creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공 학 석 사 학 위 논 문

RecurDyn과 SIMULINK를 이용한 제어기 설계용 통합 개발 플랫폼에 관한 연구

2007년 2월

부경대학교 대학원

지능기계공학과

홍 창 우

공학석사 학위논문

RecurDyn과 SIMULINK를 이용한 제어기 설계용 통합 개발 플랫폼에 관한 연구

지도교수 안 두 성

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2007 년 2 월

부경대학교 대학원

지 능 기 계 공 학 과

홍 창 우

홍창우의 공학석사 학위논문을 인준함.

2007년 2월

주 심 공학박사 정 영 석 (인)

위 원 공학박사 안 두 성 (인)

위 원 공학박사 손 정 현 (인)

목 차

List of Figure
List of Table

Abstract

제 *1* 장 서 론 1
1. 1 연구 배경 및 목적 1
1. 2 연구 내용 및 논문의 구성 2

제 *2* 장 통합 개발 플랫폼 3
2. 1 통합 개발 플랫폼의 구성 3
2. 2 Matlab & SIMULINK 4
2. 3 RecurDyn Conrol Toolkit (CoSim) 8

제 *3* 장 로봇 동역학 모델 13
3. 1 Mathematical Modeling 13
3. 1. 1 Lagrang's equation 14
3. 1. 2 1자유도 *IPS*의 *Mathematical Modeling* 15
3. 2 1자유도 *Inverted Pendulum System* 모델링 18
3. 2. 1 Pendulum 자세를 위한 *Cart* 모델링 19
3. 2. 2 Pendulum 각도 및 각속도와 *Cart*의 위치 20
*3. 2. 3 Cart wheel*의 구속조건 22
3. 3 2자유도 *Two Wheel Robot* 모델링 23
3. 3. 1 구동부 *wheel* 모델링 25
*3. 3. 2 TWR wheel*의 구속조건 26
3. 3. 3 CAD Interface 모델링 27

제 4 장 *Fuzzy Controller* 30
4. 1 Fuzzy Theory 30
4. 2 Fuzzy Control 32
4. 3 Fuzzy Inference System 33
4. 4 Application : Fuzzy Control 37
*4. 4. 1 1*자유도 *Inverted Pendulum System* 37
*4. 4. 2 2*자유도 *Two Wheel Robot* 44

제 5 장 *PID Controller* 48
5. 1 PID Control 48
5. 2 Application : PID Control 50
*5. 2. 1 1*자유도 *Inverted Pendulum System* 51
*5. 2. 2 2*자유도 *Two Wheel Robot* 55

제 6 장 시뮬레이션 및 실험 결과 62
6. 1 시뮬레이션 결과 62
*6. 2 1*자유도 *Inverted Pendulum System* 63
*6. 3 2*자유도 *Two Wheel Robot* 66

제 7 장 결론 70

참고 문헌 71

List of Figures

Fig. 2. 1 The configuration of Integrated Development Platform..... 4

Fig. 2. 2 The function of MATLAB..... 5

Fig. 2. 3 Library Browser and Model window of SIMULINK..... 7

Fig. 2. 4 The process of analysis of RecurDyn..... 9

Fig. 3. 1 IPS..... 15

Fig. 3. 2 The modeling of Inverted Pendulum System..... 19

Fig. 3. 3 The modeling of Cart..... 20

Fig. 3. 4 The Markers of Pendulum and Cart..... 21

Fig. 3. 5 The contact of wheels of Cart..... 22

Fig. 3. 6 Segway..... 23

Fig. 3. 7 The modeling of 2-DOF TWR..... 24

Fig. 3. 8 The modeling of wheel part..... 25

Fig. 3. 9 The contact of wheels of TWR..... 26

Fig. 3. 10 Imported model in RecurDyn..... 27

Fig. 3. 11 3D model in CAD Tool..... 28

Fig. 3. 12 The properties of Cart in RecurDyn..... 29

Fig. 3. 13 The properties of Cart in CAD Tool..... 29

Fig. 4. 1 Fuzzy Theory..... 30

Fig. 4. 2 Fuzzy Inference System..... 33

Fig. 4. 3 Fuzzy Controller..... 38

Fig. 4. 4 Fuzzy Inference System..... 38

Fig. 4. 5 Process of Co-Simulation..... 39

Fig. 4. 6 Process of Fuzzy Inference..... 39

Fig. 4. 7 Torque (Left direction)..... 41

Fig. 4. 8 angular (displacement and velocity) (Left direction)..... 41

Fig. 4. 9 Cart's (displacement and velocity) (Left direction)..... 42

Fig. 4. 10 Torque (Right direction)..... 42

Fig. 4. 11 angular (displacement and velocity) (Right direction)..... 43

Fig. 4. 12 Cart's (displacement and velocity) (Right direction)..... 43

Fig. 4. 13 Fuzzy Control..... 45

Fig. 4. 14 Fuzzy Inference System..... 45

Fig. 4. 15 Left and Right Torques..... 46

Fig. 4. 16 angular displacement..... 46

Fig. 4. 17 angular velocity..... 47

Fig. 5. 1 The control block-diagram of PID..... 49

Fig. 5. 2 PID Control in MATLAB SIMULINK..... 51

Fig. 5. 3 PID Controller..... 52

Fig. 5. 4 Loaded RecurDyn Plant Block..... 52

Fig. 5. 5 Torque..... 52

Fig. 5. 6 angular displacement..... 53

Fig. 5. 7 angular velocity..... 53

Fig. 5. 8 Cart Position..... 54

Fig. 5. 9 Cart velocity..... 54

Fig. 5. 10 PID Control..... 55

Fig. 5. 11 PID Controller..... 56

Fig. 5. 12 Left and Right Torques (Forward direction)..... 56

Fig. 5. 13 angular displacement (Forward direction)..... 57

Fig. 5. 14 angular velocity(Forward direction)..... 57

Fig. 5. 15 Left and Right Torques (Backward direction)..... 58

Fig. 5. 16 angular displacement (Backward direction)..... 58

Fig. 5. 17 angular velocity (Backward direction)..... 59

Fig. 5. 18 PID Control (changing direction)..... 60

Fig. 5. 19 Left and Right Torques (changing direction)..... 60

Fig. 5. 20 angular displacement (changing direction)..... 61

Fig. 6. 1 Real Inverted Pendulum System..... 63

Fig. 6. 2 Configuration of Real IPS..... 64

Fig. 6. 3 angular displacement..... 65

Fig. 6. 4 angular velocity..... 65

Fig. 6. 5 Real Two Wheel Robot..... 67

Fig. 6. 6 RTW and Step Motor Controller..... 67

Fig. 6. 7 angular displacement..... 68

Fig. 6. 8 angular velocity..... 68

List of Table

Fig. 2. 1 The feature of MATLAB..... 6

Fig. 2. 2 The RecurDyn Analysis and RecurDyn Toolkits..... 10

Fig. 3. 1 The parameters of IPS..... 15

Fig. 4. 1 The parameters of IPS..... 34

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Researches on Integrated Development Platform for Design of Controller using RecurDyn and SIMULINK

Chang-Woo Hong

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School,

Pukyong National University

ABSTRACT

This paper proposes a platform that is to efficiently design a controller using RecurDyn (Multi-body dynamic analysis software) and SIMULINK. The proposed platform consists of two parts. One is to model the plant's dynamic property using RecurDyn analysis tool. The other is controller design using SIMULINK. We can implement with co-simulation through the combination of RecurDyn and SIMULINK. This platform enables us to design a controller quickly and efficiently than using only 'Matlab' through the adaptation of RecurDyn that calculate precisely the plant's dynamic property. In this paper, a control target is Inverted Pendulum System and Two Wheel Robot. The proposed platform has been verified through the design process for the PID and Fuzzy controller and the implementation.

제 *1* 장 서 론

1. 1 연구 배경 및 목적

현대 사회의 산업 현장은 산업혁명에 의하여 시작된 기술혁신과 컴퓨터 기술의 눈부신 발달로 공정 자동화라는 큰 목표를 지향하고 있다. 공학을 이용한 전반적인 분야, 특히 자동차, 철강, 화학, 전력, 제지 등 중화학 공업에서 상품의 고부가가치화 및 생산성 향상을 위해 기계 공정의 자동화시스템을 필요로 하고 있다. 자동화시스템을 갖추기 위해서는 우선적으로 그 시스템이 사용자의 목적에 맞게 제어가 되어야만 한다. 다시 말하면, 그 공정에 적절한 제어시스템이 필요한 것이다. 제어시스템이란 프로그래밍이 가능한 기기 등을 이용하여 특정한 제어 목표를 달성할 수 있도록 적절한 구성요소들을 상호 연결시켜 놓은 시스템을 말한다. 제어 목표를 달성시키기 위해선 제어하고자 하는 대상 시스템에 대한 수학적 모델링과 동적 특성에 대한 해석이 요구되며 이것은 제어기를 설계하는데 있어 중요한 요인이 된다. 설계된 제어기의 성능을 정확히 분석하기 위해선 사전 검증을 필요로 하지만 실제 시스템에 대한 적용은 해결하기 어려운 몇 가지 문제점을 갖는다. 그 첫 번째가 실제 시스템 제작에 따른 비용문제이고, 두 번째는 테스트 과정에서의 안전성 문제이다. 이와 같은 실제 시스템 적용에 따른 문제점을 해결하기 위해 통상적으로 시뮬레이션(simulation)을 통해 사전 검증을 하고 있다. 제어기 설계부터 실제 시스템의 구성까지 시뮬레이션 상에서 구현을 하여 제어기 성능평가가 가능한 것이다.

따라서 본 연구에서는 제어시스템의 제어기 성능 사전(advance) 검증을 위한 통합 개발 플랫폼을 이용한 효율적인 시뮬레이션 방법과 이것을 이용한 실제 시스템의 적용에 따른 성능평가 및 분석을 다루고자 한다.

1. 2 연구 내용 및 논문의 구성

제어시스템의 제어기 성능 사전 검증을 위한 시뮬레이션 방법은 아주 다양하며 주어진 제어 대상에 맞는 시뮬레이션 환경 조건을 선택해야 한다. 즉, 다양한 제어 알고리즘과 제어 대상의 정확한 분석이 필요하다.

이와 같이 두 가지 조건, 즉 다양한 제어 알고리즘 구현과 Control Plant의 역학적 특성을 정확히 분석 할 수 있는 방법을 고려하여 본 논문에서는 앞서 제시한 통합 개발 플랫폼을 구성하는 MATLAB SIMULINK 와 RecurDyn의 Co-Simulation을 이용하였다. 제시된 통합 개발 플랫폼에 관한 내용은 제 2장에서 MATLAB SIMULINK 와 RecurDyn을 함께 설명하였고 , 제 3장에서는 RecurDyn을 이용한 로봇의 동역학적 모델링을 다루었고 제 4장과 5장에서는 본 논문에서 Control Plant에 적절한 제어알고리듬(Fuzzy Inference System, PID)과 그것을 적용시킨 통합 개발 플랫폼을 이용한 Co-Simulation 실행과정 및 결과 데이터를 제시하였다. 제 6장에서는 실제로 제작한 로봇의 실험결과를 정리하였다. 제 7장에서는 본 논문에서 제시한 통합 개발 플랫폼의 제어성능 검증에 대한 평가와 결론을 정리하였다.

제 2 장 통합 개발 플랫폼

최근 정보기술의 발달로 테크니컬 컴퓨팅 환경이 크게 변화하고 있으며 통신, 반도체 등 각 산업 부문에서 효율성 향상을 위한 방법으로 테크니컬 컴퓨팅용으로 특화된 각종 소프트웨어와 솔루션을 적극 활용하고 있다. 통합 개발 플랫폼을 구성하고 있는 MATLAB 역시 특화된 소프트웨어 중의 하나에 속하며 알고리듬 설계 및 시뮬레이션, 데이터 분석, 수치해석 그리고 시각화 등의 작업을 간단히 해결할 수 있는 기능을 가지고 있다. 여기에 실제 시스템에 대한 동역학적 특성을 전문적으로 다루는 다물체 운동 해석 Tool인 RecurDyn 소프트웨어와 인터페이스를 통한 제어시스템의 제어기설계가 이뤄진다면 보다 빠르고 효율적인 제어성능에 대한 검증이 이뤄지게 된다. 이는 첨단 산업의 빠른 변화의 흐름에 한발 더 다가가는 길이 될 것이다.

2. 1 통합 개발 플랫폼의 구성

본 논문에 제시된 통합 개발 플랫폼은 MATLAB SIMULINK 와 RecurDyn Tool의 소프트웨어로 구성되어 있다. MATLAB SIMULINK를 이용하여 시스템의 여러 제어 알고리듬을 구현 하였고 RecurDyn Tool을 통해 실제 제어 시스템의 동역학적 특성을 모델링 하였다.

Fig. 2. 1은 통합 개발 플랫폼의 구성을 보여준다. Fig. 2. 1에서와 같이 Control Plant는 주어지는 시스템에 따라 구현이 가능하며 본 논문에서는 1자

유도 Inverted Pendulum System 과 2자유도 Two Wheel Robot을 선택하였다. 제어알고리듬은 Fuzzy Inference System과 PID(Proportional Integral Derivative)을 이용하였다.

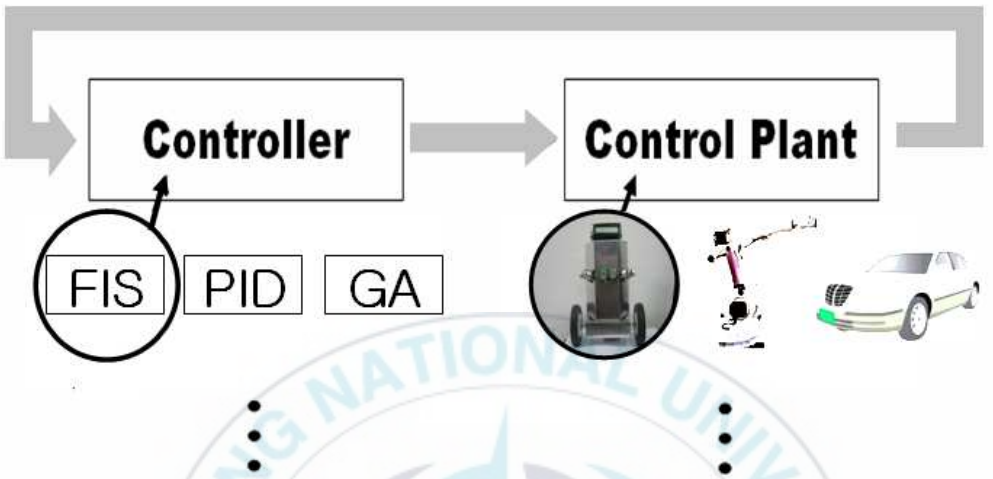

Fig. 2. 1 The configuration of Integrated Development Platform

2. 2 MATLAB & SIMULINK

MATLAB은 Matrix laboratory를 위한 단순 행렬연산을 위해서 개발되었지만 현재의 MATLAB 은 행렬 연산뿐만 아니라 수치해석, 신호처리 기능을 제공하고 있으며 행렬 연산을 기초로 하여 과학적 연산을 위한 하나의 프로그래밍 언어와 데이터를 그래픽하게 처리하기 위한 후처리기와 GUI 및 기타 애플리케이션 등으로 사용할 수도 있다. 초기의 MATLAB은 Cleve Moler에 의해 포트란으로 작성되었고, 현재는 미국의 MathWorks사에 의해 C++ 언어로 작성되어있다. MATLAB 코딩 체계는 수학적인 기호와 간단한 C 문

법으로 되어 있는데, 수학과 관련된 계산, 알고리듬 개발, 상황 모델링과 분석, 여러 가지 과학과 공학적인 그래픽 표현 등에서 이용 할 수 있다. 또한 SIMULINK라는 도구를 내장하여 동적 시스템을 그래픽하게 simulation 할 수도 있다. 그러나 그 모든 MATLAB의 기능은 행렬 연산을 기초로 하여 수행되기 때문에 MATLAB을 유용하게 사용하기 위해서는 먼저 행렬에 대한 이해가 필요하다.

Fig. 2. 2 는 앞서 설명한 MATLAB 소프트웨어에 대한 대표적인 기능을 잘 보여주고 있다.

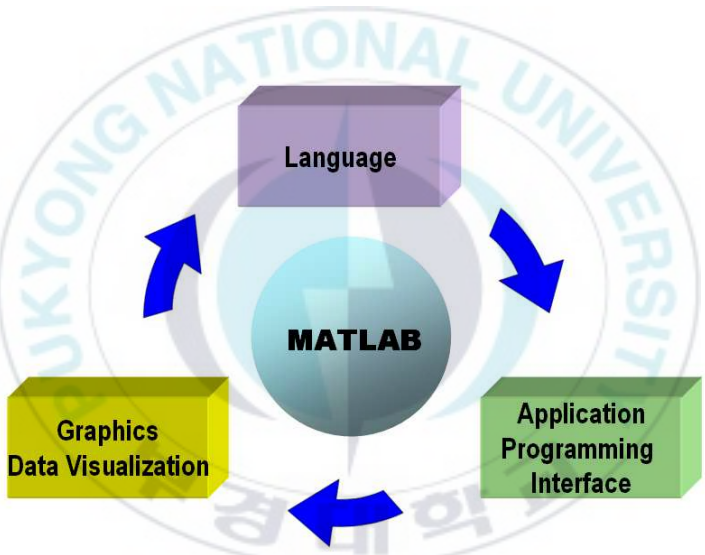

Fig. 2. 2 The function of MATLAB

Table. 2. 1 은 MATLAB의 특징에 대해 소개하고 있다. 그 중에서 주목할 기능은 본 논문에서도 사용된 MATLAB SIMULINK 이다. Table. 2.1을 통해 알 수 있지만 MATLAB은 다양하고 많은 기능을 가지고 있으며 SIMULINK 또한 다양한 기능을 가지고 있다.

Table. 2. 1 The feature of MATLAB

구 분	특 징
행렬 데이터	◆ c언어와 같은 프로그램 언어 -기본 데이터가 스칼라이며 행렬이나 벡터 데이터를 사용하기 위해서는 배열을 사용해야 함 ◆MATLAB -기본 데이터가 행렬이므로 MATLAB에서 행렬을 사용하기 위해서 별도의 함수를 만들 필요 없이 단지 행렬을 스칼라와 같이 생각하여 사용하면 된다.
M-file	◆사용자가 프로그래밍을 할 수 있도록 해준다.
Toolbox	◆M-file을 각 분야별로 모아 놓은 것 ◆Toolbox를 소개 -Control System Toolbox -System Identification Toolbox -Robust Control Toolbox -Optimization Toolbox -Signal Processing Toolbox -Neural Network Toolbox -Image Processing Toolbox -Statistics Toolbox -Wavelet Toolbox -Symbolic Toolbox -Runtime Server Toolbox -CALFEM (FEM 을 위한 Toolbox)
Symbolic 기호계산	◆Symbolic Toolbox를 이용하여 MATHEMATICA 나 MAPLE 에 버금가는 기호 계산 기능을 가지고 있다.
GUI Programming	◆ MATLAB에서도 GUI프로그래밍이 가능 ; GUI 프로그래밍의 가장 큰 장점은 MATLAB 이 가지고 있는 풍부한 함수 사용이 가능하다는 것이다.
SIMULINK	◆ SIMULINK 는 동적시스템을 아이콘화된 블록을 사용하여 모델링하고 simulation 할 수 있도록 해준다. SIMULINK 는 주로 제어 시스템을 설계하는 사람이 그 제어기의 성능을 미리 simulation 하기 위해서 사용한다.

SIMULINK는 동적 시스템의 simulation을 실행하는데 있어 그래픽 아이콘을 사용하여 시스템 구조를 구성하도록 만들어진 프로그램이기에 사용자가 편리하게 구현 할 수 있다.

Fig. 2. 3 은 SIMULINK Library Browser와 작업 창을 나타내고 있다. Library에서 필요한 아이콘 모델을 작업 창에 나열한 다음 선으로 연결하게 되면 MATLAB Code를 생성시킬 수 있으며 Simulation 명령을 통해 계산을 하게 된다. 각 공정의 모델을 블록으로 구성한 다음 입력에서부터 출력까지 각 블록을 연결함으로써 제어시스템의 응답을 확인 할 수가 있다.

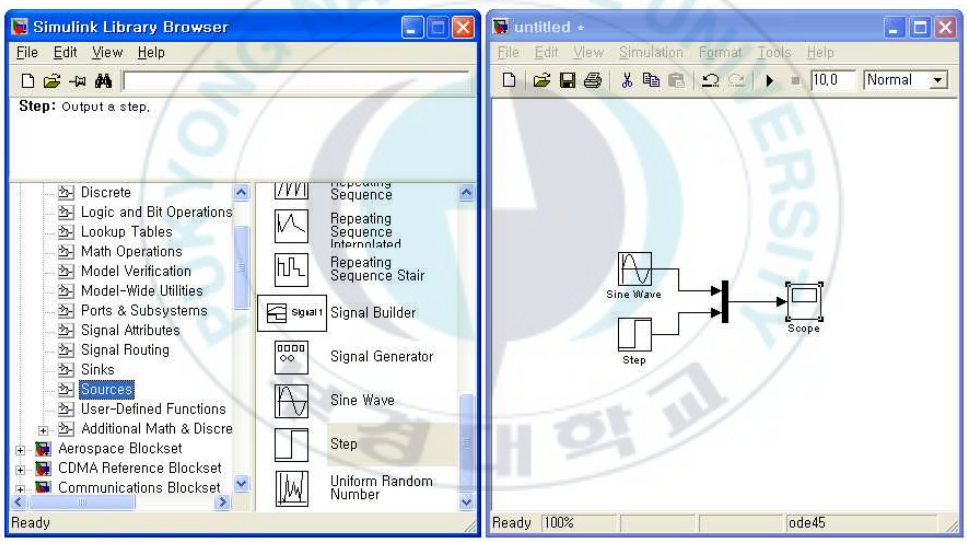

Fig. 2. 3 Library Browser and Model window of SIMULINK

본 논문에서는 제 4장의 Fuzzy Controller와 제 5장의 PID Controller를 SIMULINK를 이용하여 구현을 하였다.

2. 3 RecurDyn Control Toolkit (CoSim)

RecurDyn은 다물체 동역학 시스템 해석 Tool(Multi-body Dynamic system analysis)로써 제품을 만들기 전 설계 단계에서 가상으로 움직이는 물체를 조작해 보여 이상 유무를 사전에 점검할 수 있는 소프트웨어이다. 특히, 접촉(Contact) 모델을 포함한 복잡한 다물체(Multi-body) 해석에 우수한 성능을 나타내며 친숙한 GUI Interface Modeling 환경과 Multi Function 및 여러 유용한 Toolkit 을 기반으로 하여 타 해석 프로그램에서 작업이 어려웠던 기구 요소의 세부 모델링 기능이 가능하다. 또한 강체-유연체 모델과의 접촉 및 유연체 모델 사이의 접촉력 해석 기능을 이용하여 실제 물리 현상에 대한 보다 명확한 동역학 해석을 할 수 있다.

RecurDyn의 주요 해석 분야를 살펴보면 다음과 같다.

