

# 단일 Camera를 이용한 Ball and Plate 로봇 제어장치 설계

박이근<sup>†</sup>, 박주연<sup>\*\*</sup>, 박성모<sup>\*\*\*</sup>

## 요 약

본 논문에서는 단일 카메라와 2개의 모터를 이용하는 볼-플레이트 로봇제어장치를 설계하는 방법과 제어 오차를 줄이는 방법을 제안한다. 볼-플레이트 시스템을 설계하기 위해서는 볼의 상태 파악과 플레이트의 균형 유지가 필요하다. 볼의 상태는 캠시프트 알고리즘을 이용하여 추적하고 칼만필터로 공의 위치 오차를 보정한다. 플레이트 균형은 두 개의 모터를 움직여 제어하는데 측정 오차가 적은 DC모터를 사용하였다. 플레이트의 표면적 상태나 공의 위치 추적오류 등을 인하여 작은 오차가 여전히 남아있다. 이러한 오차는 점점 쌓이게 되며 결국은 볼의 균형유지를 방해하게 된다. 이를 해결하기 위해 적분기를 추가한 제어기를 제안한다.

## Design of Ball and Plate Robot controller using Single Camera

Yi-Keun Park<sup>†</sup>, Ju-Youn Park<sup>\*\*</sup>, Seong-Mo Park<sup>\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

This paper proposes a design method of ball-plate robot controller using single camera and two motors to balance the ball on plate and reduce steady state control error. To design the ball-plate system, it is necessary to observe state of the ball and maintain balance of the plate. The state of the ball is tracked by using the CAMShift algorithm and position error of the ball is compensated by the Kalman filter. Balance of the plate is controlled by driving two motors and we used DC motors which has smaller measurement error. Due to surface condition of the plate or tracking error of ball's position, there are small errors remained. These errors are accumulated and disturb maintaining balance of the ball. To handle the problem, we propose a controller supplemented with an integrator.

**Key words:** Ball-Plate(볼플레이트), Balance Control(균형 제어), Robot(로봇)

## 1. 서 론

최근에 로봇의 팔에 BBS(Ball and Beam System)을 장착하여 로봇의 팔이 볼의 균형을 잡는 연구가 진행되었다[1]. BBS는 휘어지지 않는 빔(Beam) 위

에서 볼의 움직임 상태를 측정하여 2개의 자유도에 따라 막대를 제어하는 시스템이다. 여기서 발전하여 4개의 자유도를 따라서 플레이트(Plate) 위에서 볼의 움직임을 파악하여 플레이트를 제어하는 시스템이 BPS(Ball and Plate System)이다. 플레이트의 경우

※ 교신저자(Corresponding Author) : 박성모, 주소 : 광주광역시 북구 용봉동 300 전남대학교 전자컴퓨터공학부 공과대학 7호관 339호(500-757), 전화 : 062) 530-1798, FAX: 062) 530-3439, E-mail : smpark@jnu.ac.kr

접수일 : 2012년 7월 19일, 수정일 : 2013년 1월 2일

완료일 : 2013년 1월 29일

<sup>†</sup> 준회원, 전남대학교 전자컴퓨터공학과

(E-mail : provezz@naver.com)

<sup>\*\*</sup> 준회원, 전남대학교 전자컴퓨터공학과

(E-mail : Lindolsang@nate.com)

<sup>\*\*\*</sup> 정회원, 전남대학교 전자컴퓨터공학부(전남대학교 정보통신연구소)

※ 본 연구는 광기술기반 융합부품소재산업 인재양성센터의 지원으로 수행된 연구결과임

에는 시스템을 만드는데 어려움이 있지만 플레이트는 빔 보다 활용도 면에서 다양하게 사용될 수 있고 제어 기법을 개발하는데 많은 도움을 줄 수 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다.

BPS는 크게 볼의 상태를 파악하는 부분과 균형유지를 위한 플레이트 제어 부분으로 구성된다. 볼의 상태를 파악하는 방법으로는 비전(Vision) 센서를 사용하는 방법이 있다. 센서의 이미지를 기반으로 볼의 상태를 파악하는 방법이다[2]. 이외에도 3축의 구성요소와 각 축 방향으로 토크를 감지하는 FT(force-torque)센서를 이용하여 동적인 방정식을 계산하여 상태정보를 파악하는 방법도 있다[3]. 동적인 방정식의 계산은 매우 복잡하기 때문에 일반적으로 비전센서가 BPS에 많이 사용되어지고 있다.

균형을 유지하기 위한 플레이트 제어 방법으로 비선형 제어, PD(Proportional Derivative)제어, LQR(Linear Quadratic Regulation)제어 등 다양한 방법이 있다. Hauser et al은 비선형 제어를 제안하였는데 이는 고차원의 계산 량으로 인하여 실시간 시스템에 적용하기 어렵다[4]. PD제어는 시스템 모델링 없이 PD 계수로 조절이 가능하지만 정밀한 제어에는 적용하기 어렵다는 단점을 가지고 있다[5]. LQR제어는 복잡한 초정밀 제어가 가능하지만 모델링이 정확하지 않는 경우와 현재 상태들을 도출해내지 못하면 신뢰성이 떨어지는 단점을 지니고 있다. 이 밖에도 퍼지(Fuzzy) 제어[6], 및 퍼지 신경망(Fuzzy & Neural Network) 제어[7] 등 좀 더 복잡한 다양한 방법들이 연구되었다.

본 논문에서는 비전센서를 통하여 현재 상태를 파

악하며 LQR제어를 통하여 볼-플레이트 균형을 유지하는 시스템을 설계하고 제작하였다. 그리고 LQR 제어의 정확한 현재상태를 도출하기 위하여 측정과 제어에 따른 오차를 줄이는 방법인 적분기에 대하여 제안하고 설명한다. 2장에서는 볼의 상태를 측정하는 방법과 오차를 줄이는 방법에 대해 설명하고 3장에서는 2개의 모터(Motor)를 이용한 LQR(Linear Quadratic Regulation)제어 방법과 제어 시 발생하는 축척된 오차를 줄이는 방법으로 적분기에 대하여 제안한다. 4장은 제안한 방법을 비교하는 실험과 그 결과를 설명하고 5장은 결론 및 향후 연구방향에 대해 설명한다.

## 2. 볼의 상태 측정

BPS의 주 목적은 볼이 플레이트 상단에서 떨어지지 않도록 균형유지를 제어하는 것이다. 본 연구에서는 시스템을 설계하기 위하여 한 개의 비전카메라와 2개의 DC모터를 이용하여 시스템을 그림 1의 왼쪽 그림과 같이 구성하였다. 볼의 움직임 측정을 위해서 하나의 비전 카메라를 플레이트의 상단부분에 위치시킨다. 이 카메라는 볼의 움직임을 추적하여 위치 상태를 파악하며 위치 데이터는 시리얼 통신(RS-232)을 통하여 플레이트 제어부로 전달된다. 그림 1의 오른쪽 그림은 BPS의 볼의 상태를 측정하는 전체 아키텍처(architecture)로 윈도우7 환경에서 MFC(Microsoft Foundation Class)와 OpenCV(Open Computer Vision) 라이브러리를 이용하여 어플리케이션(Application)을 구성하였다.

