



รายงานฉบับสมบูรณ์

การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดล

คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

Modeling and Analysis of Parallel Link Robots Based on CAD Model

Including Geometric Tolerances

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรช ทศนะ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

งบประมาณปี 2559

สัญญาเลขที่ 1606/A001

รายงานฉบับสมบูรณ์

การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์
ช่วยออกแบบที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

Modeling and Analysis of Parallel Link Robots Based on CAD Model Including
Geometric Tolerances

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช ทศณะ

สังกัด

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

สนับสนุนโดย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ประจำปีงบประมาณ 2559

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์โครงสร้างขนานปัจจุบันนี้ถูกนำไปใช้กับงานประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีความเที่ยงตรงสูงและผลิตภัณท์ขนาดเล็ก หนึ่งในปัญหาที่สำคัญสำหรับการออกแบบหุ่นยนต์โครงสร้างขนานคือ การปรับปรุงการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ เนื่องจากเป็นโครงสร้างการเชื่อมโยงที่ซับซ้อน การเคลื่อนที่แบบคิเนเมติกส์ของหุ่นยนต์โครงสร้างขนานนั้นได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการเบี่ยงเบนทางรูปร่างเรขาคณิตของชิ้นส่วนประกอบ เช่น ข้อต่อและการเชื่อมโยง เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องมีวิธีการออกแบบอย่างเป็นระบบในการระบุความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตที่เหมาะสมของข้อต่อและตัวเชื่อมโยง เพื่อปรับปรุงการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการนำเสนองานวิจัยนี้คือ การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างทางเรขาคณิตที่เหมาะสมของชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ โดยพิจารณาถึงการแลกเปลี่ยนระหว่างความต้องการเกี่ยวกับการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และความสะดวกในกระบวนการผลิต แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการกำหนดขึ้นเพื่อแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเอ็นเอฟเฟกต์เตอร์สุดท้าย โดยยึดตามค่าความคลาดเคลื่อนของข้อต่อและจุดเชื่อมโยง การนำเสนอวิธีการอย่างเป็นระบบนี้ได้ช่วยให้วิธีการปรับค่าให้เหมาะสมเพื่อกำหนดชุดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อต่อทั้งหมดและลิงก์ภายใต้ข้อจำกัดของผลเฉลยที่เหมาะสม ในส่วนการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของคิเนเมติกส์ของเอ็นเอฟเฟกต์ วิธีการนี้นำไปใช้กับปัญหาการออกแบบบางประการเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของลิงค์หุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Abstract

Parallel link robots are now being applied to various assembling tasks for small products and components. One of the important issues for design of the parallel link robots is to improve their kinematic motion deviations due to the complex link structures. The kinematic motion deviations of the parallel link robots are deeply influenced by the geometric deviations of the components, such as joints and links. A systematic design method is required for specifying suitable geometric tolerances of the joints and the links, in order to improve the kinematic motion deviations of the parallel link robots. The objective of the present research is to establish a computer-aided design system for specifying a suitable set of the geometric tolerances of the components considering the trade-off between the requirements on the kinematic motion deviations and the ease of the manufacturing processes. A mathematical model is formulated to represent the standard deviations of the kinematic motions of the end effectors, based on the tolerance values of the joints and the links. A systematic method is proposed here, by applying an optimization method, to determine a suitable set of the tolerance values of all the joints and the links under the constraints on the kinematic motion deviations of the end effectors. The method is applied to some design problems of the geometric tolerances of the parallel link robots.