- 다물체 동역학 해석 (Rigid Multibody Dynamic Analysis)
- 기구학 해석 (Kinematic Analysis)
- 정적 평형 해석 (Static Analysis)
- 유연체 동역학 해석(Flexible Dynamic Analysis - Linear and Nonlinear FE based)
- 유연체 모델의 접촉력 해석 (Flexible Multibody Contact Analysis)
- 성능 지수 민감도 분석 (Design Sensitivity Analysis)
- 진동학 해석 (Vibration Analysis)
- 제어 공학 해석 (Control Systems)
- Subsystem 을 이용한 Analysis
- Toolkit 을 이용한 기구 동역학 해석

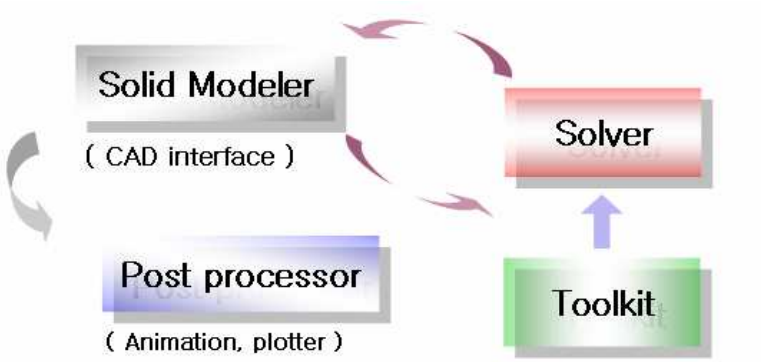

Fig. 2. 4 The process of analysis of RecurDyn

Fig. 2. 4 는 RecurDyn 해석에 대한 처리 과정을 나타내고 있다. Solid Modeler를 통한 제어 시스템의 모델링 과정이 끝나게 되면 설정된 Solver에 의해 계산과정이 이뤄지고 그 결과 값인 동역학적 특성을 Post processor를 이용하여 Animation 이나 plot으로 확인 할 수 있다. Solver에 의한 계산과정에는 RecurDyn 의 다양한 Toolkit을 적용 할 수 있는데 이것은 제어 시스템에서 필요로 하는 정보에 따라 적절한 기능을 선택하면 된다.

RecurDyn Tool은 Graphic Kernel 로 “Parasolid”를 이용하여 모델링 작업 시 필요로 하는 모델 회전, 이동, 작업 요소의 modify 등을 편리하게 수행할 수 있으며, 특히 동일한 요소의 반복 모델링 시 복사 기능을 이용하여 보다 쉽고 빠르게 모델링 할 수 있다. RecurDyn Tool 의 모델링 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 복잡한 3-D 형상의 부품 모델링이 용이
- 다양한 CAD 기능 및 편리한 작업
- 여러 CAD 변환 파일 지원 (x_b, x_t, step, stl, slp)
- 해석 결과를 이용한 Postprocessor 의 Graph Plotting & Animation (.avi)
- Parameterizing 이 가능한 모델링 요소

· Layer 기능을 이용한 편리한 모델링 작업

· Tree View 기능을 이용한 모델 수정 작업의 편리성

· Subsystem 구조를 이용한 각각의 모델 어셈불리

· 마우스 Drag & Drop 기능을 이용한 편리한 함수 작성

· 편리한 Case Study 및 Optimization Parameterize

· 풍부한 물성치 함수 제공

· Windows-Native Interface 를 이용하여 Graphic Memory 의 최소화

· 화면 분할 기능을 이용하여 다양한 각도에서 모델링

· Menu Bar 와 Tool Bar 를 User 취향에 따라 간단히 변경, 수정가능

Table. 2. 2 RecurDyn의 Anaysis와 Toolkits 의 특징을 나타내었다.

Table. 2. 2 The RecurDyn Analysis and RecurDyn Toolkits

구분	항목	특징
RecurDyn Analysis	Solid Modeler	◆ Parasolid Kernel 을 이용한 3-D solid 모델 구현 ◆ Windows-native OpenGL 지원으로 다양한 Graphic 효과 및 기능의 편리성 - Single and multiple screen picking selection - Split window - Multi-model, Multi-tasking - Menu bar and toolbar customization
	CAD Interfaces	◆ 다양한 CAD Interface 를 통해 보다 정밀하고 상세한 모델링이 가능 - Parasolid Kernel CAD file(x_t, x_b) - Stereolithography file(stl & slp) - Triangular shell file(shl) generated by a CAD program. - STEP File - IGES File
	Solver	◆ RecurDyn solver 의 다양한 해석 기능 - Dynamic, Kinematic, Static, Eigenvalue analysis ◆ Recursive algorithm 적용 - 상대좌표계 계산에 의한 빠른 Solution 제공 ◆ RecurDyn solver 의 빠르고 정확한 implicit integrators - DDASSL, Implicit G-Alpha, Track G-Alpha

RecurDyn Toolkits	Control	◆ RecurDyn의 복잡한 기계 시스템과 외부 제어 프로그램과의 inteface를 위한 module로써 쉽고 편리한 기능을 제공 ◆ RecurDyn/Control 에서 제공하는 라이브러리 함수들을 이용하여 C-언어로 작성된 제어 프로그램과 직접 interface 하여 별도의 제어 프로그램 없이도 모델의 제어 성능을 구현할 수 있는 것이 특징
	Linear	◆ 기계 시스템이 가지고 있는 고유 진동수(Natural Frequency) 및 모드 형상(Mode Shape)을 계산하는 기능을 하며, 이를 통해 시스템 진동 시 위험 인자 (Critical Object)에 의한 안정성(Stability) 해석 및 여러 진동 문제 해석에 응용,계산된 결과를 State Matirx 로 저장하여 RecurDyn/Control의 연계시 제어 프로그램 (MATLAB..등)에서 사용가능
	Hydraulic	◆ 유공압 요소에 의한 기계 시스템 모델링 및 해석에 사용되며 상용 유공압 해석 프로그램인 AMESim (IMAGINE,INC) 과의 직접 Interface를 제공 ◆ Recurdyn/Control과 연계하면 유공압 전용 해석 프로그램인 HyPnu (BarDyn, INC) 와 Interface 를 통해 쉽고 정확한 유공압 모델 해석이 가능
	Driver	◆ 차량의 가상 운행 시뮬레이션에서 인간이 조작하는 것과 같은 결과를 도출 – Steering, Braking, Throttle Position, Gear Shifting (다양한 조작 포함) ◆ IAT에서 개발된 향상된 경로계획을 통한 휴먼 드라이버 시뮬레이션(HDSEPP) 사용 – 드라이버의 성격에 따른 설정 변경이 가능
	Gear	◆ 다양한 종류의 Gear를 쉽게 모델링 하고 어셈블리를 통해 Gear간의 접촉(contact) 모델을 정의하고 이를 통해 Gear 설계 및 Gear를 포함한 복잡한 기계 시스템의 동특성 해석을 편리하게 할 수 있음
	Belt	◆ 동력 전달 요소인 Belt, Pulley 어셈블리 모델을 쉽고 빠르게 생성하고 해석할 수 있는 전용 module로써 실제 사용되어지는 여러 종류의 Belt 및 Pulley 라이브러리를 제공
	Chain	◆ 기계 시스템에서 동력 전달 요소로 다양하게 사용되어지는 Roller와 Chain 어셈블리 모델을 쉽고 빠르게 모델링 할 수 있는 전용 module 로써 RecurDyn 상에서 구현된 복잡한 기계 시스템에 Roller와 Chain을 subsystem으로 생성하고 해석 할 수 있음 ◆ 구성된 Roller 와 Chain에서의 Stress 및 Fatigue 해석등에 응용 할 수 있으며 Roller와 Chain에 의한 진동 해석 등에도 적용 가능

	Modal Flex	◆ System Level 상의 모델에 유연체 요소를 적용하여 Flexibility를 고려한 modal 해석을 통해 각 node에 발생하는 stress 및 deformation 등의 해석 가능 ◆ 유연체 모델을 적용하기 위해 상용 FEA 프로그램에서 해석 후 생성된 결과 파일 등을 이용하여 FEM 요소를 Import 할 수 있으며, RecurDyn 자체에서 생성된 강체 Body를 Toolkik을 이용하여 유연체 모델링으로 변환, 해석에 사용 가능
	Nodal Flex	◆ 자체 탑재된 유한 요소 해석 Solver를 이용하여 System Level에서의 선형 및 비선형 강체/유연체 복합 모델 해석에 사용되는 Toolkit,대 변형(Large Deformation) 동특성 해석에 적합하게 개발되었으며, 강체-강체, 강체-유연체 및 유연체 -유연체 body 간의 비선형 접촉(Nonlinear Contact) 문제에 탁월한 성능을 발휘
	Track LM	◆ RecurDyn/LM-Track 은 저속 주행 궤도 차량을 모델링하고 해석하기 위한 Module로써 Sproket, Wheel, Roller, Track Link 및 Road 조건 등 다양한 라이브러리와 접촉(contact) 기능을 통해 저속 궤도 차량의 각종 부품 설계 및 여러 지형 조건에서의 주행 안정성 등 저속 궤도 차량 모델에 대한 수준 높은 동역학 해석 결과를 얻을 수 있음
	Track HM	◆ Tank 와 같이 고속으로 주행하는 궤도 차량 시스템을 모델링 하고 해석하기 위해 사용되며 Sproket, Wheel, Roller, Track Link 및 지면 조건 (ground property) 등 다양한 라이브러리와 Track-Sproket, Track-Ground, Track-Wheel 등의 접촉 조건 사용을 통해 사용자가 고속 궤도 차량의 각종 부품 설계 및 동특성 해석을 통한 주행 안정성, 각 부품의 하중 조건 등 신뢰성 높은 데이터를 얻을 수 있습니다
	MTT2D, MTT3D	◆ RecurDyn/MTT 는 종이 (sheet) 이송 기계 시스템 (복사기, 프린터, 팩시밀리 등) 의 기구 모델링 및 동역학 해석을 편리하게 수행 할 수 있는 module로써 각종 Roller, Guide 및 sheet data 를 제공하고 해석의 목적에 따라 각각의 module 로써 MTT 2D 혹은 3D Toolkit을 선택 ◆ 다양한 Sheet 와 각 기구 사이에 작용하는 접촉(contact) 현상을 자동으로 생성하며 각종 이송 부품 설계 치수의 설정과 변경이 용이 ◆ MTT 2D, 3D Toolkit 은 Sheet 의 Jam 현상 해석과 같은 기구 동역학적 특성과 Roller 와 Guide, Belt 등의 부품 설계 및 구동 요소 설계에 이용 가능 ◆ MTT-3D의 경우 Nodal Force를 이용한 보다 정확한 Sheet 모델링을 가능하게 하는 요소를 지원

제 3 장 로봇 동역학 모델

본 논문에서는 통합 개발 플랫폼을 이용하여 설계된 제어기의 성능 검증을 위해 1자유도 Inverted Pendulum System (IPS)과 IPS를 응용한 2자유도 Two Wheel Robot (TWR)을 Control Plant로 선정하였다. IPS의 제어 목표는 직립 진자의 자세를 항상 수직으로 유지하는 것으로 Cart의 이동에 의해 제어되어 진다. 2자유도 TWR은 IPS를 응용한 로봇으로 각각의 Wheel의 구동에 의해 로봇의 자세가 제어 된다.

3. 1 Mathematical Modeling

1자유도 IPS와 2자유도 TWR의 수학적 모델링 (Mathematical Modeling)은 뉴턴 (Newton)의 제2법칙에 바탕을 둔 뉴턴역학(Newtonian mechanics)방법과 에너지개념에 바탕을 둔 라그랑지 방정식(Lagrang‘s equations)방법으로 구할 수 있다. 뉴턴역학은 개개의 강체(rigid body)에 작용하는 힘이나 모멘트의 합이 강체가 가지는 가속도 및 각가속도에 비례한다는 뉴턴의 제2법칙을 사용하기 때문에 물리적 개념이 명확한 반면에, 다물체(multi-body) 동역학의 경우에 강체와 강체 사이에 작용하는 구속력(constraint force)을 일일이 계산하여야 한다는 단점이 있다. 반면에 라그랑지 방정식은 시스템을 총괄하여 일반화된 좌표계를 정의하고 운동에너지(kinetic energy), 위치에너지(potential energy)등의 에너지 관계식으로부터 운동방정식을 유도하기 때문에 물리적 개념은 뉴턴역학만큼 명확하진 않지만 구속력을 일일이 계산하지 않아도 된다는 장점이 있다.

3. 1. 1 Lagrang's equations

논문에서는 라그랑지 방정식 방법을 이용하여 수학적 모델링을 하였다. 라그랑지 방정식은 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{dL}{\partial \dot{\theta}_j}\right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_j} = \tau_j \tag{3.1}$$

여기서 θ_j는 관절j의 각을 나타내며 $\dot{\theta}_j$는 θ_j의 일차 미분 값을 나타낸다. τ_j는 관절j에 적용된 Torque이며 L 은 라그랑지안 함수 (Lagrangian function)로써 $L = K - P$로 정의 된다. K 와 P 는 운동에너지와 위치에너지를 나타내며 K 는 병진운동과 회전운동의 합으로 표현된다.

$$K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2$$

$$P = mgh \tag{3.2}$$

식(3.2)는 라그랑지안 함수에 대입시켜 정리하면 다음과 같다.

$$L = K - P = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\theta^2 - mgh \tag{3.3}$$

따라서 라그랑지 방정식을 통해 운동방정식을 구하기 위해선 먼저 각 관절의 운동에너지와 위치에너지를 구한 뒤에 라그랑지안 함수를 구하고 θ_j와 $\dot{\theta}_j$ 로 미분한 값을 구한 뒤에 식 (3.1)과 같이 정리하고 $\dot{\theta}_j$로 미분한 값을 다시 시간으로 미분하면 관절j에 적용된 Torque를 구할 수 있다.

3. 1. 2 1자유도 IPS의 Mathematical Modeling

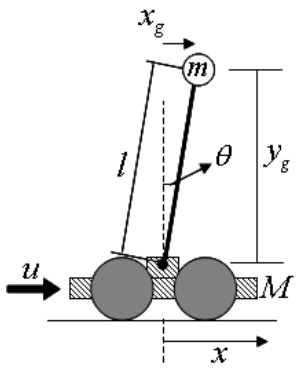

Fig. 3. 1 IPS

Fig. 3. 1 은 IPS을 나타내며 각각의 parameter를 Table. 3. 1에 나타내었다.

Table. 3. 1 The parameters of IPS

symbol	parameter	unit
M	mass of Cart	kg
m	mass of Pendulum	kg
u	Input Torque	N
x	distance	mm
θ	angular distance	degree
l	Pendulum length	mm

IPS는 Cart의 X축 방향 병진 운동과 Pendulum의 무게중심 질량 m의 회전운동에 따른 운동에너지 K와 위치에너지 P를 가진다. m의 좌표를 (x_g, y_g)표현하여 정리하면 아래와 같다.

$$x_g = x + l\sin\theta$$

$$y_g = l\cos\theta \tag{3.4}$$

K와 P는

$$K = \frac{1}{2}[M(\dot{x})^2] + \frac{1}{2}m[(\dot{x_g})^2 + (\dot{y_g})^2]$$

$$P = mgy_g = mgl\cos\theta \tag{3.5}$$

여기서 $\dot{x_g}$와 $\dot{y_g}$ 는

$$\dot{x_g} = \dot{x} + l\dot{\theta}\cos\theta$$

$$\dot{y_g} = -l\dot{\theta}\sin\theta \tag{3.6}$$

식(3.5)에 (3.6)을 대입시켜 정리하게 되면

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2}[M(\dot{x})^2] + \frac{1}{2}m[(\dot{x} + l\dot{\theta}\cos\theta)^2 + (-l\dot{\theta}\sin\theta)^2] \\ &= \frac{1}{2}[M(\dot{x})^2] + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}l\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2) \end{aligned} \tag{3.7}$$

따라서 라그랑지안 함수 L을 구하게 되면

$$\begin{aligned} L &= K - P \\ &= \frac{1}{2}[(M+m)\dot{x}^2] + \frac{1}{2}m(2\dot{x}\dot{\theta}l\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2) - mgl\sin\theta \end{aligned} \tag{3.8}$$

x와 θ에 대한 라그랑지 방정식을 구하게 되면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{dL}{\partial \dot{x}}\right] - \frac{\partial L}{\partial x} = \tau$$

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{dL}{\partial \dot{\theta}}\right] - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

$$\begin{cases} \frac{dL}{\partial \dot{x}} = (M+m)\dot{x} + ml\cos\theta\dot{\theta} \\ \frac{dL}{\partial x} = 0 \\ \frac{dL}{\partial \dot{\theta}} = ml\cos\theta\dot{x} + ml^2\dot{\theta} \\ \frac{dL}{\partial \theta} = mgl\sin\theta - ml\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta \end{cases}$$

위에서 구한 식을 정리하게 되면 아래와 같다.

$$(M+m)\ddot{x} + ml\cos\theta\ddot{\theta} - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = \tau$$
$$ml\cos\theta\ddot{x} - ml\sin\theta\dot{x}\dot{\theta} + ml^2\ddot{\theta} - mgl\sin\theta = 0 \quad (3.9)$$

Pendulum이 안정화 되면 θ는 아주 작은 값을 가지게 된다. 이때 $\cos\theta \simeq 1$, $\sin\theta \simeq \theta$ 의 값으로 근사화 시킬 수 있으며 $\dot{\theta}$와 $\dot{x}$는 무시할 수 있는 작은 값을 가지게 된다. 이렇게 근사화를 통해 얻은 선형방정식은 아래와 같다.

$$(M+m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} = \tau$$
$$m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} - mg\theta = 0 \quad (3.10)$$

상태변수 X는 $[x, \theta, \dot{x}, \dot{\theta}]$로 정의하여 상태방정식을 구하게 되면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.11)$$

$$A=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & -mg/M & 0 & 0\\ 0 & (M+m)g/Ml & 0 & 0\end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 1/M\\ -1/Ml\end{bmatrix}$$

3. 2 1자유도 Inverted Pendulum System 모델링

1자유도 IPS에 대한 연구결과는 지금까지 많은 연구 결과가 나와 있으며 제어 알고리듬의 성능 테스트를 위해 널리 이용되고 있는 Control Plant 이다. 본 논문은 IPS의 효율적인 제어 알고리듬 혹은 IPS 설계에 관한 내용이 아니라 제시된 통합개발 플랫폼을 통한 효율적이고 빠른 제어기 설계를 목적으로 하고 있다. 따라서 실제 복잡한 IPS의 외형을 RecurDyn Tool을 이용하여 간단하게 모델링 하여 적용할 수 있다. Fig. 3. 2는 RecurDyn Tool을 이용한 Inverted Pendulum System을 나타낸다. X(+X, -X)축의 한 방향의 이동성을 갖는 1자유도 시스템으로 진자(Pendulum)의 자세제어와 Cart의 위치제어를 목적으로 구성되었다. Pendulum의 자세 제어를 위해 구동되어지는 Cart와 sampling 주기 마다 센서를 통해 측정되어지는 Pendulum의 각도(θ)와 각속도($\dot{\theta}$)는 Output parameter로 설정, Pendulum의 자세제어를 위한 구동축 Torque 전달은 Input parameter의 설정으로 모델링 하였다. Input parameter와 Output parameter는 MATLAB SIMULINK와 RecurDyn Control Toolbox 의 Co-Simulation을 통해 정해진 시간동안 sampling 주기 마다 feedback 되어지는 values 이다. IPS의 모델링 절차는 아래와 같이 세 부분으로 나눌 수 있다.

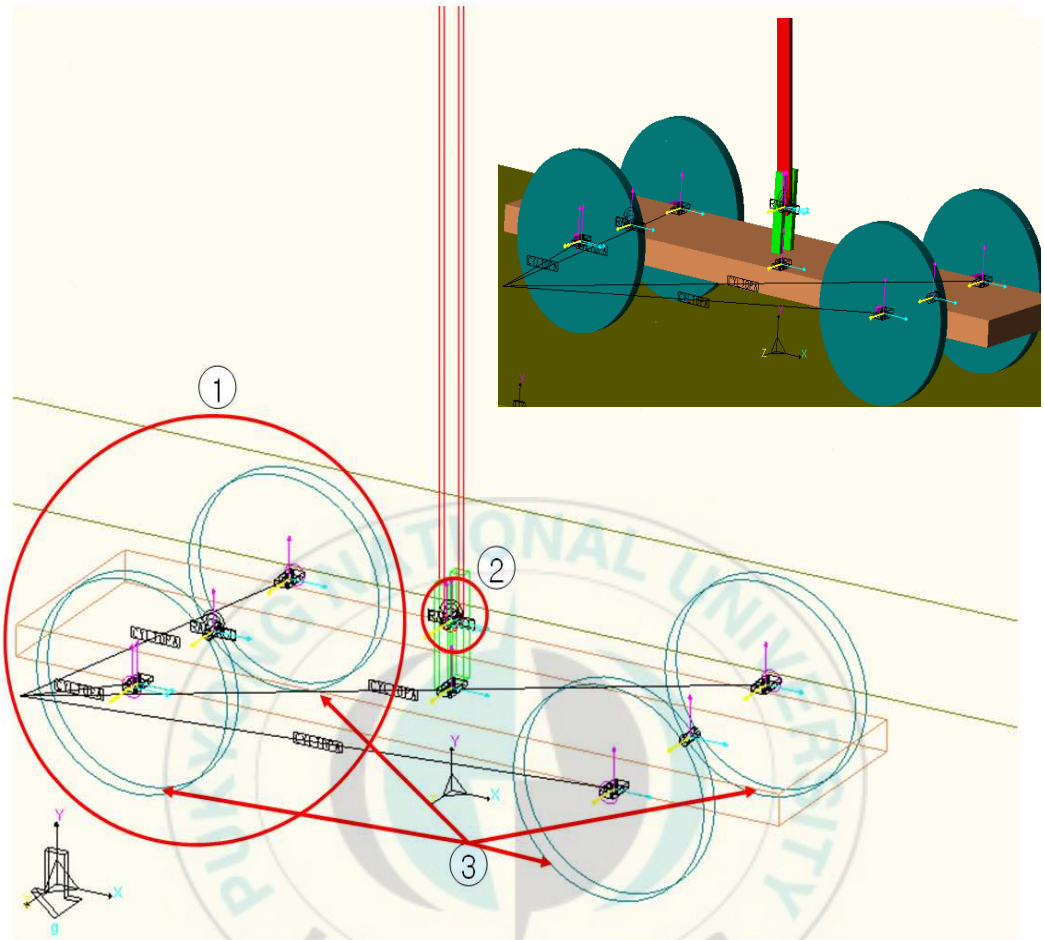

Fig. 3. 2 The modeling of Inverted Pendulum System

3. 2. 1 Pendulum 자세를 위한 Cart 모델링

Fig. 3. 3는 Cart의 한쪽 wheel shaft 에 설정된

(Rotational Axial Force)를 나타내고 있다. Rotational Axial Force는 Cart에 전달되어지는 Torque 로써 MATLAB SIMULINK에서 계산되어 Co-Simulation을 통하여 입력되는

값이다. 이 값은 RecurDyn Control Toolbox에서 입력 값으로 설정하였으며 Pendulum의 자세와 Cart의 위치에 의해 계산되어진다.

