แขนกลเซอร์โวแบบอติคูเลทด้วยอาร์ดูวีโนไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลเอวีอาร์

Servo Robotic Articulated Arm with Arduino AVR Controller

อาจารย์ศุภวัฒน์ ลาวัณวิสุทธิ์ , วชิรนันท์ แสนยะบุตร

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์และภาษาโปรแกรมของ Arduino มาประยุกต์ใช้ในการทำแขนกล และเพื่อพัฒนาไปสู่การสร้างแขนกลในงานอุตสาหกรรมและทางการทหารด้านการกู้ภัย แขนกลนี้เป็นการควบคุมด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ โดยผ่านการประมวลผลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อส่งคำสั่งในรูปสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิตอลไปยังเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อควบคุมการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ไปในทิศทางหรือตำแหน่งที่ต้องการ และ ทำให้แขนกลสามารถหยิบจับวัตถุได้

ผลการทดลอง แขนกลสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino สามารถส่งเอาต์พุตแบบดิจิตอลได้เสถียรกว่า ไมโครคอนโทรลเลอร์อื่น เช่น PIC และ MCS-51 จึงไม่ทำให้เซอร์โวมอเตอร์เกิดอาการสั่น ส่งผลให้แขนกลสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างนิ่มนวล

คำสืบค้น

แขนกล เซอร์โวมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์

บทนำ

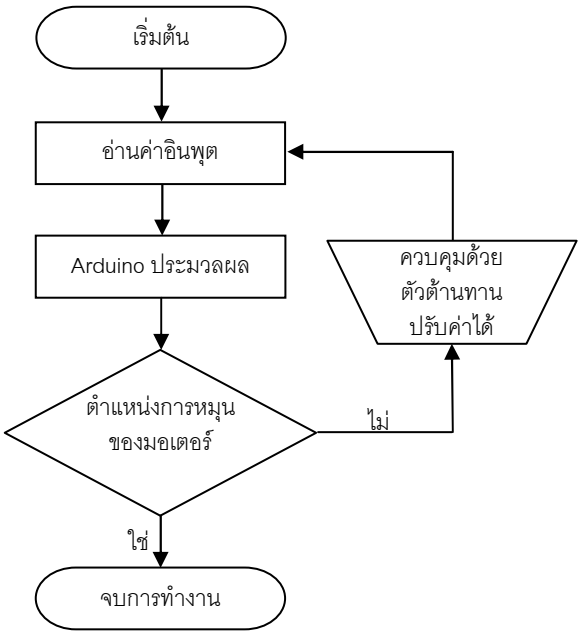
เนื่องจากในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามาเกี่ยวข้องกับการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น โดยที่ หุ่นยนต์สามารถแบ่งเบาภาระในงานอุตสาหกรรม เพิ่มความสะดวกสบาย ใช้ทำงานที่เสี่ยงอันตราย ทางการทหาร ด้านกู้ภัย หรือแม้กระทั่งสร้างหุ่นยนต์สำหรับเป็นเพื่อนกับมนุษย์ โดยหัวใจสำคัญในการสร้างหุ่นยนต์นั้นมีสองเรื่องคือ 1. ส่วนของกลไกการทำงาน 2. ส่วนที่มีหน้าที่ควบคุมโดยทั้งสองส่วน จะต้องทำงานสอดคล้องกันหุ่นยนต์จึงจะมีประสิทธิภาพ โดยหุ่นยนต์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการใช้งาน คือ 1. หุ่นยนต์ชนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปไหนได้ด้วยตัวเอง มีลักษณะเป็นแขนกลสามารถขยับและเคลื่อนไหวได้เฉพาะแต่ละข้อต่อภายในตัวมักนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานประกอบรถยนต์ 2. หุ่นยนต์ชนิดที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile Robot) หุ่นยนต์ประเภทนี้จะแตกต่างจากหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่กับที่เพราะสามารเคลื่อนที่ไปมาได้ด้วยตัวเองโดยการใช้ล้อหรือการใช้ขา [1]