TNIT

THAI-NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากความร่วมมือการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัย Osaka Prefecture University (OPU) ของห้องปฏิบัติการวิจัย Prof. Dr. Nobuhiro Sugimura ซึ่งเป็นผู้ดำเนินการควบคุมหัวข้อเรื่องหลักในการทำวิจัย ซึ่งในส่วนนี้ผู้วิจัยเป็นเพียงผู้ปฏิบัติการวิจัยในห้องแล็บ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจาก JASSO เพื่อไปปฏิบัติงานวิจัยที่ OPU โดยเสนอให้ค่าพาหนะเดินทางตัวเครื่องบินไป-กลับชั้นประหยัด และค่าเบี้ยเลี้ยง ที่พัก และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นที่ได้สนับสนุนการค่าประกันอุบัติเหตุและความสะดวกในการทำวิจัย รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ ซึ่งให้ความช่วยเหลือในทุกขั้นตอนของการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงและสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่นที่ให้การสนับสนุนในส่วนของทุนวิจัยเพื่อพัฒนาผลงานของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตขั้นสูง (ADMT) และขอขอบคุณพ่อ แม่ ครอบครัว และเพื่อน ๆ ทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำงาน จนดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรช ทัศนะ

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ

บทที่

1	บทนำ.....	1
	ที่มาและความสำคัญ.....	1
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
	ขอบเขตของการวิจัย.....	3
	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
	แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ	5
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
	หลักการพื้นฐาน.....	6
	พิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างและพารามิเตอร์การเบี่ยงเบน.....	6
	โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่	14
	การทบทวนวรรณกรรม.....	20
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
	บทนำ	22
	การออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยฯ.....	22
	การวัดและการจำลองความแม่นยำการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ฯ	25
	โมเดลจำลองความเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน.....	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่

3	การออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน	35
	กรณีศึกษาการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของแขนหุ่นยนต์ฯ	37
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	39
	ผลการจำลองการเคลื่อนที่แบบไดนามิกของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน	39
	การเปรียบเทียบการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เชื่อมต่อคู่ขนาน	40
	ผลของข้อพิจารณาการออกแบบที่ยอมรับได้จากกรณีศึกษา	42
5	บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	48
	สรุปผลการทดลอง	48
	ข้อเสนอแนะ	48
	บรรณานุกรม	49
	ภาคผนวก ก. บทความประชุมวิชาการ	52
	ภาคผนวก ข. บทความวารสารวิชาการ	59

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2559 – 2560	5
2.1 ประเภทพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง	9
2.2 การเบี่ยงเบนรูปร่างของฟิวเจอร์.....	14
2.3 แสดงเมทริกซ์การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและการเคลื่อนที่แบบหมุน	19
3.1 พารามิเตอร์ของกลไกแบบขนาน 3 ลิงค์ทั่วไป	25
3.2 จำนวนการทดลองของความผิดพลาดทั้งหมด.....	27
3.3 ตัวแปรการออกแบบ.....	36
3.4 ตำแหน่งของเอ็นเอฟเพคเตอร์	38
4.1 ผลลัพธ์ของการออกแบบความคลาดเคลื่อน	42

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โมเดล CAD ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน	3
1.2 คิเนแมติกส์ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน.....	4
1.3 รูปแบบพิกัดความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของรูปร่าง	4
2.1 รูปร่างของขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อน	8
2.2 ตัวอย่างของการแจกแจงแบบปกติ	10
2.3 การเบี่ยงเบนรูปร่างของระนาบผิวเจอร์.....	13
2.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการกัดชิ้นงาน	15
2.5 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องมือกล	16
2.6 แสดงแผนภาพเซน-ลิงก์ ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่	16
3.1 การออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานด้วย CAD โมเดล Fanuc M-1iA /1H.....	22
3.2 ห่วงโซ่คิเนแมติกส์ของหุ่นยนต์ Fanuc M-1iA / 1H.....	23
3.3 FBD สำหรับการจำลองแบบไดนามิก.....	24
3.4 การทดลองวัดความแม่นยำด้วย DBB.....	26
3.5 ผลการการวัดด้วย DBB	26
3.6 โมเดลจำลองคิเนแมติกส์และพารามิเตอร์.....	27
3.7 โมเดลของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน	28
3.8 พารามิเตอร์เรขาคณิตของลิงค์ที่ประกอบไปด้วยความยาวและตำแหน่งของข้อต่อ	28
3.9 แบบจำลองของข้อต่อแบบหมุน.....	31
3.10 โมเดลของข้อต่อทรงกลม	33
3.11 โมเดลความยาวของลิงค์.....	34
3.12 ช่วงการเคลื่อนไหว.....	38
3.13 ตำแหน่งของเอ็นเอฟเพคเตอร์ที่พิจารณาในการออกแบบความคลาดเคลื่อน	38
4.1 ผลของแรงลัพท์เทียบกับเวลาของการจำลองแบบไดนามิกสำหรับมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$	39
4.2 ผลของแรงลัพท์เทียบกับเวลาของการจำลองแบบไดนามิกสำหรับมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$	40
4.3 ผลลัพท์การจำลองของตัวอย่างที่ 1 ถึง 9	41
4.4 ผลลัพท์การจำลองของตัวอย่างที่ 10 ถึง 17	41
4.5 ผลลัพท์การจำลองของตัวอย่างที่ 18 ถึง 26	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลของการวัดและการจำลองของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน	42
4.7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 15.....	43
4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยที่ดีที่สุด	44
4.9 รูค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลเฉลยที่ดีที่สุด	44
4.10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเพคเตอร์	46
4.11 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทิศทาง X ของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ฯ	46
4.12 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทิศทาง X ของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ฯ	47
4.13 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทิศทาง X ของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ฯ	47



TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในโลกปัจจุบันของการแข่งขันทางด้านคุณภาพ ความน่าเชื่อถือ ความแม่นยำ และความพึงพอใจของลูกค้าสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนอากาศยาน ได้มีการเร่งพัฒนาการผลิตทางด้านระบบไซเบอร์ทางกายภาพ (cyber physical systems: CPS) ที่ได้เอาเทคโนโลยีมาใช้ในการพัฒนาเครื่องจักรหรือพัฒนาระบบกระบวนการผลิตในรูปแบบโรงงานอัจฉริยะ โดยการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเข้ามาใช้ในการสร้างเครือข่ายระหว่างอุปกรณ์และการบริการร่วมกับวิทยาการปัญญาประดิษฐ์ ที่ใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลกระบวนการผลิตให้มีผลผลิตมากยิ่งขึ้น และกระบวนการทางธุรกิจให้สามารถปรับปรุงได้อย่างคล่องตัว

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์สำหรับในประเทศไทยนั้นก็ได้เป็นศูนย์กลางการผลิตในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีส่วนช่วยในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจการส่งออกผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนต่าง ๆ สร้างมูลค่าให้กับประเทศอย่างมาก โดยข้อมูลสินค้าส่งออกสำคัญของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 พบว่าอุปกรณ์และส่วนประกอบรถยนต์มีสัดส่วนและมูลค่าสูงสุด รองลงมาคืออุปกรณ์และส่วนประกอบเครื่องคอมพิวเตอร์ [1] จะเห็นว่าสินค้านี้มีสัดส่วนใหญ่ล้วนแต่เป็นชิ้นส่วนที่ต้องผลิตโดยผ่านเครื่องจักรกลอัตโนมัติทั้งนั้น และต้องมีความถูกต้องแม่นยำ

การออกแบบพิถีพิถันความคลาดเคลื่อนของรูปร่างก็เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบชิ้นส่วนเพื่อการผลิตและประกอบของเครื่องจักรกลอัตโนมัติ ซึ่งที่ผ่านมาก็ได้ใช้ระบบ CAD CAE CAM แบบสามมิติมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาการออกแบบเครื่องจักร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการออกแบบรูปร่างของชิ้นส่วนและการออกแบบทางกลของการประกอบชิ้นส่วน ซึ่งได้รับการปรับตั้งในการแก้ปัญหาการออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของการสร้างขึ้นตามรูปทรงสามมิติ แต่ขอบเขตการควบคุมและกลไกการเคลื่อนไหวของช่วงพิถีพิถันความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูงก็ยังคงมีการพัฒนาการตั้งค่ากระบวนการทางเรขาคณิตที่เหมาะสม และกระบวนการทางเรขาคณิตเหล่านี้มักเกิดขึ้นกับกลไกการประมวลผลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งการปรับค่าเบี่ยงเบนคิเนแมติกส์อย่างเหมาะสมภายในช่วงความคลาดเคลื่อนจึงมีความสำคัญ [2-3]