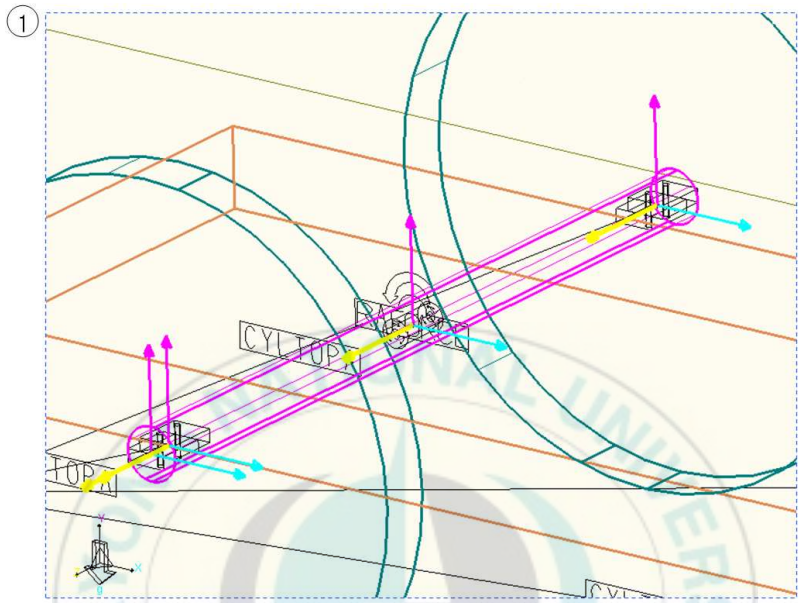

fig. 3. 3 The modeling of Cart

3. 2. 2 Pendulum 각도(θ)및 각속도($\dot{\theta}$)와 Cart의 위치

Fig. 3. 4는 simulation 시간동안의 Pendulum의 각도(θ)및 각속도($\dot{\theta}$)의 값과 Cart의 위치 값을 측정하기 위해 설정된

(Revolute Joint)와

(Marker)를 나타내고 있다.

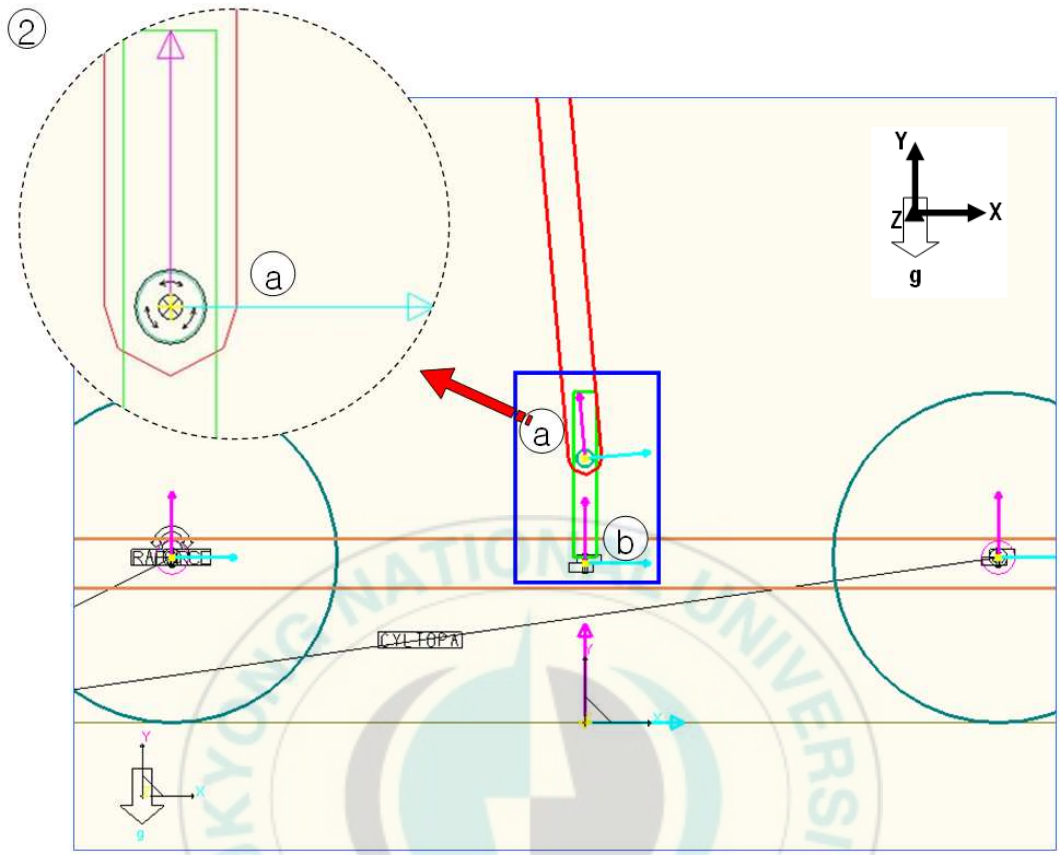

Fig. 3. 4 The Markers of Pendulum and Cart

ⓑ는 Cart에 속하는 Marker로 Z축으로의 각도변화 없이 X축으로 같은 위치에 설정된 base Marker에 대한 상대적인 위치 값만 변한다. 그리고 ⓐ는 Pendulum에 속하는 Marker로 X축은 Pendulum이 Cart와 연결되어 있어 ⓑ의 Marker의 위치에 대한 차이 값은 없으며 Z축으로는 기울여짐에 따른 각도의 변화를 가진다. 측정된 각도(θ)및 각속도($\dot{\theta}$)는 RecurDyn Control Toolbox의 출력 값으로 MATLAB SIMULINK에 feedback 되어 제어기에서 Torque를 계산하는 입력 값이 된다.

3. 2. 3 Cart wheel의 구속조건

Fig. 3. 5는 Cart Wheel과 지면과의 구속조건

(Contact)을 나타낸다. IPS의 Cart는 4개의 Wheel로 구성되어 있으며 각각의 Wheel은 지면과의 마찰에 있어 영향을 끼치지 않는 아주 작은 값으로 구속시켜 Slip 현상을 피할 수 있게 모델링 하였다.

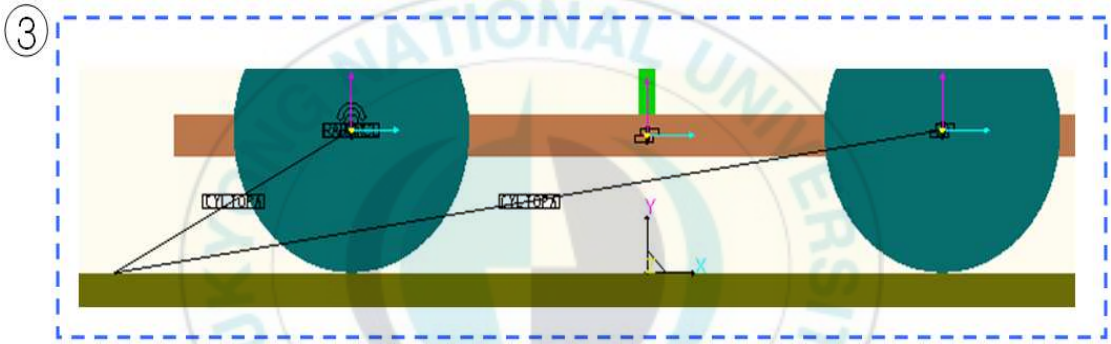

Fig. 3. 5 The contact of wheels of Cart

3. 3 2자유도 Two Wheel Robot 모델링

최근 Segway라는 차세대 교통수단으로 관심을 끌고 있는 1인용 전동 스쿠터가 국내에도 보급되고 있다. Gyro의 원리를 이용하여 평형성을 유지하고 사용자의 현재 자세와 전동 스쿠터 손잡이의 기울기를 측정하여 전진과 후진 그리고 좌·우 방향을 갖는다.

Fig. 3. 6은 시중에 시판되고 있는 Segway를 나타내고 있다.

Fig. 3. 6 Segway

본 논문에서 Control Plant로 제시하고 있는 2자유도 Two Wheel Robot 역시 2개의 Wheel을 평행하게 배치하여 로봇이 균형을 잡으며 이동을 할 수 있는 구조로 되어있다. 제어 알고리듬에 있어 Segway 와는 다소 차이가 있지만 끊임없는 자세제어와 방향 이동성에 있어선 유사한 면이 많다.

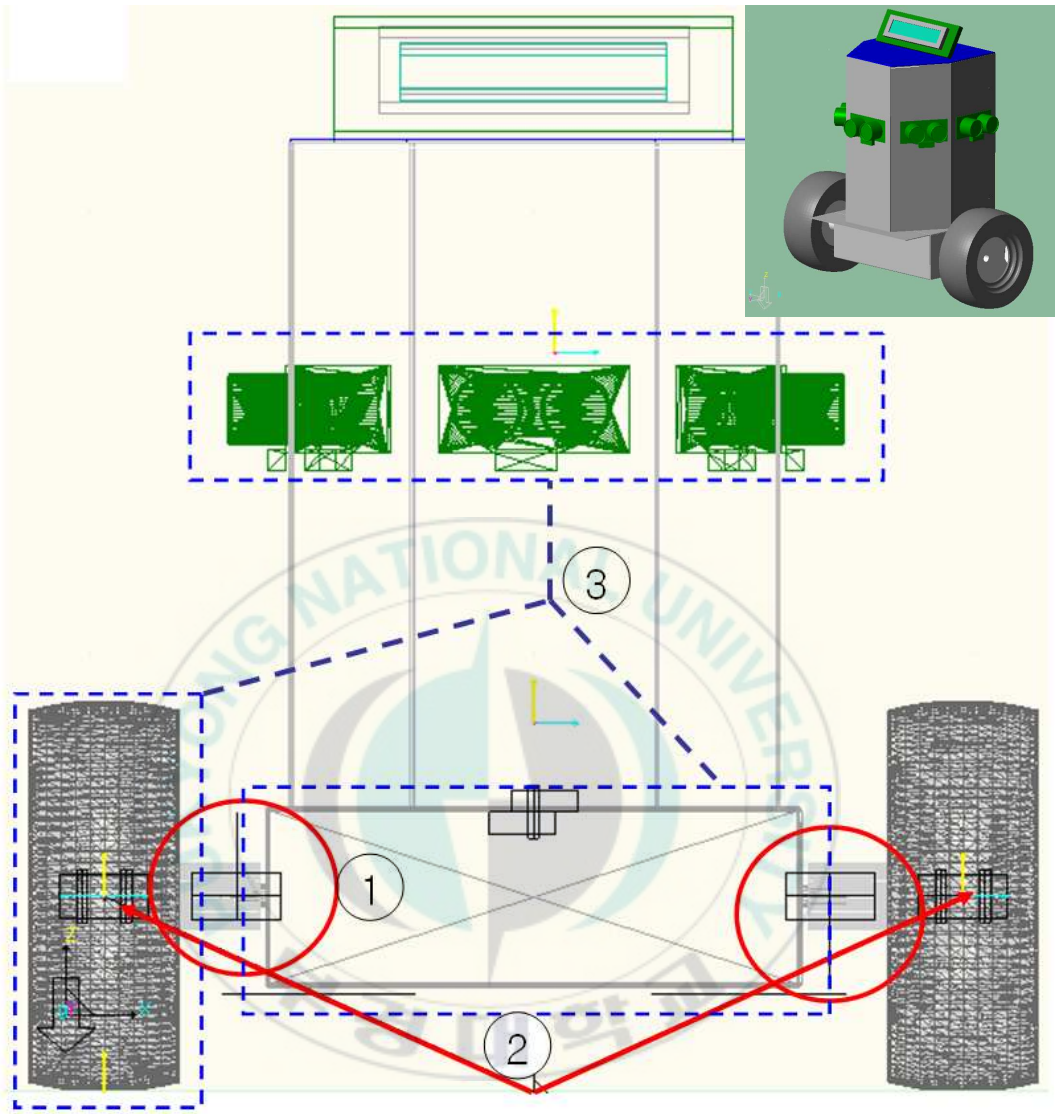

Fig. 3. 7 The modeling of 2-DOF TWR

Fig. 3. 7은 RecurDyn을 이용하여 모델링 한 2자유도 Two Wheel Robot을 나타내고 있으며 1자유도 IPS을 응용한 Control Plant이다. 1자유도 IPS는 Cart Wheel의 구동에 따라 Pendulum의 자세를 제어 한 것이고 2자유도 TWR

은 로봇을 구성하는 2개의 Wheel을 제외한 전체가 1자유도 IPS의 Pendulum 에 해당되는 부분으로 그 제외된 2개의 Wheel로 로봇의 자세를 제어한다. TWR은 이동면에서 2자유도의 방향성을 가지고 있으며 로봇에 부착된 초음파 센서를 통하여 장애물을 회피 할 수 있는 지능형 Mobile 로봇으로써의 역할을 할 수 있다. 그리고 이것은 사용자가 직접 제어하는 Segway 와 구별되는 점이기도 하다.

본 논문에서는 TWR의 지능형 Mobile 로봇으로써의 역할보다는 1자유도 IPS를 응용하여 2 자유도의 방향성을 가질 수 있는 로봇의 제어기를 통합개발 플랫폼을 이용하여 빠르고 효율적으로 설계하는 것에 중점을 두었다.

3. 3. 1 구동부 Wheel 모델링

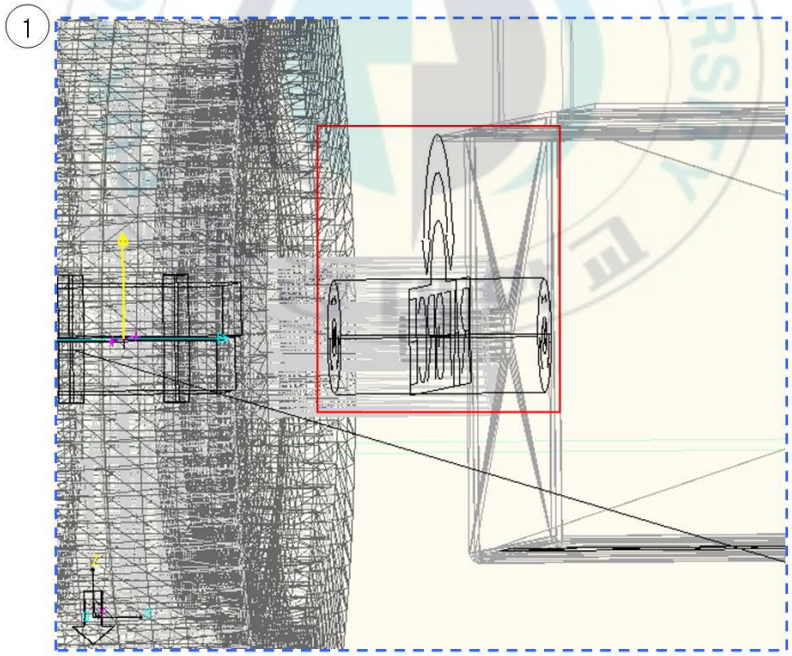

Fig. 3. 8 The modeling of Wheel part

Fig. 3. 8은 TWR의 자세제어와 이동성에 관련된 Torque가 전달되는 구동부를 나타내고 있다. Wheel과 로봇이 연결되는 shaft에

(Rotational Axial Force) 가 설정되어 있고 이것은 앞서와 같이 RecurDyn Control Toolbox에서 Input parameter로 설정되어 Co-Simulation 과정에서 계산되어진다. 양쪽 Wheel에 같은 조건으로 모델링 하였으며 양쪽 바퀴의 독립된 운동은 회전반경의 최소화로 방향전환에 있어 앞의 4개의 wheel로 구성된 Cart보다 강점을 지닌다.

3. 3. 2 TWR wheel의 구속조건

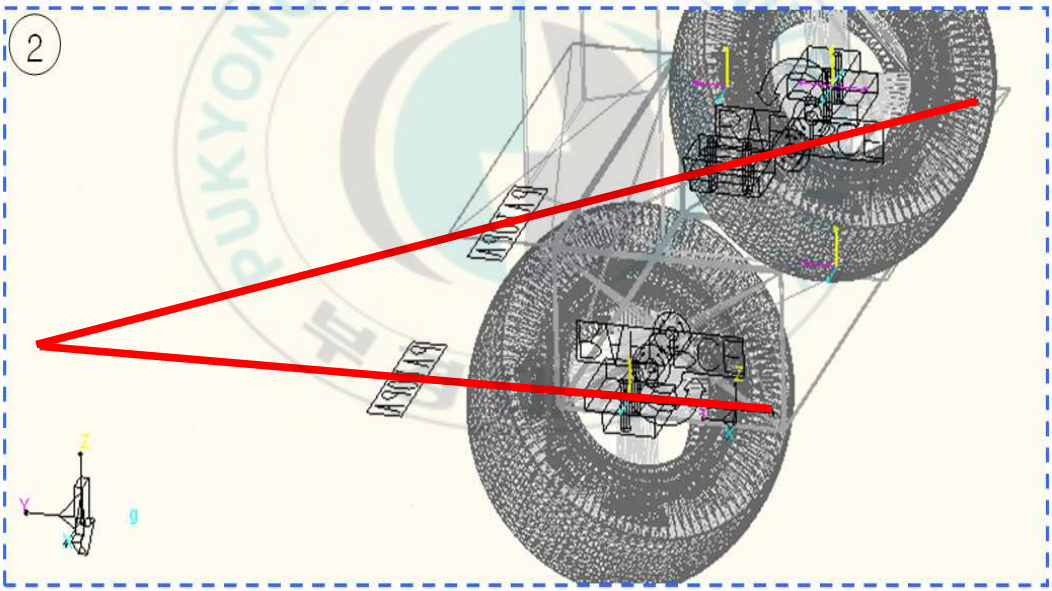

Fig. 3. 9 The contact of wheels of TWR

Fig. 3. 9는 TWR의 wheel에 적용된 구속조건

(Contact)을 나타낸다.

wheel 의 구동에 있어 지면과의 Slip 현상을 피하기 위해 TWR 제어에 영향을 끼치지 않는 아주 작은 값으로 구속조건을 설정하였다. 1자유도 IPS의 경우는 4개의 wheel에 Contact를 설정하기 때문에 Analysis를 함에 있어 2자유도 TWR 보다 계산 량이 많아 시간이 더 소요된다.

3. 3. 3 CAD Interface 모델링

Fig. 3. 10과 Fig. 3. 11은 RecurDyn Tool 의 Analysis 특징 중에 하나인 CAD Interface를 설명하기 위한 그림이다.

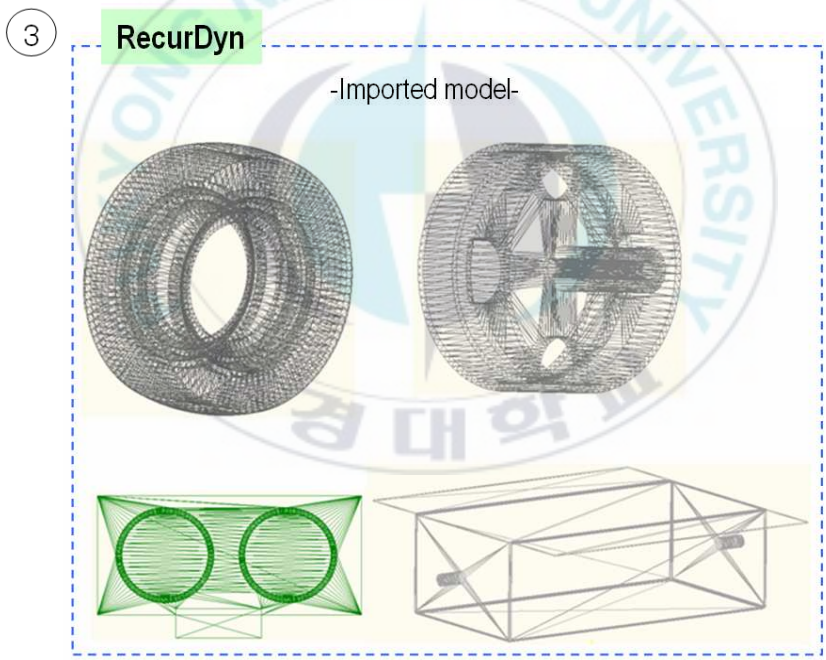

Fig. 3. 10 Imported model in RecurDyn

Fig. 3. 10은 RecurDyn Tool에서 Import 시킨 모델을 나타낸다. 실제 모양과 같은 모델링을 하게 되면 복잡한 외형의 경우 그 부품의 질량이나 관성 값은

계산하기가 쉽지 않다. 그리고 다른 CAD Tool을 통해 모델링 된 부품의 경우는 다시 모델링 작업을 거쳐야 되는 그런 번거로움이 생길 수 있는데 RecurDyn Tool의 경우 CAD Tool에서 모델링 된 부품을 본 소프트웨어에서 지원하는 종류의 파일로 변환이 가능하면 바로 사용할 수가 있다. Fig. 3. 11 역시 CAD Tool을 통해 모델링 한 것으로 이 부품들은 파일 변환을 통해 Fig. 3. 9에서 나타낸 것처럼 RecurDyn에서 Import 되어진다.

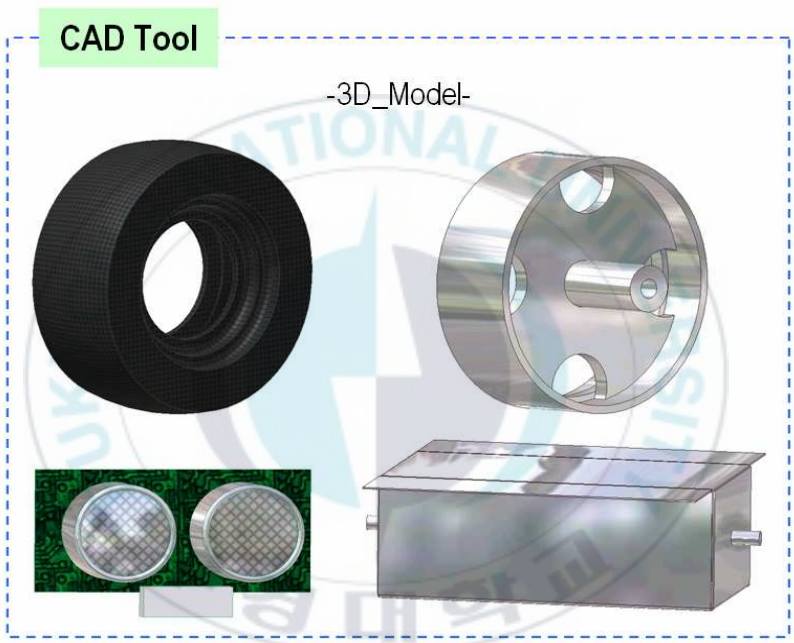

Fig. 3. 11 3D_model in CAD Tool

Fig. 3. 12와 Fig. 3. 13은 RecurDyn과 CAD Tool에서 정의된 3D model의 Physical Property를 나타낸다. CAD Interface 기능을 통해 Import 된 부품은 CAD Tool의 원래 그대로의 특성을 사용 하여 모델링 할 수 있다.