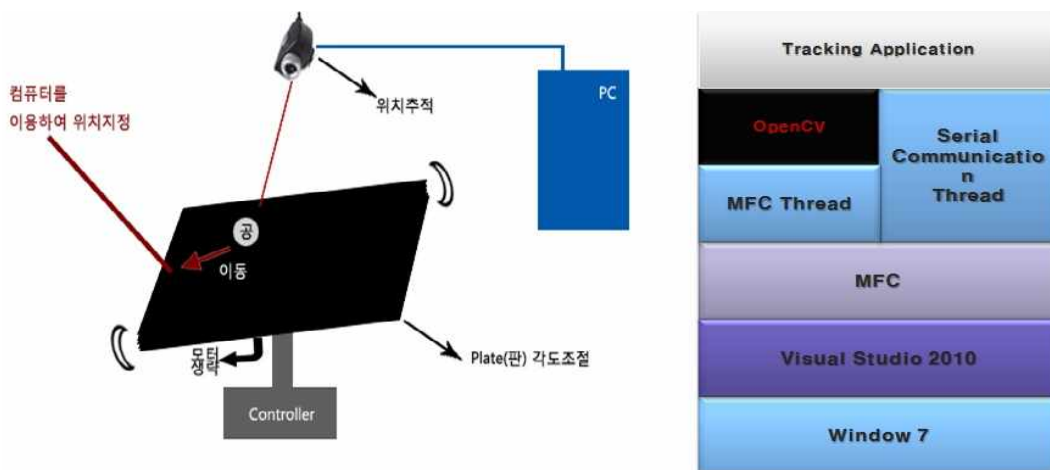


그림 1. Ball-Plate 시스템 구조와 아키텍처

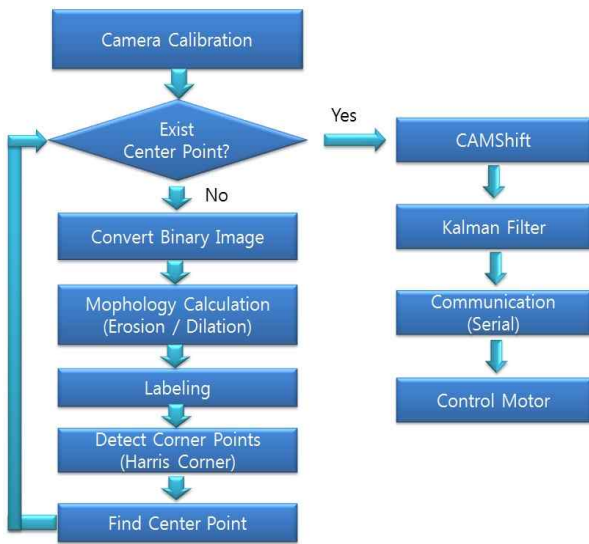


그림 2. 공의 상태 측정 흐름도

볼의 위치를 측정하기 위해서는 먼저 기준이 될 수 있는 좌표가 필요하다. 본 연구에서는 플레이트가 카메라와 수평을 이루었을 때의 상태를 초기 절대좌표로 사용하였다. 절대좌표는 플레이트의 무게중심점을 좌표(0, 0)으로 설정하고 절대 좌표를 기준으로 볼의 움직임을 측정하게 된다. 그림 2는 공의 상태를 측정하는 전체 흐름도이다. 먼저 카메라의 보정이 이루어지고 무게중심 여부를 판별한다. 무게중심 설정이 이루어지면 캄시프트(CAMShift) 알고리즘을 통하여 볼의 위치 상태를 파악하고 칼만필터(Kalman Filter)를 이용하여 발생하는 오차를 보정하게 된다. 이렇게 보정된 데이터들은 시리얼 통신을 통하여 플레이트 제어부에 전달하게 된다.

2.1 플레이트 무게중심 설정

볼의 상태 측정에 앞서 먼저 카메라의 왜곡을 줄

이는 작업이 필요하다. 상태를 추정에 있어서 최소한의 오차를 만들기 위함이다. 카메라 렌즈에서 생기는 방사왜곡과 접선왜곡을 보정하기 위하여 체스(Chess)판 보드를 이용하였다. 다음으로 플레이트의 중심좌표를 찾기 위해서 카메라로부터 받아온 영상에서 플레이트 객체를 분리해야 한다. 이는 형태학적 접근 방법을 이용하였다. 형태학적으로 접근하기 위해서는 이진(Binary)영상으로 변환을 해야 하는데 이진임계 값은 주변 환경의 밝기(Brightness)에 따라 크게 영향을 받기 때문에 항상 주변 환경을 고려하여 가변적인 임계 값으로 설정하게 하였다. 히스토그램을 이용하여 평균값을 적용하면 플레이트를 구별 할 수 있는 임계 값 설정이 된다. 이진 작업 후에는 많은 잡음들이 포함되어 있어서 전 처리 작업으로 열기(Erosion), 닫기(Dilation) 연산을 통하여 잡음을 제거 해주게 된다. 그림 3의 왼쪽 그림은 카메라 센서로부터 받아온 원본 데이터이고 오른쪽 그림은 형태학적 처리를 위하여 이진영상 변환 후 열기, 닫기 연산을 수행한 결과의 그림이다. 주변 환경의 플레이트와 유사한 큰 객체는 여전히 남아 있어서 플레이트 객체만 분리하기 위하여 레이블링(Labeling) 작업을 수행한다.

레이블링은 인접한 화소끼리 같은 번호를 붙이면서 객체를 각각 분리하는 방법이다. 카메라는 항상 플레이트의 상단에 있기 때문에 가장 큰 객체가 플레이트라고 가정하였다. 플레이트 객체를 얻은 후에는 플레이트의 무게 중심을 찾아야 한다. 무게중심을 구하기 위해서는 사각형의 4개의 꼭지 점이 필요하다. 꼭지 점을 구하기 위하여 본 시스템에서는 회전과 크기변환에도 강건한 해리스코너(Harris Corner)검출기를 이용하였다[8]. 이는 상하 좌우로 움직이는

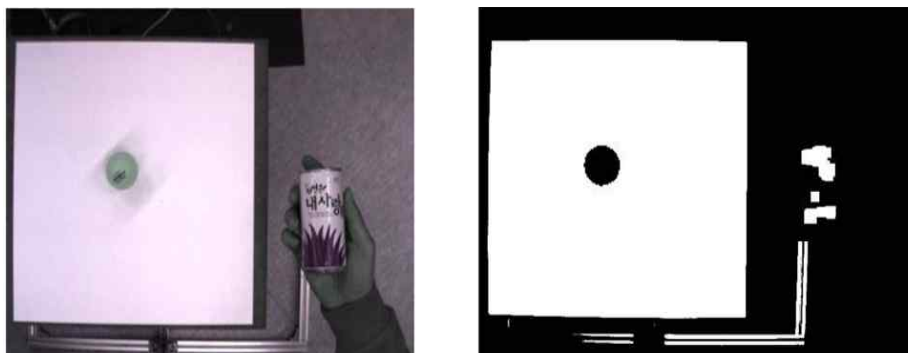


그림 3. 플레이트 객체를 얻기 위한 영상의 형태학적 처리

윈도의 픽셀 값 변화를 분석하여 코너 응답 함수를 정의하여 상하 좌우에 따른 고유 값을 가지고 코너를 결정하는 방식이다. 플레이트는 사각형이기 때문에 올바른 4개의 점(Inlier)이 나와야 하지만 카메라 이미지의 샘플링으로 인하여 계단 현상이 발생하여 많은 잡음(Noise) 포인트가 검출되게 된다. 공의 위치 부분에서도 잘못된 점(Outlier)이 발생하므로 올바른 점을 찾기 위하여 그림 4와 같은 알고리즘을 이용하였다. 먼저 왼쪽 상단에 위치하는 가장자리 점을 첫 번째 점으로 선정 한다. 그리고 첫 번째 점과 각각의 후보 점들에 대해 거리를 계산하여 가장 먼 거리에 있는 점을 대각선에 있는 두 번째 점으로 선정한다.

