

**การควบคุมระบบบอลและคานโดยใช้วิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง  
ด้วย Simulink และ บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์  
Ball-and-Beam System Control Using Model Predictive Control  
with Simulink and a Microcontroller Board**

**จกิต เบญจเลิศยานนท์<sup>1,2\*</sup>, วรวิษ กุลพิชช์เกษม<sup>2</sup> และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสัมผัสเทียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน  
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน  
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

\*ติดต่อ: E-mail g5317500061@ku.ac.th

### **บทคัดย่อ**

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการนำวิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองมาประยุกต์ใช้กับงานทางกลมากขึ้น เนื่องจากการคำนวณสามารถทำงานได้รวดเร็วมากขึ้น บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองที่มีการพิจารณาข้อจำกัด ระบบบอลและคานเป็นระบบที่ถูกใช้อ้างอิงถึงบ่อยครั้งในทางวิศวกรรมควบคุม เนื่องจากเป็นระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพทางพลศาสตร์ วิธีการควบคุมต่างๆจึงถูกนำมาศึกษาและใช้งานกับระบบบอลและคานและพิจารณาผลที่เกิดขึ้น ผลของการออกแบบถูกนำไปทดลองกับระบบบอลและคานที่ได้จัดสร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ชุดทดลองจะถูกควบคุมโดยอาศัย Simulink และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino โดยกำหนดช่วงการทำนายคือ 10 ช่วงการทำนาย และมีคาบเวลา 0.5 วินาที จากผลแสดงให้เห็นว่าวิธีการควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองสามารถควบคุมลูกบอลได้อย่างมีประสิทธิภาพที่จุดที่กำหนด สามารถทนต่อการรบกวน ผลจากการกำหนดข้อจำกัดและการคำนวณสัญญาณป้อนด้วยการทำนายทำให้สัญญาณควบคุมที่ได้มีความแปรปรวนต่ำกว่าวิธีการออกแบบ PID และมีการทำงานภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้

**คำหลัก:** บอลและคาน; การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง, ระบบไม่เชิงเส้น

### **Abstract**

Recently, more model predictive controllers are applied to mechanical systems since the computation is faster than in the past. This paper proposes control system design of a ball-and-beam system using model predictive control with constraint. The ball-and-beam system is always used as a reference to nonlinear and unstable dynamic system so that various control methods have been studied and applied to analyze the respond. The result of controller design is applied to the ball-beam system which is made in the laboratory. The equipment is controlled via Simulink and Arduino microcontroller board with 10 steps of prediction horizon and 0.5 second of sampling period. The result shows that model

## DRC-23

predictive control method can control the ball on the position and is robust to disturbances. The constraint design in the model predictive controller leads to lower input variance compared to PID and to operation in allowable range.

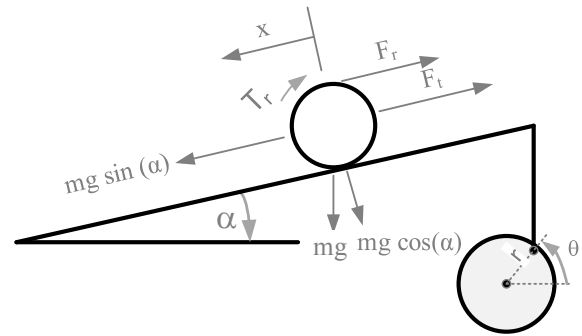
**Keywords:** ball and beam; model predictive control; nonlinear system

## 1. บทนำ

บอลและคานถูกใช้ในการศึกษาระบบควบคุม เนื่องจากเป็นระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) ไม่มีเสถียรภาพวงเปิด (open-loop unstable) และไม่ซับซ้อนทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และนำไปสู่การศึกษาระบบอื่น ๆ ที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น ระบบทางเคมี อากาศยาน เป็นต้น มีการนำวิธีการควบคุมมากมายถูกนำมาประยุกต์กับระบบบอลและคานมากมายโดยเฉพาะการนำเสนอแนวคิดและทฤษฎีการควบคุม [1-2] รวมไปถึงการศึกษาสำหรับระบบที่มีจำนวนองศาอิสระมากขึ้น เช่น Ball-and-Plant [3]