Sugimura, N. และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนของรูปร่างสำหรับเครื่องซีเอ็นซีบนพื้นฐานการเบี่ยงเบนคิเนแมติกส์อย่างเหมาะสมของชิ้นส่วนประกอบ [4] และ Takahashi,

A. และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์พิกัดความคลาดเคลื่อนบนพื้นฐานการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์สำหรับเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน ทั้งเครื่องจักรและโต๊ะหมุน [5] และงานวิจัยอื่น ๆ [6-14] แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการออกแบบเครื่องจักรจำเป็นต้องตั้งค่าช่วงความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการหมุน เพื่อให้ส่วนเบี่ยงเบนของการสร้างรูปร่าง (shape generation deviations) ของเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับชิ้นงานอยู่ในช่วงการทำนาย นั่นคือต้องใช้วิธีการออกแบบที่ยอมรับได้ตามกระบวนการของการสร้างรูปร่าง

ยิ่งไปกว่านั้นวิธีการสร้างแบบจำลองของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ที่ให้ความสนใจกับความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของการเบี่ยงเบนของการสร้างรูปร่างและวิธีการออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองนั้นไม่เพียงแต่เป็นเครื่องจักรเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์เท่านั้น นอกจากนี้ยังใช้กับแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน (parallel link robots) ที่ใช้กับการหยิบสินค้าและการประกอบผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กที่มีโครงสร้างลิงค์ที่ซับซ้อน ดังนั้นการเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตของส่วนประกอบเช่นข้อต่อและลิงค์ที่มีผลต่อความแม่นยำในการเคลื่อนไหวจำเป็นต้องมีวิธีการออกแบบในการหาค่าที่เหมาะสมของความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและความคลาดเคลื่อนมิติของข้อต่อและการเชื่อมโยงโครงสร้าง

ความแม่นยำของตำแหน่งแขนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นคุณลักษณะความสำคัญหนึ่งที่มีความจำเป็นในกระบวนการผลิต ซึ่งการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของกลไกเชื่อมโยงหุ่นยนต์อุตสาหกรรม มีการเคลื่อนที่ของตำแหน่งตอนสุดท้ายโดยการควบคุมด้วยมอเตอร์ที่ติดตั้งภายในกลไกการเชื่อมโยงบนพื้นฐานของตัวเลขจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตำแหน่งและความเร็วจะมีข้อผิดพลาดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตในแต่ละกลไกและจุดเชื่อมต่อ ดังนั้นตำแหน่งความแม่นยำทั้งหมดของหุ่นยนต์จะขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนเรขาคณิตของจุดเชื่อมต่อ ขนาดพิกัดความคลาดเคลื่อนของกลไกการเชื่อมโยง และการควบคุมความแม่นยำของมอเตอร์

การใช้ทฤษฎีการสร้างรูปร่างส่วนเบี่ยงเบนของการเคลื่อนที่ (shape generation motion deviations) ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานสำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่างก็เป็นสิ่งที่คำนึงถึงเป็นอันดับแรกของในงานวิจัยนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงความแม่นยำและความเที่ยงตรงของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อทำการประกอบสำหรับผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนเล็ก ๆ และชิ้นส่วนอุปกรณ์สำหรับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่อาจจะขาดไปได้ในชีวิตประจำวัน เช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต และอุปกรณ์อุตสาหกรรมทุกชนิดที่ต้องอาศัยชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

