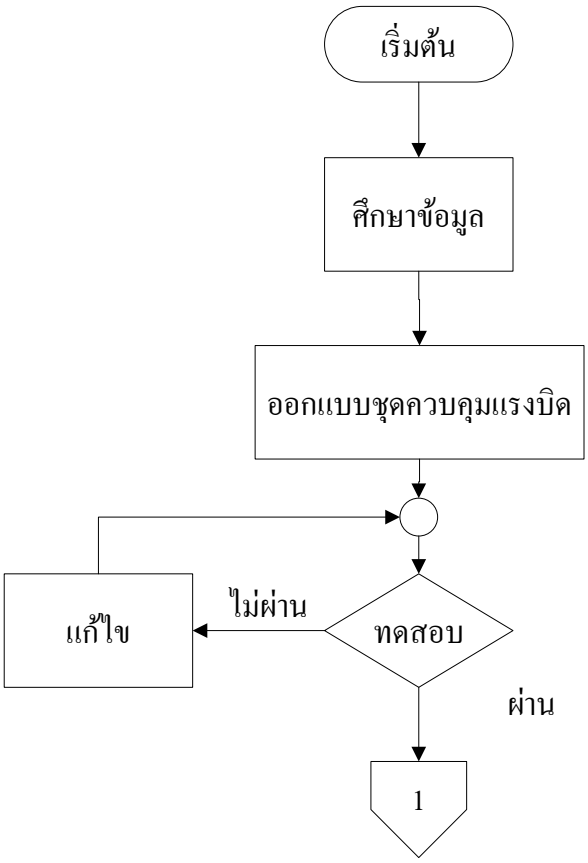
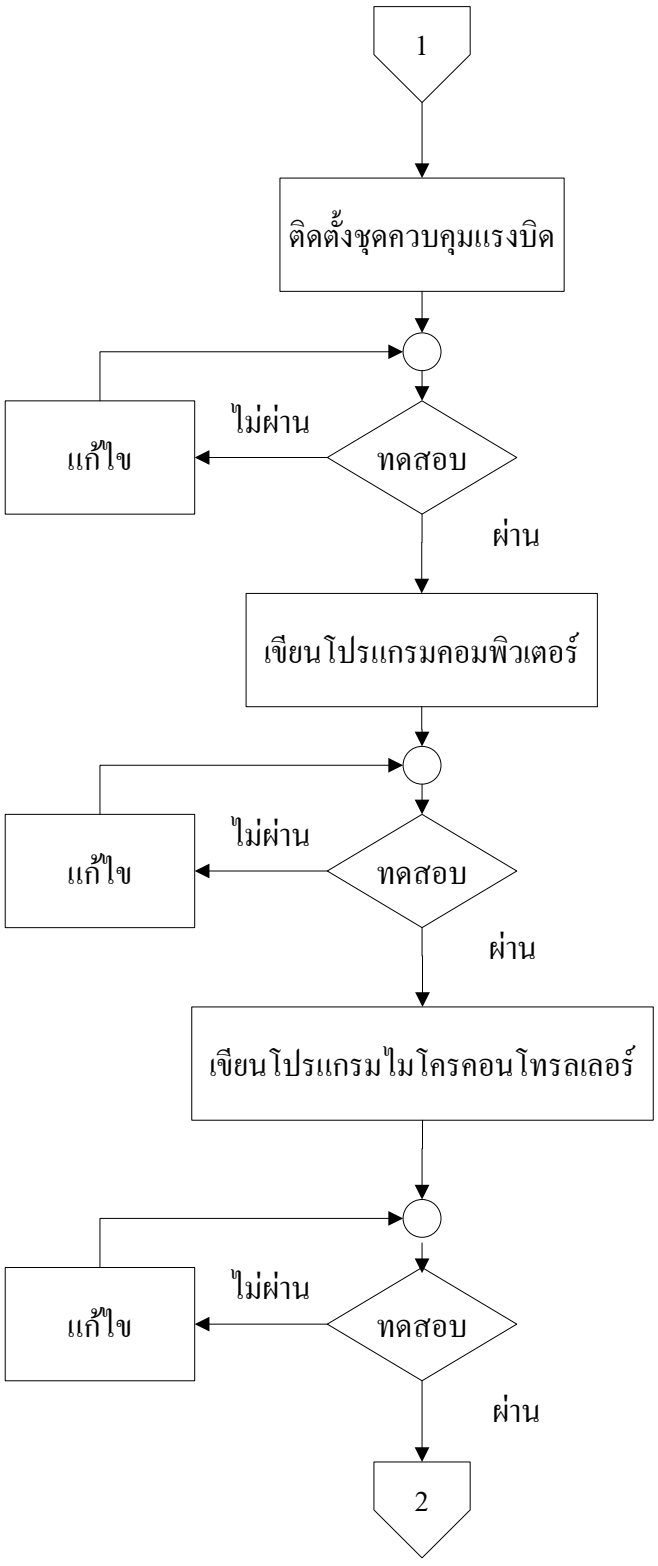
บทที่ 3
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

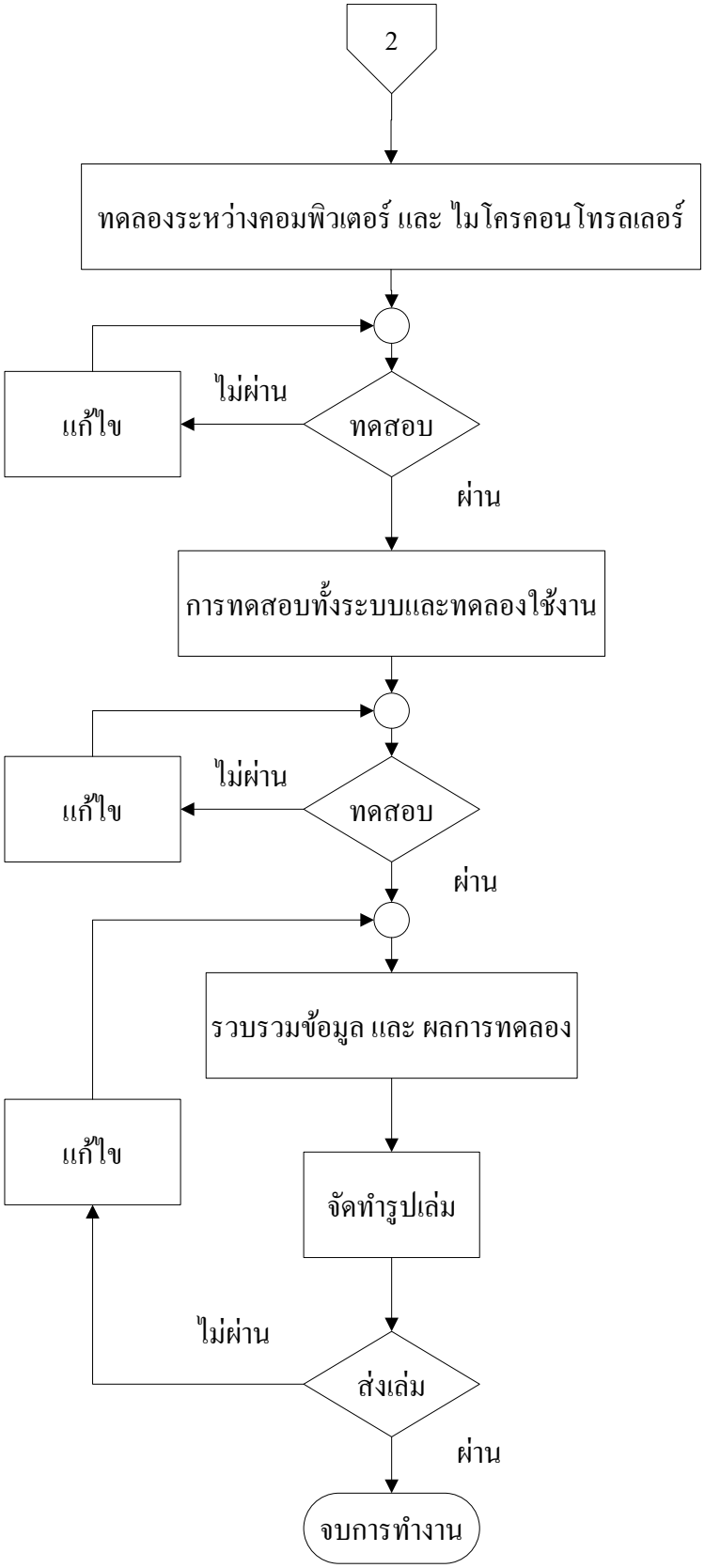
จากทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง การพัฒนาหุ่นยนต์ขันสกรู 4 และควบคุมแรงบิดในการขันสกรู โดยใช้การผสมการป้อนกลับของแรงและภาพ ได้นำเอาโครงงานเก่ามาปรับปรุงใหม่เพื่องานขันสกรู 4 แกนอัตโนมัติให้มีการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยใช้สเตรนเกจ (Strain Gauge) เข้ามาควบคุมแรงบิดและร่วมกับสัญญาณป้อนกลับจากกล้อง ซึ่งจะมีความฉลาดมากยิ่งขึ้น ในการทำงานจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับคนโดยมีแผนผังการดำเนินงานตามขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานของโครงงาน



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานของโครงงาน (ต่อ)



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานของโครงงาน (ต่อ)

3.1 การศึกษาข้อมูล

3.1.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

3.1.1.1 UART0 (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter 0: UART0)

โครงงานนี้ใช้พอร์ต UART0 ติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ โดยใช้คอนเน็กเตอร์ (Connector) แบบ DB9 ส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม RS 232 มีสายสัญญาณ 3 เส้นคือ TXD (Serial Transmit Data), RXD (Serial Receive Data) และ GND (Ground) และในโครงงานนี้จะใช้ค่า Baud Rate เท่ากับ 9600 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในการส่งข้อมูล

3.1.1.2 Timer/Counter Timer0 and Timer1

ในโครงงานนี้ใช้ Timer0 และ Timer1 ซึ่งเป็น Timer 32 bit ในการกำเนิดสัญญาณ (Pulse Width Modulation : PWM) ควบคุมความเร็วมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวโดยจะใช้ความถี่ของ PWM น้อยสุดในการควบคุม 5 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) และสูงสุด 20 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) และค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ขึ้นอยู่กับการควบคุม สามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 – 100 เปอร์เซ็นต์

3.1.1.3 GPIO (General Purpose Input/Output Port)

GPIO เป็นการส่งสัญญาณ ON/OFF ควบคุมส่วนต่างๆในโครงงานนี้จะใช้งานโหมดนี้ในการเลือกทิศทางให้กับมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว และยังใช้ในการสั่งจ่ายไฟตรง 24 โวลท์ให้กับชุดควบคุมเอซีเซอร์โวมอเตอร์(AC Servo Motor) อีกด้วย

ภาพที่ 3-2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 เบอร์ LPC2103

3.1.2 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการป้อนกลับของภาพ (Visual Feedback)

3.1.2.1 กระบวนการประมวลผลภาพ (Image Processing)

ในการประมวลผลภาพของหุ่นยนต์ 4 แกนขันสกรูอัตโนมัติใช้ชุดคำสั่ง Open CV ช่วยในการหาองศาของสกรู หลักการของกระบวนการประมวลผลภาพเพื่อป้อนกลับ

มายังหุ่นยนต์ขันสกรูอัตโนมัติ เมื่อรับภาพจากกล้อง (Charge Coupled Device : CCD) มาแล้ว จะทำการประมวลผลภาพก่อนที่จะส่งสัญญาณป้อนกลับเป็นองศาของสกรู เพื่อให้ภาพที่ได้ออกมานั้นมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากขึ้นก่อนที่หุ่นยนต์จะตัดสินใจขันสกรู โดยมีวิธีการประมวลผลภาพเพื่อหาองศาของสกรูคือ

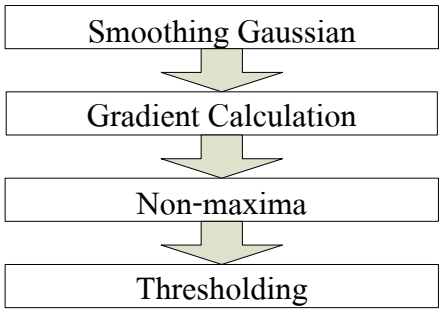
3.1.2.2 การค้นหาขอบภาพด้วยแคนนี่ (Canny Enhancement)