세 번째 점 선정은 가운데 그림과 같이 첫 번째 점과 두 번째 점 각각을 기준으로 후보 점들 간의 거리를 구하여 두 거리의 합을 구하고 가장 먼 거리에 있는 점을 세 번째 점으로 선정한다. 마지막 점 선정은 그림 4의 오른쪽 그림과 같이 앞에서 선정된 세 점 과 각각의 후보 점에 대해서 삼각형을 형성하고 세 개의 삼각형 넓이의 합 중 가장 큰 넓이를 가지는 점이 최종점으로 선정되게 된다. 이렇게 선정된 점들을 가지고 무게 중심을 구하고 기준이 되는 중심 좌표(0, 0)을 설정하게 된다.

2.2 캄시프트(CAMShift)를 이용한 공의 추적

공의 움직임을 추적하는 방법 중에서 가장 많이 알려져 있는 민 시프트(MeanShift) 알고리즘은 컬러 정보를 기반으로 윈도우(Window)를 사용하여 추적 대상의 중심을 찾는 알고리즘이다[9]. 이는 객체의 기울어짐이나 회전에 강인하고 빠른 수행 속도로 실시간 추적에 적합하다. 하지만 관심영역 검출에 있어 더 좋은 영역이 있음에도 불구하고 한곳에 수렴하는

단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 볼의 객체를 추적하기 위하여 그림 5와 같이 탐색 윈도우 크기를 조절할 수 있는 캄 시프트(Continuously Adaptive Mean Shift) 알고리즘을 이용하였다[10].

캄 시프트 알고리즘은 먼저 관심 영역을 설정하고 관심영역의 히스토그램을 생성한다. 히스토그램을 효율적으로 사용하기 위하여 색상의 분포를 통하여 가장 큰 효과를 얻을 수 있는 HSI 색 모델을 이용한다. 경사 상승 알고리즘에서 부분적인 최적 해에 수렴할 수 있기 때문에 여러 개의 윈도우를 생성한다. 이렇게 생성된 윈도우의 크기 및 중심점의 위치를 반복적으로 변화 시킨다. 이때 윈도우 중심점의 위치는 윈도우 내에 분류된 화소 값의 평균이 되며 윈도우의 크기는 화소 값들의 합에 비례하여 증가 한다. 이 과정을 모든 윈도우가 수렴할 때 까지 반복하여 탐색이 종료되며, 최종 윈도우를 물체의 영역으로 결정한다.

윈도우의 수렴 여부는 윈도우의 위치와 크기의 변화량에 의해 결정된다. 영역내의 윈도우가 수렴하게 되면 볼보다 큰 윈도우를 출력할 수 있기 때문에 실패하는 임계 값 설정이 필요하다. 본 시스템은 윈도우 크기를 공의 사이즈에 직접 맞춰 설정하고 윈도우 크기가 더 커질 경우에 영역 추출이 실패한 것으로 간주하였다. 그림 6은 본 시스템에서 탁구공의 크기를 윈도우 크기로 설정하고 캄시프트를 이용하여 볼의 움직임을 추적하는 것을 보여준다.

2.3 칼만 필터(Kalman Filter)를 이용한 공의 궤도 추정

캄시프트의 얻은 데이터를 가지고 플레이트 위에서 볼의 균형 잡기를 실험해 본 결과 쉽게 볼이 플레

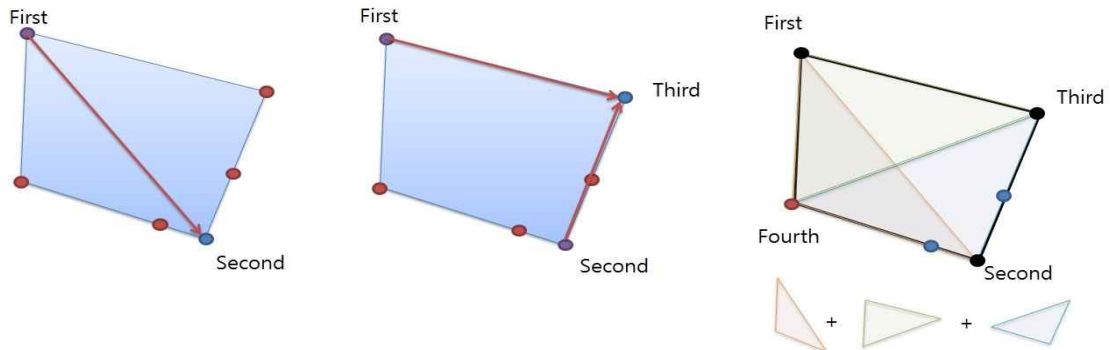


그림 4. 사각형의 꼭지점을 찾는 알고리즘

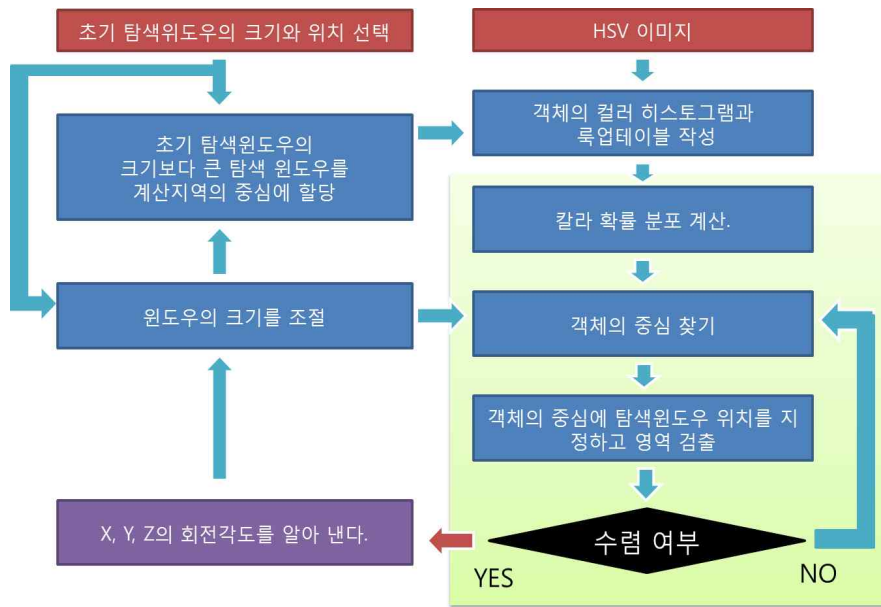


그림 5. 캄시프트(CAMShift)알고리즘 흐름도

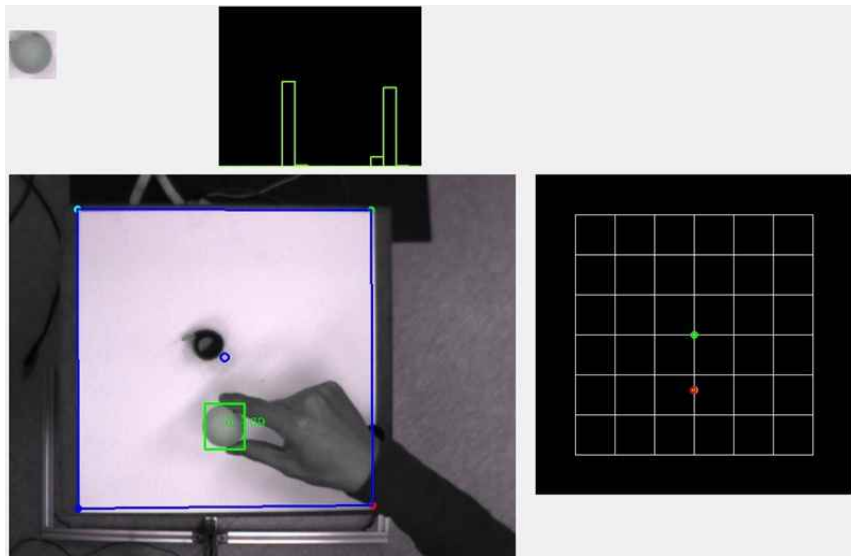


그림 6. 캄시프트 알고리즘의 시스템 적용

이트 밖으로 이탈하였다. 그래서 매트랩(Matlab)을 이용하여 시뮬레이션을 해본 결과도 실제 데이터와 측정 데이터가 시간이 지남에 따라 많이 달라지는 결과를 얻었다. 이는 잘못된 추적과 플레이트의 표면적에서 발생하는 마찰 등과 같은 오차들이 발생하기 때문이라고 생각하고 그림 7과 같은 칼만 필터를 이용하여 보정하였다[11,12].

