

# พัฒนาชุดฝึกทักษะระบบบอลและคานร่วมกับวิชั่นเซ็นเซอร์

## DEVELOPMENT OF SKILL PACKAGE ON BALL AND BEAM SYSTEM WITH VISION SENSOR

วรวุฒิ กังหัน<sup>1</sup>, วสันต์ ลีละธนาฤกษ์<sup>2</sup>, พิพัฒน์ เลิศโกวิท<sup>3</sup>  
 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี<sup>1,2</sup>  
 สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี<sup>3</sup>

Worawut Kunghun<sup>1</sup>, Wasan Leelatanaroek<sup>2</sup>, Pipat Lertkowitz<sup>3</sup>  
 Department of Mechanical Engineering, Faculty Engineering, Thonburi University<sup>1,2</sup>  
 Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และมีความต้องการที่จะลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากจากการประกาศเข้าสู่ยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่เป็นนโยบายของภาครัฐบาลของประเทศไทย คือการนำระบบควบคุมอัตโนมัติเข้ามาใช้งานในอุตสาหกรรมในประเทศ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic control system) มาใช้ในการควบคุมการผลิต เพื่อที่จะทำให้ขบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด และให้ได้งานที่มีคุณภาพ ซึ่งรูปแบบการฝึกเสมือนจริงจึงถูกนำมาใช้เป็นรูปแบบการเรียนรู้ในงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย เพื่อให้ผู้ที่ฝึกได้มีความรู้ความเข้าใจในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อซ่อมบำรุงระบบดังกล่าว และยังสามารถลดข้อผิดพลาดด้านการปฏิบัติงาน โดยผู้วิจัยได้พัฒนาชุดฝึกขึ้นโดยการจำลองรูปแบบการควบคุมแบบเสมือนจริง ที่ใช้ตัวควบคุม (proportional integral derivative : PID) ร่วมกับระบบวิชั่นเซ็นเซอร์ เพื่อที่จะควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน ซึ่งการทดลองได้ตัวควบคุม PID ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมภายใต้สภาวะการทดลองนี้คือ Proportional Gain (P) เท่ากับ 3.7061 , Integral Gain (I) เท่ากับ 0.3352 และ Derivative Gain (D) เท่ากับ 0.0587 อย่างไรก็ตามตัวควบคุม PID ดังกล่าวยังต้องมีการศึกษาปัจจัยของระบบที่ส่งผลต่อการควบคุมระบบบอลและคานให้เกิดความเสถียรภาพอีกต่อไป

คำสำคัญ: การควบคุมแบบพีไอดี, การควบคุมแบบเชิงเส้น, วิชั่นเซ็นเซอร์

### Abstract

At present industrial production technology is rapidly developing which need to reduce costs and increase productivity. That trend has significant increased from the announcement of the industry 4.0. The policy of the government of Thailand which has been using automatic control systems in the manufacturing control to get highest production efficiency. The realistic training model has been used as a model for learning in industry in Thailand and to get students with effective knowledge which has been reduced operating error. The training packaged has been developed by simulating the virtual control model using the PID control with vision sensor system to control the position of the ball on the beam. The experiment

has been showed up the appropriate PID controller for control under this experimental condition: Proportional Gain (P) is 3.7061, Integral Gain (I) is 0.3352 and Derivative Gain (D) is 0.0587. However the PID control will be continued developed the systemic factors affecting the ball control system to get the more stabilization.

Keywords: PID controller, liner control systems, vision sensor

## 1. บทนำ

ระบบบอลและคาน (Ball and Beam System) นิยมใช้งานในรูปแบบห้องปฏิบัติการควบคุมอัตโนมัติเพื่อการศึกษาพฤติกรรมของระบบควบคุม เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสถียรภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติเข้าใจรูปแบบการควบคุมแบบคลาสสิก (Classical control) และระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ (modern control) ซึ่งระบบบอลและคานเป็นระบบแบบไดนามิกที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง [1] - [6] ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และมีความต้องการที่จะลดต้นทุนและเพิ่มผลผลิตขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการเข้าสู่ยุคอุตสาหกรรม 4.0 คือการนำระบบควบคุมอัตโนมัติเข้ามาใช้งานในอุตสาหกรรมในประเทศไทย ดังนั้นจึงได้มีการนำเอา ระบบควบคุมอัตโนมัติ มาใช้ในการควบคุมการผลิต เพื่อที่จะทำให้ขบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด และให้ได้งานที่มีคุณภาพ เป็นการประหยัดต้นทุนและค่าใช้จ่ายต่างๆ ซึ่ง ระบบควบคุมอัตโนมัติ จึงเข้ามามีส่วนสำคัญอย่างมากในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งนำมาใช้ควบคุมเครื่องจักร ซึ่งเรียกว่าระบบแมคคาทรอนิกส์ ในโรงงานอุตสาหกรรมได้นำระบบแมคคาทรอนิกส์เข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตกันอย่างแพร่หลายระบบแมคคาทรอนิกส์ เป็นการบูรณาการองค์ความรู้ด้าน วิศวกรรมหลายสาขา ประกอบด้วยวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และระบบควบคุม ทำให้เกิดมุมมองใหม่ทางด้านวิศวกรรมเกี่ยวกับระบบอัตโนมัติทางอุตสาหกรรม สามารถแก้ ปัญหาทางวิศวกรรมโดยวิธีการแบบพื้นฐาน ลดความซับซ้อนและเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจมากขึ้น ซึ่งระบบแมคคาทรอนิกส์ที่นำมาใช้มีหลายแบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตว่าจะใช้แมคคาทรอนิกส์ระบบใด เช่นระบบแมคคาทรอนิกส์หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ระบบแมคคาทรอนิกส์คัดแยกชิ้นงาน ระบบแมคคาทรอนิกส์ตรวจสอบชิ้นงาน ระบบแมคคาทรอนิกส์ประกอบชิ้นงาน เป็นต้น ระบบแมคคาทรอนิกส์มีระบบการทำงานที่แม่นยำ มีประสิทธิภาพสูงในอุตสาหกรรม ซึ่งรูปแบบการฝึกเสมือนจริงจึงถูกนำมาใช้เป็นรูปแบบการเรียนรู้ในโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย เพื่อให้ผู้ที่ฝึกได้มีความรู้ความเข้าใจในในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สามารถลดข้อผิดพลาดด้านการปฏิบัติงานได้

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาชุดฝึกทักษะระบบบอลและคานร่วมกับระบบวิชั่นเซ็นเซอร์ โดยมีการเลือกตัวควบคุมแบบ (proportional integral derivative : PID) สำหรับเป็นตัวควบคุม ซึ่งมีการศึกษาหาค่าตัวแปรควบคุม PID [7] ที่เหมาะสมในระบบควบคุมบอลและคานให้ระบบความเสถียรภาพ ร่วมกับการใช้การป้อนกลับโดยใช้เทคนิคการประมวลผลทางภาพ และอีกยั้งซึ่งเป็นการจำลองในการควบคุมระบบควบคุมอัตโนมัติในสถานการณ์เสมือนจริง ที่เกิดปัญหาในด้านการควบคุมในงานอุตสาหกรรมคือ การควบคุมให้ระบบอัตโนมัติมีความเสถียรภาพ การปรับตั้งตัวแปรควบคุมในระบบควบคุมอัตโนมัติให้ระบบความเสถียรภาพ โดยเลือกใช้งานกับกลุ่มนักศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี ในรายวิชาการควบคุมอัตโนมัติ และ รายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2

