

비평탄 지형에서의 경사 인식을 통한 전동 휠체어 제어 알고리즘 개발

공정식*

¹인덕대학교 기계설계과

Design of an Electric Wheelchair Control Algorithm by Slope Recognition on uneven terrain

Jung-Shik Kong^{1*}

¹Department of Mechanical Design, Induk University

요약 본 논문은 경사 인식을 통한 비평탄 지형에서의 전동 휠체어 제어 알고리즘에 관한 내용이다. 최근 고령자가 인구가 급격하게 증가되고 있으며, 이에 따라 휠체어 사용 인구 또한 급격하게 증가되고 있다. 하지만 대부분의 휠체어는 사용자의 안전성을 확보할 수 있는 어떠한 장치 없이 사용자가 직접 제어하고 있다. 이로 인해 경사로에서는 중력의 영향으로 인한 차량 제어에 어려움을 겪게 된다. 이에 본 논문에서는 차량이 경사지에서 이동할 경우 평지에서 이동하는 것과 유사한 모션 제어를 수행할 수 있도록 차량 제어 알고리즘을 제안한다. 이때 다른 센서를 적용하지 않고 사용자의 제어 입력에 대비 차량의 이동 상태를 파악하여 차량이 경사지에 이동하는 과정에서 발생하는 오차를 인식하여 이를 최소화 할 수 있도록 제어기를 구성함으로써 차량이 사용자가 원하는 상태로 제어할 수 있도록 한다. 이러한 경사에 의해 발생하는 오차 및 이에 대한 차량 제어에 대해 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

Abstract This paper evaluated an electric wheelchair control algorithm by slope recognition on uneven terrain. Nowadays, the population using wheelchair has been increasing rapidly due to increases in the elderly population. On the other hand, most wheelchairs are directly controlled by the user without any device capable of securing the safety of the user. This causes difficulties in wheelchair control from the influence of gravity on the slope. This paper proposes a vehicle control algorithm that can move a wheelchair similar to moving on a plane. At that time, sensors are not used to recognize the degree of the slope. All processes were verified by simulation.

Key Words : Electric wheelchair, Safety, Slope recognition, Uneven terrain, Vehicle control

1. 서론

우리나라는 최근 고령화 사회로 진입하고 있다. 2010년 11.3%였던 노인비율은 2018년도 14%인 고령사회로, 2026년에는 20%가 넘어 초고령사회로 진입할 것으로 예상된다. 이에 따라 인구 고령화로 인한 고령용품에 대한 수요가 급격하게 증가될 것으로 예상되며, 특히 나이가 들수록 근육이 감소함에 따라 이동에 어려움을 겪게 된다. 이에 이러한 이동 불편을 해결할 수 있는 휠체어, 보

행보조기[1-3], 실버카 등이 각광받고 있다. 이 중에서 가장 많이 사용되고 있는 기기는 휠체어으로써 공적급여 지급으로 인해 사용인구가 급격하게 증가되고 있다. 휠체어는 크게 수동휠체어와 전동 휠체어로 나뉘며 대부분 전동 휠체어를 사용하고 있고, 대부분 조이스틱을 이용하여 차량을 조작[4]하는 것들이 대부분이다. 그리고 최근 이러한 단순 조작의 휠체어에서 극복하기 위해 다양한 연구들이 진행되고 있으며 대표적인 기술로는 휠체어의 장애물 인식 및 회피 내비게이션 기능[5], 전동휠체어

인덕대학 연구비에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Jung-Shik Kong(Induk Univ.)

Tel: +82-10-8642-9887 email: jskong@induk.ac.kr

Received August 25, 2014 Revised September 10, 2014

Accepted September 11, 2014

탑승자의 생활지원기능[6], 사용자의 안정성을 고려한 ABS 브레이크 시스템 적용[7]에 관한 연구들이다. 이와 더불어 전동 휠체어의 단점인 상지 근육의 감소를 줄여 드는 문제를 극복하면서 수동 휠체어가 가지고 있는 문제점인 경사 등에서의 조작성 불편함을 줄일 수 있는 점을 극복할 수 있는 힘 보조형 휠체어[8-12]에 대한 연구 또한 다양하게 이루어지고 있다.

