

전동차 트로이선 가설 작업 로봇의 이동제어

김실근† · 홍순일* · 홍정표**

(원고접수일 : 2006년 4월 28일, 심사완료일 : 2006년 8월 18일)

Mobile Control of working robot for a Installed Trolley Cable

Sil-Keun Kim† · Soon-Ill Hong* · Jeng-Pyo Hong**

Abstract : The aims of this study is to develop working robot for a installed trolley cable of an electric train and objective of this paper is to implement mobile control of working robot.

In this paper an approach to method for scheme of a mobile control system is presented in a dynamic hybrid velocity/tension control of working robot. The working robot is composed the velocity and tension controllers using the concept of two-degrees-of-freedom servo-controller.

This robot moved at same time a certain distance to constrain a constant tension and installed a trolley cable of an electric train. To move the robot the velocity control system have design and implemented. Simulation and experimental results are presented to illustrate the validity of designed mobil scheme.

Key words : A mobile control(이동제어), Installed trolley cable(트로이 케이블 가설), Working robot(작업로봇), An electric train(전동차)

기호설명

T_L	: 로봇 시스템의 부하 토크	h_2	: 구동륜축과 보조륜 축의 거리
R_1	: 구동륜의 반경	K_{10}	: 속도 비례분의 마찰 계수(구동륜축 환산)
μ	: 상과 차륜간의 정지 마찰계수	K_{11}	: 정상 마찰계수(구동륜 축 환산)
T_w	: 와이어 장력	R_a	: 전기자 저항
B	: 구름 마찰계수	L_a	: 전기기 인덕턴스
g	: 중력 가속도	K_E	: 유도기전력 정수
M	: 차대 질량	K_T	: 토크 정수
h_1	: 와이어 인출점과 차축 높이 방향의 거리	$\omega(t)$: 회전 속도

† 책임저자(부경대학교 전기제어공학부 박사과정), Email sihong@pknu.ac.kr. Tel. (051)620-1431

* 부경대학교 전기제어공학부 교수

** 동의과학대학 전임강사

- θ_L : 로봇 회전각 변위
 θ_M : 전동기 회전각변위
 K_2 : 치차비
 J : 회전자 및 부하의 관성모멘트
 D : 전동기 및 부하의 점성 계동계수
 $1/K_i$: 전류 피드백 계수.
 K_p : 비례상수
 T_i : 적분 상수,
 V^* : 속도 지령치
 $V_{encoder}$: 실제속도
 x : 차대의 와이어 고정 점에서 이동거리

1. 서 론

최근, 인간을 나쁜 작업상황 이나 단순 작업에서 해방시키는 것으로 생산 시스템의 자동화, 자동기계 또는 그 기계를 제어하는 자동제어 이론이 연구되어 실용화되고 있다. 로봇의 복합 작업은 혼합(Hybrid)제어 방식에 의해 행하여지고 있지만 인간을 대신할 정도로 작업을 복합화하고 실제로 할 수 있는 성능을 가진 제어방식은 아직 확립되지 않은 것이 현재상황이다.^{(1),(2)}

메카트로닉스의 대표적인 응용은 로봇의 개발이고 특히 생산 업체에서 인건비 절감과 생산품질의 향상을 위해서 생산라인의 자동화와 함께 작업 로봇의 개발이 요구되고 있다. 이러한 배경 아래 산업용 로봇은 용접, 도장, 운송, 조립 등 여러 분야에 응용되어 자동화 추진의 중요한 역할을 하고 있다.^{(3),(4)}

전동차에 전기를 전송하기 위해 와이어 케이블(전동차 트로이선)이 필요하고 이것은 일정한 장력을 유지하도록 가설하여야 한다. 그러나 이 케이블을 가설작업은 케이블이 느슨하지 않고, 케이블이 끊기는 한계장력을 넘지 않게 하기 위해 적당한 장력을 주면서 가설하지 않으면 안 된다. 이 경우 장력제어가 필요하고 장력을 일정히 유지하기 위해서 로봇의 이동 제어가 필요하다. 로봇은 2개 이상의 복합작업을 할 때 두 작업이 다른 작업에 대하여

외란으로 서로 영향을 미치므로 이에 대한 제어 방법이 연구되고 있다.^{(5),(6)}

현재 전차선에 전기를 공급하는 트로이선 가설 작업은 윈치에 의해 수동으로 하고 있지만 작업의 효율을 향상하고 위험한 작업에서 로봇이 행할 수 있는 가설작업의 자동화가 필요하다. 그러나 아직 이러한 작업의 자동화 시스템의 구성과 제어방식이 확립되어 있지 않다.