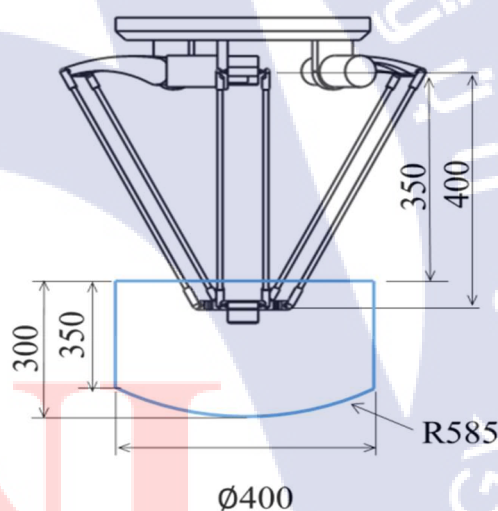
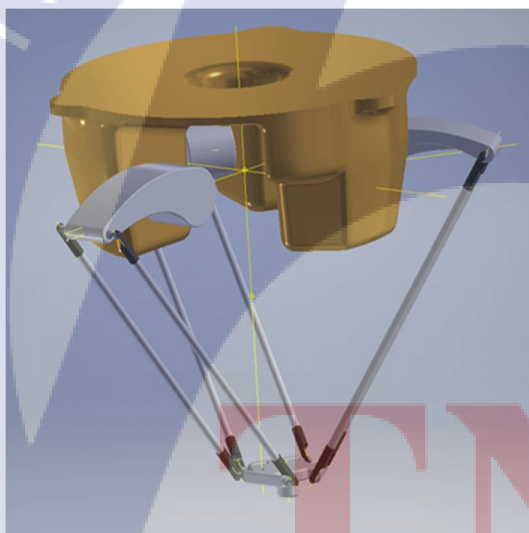
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (computer aided design: CAD) ที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

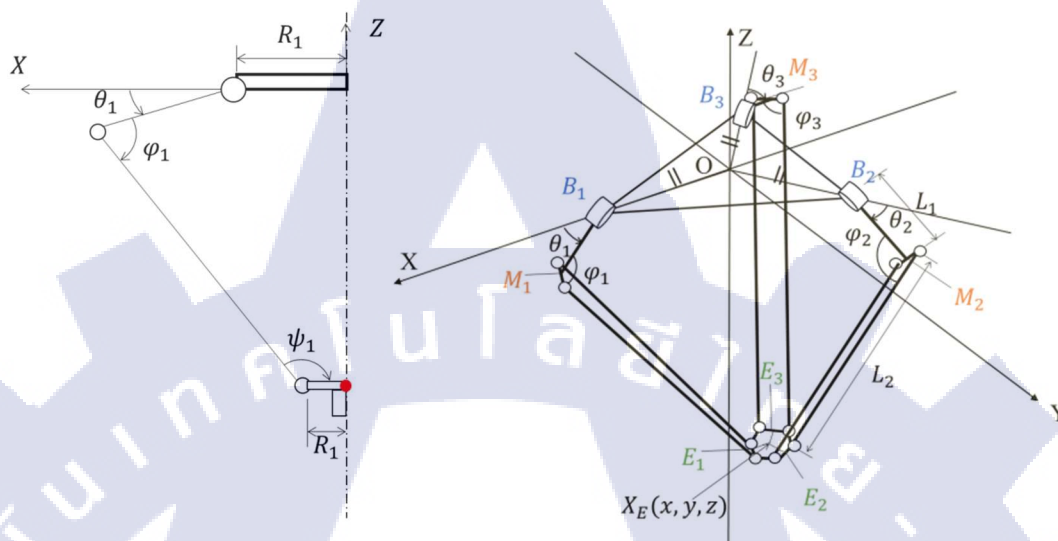
การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง ผู้วิจัยได้จำกัดขอบเขตการศึกษาไว้ดังนี้

1.3.1 แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานประกอบด้วยกลไกการเชื่อมโยง 3 แกน ซึ่งควบคุมด้วย 3 มอเตอร์บนพื้นฐานของโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบดังแสดงรูปที่ 1.1