하지만 아직 대부분의 전동 휠체어에서 가장 기본적으로 가지고 있는 문제점은 경사로에서의 차량 제어 문제이다. 이는 기본적으로 경사로에서는 휠체어가 중력의 영향을 받으나 대부분 휠체어 내부에 경사로를 손쉽게 극복할 수 있는 제어 기술이 적용되지 않아 경사로에서 휠체어가 사용자가 원하는 데로 이동하지 않고 중력에 의해 차량 움직임에 변화가 발생하는 문제점들이 발생한다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 다양한 연구가 존재하는데 대표적인 방법으로는 경사도에서 속도 및 위치 제어[13]를 고려하던지, 언덕에서 내려올 때 브레이크 제어를 수행하는[14] 등의 연구를 진행하고 있다.

본 논문에서는 전동 휠체어가 경사로에서 중력에 의한 처짐을 방지하기 위해 임의의 센서 대신에 바퀴에 걸리는 속도로 이를 추정하고 이를 통해 경사로를 극복할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 먼저 평지에서 임의의 입력을 인가할 경우 입력 지령에 따른 차량 속도와 각속도를 해석한다. 그리고 실제 차량에 임의의 지령을 입력할 경우 평지에서는 입력에 따른 차량 정보의 차이가 발생하지 않으나 경사에서는 차량의 속도가 중력 가속도의 영향으로 인해 지령과 차이가 나타나므로 중력에 영향을 외란으로 정의하고 이를 극복할 수 있는 알고리즘을 제시함으로써 경사에서도 차량의 이동 성능을 향상시킬 수 있도록 하였다. 그리고 이러한 상황에 대해 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 휠체어 동적 시스템

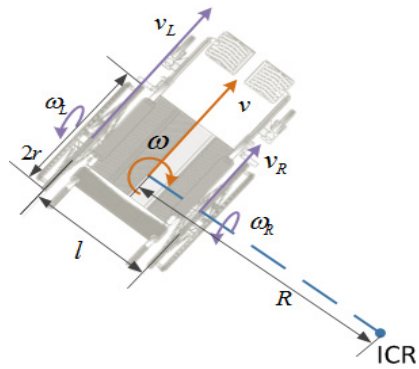
2.1 휠체어 동적 모델링

2.1.1 휠체어 기구학

휠체어를 원활하게 이동하기 위해서 사용자의 이동 의지에 따른 휠체어의 이동 경로 및 이때의 차량의 속도 가속도등을 파악하여야 한다. 대부분의 휠체어는 차동구동형 모델로 구동되므로 본 논문에서는 차동구동형 차량

모델을 기준으로 차량 기구학을 해석하였다. Fig. 1은 휠체어의 기구적 해석이다.

Fig. 1에서 휠체어의 구동 모델은 Ackerman 구동[15]을 기본으로 하며 이는 차량의 순간 회전 중심(ICR: Instantaneous Center of Rotation)을 중심으로 휠체어의 4바퀴가 모두 회전하게 될 경우 차량이 동일한 각속도를 가지고 이동하므로 미끄러짐 없이 구동하는 방식이다. 이러한 차량을 기준으로 하였을 때 조이스틱과 같은 휠체어 제어 입력을 차량의 선속도 v 와 차량의 각속도 ω 로 해석하여 이에 따른 차량의 각 바퀴에 걸리는 선속도 및 각속도, 그리고 ICR 위치를 식(1)-(3)과 같이 나타낼 수 있다.



[Fig. 1] Kinematic model of the wheelchair

$$v_R = v + \frac{l}{2}\omega, v_L = v - \frac{l}{2}\omega \quad (1)$$

$$\omega_R = \frac{v_R}{r}, \omega_L = \frac{v_L}{r} \quad (2)$$

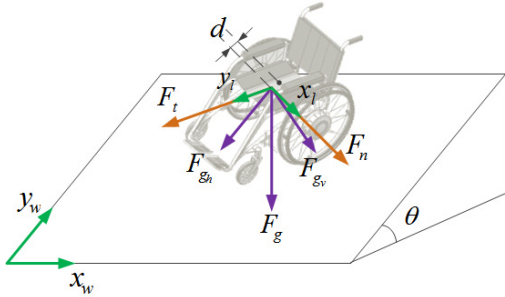
$$R = \frac{l}{2} \left(\frac{v_R + v_L}{v_R - v_L} \right) \quad (3)$$

여기서 $v_R, v_L, \omega_R, \omega_L, l, r, R$ 은 각각 오른쪽 바퀴의 선속도, 왼쪽 바퀴의 선속도, 오른쪽 바퀴의 각속도, 왼쪽 바퀴의 각속도, 차량의 폭, 바퀴의 반지름, 순간회전 중심으로부터 차량 중심으로부터의 거리를 나타낸다.