การหาขอบภาพ คือ การตรวจสอบว่าเส้นขอบลากผ่านหรือใกล้เคียงกับจุดใด โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดดังกล่าว ซึ่งวิธีการหาขอบนั้นมีด้วยกันหลายวิธี โดยในงานหาขอบของสกรูได้เลือกวิธีแคนนี่ในการหาขอบภาพเนื่องจากวิธีดังกล่าวมีการใช้ Gaussian Filter ก่อนการหาขอบจึงสามารถควบคุมระดับความละเอียดของขอบที่ต้องการ และสามารถลดสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย ตัวอย่างภาพที่ผ่านการหาขอบของสกรูดังภาพที่ 3-3 ด้วยวิธีแคนนี่ จะให้รายละเอียดขอบสกรูได้เด่นชัด

ภาพตั้งต้น Canny

ภาพที่ 3-3 ตัวอย่างการหาขอบของสกรูด้วยวิธีการหาขอบแบบแคนนี่

ขั้นตอนการค้นหาขอบภาพโดยวิธีของแคนนี่ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ขั้นตอนการหาขอบภาพโดยวิธีของแคนนี่

โดยวิธีการทำงานของหาขอบภาพด้วยวิธีแคนนี่ ในแต่ขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

-การขจัดอุปสรรค (Smoothing) ในขั้นตอนแรกของการหาขอบโดยอัลกอริทึม (algorithm) นี้จะต้องกำจัดสัญญาณรบกวนออกก่อนโดยใช้ตัวกรองเกาส์เซียน (Gaussian Filter) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการใช้กรอบ (Mask) ขนาดเล็ก ขนาดของกรอบเกาส์เซียน (Gaussian Mask) นี้หากมีขนาดกว้างจะมีผลทำให้ลดสัญญาณรบกวนได้มาก แต่ถ้ากว้างมากเกินไปจะมีผลทำให้ขอบย่อยๆ ที่เป็นส่วนรายละเอียดนั้นหายไป

-การคำนวณความลาดชัน (Gradient Calculation) ในขั้นแรกนำภาพที่ราบเรียบ (Smoothing Image) มาสร้าง X,Y อนุพันธ์ย่อย หลังจากนั้นนำค่า X,Y อนุพันธ์ย่อย มาคำนวณด้วยสูตรมาตรฐานเพื่อใช้สำหรับการแปลงรูปแบบจากเร็คแทนกูล่าร์ไปเป็นโพลา (Rectangular to Polar Conversion) เพื่อหาขนาดและทิศทางของความลาดชัน

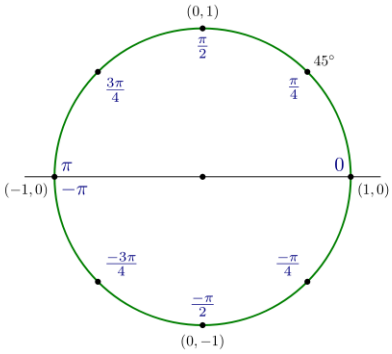
-การปรับจุดที่มีค่าไม่สูง (Nonmaxima Suppression) สำหรับการหาขอบโดยแคนนี่แมตท็อด (Canny Method) จุดที่ถือเป็นเส้นขอบได้นั้นต้องเป็นจุดที่ให้ค่าสูงสุดเฉพาะที่และเป็นทิศทางเดียว กับแกรเดียนด้วย ซึ่งด้วยวิธีดังกล่าวนี้ทำให้ได้ขอบที่บางเพียง 1 พิกเซล ภาพที่ได้หลังการปรับจุดที่มีค่าไม่สูง จะให้ค่าเป็นศูนย์ในทุกจุดยกเว้นจุดที่เป็นค่าสูง (Local Maxima Points) ซึ่งจะยังคงค่าเดิมไว้

-การลดสัญญาณรบกวนด้วยการประมาณค่าจุดเปลี่ยน (Thresholding) แม้ว่าภาพจะผ่านการขจัดอุปสรรค ในขั้นตอนแรกแล้วก็ตาม ภาพที่ได้อาจยังมีเส้นขอบที่ไม่ใช่ขอบที่แท้จริงปรากฏอยู่อันเนื่องจากสัญญาณรบกวนหรือลักษณะของวัตถุในภาพเป็นพื้นผิวที่มีลวดลาย หรือ มีรายละเอียดภายในมาก ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการกำหนดค่าการลดสัญญาณรบกวนด้วยการประมาณค่าจุดเปลี่ยน (Threshold) ขึ้นมา 2 ค่า คือ High Threshold (T1) และ Low Threshold (T2) โดยพิกเซลที่มีค่ามากกว่า T1 จะถูกปรับเป็น 1 (เป็นพิกเซลที่เป็นขอบ) แต่ถ้าน้อยกว่า T2 จะถูกปรับเป็น 0 ส่วนค่าที่อยู่ระหว่างค่าการประมาณค่าจุดเปลี่ยน ทั้งสอง การปรับเป็นค่า 0 หรือ 1 นั้นขึ้นอยู่กับพิกเซลที่อยู่รอบข้าง หากพบว่าพิกเซลที่อยู่รอบข้างของพิกเซลที่เป็นขอบ (ค่า มากกว่า T1) มีค่ามากกว่า T2 แล้ว จะปรับค่าพิกเซลดังกล่าวให้มีค่าเป็น 1 และถือเป็นสมาชิกหนึ่งในภาพขอบด้วยเช่นกัน

3.1.2.3 การหาองศาของสกรูด้วยฟังก์ชั่น ATAN

ในตรีโกณมิติ ฟังก์ชั่น ATAN คือการนำค่าอาร์กิวเมนต์สองค่า มาทำให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชั่น Arctangent กำหนดโดยพิกัด (X,Y) โดยจะระบุ Arctangent เป็นมุมจากแกน X

ถึงเส้นที่มีจุดเริ่มต้น (0, 0) ค่าของ ATAN ที่จุดที่เลือกในวงกลม ค่ามุมจะปรากฏภายในวงกลม สี่จุด (1, 0), (0, 1), (-1, 0) และ (0,-1) ในการเขียนฟังก์ชันจะอยู่ในรูปของ ATAN (Y,X)



ภาพที่ 3-5 ค่าของ ATAN ที่จุดที่เลือกในวงกลม

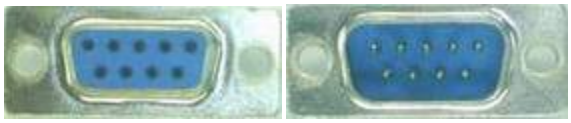
3.1.2.4 กระบวนการป้อนกลับองศาผ่านพอร์ตอนุกรม (Serial Port)

ในการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมข้อมูลถูกส่งออกมาทีละบิต ระหว่างจุดส่งและจุดรับ การส่งข้อมูลแบบอนุกรมข้อมูลจากจุดส่งจะถูกเปลี่ยนให้เป็นอนุกรมเสียก่อนแล้วค่อยทยอยส่งออกทีละบิตไปยังจุดรับ ณ ที่จุดรับจะต้องมีกลไกในการเปลี่ยนข้อมูลที่ส่งมาทีละบิต ให้เป็นสัญญาณแบบขนานที่ลงตัวพอดี นั่นคือ บิต 1 ลงที่บัสข้อมูลเส้นที่ 1 พอดี การที่จะทำให้การแปลงสัญญาณจากอนุกรมทีละบิตให้ลงตัวพอดีนั้นจำเป็นจะต้องมีกลไกที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการผิดพลาดในการรับ

การสื่อสารแบบอนุกรมนั้น มีความสำคัญต่อการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์มาก เพราะสามารถใช้แป้นพิมพ์ และจอภาพของคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะเป็นอินพุต (Input) และเอาต์พุต (Output) ในการติดต่อหรือควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยสัญญาณอย่างน้อยเพียง 3 เส้นเท่านั้น คือ

- สายส่งสัญญาณ TX
- สายรับสัญญาณ RX
- สาย GND

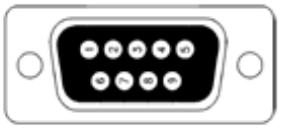
สำหรับพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะจะเป็นคอนเน็คเตอร์แบบ DB9 ตัวผู้ (Male) ส่วนพอร์ตอนุกรมของอุปกรณ์ภายนอก จะเป็นคอนเน็คเตอร์แบบ DB9 ตัวเมีย (Female) ดังภาพที่ 3-6



DB9 ตัวผู้ DB9 ตัวเมีย

ภาพที่ 3-6 พอร์ตอนุกรม DB9 ตัวผู้ และ DB9 ตัวเมีย

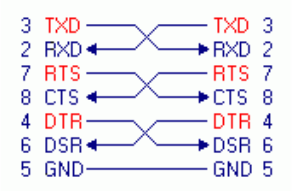
3.1.2.5 การจัดขาเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรมแบบ DB9 และหน้าที่การใช้งานต่างๆ



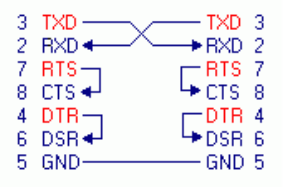
ภาพที่ 3-7 พอร์ตอนุกรม DB9 ตัวผู้เมื่อมองจากด้านหลัง

ตารางที่ 3-1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย DB9

ขา	Description	Type
1	Data Carrier Detect (DCD)	Input
2	Received Data (RXD)	Input
3	Transmitted Data (TXD)	Output
4	Data Terminal Ready (DTR)	Output
5	Signal Ground (GND)	Input
6	Data Set Ready (DSR)	Input
7	Request To Send (RTS)	Output
8	Clear to Send (CTS)	Input
9	Ring Indicator (RI)	Input



การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกผ่าน DB9 แบบ Null modem



การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกผ่าน DB9 แบบ 3 เส้น

ภาพที่ 3-8 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกผ่าน DB9 แบบ Null modem และแบบ 3 เส้น

การทำงานของขาสัญญาณ DB9

ตารางที่ 3-2 หน้าที่ของการทำงานของแต่ละขา

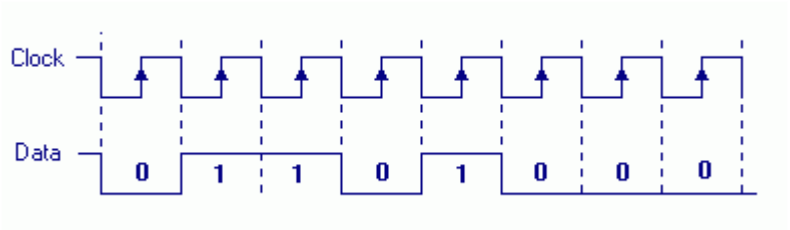
TXD	เป็นขาที่ใช้ส่งข้อมูล
RXD	เป็นขาที่ใช้รับข้อมูล
DTR	แสดงสภาวะพอร์ตว่าเปิดใช้งาน
DSR	ตรวจสอบว่าพอร์ตที่ติดต่อด้วยเปิดอยู่หรือไม่
RTS	แสดงสภาวะพอร์ตว่าต้องการส่งข้อมูล
CTS	ตรวจสอบว่าพอร์ตที่ติดต่ออยู่ต้องการส่งข้อมูลหรือไม่
GND	ขากราวด์

3.1.2.6 รูปแบบการสื่อสารแบบ

การสื่อสารแบบอนุกรมมีด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือแบบซิงโครนัส (Synchronous) และ แบบอะซิงโครนัส (Asynchronous)

- การสื่อสารแบบซิงโครนัส

การรับส่งข้อมูลของการสื่อสารแบบซิงโครนัส จะมีสัญญาณนาฬิกา ซึ่งเป็นตัวกำหนดจังหวะเวลาการส่งข้อมูลร่วมอยู่ด้วยอีกเส้นหนึ่งใช้คู่กับสัญญาณข้อมูลตัวอย่าง เช่น การส่งสัญญาณจากคีย์บอร์ด

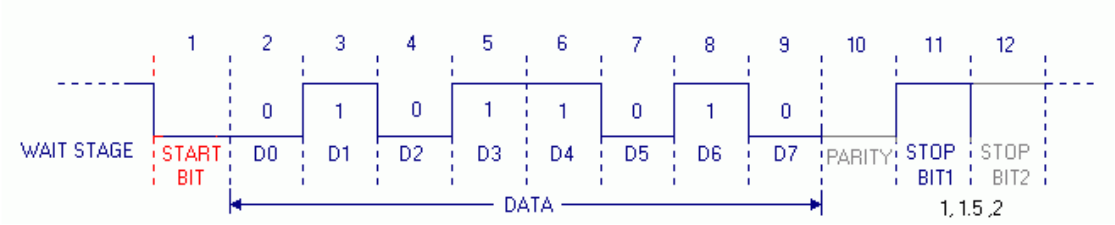


ภาพที่ 3-9 การรับส่งข้อมูลของการสื่อสารแบบซิงโครนัส

- การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

การรับส่งข้อมูลของการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิการ่วมด้วย แต่จะใช้ให้ตัวส่งและตัวรับมีอัตราส่งข้อมูลที่เท่ากันรูปแบบข้อมูลแบบอะซิงโครนัส ประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- บิตเริ่มต้น (Start bit) มีขนาด 1 บิต
- บิตข้อมูล (Data) มีขนาด 5,6,7 หรือ 8 บิต
- บิตตรวจสอบพาริตี้ (Parity bit) มีขนาด 1 บิตหรือไม่มี
- บิตหยุด (Stop bit) มีขนาด 1, 1.5, 2 บิต



