

힘 보조형 스마트 휠체어를 위한 차량 제어 알고리즘 구현

공정식^{1*}

¹인덕대학 기계설계과

Study on the Aid Control Algorithm for the Power-Assisted Smart Wheelchair

Jung-Shik Kong^{1*}

¹Department of the Mechanical Design, Induk University

요약 본 논문은 힘 보조형 휠체어에 있어 힘 센서 없이 사용자의 구동 의지를 측정하는 방법과 이를 통한 차량 제어 방법을 제시한다. 이를 위해 먼저 모터의 수학적 모델을 이용하여 사용자의 구동 의지력을 추정하는 알고리즘을 도출한다. 이후 도출된 의력을 기반으로 사용자가 원하는 차량 속도 및 방향을 추정한다. 이를 토대로 차량의 이동량을 결정하고 차량이 이에 따라 구동되도록 알고리즘을 구성하였으며 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

Abstract This paper deals with method to measure the user's driving-will force and to control the power-assisted wheelchair. To solve this problem, we extract the user's driving-will by using the mathematical motor model. And then, we get the linear and angular velocity at the center of the vehicle. Wheel velocities are also measured from center velocity. Finally, power-assisted electric wheelchairs are controlled by these data. Here all processes are verified by simulation.

Key Words : Power-assisted, Wheel control, Wheel velocity, Torque estimation, In-wheel motor

1. 서론

현대 사회에서 고령 인구가 급격한 증가는 큰 사회문제로 인식되고 있다. 통계청 자료에 의하면 우리나라는 2008년 10.3%에서 2026년 20.8%로 고령사회로 급속히 진행될 것으로 예상된다. 이에 따라 고령자의 일상생활을 지원할 수 있는 다양한 이동기기에 대한 연구 개발이 요구되고 있으며, 그 대표적인 예로는 휠체어, 실버카, 보행 보조기[1] 등이 있다. 이 중에서 현재 가장 많이 사용되고 있는 기기는 휠체어로 수동형 휠체어와 전동 휠체어로 나누어 얘기할 수 있다. 특히 조이스틱을 이용하여 전동 휠체어를 조작[2]하는 연구 및 이에 따른 다양한 제품이 개발되었으며 장애물 회피 및 네비게이션 기능을 구현 [3], 전동휠체어를 이용자가 쉽게 일어날 수 있도록 돕거나 하는 생활지원 기능[4], 사용자의 안정성을 고려하여

ABS 브레이크 시스템을 적용[5]에 관한 연구들이 진행되고 있다.

최근에는 수동휠체어와 동일하게 조작하면서 사용자의 힘을 보조할 수 있도록 힘 보조형 전동 휠체어에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 이를 자세히 살펴보면 힘 보조형 전동 휠체어 연구는 크게 기본 구동 제어[6], 평지에서 전진 및 회전 구동시 안정성 확보를 위한 연구 [7], 언덕에서의 안정성 확보를 위한 연구[8], 제어 시 기계적 충격을 감소시키기 위한 궤적 생성 연구[9] 등이 있다. 또한 사용자의 구동 의지를 파악하기 위해 림에 센서를 설계[10]하거나 사용자에게 EMG 센서[11] 부착하여 구동 의지력을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다. 하지만 이들 대부분의 연구는 모두 사용자의 구동 의지를 측정하기 위한 센서를 만들던지 아니면 사용자의 근육에 센서를 붙이는 등의 구조적, 사용측면의 불편함이 발생할

인덕대학 연구비에 의해 수행되었음

*교신저자 : 공정식(jskong@induk.ac.kr)

접수일 11년 01월 06일

수정일 (1차 11년 01월 31일, 2차 11년 05월 11)

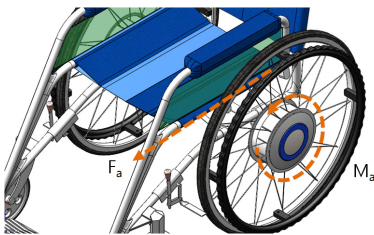
게재확정일 11년 08월 11일

수 있다.