2.1.2 휠체어 동적 모델

휠체어는 평지에서 이동할 경우 중력에 의한 영향이 차량에 수직으로만 작용할 뿐 이동 방향에 대한 영향은 없으나, 경사지에서는 중력에 의한 차량 처짐이 발생하

므로 차량이 중력에 영향을 받아 발생하는 문제를 해결하기 위해 먼저 평지에서서의 휠체어의 동적 모델 Fig. 2와 같이 정의하였다.



[Fig. 2] Dynamic model of the wheelchair

Fig. 2에서 (x_w, y_w) 와 (x_l, y_l) 는 각각 경사면에서의 절대좌표계 및 차량 좌표계를 나타내며, F_t 와 F_n 은 각각 전진방향으로 작용하는 힘과 회전에 의해 작용하는 힘이다. 또한 F_g 는 휠체어에 작용하는 중력에 의해 발생하는 힘으로써 이는 수직항력인 F_{g_v} 와 중력에 의해 경사면과 수평으로 작용하는 힘인 F_{g_h} 로 나눌 수 있다. 이때 차량에 작용하는 F_t 와 F_n 은 다음과 같이 나눌 수 있다 [16].

$$F_t = F_{t_i} + F_{t_g}, F_n = F_{n_i} + F_{n_g} \quad (4)$$

여기서 차량에 가하는 힘은 크게 휠체어 구동부에 의해 작용하는 힘인 F_{t_i} , F_{n_i} 와 중력에 의해 작용하는 힘인 F_{t_g} 와 F_{n_g} 로 나뉘며 차량 바퀴에 의해 작용하는 힘인 F_{t_i} 와 F_{n_i} 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$F_{t_i} = m\dot{v}, F_{n_i} = m\frac{v^2}{R} \quad (5)$$

여기서 m은 탑승자를 포함한 휠체어의 질량을 나타낸다. 또한 F_{t_g} 와 F_{n_g} 는 F_{g_h} 에 영향을 받으며 이는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} F_{t_g} &= mg\sin(\theta)\sin(\alpha) \\ F_{n_g} &= mg\sin(\theta)\cos(\alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

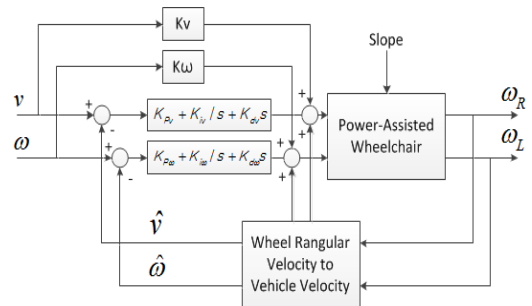
여기서 g 는 중력가속도를 나타내며 θ 는 경사 기울기, α 는 절대좌표계 (x_w, y_w) 와 차량 좌표계 (x_l, y_l) 사이의 각도를 나타내며 이는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\alpha = \int \omega dt \quad (7)$$

3. 경사 제어 알고리즘

3.1 휠체어 제어 알고리즘

본 논문에서 적용된 휠체어에 대한 제어를 수행하기 위해 Fig. 3과 같이 차량 제어 알고리즘을 구현하였다.