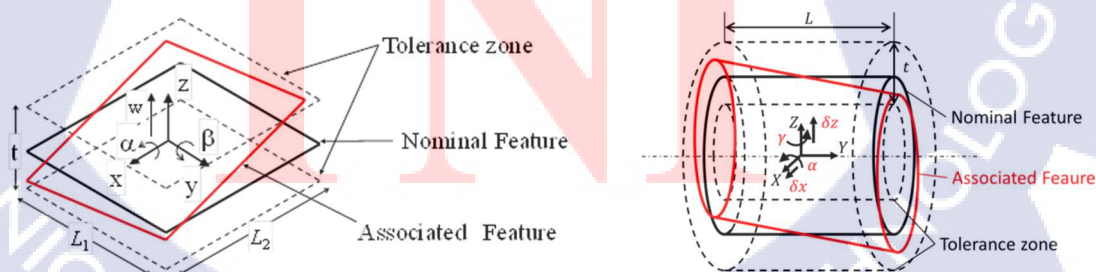
รูปที่ 1.1 โมเดล CAD ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

1.3.2 คุณสมบัติของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานจะเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่แบบความเร็วสูงและพื้นที่ความต้องการขนาดเล็กที่เหมาะสมสำหรับการแทนที่ผู้ปฏิบัติการของมนุษย์ ดังนั้นการวิเคราะห์ความเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานแสดงดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 คิเนเมติกส์ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

1.3.3 การออกแบบและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของรูปร่างในชุดกลไกเชื่อมโยงแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานประกอบด้วยข้อมูลที่รวมพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างที่จำกัดตำแหน่งและทิศทางการหมุนของฟิเจอร์ (features) เช่น ความราบ และความป็นทรงกระบอก ซึ่งการเบี่ยงเบนตำแหน่งและทิศทางการหมุนจะถูกสมมุติการแจกแจงแบบปกติ $N(\sigma, 0)$ โดยการอ้างอิงจาก Sugimura, N. และคณะ (2012) แสดงดังรูปที่ 1.3



(ก) ความราบ

(ข) ความป็นทรงกระบอก

รูปที่ 1.3 รูปแบบพิกัดความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของรูปร่าง

1.4.1 ได้องค์ความรู้และความเชี่ยวชาญในด้านการออกแบบและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของรูปร่างสำหรับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน เพื่อบูรณาการกับการเรียนการสอนในรายวิชาของสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม และการประยุกต์กับลักษณะการใช้งานสำหรับอุตสาหกรรมที่มีความเที่ยงตรงสูง

1.5 แผนงานและระยะเวลาดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินงานปี พ.ศ. 2559 – 2560

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปี 2559						ปี 2560					
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องและเสนอโครงการเพื่ออนุมัติ												
2. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง							}					
3. ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย												
4. จัดซื้ออุปกรณ์ เครื่องมือ สำหรับการวิจัย (OPU ผู้จัดทำ)												
5. สร้างแบบจำลองแผนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน												
6. ทดลองและเก็บข้อมูลการวิเคราะห์ความเบี่ยงเบน คิเนแมติกของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน							}					
7. วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของรูปร่าง และสรุปผล												
8. นำเสนอผลงานวิจัย												
9. ตีพิมพ์วารสารวิชาการ												
10. เขียนรูปเล่มรายงานการวิจัย												

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐาน

ในบทนี้จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์ โครงสร้างขนานที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง และการทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

- หลักการพื้นฐาน
- พิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างและพารามิเตอร์การเบี่ยงเบน
- โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่
- การทบทวนวรรณกรรม

2.2 พิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างและพารามิเตอร์การเบี่ยงเบน (Geometric Tolerance and Deviation Parameters)

2.2.1 นิยามพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

พิกัดความคลาดเคลื่อนของมิติและรูปร่างเป็นวิธีการระบุช่วงเบี่ยงเบนที่ยอมให้รูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสามารถประกอบเข้าหากันได้ในพิกัดที่เหมาะสม ซึ่งในการศึกษานี้การกำหนดค่าพิกัดความคลาดเคลื่อนสำหรับตำแหน่งสามมิติและท่าทางของรูปร่างเรขาคณิตจะใช้ตามในมาตรฐาน Japanese Standards Association (JIS) [15] ซึ่งเรื่องพื้นฐานเกี่ยวกับคำศัพท์ของพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างมีดังนี้

2.2.1.1 ฟิวเจอร์ (Feature)