이에 본 논문에서는 힘 보조형 전동 휠체어를 제어하기 위한 알고리즘을 개발하고자 한다. 이를 위해서는 먼저 사용자의 구동하고자 하는 힘을 측정하여야 하며 이에 본 논문에서는 사용자가 휠 립을 밀 경우 발생하는 외력을 측정하는 방식으로 구동 의지력을 측정할 수 있도록 하였다. 이때 구동 의지력을 파악함에 있어 기존의 모터 외력을 측정하기 위해 사용되던 전류량 측정 방법 대신에 모터에 인가되는 입력전압 대비 모터 속도의 변화를 통해 구동 의지력을 추정할 수 있도록 하였다. 이렇게 추정된 구동 의지력을 토대로 차량의 이동 방향 및 차량의 속도를 실제 수동 휠체어와 같은 느낌으로 구동시키기 위해 3차 Spline 함수를 적용함으로써, 외력에 의 힘 보조형 휠체어가 자연스럽게 구동 및 정지가 가능하도록 차량 제어 알고리즘을 구축하였으며 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 힘 보조형 휠체어

힘 보조형 전동 휠체어는 수동 휠체어와 유사하게 사용자가 휠에 장착된 립을 구동시킬 경우 휠 립에 작용된 힘을 측정하여 휠체어가 이에 맞춰 구동되게끔 되어 있다. 이에 사용자의 구동 의지력(F_a)와 이에 따른 휠 모터에 작용하는 모멘트(M_a)를 그림 1과 같이 나타내었다. 또한 식(1)은 사용자의 구동 의지력에 대한 바퀴에 걸리는 모멘트의 크기를 나타낸다.



[그림 1] 힘 보조형 휠체어 외력 정의
[Fig. 1] Definition of the external force at the power-assisted electric wheelchair

$$\begin{aligned} M_a &= F_a \times r \times N \\ F_a &= M_a / (r \times N) \end{aligned} \quad (1)$$

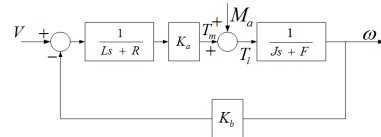
식(1)에서 r 은 차량 바퀴의 반지름이며, N 은 차량 바퀴에서의 감속비를 나타낸다. 식(1)으로부터 구동 의지력으로 인한 차량에 걸리는 외력을 추출할 수 있으며, 현재

힘 보조형 전동 휠체어의 각 바퀴에 걸리는 외력을 정확하게 파악할 경우 사용자의 구동 의지력에 따른 정확한 차량 제어가 가능해진다.

3. 힘 보조형 휠체어 제어기 설계

3.1 구동 의지력 추정 알고리즘

차량이 이동하는 과정에서 사용자의 구동 의지가 차량에 적용할 때 차량의 바퀴에는 외력이 작용한다. 이러한 외력에 의한 토크를 차량의 바퀴 회전 상태를 통해 유추하기 위한 모터 모델을 그림 2와 같이 나타내었다.



[그림 2] 모터의 수학적 모델
[Fig. 2] Mathematical model of the motor

그림 2에서 L, R, J, F, K_a, K_b 는 각각 모터의 인덕턴스, 저항, 모터축의 회전질량, 모터축의 마찰, 토크상수, 역기전력 상수를 나타낸다. 그림 2에서 모터에 외력에 의한 모멘트 M_a 가 작용할 경우 인가된 전압에 대비 모터의 속도는 외력이 없을 경우와 차이가 생기게 된다. 이에 현재 인가되고 있는 입력전압 대비 실제 구동되고 있는 모터의 속도를 비교하여 모터에 걸리는 외력을 측정할 수 있다. 식 (2)는 외력에 의해 모터에 걸리는 토크의 크기를 나타낸다.

$$M_a(s) = \left(Js + f + \frac{K_a K_b}{Ls + R} \right) \omega(s) - \frac{K_a}{Ls + R} V(s) \quad (2)$$

이에 식 (1)과 식(2)로부터 식(3)과 같이 구동 의지력을 계산할 수 있게 된다.