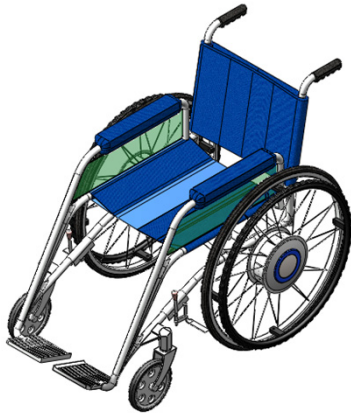


[Fig. 3] Control algorithm for the wheelchair

Fig. 3에서 K_{pv} , K_{iv} , K_{dv} , K_{pw} , K_{iw} , K_{dw} , Kv , $K\omega$ 는 각각 선속도에 대한 PID 제어 이득, 각속도에 PID 제어 이득, 그리고 선속도와 각속도에 대한 피드포워드 이득이다. 본 논문에서는 제어기 입력으로는 조이스틱과 같은 사용자 차량 제어 의지에 대해 차량의 선속도와 각속도로 바꾸어 입력하며 이에 대해 차량 각 바퀴에 걸리는 각속도를 측정한다. 이를 토대로 식(1), (2)에 의거하여 현재 차량의 선속도와 각속도를 추정한다. 또한 휠체어 구동에 있어 경사를 차량의 현재 각 바퀴에 걸리는 속도와 실제 차량에 인가된 속도와의 차이로 인식할 수 있으므로 이를 휠체어 제어기를 통해 제어하였으며 이때 휠체어 제어기는 PID 제어기를 적용하였다. 또한 지표의 경사를 휠체어에서 외란으로 보았으므로 이러한 외란에 대한 영향을 줄이면서 차량 제어를 수행하기 위해 피드포워드 제어기를 구성하였다.

4. 시뮬레이션

본 논문에 적용된 전동 휠체어는 Fig. 4와 같다. 본 논문에서 적용된 휠체어의 세부 사양은 Table 1과 같이 정의하였다.

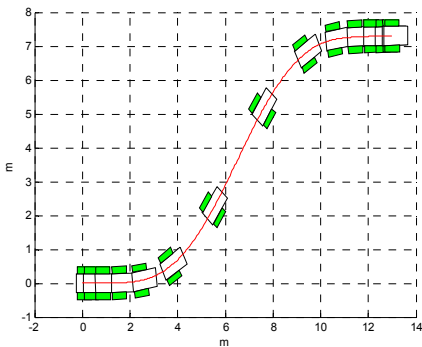


[Fig. 4] Simulation model of power-assisted wheelchair

[Table 1] Wheelchair specification

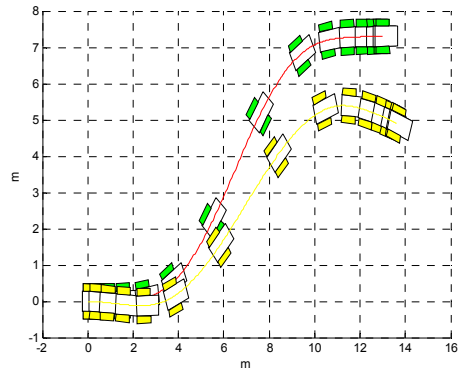
Specification	Value.
Wheelchair size	500×750×1100(mm)
Wheelchair weight	40kg
passenger weight	80kg
Wheel diameter	300mm
Motor weight	5kg

본 논문에서는 MATLAB을 이용하여 제시된 힘 보조형 휠체어 사양에 맞춰 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 평지에서 차량의 상태는 Fig. 5와 같다.



[Fig. 5] Motion of the wheelchair on the flatland

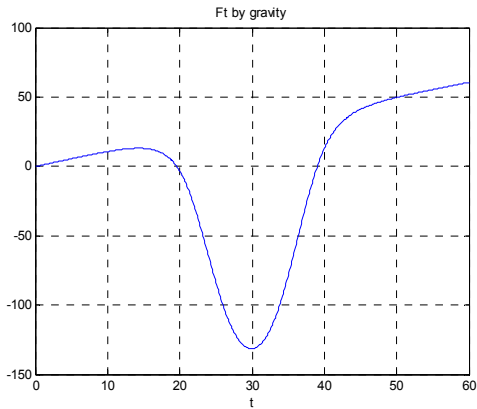
Fig. 5에서 차량의 움직임을 시그모이드 함수를 이용하여 구현하였으며 이는 차량이 수평방향과 수직방향 그리고 자연스러운 회전을 모두 표현할 수 있기 때문이다. Fig. 5에서는 평지 구동이므로 차량의 제어 전과 제어 후의 동작이 동일함을 확인할 수 있었다. 그러나 차량이 평지가 아닌 경사상황에서는 Fig. 6과 같이 차량의 움직임에 차이가 생긴다.