ระบบบอลและคานมีเป้าหมายในการควบคุมคือการควบคุมตำแหน่งบอลที่วางไว้บนคานตรงซึ่งสามารถกลิ้งไปมาอย่างอิสระ โดยระบบควบคุมจะทำการควบคุมมุมเอียงของคานเพื่อเลี้ยงบอลไปยังตำแหน่งที่ต้องการ หรือรักษาตำแหน่งของบอลเมื่อเกิดสิ่งรบกวนมากระทำต่อระบบ โดยตำแหน่งและความเร็วของบอลอาจได้จากการวัดผ่านเซนเซอร์หรือการประมาณโดยตัวประมาณสถานะ

บทความนี้แนะนำเสนอการควบคุมโดยใช้วิธีการควบคุมเชิงทำนายโดยแบบจำลองสำหรับระบบบอลและคาน โดยประยุกต์ใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino และซอฟต์แวร์ Simulink ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ออกแบบและควบคุมระบบที่แพร่หลายและใช้งานง่ายกว่าการโปรแกรมผ่าน IDE ผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมที่ได้จัดสร้างโดยอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino และ Simulink โดยที่ตัวควบคุมถูกออกแบบโดยวิธีทำนายแบบจำลองสามารถทำงานบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และควบคุมตำแหน่งบอลเป็นไปตามที่ออกไปไว้



รูปที่ 1 FBD ของระบบบอลและคาน

## 2. แบบจำลองและวิธีการควบคุม

ระบบบอลและคานเป็นปัญหาการควบคุมดั้งเดิมที่ถูกใช้เป็นตัวแบบจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบที่ไม่มีเสถียรภาพวงเปิดในห้วงปฏิบัติการ ลักษณะใกล้เคียงกับระบบลูกตุ้มหัวกลับ (Inverted Pendulum) รูปที่ 1 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในระบบบอลและคานที่ใช้ในการศึกษาสำหรับบทความนี้ โดยที่บอลจะถูกวางอยู่บนคานตรงที่สามารถควบคุมมุมของความลาดเอียงรอบจุดหมุนได้จากมอเตอร์ โดยมีแรงโน้มถ่วงกระทำต่อบอลในแนวตั้ง ระบบนี้จึงมีอินพุตคือ มุมของมอเตอร์ ( $\alpha$ ) และมีเอาต์พุตคือตำแหน่งของบอล ( $x$ ) ตัวควบคุมจะทำการควบคุมลูกบอลให้อยู่บนตำแหน่งที่ต้องการบนคาน โดยให้เวลาของการคงตัว (Settling time) และโอเวอร์ชูต (overshoot) มีค่าน้อยๆ และสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้เมื่อมีการรบกวน

## 2.1 สมการการเคลื่อนที่และแบบจำลอง

จากรูปที่ 1 ระบบบอลและคานถูกแบ่งเป็นสองส่วนคือ พลวัตของคานและลูกบอล และส่วนของเซอร์โวมอเตอร์ในการควบคุมมุมของคาน โดยในที่นี้

## DRC-23

กำหนดให้วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุแข็งไม่เกิดการเสียรูป (rigid) ไม่เกิดแรงเสียดทานและการลื่นไถล ระหว่างบอลและคาน