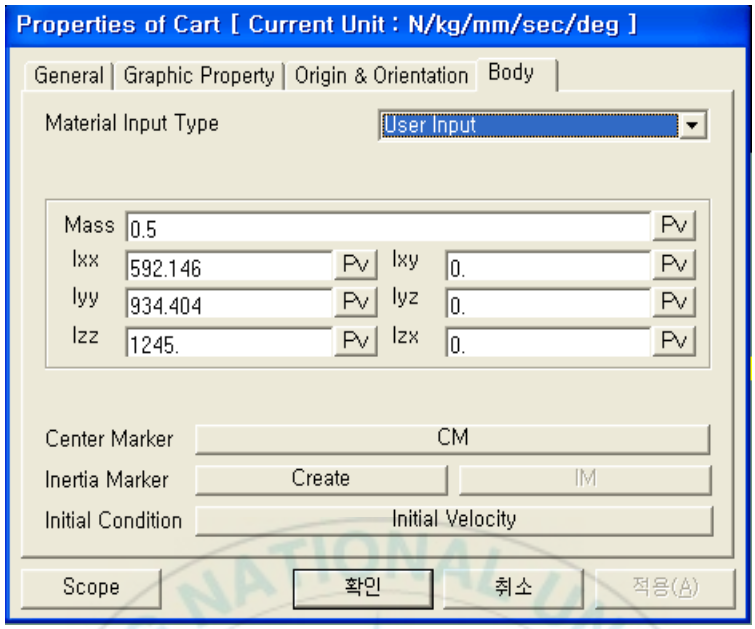

Fig. 3. 12 The Properties of Cart in RecurDyn

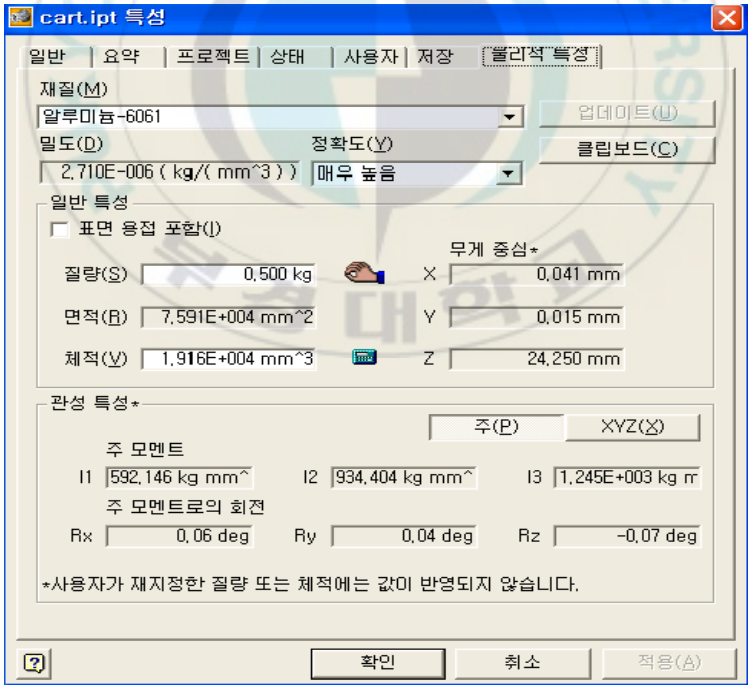

Fig. 3. 13 The properties of Cart in CAD Tool

제 4 장 *Fuzzy Controller*

4. 1 Fuzzy Theory

퍼지는 '애매모호한', '경계가 명확치 않은' 등의 사전적의미를 가지는 단어로 퍼지 이론은 애매하고 불분명한 상황에서 여러 문제들을 두뇌가 판단 결정하는 과정에 대하여 수학적으로 접근하려는 이론을 말한다. 이 이론은 불분명한 정보를 언어적으로 다루기 위한 체계적인 계산법을 제시하며 그것은 멤버쉽함수에 의한 규정된 언어적 변수를 이용하여 수치적인 연산을 수행한다.

Fig. 4. 1 Fuzzy Theory

Fig. 4. 1 은 퍼지 이론을 뒷받침하는 퍼지 집합(Fuzzy set), 퍼지 논리(Fuzzy logic), 퍼지수(Fuzzy number)를 나타낸다.

퍼지 집합은 언어의 의미와 개념의 정의에서 보여 지는 애매성을 정량적으로 나타내기 위한 집합개념으로 퍼지이론의 근간을 이룬다. 기존의 수학의 참과 거짓 사이에 존재하는 중간적 개념을 인정하고, 그 중간적 개념의 값, 또는 거짓에의 근접성에 대한 주관적 판단까지 수용하고 있다.

일반집합에서는 어떤 원소의 소속 여부를 속하느냐, 속하지 않느냐 밖에 인정하지 않는다. 만약 a가 전체집합 A의 부분 집합일 때, a를 특성함수 개념을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_a : A \rightarrow \{0,1\} \quad (\text{단, } b \in a \text{이면 } C_a(b) = 1,\ b \notin a \text{ 이면 } C_a(b) = 0)$$

$C_a(b) = 1$의 의미는 b가 a의 원소임을 나타내고, $C_a(b) = 0$ 의 의미는 b가 a의 원소가 아님을 나타낸다.

반면에, 퍼지 집합은 집합에서 부분적인 원소를 허락한다. 일반적인 집합과 같이 원소가 집합에 속하거나 속하지 않는 두 가지 중의 하나로 결정되지 않고 단위구간 [0,1] 사이의 실수 값을 멤버쉽(소속) 정도로 취하는 원소들로 구성되는 집합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \{(x, \mu a(x)) |\ b \in A,\ \mu a(x) \in [0,1]\}$$

a를 A의 퍼지 부분집합 또는 퍼지 집합이라고 한다. 여기서 μa는 전체집합A에 대한 멤버쉽함수(Membership function)라 한다. 퍼지 집합의 멤버쉽 값은 0에서 1의 범위에서 값을 갖게 된다.

퍼지 논리는 불확실한 인간의 근사적 추론 방법을 모델링하기 위한 논리적 체계를 말하며 한계가 명확하지 않은 퍼지 집합이론에 등급을 줌으로서 집합론의 일반화된 형태를 현실 세계에 적용하려는 것을 말한다.

일상생활에서 실제로 사용되는 자연어는 0 또는 1의 절대적인 형태로 표현되기가 쉽지 않다. 퍼지 논리는 참(또는 '사실' 또는 '그 일의 상태' 등)의 극단적인 경우로서 0 과 1을 포함하지만, 그 중간에 있는 여러 가지 상태의 참도 역시 포함한다. 따라서 퍼지 논리는 애매모호함의 학문이다.

퍼지 숫자는 하나의 수를 소속정도에 따라 그 수 근처를 퍼지하게 표현한 것을 말한다. 퍼지하게 표현된다고 하여 아무 소속 함수나 퍼지수가 될 수 있는 것이 아니고 다음의 세 가지 조건을 만족해야한다.

- 볼록(convex)
- 정규(normal)
- μa(소속함수)가 구분적 연속

수라는 것은 아무리 애매하게 표현되어도 표현하고자하는 그 중심값은 가져야 하며 그 중심값 주위의 수는 멀어질수록 소속정도가 작아지도록 표현해주어야 한다. 따라서 볼록한 모양으로 나타내야만 하고, 볼록한 부분이 꼭 하나만 존재해야한다. 그리고 '약'이라는 애매한 의미가 포함되더라도 우리가 나타내고자 하는 값은 확실한 중심 값이기 때문에 중심 값의 소속정도는 1이 되어야 한다. 이를 만족시키기 위해선 퍼지 집합이 정규이어야 한다. 그리고 마지막으로 소속함수가 연속되지 않고 끊어지게 되면 끊어진 이후 부분이 어떤 값을 나타내는지 불확실하게 되므로 중심값을 기준으로 소속함수는 연속이어야 한다.

4. 2 Fuzzy Control

퍼지 제어는 퍼지 이론의 응용분야로서 인간이 가진 지식과 경험을 포함하는 제어 알고리즘을 실현하는 지적 제어 방식으로 종래의 수학적인 함수에 의한 제어 방식과 다르게 인간의 제어방식을 모사한 제어 방식이다. Zadeh 는 1968년에 발표한 '퍼지 알고리즘'이란 논문에서 퍼지 알고리즘은

제어, 패턴 인식, 시스템 동정(Identification), 인공지능, 의사결정(decision making) 등에 사용 될 수 있다고 서술하고 휴머니스틱 시스템(인간 중심적인 시스템)이나 그것과 동등한 정도의 복잡한(complex) 시스템을 취급하기 위해서는 전통적인 수학적인 방법은 적합하지 않다고 하였다. 그 이유로 '부적합성의 원리'를 들고 있다. 이 원리는 시스템의 복잡성이 증가하여 어느 한도를 넘으면 시스템의 거동에 대해 정확하고 의미가 있는 기술이 불가능하다는 것이다. 정확함을 기하려고 하면 시스템 모델의 변수와 파라미터 수가 매우 커지게 되고, 쓸모없는 모델이 되어 버린다. 따라서 이러한 경우 바람직하고 쓸모 있는 모델은 정량적인(quantitative) 관계대신 정성적인(qualitative)것이 된다.

4. 3 Fuzzy Inference System

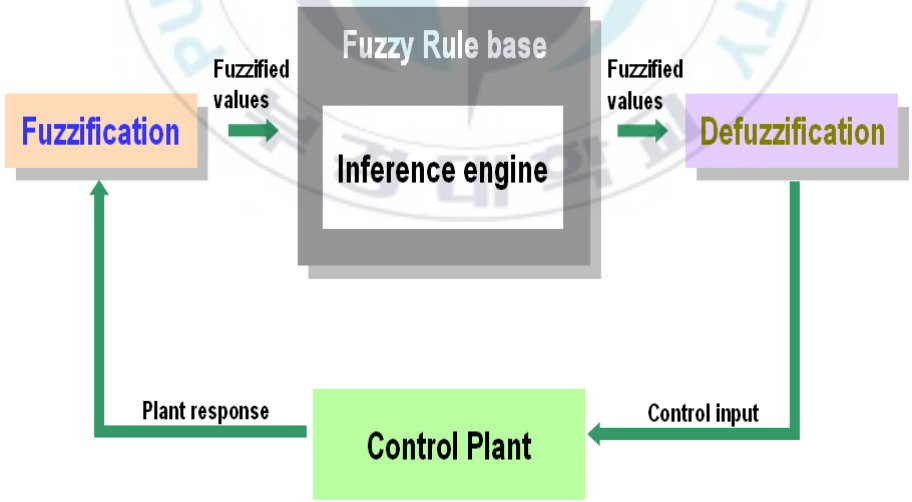

Fig. 4. 2 Fuzzy Inference System

Fig. 4. 2는 일반적인 퍼지 추론 시스템 (Fuzzy Inference System)을 나타낸다. 퍼지 추론 시스템은 기존의 수학적인 시스템 모델링에 의해서는 잘 나타낼 수 없는 복잡하고 잘 정의 되지 않는 그리고 불확실한 시스템을 IF-THEN 형태의 규칙에 의해 표현할 수 있는 장점을 가진다.

퍼지 추론 시스템은 Fig. 4. 2에서와 같이 기능적인 블록으로 이루어져 있다. 각 블록에 대해서 Table. 4. 1 에 나타내었다.

Table. 4. 1 The parameters of IPS

구분		내용
Fuzzy Rule base	Rule base	퍼지 IF-THEN 규칙을 저장한다. -IF(antecedent) -THEN(consequent)
	Data base	퍼지 규칙에 사용되는 퍼지 집합의 소속함수를 정의한다.
	Inference engine	Fuzzy Rule base를 바탕으로 추론을 행한다.
Fuzzification		Plant의 출력 값을 입력으로 받아 언어변수(linguistic value)에 대응되는 멤버쉽 값을 계산한다.
Defuzzification		추론을 통해 얻어진 퍼지 출력을 Plant의 Control input value로 계산한다.

퍼지 추론 시스템은 퍼지 추론 및 사용되는 규칙의 형태에 따라 3가지 유형으로 구분된다.

유형 I - 간략추론법

: 전체 출력은 각 규칙의 적합도와 출력의 소속함수에 의해 나타내어지는 상수의 출력 값의 하중평균이다. 이때의 퍼지 추론법을 간략추론법이라 한다. 여기서 사용되는 소속함수는 단조증가함수이어야 한다. 퍼지 규칙의 형태를 살펴보면 다음과 같다.

$$IF\ x\ is\ A\ and\ y\ is\ B,\ THEN\ z\ is\ c$$

여기서 , A, B : 퍼지 집합, c : 실수,

x, y : 전반부 변수, z : 후반부 변수.

유형Ⅱ- Mamdani 추론법

: 전체 퍼지 출력은 각 규칙의 적합도와 출력 소속함수에 의해 얻어진 각 규칙의 퍼지 출력에 대해 큰 값을 취함으로써 얻어진다. 전체적인 퍼지 출력에 대해 최종적인 상수의 출력 값을 얻기 위해 다양한 방법들이 사용되는데 무게 중심법(Center of gravity method), 최대치 평균법(Mean of maxima method), 최대치법(Max criterion Method)등이 있다. 이 방법을 Mamdani 추론법이라 한다. 퍼지 규칙의 형태는 다음과 같다.

$$IF\ x\ is\ A\ and\ y\ is\ B,\ THEN\ z\ is\ C$$

여기서, A, B, C : 퍼지 집합,

x, y : 전반부 변수, z : 후반부 변수.

유형Ⅲ- Takagi-Sugeno 퍼지 규칙

: 각 규칙의 출력은 입·출력 변수의 선형식이고 전체적인 출력은 각 규칙의 출력의 하중평균으로 이루어진다. 퍼지 규칙의 형태는 다음과 같다.

$$IF\ x\ is\ A\ and\ y\ is\ B,\ THEN\ z\ is\ ax+by+c$$

여기서, A, B : 퍼지 집합, x, y : 전반부 변수, z : 후반부 변수.

a, b, c : 후반부 선형식의 계수

본 논문에서는 Mamdani 추론법을 사용하여 퍼지 제어를 하였다.

Mamdani 추론법은 직접법이라고도 한다. Mamdani 추론법의 가장 큰 특

징은 후반부 변수가 멤버쉽함수(퍼지수)라는 점이다. 따라서 다른 추론에 비해 빠른 추론 속도를 가진다.

Mamdani 추론법의 절차는 다음의 4단계로 구분된다.

• 단계1 : 주어진 입력에 대한 각 규칙의 전반부 적합도를 구한다.

; 임의의 입력 a, b에 대한 각 규칙의 적합도는 다음과 같다.

R(규칙)의 적합도 : $\omega = \mu_A(a) \wedge \mu_B(b)$

(A와 B에 대한 적합도 중 작은 값 선택 => max-min 추론 결과)

• 단계2 : 단계1에서 구한 적합도를 기초로 각 규칙의 추론결과를 구한다.

; 단계1에서 구한 적합도를 후반부 퍼지 집합에 반영하여 각각의 규칙의 추론결과를 구한다.

R의 추론결과 : $\mu_{C'}(z) = \omega \wedge \mu_C(z), \ \forall_z \in Z$

(단계1에서 구해진 값과 C의 소속함수 값 중 작은 값(min)을 취한다.)

• 단계3 : 각 규칙의 추론결과로부터 최종적인 추론결과를 구한다.

; 다음의 식을 통해서 각 규칙에서 구해진 값 중에서 가장 큰 값(max)을 취한다.

$$\mu_C(z) = \mu_{C_1'}(z) \vee \mu_{C_2'}(z)$$

• 단계4 : Defuzzification을 통해 Plant에 사용 가능토록 한다.

; 단계3을 끝낸 후의 추론결과는 퍼지 집합이다. 일반적인 Plant에서 퍼지 값이 아닌 실수값을 필요로 하게 되면 이 퍼지 집합을 비퍼지화(Defuzzification) 시켜 실수값을 구해야 한다.

앞에서 설명했던 3가지 방법을 사용하면 비퍼지화 된 실수 값을 구할 수 있다.

4. 4 Application : Fuzzy Control

본 장에서는 Fuzzy Control 알고리듬을 3장에서 모델링 한 1자유도 Inverted Pendulum System과 2자유도 Two Wheel Robot에 적용시켜 제어 성능을 확인하였다. 통합 개발 플랫폼을 기반으로 설계된 제어기를 이용하여 Co-Simulation을 수행하였다.

4. 4. 1 1자유도 Inverted Pendulum System

Fig. 4. 3 과 4. 4는 SIMULINK 상에서 Fuzzy Controller 와 load 된 RecurDyn Plant Block을 나타낸다. RecurDyn Plant Block은 RecurDyn Tool에서 제공하는 Control Toolbox를 통해 load 된 library이다. Fuzzy Controller는 Fuzzy Inference System을 이용하여 구현 하였다.

Fuzzy Controller는 RecurDyn Plant Block에서 측정된 Pendulum의 θ와 $\dot{\theta}$을 입력 값으로 받아 Fuzzy Inference System을 통해 Torque값을 계산한다. 계산된 Torque는 RecurDyn Plant Block에 입력되어 Pendulum의 각도를 제어하게 되고 여기서 발생하는 각변위(θ)나 각속도($\dot{\theta}$)가 다시 Fuzzy Controller에 입력되어진다. 이러한 입력과 출력 값의 되풀이 되는 순환 과정을 거치면서 Pendulum의 자세를 제어하게 된다.

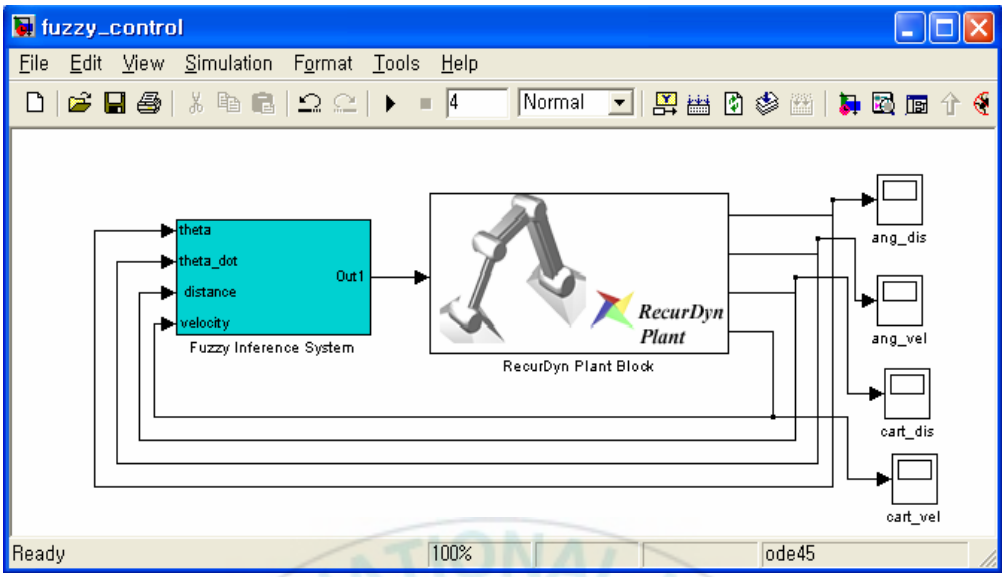

Fig. 4. 3 Fuzzy Controller

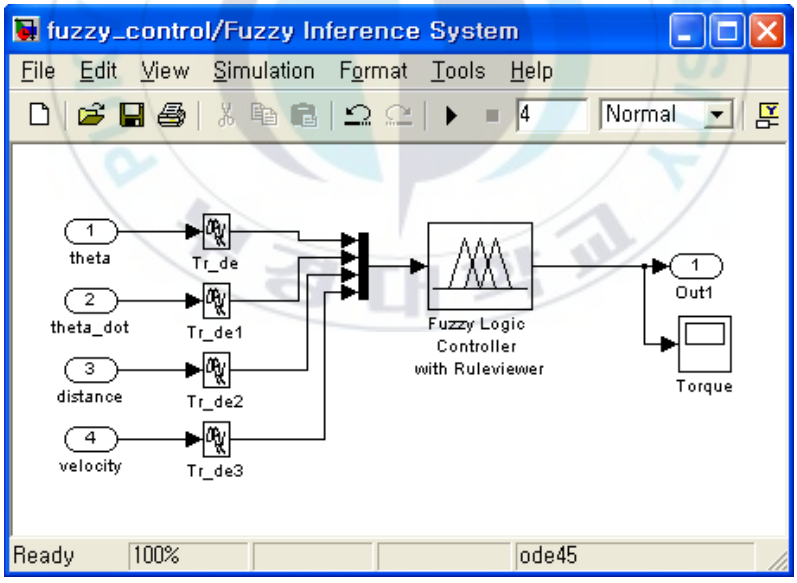

Fig. 4. 4 Fuzzy Inference System

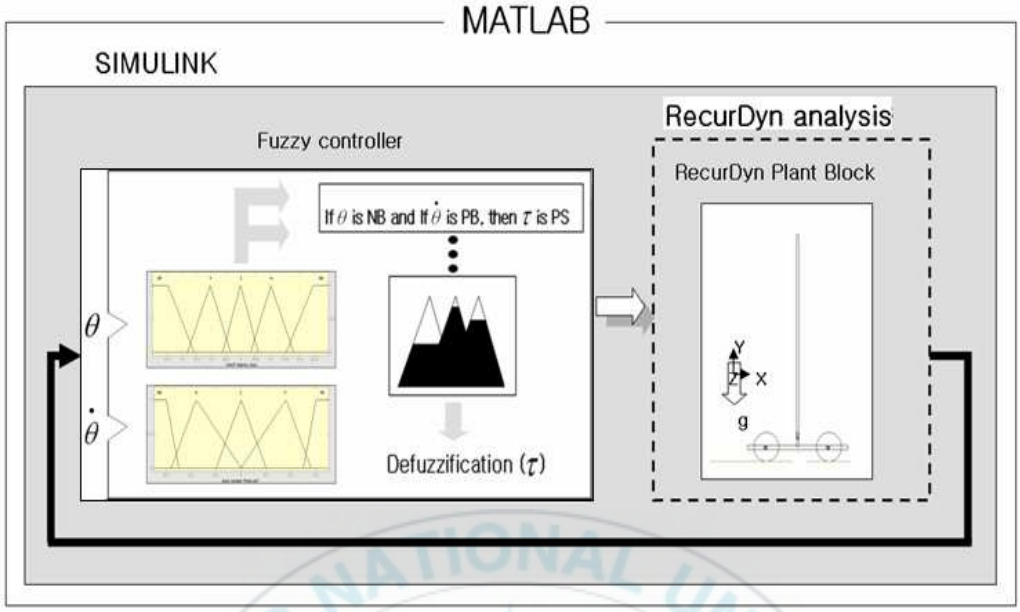

Fig. 4. 5 Process of Co-Simulation

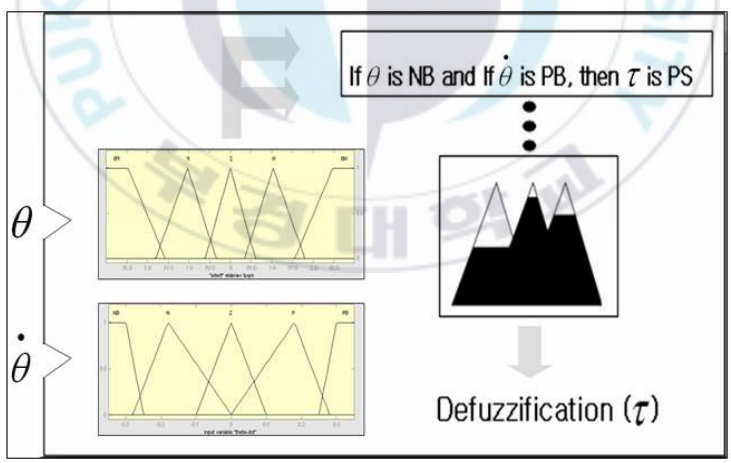

Fig. 4. 6 Process of Fuzzy Inference

Fig. 4. 5는 Co-simulation 실행 과정을 나타내며, Fig. 4. 6은 4. 4의 Fuzzy Inference 과정을 나타낸다. 입력되는 data (θ, $\dot{\theta}$)의 퍼지화(Fuzzification)를 거쳐 소속 정도를 나타내는 멤버쉽함수(Membership function)를 구하고 IF-THEN 규칙에 의한 추론 과정을 거쳐 계산된 data를 Mamdani 방법으로 비퍼지화(Defuzzification)시켜 Fuzzy Controller의 출력 값인 Torque를 계산한다.

