

## 예측 제어를 이용한 2바퀴 로봇의 실시간 균형제어

강진구\*

# Real Time Balancing Control of 2 Wheel Robot Using a Predictive Controller

Jin-Gu Kang\*

### 요약

본 논문은 예측제어를 이용하여 2휠 로봇의 실시간 균형을 유지할 수 있는 자세 제어에 대해 연구하였다. 또한 역방향 진자 제어는 로봇이 진행하는 동안 균형을 유지하기 위하여 도입되었다. 본 논문에서 구현에 사용한 프로세서는 dsPIC30F4013 임베디드 프로세서이며 자체 균형 알고리즘을 설계하고 구현 하는 것이다. 본 연구에서 ARS는 2축의 자이로 각(roll, pitch)과 3축의 가속도계 값(x, y, z)값으로 자세를 계산하도록 하였다. 따라서 본 연구에서는 외란에 대한 자세의 불균형을 극복하기 위한 예측제어를 제안했으며 이를 원격 시스템의 제어문제에 도입하여 2바퀴 로봇의 선형 제어기와 예측제어를 결합한 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 강인한 특성을 실현하기 위해 목표 필터루프를 설계하고 강인도-안정성을 만족하는 제어를 설계하므로 제어시스템의 안정성을 향상시키고 시스템의 성능의 저하를 최소화함을 확인하였다.

▶ Keywords : 예측제어, 균형, 역방향 진자, 수평, 자이로, 가속도

### Abstract

In this paper, the two-wheels robot using a predictive controller to maintain the balance of the posture control in real time have been examined. A reaction wheel pendulum control method is adopted to maintain the balance while the bicycle robot is driving. The objective of this research was to design and implement a self-balancing algorithm using the dsPIC30F4013 embedded processor. To calculate the attitude in ARS using 2 axis gyro(roll, pitch) and 3 axis accelerometers (x, y, z). In this study, the disturbance of the posture for the asymmetrical propose to overcome the predictive controller which was a problem in the control of a remote system by introducing the

• 제1저자 : 강진구

• 투고일 : 2014. 2. 12, 심사일 : 2014. 2. 19, 게재확정일 : 2014. 2. 25.

\* 강동대학교 자동차튜닝과 부교수(Dept. of Automotive Tuning, GangDong University)

※ 본 연구는 2013년도 강동대학교 교내학술연구비 지원으로 제작하였음.

two wheels of the robot controller and the linear prediction of the system controller combines the simulation was performed. Also, the robust characteristic for realizing the goal of designing a loop filter too robust controller is designed so that satisfactory stability of the control system to improve stability of the system to minimize degradation of performance was confirmed.

▶ Keywords : predictive controller, balance, reaction wheel pendulum, Balancing, gyro, accelerometers

## I. 서 론

기존의 3바퀴 이상의 안정화된 모바일 로봇에서 불안정한 모바일 시스템인 2바퀴만을 이용하여 균형을 유지하고 주행을 할 수 있는 로봇 시스템에 관심이 증가되면서 2바퀴 로봇의 균형 유지와 주행 중 제어에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 최근 2바퀴 로봇의 무인화 및 다양한 기구학적 재해석과 구조학적 재해석을 시도하고 있으며 공학적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 2바퀴 로봇의 균형을 유지하기 위해서는 정확한 각도를 측정을 위한 자이로 센서와 가속도 센서 그리고 지자기 센서등이 혼합된 IMU(Inertial Measurement Unit) 및 ARS(Attitude Reference System)등이 일반적으로 이용되고 있으며 기구학에 대한 중요성의 관심도 증가되고 있는 실정이다. 또한 이와 같은 로봇은 이전에 소개된 바 있다[1]. 본 논문에서는 로봇의 효율적 균형 유지를 위한 목적으로 자율적으로 균형을 유지하고 이동할 수 있는 2자유도 로봇 시스템으로 제작하고 시스템을 해석하여 로봇의 위치와 자세를 연구하였다. 2바퀴 로봇의 균형을 유지하기 위하여 각도를 추출하는 센서 로는 자이로 센서와 가속도 센서를 이용하는 방법이 있으나 기존의 자이로 센서만을 이용하는 경우 자이로센서 자체가 가지는 적분오차에 의한 Drift 현상을 피할 수 없는 문제점을 가지며 가속도 센서만을 이용할 경우 가속도와 중력 가속도가 벡터의 합으로 출력되므로 움직이지 않는 상태에서는 상당히 정확한 값을 가지나 움직이는 상황에서는 불안정한 값을 출력한다. 이러한 단점들을 보완하고 각 센서 들의 장점만을 추출하여 적합한 알고리즘을 적용한 IMU, ARS등이 개발되고 있는 실정이며 더욱 정밀한 값을 추구하고 있다[2]. 구동 방법에는 근사화 된 방정식 모델을 바탕으로 비선형 제어 알고리즘을 통

