

유연한 등반 로봇의 동역학 해석

Dynamic Analysis of a Compliant Wall Climbing Robot

*남성민, 오종균, 이기욱, 김종원, #서태원

*Sungmin Nam, Jongkyun Oh, Giuk Lee, Jongwon Kim, #TaeWon Seo(taewon_seo@yu.ac.kr)

¹서울대학교 기계항공공학부, ²영남대학교 기계공학부

Key words : multi-body dynamics, transitioning, wall climbing robot, magnetic force modeling

1. Introduction

최근 다양한 산업의 적용을 목적으로 등반 로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 등반 로봇이란 사람이 작업하기 어려운 극한 작업현장에서 작업자를 대신하여 작업을 수행하는 로봇을 의미한다. 현재 다양한 지형 장애물을 지닌 극한 작업현장에 대한 접근을 목적으로 많은 등반 로봇들이 연구 중이다. [1]

현재까지 개발된 등반 로봇들은 기구학 해석에 대한 연구는 많이 진행된 반면, 동역학 해석에 대한 연구는 거의 진행되고 있지 않다. [2] 하지만 로봇의 동역학 해석은 등반 로봇의 최적화 제어 및 로봇의 지능화를 위해 반드시 수행되어야 될 연구 과제이다.

따라서 이번 논문에서는 현재 개발중인 등반 로봇인 Combot[3]에 대한 동역학 해석을 진행하는 것을 목표로 한다. Combot의 Internal transition에 대한 동역학 분석을 목표로 하였으며, 이를 위해 라그랑지안 식을 사용하였다. 동역학 분석에서의 외부 힘은 로봇이 벽면에서 받는 외력과, 흡착 유닛으로 사용한 자석의 부착력을 고려하여 진행하였다.

2. Architecture Description

이번 분석의 대상이 되는 등반 로봇(이하 Combot)의 형상을 살펴보면 Fig. 1 과 같다. 등반 로봇은 3 개의 바디로 이루어져 있으며 각 바디는 자석벨트가 장착 되어 있다. 각 바디는 2 개의 링크와 5 개의 조인트를 통해 각각 연결이 되며, 조인트는 3 개의 능동 조인트와 2 개의 수동 조인트로 이루어져 있다. 그림에서 보이는 J2, J4, J5 는 능동 조인트로 토크 제어 모터가 달려있으며, J1, J3 는 수동 조인트로 비틀림 스프링이 달려있다.

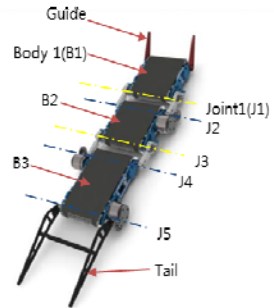
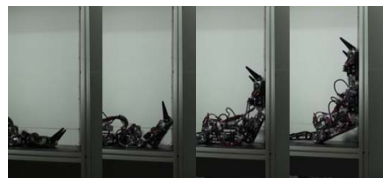
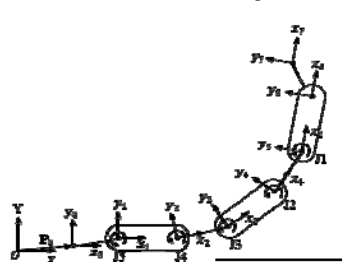


Fig. 1 Configuration of Combot

Figure 2 a)는 Combot의 실제 internal transition의 모습을 나타내며, b)는 이러한 internal transition의 동역학 분석을 위하여 Combot의 기구학을 분석한 모델을 묘사하고 있다. 회전 축은 모두 Z 축으로 XY 평면에 수직하다.



a) Photos of internal transitioning of Combot



b) Kinematics of Combot
Fig. 2 Internal transition

3. Equation of Motion

로봇에 라그랑지안 식을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right] - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q}_e + \boldsymbol{\tau}_a \quad (1)$$