ในการควบคุมจะควบคุมตำแหน่งบอล  $x$  (m) โดยกำหนดค่าต่างๆในการออกแบบอุปกรณ์ คือ คานยาว  $L$  (m) มุมของคานเทียบกับแนวระดับคือ  $\alpha$  (rad) มวลของบอลคือ  $m$  (kg) รัศมีของบอลคือ  $R$  (m) ระยะจากศูนย์กลางมอเตอร์ถึงจุด  $D$  คือ  $r$  (m) โดยสมมุติให้มุมของ Lever arm อยู่ในแนวตั้ง มุมของเซอร์โวมอเตอร์คือ  $\theta$  (rad) โมเมนต์ความเฉื่อยของบอลคือ  $J$  กำหนดความเร่งโน้มถ่วง  $g$  ค่าต่างๆของชุดทดลองที่ได้สร้างขึ้น แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	ปริมาณ
L	ความยาวคาน	0.3 m
m	มวลของบอล	$5 \times 10^{-6}$ kg
R	รัศมีของบอล	0.02 m
r	ระยะ offset	0.016 m
J	โมเมนต์ความเฉื่อยบอล	$8 \times 10^{-10}$
g	ความเร่งโน้มถ่วง	$9.81 \text{ m/s}^2$
l	จุดหมุนคานถึงจุดต่อไปยังมอเตอร์	0.09 m

การควบคุมจะกำหนดข้อจำกัดช่วงการทำงานของมุมมอเตอร์ในช่วงที่มุมของมอเตอร์และมุมของคานทำงานใกล้เคียงระบบเชิงเส้น ( $\alpha \approx k\theta$  เมื่อ  $k$  เป็นค่าคงที่) และกำหนดข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ที่สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองแบบเชิงเส้นคือให้มอเตอร์สามารถทำได้ระหว่าง  $\pm 15^\circ$

### การเคลื่อนที่ของบอล

กำหนดให้แรงที่กระทำกับบอลประกอบด้วยสองส่วน คือแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ และแรงที่ทำให้เกิดการหมุน

$$F_t = m\ddot{x} \quad (1)$$

$$T_r = F_r R \quad (2)$$

และ

$$T_r = J \frac{d\omega_b}{dt} = J \frac{d(v_b/R)}{dt} = \frac{J}{R} \ddot{x} \quad (3)$$

หรือ

$$F_r = \frac{J}{R^2} \ddot{x} \quad (4)$$

จาก Newton 2<sup>nd</sup> Law

$$F_t + F_r = mg \sin(\alpha) \quad (5)$$

จาก (1)-(5) แทนค่าได้

$$\ddot{x} = \frac{5}{7} g \sin(\alpha) \quad (6)$$

การเคลื่อนที่ของมอเตอร์และคาน

จากรูปที่ 2

$$\sin \alpha = \left( \frac{r \sin \theta}{l} \right) \quad (7)$$

และสมมุติให้  $\alpha$  มีค่าน้อย

$$\alpha \approx \frac{r}{l} \theta \quad (8)$$

สมการสถานะ

จาก (6) กำหนดตัวแปรสถานะ โดยให้  $x_1$  คือตำแหน่งของบอล  $x_2$  แทนความเร็วของบอล

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{5}{7}g \end{bmatrix} \alpha(\theta) \quad (9)$$

แทนค่า (8) ใน (9) และทำให้อยู่ในรูปของ

Discrete state space เขียนได้ตามสมการ

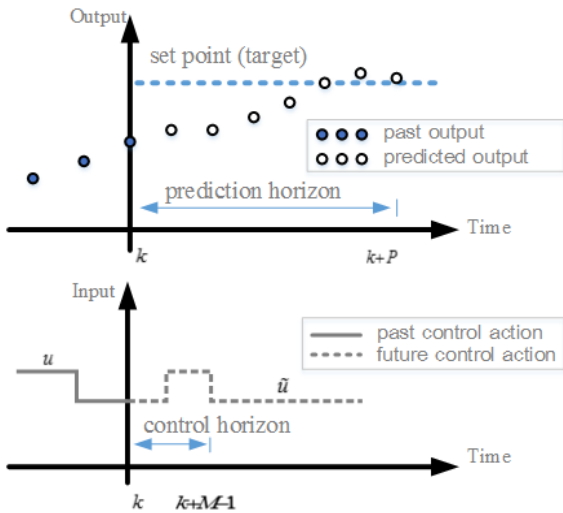
$$\begin{bmatrix} x_1[k+1] \\ x_2[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1.25 \end{bmatrix} \theta \quad (10)$$