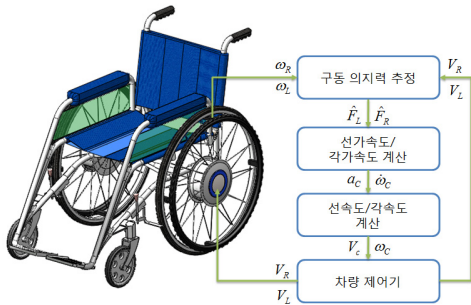
$$F_a(s) = \frac{1}{Nr} \left\{ \left(Js + f + \frac{K_a K_b}{Ls + R} \right) \omega(s) - \frac{K_a}{Ls + R} V(s) \right\} \quad (3)$$

식(3)을 통해 계산된 입력전압과 각속도를 이용하여 추정된 구동 의지력은 각속도의 미분항(Js)을 가지고 있으므로 구현 시 고주파에서 고이득이 되므로 모터 구동 시 노이즈의 영향을 받게 된다. 이를 극복하기 위해 식(4)와 같이 저역 통과 필터를 적용하여 고주파로 인해 발생할 수 있는 노이즈 성분을 제거하였다.

$$\hat{F}_a(s) = \frac{1}{\tau s + 1} F_a(s) \quad (4)$$

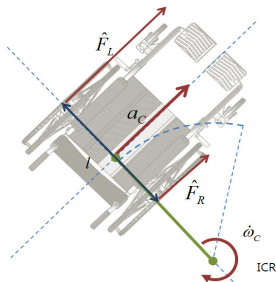
3.2 전동 휠체어 차량 제어기 설계

힘 보조형 전동 휠체어에 있어 사용자의 구동 의지력이 바퀴를 통해 모터에 전달되면 이는 모터의 외력으로 작용하며, 사용자의 구동 의지력에 따라 차량을 정확하게 제어할 수 있어야 한다. 이에 차량의 안정적인 제어를 수행하기 위해 그림 3과 같이 제어기를 구성하였다.



[그림 3] 힘 보조형 전동 휠체어 차량 제어기
 [Fig. 3] Aid controller for the power-assisted electrical wheelchair

그림 3에서 사용자가 림에 힘을 작용할 경우 모터에 가해지는 외력에 의한 토크는 토크 추정 관측기를 통해 식 (2)-(4)와 같이 계산되었다. 이제 토크 추정 관측기를 통해 추정된 각 모터에 걸린 외력(\hat{F}_L , \hat{F}_R)을 토대로 차량 중심에서의 선가속도 및 각가속도를 계산하도록 한다. 그림 4는 차량에 걸리는 외력에 대한 차량 중심에서의 선가속도 및 각가속도를 도식한 그림이다. 그림 4에서 휠체어 림에 걸리는 추정된 힘을 각각 \hat{F}_L 과 \hat{F}_R 이라 하였을 때 이에 따라 휠체어 중심에 걸리는 힘에 의한 선가속도 및 각가속도는 식 (6)과 같이 표시할 수 있다.



[그림 4] 휠체어중심에서의 선가속도와 각가속도
 [Fig. 4] Linear and Angular accelerometer at the center of the wheelchair

$$F_R = ma_R, \quad F_L = ma_L, \quad F_C = ma_C$$

$$a_C = \frac{a_R + a_L}{2}, \quad \dot{\omega}_C = \frac{a_R - a_L}{l} \quad (6)$$

여기서 a_R 과 a_L 은 각각 차량에 대해 오른쪽 바퀴와 왼쪽 바퀴에 걸리는 선가속도, l 은 차량 바퀴 사이의 폭을 나타낸다. 식(6)을 통해 추론된 차량의 중심에서의 선가속도와 각가속도를 토대로 차량 중심에서의 선속도 및 각속도를 식(7), (8)과 같이 구현하였다.

$$f(t) = \frac{2}{t_f^3} t^3 - \frac{3}{t_f^2} t^2 + 1, \quad t_f = K_T \times \max\{a_C\} \quad (7)$$

$$v_C = f(t) \times \int a_C, \quad \omega_C = f(t) \times \int \dot{\omega}_C \quad (8)$$