ภาพที่ 3-10 การรับส่งข้อมูลของการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

เมื่อไม่มีการส่งข้อมูล ขา DATA จะมีสถานะเป็นลอจิก "1" หรือ สถานะหยุดรอ (Waiting Stage) เมื่อเริ่มต้นส่งข้อมูลจะให้ขา DATA เป็นลอจิก "0" เป็นจำนวน 1 บิต เรียกว่าบิตเริ่มต้น (Start Bit) จากนั้นก็จะเริ่มต้นส่งข้อมูล โดยส่งบิตต่ำไปก่อน (LSB) แล้วตามด้วยพาริตี้บิตเพื่อสำหรับตรวจสอบความผิดพลาดจากสื่อสารหรือส่งข้อมูล สุดท้ายตามด้วยโลจิก "1" อย่างน้อย บิต (มีขนาด 1, 1.5, หรือ 2 บิต) เพื่อแสดงว่าสิ้นสุดข้อมูล

การรับและส่งข้อมูลแบบอนุกรมยังแบ่งออกเป็นลักษณะการใช้งานได้ 3 แบบคือ

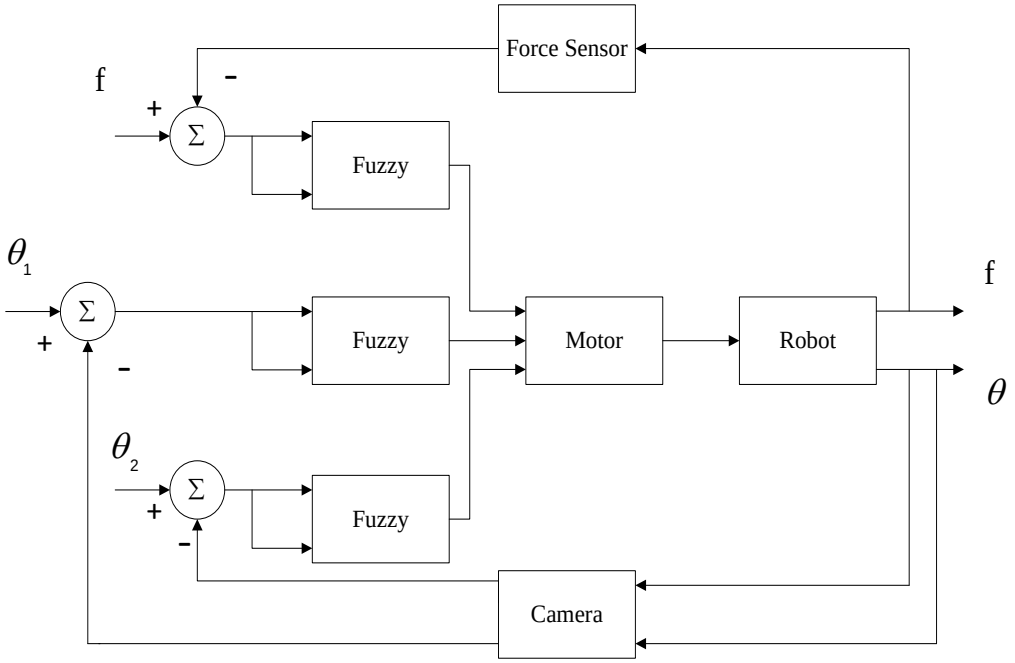
- แบบซิมเพลกซ์ (Simplex) เป็นการส่ง หรือรับข้อมูลแบบทิศทางเดียวเท่านั้น

- แบบฮาล์ฟดูเพลกซ์ (Half Duplex) เป็นการส่งและรับข้อมูลแบบสลับกัน คือเมื่อด้านหนึ่งส่งอีกด้านหนึ่ง เป็นฝ่ายรับ สลับกัน ไม่สามารถรับ-ส่งในเวลาเดียวกันได้

- แบบฟูลดูเพลกซ์ (Full Duplex) สามารถรับ-ส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันได้

3.2 การออกแบบการทำงานของระบบ

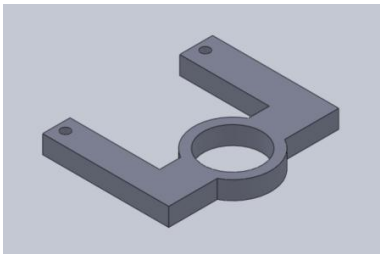
หุ่นยนต์จะรับค่า Set Point จากโปรแกรม และองศาจากกล้องตัวที่ 1 (θ_1), องศาจากกล้องตัวที่ 2 (θ_2) เข้ามาประมวลผลในโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นส่งค่าไปสั่งให้มอเตอร์ทำงาน โดยจะมี สเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นเซ็นเซอร์ (Sensor) วัดแรงบิด และกล้องเพื่อวัดองศาความเอียง โดยโปรแกรมจะทำงานแบบลูปปิด (Close Loop Control) โดยใช้การคำนวณแบบฟัซซี่ (Fuzzy)



ภาพที่ 3-11 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างการทำงานของระบบ

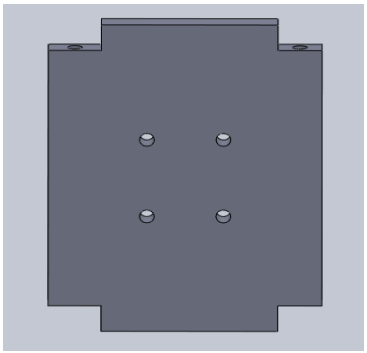
3.3 การออกแบบชุดควบคุมแรงบิด

เนื่องจากต้องการพัฒนาหุ่นยนต์ให้ทำการตรวจวัดแรงบิดได้ จึงได้ทำการเปลี่ยนฐานยึดมอเตอร์ให้สามารถตรวจวัดแรงบิดที่เกิดจากการปีนเกลียวในการขันสกรูได้



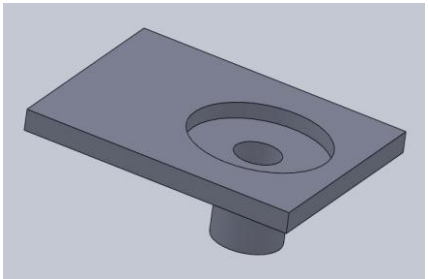
ภาพที่ 3-12 ฐานบนและฐานล่าง

จากภาพที่ 3-12 ฐานบนและฐานล่างเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่รองรับตัวยึดมอเตอร์ จะช่วยทำให้ตัวยึดมอเตอร์อยู่กับที่ โดยจะออกแบบทั้งด้านบน และด้านล่าง



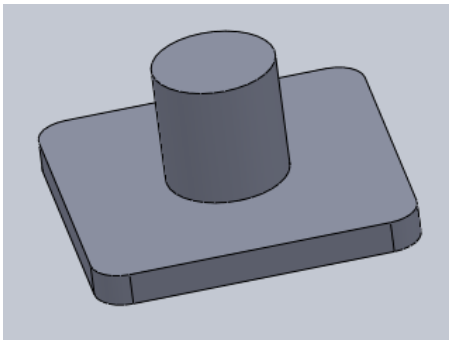
ภาพที่ 3-13 ฐานยึดเอซีเซอร์โวมอเตอร์ (AC Servo Motor) เข้ากับแกน Z

จากภาพที่ 3-13 จะเป็นการออกแบบฐานยึดกับแกน Z เพื่อทำหน้าที่ยึดฐานบนและฐานล่างให้อยู่กับที่



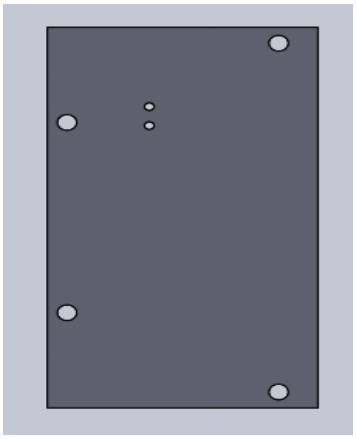
ภาพที่ 3-14 ตัวยึดด้านล่างมอเตอร์

จากภาพที่ 3-14 ตัวยึดด้านล่างมอเตอร์ชิ้นส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ติดอยู่กับมอเตอร์ ทำหน้าที่กดเซนเซอร์และเป็นส่วนที่ทำให้มอเตอร์หมุนได้ทั้ง โรเตอร์ (Rotor) และ สเตเตอร์ (Stator)



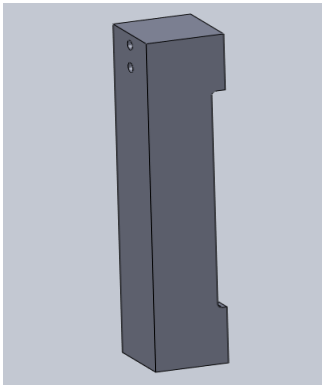
ภาพที่ 3-15 ตัวยึดด้านบนมอเตอร์

จากภาพที่ 3-15 ตัวยึดหัวมอเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนกับตัวยึดด้านล่างมอเตอร์



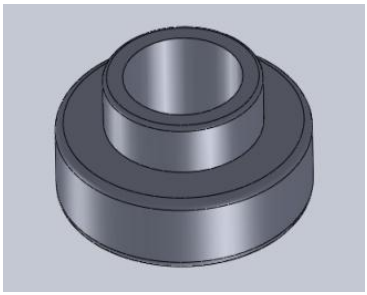
ภาพที่ 3-16 แผ่นยึดโหลดเซลล์ (Load Cell)

จากภาพที่ 3-16 แผ่นยึดโหลดเซลล์ ทำหน้าที่เป็นฐานยึดให้โหลดเซลล์เพื่อใช้เป็นเซ็นเซอร์ในการตรวจจับแรงบิดขณะที่สกรูเกิดการปีนเกลียว



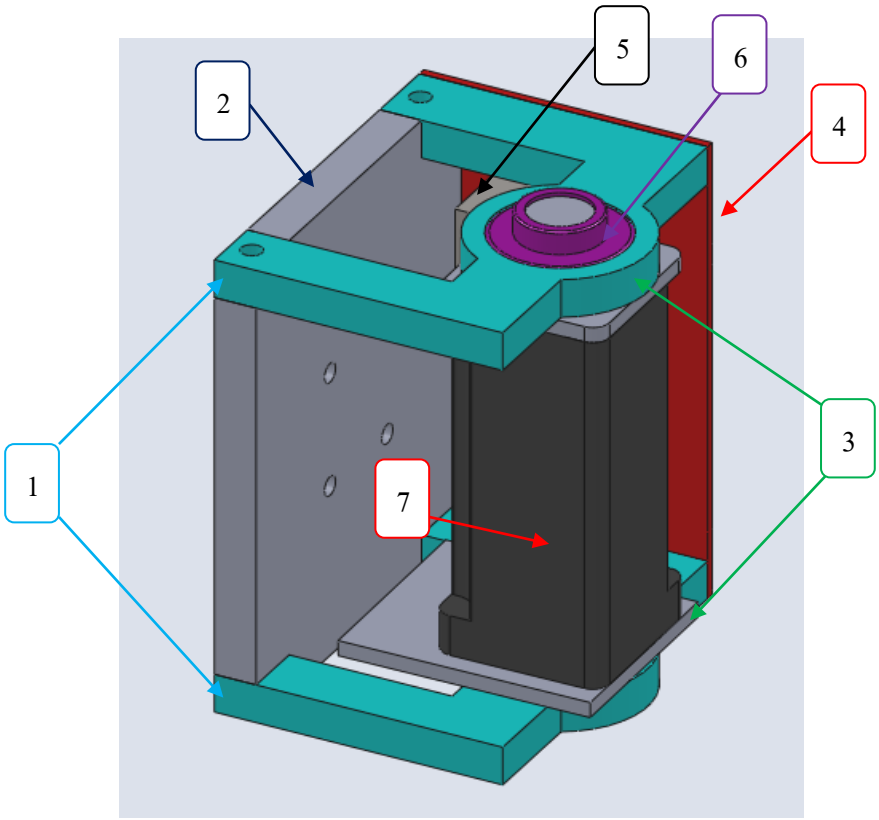
ภาพที่ 3-17 โหลดเซลล์

จากภาพที่ 3-17 โหลดเซลล์ข้างในจะมีสเตรนเกจอยู่ ทำหน้าที่ตรวจวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นในขณะทำการขันสกรู โดยจะนำมาติดไว้ที่แผ่นยึดเซ็นเซอร์