โดยที่มีความเวลา 0.5 วินาที

### 2.2 การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง

การควบคุมเชิงทำนายแบบจำลอง (Model Predictive Control : MPC) [4] คือการควบคุมโดยใช้ข้อมูลของแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบในการ

**DRC-23**



รูปที่ 2 พื้นฐานการควบคุมแบบ MPC

ทำนายผลตอบสนองที่จะเกิดขึ้นในอนาคต และเลือกสัญญาณการควบคุมที่ดีที่สุดมาใช้ในการป้อนให้กับระบบ การคำนวณจะใช้ค่าที่ได้จากการทำนายในอนาคตและค่าที่ได้จากการวัดในช่วงเวลาปัจจุบันของการคำนวณ โดยการหาค่าที่เหมาะสม (Optimize) ของฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)

รูปที่ 2 แสดงพื้นฐานของตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจะลองเมื่อ  $y$  คือค่าเอาต์พุตจริงจากในอดีตถึงปัจจุบัน,  $\hat{y}$  คือเอาต์พุตที่ได้จากการทำนาย,  $u$  แทนสัญญาณอินพุตที่ต้องการควบคุม,  $\tilde{u}$  แทนสัญญาณอินพุตที่ได้จากการทำนาย, ช่วงเวลาที่สนใจคือ เวลาช่วงที่  $k$  ถึงเวลาช่วงที่  $k + P$  และช่วงเวลาที่สัญญาณควบคุมจากการทำนายมีการเปลี่ยนแปลงคือ  $k + M - 1$

กำหนดสมการปริภูมิสถานะเชิงเส้น

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= C_y x(k) \\ z(k) &= C_z x(k) \end{aligned} \quad (11)$$

โดยที่  $x(k)$  คือเวกเตอร์สถานะที่เวลา  $k$ ,  $u(k)$  แทนเวกเตอร์อินพุต ซึ่งในที่นี้คือมุมที่ป้อนให้กับเซอร์โวมอเตอร์,  $y(k)$  คือเวกเตอร์ของเอาต์พุตที่วัดได้ หรือตำแหน่งของบอล และ  $z(k)$

คือเวกเตอร์ของเอาต์พุตที่ต้องการควบคุม โดยให้เท่ากับ  $y(k)$  จากภาพแสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมด้วย MPC Controller ในที่นี้สัญญาณรบกวนจะกำหนดให้เป็นค่าที่วัดไม่ได้

กำหนด  $Q(i)$  และ  $R(i)$  คือเมทริกซ์ถ่วงน้ำหนักของเอาต์พุตและอินพุตตามลำดับ ฟังก์ชันสมรรถนะถูกกำหนดขึ้นเพื่อหาค่า  $\Delta u$  ที่ทำให้ฟังก์ชันมีค่าน้อยที่สุด คือ

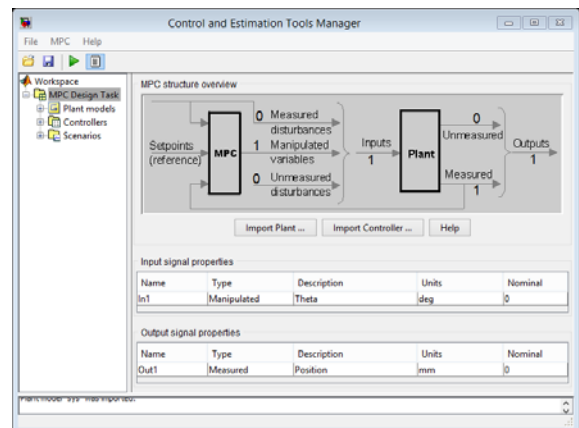
$$V(k) = \|\hat{Y}(k) - \hat{R}(k)\|_Q^2 + \|\Delta U\|_R^2 \quad (12)$$