칼만 필터는 과거의 측정데이터와 새로운 측정데이터를 가지고 데이터에 포함된 노이즈를 제거하여 새로운 결과를 추정하는 방법이다. 먼저 초기 값 설

정으로 추정오차공분산( $P_{k-1}$ )과 현재 상태 값( $\hat{x}_{k-1}$ )을 설정한다. 그리고 예측단계와 교정단계의 반복을 통하여 예측 값을 제공하게 된다. 그림 8은 칼만 필터를 적용한 실험 과정을 보여준다. 왼쪽 사진에서 중앙의 사각형 이전 위치에서 아래 사각형 현재 위치로 이동했을 경우의 이미지이다. 오른쪽 사진의 녹색 점은 이전 위치를 나타내고, 빨간 점은 실제 이동한 측정된 값을 나타내며, 노랑 점은 칼만 필터를 적용한 후의 추정 값을 나타낸 것이다. 측정 값 보다 추정된 값이 공의 실제 위치와 비교해 보았을 때 칼만필터를



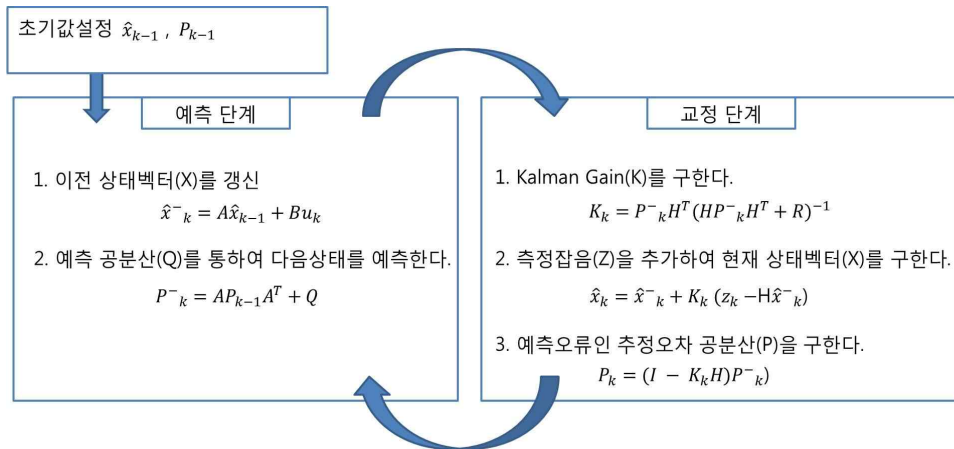


그림 7. 칼만필터(Kalman Filter) 흐름도

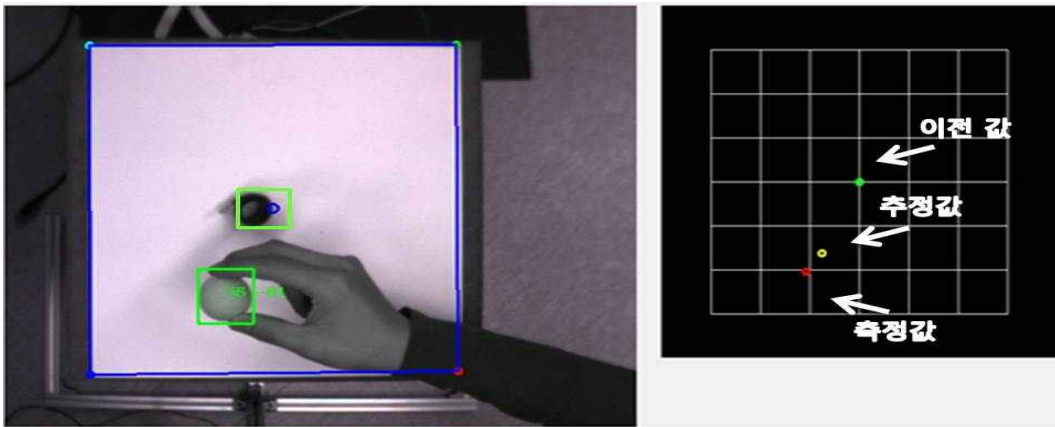


그림 8. 칼만 필터의 적용

이용하여 추정된 값이 더 측정된 값 보다 근사한 결과를 보였다.

그림 9는 좌표 데이터에 대한 칼만 필터의 적용 전과 후를 지속적인 시간에 따라 매트랩으로 시뮬레

이션 한 결과이다. 왼쪽은 시간에 따른 X축 좌표, 오른쪽은 시간에 따른 Y축 좌표를 나타낸다. 파랑선은 칼만 필터를 적용하기 전이며 빨간 선은 칼만 필터를 적용한 후의 상태 그래프이다. 적용한 후가 실제 불

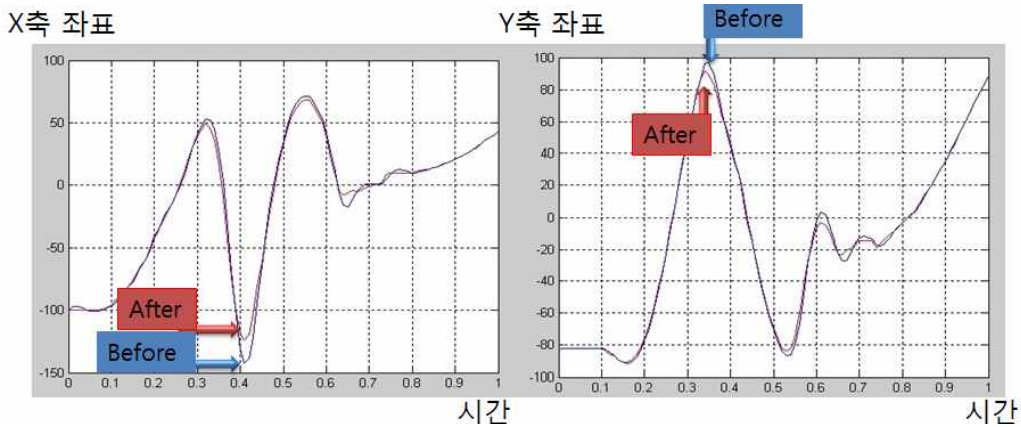


그림 9. 칼만필터의 적용 전 후의 X축과 Y축 좌표 변화 그래프

의 위치와 근사하는 것을 확인 할 수 있었다.

이렇게 칼만 필터를 이용하여 재설정 된 볼의 위치상태 데이터들은 시리얼(RS-232) 통신을 통하여 플레이트 제어부로 전달 되게 된다.