ฟิวเจอร์ถ้าแปลจากภาษาญี่ปุ่นตาม JIS Z 8114 คือ ลักษณะที่ถูกกำหนดเป็น "จุด, เส้น, แกน, ระนาบ และระนาบกึ่งกลาง ซึ่งเป็นวัตถุของพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง" และแม้แต่ใน JIS B 0401 (ความคลาดเคลื่อนของมิติและวิธีการสวมพอดี) มันเป็นคำทั่วไปที่ใช้เพื่อจัดการกับความคลาดเคลื่อนทางมิติของชิ้นส่วน เนื่องจากมันใช้ข้อกำหนดคุณสมบัติด้านนอกและภายในของฟิวเจอร์

2.2.1.2 รูปร่างในอุดมคติ (Ideal Shape)

รูปร่างในอุดมคติเป็นการบอกขนาด ตำแหน่ง และท่าทางที่กำหนดโดยกระบวนการออกแบบ

2.1.1.3 ขนาดมิติ (Dimensions)

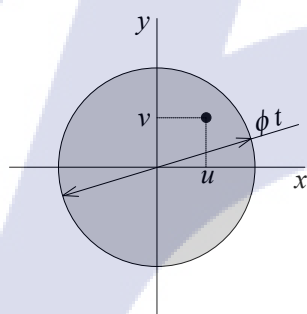
ขนาดมิติจะถูกแบ่งออกเป็นขนาดมิติขนาดใหญ่ ขนาดของตำแหน่ง และขนาดเชิงมุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและมิติของตำแหน่งเป็นคำศัพท์ที่ต้องรวมอยู่ในวิธีการของพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

2.1.1.4 ความคลาดเคลื่อน (Tolerance)

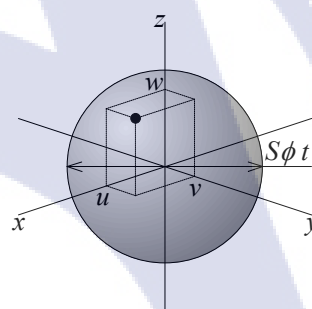
ความคลาดเคลื่อนเป็นช่วงขีดจำกัดของการเบี่ยงเบนจากรูปร่างในอุดมคติที่กำหนดโดยกระบวนการออกแบบ ซึ่งจำเป็นต้องมีรูปร่างขนาดตำแหน่งและท่าทางที่อยู่ภายใต้ค่าพิกัดความเผื่อเมื่อทำการตัดเฉือนและการประกอบเครื่องมือกล และส่วนประกอบของมันให้เสร็จสมบูรณ์

2.1.1.5 ขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อน (Tolerance zone)

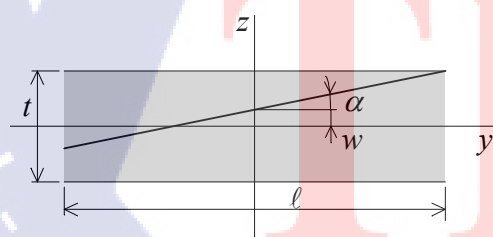
8 ชนิดของขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนของฟิวเจอร์ที่ควบคุมโดยพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างแสดงดังในรูปที่ 2.1 ซึ่งขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนเหล่านี้สามารถใช้แบบเดี่ยวหรือหลายฟิวเจอร์ได้



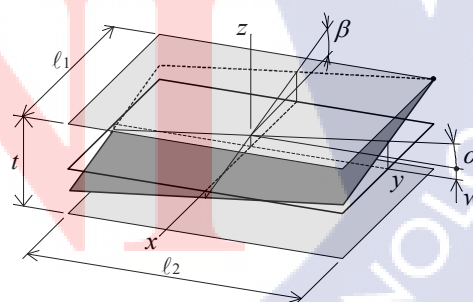
(A) In a circle (円内)