하여 제어기를 설계하여 2바퀴 로봇의 주행 안정성에 대한 진행속도와 조향 각(steering angle)에 대한 상관관계를 시뮬레이션을 통하여 결과를 분석하고자 한다. 이러한 분석을 통한 2바퀴 로봇의 자세제어를 통하여 기타 로봇의 자세제어 및 다양한 시스템에 적용 가능성을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 2개의 바퀴로 구동하는 이동 로봇과 앞, 뒤 바퀴의 조향각에 의한 균형을 유지하는 시스템으로 구성하였다. 2바퀴로 이동하는 로봇 시스템이 수직자세로 구동을 위해서는 외란에 대한 대처가 필요하다[3]. 이러한 외란 중 가장 큰 외란은 각도 정보에 대한 오차와 구동 알고리즘에 대한 오차 및 구동환경에 대한 지면의 변화를 들 수 있다[4]. 본 연구에서는 불안정한 2바퀴 로봇에 예측제어기를 도입하여 누적차수, 예측차수, 예측카운트, 누적카운트 항을 적용하여 안정적으로 제어하였으며 센서는 정확한 각도 정보를 추출하기 위하여 ARS를 이용하였다. 본 연구에서는 2바퀴 로봇이 수직 자세를 지속적으로 유지하기 위하여 발생하는 외란에 대한 보상방법과 이에 대처할 수 있는 시스템을 설계하고 실험을 통하여 그 효율성을 검증하였다.

## II. 2바퀴 로봇의 시스템 구성

### 2.1. 2바퀴 로봇의 구성

본 연구에서 각도 추출을 위하여 상용화 되어있는 ARS를 이용하였다. 이는 3축 가속도 센서와 2축 자이로 센서의 측정값을 칼만 필터링하여 중력 벡터의 방향을 구하여 각도를 계산한다. 이러한 ARS의 각도는  $\pm 70^\circ$ 의 측정범위를 가지며  $0.01^\circ$ 단위로 측정이 가능한 방식이다. 또한 100 Hz로 동작하며 10 ms 마다 1회씩 결과를 출력한다. 2바퀴 로봇의 2개의 구동축을 가지며 앞, 뒤 각각의 방향을 조절할 수 있는 구

동축이 2개가 있다. 중앙에는 균형 제어를 위해 반작용 역 진자 휠을 이용하였다. 이러한 반작용 역 진자 휠은 로봇이 기울어지는 방향으로 디스크(Disk)를 회전시켜 순간적인 가속을 발생시키고, 디스크의 관성과 회전의 반작용으로 로봇 몸체가 회전방향의 반대방향으로 기울어지게 되는 힘을 이용한다[5]. 모터는 독립된 12V-1200[rpm]을 가지는 AI모터로 기어 비율은 100:1로 구성하였다. 자세제어와 알고리즘처리를 위한 프로세서는 dsPIC계열의 dsPIC30F4012를 사용하였으며 프로세서간의 통신은 SPI(Serial Peripheral Interface)를 이용 하였다. 2바퀴 로봇이 자율적으로 이동하며 로봇의 위치 및 속도 등의 데이터를 PC로 전송하기 위하여 RS-232를 RF통신으로 전송하도록 구성하였다. 바퀴의 반지름은 180mm로 설계하였다. 제안된 2바퀴 로봇 시스템은 그림 1과 같다.