## 2. ขั้นตอนในการวิจัย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นายมนัส หมิดหวัง [7] ได้ออกแบบการควบคุมลูกบอลบนคานแบบฟิชชีสไลด์ดิ่ง ระบบควบคุมลูกบอลบนคานแบบฟิชชีสไลด์ดิ่งโหมตนั้นจะประกอบด้วยลูกบอลโลหะทรงกลมอยู่บนคาน ซึ่งคานด้านหนึ่งเชื่อมต่อกับมอเตอร์โดยมี เซอร์โวมอเตอร์เป็นต้นกำลังสำหรับการควบคุมองศาการเอียงของคาน โดยที่มอเตอร์จะเชื่อมต่อกับกับเพลาของมอเตอร์และจะมี เซนเซอร์อินฟราเรด วัดระยะทาง ซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดมุมของคาน โดยเป็นส่วนหนึ่งของวงจรวัดมุมของคาน ในส่วนของคานมี เซนเซอร์วัดระยะทาง ในการตรวจวัดตำแหน่งของลูกบอล การควบคุมจะใช้ตัวควบคุมแบบฟิชชีสไลด์ดิ่งโหมต ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคาน แบบฟิชชีสไลด์ดิ่ง [7]

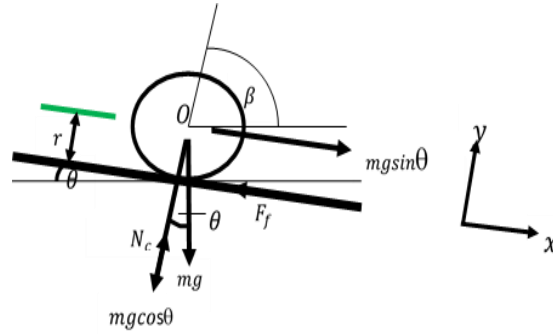
บริษัท Quanser [8] ได้ออกแบบผลิตภัณฑ์ในชื่อ “Ball and Beam Module” ดังรูปที่ 2 ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานนี้ประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งในการวัดตำแหน่งลูกบอลบนคาน และเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีเกียร์ทด ระบบถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบ PID หรือการควบคุม State – Space controller



รูปที่ 2 ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานของบริษัท Quanser [8]

## 2.2 Automatic control system of ball and beam system Mathematical modeling

ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลูกบอล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปแบบของ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) โดยส่วนแรกเป็นการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อช่วยในการจำลองเพื่อหาค่า ตัวควบคุมได้ง่ายโดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3 แผนภาพส่วนอิสระ (Free-body diagram) ของลูกบอลและคาน

การหาสมการทางคณิตศาสตร์ของ บอลและคานได้ใช้วิธีของนิวตันในการหาสมการการเคลื่อนที่ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 1

$$\sum F_x = ma_x = m\ddot{X} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 มาทำการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของบอลและคานที่เป็นฟังก์ชันของเวลา t-domain หลังจากนั้นนำมาเปลี่ยนเป็นฟังก์ชันของ s-domain โดยใช้วิธีการแปลง Laplace Transformation แล้วจัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันของ s-domain จะได้ดังสมการที่ 2

$$\frac{X(s)}{\theta_m(s)} = \frac{mgr}{\left(\frac{J_{ball}}{r} + mr\right)s^2} \quad (2)$$

ซึ่ง  $X(s)$  คือคือ ระยะทางที่ลูกบอลเคลื่อนที่บนคาน (m),  $\theta_m(s)$  คือมุมของคานที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ (rad),  $m$  คือ มวลของลูกบอล (kg),  $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ ),  $r$  คือ รัศมีของลูกบอล (m) และ  $J_{ball}$  คือโมเมนต์เฉื่อยของลูกบอล ( $kg \cdot m^2$ )

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรงได้จากข้อมูลอ้างอิง คือ

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3)$$

เมื่อ  $K$  คือ ค่าเกนของระบบ (System gain) มีค่าเท่ากับ 0.8 (ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ)

$\tau$  คือ ค่าเวลาคงตัวของระบบ (Time constant) มีค่าเท่ากับ 0.24 (ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ)

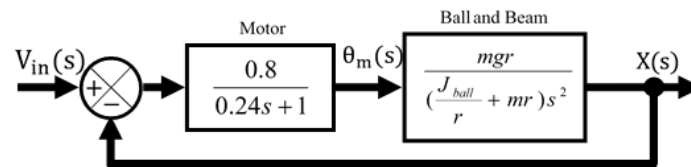
จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์กระแสตรง คือ

$$\frac{\theta_m(s)}{V_{in}(s)} = \frac{0.8}{0.24s + 1} \quad (4)$$

ตารางที่ 1 ตารางพารามิเตอร์สมการทางคณิตศาสตร์ของบอลและคาน

พารามิเตอร์	ตัวแปร	หน่วย	ค่าที่วัดได้
มวลของลูกบอล	$m$	$kg$	0.0024
รัศมีของลูกบอล	$r$	$m$	0.002
มวลของคาน	$M_{beam}$	$kg$	0.5
ความยาวของคาน	$L_{beam}$	$m$	0.8
ความต้านทานของอาร์เมเจอร์	$R_a$	$\Omega$	1.8
ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์	$K_T$	$N \cdot m / A$	0.0833
ค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ	$K_e$	$V / kRPM$	8.7
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	$g$	$m / s^2$	9.8
โมเมนต์เฉื่อยของคาน	$J_{beam}$	$kg \times m^2$	$3.735 \times 10^{-3}$
โมเมนต์เฉื่อยของลูกบอล	$J_{ball}$	$kg \times m^2$	$3.840 \times 10^{-9}$

เมื่ออินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ส่งให้เซอร์โวมอเตอร์ และได้มุมของแกนเพลลาเป็นเอาต์พุต ในขณะที่เดียวกันมุมของแกนเพลลาเป็นอินพุตที่ทำให้ได้ตำแหน่งของลูกบอลเป็นเอาต์พุต และมีตำแหน่งของลูกบอลเป็นสัญญาณป้อนกลับให้ระบบ จากสมการที่ (2) และ (4) สามารถนำมาเขียนรวมกันอยู่ในรูปบล็อกไดอะแกรมแบบลูปปิดได้ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Block diagram of Ball and beam Machine Automatic Training Set (Plant)