수동 휠체어의 경우 힘이 가해진 후 일정시간이 지나면 지면 마찰력 및 구름 마찰력 등에 의해 차량이 정지된다. 힘 보조형 휠체어가 수동 휠체어와 동일한 사용감을 느낄 수 있도록 하기 위해서 차량에 힘을 가한 후 일정시간이 지나면 차량이 정지할 수 있도록 3차 Spline 함수를 적용하여 수동 휠체어와 비슷한 성능이 나타날 수 있도록 하였다. 이를 위해 $f(t)$ 를 3차 Spline함수로 구성한 후 초기 위치는 1로 최종 위치는 0으로 하며, 초기 기울기 및 최종 기울기를 0으로 하여 식 (7)의 $f(t)$ 와 같이 함수를 구성하였다. 그리고 이때 최종 시간 t_f 는 가해진 힘의 크기에 따라 움직이는 시간이 변하므로 힘의 크기의 최대값에 따라 변화될 수 있도록 하였다.

이제 차량 중심의 선가속도와 각가속도를 토대로 차량 각 바퀴에 걸리는 휠의 속도를 Ackerman 구동 방식으로 유도하였다. Ackerman 구동 방식은 순간 회전 중심(ICR: Instantaneous Center of Rotation)을 중심으로 하는 회전 운동으로 4개의 바퀴가 회전 중심을 기준으로 동심원에 접하고 동일한 각속도를 가지게 됨으로써 차량의 움직임이 미끄러짐 없이 이동 가능한 기법이다. 본 논문에서는 Ackerman 기법을 활용하였으며 이때 차량 바퀴의 속도는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega}_R = \frac{2v_C + l\omega_C}{2r}, \quad \hat{\omega}_L = \frac{2v_C - l\omega_C}{2r} \quad (9)$$

식(9)에서 l 은 차량의 폭, r 은 차량의 바퀴의 반지름, R 은 차량의 중심에서 회전 중심(ICR)까지의 거리를 나타낸다. 또한 w_C 는 차량의 중심에서 ICR을 기준으로 하였을 때의 각속도를 나타내며 \hat{w}_L, \hat{w}_R 은 각각 왼쪽 바

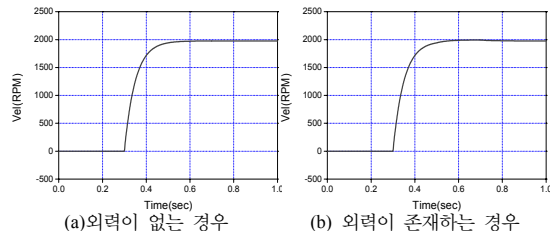
퀴와 오른쪽 바퀴의 각속도를 나타낸다. 식 (8)로부터 현재 차량의 속도로 추정된 외력 및 현재 차량의 움직임을 토대로 차량의 바퀴의 각속도를 추정할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

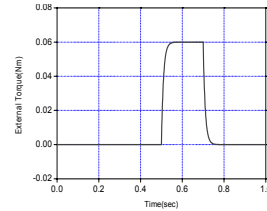
본 논문에서 시뮬레이션에 적용된 전동 휠체어는 시트 폭이 380mm 바퀴사이 폭이 500mm, 최대높이 750mm, 앞뒤 폭 1100mm 질량이 14.5kg의 대성 DS911A 시트분리형 휠체어에 개당 8kg의 인휠 모터를 장착하였다고 가정하였다. 이렇게 시스템을 가정하였을 때 전동 휠체어에 적용된 모터 및 감속기 사양은 표 1과 같다. 본 논문에서는 MATLAB을 이용하여 제시된 전동휠체어 및 구동기 사양에 맞춰 시뮬레이션을 수행하였다. 모터에 되먹임 제어를 수행할 경우 외력이 작용한 경우와 외력이 작용하지 않았을 때의 모터의 회전 속도는 그림 5와 같다. 그림 5에서 구동 후 0.3초 후에 되먹임 제어 입력값으로 2000 RPM을 입력 한 후, 0.5초 이후에 10N의 힘을 가한 후 이를 0.7초까지 유지한 경우에 모터 회전 속도 변화를 비교하였다. 그림 5의 (a), (b)를 비교해 보았을 때 속도 되먹임 제어기를 구축하였을 경우 외력에 의한 값의 변화가 거의 없다. 하지만 토크 추정 관측기를 적용하였을 경우 외력을 정확하게 추출할 수 있었으며 그림 6과 같이 측정되었다.