เมื่อ  $\hat{Y}(k)$  เป็นเวกเตอร์ของเอาต์พุตที่ทำนายในช่วงเวลา  $k+1$  ถึง  $k+p$  จากข้อมูลทีเวลา  $k$   $\hat{R}(k)$  เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณอ้างอิงในช่วงเวลา  $k+1$  ถึง  $k+p$  จากข้อมูลทีเวลา  $k$

กรณีที่มีการพิจารณาข้อจำกัดระหว่างช่วงการทำนาย จะกำหนดข้อจำกัดด้วยอสมการ

$$\begin{aligned} F[\hat{u}(k|k) \dots \hat{u}(k+m|k) \ 1]^T &\leq 0 \\ G[\hat{y}(k|k) \dots \hat{u}(k+p|k) \ 1]^T &\leq 0 \\ D[\Delta \hat{u}(k|k) \dots \Delta \hat{u}(k+m-1|k) \ 1]^T &\leq 0 \end{aligned}$$

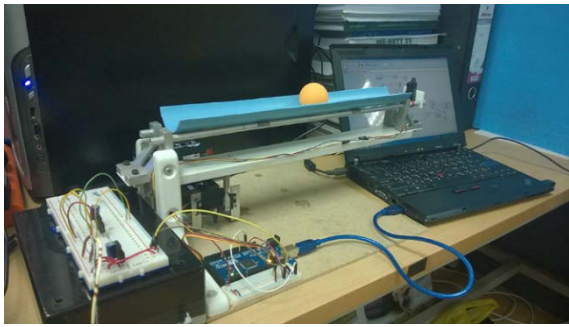
ในกระบวนการการคำนวณเชิงตัวเลข สามารถใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink หรือ การใช้ Model Predictive Control Toolbox [5] (รูปที่ 3) ซึ่งสามารถกำหนดข้อจำกัดต่างๆ (Constraint) ได้อย่างสะดวก รายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุม MPC สามารถศึกษาได้จากหนังสือ [4] และเอกสารที่เกี่ยวข้อง



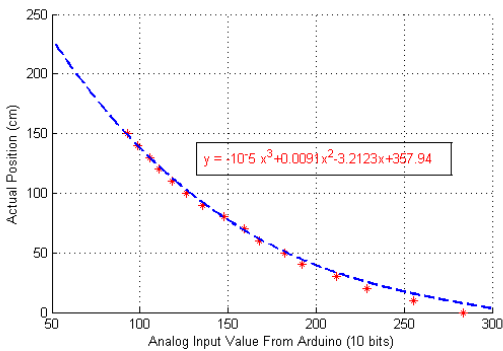
รูปที่ 3 Model Predictive Control Toolbox

DRC-23

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



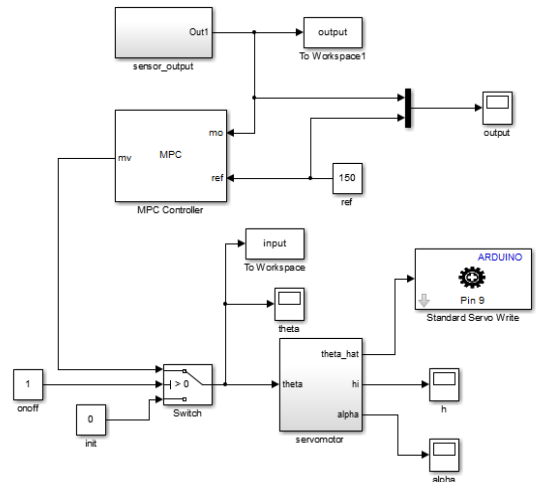
รูปที่ 4 การทดลองบอลและคาน



รูปที่ 5 การปรับค่าเซนเซอร์อินฟราเรด เครื่องหมายดอกจันแสดงค่าที่วัดได้ เส้นประแสดงเส้นแนวโน้มจากการประมาณ