### 3. 플레이트의 균형 유지

볼의 위치상태를 파악하였다면 상태에 따른 플레이트의 균형유지 제어가 필요하다. 플레이트 제어를 위하여 본 시스템은 그림 10과 같이 구성하였다. 시리얼 통신을 이용하여 전송받은 볼의 상태 데이터를 토대로 LQR Control 알고리즘을 바탕으로 각도 값을 산출하고 이 값을 모터의 PID Control 알고리즘에 입력한다. 모터는 LQR이 지시한 각도를 향해 움직이고 이것이 반복되면서 제어 루프를 형성한다. 복잡한 초정밀 제어를 위하여 모델링이 필요한 LQR(Linear Quadratic Regulation) 제어는 모델링이 정확하지 않는 경우와 현재 상태들을 도출해내지 못하면 신뢰성이 떨어지는 단점을 지니고 있기 때문에 정확한 모델

링 작업이 필요하다.

#### 3.1 동역학적 모델링

볼과 플레이트의 동역학적 상태 방정식을 도출해 내 기위해서는 카메라를 통해 본 좌표계와 플레이트의 좌표계의 관계방정식이 필요하다. 그림 11에서  $i, j, k$ 는 카메라 좌표계의 기저벡터이고  $e_1, e_2, e_3$ 는 플레이트에 고정된 좌표계의 기저벡터이다.

각각의  $x, y$ 좌표에 대한 모터 제어변환각도를  $\phi_1, \phi_2$  정의하고 하나의 축은 움직이지 않기 때문에 수식(1)의 관계방정식이 성립한다[13]. 시리얼 통신을 통하여 얻은 볼의 상태 데이터에 DC모터의 인가된 각도를 곱해주면 카메라 좌표계에서 볼의 위치를 얻어 낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{j} \\ \hat{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi_2 & \sin\phi_1\sin\phi_2 & -\cos\phi_1\sin\phi_2 \\ 0 & \cos\phi_1 & \sin\phi_1 \\ \sin\phi_2 & -\sin\phi_1\cos\phi_2 & \cos\phi_1\cos\phi_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \hat{e}_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

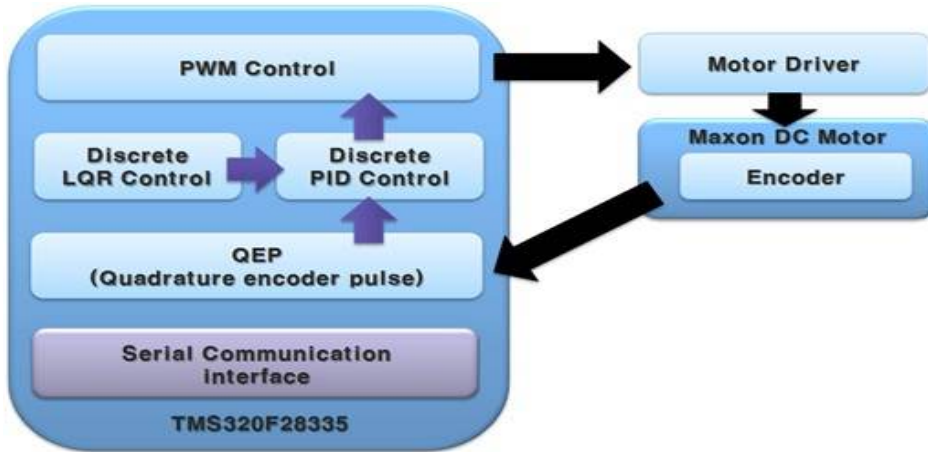


그림 10. 플레이트 균형 유지 시스템 아키텍처

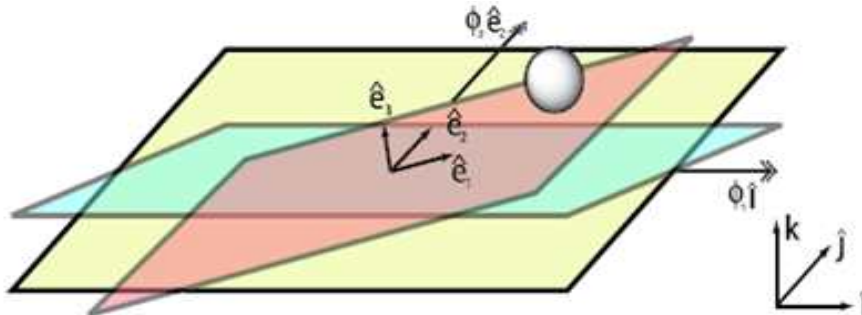


그림 11. 카메라좌표계와 플레이트의 좌표계의 관계

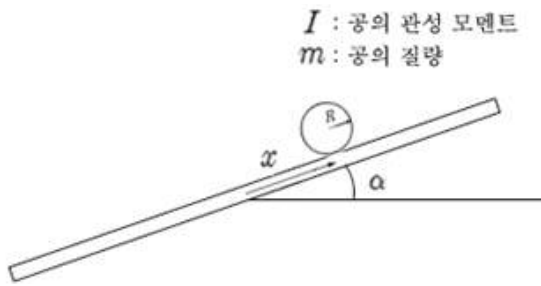


그림 12. 볼-플레이트 시스템 1차원 자유선도

다음으로는 볼과 플레이트의 동역학적 해석이 필요하다. 그림 12와 같이 한쪽 방향에서 볼의 모습을 바라보면 이것은 경사면에서 구르는 볼 모델과 비슷하다. 볼이 경사면에서 구를 때, 힘을 받는 원천은 바로 중력이다. 본 실험에서는 중력은 최대 가속도  $9.81m/s^2$ 로 정의하였다.

플레이트 상에서의 공의 운동을 각각 x축, y축으로 나누어서 볼의 에너지는 회전하는 각도를 고려해서 얻은 값들의 합으로 표현할 수 있는 라그랑지안(Lagrangian) 함수를 이용하면 식(2)로 표현할 수 있다[13]. R은 공의 반지름이며 m은 공의 질량, I는 공의 관성의 모멘트를 나타낸다.

$$(m + \frac{I}{R^2})\ddot{x} - m(\dot{\alpha}\dot{\beta}y + \dot{\alpha}^2x) - mgsin\alpha = 0 \quad (2)$$

$$(m + \frac{I}{R^2})\ddot{y} - m(\dot{\alpha}\dot{\beta}y + \dot{\beta}^2x) - mgsin\beta = 0$$

실제 x축과 y축에 대한 공의 운동은 서로에 대한

간섭을 하는 항들을 포함하는데 이것은 판의 각속도에 대한 제곱이 포함되어 있으므로 식 (2)는 비선형 관계임을 알 수 있다. 이러한 비선형을 제거하고 x축과 y축의 운동방정식을 분리시키기 위해 판의 각도  $\alpha, \beta$ 는 아주 작은 값이라고 가정 하면 식 (3)으로 정리할 수가 있다.

$$(m + \frac{I}{R^2})\ddot{x} - mg\alpha = 0 \quad (3)$$

$$(m + \frac{I}{R^2})\ddot{y} - mg\beta = 0$$

이를 상태 공간 방정식과 볼과 플레이트간의 방정식을 이용하면 식(4)와 같이 최종 상태방정식으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\theta$ 는 판의 각도를, R은 반지름을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{mg}{(\frac{I}{R^2} + m)} \\ -\frac{mg}{(\frac{I}{R^2} + m)} \end{bmatrix} \theta \quad (4)$$

### 3.2 LQR 제어를 통한 시스템의 안정화

공의 속도는 등가속도에 의해 일정하게 증가하게 된다. 이 일정하게 증가된 속도는 이차함수의 모양으로 위치를 증가시키게 된다. 즉 판을 특정한 각도에