ภาพที่ 3-18 แบริ่ง(Bearing)

จากภาพที่ 3-18 แบริ่งทำหน้าที่ลดความฝืดระหว่าง ฐานบนและฐานล่าง กับ ตัวยึดด้านบนมอเตอร์และตัวยึดด้านล่างมอเตอร์



ภาพที่ 3-19 นำชิ้นส่วนทั้งหมดมาประกอบรวมกัน

จากภาพที่ 3-19 นำชิ้นส่วนที่ทำการออกแบบประกอบเข้าด้วยกัน

โดย หมายเลข 1 คือ ฐานบนและฐานล่าง

หมายเลข 2 คือ ฐานยึดเอซีเซอร์โวมอเตอร์เข้ากับแกน Z

หมายเลข 3 คือ ตัวยึดด้านบนและตัวยึดด้านล่างของมอเตอร์

หมายเลข 4 คือ แผ่นยึดโหลดเซลล์

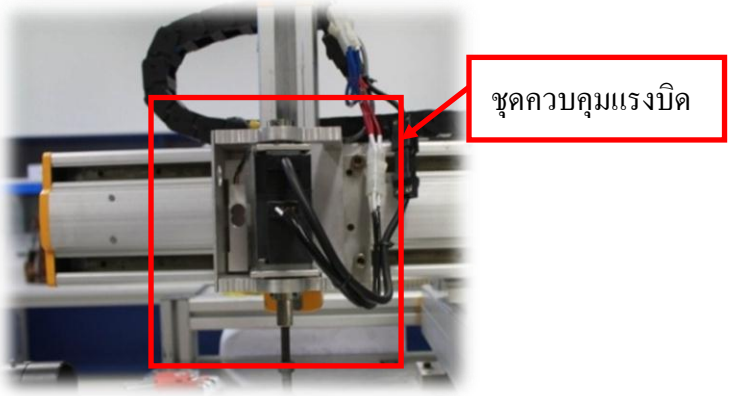
หมายเลข 5 คือ โหลดเซลล์

หมายเลข 6 คือ แบริ่ง

หมายเลข 7 คือ เอซีเซอร์โวมอเตอร์

3.3.2 ผลที่ได้จากการปรับปรุงชุดควบคุมแรงบิดที่แกน Z

ภาพที่ 3-20 ชุดฮาร์ตแวร์ก่อนทำการปรับปรุง

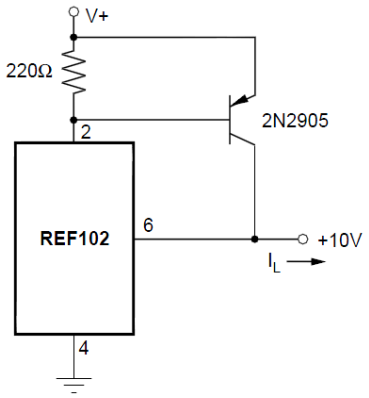


ภาพที่ 3-21 ชุดฮาร์ตแวร์ที่ทำการปรับปรุงแล้ว

3.4 การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิคส์

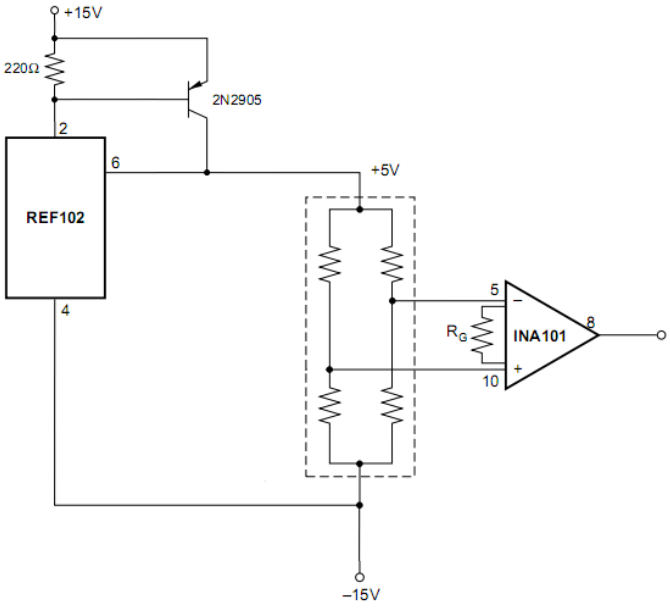
3.4.1 วงจรแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference)

ออกแบบวงจรนี้เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับสเตรนเกจ เพื่อเป็นเซ็นเซอร์วัดแรง ดังนั้นจะต้องออกแบบให้แรงดันออกมาคงที่ โดยใช้ไอซีเบอร์REF102 (IC REF102) และขยายกระแสด้วยทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N2905 (Transistor 2N2905) ดังแสดงดังภาพที่ 3-22



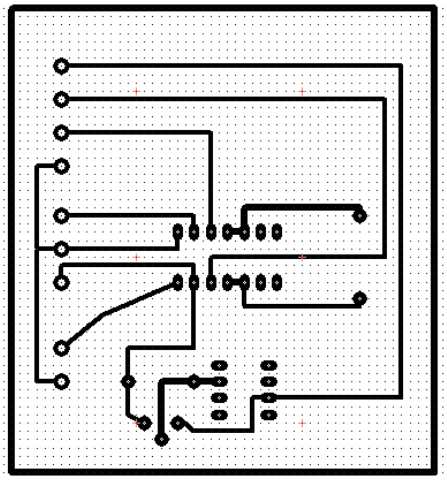
ภาพที่ 3-22 วงจรวงจรแรงดันอ้างอิง

3.4.2 วงจรขยายแรงดัน (Voltage Amplifier)

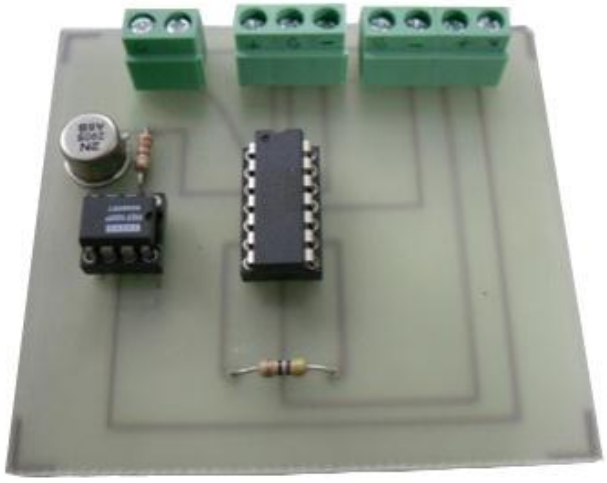


ภาพที่ 3-23 วงจรขยายแรงดันไอซีเบอร์ INA101

เป็นการขยายสัญญาณที่รับมาจากสเตรนเกจ เพื่อที่จะใช้ในการควบคุมแรงบิดโดยจะใช้ไอซีขยายสัญญาณ (IC Instrument Amplifier INA101) และไอซีอ้างอิงแรงดัน (IC Voltage Reference REF102) และทรานซิสเตอร์ (Transistor 2N2905)



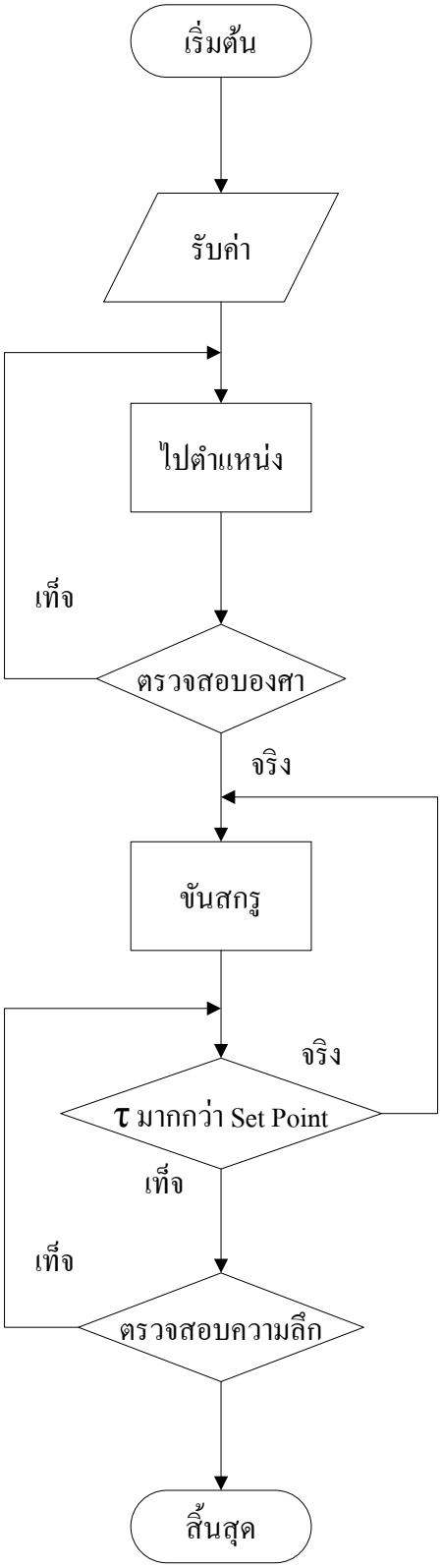
ภาพที่ 3-24 แบบแผ่นปริ๊นของวงจรขยายแรงดันไอซีเบอร์ INA101



ภาพที่ 3-25 วงจรขยายแรงดันไอซีเบอร์ INA101

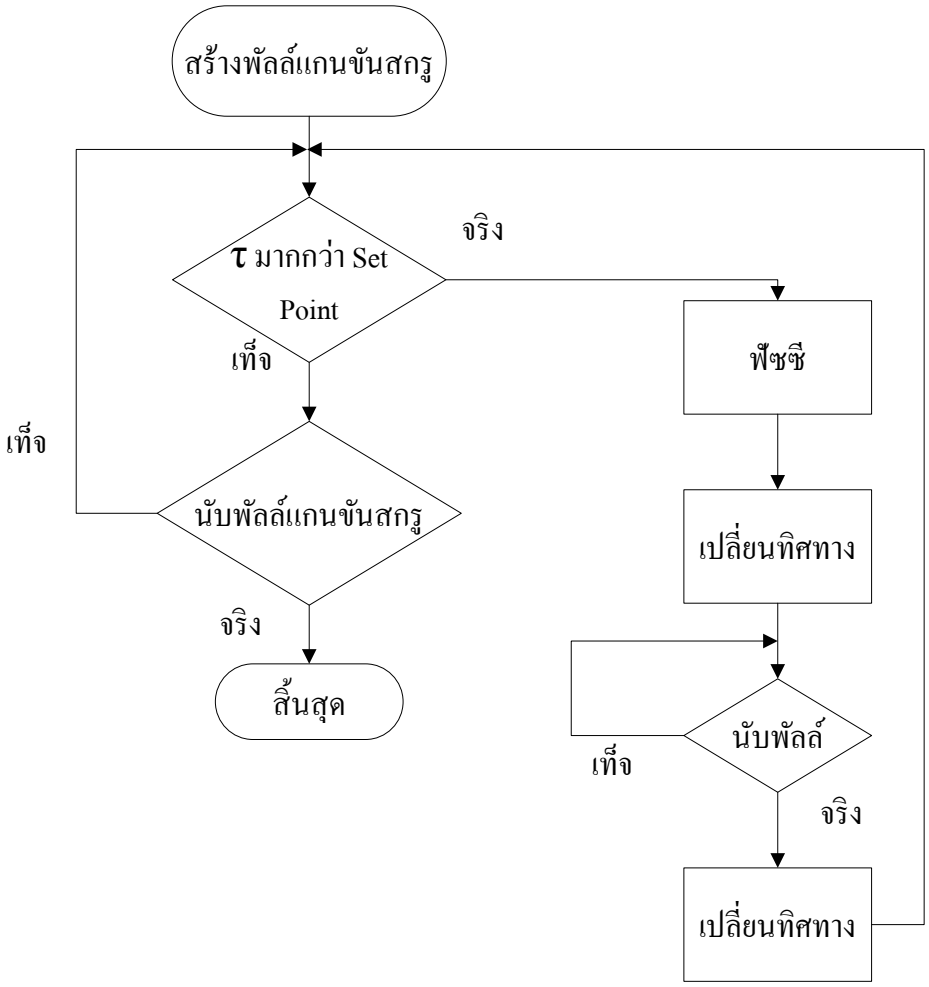
3.5 การออกแบบโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ นั้นในที่นี้จะให้เป็น การควบคุมการเคลื่อนไหว ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยการนำค่าตำแหน่งที่ได้จากคอมพิวเตอร์ คือค่าความเร็วการขันสกรู ระยะทางที่ทำการเคลื่อนที่ และส่งค่าออกไปควบเอซีเซอร์โวมอเตอร์