여기서 왼쪽 항은 로봇의 고유 형상으로 결정되며, 오른쪽 항은 능동 관절의 토크와 외부 힘으로 구성된다. 외부 힘은 벽의 반발력과 자석에 의한 흡착력으로 인해 생기며 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\mathbf{Q}_e^T \dot{\mathbf{q}} = \sum_{i=1}^3 {}^0 \boldsymbol{\tau}_{e_i}^T ({}^0 \mathbf{V}_{e_i}) \quad (2)$$

$${}^0 \boldsymbol{\tau}_{e_i} = \begin{bmatrix} {}^0 \boldsymbol{\tau}_{w_i} \\ {}^0 \boldsymbol{\tau}_{m_i} \end{bmatrix} {}^0 \mathbf{V}_{e_i} = \begin{bmatrix} {}^0 \mathbf{V}_{w_i} \\ {}^0 \mathbf{V}_{c_i} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (2)에서 $\mathbf{Q}_e = \mathbf{Q}_w + \mathbf{Q}_m$ 으로 벽에 의한 반발력과 자석에 의한 흡착력의 합을 나타낸다. ${}^0 \mathbf{V}_{e_i}$ 는 외부 힘의 작용점의 속도를 나타내는 벡터이며, 각각의 작용점 속도는 자코비안 행렬을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^0 \mathbf{V}_{w_i} = \mathbf{J}_{w_i} \dot{\mathbf{q}}, \quad {}^0 \mathbf{V}_{c_i} = \mathbf{J}_{c_i} \dot{\mathbf{q}} \quad (4)$$

식 (4)를 통해 오른쪽 항의 Generalized force 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Q}_e = \mathbf{J}^T ({}^0 \boldsymbol{\tau}_e) \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{w_i} \\ \mathbf{J}_{c_i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

로봇은 internal transition 을 하는 동안 Fig. 3 과 같이 외부 힘의 작용점이 바뀐다. 로봇의 첫 번째 바디는 Fig. 3 에서 phase 1, 2, 3 를 걸쳐 작용점이 바뀌며, 두 번째와 세 번째 바디는 phase 2, 3 을 걸쳐 작용점이 바뀌게 된다. 이는 식 6 과 같이 collecting matrix 를 통한 자코비안 행렬 \mathbf{J} 의 교체를 통해 나타낼 수 있다.

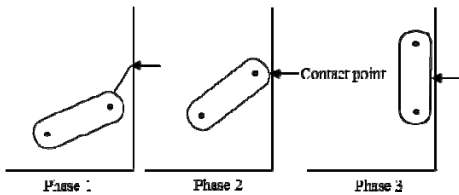


Fig. 3 Contact point changes according to Phases

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_7 & \mathbf{J}_6 & \mathbf{J}_{c_1} \\ \mathbf{J}_4 & \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_{c_1} \\ \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_{c_1} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{J}_5 & \mathbf{J}_{c_2} \\ \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_{c_2} \end{bmatrix}, \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{J}_2 & \mathbf{J}_{c_3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)에서 \mathbf{H}_i 행렬은 collecting matrix 이며, i 번째 바디에 작용하는 외부 힘에 대한 자코비안 행렬을 모아놓은 것이다. \mathbf{H}_i 행렬의 n 번째 행은 n 번째 바디의 internal transition 에 대한 지표이고, m 열은 m 번째 phase 를 알려 주는 지표이다.

최종적으로 selecting vector \mathbf{r} 과 \mathbf{c} 의 도입을 통하여, 동역학 식을 다음과 같이 표현 하였다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (i, j, k = 1, 2, 3) \\ = \sum_{k=1}^3 \mathbf{c}_j^T \mathbf{H}_k^T \mathbf{r}_i ({}^0 \boldsymbol{\tau}_{w_k}) + \sum_{k=1}^3 \mathbf{c}_3^T \mathbf{H}_k^T \mathbf{r}_i ({}^0 \boldsymbol{\tau}_{m_k}) + \boldsymbol{\tau}_a \quad (7)$$

4. Conclusion

이번 논문에서는 라그랑지안 식을 통해 Combot 의 동역학 식을 도출해내었다. 이러한 동역학 식은 추후 동역학 시뮬레이션 프로그램 (Version V7 R1, RecurDyn, FunctionBay, Korea)을 통해 그 실효성을 검증할 계획이다. 또한 이번 연구를 통해 얻어낸 식을 통하여 로봇의 최적화 제어 및 지능화를 진행할 계획이다.

5. Reference

1. Baeksuk Chu, Kyungmo Jung, Chang-soo Han and Daehie Hong, 2010, "A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11(4) pp.633~647.
2. Giuk Lee, Kunchan Seo, Seokwoo Lee, Junhwan Park, Hwang Kim, Jongwon Kim, TaeWon Seo, 2011, "Compliant Track-Wheeled Climbing Robot with Transitioning Ability and High-Payload Capacity," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Phuket(Thailand) pp.2020-2024.
3. Giuk Lee, Geeyun Wu, Sun Ho Kim, Jongwon Kim, and TaeWon Seo, 2012, "Combot: Compliant Climbing Robotic Platform with Transitioning Capability and Payload Capacity," Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minnesota(USA).