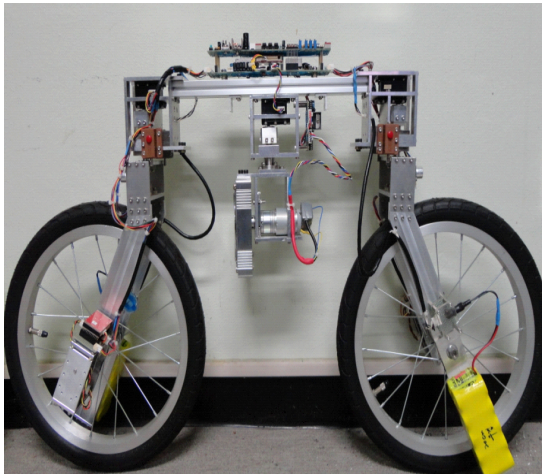


그림 1. 제작된 2바퀴 로봇시스템  
Fig. 1. 2-Wheel Robot System Designed

## 2.2. 2바퀴 로봇의 기구학 해석

2바퀴 로봇의 모델링은 전륜 조향바퀴와 후륜바퀴의 무게 중심점의 방향에 대한 관계를 알기 위하여 그림 2와 같이 2륜 자전거로 모델링을 하였다. 로봇의 회전에 대한 상태변수를 식(1)과 같이 설정한다.

$$Z = [\beta \quad \gamma]^T \quad (1)$$

여기서  $\beta$  는 로봇의 side slip angle이고,  $\gamma$ 는 로봇의 yawing rate이다. 전체 시스템의 시스템 변수는 다음 식(2)과 같이 설정 한다[6].

$$.b = [m \ I \ K_f \ K_r \ l_f \ l_r]^T \quad (2)$$

그림 2의 모델을 2차 평면에서의 운동을 수학적으로 표현하면 식(3), 식(4)과 같이 나타난다.

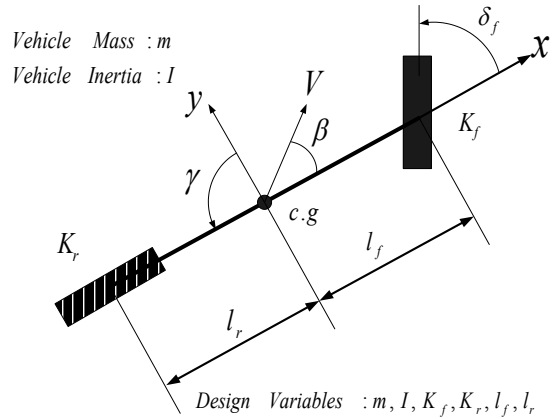


그림 2. 2바퀴로봇의 단순 모델링  
Fig. 2. Simple Modeling of 2 Wheel Robot

$$mV \frac{d\beta}{dt} + 2(K_r + K_f) \beta + \left[ mV + \frac{2}{V}(l_f K_f - l_r K_r) \right] r = 2K_f \delta_f \quad (3)$$

$$2(l_f K_f - l_r K_r) \beta + I \frac{dr}{dt} + \left[ \frac{2(l_f^2 K_f - l_r^2 K_r)}{V} \right] r = 2l_f K_f \delta_f \quad (4)$$

식(3)과 식(4)의 우변은 로봇의 입력인 전륜 조향바퀴의 각( $\delta_f$ )을 나타내고, 좌변은 그에 따른 로봇의 운동을 나타낸다. 식(3)과 식(4)을 정리하면 로봇의 상태변수  $Z$ 는 다음 식(5)과 같이 나타난다.