แต่เนื่องด้วยปัจจุบันเป็นยุคของอุตสาหกรรม หุ่นยนต์ชนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ จึงมีความจำเป็นอย่างมากในงานอุตสาหกรรมในการนำเทคโนโลยีแขนกลมาใช้เพื่อเพิ่มผลิตและทางการทหารด้านการกู้ภัยจึงต้องซื้อแขนหุ่นยนต์สำเร็จรูป ซึ่งจะมีราคาค่อนข้างสูงและอุปกรณ์บางส่วนก็ใช้ต้นทุนเกินความจำเป็น เช่น ไมโครคอนโทรเลอร์ที่มีราคาสูง มอเตอร์ และ ไฮดรอลิก เป็นต้นแต่มีองค์กรหลายองค์กรพยายามใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำส่วนของกลไกการทำงานที่ราคาถูก เช่น เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ที่มีคุณสมบัติมีแรงบิดสูง หมุนในตำแหน่งองศาที่แม่นยำและใช้พลังงานต่ำ ในทฤษฎีเซอร์โวมอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่รับสัญญาณพัลส์ดิจิตอลเป็นการควบคุม การหมุนแต่สัญญาณดิจิตอลที่ได้จากเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ยังไม่มีความเสถียรพอทำให้เซอร์โวมอเตอร์มีอาการสั่น และส่งผลให้การสร้างแขนกลด้วยเซอร์โวมอเตอร์ ยังไม่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งมีบริษัทมากมายที่สร้างไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อการแข่งขันทางการตลาดนั้นได้เกิดขึ้นมามากมาย โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดเล็กและราคาถูกที่ผลิตโดย บริษัท Atmel ซึ่งเหมาะกับงานหลายด้าน และโปรแกรมที่ใช้ควบคุมไม่มีความซับซ้อนเหมือนไมโครคอนโทรลเลอร์แบบเก่า

คณะผู้จัดทำจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์Arduino นำมาแก้ไขและปรับปรุงปัญหาแขนกลที่ทำด้วยเซอร์โวมอเตอร์ที่มีอาการสั่นและพัฒนาความสามารถของแขนกลในด้านต่าง ๆ เพื่อส่งผลในเรื่องของความแม่นยำในการควบคุมระบบและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในอนาคตต่อไป [1-2]

หลักการทำงานเบื้องต้นของแขนกล

หลักการทำงานเบื้องต้น



รูปที่ 1 Flowchart การทำงานของแขนกล

เมื่อเริ่มเปิดเครื่อง Arduino จะทำการรับแรงดันจากการปรับค่าด้วย ตัวต้านทานปรับค่าได้มาไปประมวลผล เพื่อนำมาเป็นค่าเริ่มต้นของชุดคำสั่ง หลังจาก Arduino ประมวลผลค่าอินพุตที่ได้รับแล้ว Arduino ก็จะทำการประมวลเงื่อนไขของคำสั่งที่เขียนไว้ ส่งสัญญาณเอาต์พุตออกมาเพื่อเป็นสัญญาณในการควบคุมเวอร์โวมอเตอร์ และเมื่อต้องการให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปในทิศทางที่ต้องการ ก็สามารถปรับตัวต้านท่านปรับค่าได้อีกครั้ง โดยแสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 1

ไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino

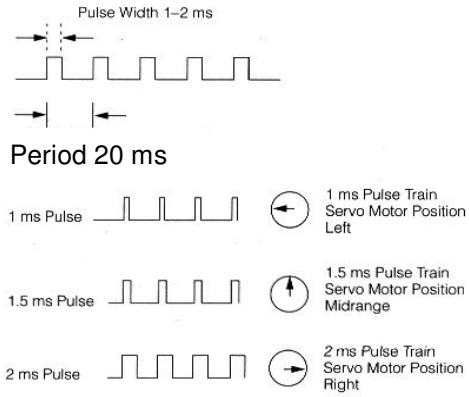
Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ AVR ขนาดเล็กเป็นตัวประมวลผลและสั่งงาน เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาเรียนรู้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และ นำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการควบคุมอุปกรณ์ Input / Output ต่าง ๆ ได้มากมาย ทั้งในแบบที่เป็นการทำงานตัวเดียวอิสระ หรือ เชื่อมต่อสั่งงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ PC ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่า Arduino สนับสนุนการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Input / Output ต่าง ๆ ได้มากมายทั้งแบบ Digital และ Analog เช่น การรับค่าจากสวิตซ์ หรือ อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) แบบต่าง ๆ รวมไปถึง การควบคุมอุปกรณ์ Output ต่าง ๆ ตั้งแต่ LED หลอดไฟ เซอร์โวมอเตอร์ รีเลย์ ฯลฯ โดยระบบฮาร์ดแวร์ของ Arduino สามารถสร้างและประกอบขึ้นใช้งานได้เอง โดย Arduino มีจุดเด่น ในเรื่องของความง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรมและมีเอกสารข้อมูลรวมทั้งตัวอย่างต่าง ๆ ให้ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเรียนรู้เป็นจำนวนมาก

เนื่องจาก Arduino เป็นระบบการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Open Source ซึ่งมีการตีพิมพ์เอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องออกมาเผยแพร่ให้ได้รับรู้เป็นระยะ ๆ รวมทั้งการเปิดเผย Source Code และตัวอย่างต่าง ๆ ให้ผู้ใช้และนำไปศึกษาทดลองใช้งานกันมากมาย [3] โดยบอร์ด Arduino มีลักษณะดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino ATMEGA32-16PU

หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

การควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ทำได้โดย การป้อนสัญญาณความกว้างพัลส์ ให้กับเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งตำแหน่งและทิศทางการหมุนรอบของเซอร์โวมอเตอร์จะแปรผันตามขนาดของความกว้างพัลส์นั้น ๆ โดยทั่วไปแล้วความกว้างของสัญญาณพัลส์จะมีจุดให้อ้างอิง 3 จุด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์

จะเห็นได้ว่าสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์นั้น จะมีค่าความถี่คงที่กับ 50 Hz. โดยมีคาบเวลาของสัญญาณ 20 ms. โดยการปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์ นั้นจะใช้การปรับค่าความกว้างของพัลส์ที่เป็น HIGH ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ms. ถึง 2.0 ms. โดยประมาณ โดยค่าความกว้างพัลส์ LOW และ HIGH รวมกันแล้วจะมีค่าเท่ากับ 20 ms. พอดี ซึ่งถ้าคิดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์ เป็น 90° จะได้ว่า

สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1.5 ms. จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของการเคลื่อนที่ หรือ มุม 0°