3. การทดลอง

จากรูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์การทดลองบอลและคานที่ได้สร้างขึ้น ประกอบด้วยบอลซึ่งได้ใช้ลูกปิงปองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 ม.ม. น้ำหนัก 2.7 กรัม เคลื่อนที่อยู่บนคาน มุมของคานถูกขับด้วยเซอร์โวมอเตอร์ Toward Pro MG996R โดยสมมติว่ามุมของมอเตอร์ถูกควบคุมโดยสัญญาณอ้างอิงขาเข้าอย่างแม่นยำจากวงจรถ่ายของเซอร์โวมอเตอร์คอนโทรลเลอร์ตำแหน่งของบอลถูกวัดโดยเซนเซอร์ตรวจจับระยะแบบอินฟราเรด สัญญาณตำแหน่งบอลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 0 ถึง 3 โวลต์ จากช่วงการทำงาน 0 ถึง 300 ม.ม. สัญญาณจากเซนเซอร์ถูกปรับค่าให้ถูกต้องตามระยะจริง จากรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ได้จากเซนเซอร์ที่ส่งสัญญาณไปยังบอร์ด



รูปที่ 6 Simulink code

ไมโครคอนโทรลเลอร์กับระยะจริง ประมาณได้ด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 7

ตัวควบคุมถูกคำนวณภายในโปรแกรม Simulink และส่งค่าสัญญาณเอาต์พุตเป็นมุมอ้างอิงที่ส่งไปยังเซอร์โวมอเตอร์ แสดงได้ดัง รูปที่ 6 การออกแบบ MPC ทำได้บน Model Predictive Control Toolbox โดยกำหนดพารามิเตอร์ออกแบบตามตารางที่ 2 และแบบจำลองที่ได้จากสมการที่ (10)

ในการทดลองได้ทดสอบร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบพื้นฐาน โดยกำหนดอัตราขยาย KP KI และ KD ที่ได้ออกแบบจนระบบมีเสถียรภาพและมีผลการควบคุมตำแหน่งได้ดีที่สุด เท่ากับ 1, 0.8, 0.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงพารามิเตอร์ออกแบบ MPC

พารามิเตอร์ออกแบบ	สัญลักษณ์	ค่าที่ใช้
Prediction Horizon	P	10
Control Horizon	M	1
Sampling period	T <sub>s</sub>	0.1
Input Weight	R	0.1
Output Weight	Q	1

**DRC-23**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28  
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น