본 연구의 목적은 전동차트로이선 자동 가설을 위해 케이블을 실은 운반차(작업로봇)가 이동하면서 케이블을 동시에 당겨 장력을 일정하게 유지하는 작업 로봇의 개발이다. 이 작업로봇은 이동/장력의 혼합 제어부로 구분한다. 이번 연구의 목적은 작업로봇의 혼합제어 시스템 중 이동시스템 구성과 제어에 대한 연구이다.

전차선 가설 로봇은 일정한 속도로 진행하지 않으면 와이어 케이블이 확실하게 당겨지지 않기 때문에 로봇은 이동/장력의 혼합제어가 필요하게 된다.

본 논문은 전동차트로이선 자동가설 시스템의 원리를 나타내고 차륜 이동부의 구성과 제어방법에 관해서 나타내었다. 로봇의 이동은 DC 전동기의 속도제어에 의해서 행하여지고 이동 시스템의 구조를 설계하고 각 파라미터 등의 값을 결정한다.

작업로봇의 차륜 구동에 필요한 직류 전동기모델과 제어방법에 대해서 나타내었다. 직류 전동기를 포함한 차륜 구동부의 전달함수를 구하고 실제로 로봇을 움직이기 전에 시뮬레이션을 행하여 구성한 속도제어 시스템이 작업로봇의 이동에 유용한 것을 구명하였다. 끝으로 이동부의 실험을 하여 실용성을 검토하였다.

2. 작업모델 로봇

Fig. 1은 트로이 케이블을 가설하는 작업 로봇의 외형도를 나타낸다. 로봇은 케이블을 당기는 장력제어부와 차대를 이동하기 위한 차륜 구동부가 있고 차륜 구동부 위에 장력 제어부가 탑재되어 있다.

로봇은 완전 자립형이고 각 전기 회로가 탑재되어 있고 각 회로에 전용 CPU와 전체를 제어하는 멀티프로세스 시스템이다.

작업 로봇의 이동시스템은 알루미늄 프레임으로 된 높이 약 70cm의 차대이고 상부에 장력제어 장치를 탑재할 수 있도록 직경50[cm] 두께 10[mm]의 알루미늄 원판을 설치한다. 로봇 이동 방법은 차륜을 사용하고 좌우에 구동륜이 2개, 전후에 방향을 자유로 변하게 할 수 있는 보조륜이 2개 모두 4개가 있다. DC 전동기 축에는 감속기(20:1)가 직결되어 있고 구동륜의 동력 전달장치는 체인을 사용한다.

장력제어 시스템은 와이어를 감아 둔 드럼, 와이어를 유도하는 활차, 와이어에 장력을 주는 구동활차, 장력을 측정하는 로드셀(Road Cell) 그리고 검출 장력을 와이어에 전달하는 동활차 등 5개 부분으로 구성된다. 그리고 구동 활차의 구동 토크를 발생하는 교류 서보 전동기가 있다.

장력 발생 전동기의 토크는 치차(30:1)를 통해서 큰 구동 토크를 얻는다. 로봇 중량은 100[Kg], 최대 속도는 1[m/sec], 최대 가속도는 0.5[m/sec²]이다. 와이어 인출 최고 속도 20[cm/s]로 한다.

이 외란으로 되고 케이블 장력장치를 실은 차대가 이동 할 때 통과하는 지면의 요철이나 지면과의 마찰 등도 외란으로 된다. 이와 같은 조건하에서 와이어 케이블은 일정 장력으로 당겨져 가설된다.

Fig. 2는 작업로봇 모델을 나타내고 차륜의 이동에 필요한 속도제어와 케이블이 일정 장력을 유지하도록 당기며 장력제어를 하는 혼합제어 이다.