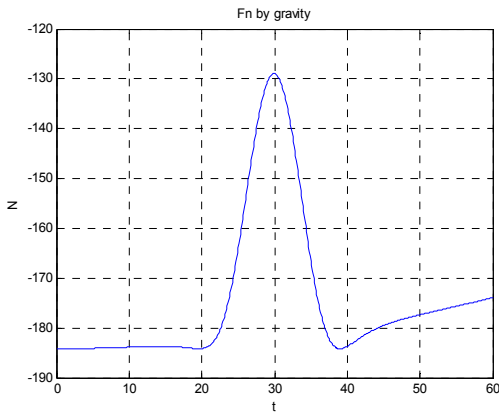
[Fig. 6] Motion of the wheelchair on the Slope

Fig. 6은 경사도가 9도일 때의 평지 이동과 비교한 그래프이다. Fig. 6에서 비교해보면 평지 이동 대비하여 중력에 영향으로 평지 주행에서 x 축 방향으로 13.0m, y 축 방향으로 7.30m인 최종 목표점 대비 2.40m에 못미치는 이동을 하였을 뿐만 아니라, 차량이 최고 높이 5.40m에서 중력의 영향으로 4.92m로 내려오게 되는 상황이 발생하였다. 이는 차량에 작용하는 중력이 Fig. 7과 같이 자세에 따라 지속적으로 작용하기 때문이다. 본 논문에서 제시된 궤적에 대해 임의의 제어 없이 차량을 이동시킬 경우 휠체어를 기준으로 전진방향에서는 최대 131.5N이 작용하며, 측면 방향으로 최대 184.15N이 작용한다.

이제 본 논문에서 제안한 알고리즘을 적용하였을 경우에 차량 제어 결과를 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 8에서는 차량을 제어하기 전과 제어하고 난 후의 차량의 상태를 나타내었으며, Fig. 8에서 붉은 실선은 평지에서의 차량의 움직임을 나타내었으며, 제어전과 제어 후의 차량의 움직임을 차량 모형 형상으로 표시하였다. 또한 Table 2에 본 논문에서 적용된 각 제어기의 이득값을 표시하였다.



(a) Longitudinal force by the gravity



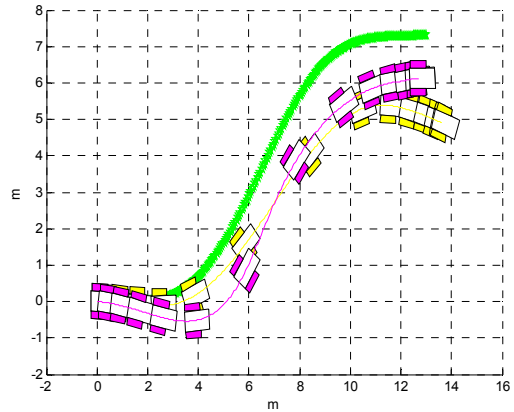
(b) Lateral force by the gravity

[Fig. 7] External force according to the gravity

[Table 2] Gains applied proposed controller

Gain	Value	Gain	Value
K_{pv}	150	$K_{p\omega}$	1.5
K_{iv}	1.2	$K_{i\omega}$	0.1
K_{dv}	0.8	$K_{d\omega}$	0.3
Kv	24.5	$K\omega$	21.5

Fig. 8에서 차량 제어를 수행하였을 경우 기존에 알고리즘을 적용하지 않은 차량 이동 시 최종 목적지 대비 2.40m 오차가 발생하는데 비해, 알고리즘을 적용할 경우 최종 위치 오차가 1.22m 오차가 발생하여 49%의 위치 보정 효과가 발생하였을 뿐만 아니라 차량이 최대 높이 6.1286m에서 6.1280m로 처짐이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.



[Fig. 8] Comparison result of the wheelchair motion applied control algorithm

3. 결론

본 논문에서는 힘 보조형 휠체어를 경사로에서 이동하고자 할 경우 차량의 동적 영향에 따른 차량 처짐을 해결할 수 있는 제어 알고리즘을 제안하였다. 그리고 이러한 경사에 대한 영향 감소를 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 본 논문을 통해 사용자의 입력에 대해 이를 차량의 선속도 및 각속도로 변환하여 이를 제어 입력으로 인지하고 PID제어기와 피드포워드 제어기를 이용하여 제어를 수행할 경우 경사에 의해 차량에 작용하는 중력의 영향을 줄일 수 있음을 증명하였다.

향후 휠체어의 경우 다양한 환경에서 차량이 이동하므로 이러한 다양한 환경에 따른 차량 내 최적 제어 및 최적 이득값을 얻을 수 있는 다양한 연구가 필요하며, 경사뿐만 아니라 둔턱 등에 의해 차량 입력 및 자세 변화를 극복할 수 있는 다양한 연구가 진행 할 것이다.