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} -\frac{2(K_f + K_r)}{mV} \beta - \left[ 1 + \frac{2}{mV^2}(l_f K_f - l_r K_r) \right] \gamma + \frac{2K_f}{mV} \delta_f \\ -\frac{2(l_f K_f - l_r K_r)}{I} \beta - \frac{2}{IV}(l_f^2 K_f + l_r^2 K_r) \gamma + \frac{2l_f^2 K_f}{I} \delta_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

### III. 예측제어기 설계

2바퀴 로봇 시스템의 각각의 위치와 속도 제어는 PID 알고리즘을 사용하였다. PID 알고리즘에는 구동 모터의 출력을 제어하기 위해서 비례, 적분, 미분 제어를 이용하였다. PID 제어 알고리즘은 구동모터의 중요한 시스템 특성, 즉 샘플링 타임, 정상상태 오차, 시스템 안정도 등을 제어한다. 제어 알고리즘의 각 항은 서로 다르게 시스템의 특성에 영향을 미친다. 3개의 Gain상수의 설정은 좋은 시스템 특성을 갖고 빠른 시스템 응답을 만드는데 중요하다. 미세하게 조정된 PID 알고리즘은 시스템응답을 빠르게 하고 시스템의 안정성을 높인다. 제어 알고리즘을 향상시키기 위해서는 2가지의 조정이 필요하다. 첫째는 상당히 큰 적분상수에 의하여 오랜 시간 후에 큰 오차를 일으키는 불안정성을 막기 위하여 적분항의 크기를 적당한 값으로 고정시키는 것이고 둘째는 시스템 안정성을 높이기 위해 오차의 부호가 바뀔 때 적분항을 제거하는 것이다. 예측제어기의 설계는 그림 3과 같으며 이는 출력에 발생하는 외부 외란 입력과 센서의 노이즈를 고려한 블록선도이다. 여기서  $G(s)$ 는 제어 플랜트,  $K(s)$ 는 제어기,  $\Delta(s)$ 는 시간지연 요소,  $C(s)$ 는 예측 보상기를 각각 나타낸다.

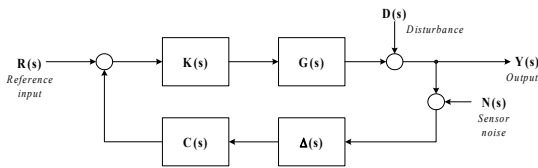


그림 3. 외란과 센서 노이즈를 고려한 예측제어 시스템  
Fig. 3. Predictive Control System with Disturbance and Sensor Noise.

여기서 입력되는 요소는  $R(s)$ ,  $D(s)$ ,  $N(s)$ 로서 시스템이 선형시스템이면 출력  $Y(s)$ 는 세 가지 입력의 영향이 선형 결합되어 식(6)과 같이 나타난다[7].

$$Y(s) = P_{ry}(s)R(s) + P_{dy}(s)D(s) + P_{ny}(s)N(s) \tag{6}$$

여기서  $P_{ry}(s)$ 는 기준입력  $R(s)$ 와 출력  $Y(s)$ 의 관계를 나타내는 전달함수이며,  $P_{dy}(s)$ 는 외란  $D(s)$ 와 출력  $Y(s)$  사이의 전달함수,  $P_{ny}(s)$ 는 노이즈  $N(s)$ 와 출력  $Y(s)$ 사이의 전달함수이다. 바람직한 시스템응답은  $P_{ry}(s) \sim 1$ ,  $P_{dy}(s) \sim 0$ ,  $P_{ny}(s) \sim 0$  로서 출력은 기준입력인  $R(s)$ 만

나타나고 외란과 노이즈에 의한 출력은 감쇠시키는 것이다. 각 입력에 대한 전달함수는 식 (7) ~ (9)와 같다.

$$P_{ry}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)K(s)}{1 + G(s)K(s)C(s)\Delta(s)} \tag{7}$$

$$P_{dy}(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{1}{1 + G(s)K(s)C(s)\Delta(s)} \tag{8}$$

$$P_{ny}(s) = \frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{G(s)K(s)C(s)\Delta(s)}{1 + G(s)K(s)C(s)\Delta(s)} \tag{9}$$