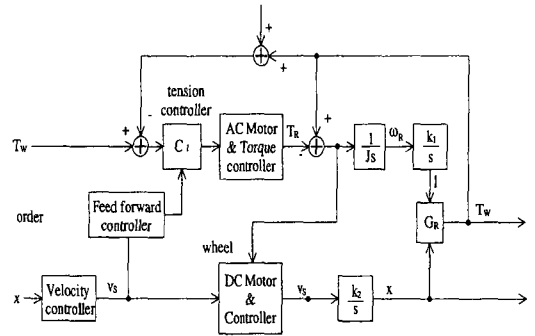


Fig. 2 The model of working robot

3. 작업로봇의 이동시스템

3.1 이동 모델

이동 로봇의 힘 평행 방정식은 (1)과 같다.

$$F_1 = \frac{h_1}{h_2} T_w \tag{1}$$

구름마찰에 의한 전동기 토크에 대응하는 반발력은 (2)이 된다.

$$F_2 = \frac{B g}{R_1} \left(M - \frac{h_1}{h_2} \frac{T_w}{g} \right) \tag{2}$$

전동기축, 기어, 힘 전달 체인 등에 생기는 마찰은 주로 속도에 비례하는 성분과 정상상태에 존재하는 마찰 성분이 있다. 속도 비례하는 마찰 성분의 계수는 K_{11} 이라 하고, 정상 마찰의 계수는 K_{10} 라고 하면 (3)이 된다.

$$F_3 = K_{11} \cdot x + K_{10} \tag{3}$$

모든 파라미터를 고려하여 차대의 이동에 관한 운동 방정식은 (4), (5)와 같이 된다.

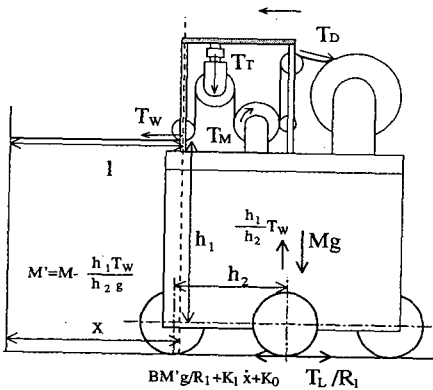


Fig. 1 The layout of a installed working robot

전동차 트로이 케이블 가설 원리는 한쪽 끝에 와이어 케이블을 고정하고 케이블을 실은 수레차(로봇)가 일정 장력을 유지하고 이동하면서 가설하는 것이다.

따라서 로봇의 제어대상은 이동과 가설되는 전동차 트로이 케이블이고 비선형이다. 가설 작업은 케이블의 신장과 바람 등에 의해 케이블의 흔들림

$$M\ddot{x} = \frac{T_L}{R_1} - T_w - \frac{Bg}{R_1} \left(M - \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{T_w}{g} \right) - K_0\dot{x} - K_{11} \quad (4)$$

$$M\ddot{x} < \mu \left(Mg - \frac{h_1}{h_2} \cdot T_w \right) \quad (5)$$

식(5)은 차대가 미끄러지지 않기 위한 조건식이다. 그리고 주행용 DC 전동기에 의한 로봇의 이동 거리는 식 (6)이 된다.

$$x = R_1\theta_L = R_1 \frac{\theta_M}{n} \quad (6)$$

전동기 토크에 반대 되는 로봇 시스템의 부하 토크는 식 (7)이다.

$$T_L = T \times n + \frac{BMg/2}{n} \quad (7)$$

3.2 전동기 모델과 속도제어

작업로봇의 이동 (x)을 행하는 직류 전동기 속도제어 모델을 제안한다. 브러시의 전압강하를 무시하면 단자전압과 전류의 관계는 식(8)과 같다.

$$v = R_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_E \omega \quad (8)$$

전동기 발생 토크는 식 (9)과 같다.

$$T_m(t) = K_m \Phi i_a(t) = K_T i_a(t) \quad (9)$$

토크 $T_m(t)$ 와 회전속도 ω 의 관계는 식(10)이다.

$$T_m(t) = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega \quad (10)$$

전동기는 1차 지연계로 근사화 되기 때문에 전류 피드백에 의해 속응성을 개선할 수 있다. 전류 피드백 방법은 전동기 전류를 전류 검출기로 검출하고 그 값의 $1/K_i$ 배하여 전동기 입력전압에서 뺀 편차를 A_{mp} 으로 증폭하고 전동기 입력전압으로 한다.

속도 피드백은 전동기에서 피드백 된 값은 펄스 인코더에 의해 얻을 수 있는 값이기 때문에 단지 피드백 된 것이 아니고 이 값을 차륜의 회전 속도

로 변환하지 않으면 안 된다.

그 때문에 피드백에 비례정수 K_c 를 넣는다. (시뮬레이션 할 때에는 K_c 는 K_2 (치차비)와 같은 값으로 한다.) 또한 단위를 일치시키고 응답속도를 빠르게 하기 위해 속도 제어용 증폭기 K_p 을 넣는다.

실제 전동기 속도를 일정 값에 유지하기 위해서는 외란 토크 T_L 에 대응되도록 전동기 토크 T_m 가 항상 발생하지 않으면 안 된다.