이런 일련의 과정에서 Control Toolbox에서 설정한 Input Values 와 Output Values가 계산되어 Co-Simulation이 진행되는 동안 sampling 시간마다 feedback되어 Pendulum의 자세를 제어하고 RecurDyn Plant Block의 analysis가 MATLAB SIMULINK에서 함께 시뮬레이션 되어 RecurDynd Tool에서 제공하는 animation을 통해 Pendulum의 자세를 확인 할 수 있기 때문에 보다 빠르고 효율적으로 Fuzzy Controller를 설계 할 수가 있다.

Fig. 4. 7에서 4. 9는 Pendulum의 각도를 왼쪽으로 5° 기울인 상태에서 Fuzzy Control을 통한 data의 결과 값을 나타내고 있다. 먼저 Torque 값을 살펴보면 '0'에서 시작한 값은 자세 제어를 위해 '0'을 기준으로 상하 반복적인 값을 유지하다 2.5s 이후부터는 거의 일정한 값으로 진동을 함을 알 수 있다. Pendulum의 각도를 왼쪽으로 기울인 것은 제어 성능의 확인을 위한 것과 Cart의 방향을 조절하기 위한 방법으로 사용하였다.

마찬가지로 Fig. 4. 10에서 4. 12는 반대로 Pendulum의 각도를 오른쪽으로 5° 기울인 상태에서 제어 성능을 확인한 결과 그래프이다. Fig. 4. 9와 Fig. 4. 12는 각각 Cart가 움직인 왼쪽과 오른쪽 방향을 나타내는 것으로 Cart의 방향을 Pendulum의 θ를 통해 제어 할 수 있음을 확인 할 수 있다.

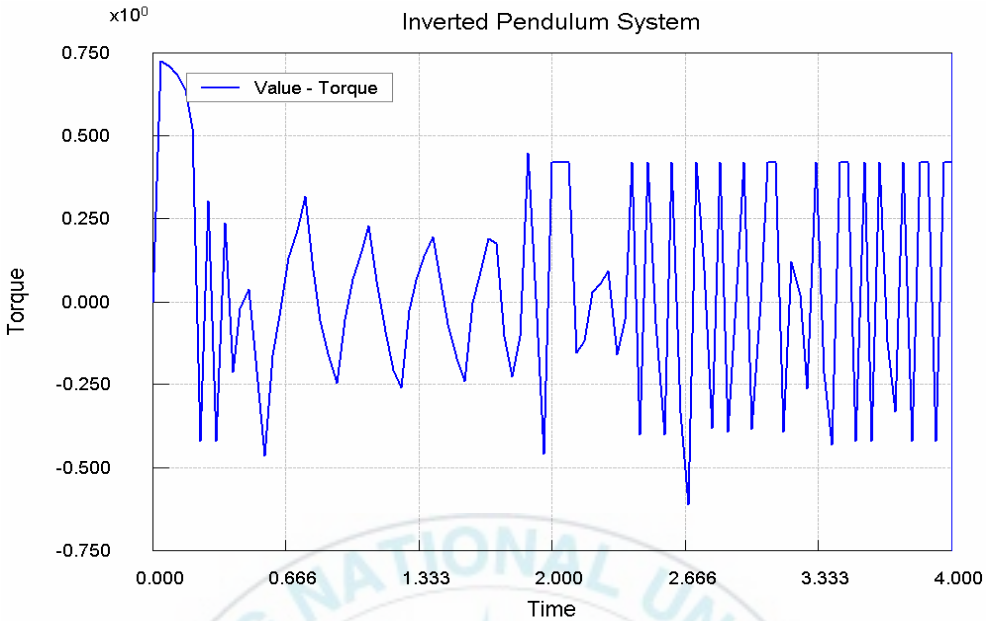

Fig. 4. 7 Torque (Left direction)

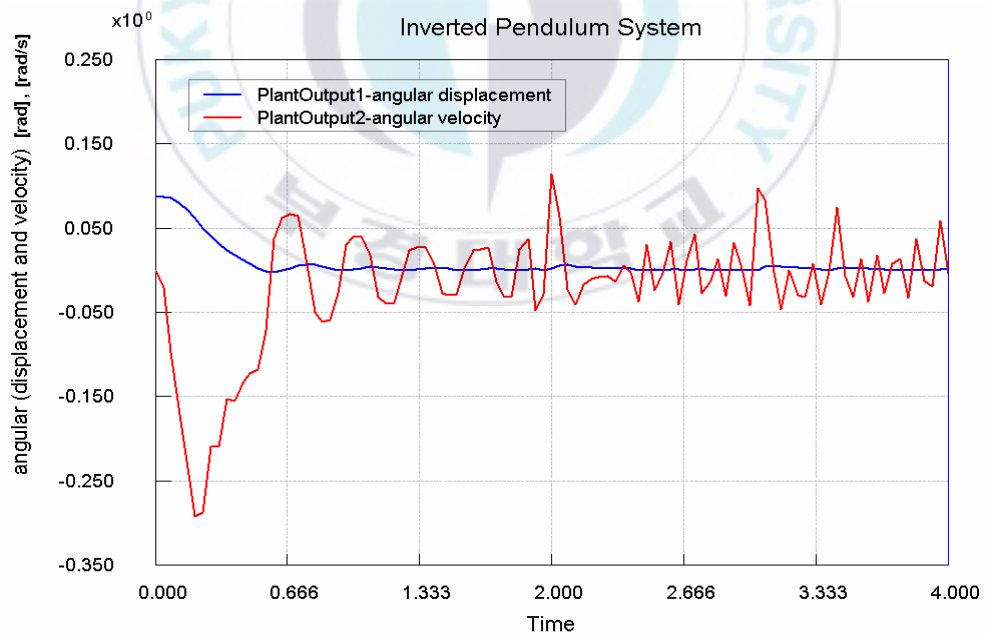

Fig. 4. 8 angular (displacement and velocity) (Left direction)

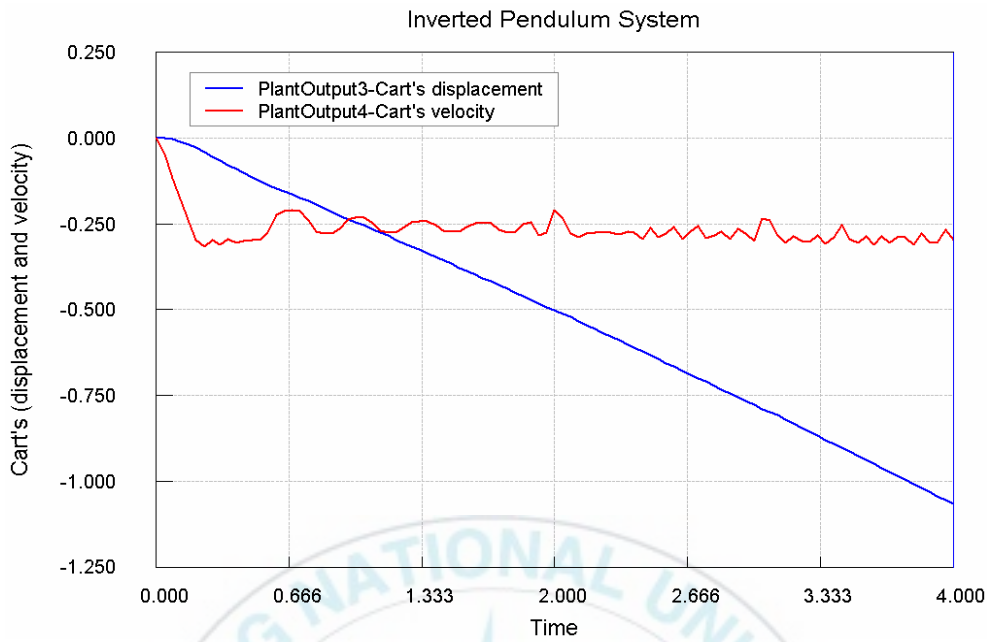

Fig. 4. 9 Cart's displacement and velocity (Left direction)

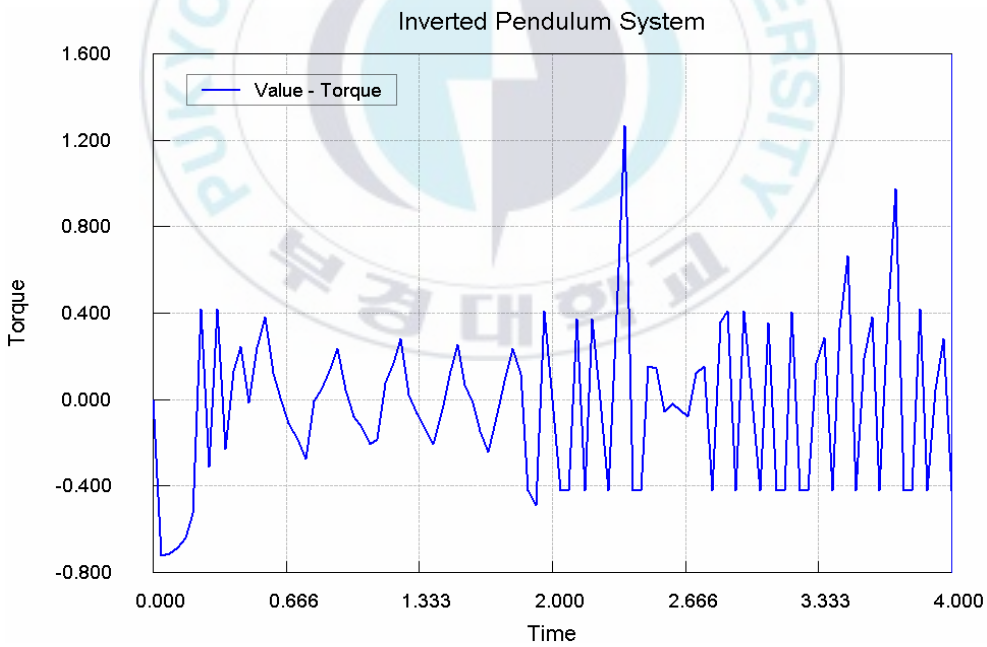

Fig. 4. 10 Torque (Right direction)

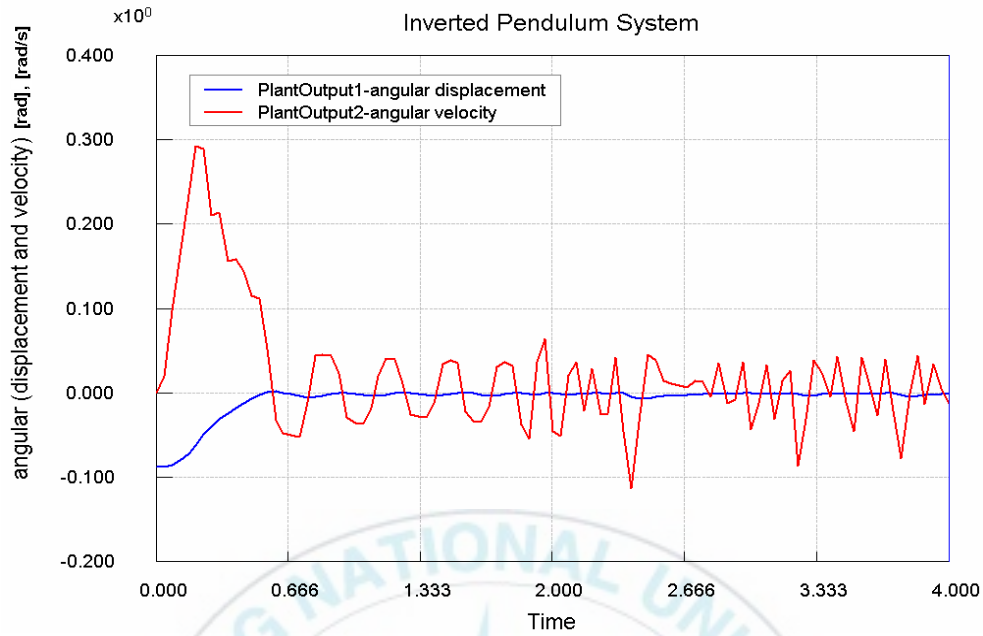

Fig. 4. 11 angular_(displacement and velocity) (Right direction)

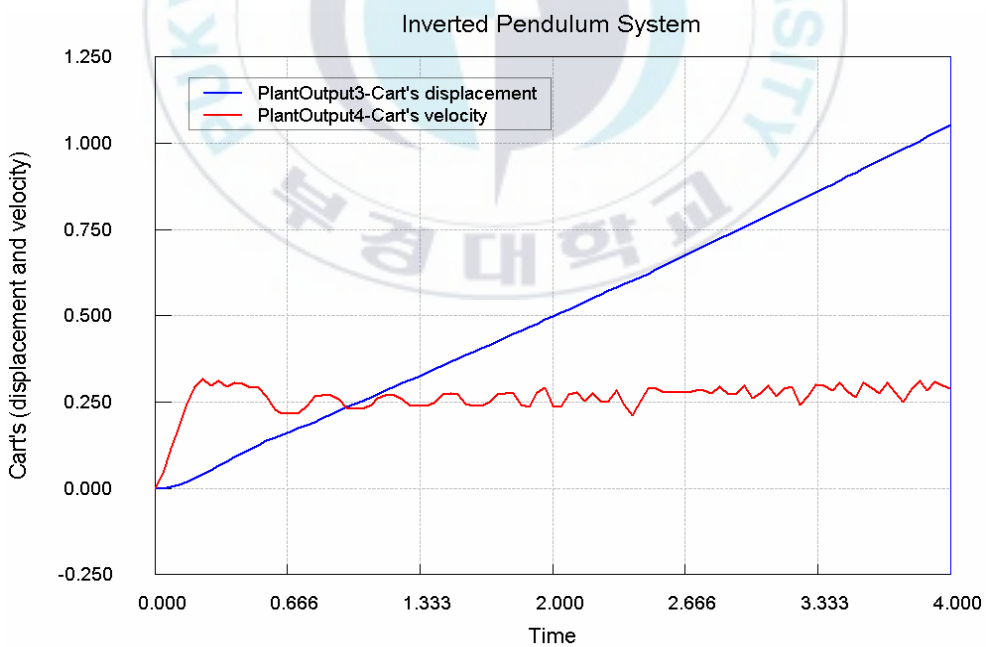

Fig. 4. 12 Cart's (displacement and velocity) (Right direction)

4. 4. 2 2자유도 Two Wheel Robot

1자유도 Inverted Pendulum System을 응용하여 모델링 한 2자유도 TWR은 2개의 Wheel의 구동에 따라 로봇의 자세가 제어되기 때문에 1자유도 Inverted Pendulum System 보단 복잡한 구조를 가진다. 하지만 각각의 Wheel은 로봇의 좌·우 방향 전환을 제외 하고는 서로 반대방향으로의 Driving Torque에 의해서 자세가 제어되기 때문에 1자유도 Inverted Pendulum System 경우와 크게 벗어나지 않는다. 다시 말하면 크기는 같고 서로 반대방향을 가지는 Torque 가 적용되어져야 로봇은 전진이나 혹은 후진이 가능한 것이다. 2자유도 Two Wheel Robot의 경우 Co-Simulation의 입력 값을 좌·우 반대 부호 설정을 통하여 같은 크기와 방향의 Torque를 입력받도록 하였고 전진과 후진만을 고려하게 되면 1자유도 Inverted Pendulum System과 동일한 자유도를 갖게 되는 것이므로 앞에서 적용되었던 제어알고리듬을 바로 이용할 수 있다. 하지만 2개의 Wheel은 좌·우 방향전환을 목적으로 모델링 된 것이기에 앞의 제어알고리듬을 기반으로 2자유도 Two Wheel Robot에 적절한 제어 알고리듬으로 수정을 하였다. 다시 말하면 2자유도 Two Wheel Robot에 있어선 Fuzzy Control과 PID Control을 이용한 자세제어 및 방향전환에 중점을 두어 Co-Simulation을 하였다.

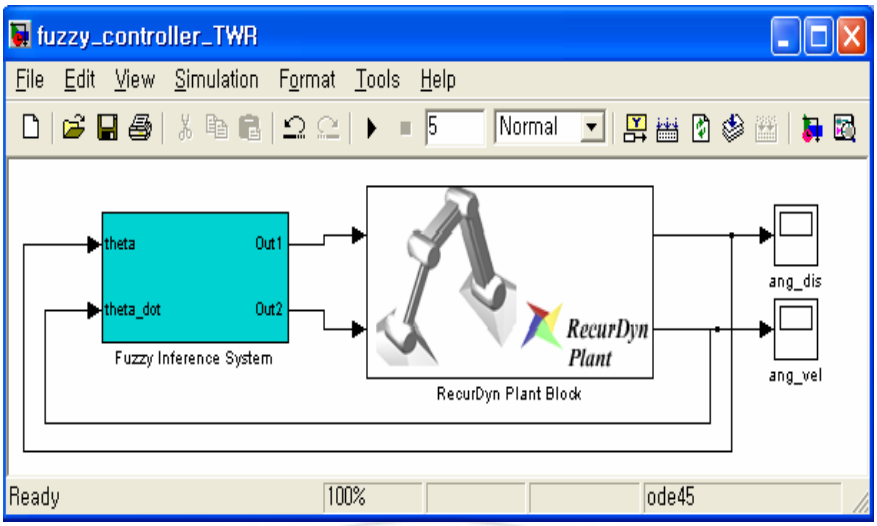

Fig. 4. 13 Fuzzy Control

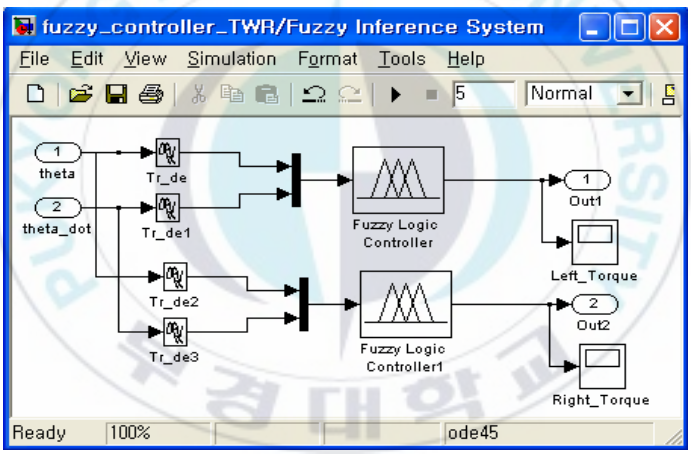

Fig. 4. 14 Fuzzy Inference System

Fig. 4. 13와 4. 14는 Fuzzy Control를 이용한 TWR 제어 블록선도를 나타낸다. 1자유도 IPS의 Fuzzy Control과 동일한 방법으로 Co-Simulation을 수행하였고 RecurDyn Plant Block의 출력 값과 Fuzzy Inference System의 멤버쉽 함수(Membership function)설정과 IF-THEN 규칙은 다르게 적용되었다.

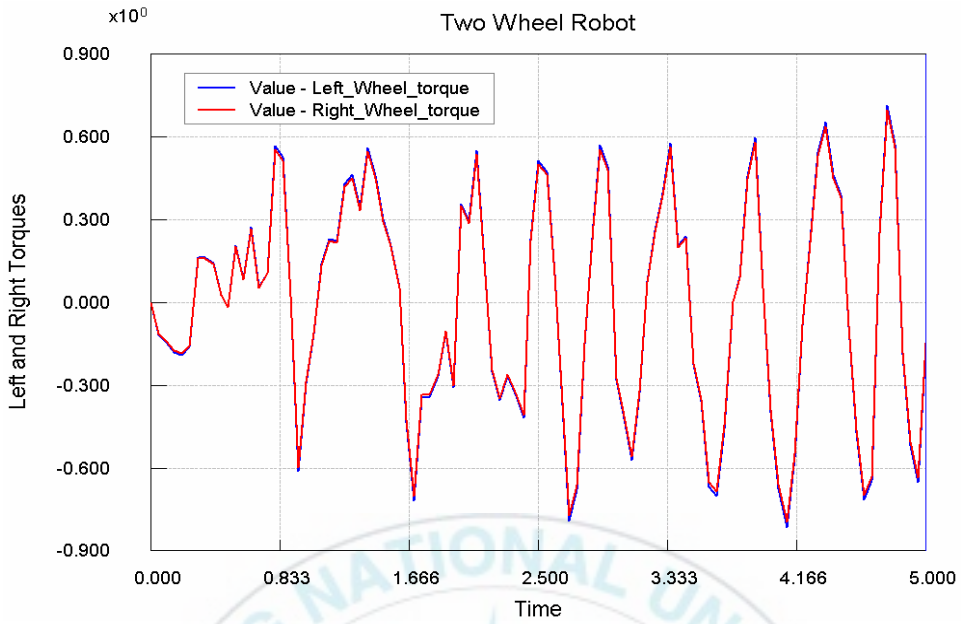

Fig. 4. 15 Left and Right Torques

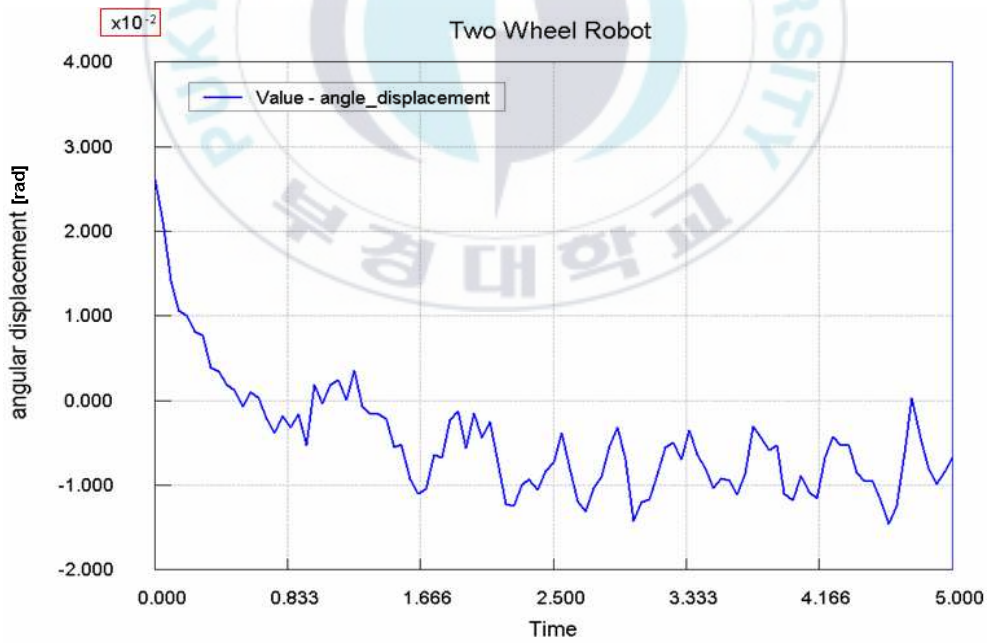

Fig. 4. 16 angular displacement

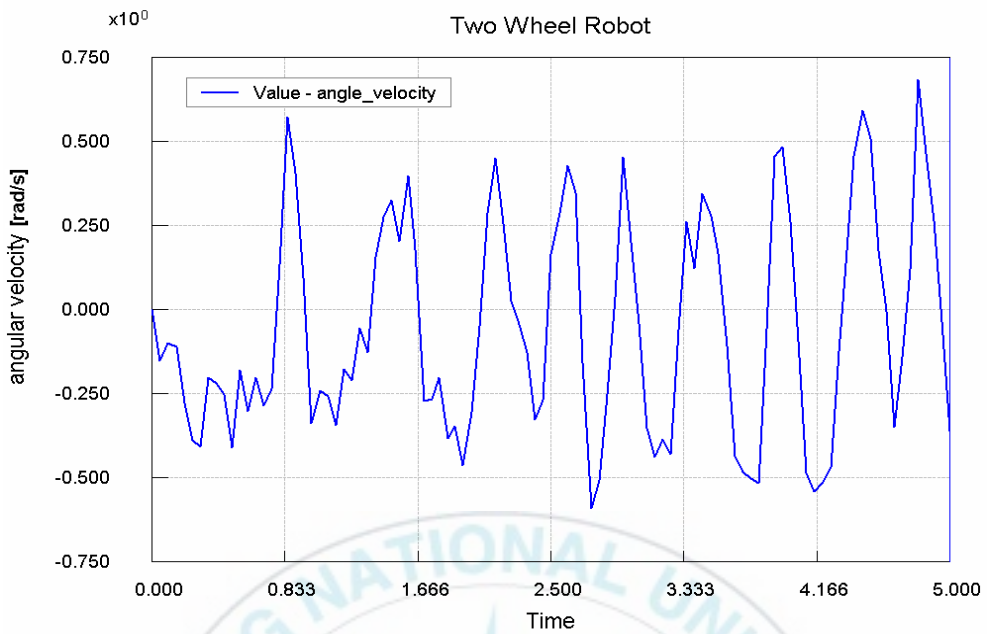

Fig. 4. 17 angular velocity

Fig. 4. 15에서 4. 17까지는 Fuzzy Control에 의한 Co-Simulation 결과 그래프를 나타낸다. Fig. 4. 16은 angular displacement를 나타내는데 변화의 폭을 확인하게 되면 0.01 rad 정도로 도(degree)로 환산하게 되면 0.573°의 값을 가진다. 이 값으로 로봇의 자세 변화가 아주 작음을 확인 할 수 있다.