ภาพที่ 3-26 บล็อกไดอะแกรมออกแบบโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

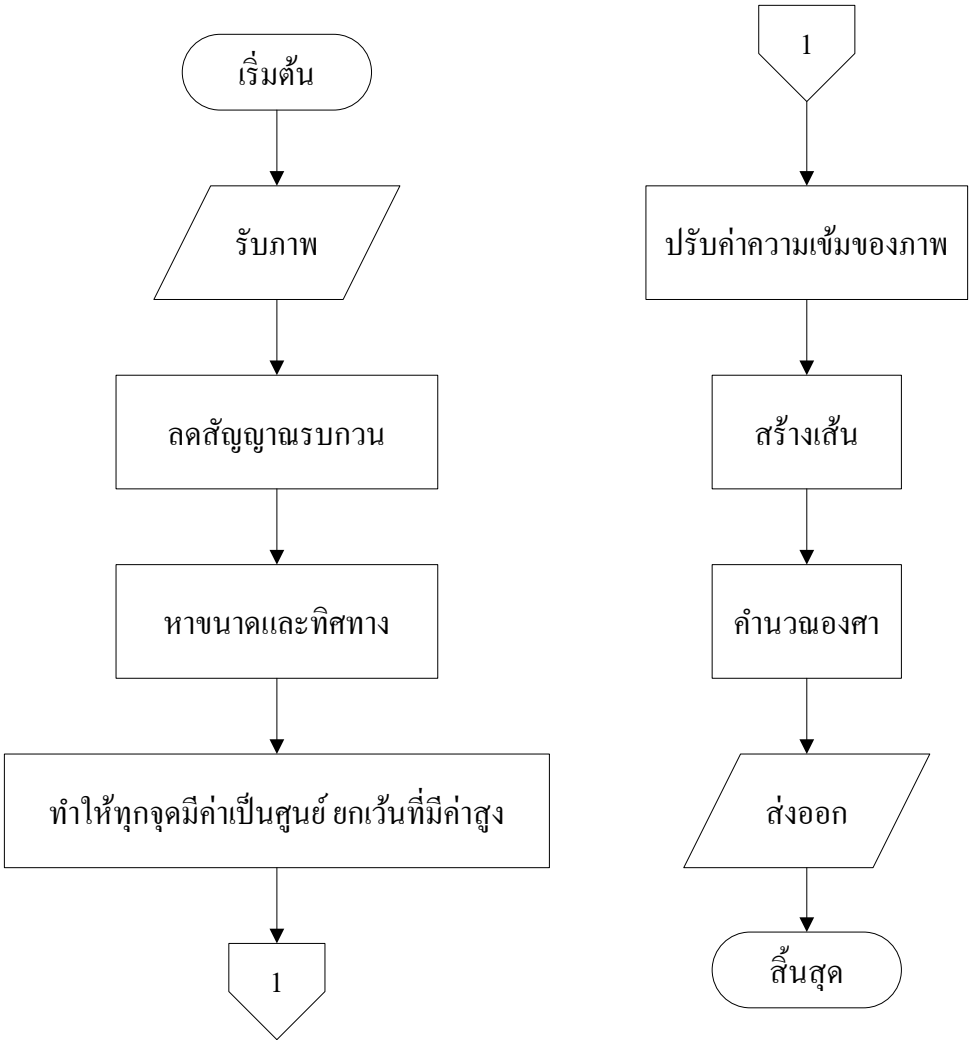
การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เริ่มต้นรับค่าจากคอมพิวเตอร์ รับค่าเป็น X [], Y [], Z [], และ C [], เมื่อป้อนค่าเสร็จหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง ทำการตรวจสอบองศา ถ้าเป็นจริง หรือ มีขนาด 90 องศา ก็จะทำการขันสกรู แต่ถ้าเป็นเท็จ คือไม่ใช่ 90 องศา หุ่นยนต์จะทำการปรับองศาให้ได้ 90 องศาแล้วจึงทำการขันต่อไป ขณะทำการขันสกรูจะวัดแรงบิด ทำการตรวจสอบว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นว่ามากกว่าค่าแรงบิดที่กำหนดหรือไม่ (τ มากกว่า Setpoint) ถ้าเป็นจริงก็ทำการคลายสกรูออกแล้วจึงทำการขันใหม่ แต่ถ้า แรงบิดที่เกิดขึ้นน้อยกว่าค่าแรงบิดที่กำหนด ก็จะทำการขันสกรูลงและตรวจสอบความลึก ดังรูปที่ 3-27



ภาพที่ 3-27 บล็อกไดอะแกรมแกนขันสกรู

หลังจากสร้างพัลล์แกนขันสกรูทำการเช็คแรงบิดขณะขันสกรู (τ มากกว่า Setpoint) ในกรณีที่แรงบิดน้อย (τ มากกว่า Setpoint) กว่าหรือเท่ากับค่าที่เซตไว้ (τ เท่ากับ set) จะทำการนับแกนขันเมื่อถึงค่าที่กำหนดก็สิ้นสุดการทำงาน แต่ถ้าแรงบิดขณะขันสกรูมากกว่าค่าที่เซตไว้ (τ มากกว่า Setpoint) เป็นจริง ระบบจะทำการคำนวณด้วย ฟัซซี่ ทำการขันสกรูออก และทำการนับพัลล์ขันสกรูออกจนครบ จากนั้นทำการเปลี่ยนทิศทางการ หมุนเป็นขันสกรูเข้าอีก จากนั้นทำการเซต แรงบิดอีก ระบบจะทำการทำงานแบบรูปปิดจนกว่าค่า (τ มากกว่า Setpoint) เป็นเท็จถึงจะสิ้นสุดการทำงาน

3.6 การออกแบบโปรแกรม C#



ภาพที่ 3-28 บล็อกไดอะแกรมออกแบบโปรแกรม C#

3.7 การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงาน

โปรแกรมควบคุมการทำงานได้เขียนจาก ภาษา C# โดยสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การปรับตั้งค่าความเร็วมอเตอร์ และ ตรวจสอบองศาความเอียงด้วยกล้อง CCD

ภาพที่ 3-29 หน้าจอโปรแกรมควบคุมการทำงาน

โดย หมายเลข 1 คือ จอแสดงรูปภาพที่รับมาจากกล้อง CCD ในที่นี้จะมีกล้องด้วยกันสองตัว กล้องตัวที่หนึ่ง (Camera 1) กล้องตัวที่สอง (Camera 2)

- Degree 1 คือ ค่าความเอียงที่จัดได้จากกล้องตัวที่หนึ่ง มีหน่วยเป็นองศา
- Degree 2 คือ ค่าความเอียงที่จัดได้จากกล้องตัวที่สอง มีหน่วยเป็นองศา

หมายเลข 2 คือ หน้าจอแสดงกราฟของกล้อง CCD ทั้งสองตัว

หมายเลข 3 คือ หน้าจอแสดงกราฟของสัญญาณที่รับมาจากสเตรนเกจ

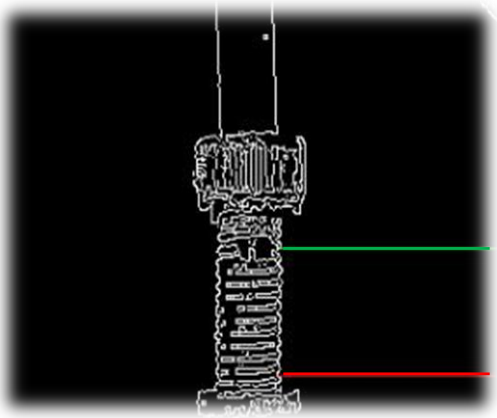
หมายเลข 4 คือ Start เริ่มโปรแกรม Exit ออกจากโปรแกรม

- Connect Port ใช้เลือก Port ติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ กับ ARM7
- Baud Rate ใช้เลือกค่า ความเร็วในการรับส่ง มีหน่วยเป็น บิต ต่อ วินาที

หมายเลข 5 คือ ตั้งค่าการตรวจจับของกล้อง

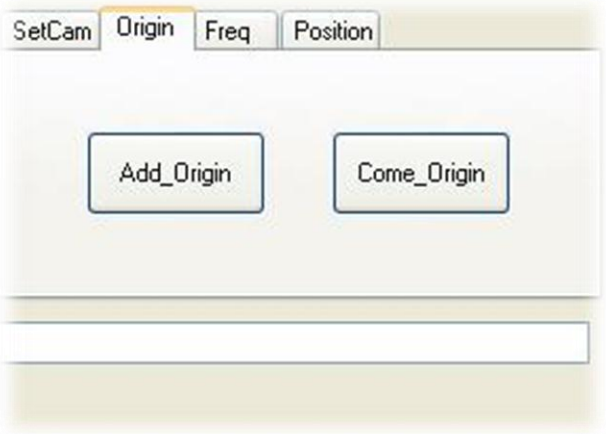
- เส้นสีเขียว (Up Line), เส้นสีแดง (Down Line) จะมีผลในการใช้วัดองศาความเอียง เพื่อหาจุดอ้างอิงในการปรับองศา ดังภาพที่ 3-30

- Threshold ใช้ปรับค่าความละเอียดขอบเส้นของภาพให้ได้ขอบภาพที่ต้องการ (เส้นสีขาว) ดังภาพที่ 3-30



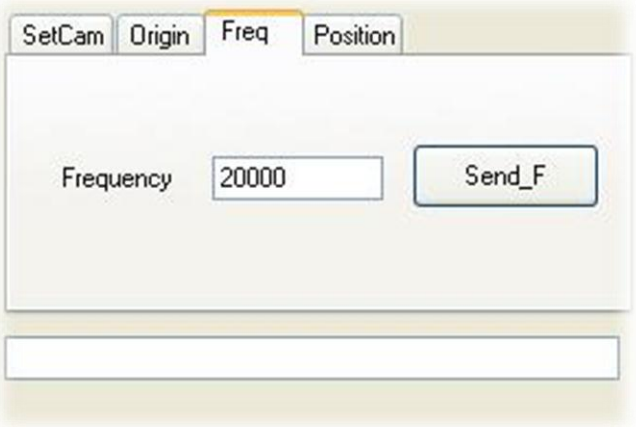
ภาพที่ 3-30 ภาพที่ได้จากกล้อง CCD

หมายเลข 6 คือ เลือกปรับค่ากล้องตัวที่หนึ่ง และตัวที่สอง ซึ่ง กล้องตัวที่หนึ่งจะจับภาพในแนวแกน X ส่วนกล้องตัวที่สองจะจับภาพในแนวแกน Y



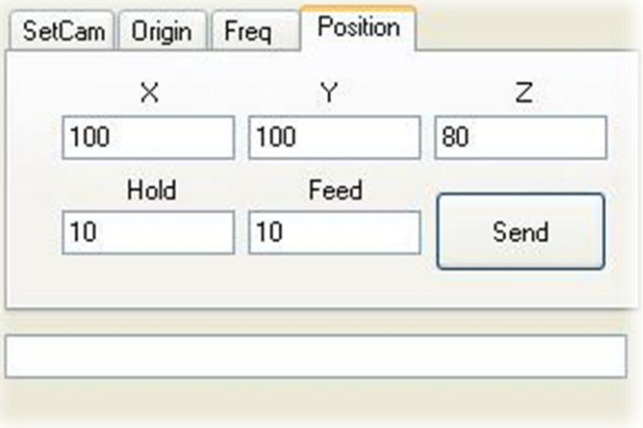
ภาพที่ 3-31 หน้าต่าง Origin

จากภาพที่ 3-31 หน้าต่าง Origin คือใช้เพื่อให้หุ่นยนต์หาจุดเริ่มต้นโดยการให้หุ่นยนต์จำค่าเริ่มต้น (Add_Origin) และสามารถเรียกให้หุ่นยนต์กลับจุดเริ่มต้นได้ (Come_Origin) หลังจากจำค่าเริ่มต้นไว้แล้ว



ภาพที่ 3-32 หน้าต่าง Freq

จากภาพที่ 3-32 หน้าต่าง Freq คือ ความถี่ที่ใช้ในการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)



ภาพที่ 3-33 หน้าต่าง Position

จากภาพที่ 3-33 หน้าต่าง Position คือ ใช้ป้อนค่าให้หุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

โดย X คือ ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน X มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

Y คือ ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน Y มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

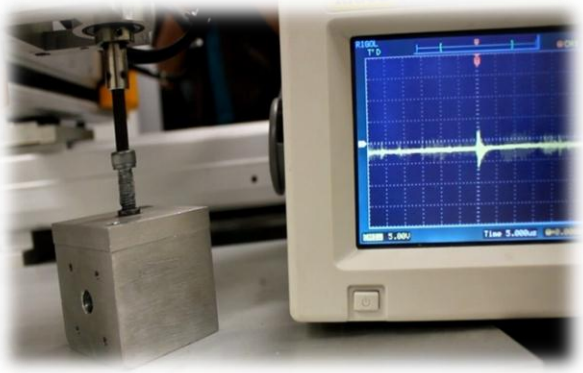
Z คือ ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน Z มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