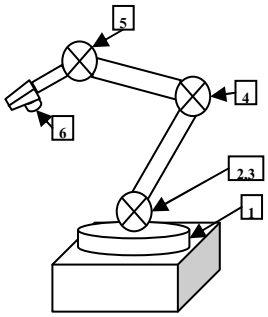
สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1.0 ms. จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งซ้ายสุดของการเคลื่อนที่ หรือมุม –90° ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 2.0 ms. จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งขวาสุดของการเคลื่อนที่ หรือมุม +90° ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ส่วนการที่จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนเป็นมุมอื่น ๆ นั้นก็สามารถทำได้โดยการปรับค่าพัลส์ให้สัมพันธ์กับตำแหน่งหมุนที่ต้องการ เช่น ถ้าต้องการให้หมุนไปที่มุม – 45° เราก็จะต้องป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 1.25 ms. เป็นต้น และสัญญาณพัลส์นี้จะต้องจ่ายให้เซอร์โวมอเตอร์ทุก ๆ 20 ms. (Period) เพื่อรักษาสภาพตำแหน่งไว้ โดยหลักการทำงานของเซอร์โว-มอเตอร์ จะอาศัยการเปรียบเทียบช่วงเวลาของความกว้างพัลส์ที่จ่ายให้กับเซอร์โวมอเตอร์ทางขาสัญญาณควบคุม กับค่าเวลาของวงจร RC ของบอร์ดควบคุมในตัวของเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งค่าเวลาของวงจร RC นี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ เนื่องจากตัวต้านทานปรับค่าของจงจร RC ภายในตัวเซอร์โวมอเตอร์จะถูกยึดติดอยู่กับแกนหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ เมื่อเซอร์โวมอเตอร์หมุนจะทำให้ค่าความต้านทางเปลี่ยนแปลงเป็นผลทำให้ค่าเวลาของวงจร RC ภายในเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยโดยขณะที่เราป้อนสัญญาณพัลส์ให้กับเซอร์โวมอเตอร์ทางขาสัญญาณควบคุมนั้น สัญญาณพัลส์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเวลาของวงจร RC ถ้าค่าทั้ง 2 ไม่เท่ากันเซอร์โวมอเตอร์ก็จะหมุนจนค่าของตัวต้านทานเปลี่ยนแปลงแล้วทำให้ค่าเวลาของวงจร RC เท่ากับสัญญาณพัลส์ทางขาควบคุม (Control -line) เซอร์โวมอเตอร์จึงจะหยุดหมุน[3]

โครงสร้างแขนกล

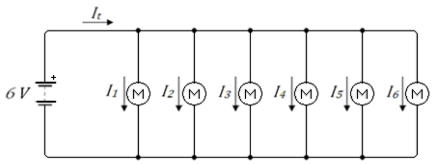
แขนกลจะมีส่วนเคลื่อนไหวหลายตำแหน่งจึงจำเป็นต้องจำแนกตำแหน่งการวางเซอร์โวมอเตอร์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างแขนกลและตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์

การคำนวณหากระแสการใช้งานของแขนกล

การคำนวณเพื่อหา กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมกับแขนกล โดยการต่อแขนกลเป็นการต่อแบบวงจรขนาน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การต่อเซอร์โวมอเตอร์แบบวงจรขนาน

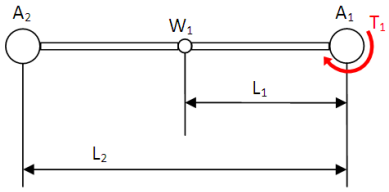
เซอร์โวมอเตอร์ใช้กระแสไฟฟ้าขณะทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 6 V. ประมาณ 0.45-0.5 A. ซึ่งแขนกลใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นตัวเคลื่อนไหวของแขนกลจำนวน 6 ตัว จะได้กระแสไฟฟ้าทั้งวงจรดังต่อไปนี้

$$I_t = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (1)$$

จากการคำนวณ จะได้ $I_t \approx 2.7 - 3A$

การคำนวณหาน้ำหนักของวัตถุที่แขนกลยกได้

การคำนวณหาน้ำหนักของวัตถุที่แขนกลสามารถจับหรือยกขึ้นได้นั้น จะใช้ทฤษฎีเรื่องแรงและกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน โดยใช้พิจารณาการคำนวณแรงบิดเพื่อหาน้ำหนักของวัตถุ ดังรูปที่ 6 [4-6]



รูปที่ 6 การคำนวณหาแรงบิด

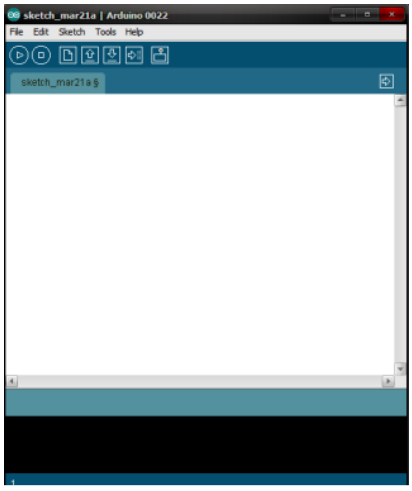
จากภาพที่ 6 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$T_1 = (L_2 \times A_2) + (L_1 \times W_1) \quad (2)$$