제 5 장 PID Controller

5. 1 PID Control

PID 제어는 제어대상 (Control Plant)의 출력 값이 목표치와 일치하도록 자동적으로 제어하는 것을 목적으로 하는 제어로써 출력편차 e에 비례하는 출력을 내는 비례동작 (Proportional action : P동작)과 편차 e의 적분에 비례하는 출력을 내는 적분동작 (Integral action : I동작) 그리고 편차 e의 미분에 비례하는 출력을 내는 미분동작 (Derivative action : D동작)의 합으로 표현되고, 시간영역에서는 식(4.1)과 같이 표현된다.

$$U(t) = Kp(e + \frac{1}{T_I}\int edt + T_D\frac{de}{dt}) + U(0) \tag{5.1}$$

여기서, U(t) : 조작량 e : 편차 K_p : 비례이득 (proportional gain)

T_I : 적분시간 (integral time) T_D : 미분시간 (derivative time)

$U(0)$: 조작량 초기치 (stead-state controller output that drives error to zero)

식 (4.1)을 라플라스 변환(Laplace transform)에 의해 전달함수의 형태로 표현하면 식 (4.2)와 같이 된다.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s) \tag{5.2}$$

여기서, C(s) : PID의 전달함수 s : Laplace 연산자

이것은 식 (5.1)의 이상적인 제어기 방정식 (ideal controller equation)의 전달함수이다. 그리고 식 (5.2)를 이용한 PID 제어계의 불록선도를 표시하면 다음과 같다.

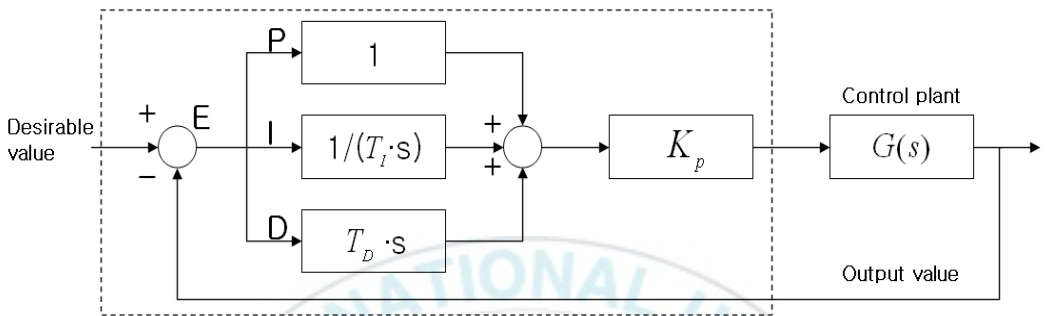

Fig. 5. 1 The control block-diagram of PID

이산(Discrete)형 PID 제어기의 동작은 연속(Continuous)형 PID 제어기의 동작으로부터 구할 수 있는데 그 식은 다음과 같다.

$$V = V_0 + K_p (e + \frac{1}{\tau_I}\int_0^t e dt + \tau_D \frac{de}{dt}) \tag{5.3}$$

위의 식 (5.3) 연속형 PID 제어기로부터 등가인 이산형 PID 제어기를 얻기 위해, 위 식의 미분(derivative)과 적분(integral)항을 n번째 샘플링(sampling) 순간의 제어기 출력(Controller output)을 구하는 식에서 근사화 시킬 수 있는데 그 식은 다음과 같다.

$$V_n = V_0 + K_p [e_n + \frac{T}{\tau_I}\sum_{i=0}^{n} e_i + \frac{\tau_D}{T}(e_n - e_{n-1})] \tag{5.4}$$

(n-1) 번째 샘플링 순간에 제어기 출력은 다음과 같다.

$$V_{n-1} = V_0 + K_p[e_{n-1} + \frac{T}{\tau_I}\sum_{i=0}^{n-1} e_i + \frac{\tau_D}{T}(e_{n-1} - e_{n-2})] \tag{5.5}$$

식 (5.4)에 식 (5.5)를 빼게 되면

$$V_n = V_{n-1} + K_p[(e_n - e_{n-1}) + \frac{T}{\tau_I}e_n + \frac{\tau_D}{T}(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2})] \tag{5.6}$$

여기서, V_n : n번째 샘플링 순간의 제어기 출력

e_n : n번째 순간의 오차 (desirable value - output value)

V_0 : 제어 알고리듬(Control algorithm)이 zero error로 주어질 때의 정상상태 출력

(n)번째 샘플링 순간의 제어기 출력을 구할 수 있게 된다. 시스템의 성능에 벗어나지 않으며 적절한 출력 값의 계산은 비례이득(K_p), 미분이득(K_d), 적분이득(K_i) 값의 조절로 가능하다.

5. 2 Application : PID Control

본 장에서는 PID Control 알고리듬을 4장에서와 같이 1자유도 Inverted Pendulum System과 2자유도 Two Wheel Robot에 적용시켜 Co-Simulation을 수행하였다.

5. 2. 1 1자유도 Inverted Pendulum System

Fig. 5. 2와 5. 3, 5. 4는 SIMULINK 상에서 구현한 PID Controller와 RecurDyn Tool을 이용하여 모델링 한 IPS의 RecurDyn Plant Block을 나타낸다.

Fig. 5. 3은 PID Controller를 나타내며 IPS에서 측정된 $x,\theta,\dot{x},\dot{\theta}$ 출력 값은 PID 연산을 수행한 뒤에 gain block과 연결되어 Torque 값을 조절하게 된다. 각각의 gain 값들의 조절로 출력 Torque를 제어 할 수 있는데 이 값의 범위가 너무 크거나 작게 되면 실제 시스템에 적용 할 수 없는 제어기가 될 수 있기 때문에 시스템의 성능을 고려한 제어가 필요하다.

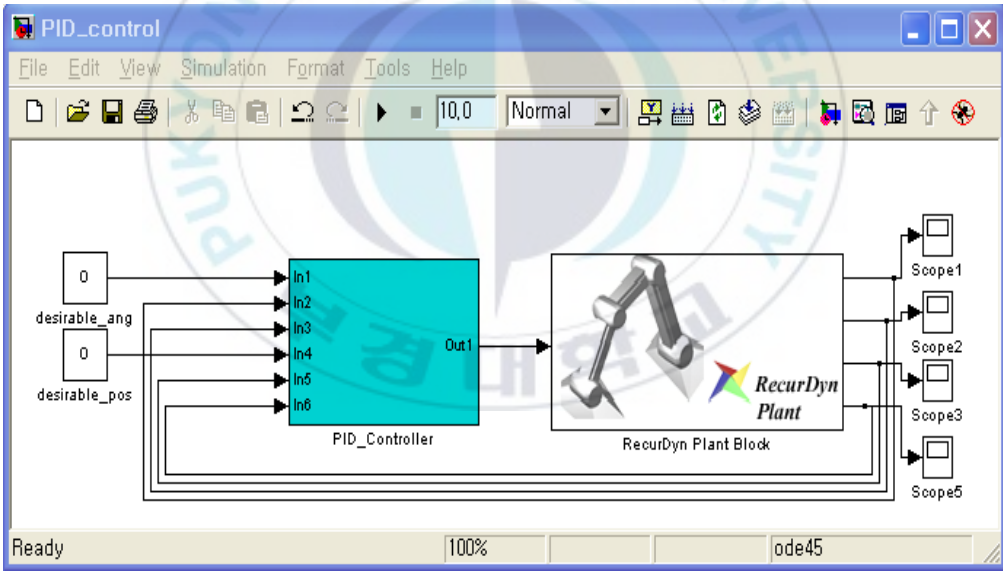

Fig. 5. 2 PID Control in MATLAB SIMULINK

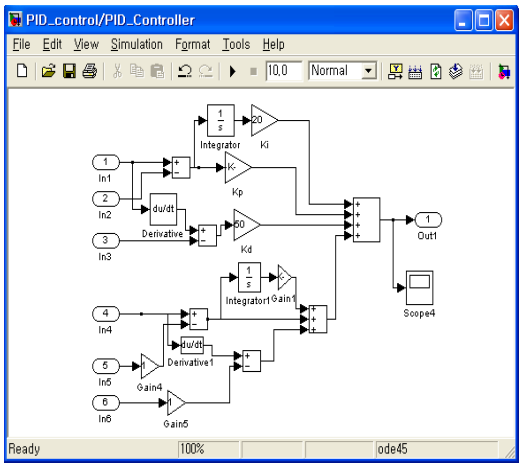

Fig. 5. 3 PID Controller

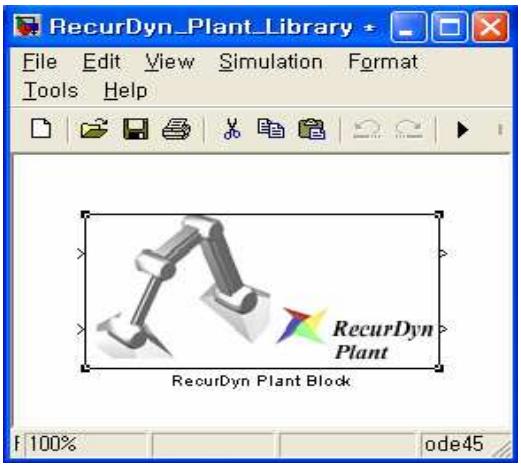

Fig. 5. 4 Loaded RecurDyn PL.BL

Fig. 5. 5에서 5. 9는 PID Control 알고리듬을 적용시켜 Pendulum의 자세와 Cart의 위치를 제어한 Co-Simulation 후의 결과 그래프를 나타낸다.

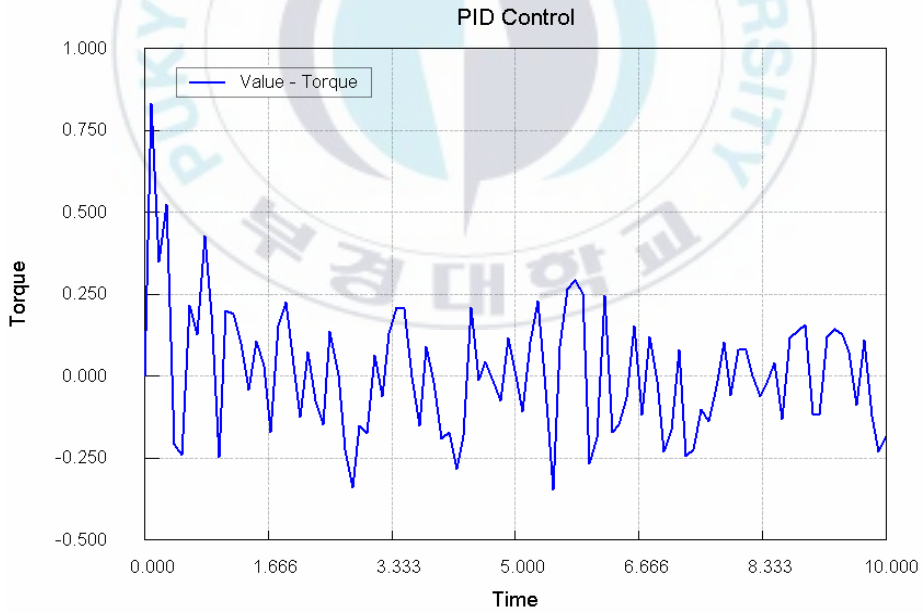

Fig. 5. 5 Torque

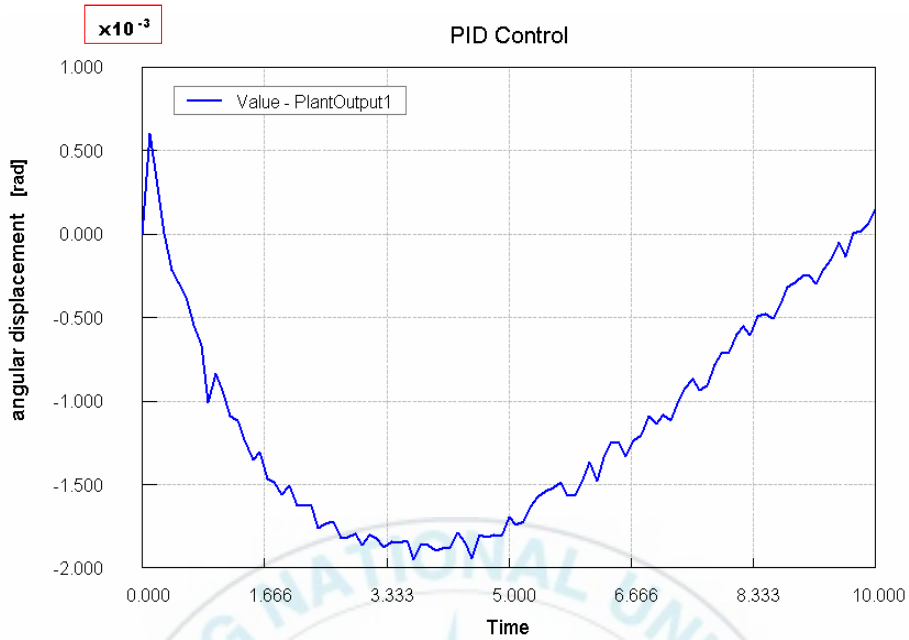

Fig. 5. 6 angular displacement

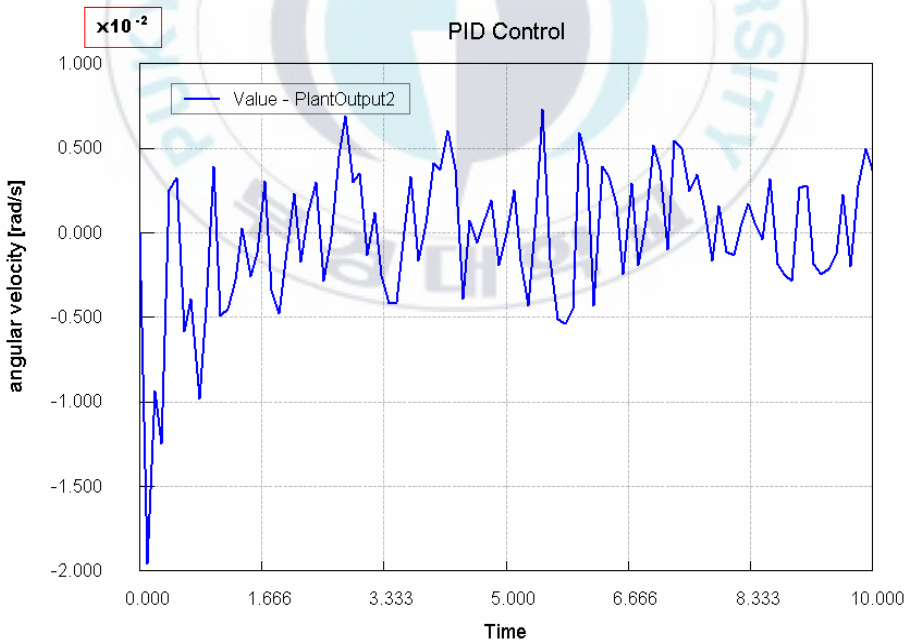

Fig. 5. 7 angular velocity

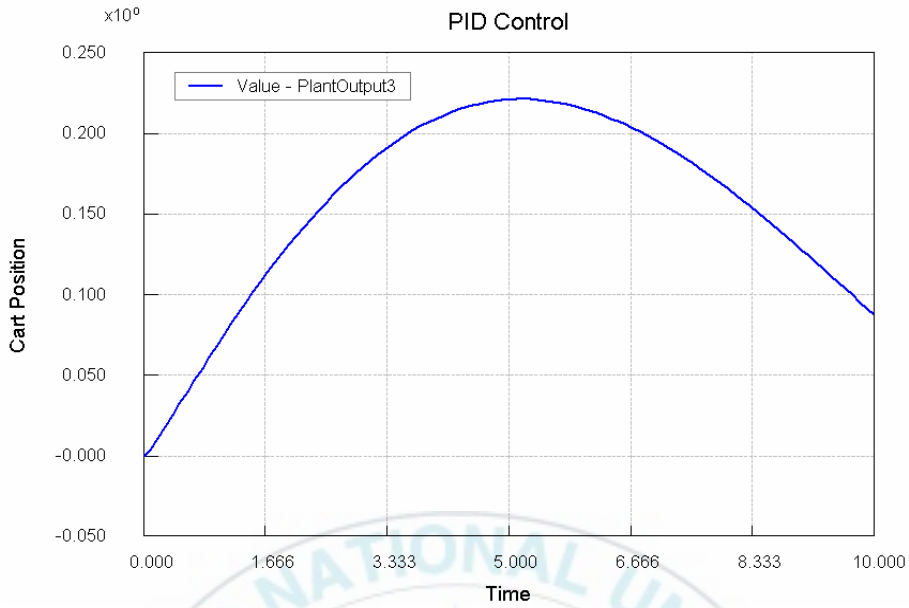

Fig. 5. 8 Cart Position

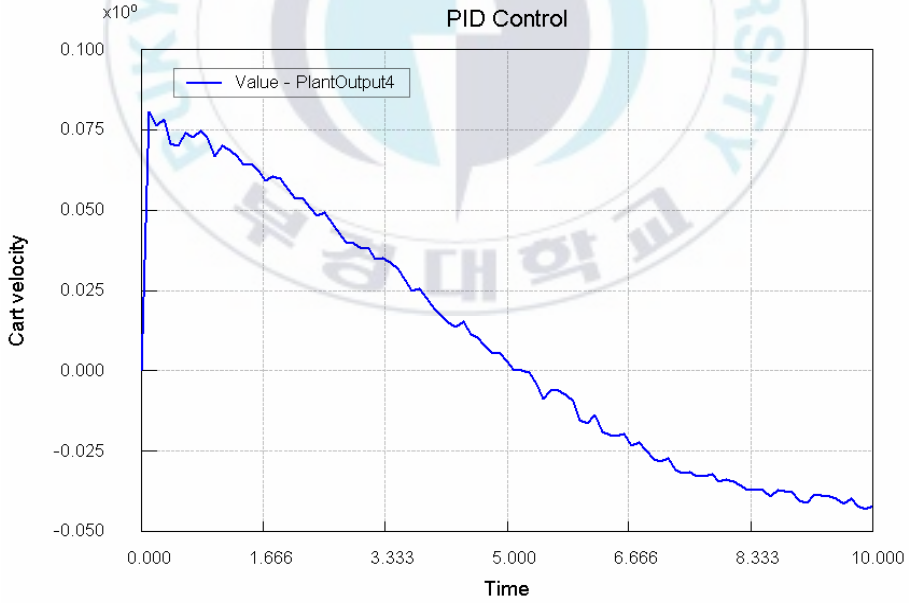

Fig. 5. 9 Cart velocity

Fig. 5. 6은 Pendulum의 각 변위를 나타내는 그래프로 Cart의 위치가 θ를 제어하는 동안 이동을 하게 되어 설정된 원래 위치로 다시 돌아가기 위해 감소하다가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 마찬가지로 Fig. 5. 8 역시 Cart의 위치가 원래 위치로 돌아가기 위해 증가했다가 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

5. 2. 2 2자유도 Two Wheel Robot

Fig. 5. 10과 5. 11은 PID Control의 블록선도와 PID Controller를 나타낸다. 'theta_d' 값을 통해 좌·우 방향을 선정할 수 있다.

Fig. 5. 12부터 5. 14까지는 좌측으로 이동가능 한 방향설정을 Fig. 5. 15에서 5. 17까지는 우측으로 이동가능 한 방향설정에 관련된 Co-Simulation 결과 그래프를 나타낸다.