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน แบบลูปปิดสามารถเขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ที่อยู่ในรูปอินพุต  $V_m(s)$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปยังมอเตอร์ เอาต์พุตคือ  $X(s)$  ตำแหน่งของลูกบอลที่อยู่คาน และ  $\theta_m(s)$  คือ มุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ แสดงดังสมการที่ 6

$$\frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} \cdot \frac{X(s)}{\theta_m(s)} = \frac{0.8mgr}{(0.24s+1)\left(\frac{J_{ball}}{r}s^2 + mrs^2\right)} \quad (5)$$

$$\frac{X(s)}{V_m(s)} = \frac{0.8mgr}{0.24J_B s^3 + J_B s^2} \quad (6)$$

เมื่อ

$$J_B = \frac{J_{ball}}{r} + mr$$

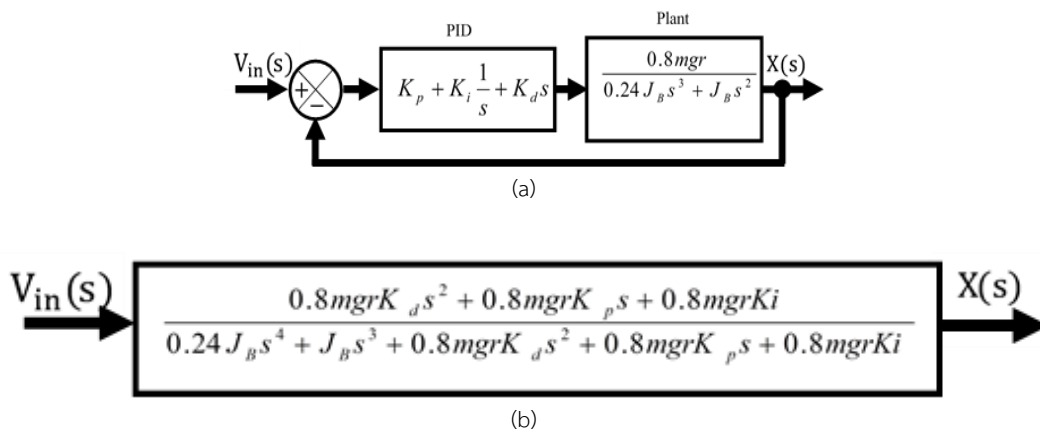
### 2.3 การออกตัวควบคุม PID และสมการการเคลื่อนที่ของระบบบอลและคาน

การควบคุมแบบฟีดแบ็คเป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมในระบบวงปิดหรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop control systems, Feedback control systems) ที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่า ที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ โดยการควบคุมแบบ PID จะประกอบไปด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญด้วยกันคือ

การกระทำแบบสัดส่วน (Proportional action)  $K_p$  เป็นการกำหนดการทำงานของเอาต์พุตให้เป็นสัดส่วนกับค่าความคลาดเคลื่อน (Error) หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่  $K_p$  หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน

การกระทำแบบปริพันธ์ (Integral action)  $K_i$  เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ค่า Offset สะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้าความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์

การกระทำแบบอนุพันธ์ (Derivative action)  $K_d$  เป็นสัดส่วนโดยตรงต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนกรณีที่ค่าเป้าหมายมีค่าคงที่ กล่าวคือ ตรวจจับที่สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การกระทำแบบ Derivative จะไม่มีผล อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆเวลา คูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์  $K_d$  ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ขึ้นกับอัตราขยายอนุพันธ์  $K_d$  จากการสร้างชุดทดลองของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานโดยทางคณะผู้จัดทำได้เก็บค่าพารามิเตอร์ในส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ โดยนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมและใช้อ้างอิงในการจูนค่า PID ระบบจริง แสดงดังรูปที่ 5



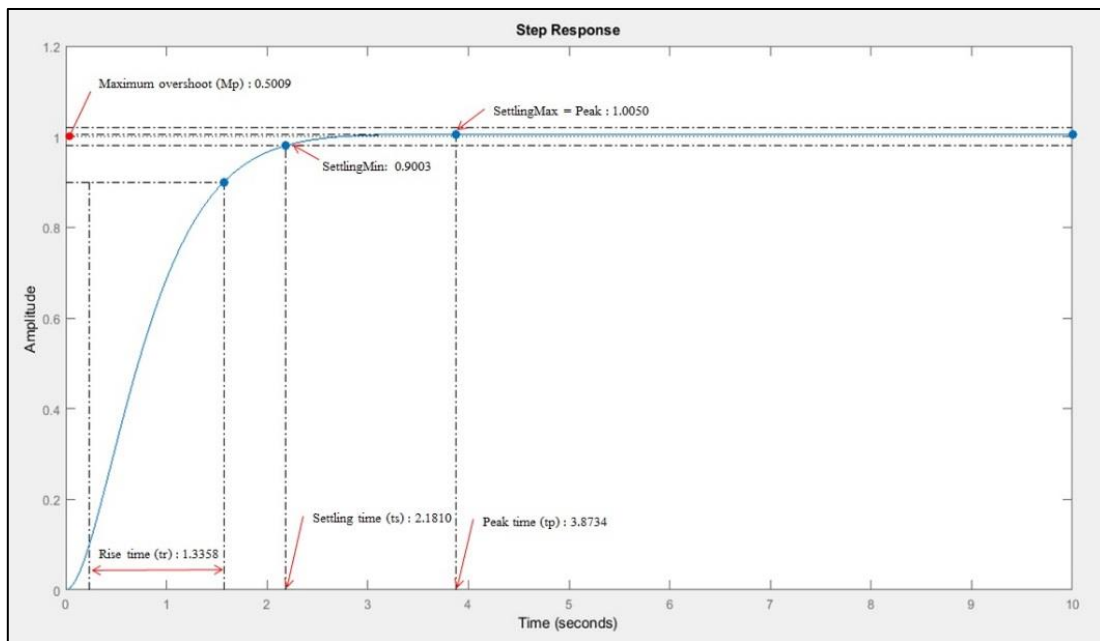
รูปที่ 5 (a) บล็อกไดอะแกรมการควบคุมด้วย PID ของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

(b) บล็อกไดอะแกรมฟังก์ชันถ่ายโอนควบคุมด้วย PID ของระบบ

จากรูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมด้วย PID ของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานแบบลูปปิดสามารถ เขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ที่อยู่ในรูปอินพุต  $V_m(s)$  คือแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปยังมอเตอร์ เอาต์พุตคือ  $X(s)$  ตำแหน่งของลูกบอลที่อยู่คาน ดังสมการที่ 7

$$\frac{X(s)}{V_{in}(s)} = \frac{0.8mgrK_d s^2 + 0.8mgrK_p s + 0.8mgrK_i}{0.24J_B s^4 + J_B s^3 + 0.8mgrK_d s^2 + 0.8mgrK_p s + 0.8mgrK_i} \quad (7)$$

จากนั้นจึงนำสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ 7 ไปทำการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ได้ค่าที่เหมาะสมซึ่งค่าที่ได้จากการจูนคือ ค่า  $K_p = 0.001185$  ,  $K_i = 0.000015$  และ  $K_d = 0.215$  เพื่อปรับจูน PID อ้างอิงเพื่อนำไปอ้างอิงสำหรับการปรับจูนหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมบนระบบจริงที่คณะผู้วิจัยได้สร้างขึ้น