โปรแกรมเขียนคำสั่งที่ใช้ในการควบคุม

Arduino มีการพัฒนาภาษาที่ใช้ในการควบคุมเพื่อความเข้าใจง่ายและกะทัดรัด และ ในพื้นที่คอนโซล ข้อความแถบเครื่องมือสำหรับการทำงานร่วมกันและชุดเมนู สามารถเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ Arduino ที่จะทำการอัพโหลดโปรแกรมได้

ซอฟท์แวร์เขียนโดย Arduino จะเรียกว่า สเกตซ์ (Sketch) ดังรูปที่ 7 สเกตซ์เหล่านี้สามารถเขียนใหม่ แก้ไข หรือเขียนแทนที่ได้ พื้นที่ส่วนคอนโซลให้จะความคิดเห็น (Comment) แสดงสถานะหรือแสดงข้อผิดพลาดคอนโซล จะแสดงผลข้อความตามสถานะ Arduino รวมทั้งข้อความ ผิดพลาดที่สมบูรณ์และข้อมูลอื่น ๆ



รูปที่ 7 หน้าโปรแกรม Arduino Alpha

คำสั่งที่ใช้ควบคุม

เป็น Source Code ที่ควบคุมแขนกล

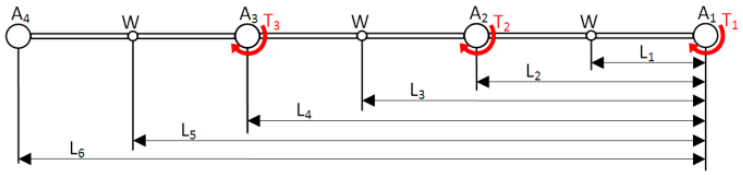
```
#include <Servo.h>
Servo servo1;
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;
Servo servo5;
Servo servo6;
int val1=0;
int val2=1;
int val3=2;
int val4=3;
int val5=4;
int val6=5;
void setup()
{
```

```
servo1.attach(2);
servo2.attach(3);
servo3.attach(4);
servo4.attach(5);
servo5.attach(6);
servo6.attach(7);
}
void loop()
{
val1= analogRead(0);
val1 = map(val1, 0, 1023, 0, 179);
servo1.write(val1);
val2= analogRead(1);
val2 = map(val2, 0, 1023, 0, 179);
servo2.write(val2);
val3= analogRead(2);
val3 = map(val3, 0, 1023, 0, 179);
servo3.write(val3);
val4= analogRead(3);
val4 = map(val4, 0, 1023, 0, 179);
servo4.write(val4);
val5= analogRead(4);
val5 = map(val5, 0, 1023, 0, 179);
servo1.write(val5);
val6= analogRead(5);
val6 = map(val6, 0, 1023, 0, 179);
servo6.write(val6);
}
delay(15);
```

ผลการทดลอง

การทดลองความสามารถในการยกวัตถุ

การทดลองนี้เป็นการแสดงขีดจำกัดของแขนกลเซอร์โว-มอเตอร์ จากการคำนวณดังสมการที่ 4 จะได้การจำลองดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การคำนวณหาน้ำหนักของวัตถุที่แขนกลสามารถยกได้

$T_1 =$ แรงบิดของเซอร์โวมอเตอร์ (3)

ยี่ห้อ TowerPro รุ่น MG995 จำนวน 2 ตัว

$$=(10\text{kg./cm.})\times 2$$

$$=20\text{kg./cm.}$$

$$A_4=\frac{T_1-(L_5\times W_3)-(L_4\times A_3)-(L_3\times W_2)-(L_2\times A_2)-(L_1\times W_1)}{L_6} \quad (4)$$

$$=\frac{20-(46\times 0.001)-(40\times 0.055)-(30\times 0.001)-(20\times 0.055)-(10\times 0.001)}{52}$$

$$=0.3195\text{ kg.}$$

จากการคำนวณสามารถหาค่าน้ำหนักที่แขนกลสามารถยกได้เท่ากับ 0.3195 kg. หรือ 319.5 g. โดยการยกวัตถุให้สูงจากพื้นประมาณ 20 cm. และเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 50 g. ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงความสามารถในการยกวัตถุ

น้ำหนักของวัตถุ / ครั้งที่	50 g.	100 g.	150 g.	200 g.	250 g.	300 g.	350 g.	400 g
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×

ผลการทดลอง ความสามารถในการยกวัตถุ แขนกลสามารถยกวัตถุที่มีน้ำหนักได้ประมาณ 300 – 350 g. เนื่องจากเซอร์โวมอเตอร์รับน้ำหนักของส่วนแขน จึงเกิดการลดทอนของน้ำหนักที่แขนสามารถรับ น้ำหนักได้

การทดลองความสามารถในการเคลื่อนย้ายวัตถุ

การทดลองนี้เป็นการแสดงประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายวัตถุที่มีน้ำหนักประมาณ 85% ของน้ำหนักของวัตถุที่แขนกลสามารถยกได้สูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.1 โดยเคลื่อนย้ายวัตถุไปในทิศทางตรงข้ามหรือ 0๐ – 165๐ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงความสามารถในการเคลื่อนย้ายวัตถุ

ครั้งที่	ผ่าน	ไม่ผ่าน
1	✓	–
2	✓	–
3	✓	–
4	✓	–
5	✓	–

ผลการทดลอง ความสามารถในการเคลื่อนย้ายวัตถุ น้ำหนักสูงสุดจาก ผลการทดลองที่ 3.1 เหลือเพียง 85% หรือน้ำหนักไม่เกิน 300 g. ทำให้แขนกลสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุป

Arduino มีรูปแบบภาษาควบคุมที่เข้าใจง่ายในส่วนของ โครงสร้างของโปรแกรม การกำหนดตัวแปร การกำหนดเงื่อนไข และคำสั่งสำเร็จรูป ทำให้ใช้หน่วยความจำน้อยส่งผลให้ Arduino สามารถรับคำสั่งได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอื่นๆ

Arduino สามารถให้สัญญาณพัลส์เอาต์พุต เพื่อควบคุมเซอร์โว-มอเตอร์ได้จริงและไม่เกิดอาการสั่นขณะเคลื่อนไหว

โครงสร้างทางกลศาสตร์มีขนาดที่ยาวเกินความสามารถของแรงบิดเซอร์โวมอเตอร์ที่จะรับน้ำหนักได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการยกวัตถุลดลง

เอกสารอ้างอิง

[1] โกวิท โชวสุวรรณ. คู่มือนักสร้างหุ่นยนต์ควบคุมด้วยเบสิกแสตมป์. กรุงเทพมหานคร : บริษัท วี.พริ้นต์ (1991) จำกัด, 2550.

[2] ภควัต รักศรี. หุ่นยนต์อุตสาหกรรมประเภทต่างๆ. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา : http://www.coe.or.th/e_engineer/knc_detail.php?>id=87 [2555, มกราคม 11]

[3] เอกชัย มะการ. เรียนรู้และเข้าใจใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล AVR ด้วย Arduino. กรุงเทพมหานคร: บริษัท อีทีที จำกัด, 2552.

[4] วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และรัชทิน จันทร์เจริญ. ระบบควบคุมเชิงเส้น. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด, 2545.

[5] สุรศักดิ์ แก้วอ่อน. ฟิสิกส์พื้นฐานภาคกลศาสตร์. นครศรีธรรมราช : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.

[6] อนันตสิน เตชะกำพุช, พิศิษฐ์ รัตนวรารักษ์ และพรชัย พัชรินทร์ตนะกุล. ฟิสิกส์1. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.