일반적인 제어 시스템에서는  $C(s)$ 와  $\Delta(s)$ 가 존재하지 않으므로 시스템 설계 시 저주파영역에서는  $|G(s)K(s)|$ 의 이득을 크게 하고 고주파 영역에서는 이득을 낮게 설계하여 강인한 특성을 나타내도록 설계한다. 제한한 시스템에서는  $C(s)$ 와  $\Delta(s)$ 가 추가된다.  $G(s)K(s) = n(s) / d(s)$ 로 두면, 일반적으로 강인한 시스템 특성을 가지기 위해 저주파영역에서는  $n(s) \gg d(s)$ 로  $|G(s)K(s)|$ 가 큰 이득을 가지며  $P_{ry}(s) \sim 1$ ,  $P_{dy}(s) \sim 0$ 의 특성이 가지며 고주파 영역에서는  $n(s) \ll d(s)$ 로  $|G(s)K(s)|$ 가 낮은 이득으로  $P_{ny}(s) \sim 0$ 의 특성이 나타난다. 제한된 시스템에서  $P_{ry}(s)$ 는 저주파에서  $n(s) \gg d(s)$ 이므로 식 (10)과 같이 근사화 된다.  $\Delta(s)$ 는 시간지연 전달함수이므로 식 (10)과 같이 이득에는 영향이 나타내지 않으며 위상에만 영향을 미친다[8].

$$|P_{ry}(s)| \cong \frac{1}{|C(s)\Delta(s)|} \cong \frac{1}{|C(s)|} \tag{10}$$

따라서 시스템의 저주파영역에서의 주파수특성이 원래의 1에 가까운 값의 특성에서  $1/|C(s)|$ 로 변형되는데  $1/|C(s)|$ 의 주파수응답을 모델링 오차에 대하여 강인한 특성을 가지도록 식 (11)의 조건을 만족하도록 설계할 수 있다. 즉, 시스템이 강인한 특성을 가지도록 설계하여 시간지연에 강인한 시스템을 설계할 수 있다[9].

$$\sigma_{\max}[E(j\omega)] < \sigma_{\min}[I + T^{-1}(j\omega)] \tag{11}$$

$$\sigma_{\max}[P_{ry}(j\omega)] < \sigma_{\max}^{-1}[E(j\omega)]$$

### IV. 실험 및 분석

본 연구에서 제안한 ARS를 이용한 2바퀴 로봇의 수평유지와 자세제어의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 먼저 ARS의 출력을 실험을 통하여 확인하였다. 그림 4는 2바퀴 로봇이 수평상태에서 100(ms)로 고정된 조향각의 오차를 나타내었다. 점선의 결과는 시간지연이 없는 경우의 응답을 나타내며 실선은 예측제어기가 적용된 응답이며 점 실선은 적용되지 않은 응답을 각각 나타낸다. 예측제어기의 응답에서 비록 시스템 내부에 시간지연이 존재하지만 제어기의 전체 루프설계를 100(ms)의 시간지연과 오차에 대하여 강인하도록 설계하였으므로 루프내의 시간지연에 대하여 시스템은 강인한 특성을 나타내며 안정적으로 제어가 수행된다. 그러나 시간지연이 크게 발생한 경우의 시스템 응답에서 각 조향 각 오차의 크기가 증가하고 진동이 발생됨을 확인할 수 있으며 이는 시간지연에 따른 제어 시스템의 성능저하를 나타낸다. 이에 비해 예측제어기가 적용된 시스템의 응답은 시간지연이 없는 경우의 응답과 큰 차이를 나타내지 않는다. 이는 예측제어기가 시간지연에 대한 시스템의 불확실성을 잘 보상하여 예측제어기의 성능의 우수함을 나타낸다. 그림 5와 그림 6은 시간지연이 발생한 경우의 직교좌표 공간상의 오차와 입력 토크를 나타낸다.