รูปที่ 6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลตอบสนองชั่วขณะของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) และปรับจูนการควบคุมแบบ PID จะเห็นได้ว่า ระบบจะเข้าสู่เวลาสู่สมดุล (Settling time) ที่เวลาประมาณ 2.1810 วินาที เวลาที่ระบบควบคุมมีการตอบสนองสูงสุด (Peak time) ที่ 3.8734 วินาที และผลตอบสนองสูงสุด (Maximum overshoot) ที่ 0.5009 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ามีการเกิด Over shoot น้อยมาก โดยที่กำหนด Set point = 1 แต่ระบบมีค่า SettlingMax time = 1.0050 และระบบอยู่นิ่งจุดนี้ จึงมีค่า Actual เป็น 0.005 เท่าของ Set point ซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ คือ  $\pm 2\%$

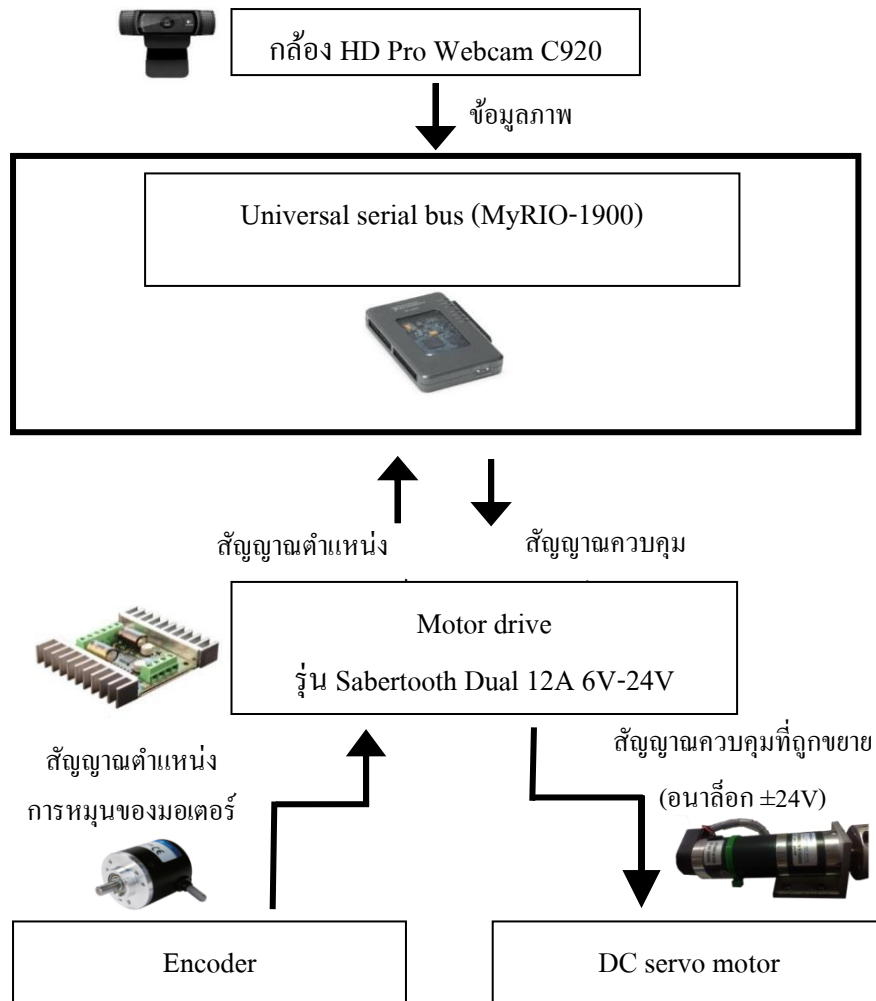
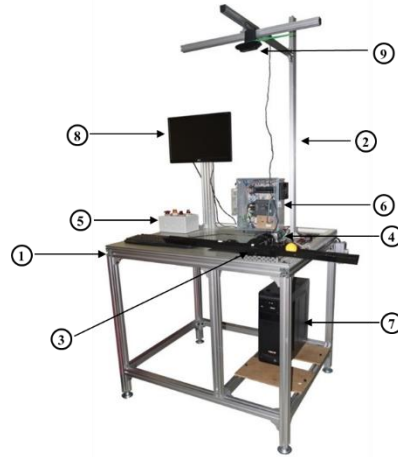
### 3. ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน จะทำการทดลองโดยสั่งการทำงานของอุปกรณ์ให้รักษาตำแหน่งของลูกบอลที่กำหนดไว้โดยสั่งการทำงานจากโปรแกรม LabVIEW ขั้นตอนในการสั่งงานจากโปรแกรม LabVIEW ที่ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ NI myRIO-1900 board ที่เป็นลิขสิทธิ์อยู่บนระบบดังกล่าว เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์มีรายละเอียดดังนี้

### 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลอง

เมื่อออกแบบอุปกรณ์ที่จะต้องใช้ในการสร้างชุดทดลองการควบคุมลูกบอลและคานร่วมกับวิชชั่นเซ็นเซอร์ด้วยโปรแกรม Solid work เสร็จแล้ว จึงเริ่มมีการสร้างและประกอบอุปกรณ์ โดยมีอุปกรณ์ทั้งหมด 9 ชิ้นส่วนหลักที่สำคัญต่อการควบคุมระบบโดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) โต๊ะทดลอง
- 2) ขาตั้งกล้อง
- 3) คานสำหรับเลี้ยงลูกบอล
- 4) เซอร์โวมอเตอร์ และเอ็นโค้ดเดอร์
- 5) สวิตช์ควบคุมระบบ
- 6) ตู้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ควบคุมระบบ
- 7) คอมพิวเตอร์
- 8) จอแสดงผล
- 9) กล้องดิจิทัลวิดีโอ



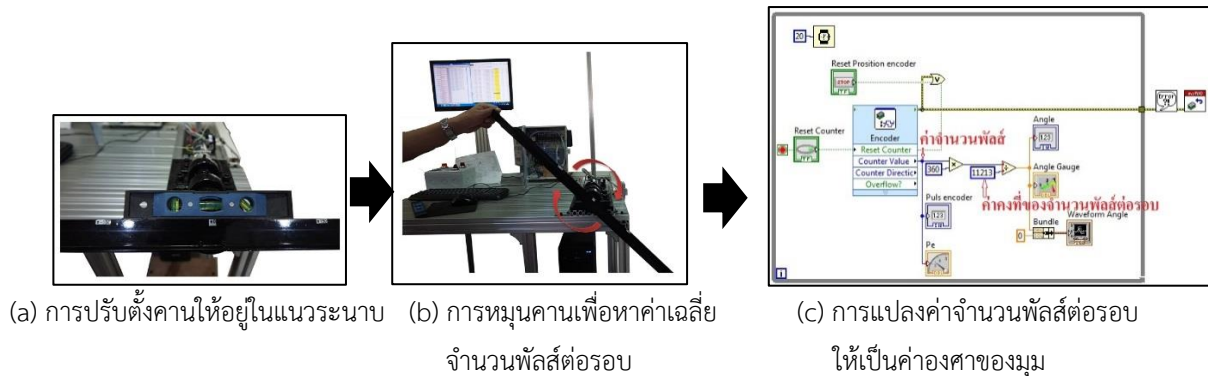
รูปที่ 7 โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ และระบบควบคุม ของชุดทดลองระบบจริงของ ระบบบอลและคาน