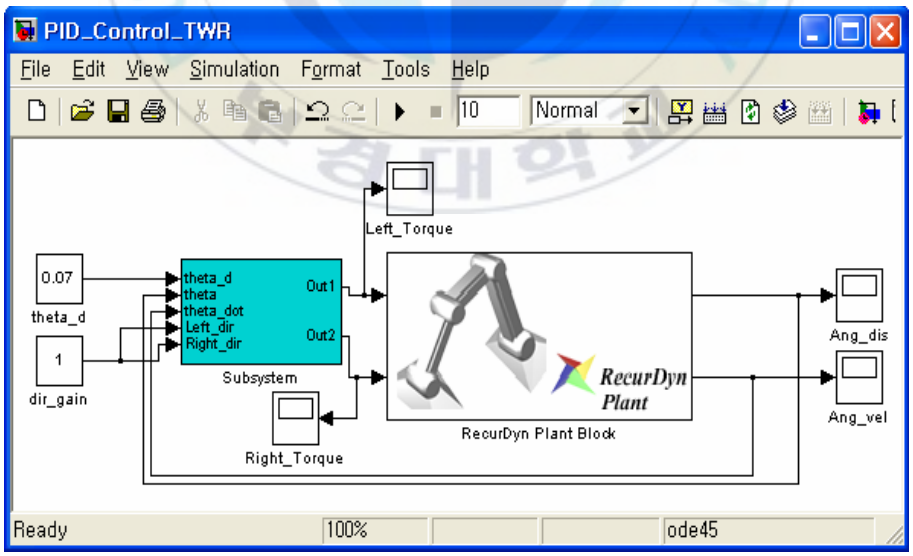

Fig. 5. 10 PID Control

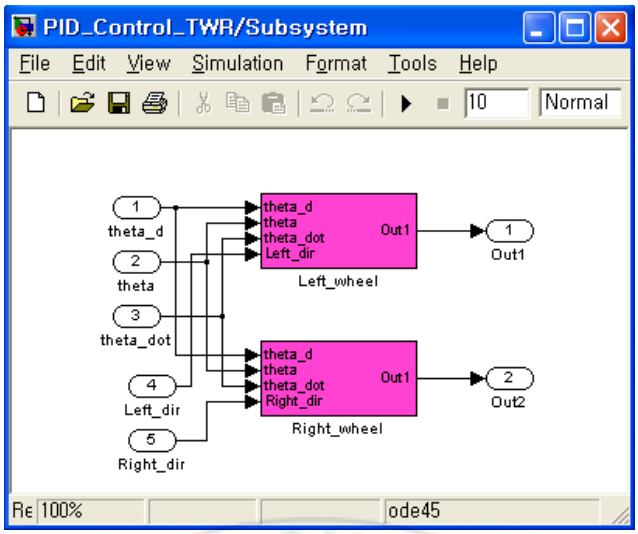

Fig. 5. 11 PID Controller

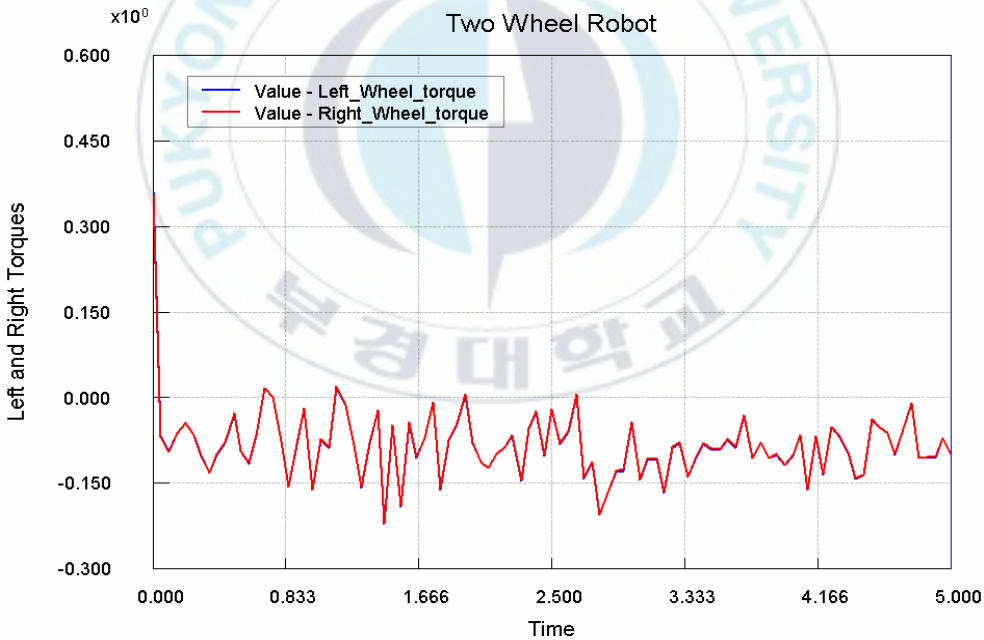

Fig. 5. 12 Left and Right Torques (Forward direction)

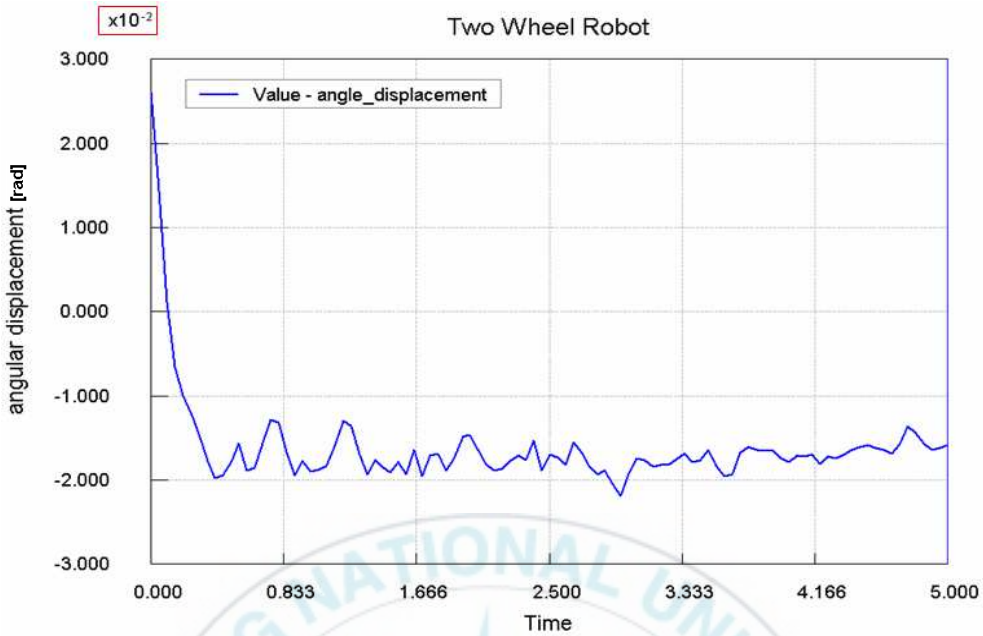

Fig. 5. 13 angular displacement (Forward direction)

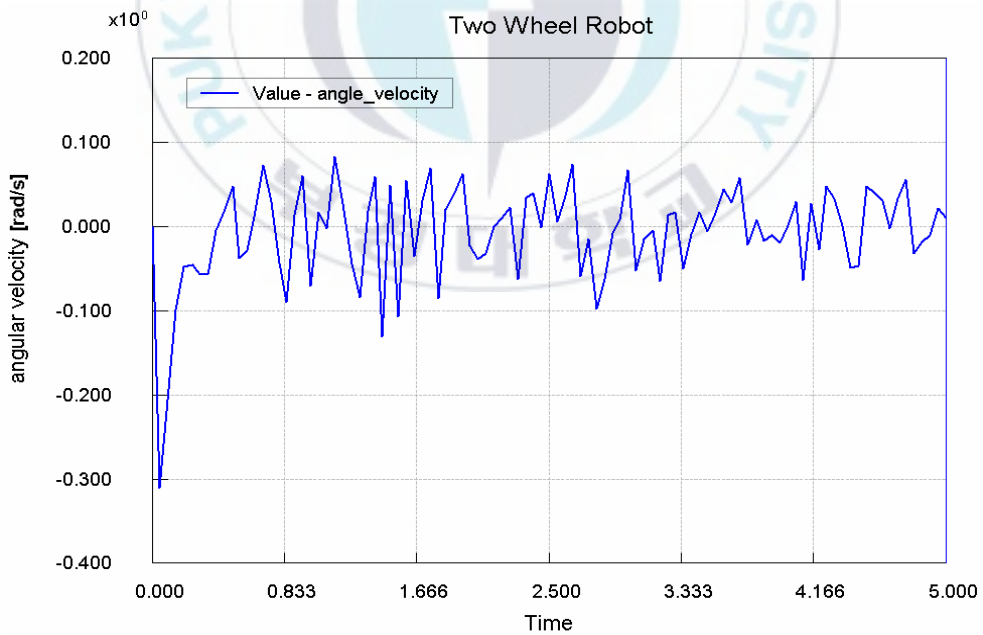

Fig. 5. 14 angular velocity (Forward direction)

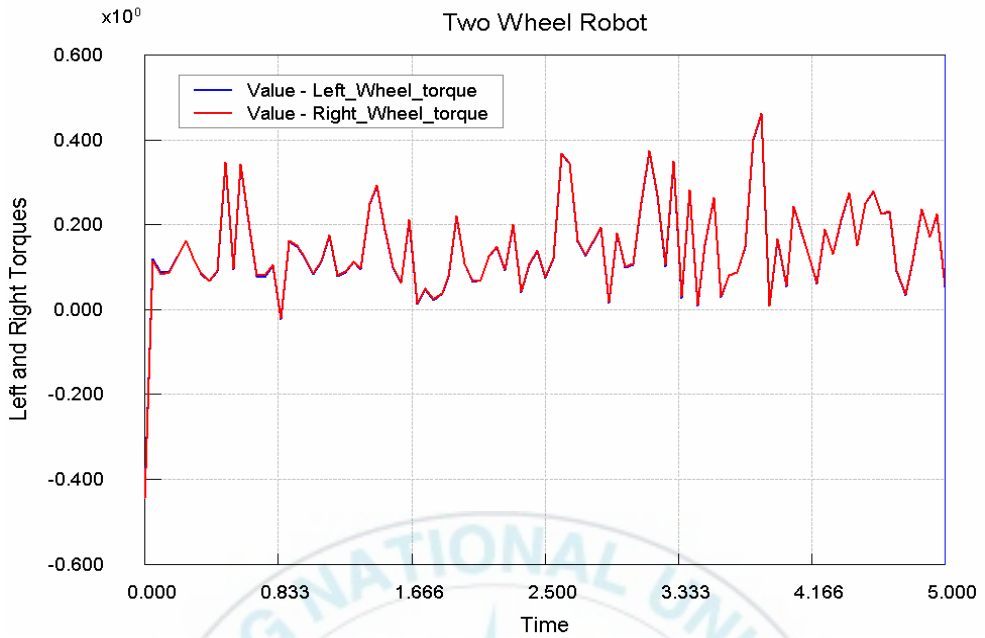

Fig. 5. 15 Left and Right Torque (Backward direction)

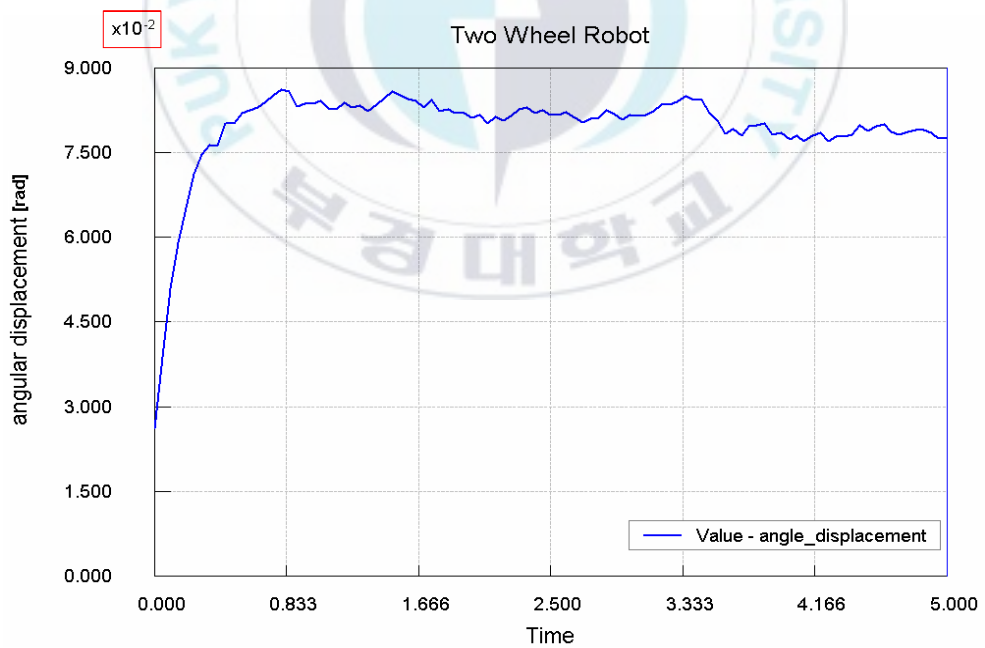

Fig. 5. 16 angular displacement (Backward direction)

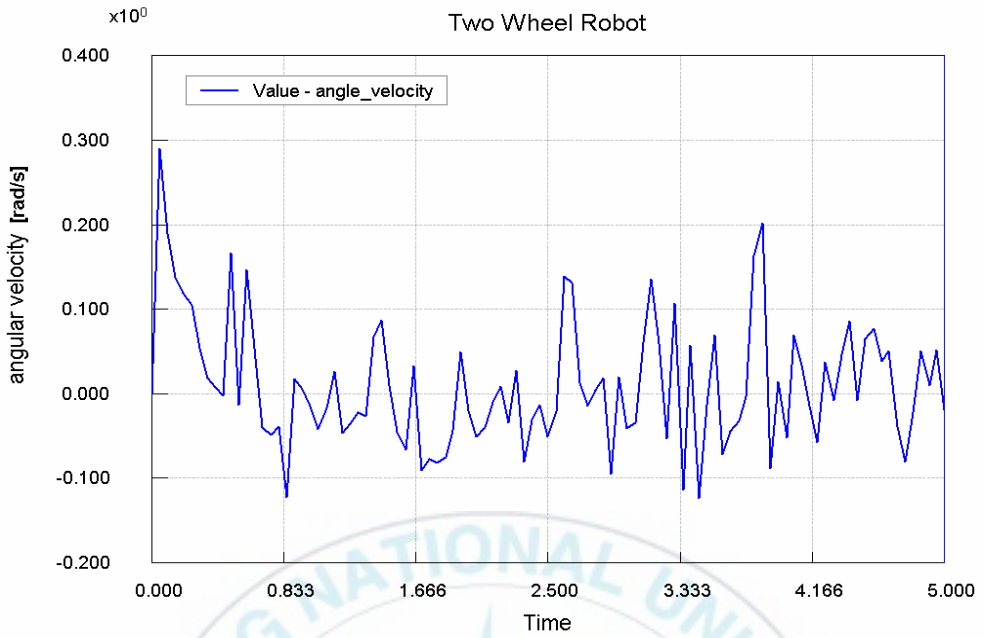

Fig. 5. 17 angular velocity(Backward direction)

우측으로의 방향 설정은 앞의 좌측으로의 방향 설정에 있어서 PID Controller의 'theta_d' 값의 부호 변경만으로 바꿀 수 있다.

Fig. 5. 18은 앞에서 살펴본 PID Controller의 'theta_d' 값과 'Left_dir' 과 'Right_dir' 입력 값의 변화에 따른 TWR의 방향전환이 가능한 블록선도를 나타내고 있다. 여기서 'Left_dir'과 'Right_dir'은 MATLAB M-File을 이용하여 설정한 시간동안 Wheel 에 가해지는 Torque 값의 방향을 바꿀 수 있도록 하였다. 앞에서 언급된 내용으로 TWR은 로봇에 부착된 초음파센서를 통해 장애물을 감지 할 수 있기 때문에 모바일(Mobile) 로봇으로써의 역할을 할 수 있다. 다시 말하면, 장애물을 피해가기위해 방향전환이 가능하다는 것이다. 2자유도의 방향전환 운동을 표현하기 위해 'MATLAB Function'를 이용하여 Co-Simulation을 하였다. Fig. 5. 19에서 5. 20은 결과 그래프를 나타낸다.

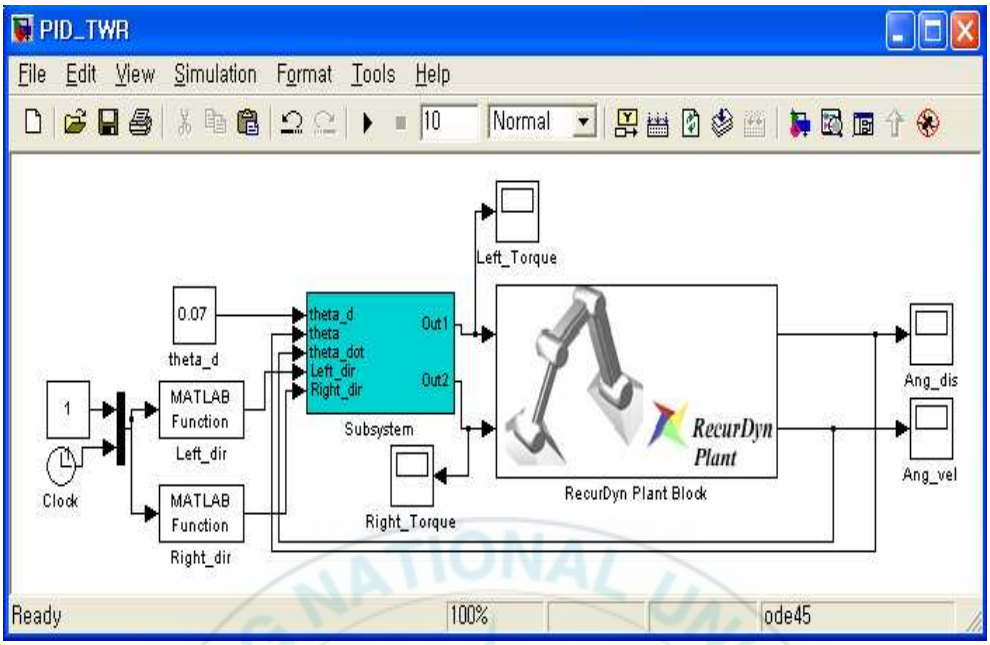

Fig. 5. 18 PID Control (changing direction)

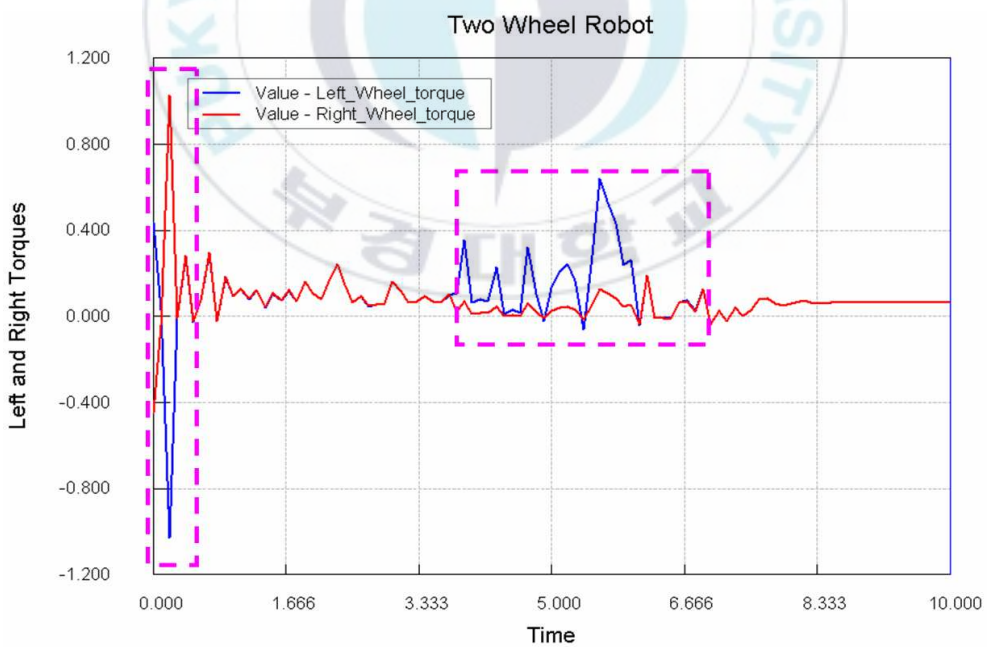

Fig. 5. 19 Left and Right Torques

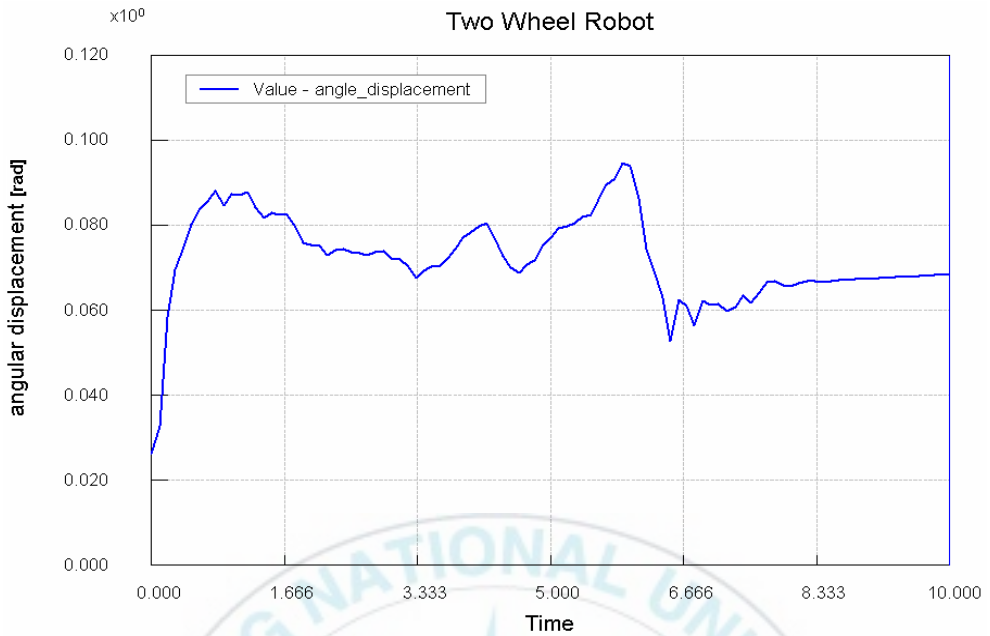

Fig. 5. 20 angular displacement (changing direction)

Fig. 5. 19는 점선으로 표시된 부분에서 방향전환이 일어나는 구간을 나타낸다. Co-Simulation의 입·출력 값을 설정할 때 각각의 Wheel은 같은 크기의 Torque를 입력받지만 한쪽 Wheel에는 음의 부호를 적용시켜 서로 반대방향으로 Torque 가 작용하여 TWR은 전진과 후진이 가능하다. 따라서 점선 구간에서처럼 각각의 Wheel에 서로 다른 부호의 Torque가 적용되면 TWR은 한쪽으로 회전운동을 하게 된다. 또는 같은 부호의 다른 크기의 Torque가 적용되어도 입력 Torque가 큰 쪽 Wheel이 빠르게 움직여 회전운동이 일어나게 된다. Fig. 5. 20은 방향전환이 일어나는 구간에서의 angular displacement를 나타내며 0.07(rad) 값을 목표로 제어되고 있음을 확인 할 수 있다.

제 6 장 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서 제시된 통합 개발 플랫폼에는 제어알고리듬과 Control Plant가 하나의 시스템으로 정해진 것이 아니라 여러 가지 알고리듬과 Control Plant를 적용시킬 수 있다. 이에 본장에서는 제4장과 5장에서 살펴본 Co-Simulation의 결과 data에 의한 제어성능에 대한 고찰과 이를 토대로 통합 개발 플랫폼을 통해 설계된 제어기의 성능을 검증하기 위해 실제 시스템인 1자유도 Inverted Pendulum System과 2자유도 Two Wheel Robot을 제작하여 실험 하였다. 실험은 Co-Simulation에서와 동일한 조건을 가지는 Control Plant를 구현하여 앞서 설계된 PID Control 알고리듬이 적용된 제어기를 이용하였다.

6. 1 시뮬레이션 결과

1자유도 Inverted Pendulum System과 2자유도 Two Wheel Robot의 Fuzzy Control과 PID Control을 이용한 제어기의 Co-Simulation결과는 각각에 설정된 목표치를 만족시키는 것을 결과 그래프를 통해 확인 하였다.

본 논문에서 선정한 두 Control Plant의 경우에서는 Fuzzy Control 알고리듬보다는 PID Control 알고리듬을 적용한 제어 결과가 뛰어난 제어성능을 나타내었다. 그러나 Control Plant가 다른 시스템으로 변경되거나 Fuzzy 나 PID Control 알고리듬이 아닌 다른 Control 알고리듬이 적용되면 제어성능의 결과는 달라 질 수 있다. 물론 본 논문에서도 Control Plant의 제어기 성능을 향

상시키기 위한다면 PID Control의 경우에선 보다 정확한 gain 값의 계산을 통해 실현 할 수 있으며 Fuzzy Control에서는 더욱 세분화된 멤버쉽함수를 통해서 실현 할 수 있다. 하지만 본 논문은 Fuzzy Control과 PID Control의 새로운 제어 알고리듬의 개발이 아닌 통합 개발 플랫폼을 이용한 제어기 설계와 그 제어기를 통한 Control Plant의 제어 성능 및 결과에 대한 연구임을 강조하고자 한다.