## DRC-23

15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

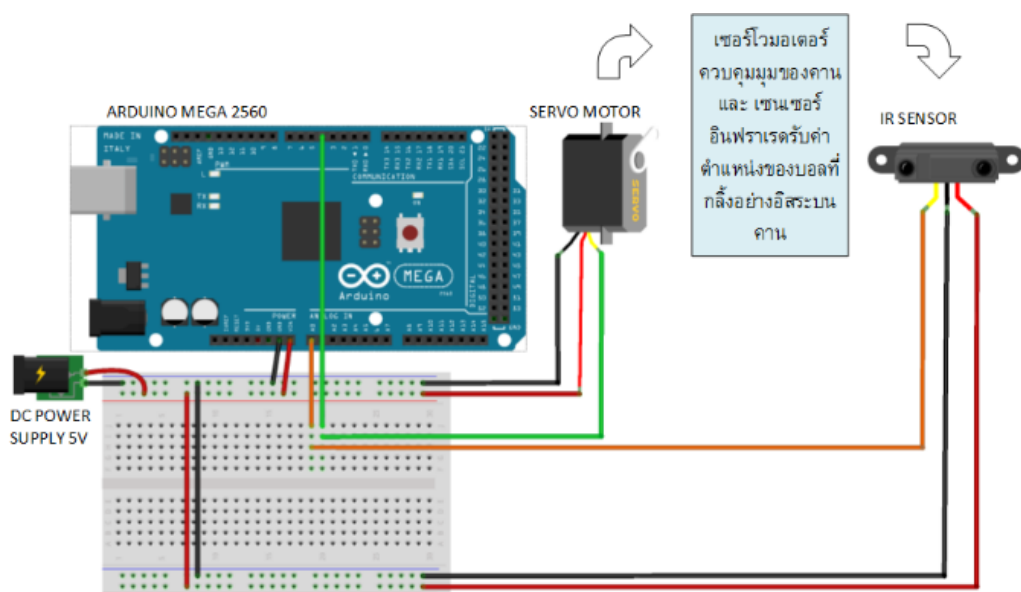
## 4. ผลการทดลอง

รูปที่ 8 แสดงผลการทดลองควบคุมตำแหน่งบอลที่ตำแหน่ง 150 มม. โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID และรูปที่ 9 เป็นผลที่ได้จากตัวควบคุมแบบ MPC จากรูปตัวควบคุมถูกเปิดใช้งานที่เวลาที่ 0 วินาที กราฟด้านบนแสดงตำแหน่งบอลที่เวลาต่างๆ (มิลลิเมตร) และกราฟด้านล่างแสดงสัญญาณมุมที่ป้อนให้กับมอเตอร์ (องศา) ในการทดลองได้ทำการรบกวนระบบด้วยการเคาะบอลที่ตำแหน่งเวลาที่ทำเครื่องหมายวงกลมประ เว้นช่วงประมาณ 30, 30, 15, 15 วินาทีตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบ MPC ที่ทำการควบคุมจริงผ่านทางบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถควบคุมให้บอลมีเสถียรภาพแม้มีการรบกวนจากภายนอก เช่นเดียวกับการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่สามารถควบคุมเสถียรภาพของบอลได้ อย่างไรก็ตามสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี (มุมของเซอร์โวมอเตอร์) มีการแกว่งตัวมาก วัดได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ นั่นคือ  $\sigma_{MPC} = 2.7824$  และ  $\sigma_{PID} = 3.4553$  ผลคือทำให้เกิดการสั่นของโครงสร้างคานขณะทำการรักษาสมดุล ในขณะที่การควบคุมด้วย MPC โครงสร้างคานมีการสั่นน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวควบคุมแบบพีไอดี และมี

สัญญาณอินพุทบางค่าเกินจากช่วงที่ได้กำหนด ซึ่งหากมีค่ามากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมหรืออาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ในขณะที่ตัวควบคุม MPC จะพิจารณาข้อจำกัดในส่วนนี้ระหว่างการคำนวณ