### 3.2 ขั้นตอนตั้งค้าระบบ และทดลองของระบบจริงของ ระบบบอลและคาน

#### 3.2.1 การตั้งค้าค่าของคานในโปรแกรม LabVIEW ก่อนการเริ่มการทดลอง

อุปกรณ์เซ็นโค้ดเดออร์จะอ่านค่า เป็นสัญญาณดิจิทัล NO-OFF ซึ่ง Pulse rate คือจำนวนพัลส์ต่อรอบที่ NI myRIO-1900 board อ่านค่ามาได้ สามารถแปลงค่าให้เป็นมุมมองศาของคานที่ขนานแนวระดับทำได้โดย 3 ขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 8 การตั้งค้าค่าของคานในโปรแกรม LabVIEW ก่อนการเริ่มการทดลอง

ในการแปลงค่าจำนวนพัลส์ต่อรอบให้เป็นค่าองศาของมุมทำได้โดยนำค่า จำนวนพัลส์ คูณด้วย 360 แล้ว ทหารด้วย 11,213 พัลส์ต่อรอบ ซึ่งเขียนเป็นสมการที่ 7

$$Angle = \frac{(Pu)(360)}{Pur} \quad (7)$$

เมื่อ *Angle* คือ มุมองศาของแกนเพลลา ( องศา)

*Pu* คือ จำนวนพัลส์ที่ NI myRIO-1900 board อ่านค่ามาได้ ( พัลส์)

*Pur* คือ จำนวนพัลส์ต่อรอบที่ NI myRIO-1900 board อ่านค่ามาได้ (พัลส์ต่อรอบ)

ตัวอย่าง เช่น ถ้า NI myRIO-1900 board อ่านค่ามาได้ 64 พัลส์แทนค่าในสมการที่ 7 จะได้มุมแกนเพลลาเท่ากับ

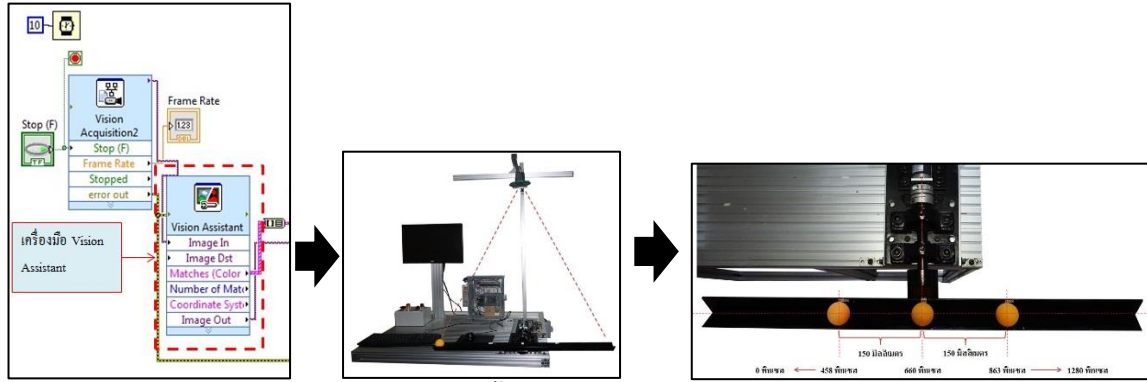
$$Angle = \frac{(64)(360)}{11,213}$$

$$Angle = 2.0547^\circ$$

ดังนั้น จะได้มุมแกนเพลลาที่ 2.0547 องศา จากนั้นนำค่าไปตั้งค่าในโปรแกรม LabVIEW ดังรูปที่ 8 (c)

#### 3.2.2 การตั้งค้าการหาตำแหน่งของลูกบอลด้วยกล้อง Webcam-C920 ในโปรแกรม LabVIEW

ในการแปลงภาพสีให้เป็นภาพไบนารีเพื่อหาตำแหน่งของลูกบอล ค่าตำแหน่งของลูกบอลหรือ ค่า mid x คือตำแหน่งของลูกบอลที่หาได้จากการประมวลผลภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลคือโอเป็นตัวรับภาพและภาพที่ได้เป็นภาพ RGB โดยปกติที่มีขนาด 1280x720 พิกเซล จากนั้นทำการแปลงภาพข้อมูลของค่าสีที่ได้ให้มีความเป็น 0 - 255 เพื่อใช้วิเคราะห์ภาพต่อไป ในส่วนของโปรแกรม LabVIEW สามารถกำหนดให้จดจำค่าสีและจดจำรูปร่างของวัตถุ โดยใช้เครื่องมือ Vision Assistant



(a) แสดงเครื่องมือ Vision Assistant ในโปรแกรม LabVIEW (b) การปรับตั้งระยะของกล้อง (c) แสดงตำแหน่ง พิกเซลในแนวแกน X ของลูกบอล กับระยะห่าง 150 มิลลิเมตร

รูปที่ 9 การตั้งค่ามุมของคานในโปรแกรม LabVIEW ก่อนการเริ่มการทดลอง

ในการแปลงค่าพิกเซลในแนวแกน X ให้เป็นระยะทางในหน่วยมิลลิเมตร จากรูปที่ 3.39 ได้ค่าตำแหน่งของลูกบอลที่ -150 มิลลิเมตรบนคาน เท่ากับ 485 พิกเซลในแนวแกน X และตำแหน่งของลูกบอลที่ 150 มิลลิเมตรบนคาน เท่ากับ 863 พิกเซลในแนวแกน X ที่มุมแกนเพล่า 0 องศา ซึ่งค่าพิกเซลในแนวแกน X นั้น นับจาก 0 ถึง 1,280 พิกเซล จากด้านซ้ายไปทาง ด้านขวา ส่วนระยะทาง เริ่มนับ 0 มิลลิเมตรที่ตำแหน่ง 660 พิกเซลในแนวแกน X จะได้ว่า ที่ระยะความยาวจาก 0 มิลลิเมตร ถึง 150 มิลลิเมตร มีพิกเซลในแนวแกน X เท่ากับ 863 - 660 พิกเซล คือ 203 พิกเซล และระยะความยาวจาก 0 มิลลิเมตรถึง -150 มิลลิเมตร มีพิกเซลในแนวแกน X เท่ากับ 660 - 458 พิกเซล คือ 202 พิกเซล ในที่นี้ ที่ระยะความยาวเท่ากันแต่ได้ พิกเซลในแนวแกน X ไม่เท่ากัน จึงหาค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $\frac{203 + 202}{2} = 202.5$  พิกเซล นั้นหมายความว่าหากระยะห่างของ ภาพที่ 202.5 พิกเซลจะมีระยะห่างบนคานเท่ากับ 150 มิลลิเมตร จึงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{ball0^\circ} = \frac{(P_i - 660)(150)}{202.5} \quad (8)$$

เมื่อ  $P_{ball0^\circ}$  คือ ตำแหน่งลูกบอลบนคานที่มุม 0 องศา (mm.)