References

- [1] Hirata Y., Hara A., and Kosuge K., "Motion Control of Passive-type Walking Support System based on Environment Information", *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2921-2926, April, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570557>
- [2] Hirata Y., Komatsuda S., and Kosuge K., "Fall Prevention

- Control of Passive Intelligent Walker based on Human Model”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1222-1228, September, 2008.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2008.4651173>
- [3] Taghvaei S., Hirata Y., and Kosuge K., “Vision-based Human State Estimation to Control an Intelligent Passive Walker”, *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 146-151, December, 2010.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SII.2010.5708316>
- [4] R.A. Cooper, L.M. Widman, D.K. Jones, R.N. Robotson, and J.F. Ster, “Force Sensing Control for Electric Powered Wheelchairs”, *IEEE Trans. on Control System Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 112-117, 2000.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/87.817696>
- [5] Richard Simpson, Edmund LoPresti, Steve Hayashi, Illah Nourbakhsh and David Miller, “The Smart Wheelchair Component System,” *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 41, No. 3B, pp.429-442, 2004.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1682/JRRD.2003.03.0032>
- [6] Atsuhiko Nakamura, Gen Obayashi, Yasunari Fujimoto, Osamu Nitta, and Toru Yamaguchi, “Development of Intelligent Power Wheelchair Assisting for Frail Elderly People on Daily Life,” *Int. Joint. Conf. ICROS-SICE on* , pp.2754-2757, 2009.
- [7] Seihwan Kim and Jongsun Lee, “The Design and Manufacture for Wheelchair ABS,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol4, No. 3, pp. 312-316, 2003.
- [8] R. A. Cooper, T. A. Corfman, S. G. Fitzgerald, M.L. Boninger, D. M. Spaeth, W. Ammer, and J. Arva, “Performance Assessment of a Pushrim-activated Power-Assisted Wheelchair Control System,” *IEEE Trans. Control System Technology*, Vol. 10, No. 1, pp.121-126, 2002.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/87.974345>
- [9] Y. Takahashi, S. Ogawa, and S. Machida, “Front Wheel Raising and Inverse Pendulum Control of Power Assist Wheelchair Robot,” *In Proc. IEEE IECON*, pp.668-673, 1999.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.1999.816479>
- [10] H. Seki, T. Sugimoto, and S. Tadakuma, “Driving Control of Power Assisted Wheelchair Based on Minimum Jerk Trajectory,” *Int. Conf. on Power Electronics*, pp.1682-1687, 2005.
- [11] Chung-Hsien Kuo, Jia-Wun Siao and Kuo-Wei Chiu, “Development of an Intelligent Powe Assisted Wheelchair Using Fuzzy Control Systems,” *Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pp.2578-2583, 2008.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSMC.2008.4811684>
- [12] Yuusuke Oonishi, Sehoon Oh, and Yoichi Hori, “A New Control Method for Power-Assisted Wheelchair Based on the Surface Myoelectric Signal,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 9, pp.3191-3196, 2010.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2051931>
- [13] Sehoon Oh, Naoki Hata, and Yoichi Hori, “Integrated Motion Control of a Wheelchair in the Longitudinal, Lateral, and Pitch Directions,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 4, pp. 1855-1862, April, 2008.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2007.908533>
- [14] HiroKazu Seki, Kenji IKshihara, and Susumu Tadakuma, “Novel Regenerative Braking Control of Electric Power-Assisted Wheelchair for Safety Downhill Road Driving”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol 56, No. 5, pp. 1393-1400, May, 2009.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2014747>
- [15] G. Dudek and M. Jenkin, “Computational Principles of Mobile Robot,” *Cambridge university press*, pp.26-27, 2000
- [16] Won-Young Lee, Seung-Hyun Lee, Mun-Suck Jang, and Eung-Hyuk Lee, “A Study on Methods for Improving the Straightness of the Intelligent Walking to Move on Slope”, *Int. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, pp. 536-541, 2013.

공 정 식(Jung-Shik Kong)

[정회원]



- 1998년 2월 : 인하대학교 자동화공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 인하대학교 자동화공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2009년 2월 : 대덕대학교 로봇과 전임강사
- 2009년 3월 ~ 현재 : 인덕대학교 기계설계과 조교수

<관심분야>

지능제어, 재활공학, 지능형 로봇 및 제어