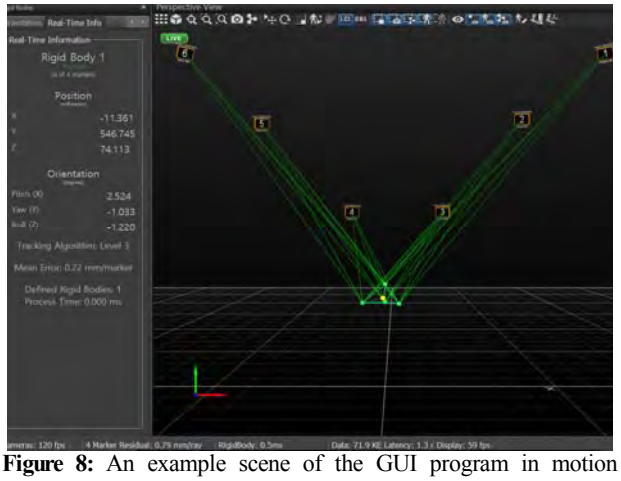

Figure 8: An example scene of the GUI program in motion capture server

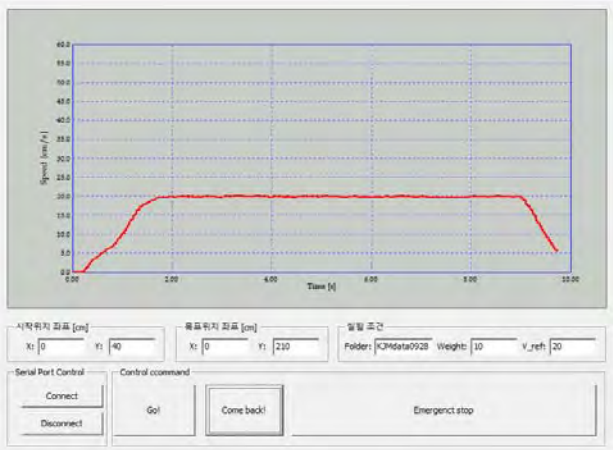

Figure 9: Control and monitoring system for performance evaluation of a wall-climbing robot

3.3 성능 평가 결과

3.3.1 수직부착하중

수직부착하중을 평가하기 위하여, **Figure 10**과 같이 등반로봇을 주행벽면에 수직방향으로 부착하여 2.3.1절의 평가절차에 따라 부하하중을 추가하면서 슬립 데이터를 수집하였다. 시간에 따른 슬립의 상태를 충분히 반영하기 위하여, 본 연구에서는 슬립측정 지연시간을 5분으로 설정하였다. **Figure 11**은 슬립 측정실험 결과로서 등반로봇의 하중과 측

Figure 10: An example scene of measuring the slip of a wall-climbing robot against adding load

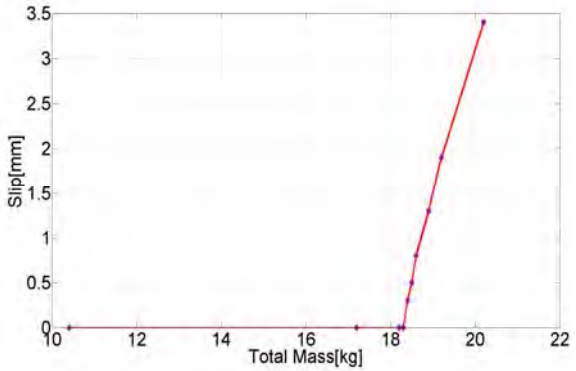

Figure 11: Experiment results of adhering slips measured with increasing load

정된 슬립간의 관계를 도시한 것이다. 등반로봇의 자체 중량인 10.5kg에서 지연시간동안 슬립은 발생하지 않았으며, 부하하중을 점차로 인가하여 8kg이 되었을 시점(총 하중 18.5kg)부터 슬립이 조금씩 발생되었다. 이 시점부터 부하를 인가하였을 때 슬립의 변화 추이를 관찰한 결과, 하중 100g당 대략 0.3mm의 추가적인 슬립이 발생하였다.

최종적으로 본 평가실험을 통해 대상 등반로봇의 최대 수직부착하중은 슬립이 발생하지 않은 시점의 하중인 18.5kg으로 평가되었다.