$P_i$  คือ ค่าพิกเซลในแนวแกน X ที่อ่านได้ (พิกเซล)

ตัวอย่างเช่น ถ้ากล้องจับตำแหน่งของลูกบอลได้ที่ 700 พิกเซลในแนวแกน X แทนค่าสมการที่ 8 จะได้

$$P_{ball0^\circ} = \frac{(700 - 660)(150)}{202.5}$$

$$P_{ball0^\circ} = 29.6 \text{ mm}$$

### 3.2.3 การปรับจูนพารามิเตอร์ PID บนโปรแกรม LabVIEW มีการทดลองดังนี้

จากการทดลองระบบการควบคุมลูกบอลและคานร่วมกับวิชชั่นเซ็นเซอร์และปรับจูนค่า ผู้วิจัยได้ทำการทดลอง ไว้ทั้งหมด 5 ตำแหน่งตามลำดับดังต่อไปนี้ ตำแหน่งอ้างอิงที่ 100 มิลลิเมตร , ตำแหน่งอ้างอิงที่ 175 มิลลิเมตร , ตำแหน่งอ้างอิงที่ 0 มิลลิเมตร (ตำแหน่งอ้างอิงบนคาน) , ตำแหน่งอ้างอิงที่ -100 มิลลิเมตร และ ตำแหน่งอ้างอิงที่ -175 มิลลิเมตร

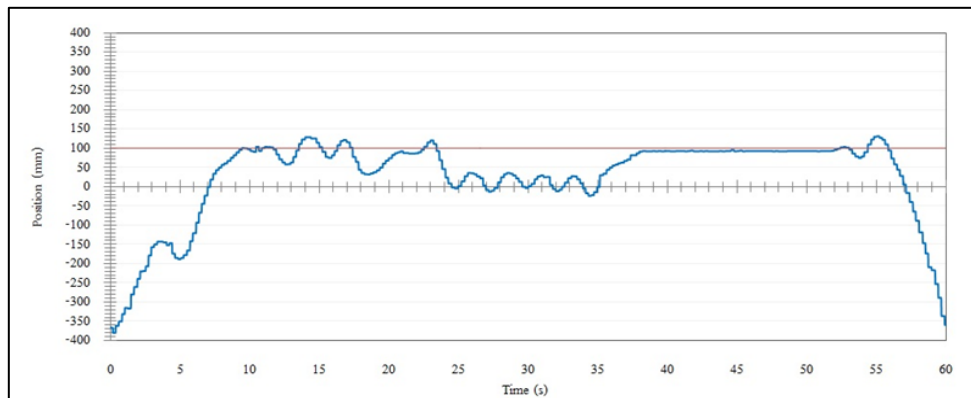
ตารางที่ 2 ตารางตั้งค่าพารามิเตอร์ในการทดลองบนสภาวะจริงของชุดฝึก บอลและคาน

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ค่าขอบเขตสูงสุด ของสัญญาณควบคุมจาก PID	10	ไม่มีหน่วย
ค่าขอบเขตน้อยสุด ของสัญญาณควบคุมจาก PID	-10	ไม่มีหน่วย
ค่าขอบเขตสูงสุด ของสัญญาณควบคุมเซอร์โวมอเตอร์	2.11	Volt
ค่าขอบเขตน้อยสุด ของสัญญาณควบคุมเซอร์โวมอเตอร์	2.89	Volt
ค่าคงที่ของ P	3.7061	ไม่มีหน่วย
ค่าคงที่ของ I	0.3352	ไม่มีหน่วย
ค่าคงที่ของ D	0.0587	ไม่มีหน่วย
ค่า Sampling time ของโปรแกรม	0.02	Sec

#### 4. ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองไว้ทั้งหมด 5 ตำแหน่งตามลำดับดังต่อไปนี้ ตำแหน่งอ้างอิงที่ 100 มิลลิเมตร , ตำแหน่งอ้างอิงที่ 175 มิลลิเมตร ,ตำแหน่งอ้างอิงที่ 0 มิลลิเมตร (ตำแหน่งอ้างอิงบนคาน) , ตำแหน่งอ้างอิงที่ -100 มิลลิเมตร และ ตำแหน่งอ้างอิงที่ -175 มิลลิเมตร ซึ่งตั้งค่าพารามิเตอร์ในการทดลองบนสภาวะจริงของชุดฝึก บอลและคาน ดังตารางที่ 2 ซึ่งได้ผลการทดลองแยกเป็นแต่ละการทดลองดังนี้

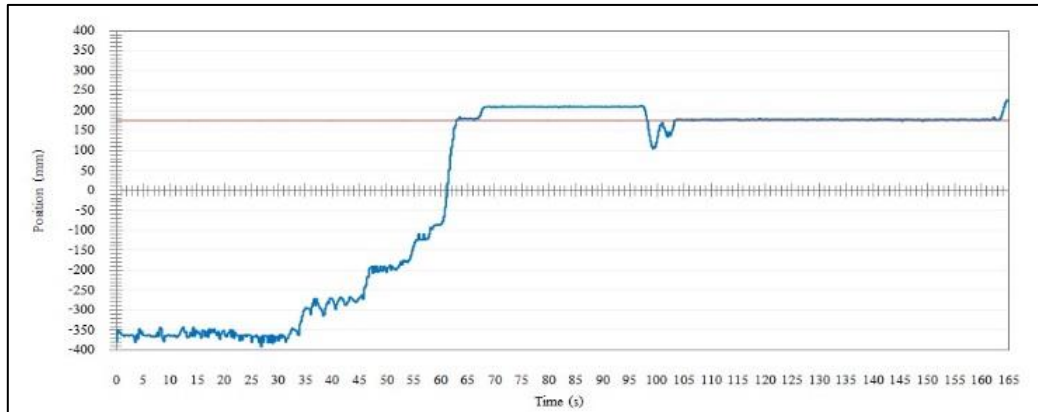
##### 4.1 การทดลองที่ 1 ตำแหน่งอ้างอิงตำแหน่งคานที่ 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งของลูกบอลที่ตำแหน่งอ้างอิง 100 มิลลิเมตร

จากกราฟที่ได้จากการทดลองที่ 1 ดังรูปที่ 10 ได้แก่ กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งของลูกบอลบนคานจะเห็นได้ว่าระบบสามารถทำให้ลูกบอลไปอยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิงที่ 100 มิลลิเมตร ได้ลูกบอลให้ไปยังตำแหน่งดังกล่าวได้จริง แล้วทำให้ลูกบอลหยุดนิ่งได้โดยใช้เวลาประมาณ 40 วินาที หลังจากที่กำหนดตำแหน่งอ้างอิง 100 มิลลิเมตร โดยที่พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลูกบอลค่อนข้างแกว่งไปมา เห็นได้จากกราฟระหว่างเวลาและมุมของคาน ดังรูปที่ 10 โดยใช้เวลาสำหรับการลูกบอลเคลื่อนที่เข้า Set point ได้เพียงประมาณ 10 วินาที