Hold คือ ระยะเคลื่อนที่ในการขันสกรูลงบนชิ้นงานมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm)

Feed คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ในขณะขันสกรูลงบนชิ้นงาน มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)

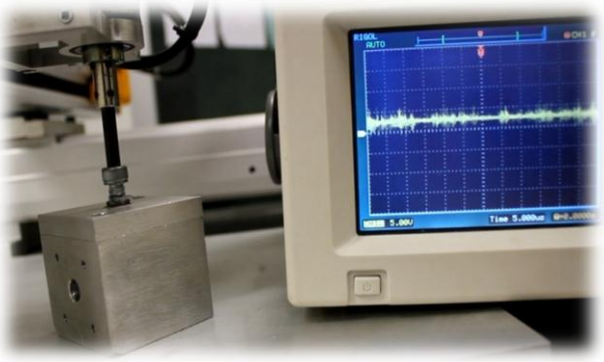
3.8 ผลการทดลองระบบการทำงานของหุ่นยนต์ขันสกรู

3.8.1 ผลการทดลองชุดควบคุมแรงบิด



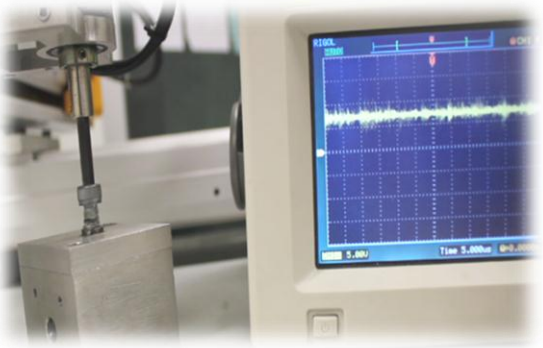
ภาพที่ 3-34 วัดสัญญาณขณะเปิดเครื่อง

ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณจะสังเกตเห็นได้ว่า จากการวัดสัญญาณในขณะเปิดเครื่องจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) และค่าแรงดันจะไม่อยู่ตรงตำแหน่ง 0 โวลท์ (V) ดังภาพที่ 3-34



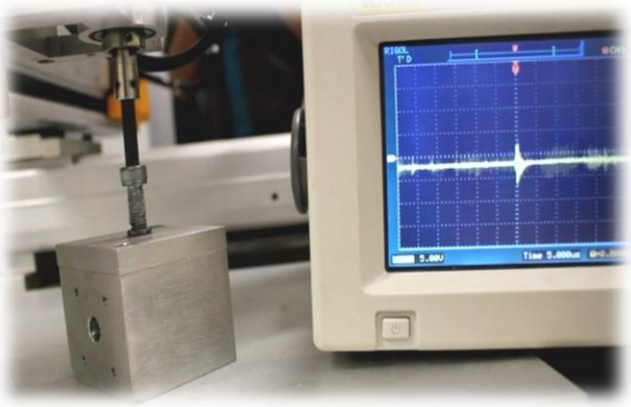
ภาพที่ 3-35 วัดสัญญาณขณะขันสกรูปกติ

ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณในขณะขันสกรูปกติไม่มีการปีนเกลียวนั้น จะมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังภาพที่ 3-35



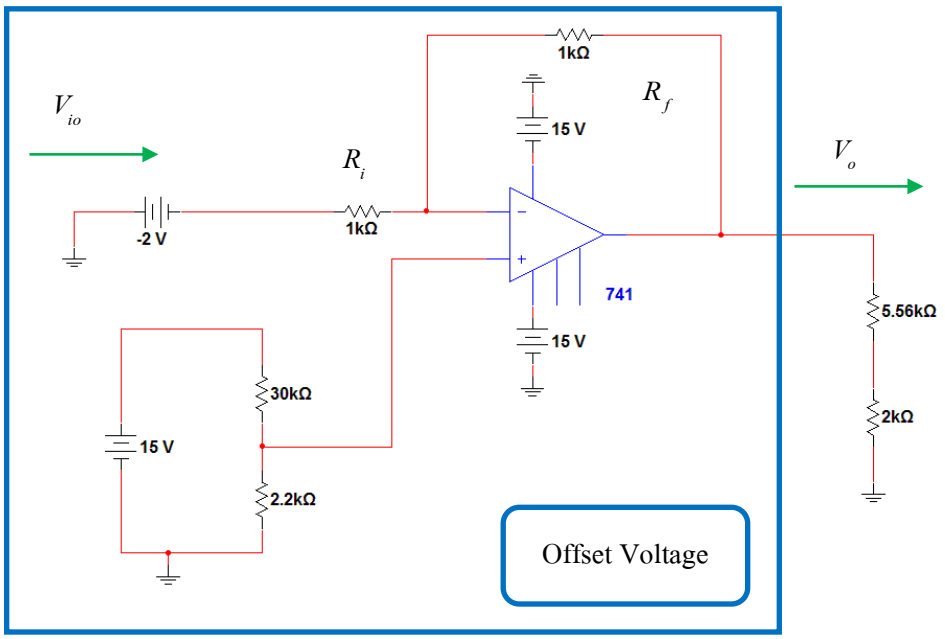
ภาพที่ 3-36 การทดลองขันสกรูขณะปีนเกลียว

ผลที่ได้จากการวัดสัญญาณในขณะขันสกรูปกติที่มีการปีนเกลียวจะมีค่าแรงดันเพิ่มขึ้นมากกว่าตอนขันสกรูปกติ ดังภาพที่ 3-36



ภาพที่ 3-37 การทดลองตอนเปิดเครื่อง

จากผลการทดลองตอนเปิดเครื่อง ก่อนหุ่นยนต์ทำการขันสกรูค่าแรงดันไฟฟ้าจากการขยายสัญญาณที่รับมาจากสเตรนเกจ จะมีค่าติดลบซึ่งไม่อยู่ในตำแหน่งศูนย์ดังภาพที่ 3-37 มีผลทำให้ค่าในการวัดแรงบิดผิดพลาด จึงได้ทำการแก้ไขให้ค่าแรงดันที่ออกมานั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยใช้วงจร ออฟเซ็ท โวลต์เตจ (Offset Voltage) ดังภาพที่ 3-38



ภาพที่ 3-38 ออกแบบวงจร Offset Voltage

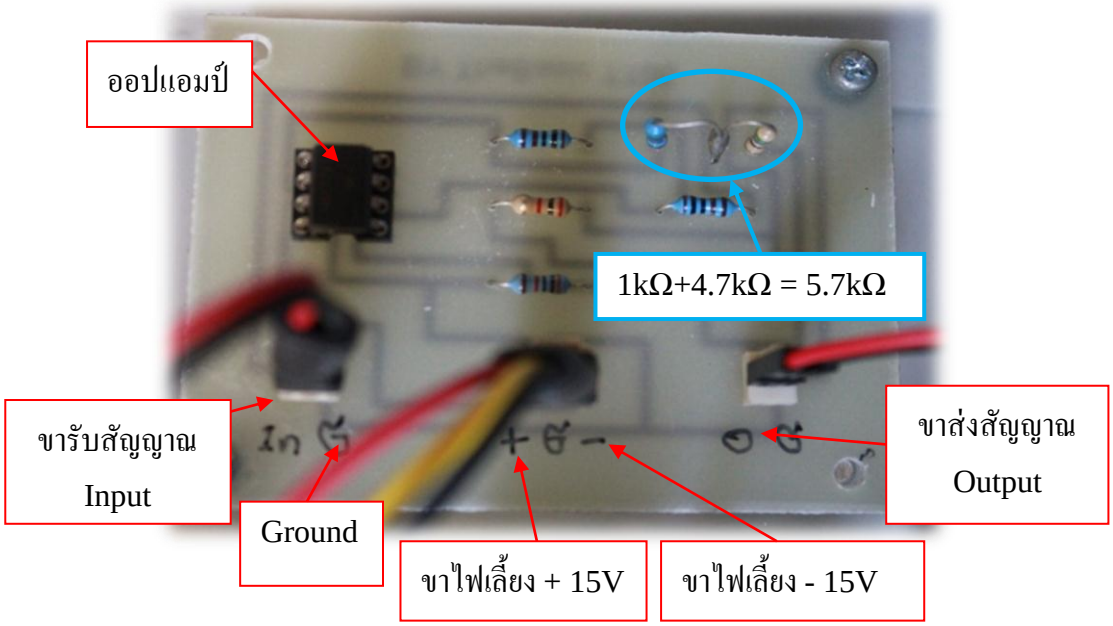
สูตรการคำนวณวงจร ออฟเซ็ท โวลต์เตจ

$$V_0 = V_{io}\left(-\frac{R_f}{R_i}\right)+V_{io}\left(1+\frac{R_f}{R_i}\right) \tag{3-1}$$

$$V_0 = (-2V)\left(-\frac{1k\,\Omega}{1k\,\Omega}\right)+(-1V)\left(1+\frac{1k\,\Omega}{1k\,\Omega}\right) \tag{3-2}$$

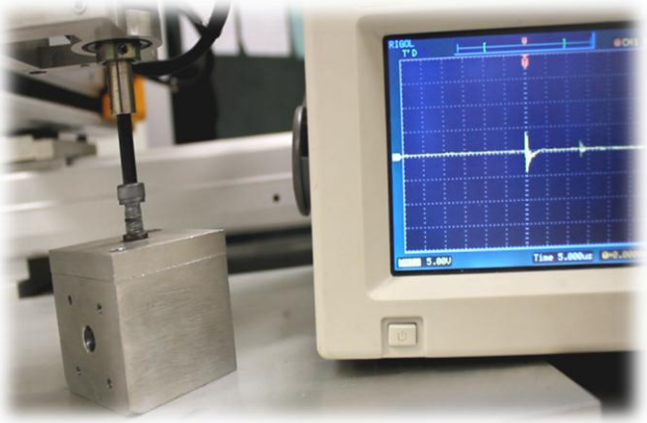
$$V_0 = (2V)+(-2V) \tag{3-3}$$

$$V_0 = 0V \tag{3-4}$$

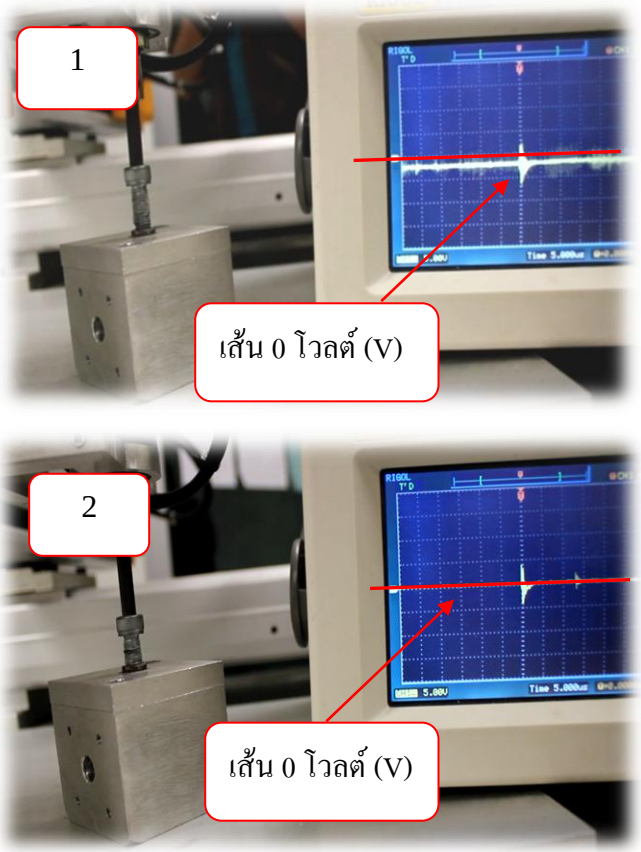


ภาพที่ 3-39 จัดทำวงจร Offset Voltage

จากภาพที่ 3-40 ทำการทดลองวัดสัญญาณโดยใช้วงจร ออฟเซ็ท โวลต์เตจ มาทำการลดค่าแรงดันไฟฟ้าจากการขยายสัญญาณที่รับมาจากสเตรนเกจ ทำให้ค่าแรงดันที่ออกมานั้นมีค่าเท่ากับ 0โวลต์