이 때문에 토크 외란에 의한 정상 편차의 발생을 없애기 위해서 속도는 PI제어한다. 이 상의 고찰에서 이동제어 블록선도는 Fig. 3과 같이 제안한다.

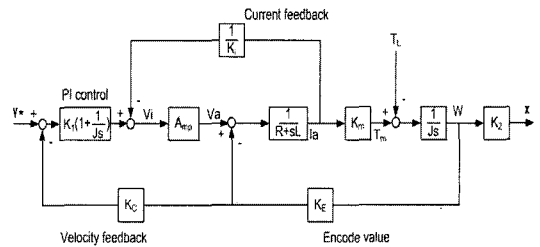


Fig. 3 The proposed velocity control system

속도제어의 블록선도에서 전동기 입력 전압은 식 (11)과 같이 제어한다.

$$v_a(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) (V^*(s) - V_{enco}(s)) \quad (11)$$

Fig3의 블록선도에서 기계부분을 포함한 플랜트 (프로세스)의 전달함수는 식 (12)이 된다.

$$G_P(s) = \frac{A_{mp} K_T}{JL_a s^2 + J \left(R_a + \frac{A_m}{K_i} \right) s + K_T K_E} \quad (12)$$

4. 시뮬레이션과 실험

제안한 이동제어 시스템의 적합성을 검증하기 위하여 디지털 시뮬레이션과 실험을 행한다. 시뮬레이션은 앞에서 나타난 블록선도를 기준으로 Matalab M-파일을 통한 프로그램으로 작성하고 기계적인 요소와 전기적인 요소는 Simulink를 사

용하였다. Table 1은 제어 파라미터 및 전동기 정수이다.

Table 1 The system parameters

A_{mp}	15	K_T	0.0647 [N · m/A]
T_i	0.3[sec]	R_a	1.3[Ω]
K_p	2.0	L	1.7[mH]
$K_2(=n)$	1/20	K_E	0.0649[V/(rad/s)]
K_c	1/20	J	0.00079 [Kg · m ²]
$1/K_I$	1.35		

4.1 속도스텝 응답

이동제어시스템을 구성하기 위해서 먼저 전동기의 구동특성을 조사 한다. 여기서 전동기를 차대에 부착하여 스텝전압을 전동기에 인가하여 스텝응답을 측정한다. Fig. 4는 1차 지연계로 근사화한 직류 전동기의 각 스텝입력 전압에 대한 시뮬레이션 속도응답이고 Fig. 5는 각 스텝 입력 전압에 대해 실측한 속도응답을 나타낸다.

이상의 결과에서 전동기 속도응답은 오버슈트 있고 입상시간이 긴 것을 알 수 있다. 이 상태에서 제어를 행할 경우 발진 할 가능성이 있고 Fig. 5에서 실제 개루프 응답은 입력 전압이 22[V]가 넘으면 발진하고 있는 것을 알 수 있다. 로봇을 이동제어 할 경우 응답특성을 개선하고 안정 동작을 하도록 하기 위해 PI제어하고 파라미터를 적절히 선정하는 것이다.