6. 2 1자유도 Inverted Pendulum System

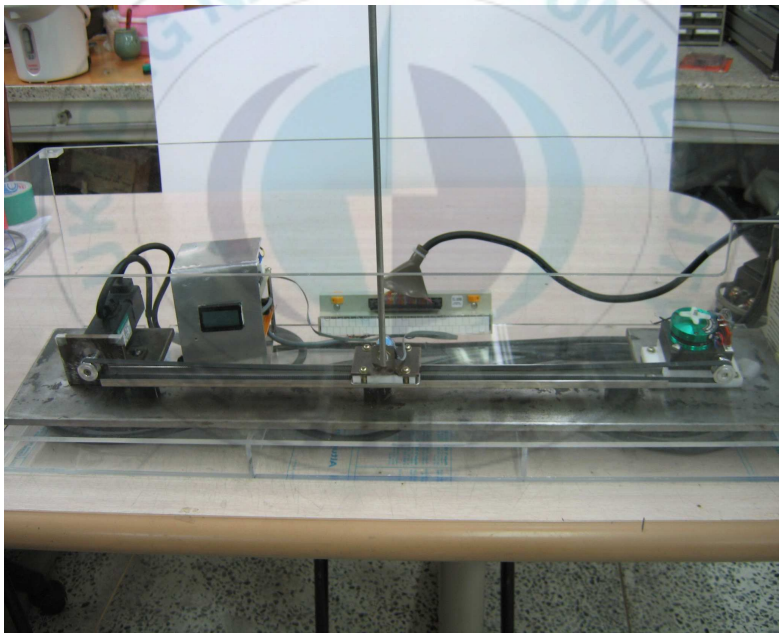

Fig. 6. 1 Real Inverted Pendulum System

Fig. 6. 1은 실제 제작한 IPS를 나타낸다. 실제 IPS의 구성은 Fig 6. 2에 나타내었다.

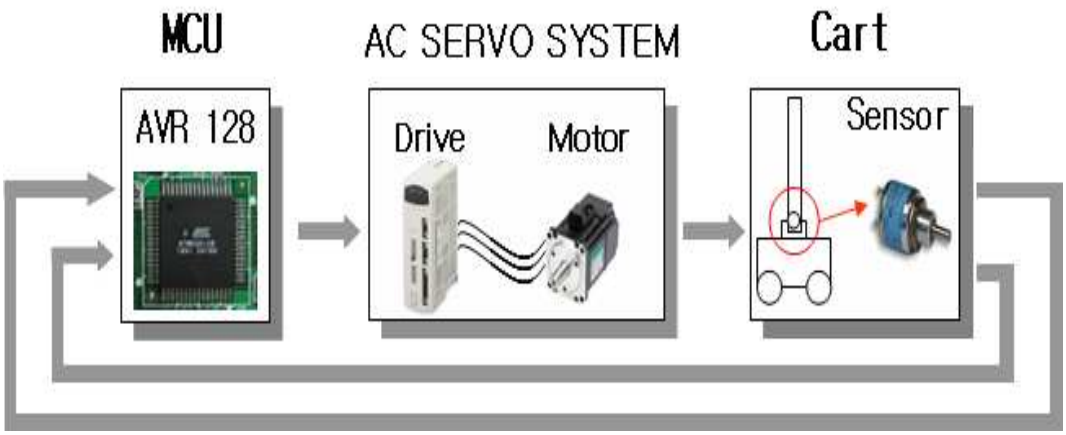

Fig. 6. 2 Configuration of Real IPS

Pendulum의 끝단에 부착된 Sensor의 Signal을 상위 제어기 ATmega 128 (microprocessor)을 이용하여 A/D Converting을 하였고 그 값은 AC SERVO SYSTEM 의 Drive에 입력되는 PWM (Pulse Width Modulation) Signal을 생성하는데 이용되어 진다. PWM Signal을 입력받은 AC Servo Drive는 AC Motor를 제어하게 되고 Motor와 연결된 벨트에 의해 Cart는 이동을 하면서 Pendulum의 자세를 제어하게 된다.

Fig. 6. 3, 6. 4는 실제 실험을 통해 얻은 data의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Sensor의 신호를 A/D Converting 시켜 측정한 값으로 시뮬레이션 시간 동안 '0'의 값으로 수렴하는 것을 확인 할 수 있다.

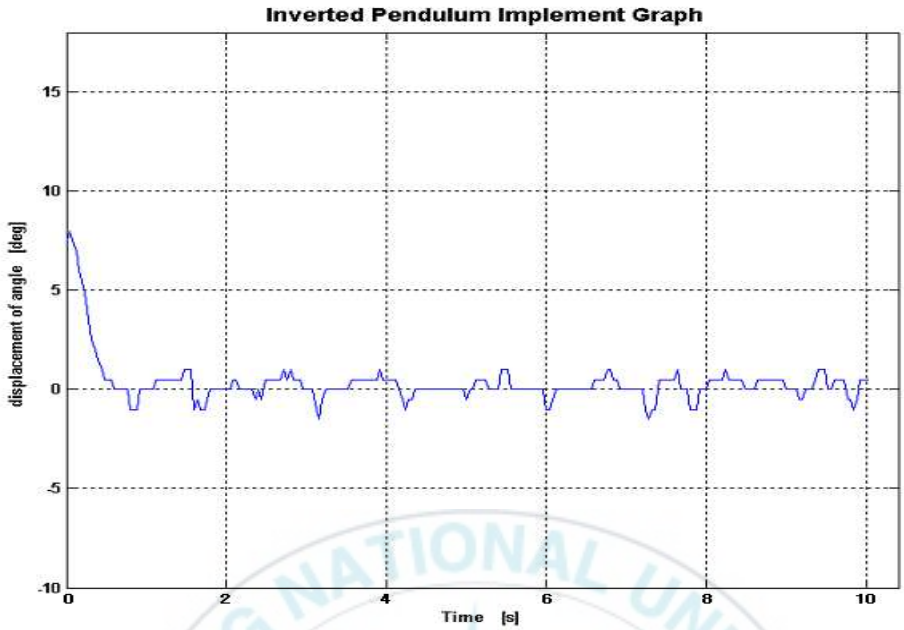

Fig. 6. 3 angular displacement

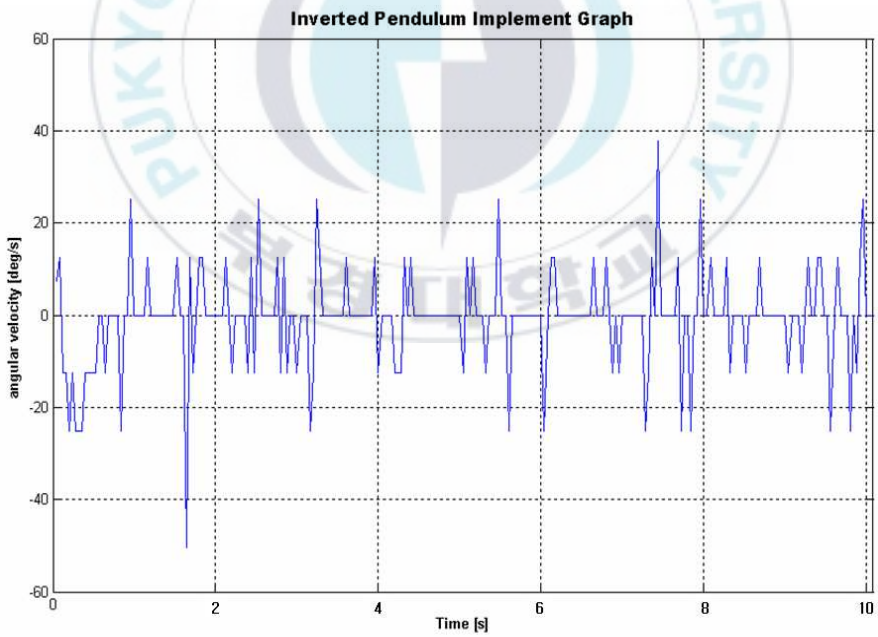

Fig. 6. 4 angular velocity

시뮬레이션 결과 그래프와 비교하면 실제 Inverted Pendulum System의 실험을 통한 결과 그래프가 정확하게 일치 하진 않지만 각 변위 결과 값이 ‘0’의 값으로 수렴하는 것은 실제 시스템의 제작을 하지 않고 시뮬레이션을 통한 결과만으로 제어성능을 확인 할 수 있음을 나타낸다.

6. 3 2자유도 Two Wheel Robot

Fig. 6. 5와 6. 6은 실제로 제작된 Two Wheel Robot과 Controller 및 Step Motor의 Drive를 나타낸다.

3장에서 언급한 소형 스쿠터 Segway와 유사한 구조로 제작하였으며 초음파 센서를 이용하여 장애물이 놓인 방향과 거리를 판별하여 충돌을 회피 할 수 있도록 방향전환을 할 수 있는 모바일 로봇으로의 역할을 할 수 있다.

실제 실험에서는 모바일 로봇으로써의 역할 이전에 Two Wheel Robot의 자세를 유지하는데 중점을 두었다. 제어 알고리듬은 통합 개발 플랫폼을 이용하여 설계한 PID 제어기를 이용하였다.

Fig. 6. 6에서 Controller의 각도는 'TILT SA1' 기울기 센서를 이용하여 계산하였다. 이 센서는 ±60˚의 측정 범위를 가지며 5V 전압에서 작동한다.

실험에서 기울기 센서에 의해 측정된 analog 값은 Controller에서 A/D Converting 과정 후에 전체 220이라는 범위로 계산되었다. 여기서 범위1은 0.545˚(120˚/220)의 값을 나타낸다. 이 값은 Step Motor를 구동하는데 필요한 signal을 계산하는데 이용되어진다.

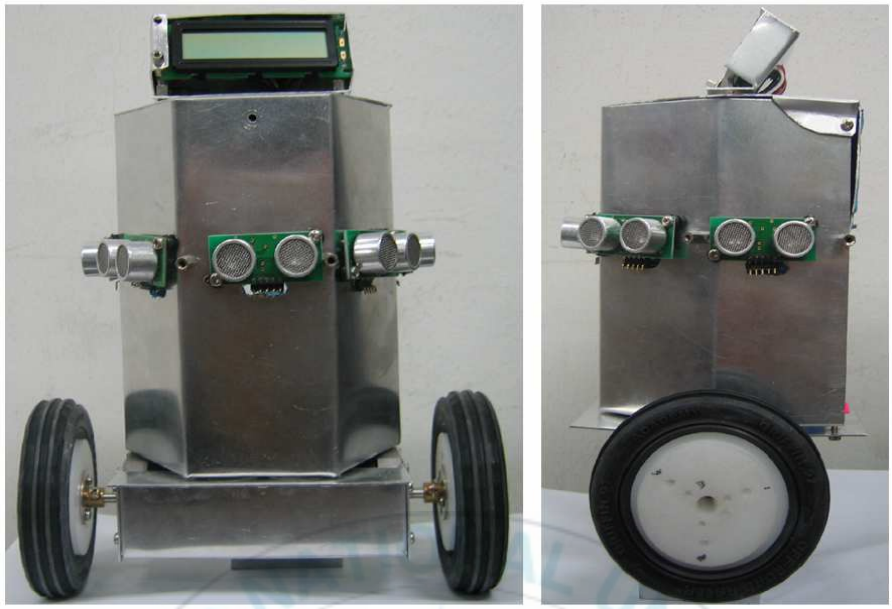

Fig. 6. 5 Real Two Wheel Robot

Fig. 6. 6 Two Wheel Robot's Controller and Step Motor Drive

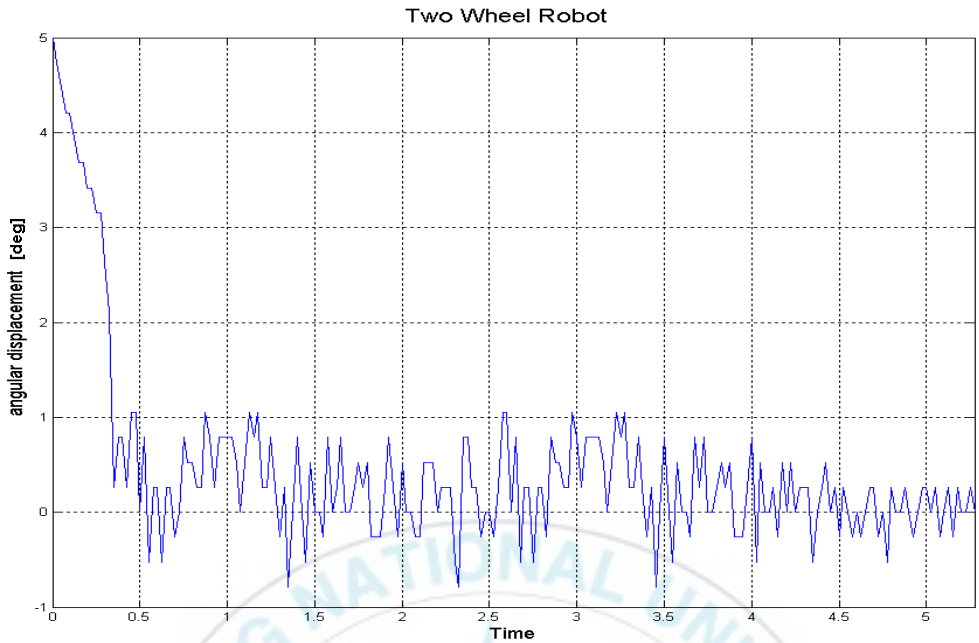

Fig. 6. 7 angular displacement

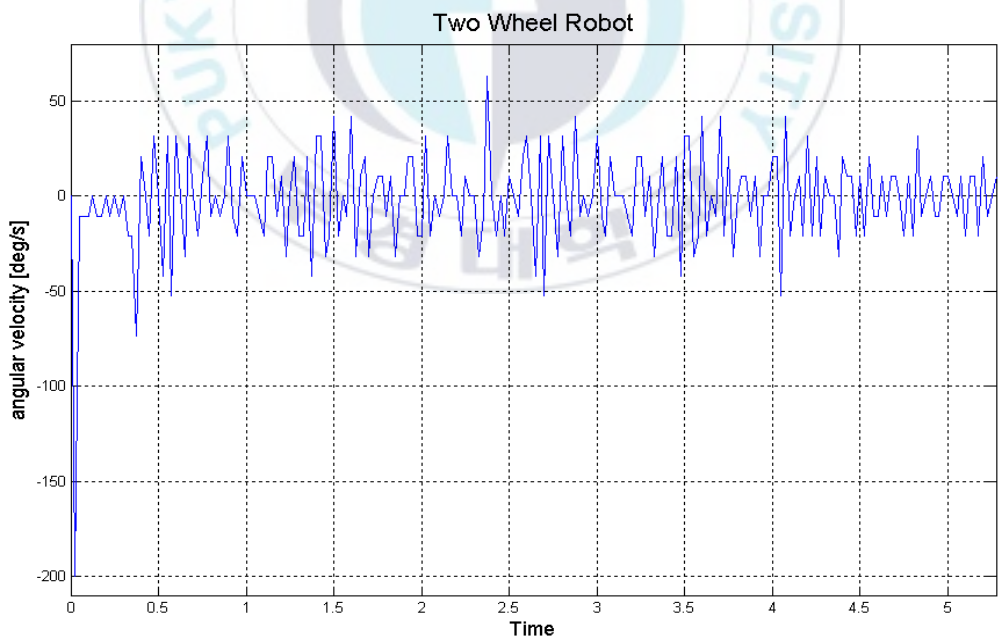

Fig. 6. 8 angular velocity

Fig. 6. 7과 6. 8은 Two Wheel Robot을 PID Control 알고리듬을 적용시킨 실험에 대한 angular displacement와 angular velocity로 A/D Converting된 값을 도(degree)로 환산하여 나타내었다. 시뮬레이션의 결과 그래프 Fig. 5. 13과 5. 14와 비교하게 되면 제어 응답 면에서 다소 차이가 나는데 이는 바퀴와 지면과의 Slip현상과 실제 Control Plant의 복잡한 형상의 무게중심 및 질량에 대한 오차로 설명할 수 있다. 하지만 결과 그래프에서도 확인 할 수 있듯이 시간에 따라 angular displacement는 '0'의 값으로 수렴하고 있음을 나타낸다. 이것은 앞의 1자유도 Inverted Pendulum System과 마찬가지로 실제 Control Plant를 설계하지 않고 본 논문에서 제시하는 통합 개발 플랫폼을 이용하여 설계된 제어기를 통해서 제어 성능을 검증할 수 있음을 말해 준다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

제 7 장 결 론

본 논문에서는 MATLAB SIMULINK와 다물체 동역학 해석 Tool 인 RecurDyn을 이용하여 빠르고 효율적으로 제어기를 설계 할 수 있는 통합 개발 플랫폼(Integrated Development Platform)을 연구하였다. 빠르고 정확한 계산을 요구하는 제어기의 설계는 MATLAB SIMULINK를 이용하였고 다물체 동적 특성의 정확한 계산을 위해 제어시스템의 Plant 모델링은 RecurDyn Tool을 이용하였다.

MATLAB SIMULINK와 RecurDyn Tool의 Co-Simulation 수행과정에서는 시뮬레이션 시간동안 입·출력 값이 반복적인 feedback을 통하여 Plant의 입력 값을 제어기에서 계산하고 Plant의 출력 값은 측정 과정 후에 제어기의 입력 값으로 사용하였다. 이런 반복과정을 통해서 Plant에 적용되는 제어기의 성능을 검증하였다.

제시된 통합개발 플랫폼을 통해서1자유도 Inverted Pendulum System과 1자유도 IPS를 응용한 2자유도 Two Wheel Robot의 각각의 제어기에 Fuzzy Control과 PID Control을 적용하여 제어 성능을 확인하였다.

하나의 알고리듬과 하나의 Control Plant의 제어기 설계가 아닌 다양한 제어 알고리듬과 Control Plant의 제어기를 빠르고 효율적으로 설계 할 수 있다는 것과 실제 실험에 의해서 출력된 결과 그래프를 통해서 실제 시스템을 제작하지 않고 Co-Simulation으로 제어성능을 검증 할 수 있다는 것을 본 논문에서 제시한 통합개발 플랫폼을 통해서 확인 할 수 있었다.

참고 문헌

[1] Chuen Chien Lee, IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, March/April, 1990, "Fuzzy logic in control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part 1".

[2] Chuen Chien Lee, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Vol. 20, No. 2, March/April, 1990, "Fuzzy logic in control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part 2".

[3] Jean-Francois Josserand and Laurent Foulloy, "Fuzzy Component Network for Intelligent Measurement and Control," IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS, Vol 4, No. 4, November 1996.

[4] Che Wei Ji, Fang Lei, Lei Kam Kin, "Fuzzy Logic Controller for An Inverted Pendulum System,"1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, October 28 - 31, Beijing, China.

[5] Mansoor Doostfatemeh and Stefan C. Kremer, "Developing a New Fuzzy Controller," NAFIPS 2005-2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society.

[6] Chaves, L.F., Spiller, P.A., Scolari, A. G., Conte, R. N., Pereira, L. F. A., "A matlab_simulink-based platform for real-time planning and execution of control techniques applied to mobile robots,"Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation July 29 August 1, 2001, Banff, Alberta, Canada.

[7] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller Part I," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 404-418, Mar./Apr. 1990.

[8] R. J. Stonier, N. Young, "Co-evolutionary learning and hierarchical fuzzy control for the inverted pendulum," Evolutionary Computation, 2003. CEC '03. The 2003 Congress on Volume 1,8-12 Dec. 2003 Page(s): 467 - 473 Vol.1

[9] Ronald R. Yager and Dimitar P. Filev, IEEE Transaction on Fuzzy Systems, Vol. 1, No. 1, February 1993, "SLIDE : A Simple Adaptive Defuzzification Method".

[10] C. W. Hong, G. J. Choi, D. S. Ahn," Integrated Development Platform for Design of Fuzzy Inference System using RecurDyn and SIMULINK," SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Oct. 18-21, 2006 in Bexco, Busan, Korea

[11] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun and E. Mizutani, "Neuro-Fuzzy and Soft-Computing", Prentice hall

[12] L. A. Zadeh, Fuzzy Algorithms, Information and Control, Vol. 12, 1968

[13] John J. Craig," Introduction to Robotics", Prentice hall

[14] F. O. Karray, C. D. Silva, "Soft Computing and Intelligent Systems Design", PEARSON

[15] 박종진,최규석, “퍼지 제어 시스템”, 교우사

[16] 김종식, “선형제어 시스템공학”, 청문각

[17] 정슬, “로봇 공학(MATLAB 및 SIMULINK 응용)”, 충남대학교

[15] http://www.functionbay.co.kr

감사의 글

남과 다른 뜻 깊은 대학생활을 해 보고자 시작한 연구실 생활이 어느덧 4년이 넘어 이젠 대학원 졸업을 하게 되었습니다. 아직 갈 길이 멀고 많이 남았지만 뒤돌아보면 많은 아쉬움과 후회 그리고 보람과 희망이 가득했던 시간이었습니다. 언제나 똑같은 굴레 속에서 식상하게만 느껴졌던 대학생활을 새로운 것에 대한 도전과 열정으로 바꿔주었던 소중했던 시간이 아닐 수 없습니다. 그 소중했던 추억을 함께 만들어 주셨던 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

부족함이 많은 저에게 때론 엄한 호통으로 때론 따뜻한 격려로 지식의 깨달음과 삶의 지침을 주셨던 안두성 지도 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 저에게 기계 공학도로써 걸어야 될 올바른 길과 한 사람으로써 살아가는데 필요한 정(情)을 가르쳐 주신 배효정 선배님, 대학원생으로써 갖추어야 될 자세를 일깨워준 부드러움 속에 냉철함을 지닌 규종형, 후배 사랑이 넘쳤던 재호형, 지금은 같이 없지만 학부생의 마음을 정말 잘 헤아려 줬던 성우형에게 감사의 마음을 전합니다.

연구실과 나의 인연을 만들어 준 그리고 서로를 너무 잘 알았던 동기 봉익, 재욱, 인생의 선배로써 성실함을 가르쳐 주셨던 태형형, 마범석 선배님, 후배에게 인기가 젤 많은 정수형, 웃음이 가득한 상욱형, 멋진 바람의 라이더 동기 지영에게도 감사의 마음을 전합니다.

생각이 많은 착한 후배 정훈이, 개그맨 보다 웃기는 귀여운 후배 웅태, 진한 우정으로 서로를 챙겨주는 후배 구일이, 성현이, 휘찬 에게 감사의 마

음을 전합니다.

지금까지 뒤에서 묵묵히 아들의 행복한 미래를 위해 언제나 사랑으로 버팀목이 되어 주셨던 부모님께 머리 숙여 감사의 말씀을 올립니다.

때로는 친구처럼 때로는 아버지처럼 항상 동생을 자랑스러워했던 형과 온화한 미소와 웃음으로 동생들 사랑이 가득한 큰 누나와 큰 자형, 누구보다 가족 사랑이 많아 눈물이 많은 작은 누나와 작은 자형에게 감사의 말씀과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 제게 웃음과 사랑과 행복과 믿음을 가져다준 세상에서 가장 사랑스러운 아내 경민이에게 고마움과 사랑의 마음을 전합니다.