3.3.2 수직등반속도

[무부하하중에서 주행속도 평가]

본 평가실험에서는 우선 추가적인 하중을 가하지 않은 (즉 등반로봇 자체하중이 가해진) 상태에서 수직등반속도를 평가하였다. 이 실험에서 평가구간은 총중량 10.5kg에 대하여 선속도 20cm/s에서 50cm/s의 구간까지 매 10cm/s의 간격으로 설정되었다. **Figure 12**는 각 속도구간별로 측정된 속도를 각각 출력한 것이다. 여기서 속도가 높아질수록 출력된 그래프의 시간구간이 짧은 이유는 속도가 높을수록 목표위치에 도달하는 시간이 짧아지기 때문이다. 이 결과를 토대로 무부하하중에서의 최대 수직등반속도는 45cm/s로 평가되었다.

[최대 수직부착하중에서의 주행속도 평가]

본 연구에서는 로봇에 부하를 인가하여 최대 수직부착하중이 18.5kg인 상태에서 주행속도를 평가하였다. 이 평가실험에서 속도 평가구간은 무부하하중 시와 동일하게 설정되었다. **Figure 13**은 각 속도구간별로 수집된 등반로봇의 수직등반속도를 나타내고 있다. 여기에서 20~40cm/s의 범위에서는 등반로봇의 속도가 설정치 근방에서 출력되고 있으나, 속도 설정치가 45cm/s인 경우에는 출력치가 설정치에 도달하지 않고 있음을 확인할 수 있다. 이는 대상 등반로봇의 구동모터가 허용하는 최대출력을 내고 있음을 나타내는 것으로서, 이 데이터가 등반로봇이 가지는 최대 수직등반속도를 산출하기 위해 활용될 수 있음을 의미한다. 본 연구를 통해 대상로봇의 최대 수직등반속도는 41cm/s로 산출되었다.

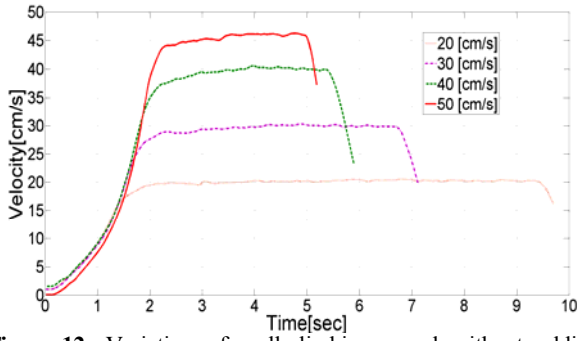

Figure 12: Variation of wall-climbing speed without adding load (total weight: 10.5kg)

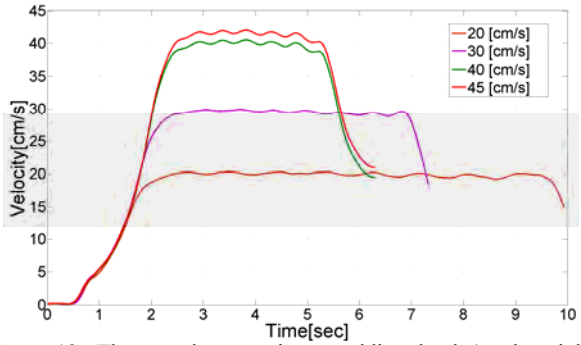

Figure 13: The speed at maximum adding load (total weight: 18.5kg)

최대수직부착하중 상태에서 등반로봇의 최대 수직등반속도는 무부하하중 시에 비하여 4cm/s가 감소됨을 알 수 있다. 특히 **Figure 13**을 토대로 볼 때, 모터의 출력이 최대가 되면 매 시간 속도 변화가 일정하지 않음을 알 수 있다. 따라서 모터 수명과 등반로봇의 안전성을 확보하기 위하여 최대출력의 70%범위인 29cm/s 이하에서 동작시키는 것이 좋을 것으로 판단된다. 실제로 **Figure13**에서 등반속도가 30cm/s인 경우 최대 출력 시에 비해 안정적인 속도 변화 패턴을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 논문은 선체 벽면에서 등반이 가능한 로봇을 대상으로 성능 평가를 위한 방법을 다루었다. 등반로봇에 대한 부착력 해석을 토대로, 부착력과 주행성이 등반로봇의 성능평가에 있어 주요 요인이 됨을 보였다. 이를 토대로, 본 논문은 두 가지 구체적인 성능지표인 수직부착하중과 수직등반속도를 제시하였다. 또한 각각의 성능평가 방법 및 절차를 제안하였다. 제안된 방법은 자체 개발된 등반로봇에 적용되었고, 각각의 평가방법에 따라 구축된 실험환경에서 평가되었다.