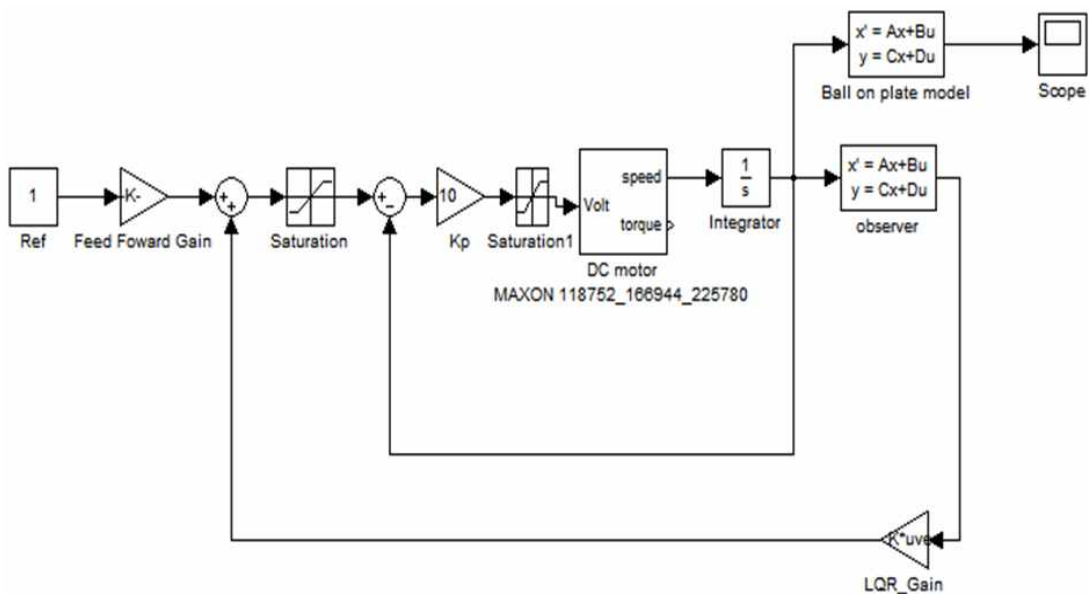


그림 13. LQR 블록선도 매트랩시뮬링크로 표현



고정시키면 공은 일정한 가속도를 받게 되고 이 일정한 가속도는 공의 속도를 증가 시킨다. 이 속도 증가에 의해 2차 함수적으로 위치가 증가하게 되면 오차가 발생하기 때문에 공이 판에서 벗어나게 된다. 이러한 불안정한 특성을 지닌 시스템을 안정화시키기 위해서 LQR설계를 하였다[14]. LQR은 시스템을 안정화 시키는 안정화(Regulator) 역할을 한다. PID 제어처럼 지령치에 대한 추정을 할 수 없기 때문에 피드포워드이득(Feed Forward Gain)을 추가하여 지령을 받을 수 있는 제어기로 변형을 해주어야 한다. 그림 11은 LQR제어를 매트랩시뮬링크로 표현하여 나타낸 것이다. LQR-Gain에 의해 곱해져 피드포워드 이득 값과 더해지는 값은 각도(Rad)로 실제 시스템에서는 액추에이터 즉 DC모터의 지령치로 들어가는 값이 된다.

식(5)는 LQR 성능 지수 함수로 Q와 R 값이 주어졌을 때 성능지수 J가 시간이 무한대로 갈 때 최소가 되게 하는 K를 구하는 것이다. 입력신호의 크기와 응답의 수렴속도 사이에는 상반된 요구조건이 존재하는데 이 두 조건 사이의 타협점을 발견해야한다. 입력벡터(u)와 상태변수(x)의 각각 성분의 절대 값의 합을 시간 적분하여 이 값을 최소로 할 수 있는 게인(Gain)값 K를 결정해야한다.

$$J = \int (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (5)$$

K를 구하기 위하여 입출력 벡터 값과 동역학 모델링 상태방정식을 인자를 가지고 매트랩 코드를 실행하여 피드백이득을 구할 수 있는 LQR함수를 통하여 K값을 결정하였다. 그림 14는 공의 위치를 중심으로

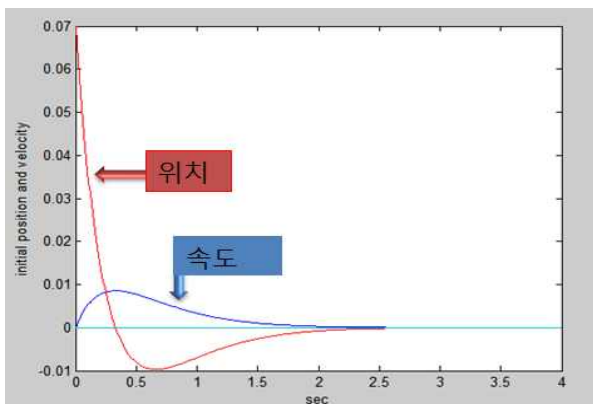


그림 14. 제어가 추가된 시스템에서 공의 위치와 속도 그래프

부터 0.07m 이라고 가정을 하고 LQR을 통하여 안정화되는 과정을 시뮬레이션 한 것으로 2.5초 정도에서 수렴하는 것을 알 수 있다.

### 3.3 적분기를 통한 오차 값 보정

그림 13과 같이 LQR블록선도를 토대로 제어기를 설계한 시스템에서는 피드 포워드 이득을 추가하면 원하는 거리로 덜 이동하는 현상이 발생하는 문제점이 생긴다. 그러한 이유는 첫 번째로 시스템 자체에 적분기가 포함되어 있기 때문이고 두 번째로는 모터의 데드밴드 영역 안의 전압인가시 모터가 움직이지 않기 때문이다. 이러한 정상 상태 오차를 해결하기 위해 적분기를 도입하였고 그림 15와 같이 블록선도를 수정하여 시스템을 구성하였다.

제안하는 적분기는 오차 값을 적분하여 이 적분 값이 커지면 이득 값을 적용시켜 플레이트의 모터를 강제로 움직여 오차를 점점 줄이는 방법이다. 수렴할 때까지 적분을 수행하는 시간이 걸리지만 큰 오차를 줄이기 때문에 정확도적으로 뛰어난 성능을 지닌다.

## 4. 실험 및 결과

본 연구에서는 하이비전의 HVR-2030 비전카메라[15]와, Maxon사의 RE25 DC모터[16]를 이용하여 전체 시스템을 설계 제작하고 볼의 상태 측정과 플레이트의 제어에 따른 오차를 줄이는 방법에 대한 2가지의 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 볼은 탁구공이고 플레이트는 가로 세로 30Cm의 정사각형 크기의 휘지 않는 나무판자를 이용하여 제작하였다. 최대 중력가속도는  $9.81m/s^2$ 로 설정 하였으며 플레이트 제어 부는 TI(Texas Instrument)사의 C2000 계열의 MCU인 TMS320F28335를 이용하였다. 그림 16의 왼쪽 그림은 전체 시스템의 모습이며, 오른쪽 그림은 본 실험에서 사용된 어플리케이션(Application)이다.

첫 번째 실험은 볼의 추적 시 발생하는 오차를 칼만 필터가 얼마나 줄여주는지를 확인하기 위한 실험이다. 모터로부터 생기는 오차가 동일하다고 가정하고, 중심좌표는 원점(0, 0)으로 설정하고 공은 항상 원점으로 무게중심을 잡도록 설정하였다. 그리고 공을 놓는 위치를 x축은 100mm으로 고정하고 y축을 50mm부터 20mm간격으로 총 5단계의 위치로 10회씩 수행하여 공의 플레이트 이탈 여부를 측정하였다.