[표 1] 시뮬레이션에 적용된 모터 및 감속기 사양
[Table 1] Motor and reducer specification applied at the simulation

인휠 모터 사양		
모터 사양		
사양	단위	데이터
직경	m	0.6
입력전압	V	24
최대 유효 토크	Nm	0.467
저항	Ω	0.0809
인덕턴스	H	30.8×10^{-6}
토크 상수	Nm/A	0.0554
역기전력 상수	V·s/rad	0.0554
회전자 Inertia	$kg \cdot m^2$	1.29×10^{-4}
회전자 마찰력	Nm	0
엔코더 해상도	CPT	500
기어 사양		
감속비		50:1
최대 유효 출력 토크	Nm	507
기어 에너지 효율		0.95

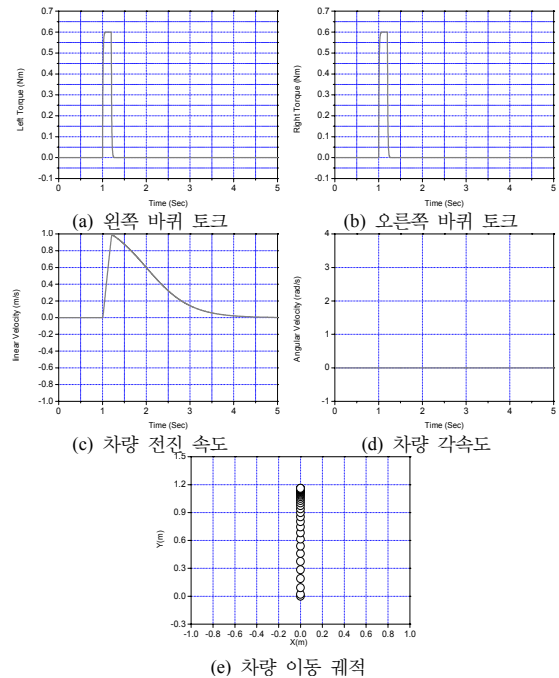


[그림 5] 외력에 대한 모터 속도 비교
[Fig. 5] Velocity comparison by external forces



[그림 6] 시뮬레이션에 의한 토크 측정 결과
[Fig. 6] Simulation result of the measurement of the torque

그림 6에서 0.5초에서 0.7초까지 0.2초간의 모터에 외력 10N의 힘을 가하였을 때 외력에 의해 바퀴에 작용되는 힘은 3Nm가 되며 감속기를 통과할 경우 50:1의 감속기에 의해 0.06Nm의 힘이 모터에 전달되며 그림 6로부터 0.06Nm의 힘이 모터에 전달됨을 확인할 수 있다.

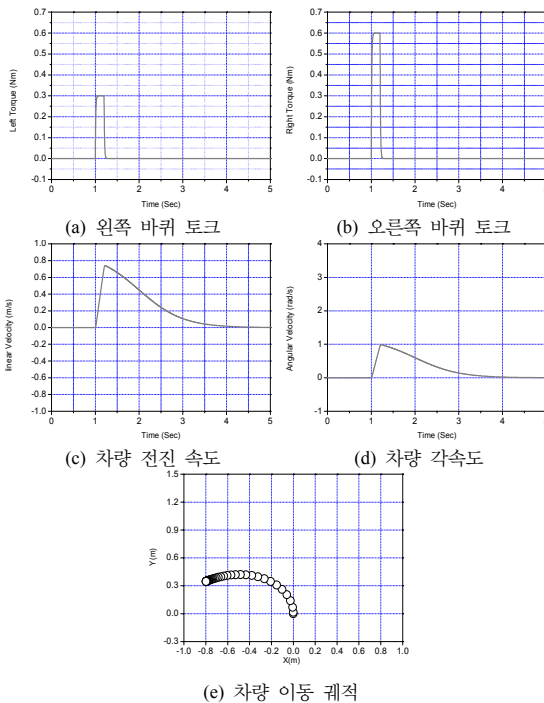


[그림 7] 전진 이동 차량 시뮬레이션 결과
[Fig. 7] Simulation result at the straight movement

그림 7은 차량이 정지되어 있는 상태에서 1초 후 0.2초 동안 차량을 전진방향으로 100N의 힘으로 양쪽 림을 밀었을 경우 이때 차량에 전달된 토크 및 이로 인한 차량의 선속도 및 각속도 변화 그리고 이에 따른 차량의 이동 궤적을 나타낸다.