본 연구에서 제시된 성능평가지표는 특히 등반로봇 분야에서 다양한 활용이 가능할 것으로 기대되며, 이와 더불어 경로추종, 장애물 회피 등 추가적인 성능평가방법에 관한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2015R1C1A1A01053126). 또한, 이 논문은 2016년도 목포해양대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] K. Tanneberger, A. Grasso. “MINOAS deliverable (D1): Definition of the inspection plan/definition of acceptance criteria,” [Online] Available: http://minoasproject.eu/excibition/Publications/PDF/D1.pdf,, Accessed August 26, 2016.

[2] A. Mohammed, E. Markus, and B. Felix, “Design and control of MIRA: A lightweight climbing robot for ship inspection,” International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy, vol. 55, pp. 128-135, 2015.

[3] Y. S. Kim and S. C. Kil, “Latest welding technology for storage and transportation facilities of liquified natural gas,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 40, no.1, pp. 17-27, 2016 (in Korean).

[4] R. D. Dethe and S. B. Jaju, “Developments in wall climbing robots: A review,” International Journal of Engineering Research and General Science, vol. 2, no. 3, pp. 33-42, 2014.

[5] H. Kang and J. S. Oh, “Development of a drive control system of a hull cleaning robot reflecting operator’s convenience,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 4, pp. 391-398, 2013 (in Korean).

[6] H. S. Choi, K. Y. Kwon, K. R. Chung, J. N. Seo, and H. S. Kang, “Development of cleaning module and operating system of underwater robot for ship hull cleaning.” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 4 pp. 553-561, 2009 (in Korean).

[7] C. H. Jung, T. K. Nam, and J. S. Jeong, “A study on the improvement of salvage procedures through the collision accident of ships,” The Journal of Navigation and Port Research, vol. 36, no. 10, pp. 851-856, 2012 (in Korea).

[8] M. O. F. Howlader and T. P. Sattar, “Development of magnetic adhesion based climbing robot for non-destructive testing,” Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEEC), 2015 7th. IEEE, pp. 105-110, 2015.

[9] X. Gao, J. Sho, F. Dai, C. Zong, W. Guo, and Y.

Bai, “Strong magnetic units for a wind power tower inspection and maintenance robot,” International Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 9, no. 5, pp. 1-9, 2012.

[10] J. C. Grieco, M. Prieto, M. Armada, and P. de Santos, “A six-legged climbing robot for high payloads,” Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications, vol. 1, pp. 446-450, 1998.

[11] M. G. Lee, S. J. Yoo, J. W. Park, and S. H. Kim, “Modular type robot for field moving and tree climbing,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, vol. 18, no. 2, pp. 118-125, 2012 (in Korean).

[12] J. Ryu, and J. W. Jeon, “Research for the standardization technology according to published autonomous navigation/coverage test of IEC 62929,” Institute of Control, Robotics and Systems Conference on, pp. 247-248, 2016 (in Korean).

[13] W. S. Lim, S. H. Sakong, J. O. Lee, J. H. Jung, S. S. Byun, and J. H. Oh, “A study of performance test for fire fighting robot,” Korean Institute of Fire Science & Engneering Conference on, pp. 361-364, 2012 (in Korean).

[14] T. K. Nam and Y. J. Kim, “A study on the modeling for the control of magnetic levitation stage,” Journal of the Korean Society of Marine Engineers, vol. 27, no. 7, pp. 862-871, 2003 (in Korean).

[15] L. Yan, L.Zhang, T. Wang, Z. Jiao, C. Y. Chen, and I. Chen, “Magnetic field of tubular linear machines with dual halbach array,” Progress In Electromagnetics Research, vol. 136, pp. 283-299, 2013.

[16] J. E. Hilton and S. M. McMurry, “An adjustable linear Halbach array," Journal of Magnetism and Magnetic Materials vol. 324, no. 13 pp. 2051-2056, 2012.

[17] Point, Natural, “Optitrack,” Natural Point, Inc., 2011, [Online]. Available: http://www. naturalpoint. com/optitrack/, Accessed February 22, 2014.