ภาพที่ 3-40 วัดสัญญาณขณะเปิดเครื่องที่มีวงจร Offset Voltage

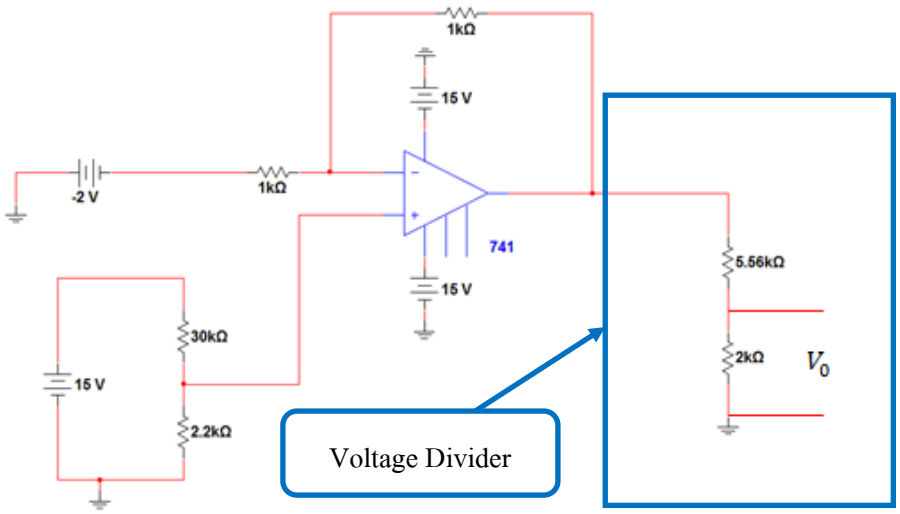


ภาพที่ 3-41 เปรียบเทียบแรงดันขณะเปิดเครื่อง

จากการทดลองที่ใช้วงจร ออฟเซ็ท โวลต์เตจ มาช่วยเพิ่มแรงดันให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งภาพหมายเลข 1 เป็นการทดลองก่อนจะใช้วงจร ออฟเซ็ท โวลต์เตจ ส่วนภาพหมายเลข 2 ค่าแรงดันที่ผ่านวงจร Offset Voltage จะมีค่าเท่ากับ 0โวลต์

3.8.2 ผลจากการทดลองโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (ARM7 เบอร์ LPC2103) สามารถรับอินพุตได้ 3.3V แต่เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าจากการขยายสัญญาณ ที่รับมาจากสเตรนเกจ เมื่อกด สเตรนเกจจนสุดจะมีแรงดันออกมาถึง 12 โวลต์(V) จึงทำให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ไม่สามารถรับอินพุตจากการกด สเตรนเกจ จนสุดได้ จึงทำการการแก้ไขปัญหาโดยการแบ่งแรงดันไฟฟ้าการเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากต้องลดแรงดันไฟฟ้า จากแรงดัน 12 โวลต์ ให้เหลือ 3.3 โวลต์ หรือน้อยกว่า จึงใช้วงจรโวลต์เตจ ดีไวเดอร์ (Voltage Divider) ทำการแบ่งแรงดัน



ภาพที่ 3-42 ออกแบบวงจร Voltage Divider

สูตรในการคำนวณวงจรโวลต์เตจ ดีไวเดอร์

$$V_0 = V_i\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \tag{3-5}$$

$$V_0 = 12V \times \left(\frac{2k\Omega}{5.56k\Omega + 2k\Omega}\right) \tag{3-6}$$

$$V_0 = 12V \times \left(0.264\Omega\right) \tag{3-7}$$

$$V_0 = 3.17V \tag{3-8}$$

3.9 ทำการคาริเบท (Calibrate) แรงบิดจากสเตรนเกจ

ทำการคาริเบทแรงบิดโดยการใช้ตาชั่งแบบดึงในการวัด โดยทำการเก็บผลทั้งหมด 50 ค่าจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยอ้างอิงจากการเขียนโปรแกรมในการรับค่าแรงบิดจาก 0% - 100% ทำการวัดค่าค่าละ 10 ครั้ง จากนั้นนำผลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ดังตารางที่ 3-3

จากสูตร $$\overline{X} = \frac{\sum x}{N} \quad (3\text{-}9)$$

โดย

$\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ย

$\sum x$ คือ ผลรวมข้อมูลดิบ

N คือ จำนวนข้อมูลดิบ

3.9.1 หาค่าแรงบิดที่เกิดขึ้น

จากค่าเฉลี่ยที่ได้มามีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg.) จากนั้นแปลงหน่วยจาก กิโลกรัมให้เป็น นิวตัน (N)

จาก 1 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 10 นิวตัน เพื่อจะทำการหาแรงบิดดังตารางที่ 3-4

จากสูตร $$\tau = F \times r \quad (3\text{-}10)$$

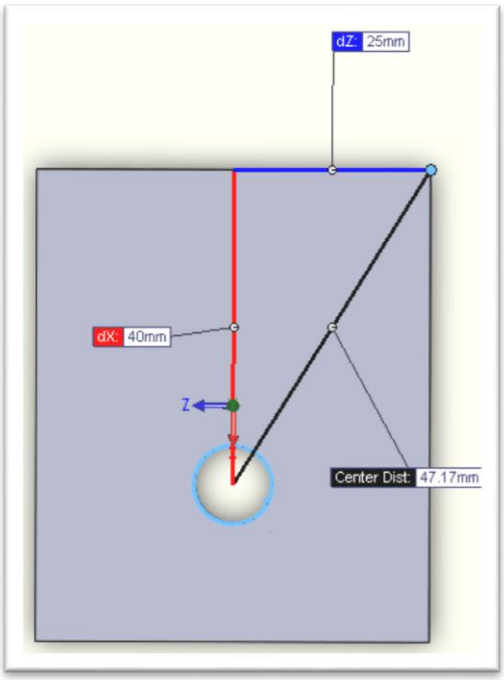
โดย

τ คือ แรงบิด (Torque) มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร (Nm)

F คือ แรง (Force) มีหน่วยเป็น นิวตัน

r คือ รัศมีความยาวจากเพลามอเตอร์ถึงโหลดเซล มีหน่วยเป็น เมตร (m)

ภาพที่ 3-43 ตาชั่งแบบดึง



ภาพที่ 3-44 รัศมีความยาวจากเพลามอเตอร์ถึงโหลดเซล

ตารางที่ 3-3 ผลการคาริเบทแรงบิด

ค่าที่วัด (%)	จำนวนครั้งในการวัด										ค่าเฉลี่ย (kg)
	1 (kg)	2 (kg)	3 (kg)	4 (kg)	5 (kg)	6 (kg)	7 (kg)	8 (kg)	9 (kg)	10 (kg)	
2	0.07	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.095
4	0.15	0.16	0.16	0.16	0.14	0.14	0.12	0.15	0.14	0.15	0.147
6	0.23	0.22	0.22	0.23	0.22	0.21	0.20	0.21	0.22	0.21	0.217
8	0.29	0.27	0.29	0.28	0.29	0.28	0.29	0.26	0.28	0.28	0.281
10	0.33	0.32	0.32	0.34	0.33	0.34	0.33	0.33	0.33	0.34	0.331
12	0.39	0.39	0.38	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.39	0.384
14	0.46	0.45	0.43	0.45	0.45	0.44	0.45	0.45	0.46	0.45	0.449
16	0.51	0.51	0.51	0.50	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.50	0.511
18	0.60	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59	0.56	0.58	0.56	0.581
20	0.66	0.69	0.63	0.63	0.64	0.63	0.63	0.62	0.64	0.64	0.641
22	0.70	0.71	0.88	0.69	0.69	0.68	0.68	0.69	0.68	0.67	0.707
24	0.75	0.74	0.74	0.76	0.75	0.74	0.75	0.76	0.76	0.75	0.750

ตารางที่ 3-3 ผลการคาริเบทแรงบิด (ต่อ)

ค่าที่วัด (%)	จำนวนครั้งในการวัด										ค่าเฉลี่ย (kg)
	1 (kg)	2 (kg)	3 (kg)	4 (kg)	5 (kg)	6 (kg)	7 (kg)	8 (kg)	9 (kg)	10 (kg)	
26	0.80	0.82	0.83	0.81	0.81	0.81	0.79	0.78	0.81	0.82	0.808
28	0.90	0.87	0.86	0.88	0.86	0.88	0.90	0.89	0.91	0.90	0.885
30	0.95	0.95	0.95	0.92	0.93	0.95	0,96	0.93	0.94	0.93	0.941
32	1.01	0.99	0.98	0.99	0.97	0.99	0.99	1.00	0.99	0.98	0.989
34	1.03	1.03	1.03	1.04	1.02	1.05	1.06	1.06	1.04	1.03	1.039
36	1.12	1.12	1.09	1.13	1.11	1.15	1.14	1.14	1.11	1.15	1.126
38	1.21	1.20	1.23	1.19	1.18	1.18	1.17	1.19	1.19	1.20	1.194
40	1.26	1.25	1.27	1.24	1.25	1.25	1.24	1.24	1.24	1.26	1.250
42	1.33	1.32	1.32	1.36	1.32	1.35	1.33	1.34	1.35	1.34	1.336
44	1.41	1.38	1.37	1.41	1.39	1.39	1.39	1.39	1.37	1.38	1.388
46	1.43	1.42	1.45	1.43	1.42	1.43	1.43	1.43	1.43	1.44	1.431
48	1.53	1.51	1.51	1.52	1.52	1.52	1.49	1.52	1.51	1.50	1.513

ตารางที่ 3-3 ผลการคาริเบทแรงบิด (ต่อ)

ค่าที่วัด (%)	จำนวนครั้งในการวัด										ค่าเฉลี่ย (kg)
	1 (kg)	2 (kg)	3 (kg)	4 (kg)	5 (kg)	6 (kg)	7 (kg)	8 (kg)	9 (kg)	10 (kg)	
50	1.60	1.59	1.58	1.57	1.58	1.57	1.59	1.59	1.60	1.59	1.586
52	1.63	1.61	1.64	1.60	1.62	1.59	1.60	1.63	1.61	1.60	1.613
54	1.67	1.67	1.68	1.69	1.66	1.66	1.65	1.69	1.68	1.68	1.673
56	1.70	1.72	1.70	1.72	1.69	1.71	1.70	1.72	1.73	1.70	1.709
58	1.76	1.77	1.74	1.75	1.76	1.76	1.75	1.74	1.74	1.72	1.749
60	1.82	1.80	1.82	1.82	1.84	1.81	1.82	1.81	1.83	1.82	1.819
62	1.89	1.90	1.88	1.89	1.87	1.88	1.86	1.87	1.89	1.92	1.885
64	1.97	2.00	1.99	1.98	1.97	1.97	1.98	1.95	1.97	2.01	1.979
66	2.05	2.04	2.01	2.03	2.04	2.02	2.03	2.01	2.02	2.02	2.027
68	2.10	2.12	2.10	2.12	2.10	2.12	2.10	2.11	2.09	2.11	2.107
70	2.15	2.16	2.17	2.15	2.15	2.14	2.16	2.15	2.16	2.14	2.153
72	2.20	2.21	2.21	2.24	2.25	2.25	2.22	2.23	2.21	2.22	2.224

ตารางที่ 3-3 ผลการคาริเบทแรงบิด (ต่อ)

ค่าที่วัด (%)	จำนวนครั้งในการวัด										ค่าเฉลี่ย (kg)
	1 (kg)	2 (kg)	3 (kg)	4 (kg)	5 (kg)	6 (kg)	7 (kg)	8 (kg)	9 (kg)	10 (kg)	
74	2.33	2.33	2.29	2.28	2.29	2.28	2.26	2.29	2.26	2.27	2.228
76	2.35	2.37	2.38	2.36	2.35	2.39	2.40	2.39	2.36	2.37	2.372
78	2.40	2.40	2.39	2.40	2.39	2.39	2.39	2.39	2.40	2.39	2.394
80	2.45	2.42	2.43	2.42	2.43	2.42	2.42	2.43	2.42	2.44	2.428
82	2.52	2.53	2.48	2.46	2.48	2.50	2.50	2.50	2.48	2.50	2.495
84	2.57	2.58	2.59	2.57	2.58	2.57	2.57	2.56	2.56	2.57	2.572
86	2.60	2.62	2.63	2.64	2.62	2.63	2.62	2.62	2.66	2.65	2.629
88	2.70	2.74	2.68	2.75	2.74	2.70	2.71	2.73	2.72	2.70	2.717
90	2.83	2.82	2.79	2.80	2.80	2.81	2.80	2.82	2.79	2.78	2.804
92	2.85	2.86	2.86	2.86	2.87	2.85	2.87	2.86	2.87	2.86	2.861
94	2.90	2.89	2.91	2.90	2.92	2.94	2.91	2.90	2.89	2.91	2.907

ตารางที่ 3-3 ผลการคาริเบทแรงบิด (ต่อ)