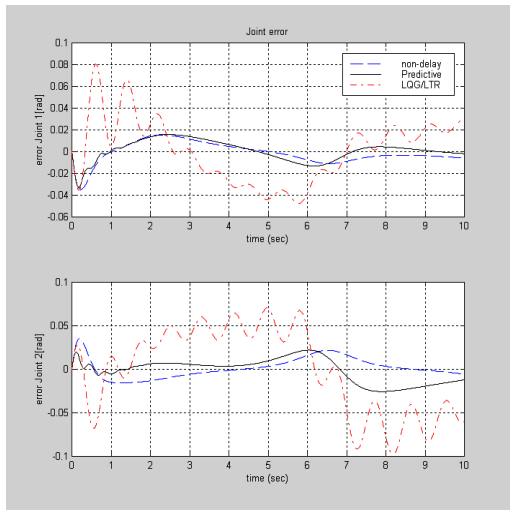


그림 4. 100(ms)로 고정된 시간지연에 대한 조향각의 오차  
Fig. 4. Steering Angle Errors for 100(ms) Fixed Time Delay.

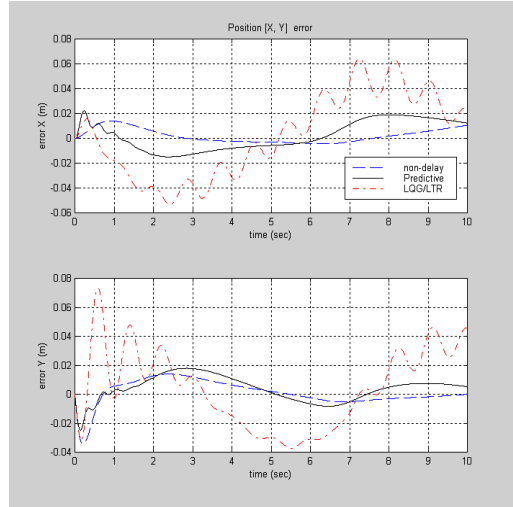


그림 5. 100(ms)로 고정된 시간지연에 대한 직교좌표 오차  
Fig. 5. Cartesian Errors for 100(ms) Fixed Time Delay.

그림 5와 같이 예측제어기를 사용하지 않았을 경우 조향각의 오차의 크기가 증가하고 진동함에 따라 직교좌표 공간상의 오차 역시 확대되고 진동한다. 그러나 예측제어기가 적용된 시스템의 응답은 각관절과 마찬가지로 시간지연이 없는 경우의 응답과 큰 차이를 나타내지 않는다. 그림 6과 같이 토크 입력 역시 예측제어기가 적용된 시스템은 시간지연이 없을 때에 비해 변화가 나타나지 않으나 적용되지 않은 경우는 토크 입력의 변화가 심하며 떨리는 현상이 발생된다.

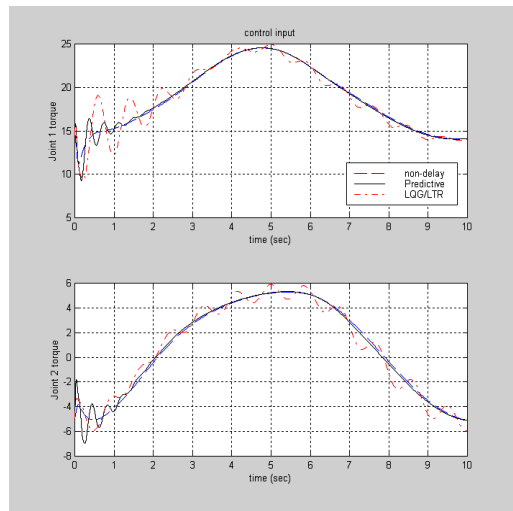


그림 6. 100(ms)로 고정된 시간지연에 대한 제어입력 토크  
Fig. 6. Control Input Torques for 100(ms) Fixed Time Delay.