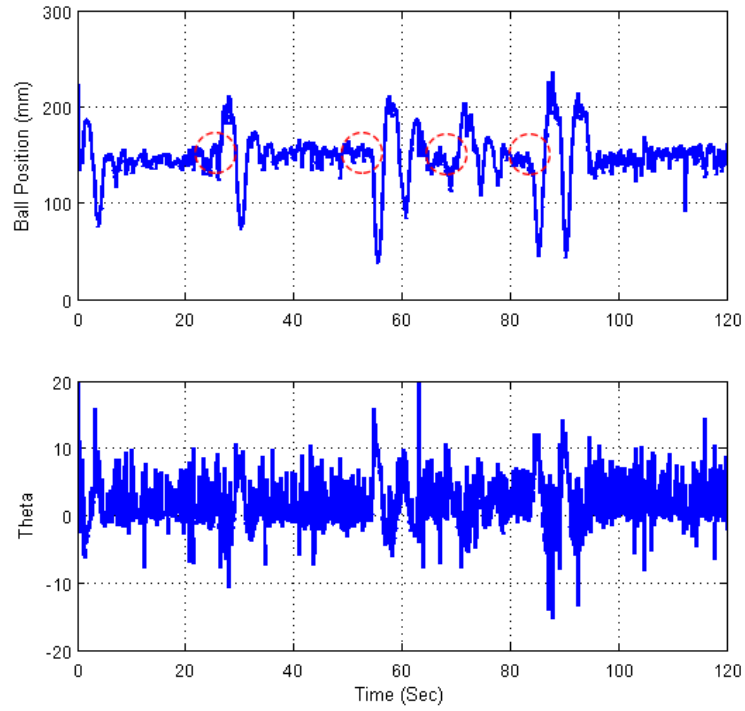
## 5. สรุปผลการทดลอง

ระบบบอลและคานเป็นระบบที่มีการอ้างอิงถึงบ่อยครั้งในการศึกษาพลศาสตร์ของระบบควบคุม เนื่องจากความไม่ซับซ้อนของระบบ มีสมบัติเป็นระบบไม่เชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพ งานวิจัยส่วนมากได้กล่าวถึงเฉพาะการควบคุมโดยการจำลอง สำหรับบทความนี้มุ่งเน้นไปในส่วนของการทดลองจริงโดยใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีความแพร่หลายราคาถูกด้วยตัวควบคุมเชิงทำนายแบบจำลองซึ่งมีขั้นตอนวิธีที่มีสมรรถนะสูงในการควบคุม ซึ่งจากผลการทดลอง ตัวควบคุม MPC สามารถรักษาเสถียรภาพของบอลได้โดยที่ข้อได้เปรียบของตัวควบคุม MPC ที่ทำนายผลของตำแหน่งในอนาคต และสามารถกำหนดข้อจำกัดในการควบคุม ทำให้ผลที่ได้เหนือกว่าการควบคุมแบบ PID

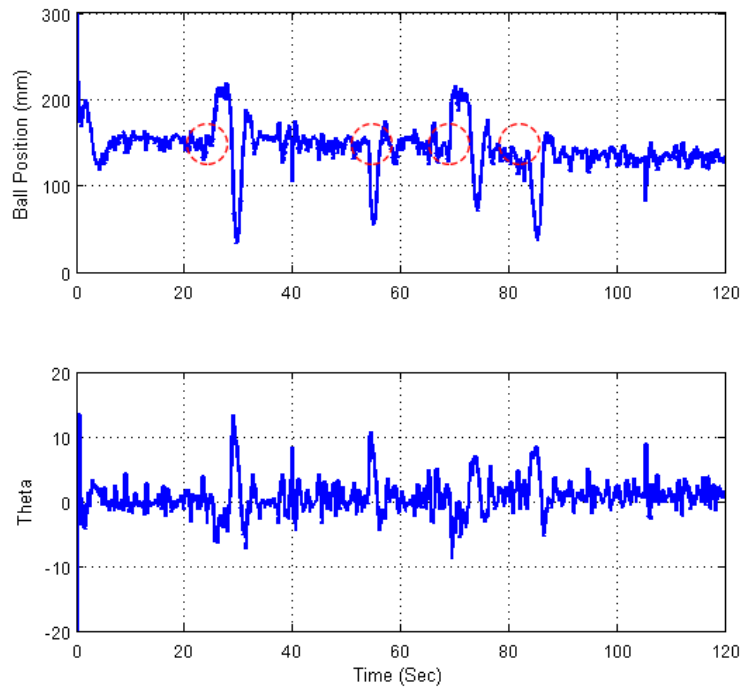


รูปที่ 7 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดลองแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทดลอง

DRC-23



รูปที่ 8 ผลตอบสนองเมื่อใช้ PID Controller



รูปที่ 9 ผลตอบสนองเมื่อใช้ MPC Controller



## DRC-23

### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับ  
การสนับสนุนพื้นที่ทำการวิจัย

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ryu, K., and Oh, Y. (2011). Balance Control of Ball-Beam System Using Redundant Manipulator, paper presented in *IEEE International Conference on Mechatronics 2011*, Istanbul, Turkey.
- [2] Nganga-Kouya, D. and Okou, F.A. (2011). A New Adaptive State Feedback Controller for the Ball and Beam System, presented in *Canadian Conference Electrical and Computer Engineering 2011*, Niagara Falls, Canada.
- [3] Lee, K., Bätz, G. and Wollherr, D. (2008). Basketball Robot: Ball-on-Plate with Pure Haptic Information, presented in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA.
- [4] Maciejowski, J.M. (2002). *Predictive Control with Constraints*, Prentics Hall, London.
- [5] Bemporad, A., Morari, M. and Ricker, N.L. (2013) *Model Predictive Control Toolbox User's Guide*, Mathworks.