ค่าที่วัด (%)	จำนวนครั้งในการวัด										ค่าเฉลี่ย (kg)
	1 (kg)	2 (kg)	3 (kg)	4 (kg)	5 (kg)	6 (kg)	7 (kg)	8 (kg)	9 (kg)	10 (kg)	
96	2.95	2.94	2.94	2.97	2.96	2.97	2.98	2.96	2.95	2.96	2.958
98	3.01	2.99	3.02	3.05	3.03	3.02	3.01	3.02	3.08	3.07	3.03
100	3.09	3.11	3.09	3.12	3.10	3.09	3.12	3.13	3.15	3.13	3.113

ตารางที่ 3-4 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้น

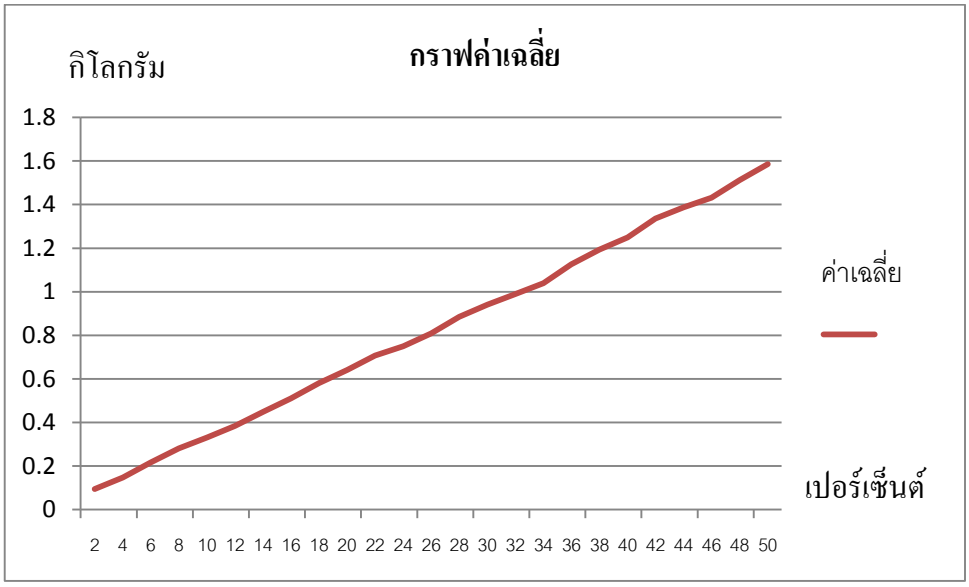
ค่าที่วัด(เปอร์เซ็นต์)	แรง(นิวตัน)	รัศมี(เมตร)	แรงบิด (นิวตันเมตร)
2	0.95	47.17×10^{-3}	44.81×10^{-3}
4	1.47	47.17×10^{-3}	48.64×10^{-3}
6	2.17	47.17×10^{-3}	102.35×10^{-3}
8	2.81	47.17×10^{-3}	132.54×10^{-3}
10	3.31	47.17×10^{-3}	156.13×10^{-3}
12	3.84	47.17×10^{-3}	181.13×10^{-3}
14	4.49	47.17×10^{-3}	211.79×10^{-3}
16	5.11	47.17×10^{-3}	241.03×10^{-3}
18	5.81	47.17×10^{-3}	274.05×10^{-3}
20	6.41	47.17×10^{-3}	302.35×10^{-3}
22	7.07	47.17×10^{-3}	333.49×10^{-3}
24	7.50	47.17×10^{-3}	353.77×10^{-3}
26	8.08	47.17×10^{-3}	381.13×10^{-3}
28	8.85	47.17×10^{-3}	417.45×10^{-3}
30	9.41	47.17×10^{-3}	443.86×10^{-3}
32	9.89	47.17×10^{-3}	466.51×10^{-3}
34	10.39	47.17×10^{-3}	490.09×10^{-3}
36	11.26	47.17×10^{-3}	531.13×10^{-3}
38	11.94	47.17×10^{-3}	563.20×10^{-3}
40	12.50	47.17×10^{-3}	589.62×10^{-3}
42	13.36	47.17×10^{-3}	630.19×10^{-3}
44	13.88	47.17×10^{-3}	654.71×10^{-3}
46	14.31	47.17×10^{-3}	675.00×10^{-3}
48	15.13	47.17×10^{-3}	713.68×10^{-3}
50	15.86	47.17×10^{-3}	748.11×10^{-3}
52	16.13	47.17×10^{-3}	760.85×10^{-3}
54	16.73	47.17×10^{-3}	789.15×10^{-3}

ตารางที่ 3-4 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้น (ต่อ)

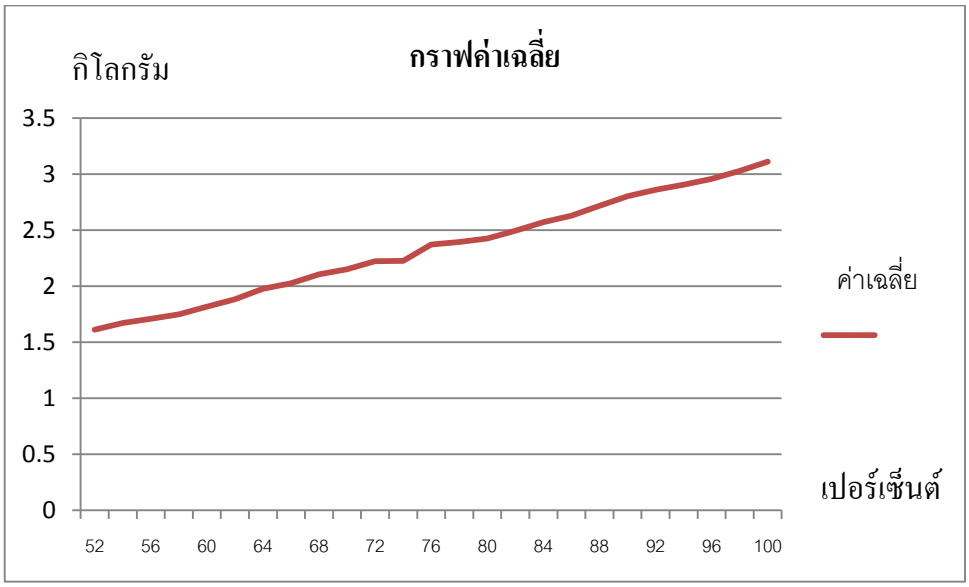
ค่าที่วัด(เปอร์เซ็นต์)	แรง(นิวตัน)	รัศมี(เมตร)	แรงบิด (นิวตันเมตร)
56	17.09	47.17×10^{-3}	806.13×10^{-3}
58	17.49	47.17×10^{-3}	825.00×10^{-3}
60	18.19	47.17×10^{-3}	858.02×10^{-3}
62	18.85	47.17×10^{-3}	889.15×10^{-3}
64	19.79	47.17×10^{-3}	933.49×10^{-3}
66	20.27	47.17×10^{-3}	956.13×10^{-3}
68	21.07	47.17×10^{-3}	993.87×10^{-3}
70	21.53	47.17×10^{-3}	1015.57×10^{-3}
72	22.24	47.17×10^{-3}	1049.06×10^{-3}
74	22.28	47.17×10^{-3}	1050.94×10^{-3}
76	23.72	47.17×10^{-3}	1118.87×10^{-3}
78	23.94	47.17×10^{-3}	1129.24×10^{-3}
80	24.28	47.17×10^{-3}	1176.89×10^{-3}
82	24.95	47.17×10^{-3}	1176.89×10^{-3}
84	25.72	47.17×10^{-3}	1213.21×10^{-3}
86	26.2	47.17×10^{-3}	1235.85×10^{-3}
88	27.1	47.17×10^{-3}	1278.30×10^{-3}
90	28.0	47.17×10^{-3}	1320.76×10^{-3}
92	28.6	47.17×10^{-3}	1349.06×10^{-3}
94	29.0	47.17×10^{-3}	1367.93×10^{-3}
96	29.5	47.17×10^{-3}	1391.51×10^{-3}
98	30.3	47.17×10^{-3}	1429.25×10^{-3}
100	31.13	47.17×10^{-3}	1468.40×10^{-3}

3.9.2 สรุปผลการทดลอง

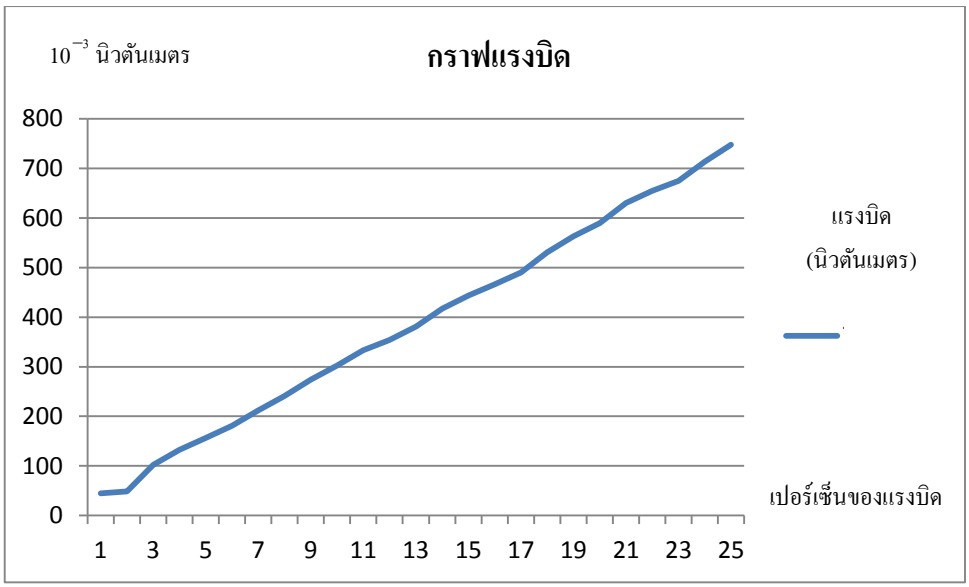
นำผลจากการคาริเบทแรงบิดมาสรุปเป็นกราฟดังภาพที่ 3-45 และนำผลจากการหาแรงบิดมาสรุปเป็นกราฟดังรูปที่ 3-46



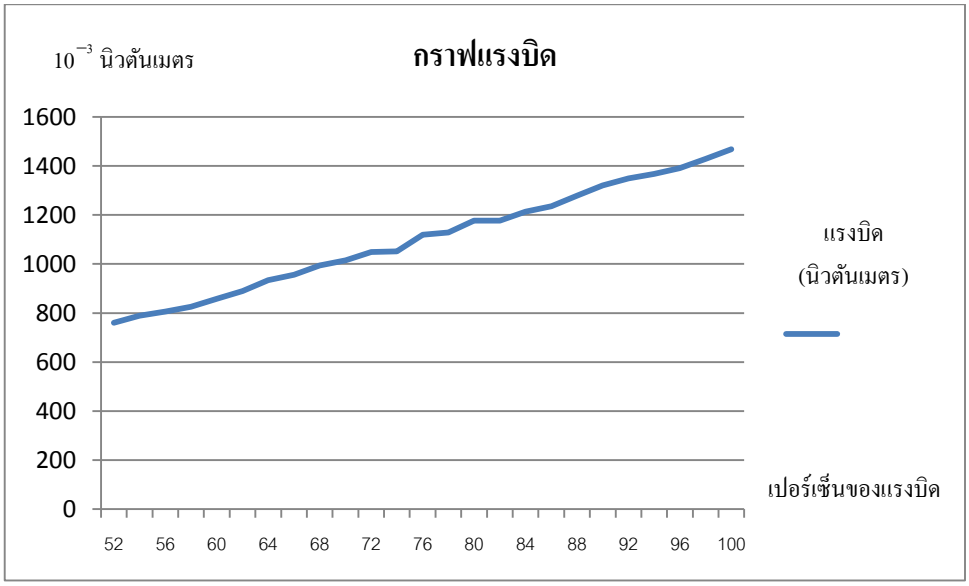
ภาพที่ 3-45 กราฟค่าเฉลี่ยของแรงบิด



ภาพที่ 3-45 กราฟค่าเฉลี่ยแรงบิด (ต่อ)



ภาพที่ 3-46 กราฟแรงบิด



ภาพที่ 3-46 กราฟแรงบิด (ต่อ)

3.10 ประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกันและทดลองใช้งานจริง

เมื่อทำการประกอบทุกส่วนเข้าด้วยกัน จะได้ชุดควบคุมแรงของแกน Z แบบฟัซซี่ลอจิกคอนโทรล และได้ทดลองกับโปรแกรมที่ได้เขียนขึ้นมากับมีผลการทดลอง คือ สามารถทดสอบแรงกดได้สูงสุดไม่เกิน 1.5 นิวตันเมตร

ภาพที่ 3-47 ประกอบส่วนต่างๆเข้าด้วยกันและทดลอง