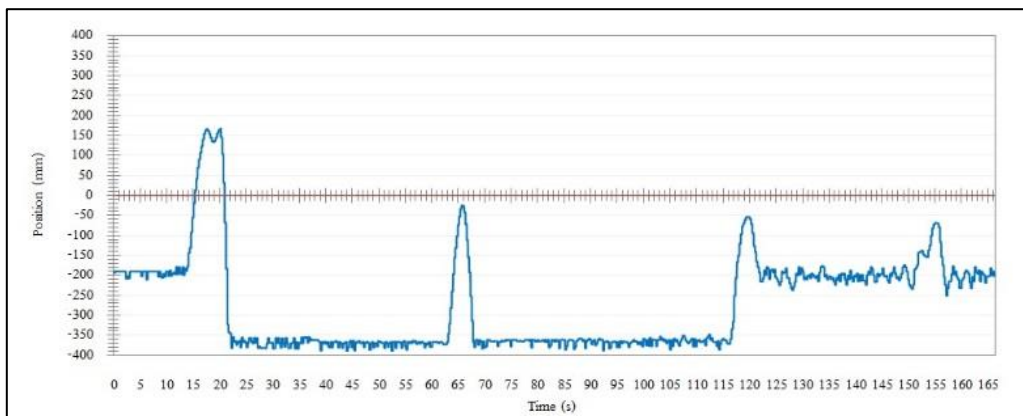
#### 4.2 การทดลองที่ 2 ตำแหน่งอ้างอิงตำแหน่งคานที่ 175 มิลลิเมตร



รูปที่ 11 กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งของลูกบอลที่ตำแหน่งอ้างอิง 175 มิลลิเมตร

จากกราฟที่ได้จากการทดลองที่ 2 ดังรูปที่ 11 ได้แก่ กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งจะเห็นได้ว่าระบบสามารถทำให้ลูกบอลไปอยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิงที่ 175 มิลลิเมตร ให้ไปยังตำแหน่งดังกล่าวได้จริง โดยใช้เวลาประมาณ 60 วินาที หลังจากที่กำหนดตำแหน่งอ้างอิง 175 มิลลิเมตร โดยที่พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลูกบอลนั้นค่อนข้างเคลื่อนที่ไปบนคานอย่างสม่ำเสมอ โดยครั้งแรกจะเข้า Set point ได้เพียงประมาณ 5 วินาที จากนั้นจึงเกิด Over Shoot แล้วอยู่นิ่งที่ตำแหน่ง Over Shoot ประมาณ 25 วินาที แล้วจึงกลับมาเข้า Set point ได้อีกครั้ง โดยอยู่นิ่งได้ประมาณ 60 วินาที จากนั้นจึงเกิด Over Shoot และเสียการควบคุมออกไป

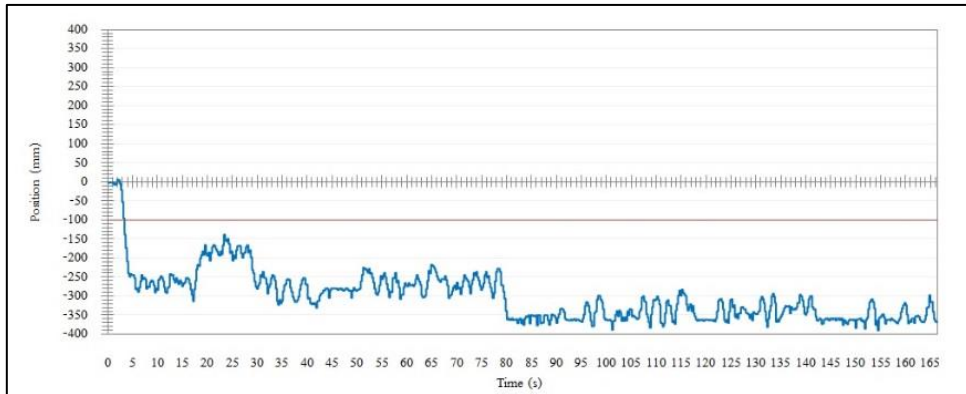
#### 4.3 การทดลองที่ 3 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 0 มิลลิเมตร (ตำแหน่งกึ่งกลางคาน)



รูปที่ 12 กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งของลูกบอลที่ตำแหน่งอ้างอิง 0 มิลลิเมตร (ตำแหน่งกึ่งกลางคาน)

จากกราฟที่ได้จากการทดลองที่ 3 ดังรูปที่ 12 ได้แก่ กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งจะเห็นได้ว่าระบบสามารถทำให้ลูกบอลไปอยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิงที่ 0 มิลลิเมตร (ตำแหน่งกึ่งกลางคาน) ซึ่งการทดลองพบว่ามุมของคานอยู่ระหว่าง -4 ถึง 10 องศา ดังนั้นจะเกิดการแกว่งอยู่ตลอดเวลาส่งผลให้ระบบไม่สามารถส่งสัญญาณเพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้เป็นที่ไปตามที่ต้องการได้

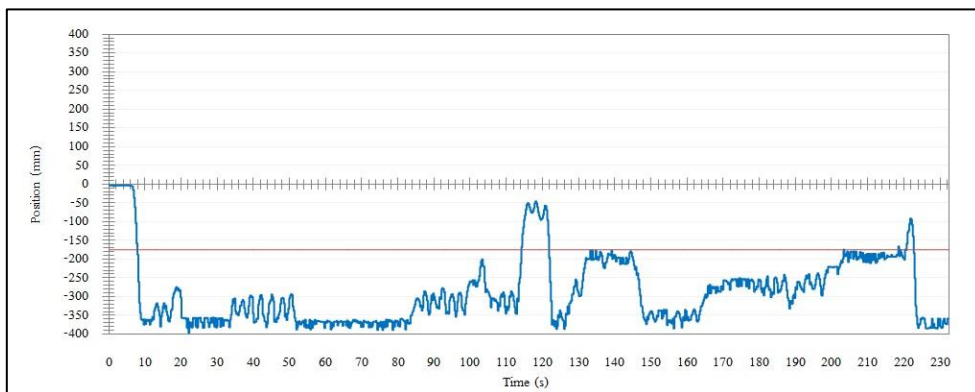
## 4.4 การทดลองที่ 4 ตำแหน่งอ้างอิงที่ -100 มิลลิเมตร



รูปที่ 13 กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งของลูกบอลที่ตำแหน่งอ้างอิง -100 มิลลิเมตร

จากกราฟที่ได้จากการทดลองที่ 4 ดังรูปที่ 13 ได้แก่ กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งจะเห็นได้ว่าระบบไม่สามารถทำให้ลูกบอลไปอยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิงดังกล่าวได้ จากการทดลองมุมของคานจะเห็นว่ามุมของคานอยู่ระหว่าง -2 ถึง 5 องศา และการทดลองระบบตัวแปรระหว่างเวลาและสัญญาณควบคุมที่ได้นั้นจะเกิดการแกว่งอยู่ตลอดเวลาส่งผลให้ระบบไม่สามารถส่งสัญญาณเพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้

## 4.3 การทดลองที่ 5 ตำแหน่งอ้างอิงที่ -175 มิลลิเมตร



รูปที่ 14 กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งของลูกบอลที่ตำแหน่งอ้างอิง -175 มิลลิเมตร