차량 전진을 위해 사용자가 양쪽 림에 동일한 힘을 가한 경우 왼쪽바퀴에 걸리는 토크와 오른쪽 바퀴에 걸리는 토크가 일정하게 되며, 이에 따라 차량은 전진한다. 0.2초 동안 100N의 힘을 밀었을 경우 시뮬레이션 상에서는 1.16m 전진함을 알 수 있었다.

그림 8은 정지되어 있는 차량에서 1초 후 0.2초 동안 왼쪽 림에 50N의 힘을 가하고 오른쪽 림에 100N의 힘을 가한 경우의 움직임상을 나타낸 것이다. 이 경우 0.2초 동안 왼쪽 바퀴 및 오른쪽 바퀴에 걸리는 토크의 크기는 각각 0.3Nm, 0.6Nm 이고, 이에 따라 차량에는 전진 속도와 차량 각속도가 동시에 표현되면서 차량은 X축으로 -0.80m, Y축 방향으로 0.34m 전진하게 됨을 알 수 있다.



[그림 8] 임의 이동에 대한 차량 시뮬레이션 결과
[Fig. 8] Simulation result at the freely movement

5. 결론

본 논문에서는 힘 보조형 전동 휠체어에 힘을 측정하

기 위해 기존의 토크 센서나 힘센서를 사용하는 대신에 차량에 장착되어 있는 휠 속도 센서를 적용하고, 차량이 수동형 휠체어와 비슷하게 움직일 수 있도록 3차 Spline 함수를 적용하여 차량이 기존의 수동형 휠체어와 비슷한 구동 특성을 갖도록 차량 제어 알고리즘을 구하였으며, 휠체어의 구동이 사용자의 구동의지에 따라 잘 이동됨을 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

향후 힘 보조형 전동 휠체어에 본 알고리즘을 적용하여 시스템의 신뢰성 실험을 수행하며, 힘 보조형 휠체어의 특성을 파악할 수 있도록 임상평가를 수행할 것이다. 또한 다양한 힘 측정 센서를 통한 구동 의지력 파악 센서 모듈 개발 및 성능 평가를 통해 현재 수동형 휠체어가 가지고 있는 손목터널증후군등의 문제점을 회피할 수 있는 휠체어 개발에 대한 연구가 진행될 것이다.

References

- [1] J.S. Kong, D.K. Lee, Y.S. Nam, B.H. Lee, and E.H. Lee, "Optimized Walking Will Recognizing System of the Walking Aid with the Fuzzy Algorithm," Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol. 18, No. 5, pp.692-699 2008.
- [2] R.A. Cooper, L.M. Widman, D.K. Jones, R.N. Robertson, and J.F. Ster, "Force Sensing Control for electric powered wheelchairs," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 8, no. 1, pp.112-117, 2000.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Seihwan Kim and Jongsun Lee, "The Design and Manufacture for Wheelchair ABS," Journal fo the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol 4, No. 3, pp. 312-316, 2003.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] H. Seki and S. Tadakuma, "Straight and circular Road Driving Control for Power Assisted Wheelchair Based on Fuzzy Algorithm," IEEE IECON, pp.3898-3903, 2006.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

공 정 식(Jung-Shik Kong)

[정회원]



- 1998년 2월 : 인하대학교 자동화 공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 인하대학교 일반대학원 자동화공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2009년 2월 : 대덕대학 로봇과 전임강사
- 2009년 3월 ~ 현재 : 인덕대학 기계설계과 전임강사

<관심분야>

지능제어, 재활공학, 지능형 로봇 및 제어