## V. 결 론

본 연구에서는 현재 상업화가 되고 있는 ARS를 이용하여 조향 각을 이용한 2바퀴 로봇의 실시간 균형 유지 시스템에 대하여 시간지연에 따르는 문제를 극복하는 방법을 연구하였다. 예측제어기를 적용한 시스템은 지연에 따르는 치명적인 영향이 보상되어 안정한 시스템이 된다는 것을 확인하였다. 이러한 결과에서 예측제어기를 적용한 시간지연 시스템은 전 송지연이나, 모터의 회전운동을 변환시켜 직선운동을 요구하는 경우 직선운동의 방향전환 시점에서 나타나는 부하 등을 포함하는 불확실한 시간지연과 외란에 대하여 보다 안정적이며 강인한 시스템임을 확인하였다. 제안된 제어기는 플랜트에 대한 대략적인 정보만으로도 가능하므로 불확실성을 갖는 시스템이나, 정확한 모델링이 어려운 시스템 등의 다양한 제어 시스템에 적용 가능하다. 제어 시스템의 페루프 내부의 시간 지연은 시스템의 안정성 및 성능에 치명적인 영향을 미치며 이에 대한 강인한 제어에 대해서 성능과 안정도-강인성 사이의 상관관계를 고찰하였다. 시간지연에 대한 강인한 제어기와 시스템 응답속도를 나타내는 성능사이에는 트레이드-오프 관계가 있으며 이는 선형 제어 시스템의 한계임을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 이를 극복하기 위한 예측제어기를 제안했으며 이를 원격 시스템의 제어문제에 도입하여 2바퀴 로봇의 제어루프 내부에 시간지연을 인가하고 선형 제어기와 예측제어기를 결합한 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. 100(ms)이내의 시간지연에 대하여 강인한 특성을 실현하기 위해 목표필터루프를 설계하고 강인도-안정성을 만족하는 제어기를 설계하였다. 결과로부터 예측제어기가 적용된 시스템은 제어 루프 내부의 시간지연을 보상하여 제어시스템의 안정성을 향상시키고 지연에 대한 불확실성으로 인한 제어시스템의 성능의 저하를 최소화함을 확인하였다. 향후 연구 과제로는 예측모델의 예측구간에 한계가 있어 제한된 범위 이후의 값은 예측이 어려운 문제가 있으므로, 예측모델의 이득조정의 최적화와 플랜트에 따른 최적의 가중치 함수를 구하여 예측구간을 더욱 확장하는 것이다.

## 참고문헌

[1] Kang Jin Gu, "Real Time Pose Control for the Horizontal Maintenance and driving of Mobile Inverted Pendulum," Journal of the The Korea Society of Computer and Information, Vol. 16, NO. 7, pp. 157~163, 2011.

- [2] R. O. Ambrose, R. T. Savely, S. M. Goza, P. Strawser, M. A. Diftler, I. Spain, and N. Radford "Mobile Manipulation using NASA's Robonaut," IEEEICRA, pp. 2104-2109, 2004.
- [3] Block, D., K. Åström, and M.Spong, "The Reaction Wheel Pendulum," Synthesis Lectures on Control and Mechatronics, Morgan & Claypool Publishers, Princeton, NJ, 2007.
- [4] K. N. Srinias and L. Behera, "Swing-up strategies for a reaction wheel pendulum," Int. J. Syst. Sci., vol. 39, no. 12, 1165-1177, 2008.
- [5] K. N. Srinias and L. Behera, "Swing-up strategies for a reaction wheel pendulum," Int. J. Syst. Sci., vol. 39, no. 12, 1165-1177, 2008.
- [6] N. Shanmugathasan and R. D. Johnston, "Exploitation of Time Delays for Improved Process Control," International Journal of Control, Vol. 48, No. 3, pp. 1137-1152, 1988.
- [7] Z. Q. Wang and S. Skogestad, "Robust control of time-delay systems using the Smith predictor," International Journal of Control, Vol. 57, No. 6, pp. 1405-1420, 1993.
- [8] Jang Myung Lee, "Dynamic Modeling and Cooperative Control of a Redundant Manipulator Based on Decomposition," International Journal of KSME, Vol. 12, No. 4, pp. 642~658, 1998.
- [9] Hwa. R, Jae H. Park, Jang M, Lee, "Compensation of Time Delay Using Predictive Controller," Journal of the The institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 36, NO. 2, pp. 46~56, 1999.

## 저 자 소개



강진구

2001년 2월: 부산대학교  
전자공학과 졸업(공학박사)  
2001년~현재: 강동대학교  
자동차튜닝과 부교수  
관심분야 : 인공지능로봇  
Email : jgukang@gangdong.ac.kr