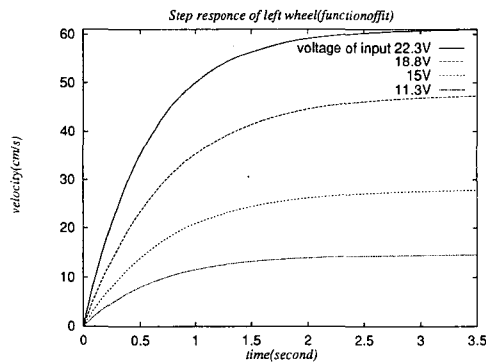


Fig. 4 Simulated step speed responses of open loop motor system

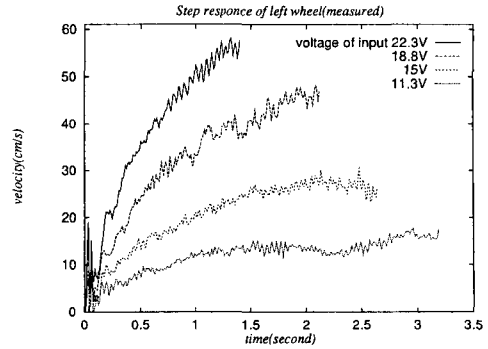


Fig. 5 Experimental step speed responses of open loop motor system

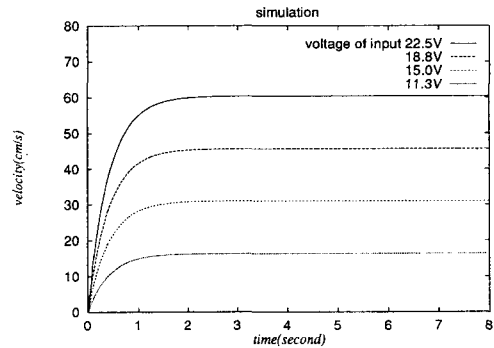


Fig. 6 Simulated step velocity responses of PI control motor system

시뮬레이션에 의해 세부 조정을 하여 PI제어기 파라미터는 $K_p=2.0$ [sec], $T_i=0.3$ [sec]로 결정을 하였다.

Fig. 6은 PI 제어 할 때 이동계의 스텝입력 전압에 대한 속도응답 시뮬레이션 결과를 나타내고 이 결과에서 시뮬레이션의 전동기 특성은 1차 지연계로 근사화 하였기 때문에 실 시스템과약간의 오차가 있다.

4.2 지령속도에 대한 응답

작업로봇이 전차 토로이선 일정 장력유지 가설 작업을 할 때 로봇의 속도와 가속도가 장력제어에 간섭하기 때문에 이것의 영향을 조사하기 위해 지령속도는 사다리꼴과 삼각형으로 하여 실험한다.

Fig. 7, 8은 사다리꼴 속도지령과 삼각형 속도

지령에 대한 이동계 시뮬레이션 응답특성을 나타낸다. PI제어 파라미터는 그림 6의 시뮬레이션 응답에서 가장 속응성이고 정상 특성의 좋은 것을 사용했다. 그래프는 위에서 차례로 속도 지령, 차대의 속도, 전동기 전압 및 전동기 전류를 나타낸다. 속도응답은 속도지령에 잘 추종하고 있음을 나타낸다.

Fig.9, 10은 사다리꼴 및 삼각형 속도지령에 대하여 시뮬레이션과 같은 조건에서 실측한 이동계 응답 특성을 나타내고 속도응답의 그래프는 지령속도, 이동속도를 타나내고 전류응답은 지령속도, 전동기 전류에 대해서 나타낸다.

이상 이동계의 시뮬레이션 응답과 실측응답은 일치하고 있음을 알 수 있고 이 결과에서 실제 작업로봇의 이동 동작을 위한 시스템 구성이 올바름을 확인할 수 있다.

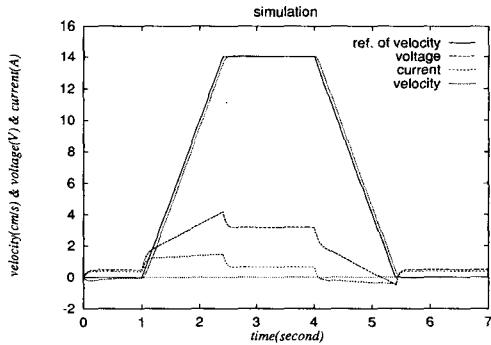


Fig. 7 Simulated velocity responses for a trapezoid command

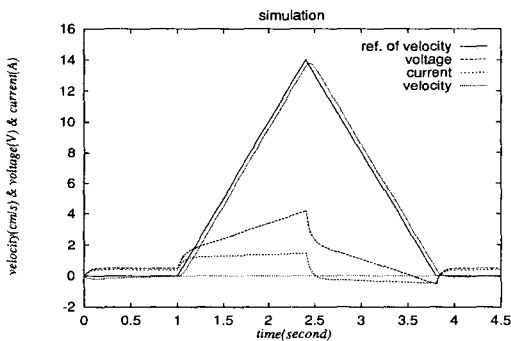
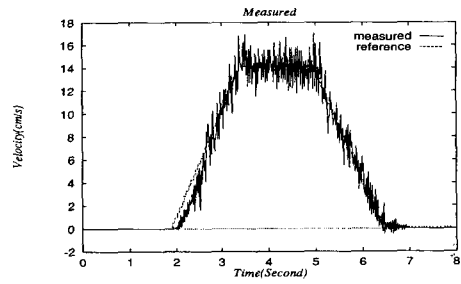
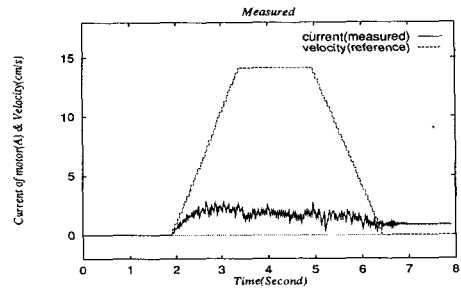