จากกราฟที่ได้จากการทดลองที่ 5 ดังรูปที่ 14 ได้แก่ กราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งจะเห็นได้ว่าระบบไม่สามารถทำให้ลูกบอลไปยังตำแหน่งอ้างอิงดังกล่าวได้ แต่ในช่วงเวลาที่ประมาณ 135 วินาที และ 210 วินาที ระบบยังพยายามทำให้ลูกบอลไปยังตำแหน่งอ้างอิงให้เข้า Set point แต่ก็ยังไม่สามารถทำให้ลูกบอลเข้าจุดอ้างอิงและหยุดนิ่งได้ ซึ่งการทดลองระหว่างเวลาและมุมของคานจะเห็นว่ามุมของคานอยู่ระหว่าง -2 ถึง 7 องศา และในช่วงเวลาเดียวกันกับกราฟระหว่างเวลาและตำแหน่ง ในขณะที่ระบบยังพยายามที่จะเลี้ยงลูกบอลให้เข้า Set point มุมของคานอยู่ระหว่างประมาณ 0.5 ถึง 4 องศา และการทดลอง

ตัวแปรระหว่างเวลาและสัญญาณควบคุมที่ได้นั้นจะเกิดการแกว่งอยู่ตลอดเวลาส่งผลให้ระบบไม่สามารถส่งสัญญาณเพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้

### 5. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองหาค่า PID ที่เหมาะสมของชุดทดลองดังกล่าวครั้งนี้ พบว่าการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงที่มีค่าเป็นบวกจะทำให้ระบบตอบสนองดีกว่าการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงที่มีค่าเป็นลบโดยมีนัยสำคัญ และที่ตำแหน่งอ้างอิงที่ 100 มิลลิเมตร และ 175 มิลลิเมตร ตามผลการทดลองที่ 1 และที่ 2 จะพบได้ว่าระบบสามารถทำให้ลูกบอลให้เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงได้ และอยู่นิ่งได้ในช่วงเวลาหนึ่ง ระบบก็จะทำการตอบสนองให้ลูกบอลเคลื่อนที่เปลี่ยนไปตำแหน่งอื่นๆ เนื่องมาจากค่า PID อาจะยังไม่มี ความถูกต้อง ปฏิบัติงาน โดยผู้วิจัยได้พัฒนาชุดฝึกขึ้นโดยการจำลองรูปแบบการควบคุมแบบเสมือนจริง ที่ใช้ตัวควบคุม PID ร่วมกับระบบวิชั่นเซ็นเซอร์ เพื่อที่จะควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน ซึ่งการทดลองได้ตัวควบคุม PID ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมภายใต้สภาวะการทดลองนี้คือ Proportional Gain (P) เท่ากับ 3.706 , Integral Gain (I) เท่ากับ 0.3352 และ Derivative Gain (D) เท่ากับ 0.0586938 อย่างไรก็ตามตัวควบคุม PID ดังกล่าวยังต้องมีการศึกษาปัจจัยของระบบที่ส่งผลต่อการควบคุมระบบบอลและคานให้เกิดความเสถียรภาพอีกต่อไป เนื่องจากการคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าของเอ็นโค้ดเดอร์ในโปรแกรม มักจะคลาดเคลื่อนไปประมาณ  $\pm 1$  ถึง  $\pm 2$  องศา เมื่อเทียบกับมุมจริงของแกนเพลลา เพราะเมื่อเกิดการหมุนที่แกนเพลลาจะทำให้คานเอียง ตัวเอ็นโค้ดเดอร์จึงส่งสัญญาณ พัลส์ออกไป แต่เนื่องจากเกิดการคลาดเคลื่อนจึงทำให้การคำนวณตำแหน่งของลูกบอลไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง อีกทั้งค่าตำแหน่งของลูกบอลนี้ยังเป็นสัญญาณป้อนกลับของการควบคุมแบบปิดนี้ จึงทำให้ระบบมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ในส่วนของทางด้านกลศาสตร์ของลูกบอลกับคาน พบว่าระบบมีแรงเสียดทานระหว่างลูกบอลกับคานน้อย โดยไม่ทราบค่าที่แน่นอน และลูกบอลมีน้ำหนักเบา จึงทำให้เป็นการยากที่ระบบจะสามารถควบคุมให้ลูกบอลอยู่นิ่งๆได้ ควรมีการศึกษาและออกแบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมแบบปิด ที่ใช้สัญญาณป้อนกลับให้ระบบสามารถรู้ได้ทั้งตำแหน่งของลูกบอลบนคานและมุมของแกนเพลลา โดยอาจจะเพิ่มกล้องดิจิตอลวิดีโอในการบอกค่ามุม หรืออาจจะใช้เอ็นโค้ดเดอร์ร่วมด้วย ในอนาคตอาจจะมีการพัฒนาระบบ simulation เพื่อจำลองและทดสอบการปรับหาค่า PID ด้วยระบบคอมพิวเตอร์ให้ได้ค่าตั้งต้นก่อน แล้วจึงทำการปรับค่าอีกครั้ง จะช่วยให้ลดเวลาในการปรับหาค่า PID ได้

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทางผู้บริหารระดับสูงของมหาวิทยาลัยธนบุรีที่ทำการสนับสนุนเงินทุนทั้งหมด และสำนักวิจัยและวางแผนพัฒนา มหาวิทยาลัยธนบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านเอกสารและอื่นๆที่เกี่ยวข้อง ในการพัฒนาชุดฝึกทักษะระบบบอลและคานร่วมกับวิชั่นเซ็นเซอร์ สำหรับใช้ในการเรียนการสอนใน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี ไว้ ณ ที่นี้ด้วย ในการทดสอบการทดลองและสร้างชุดฝึกดังกล่าวใช้ลิขสิทธิ์ ของโปรแกรม LABVIEW ที่ใช้งานบนระบบปฏิบัติการ NI myRIO-1900 board ที่เป็นลิขสิทธิ์อยู่บนระบบดังกล่าว ที่ทางผู้วิจัยได้ซื้อจากตัวแทนจำหน่ายของ National Instruments

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Keshmiri, A. F. Jahromi, A. Mohebbi, M. H. Amoozgar, W-F. Xie. (2012). Modelling and Control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches. International Journal on Smart Sensing and Intelligent System. vol.5, no.1.
- [2] Y. H. Chang, W. S. Chan, C. W. Chang, C.W. Tao. (2011). Adaptive Fuzzy Dynamic Surface Control for Ball and Beam System. International Journal of Fuzzy System. vol.13, no.1.

- [3] W. Yu. (2009). Nonlinear PD Regulation for Ball and Beam System. International Journal of Electrical Engineering Education. vol. 46. pp. 37-59
- [4] X. Li, W. Yu. (2010). Synchronization of Ball and Beam System with Neural Compensation. International Journal of Control. Automation and System.
- [5] W. Yu, F. Ortiz. (2005). Stability analysis of PD regulation for ball and beam system. In IEEE Conference on Control Applications. Toronto. Canada.
- [6] F. O. Rodriguez, W. Yu. (2004). Stable PD control for ball and beam system. In International Symposium on Robotics and Automation.
- [7] นายมนัส หมิตหวัง. (2552). การควบคุมลูกบอลบนคานแบบฟิชชีสไลด์ตั้ง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [8] Quanser Innovate Educate. [เว็บไซต์]. สืบค้นจาก <http://www2.hawaii.edu/~gurda/EE351L/bb.pdf>