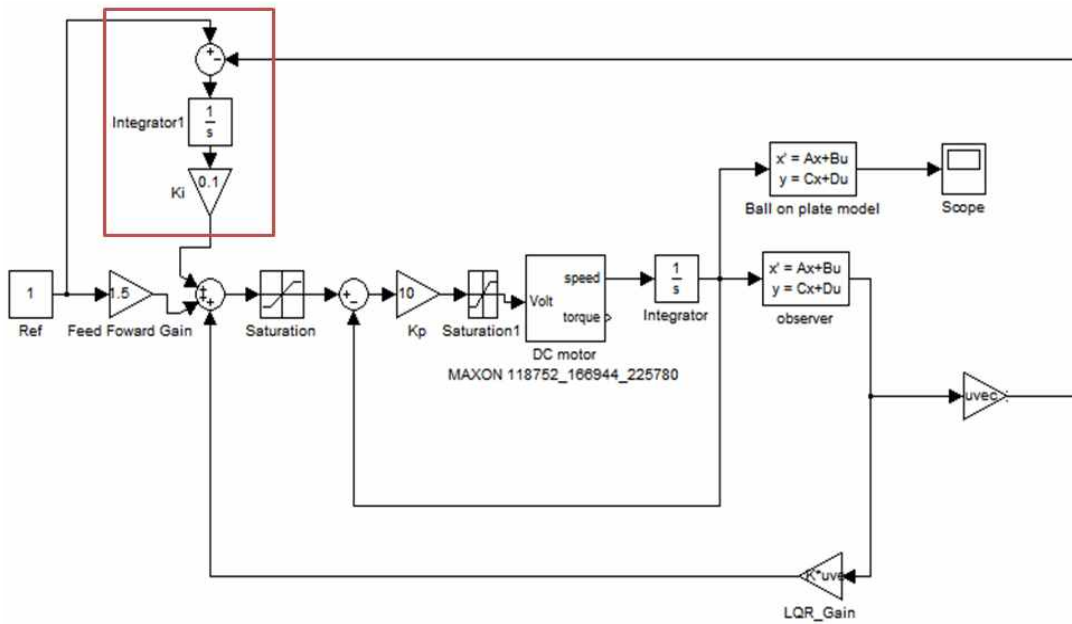


그림 15. 적분기를 추가한 LQR 블록선도 매트랩 시뮬링크

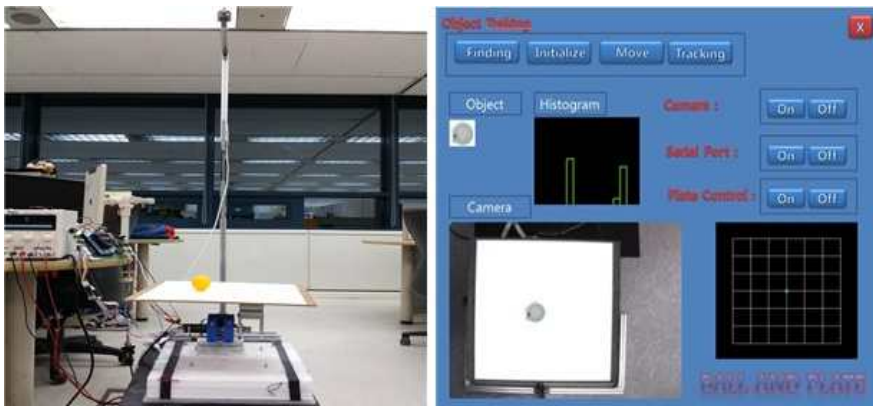


그림 16. 실험에 사용된 볼-플레이트시스템과 어플리케이션

그 결과 그림 17과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 여기서 공의 위치가 외곽인 (100, 130)에 놓였을 때는 공의 이탈이 많은 것을 확인 할 수 있다. 하지만 칼만 필터를 적용한 후에는 그 이탈 횟수가 확연히 줄어든 결과를 얻을 수 있었다.

좀 더 자세한 데이터 결과를 보기 위하여 볼의 궤도를 매트랩으로 그림 18과 같이 나타내었다. 이는 공을 (100, 70)의 위치에 놓았을 경우에 칼만 필터를 적용 전과 후의 측정 데이터를 토대로 구성한 것이다. 칼만 필터를 사용할 경우에는 파란 선을 나타내고 칼만 필터가 적용이 안 된 경우에는 빨간 선을 나타낸다. 칼만 필터를 적용하지 않을 경우 이탈가능성을 보였지만 칼만 필터 적용 후 이탈가능성이 현저

히 줄어든 모습을 볼 수 있다.

두 번째 실험은 LQR제어기에 적분기를 추가하였을 때와 추가하지 않았을 때의 공의 위치와 속도의

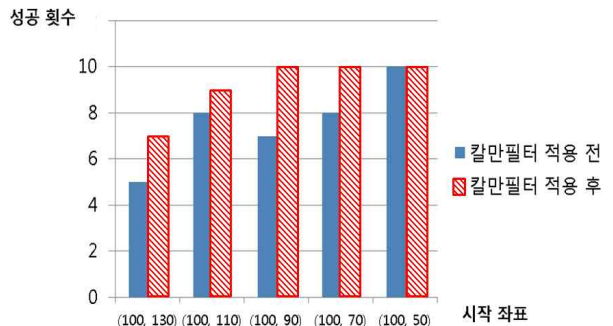


그림 17. 칼만 필터 적용 전후에 따른 공의 중심잡기 횟수

차이를 매트랩 시뮬링크를 통하여 비교하였다. 그림 19 왼쪽은 추가하기 전이고 오른쪽은 추가한 후의 그래프를 나타낸다. X축은 시간을 나타내며 Y축은 볼의 위치를 나타낸다. 볼이 움직이는 속도는 차이가 거의 없었다. 하지만 볼의 위치는 큰 차이를 보였다. 적분기를 추가하지 않았을 경우에는 볼이 목표위치까지 도달 할 수 없었다. 그러나 적분기 추가 후 실시간 제어가 가능하며 목표위치까지 도달하는 결과를 얻을 수 있었다.

적분기가 플레이트를 강제로 제어하여 볼의 위치를 정확한 위치까지 도달하는 데 시간이 걸리게 된다. 측정값이 실제 값에 소수점 셋째 자리까지 근사해지는 시간을 100회 측정해 보았다. 그 결과 원하는 목표 위치까지 오차를 줄여서 수렴하는데 걸리는 시간은 불규칙적이지만 평균적으로 2.89Sec(표준편차는 0.1317)라는 결과를 얻었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 단일 카메라와 2개의 DC 모터를 이용하여 볼 플레이트 시스템을 설계하고 제작하였다. 볼의 추적 부분은 칼만 필터를 이용하였고, 플레이트의 제어 부분에서는 LQR제어를 이용하였다. 이 두 가지를 결합하여 오차를 줄일 수 있었고 볼의 이탈을 방지할 수 있었다. 그리고 여전히 남아 있는 오차로 인하여 목표 위치까지 정확하게 도달하지 못하는 문제를 적분기를 통하여 해결할 수 있었다. 측정 결과 정확한 위치 지점까지 도달하는데 평균 2.89초 정도의 적분기의 수행시간이 요구되었다. 앞으로는 적분기 수행 시간을 줄이기 위하여 LQR제어시 사용 하였던 상태방정식의 선형접근을 비선형 접근으로 연구 해보려고 한다. 하나의 카메라가 아닌 다수의 카메라를 이용하여 볼의 위치의 측정오차를 줄이는