Fig. 8 Simulated velocity responses for a tripod command

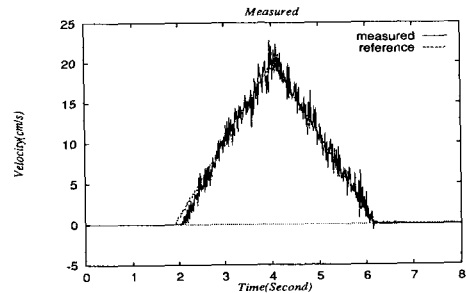


(a) Measured velocity

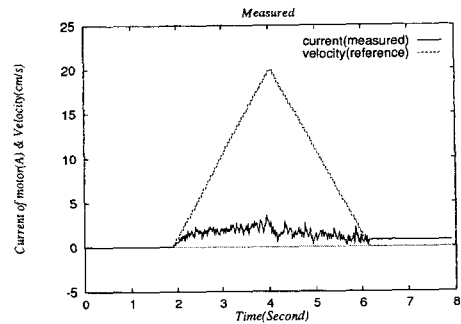


(b) Measured current

Fig. 9 Measured velocity responses for trapezoid command



(a) Measured velocity



(b) Measured current

Fig. 10 Measured velocity responses for a tripod command

5. 결 론

전동차트로이선 가설작업 위한 총 중량 100[Kg]를 최고 속도 1[m/sec], 최대 가속도 0.5 [m/sec²]로 이동하는 로봇 구동장치를 설계 제작하였다.

1) 로봇의 이동 시스템을 구성하고 모델링하여 해석하였다.

2) 시뮬레이션으로 구성된 이동시스템의 유용성을 나타내었다.

3) 이동부의 실험을 행하여 실용성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] Luigi Villani, Bruno Sicilano, "An Experimental Study of Adaptive Force/Position Control Algorithms for Industrial Robot", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 8, No. 5, pp. 777-786, 2000.
- [2] Di Xiao, K. Ghosh, "Sensor-Based Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulator in an Uncalibrated Environment", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 8, No. 4, pp.635-644, 2000.
- [3] Hakan Koc, Dominique Knittel, "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 10, No. 2, pp.197-207, 20002
- [5] T.X Mei and Roger M. Goodall, "Robust Control for Independently Rotating Wheelsets on a Railway Vehicle Using Practical Sensor", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 9, No. 4, pp.599-607, 2001.
- [4] Randolph Cabell and Dan Pallumbo, "A Principal Component Feed forward Algorithm for Active Noise Control : Flight Test Results", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 9, No. 1, pp.76-83, 2001.
- [5] Bilin Aksun Guvenc and Levent Guvenc, "Robust Two Degree-of Freedom Add-On Controller Design for Automatic Steering", IEEE Transaction on Control System Technology, Vol. 10, No. 1, pp.137-148, 2002.
- [6] K. K. Tan T. H. Lee and S. J. Chin, "Precision Motion Control with Disturbance Observer for Pulse Width Modulated Driven Permanent Liner Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 39, No. 3, 2003.

저 자 소 개



김실근 (金實根)

1960년 5월 1일생 울산출생, 2001년 한국교육개발원 전기공학졸업, 2005년 부경대학교 산업대학원 전기공학과 공학석사, 2006년 현 부경대학교 대학원 박사과정 재학, 2006년 현 부산광역시 시설관리공단 광안대로사업단 교량시설팀 장 재직, 관심분야 풍력/태양광 발전 시스템, 전차 트로이선 가설 작업로봇, 장력제어.



홍순일 (洪淳一)

2006 현 부경대학교 전기제어 계측공학부 교수, 1981 부산대학 공학석사(전력전자), 1986 한국해양대학 공학박사(제어공학) 1999 일본전기 통신대학 연구교수, 2000 대한전기학회 부산지부 회장, 관심분야, 퍼지 시스템설계, 서보시스템 설계, 전동기 벡터제어.



홍정표 (洪正杓)

2006년 현 동의과학대학 전임강사, 부경대학교 기계공학부 박사과정, 1998년 부경대학교 전기공학과 졸업, 2001 부산대학교 대학원 공학석사, 관심분야 퍼지 시스템설계, 전동기 벡터제어, 리턴스 전동기 제어 설계.