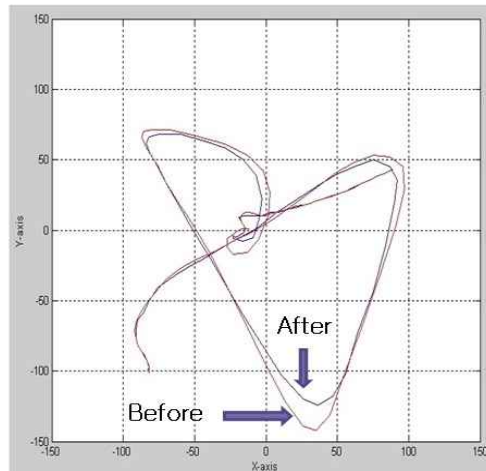
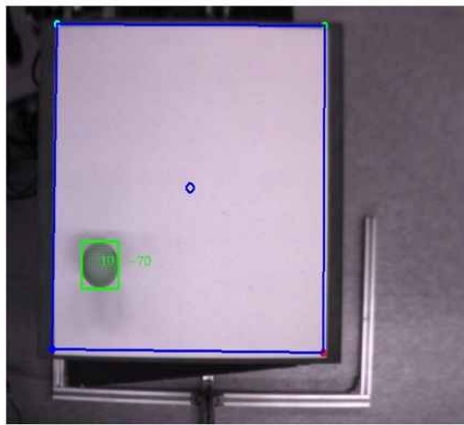


그림 18. 칼만 필터 전과 후의 궤도 비교

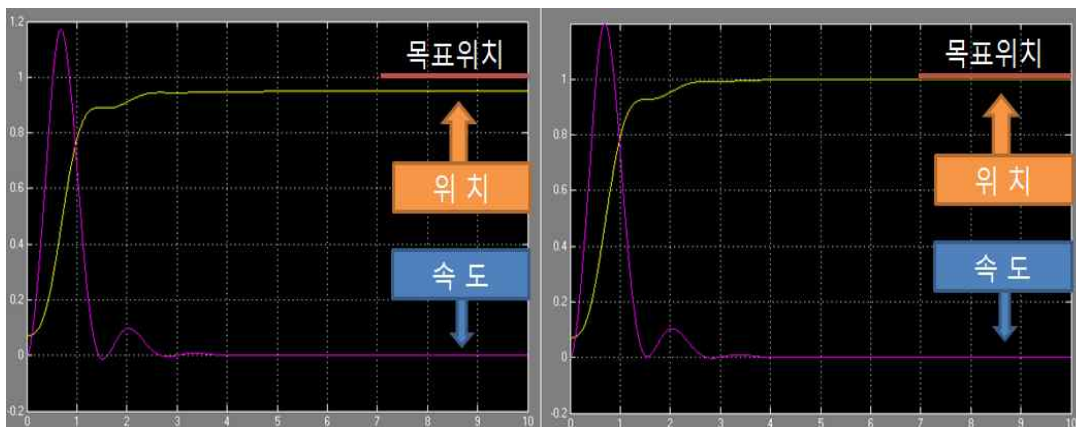


그림 19. 적분기 추가 전후 볼의 위치와 속도 그래프

새로운 방법도 연구해보려고 한다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] Kwanghyun Ryu and Yonghwan Oh, "Balance Control of Ball-Beam System using Redundant Manipulator," *Proc. of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics*, pp. 403-408, 2011.
- [ 2 ] C.C. Ker, C.E. Lin, and R.T. Wang. "Tracking and Balance Control of Ball and Plate System," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 30, No. 3, pp. 459-470, 2007.
- [ 3 ] K.K Lee, G. Batz, and D. Wollherr, "Basketball Robot: Ball-on-Plate with Pure Haptic Information," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2410-2415, 2008.
- [ 4 ] J. Hauser, S. Sastry, and P. Kokotovic, "Nonlinear Control Via Approximate Input-Output Linearization: The Ball and Beam Example," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 37, No. 3, pp. 392-398, 1992.
- [ 5 ] Wen Yu, "Nonlinear PD Regulation for Ball and Beam System," *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 46, No. 1, pp. 59-73, 2009.
- [ 6 ] X. Fan, N. Zhang, and S. Teng, "Rajectory Planning and Tracking of Ball and Plate System using Hierarchical Fuzzy Control Scheme," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 144, Issue 2, pp. 297-312, 2004.
- [ 7 ] Paul H. Eaton, Danil V. Prokhorov, and Donald C. Wunsch II, "Neurocontroller Alternatives for Fuzzy Ball-and-Beam Systems with Nonuniform Nonlinear Friction," *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 11, No. 2, pp. 423-435, 2000.
- [ 8 ] C. Harris and M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector," *Proc. 4th Alvey Vision Conference*, pp. 147-151, 1988.
- [ 9 ] D. Comaniciu, V. Ramesh, and P. Meer, "Real-Time Tracking of Non-Rigid Objects using Mean Shift," *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 142-149, 2000.
- [ 10 ] John G. Allen, Richard Y.D. Xu, and Jesse S. Jin, "Object Tracking using CamShift Algorithm and Multiple Quantized Feature Spaces," *Proc. the Pan-Sydney Area Workshop on Visual Information Processing*, pp. 3-7, 2004.
- [ 11 ] R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *Journal of Basic Engineering*, Vol. 82, No. 1, pp. 34-45, 1960.
- [ 12 ] 염정남, 이금분, 박정진, 조범준, "GPS와 가속도계를 이용한 이동 물체의 위치 추정 시스템," 멀티미디어학회논문지, 제12권, 제4호, pp. 600-607, 2009.
- [ 13 ] Tarapada Roy and Debabrata Chakraborty, "Genetic Algorithm Based Optimal Design for Vibration Control of Composite Shell Structures using Piezoelectric Sensors and Actuators," *Internatinal Journal of Mechanics and Materials in Design*, Vol. 5, Issue 1, pp. 45-60, 2009.
- [ 14 ] Ding-guo Zhang, "Recursive Lagrangian Dynamic Modeling and Simulation of Multi-link spatial flexible manipulator arms," *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 30, Issue 10, pp. 1283-1294, 2009.
- [ 15 ] HVR-2000Series Vision Camera, <http://www.hyvision.co.kr/support/down.asp>, 2010.
- [ 16 ] Maxon DC Motor, <http://www.maxonmotor.co.kr/maxon/view/catalog>, 2012.



**박 이 근**

2003년 3월~2009년 2월 조선대  
학교 컴퓨터통계학과 학  
사  
2011년 3월~현재 전남대학교 전  
자컴퓨터공학과 석사과정  
관심분야: 컴퓨터비전, 로봇, 의  
료영상 처리, 멀티미디어  
시스템 등



**박 주 연**

2007년 3월~2012년 2월 조선대  
학교 컴퓨터공학과 학사  
2012년 3월~현재 전남대학교 전  
자컴퓨터공학과 석사과정  
관심분야: 소프트웨어공학, 멀티  
미디어응용 등



**박 성 모**

1977년 서울대학교 전자공학과  
학사  
1979년 한국과학기술원 전기 및  
전자공학과 석사  
1988년 노스캐롤라이나 주립대  
학 전기 및 컴퓨터공학과  
공학박사  
1979년~1984년 한국전자기술연구소 설계개발부 선임  
연구원  
1988년~1992년 올드도미니언대학교 전기 및 컴퓨터공  
학과 조교수  
1992년~현재 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수  
관심분야: 멀티미디어 프로세서 구조, SoC 설계, 영상압  
축, 임베디드 시스템 등