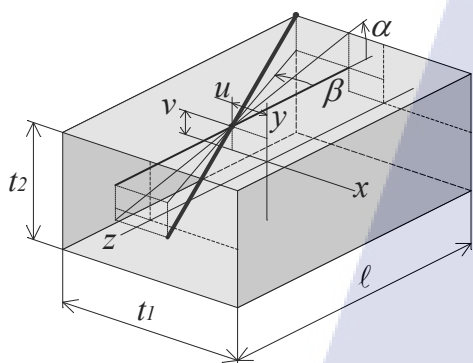
(B) In a sphere (球内)



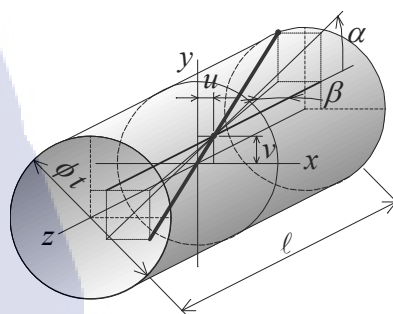
(C) Between two parallel lines
(平行 2 直線間)



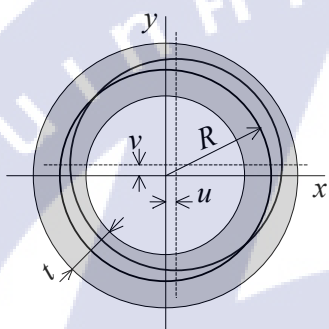
(D) Between two parallel planes
(平行 2 平面間)



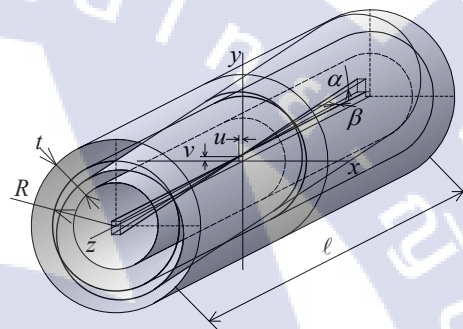
(E) In rectangular parallelepipeds
(直方体内)



(F) In a cylinder(円筒内)



(G) Between two concentric circles
(同心 2 円間)



(H) Between two coaxial cylinders
(同軸 2 円筒間)

รูปที่ 2.1 รูปร่างของขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อน

2.1.1.6 ความเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตของรูปร่าง (Geometric deviation)

ขนาดข้อผิดพลาดผิวเจอร์ของรูปร่างที่ถูกต้องจะได้รับโดยการตรวจสอบจริง

2.1.1.7 ประเภทพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

วิธีการพิจารณาพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างขึ้นอยู่กับความต้องการการออกแบบทั้ง 14 ชนิดของช่วงขอบเขตและดัดแปรที่ต้องการ ซึ่งจะถูกเลือกและรวมกันตามแบบงานที่ได้รับ โดยใช้พิกัดความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตรูปร่าง 14 ประเภท ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะถูกใช้ในลักษณะไขว้กัน ดังนั้นเราต้องเลือกความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตโดยการตัดสินใจวิธีการตรวจสอบอย่างถูกต้อง เพื่อที่จะบ่งบอกถึงวิธีการยอมรับทางเรขาคณิตกับแบบงานที่จำเป็นต้องมีสัญลักษณ์เพิ่มเติม ชนิดของความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและรูปร่างของขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่เลือกได้แสดงไว้ในตาราง

ที่ 2.1 และรูปที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทพิกต์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

Types of geometric tolerances	Shapes of selectable tolerance zones
Straightness tolerance	(C), (D), (E), (F)
Flatness tolerance	(D)
Circularity tolerance	(G)
Cylindricity tolerance	(H)
Profile of a Line tolerance	(C)
Profile of a Surface tolerance	(D)
Parallelism tolerance	(D), (E), (F)
Perpendicularity tolerance	(D), (E), (F)
Angularity tolerance	(D)
Position tolerance	(A), (B), (C), (D), (E), (F)
Coaxial Control tolerance (Concentricity tolerance)	(A), (B), (F)
Symmetry tolerance	(D), (E)
Circular Runout tolerance	(D), (F)
Total Runout tolerance	(D), (F)

2.1.1.8 ดาตัม (Datum)

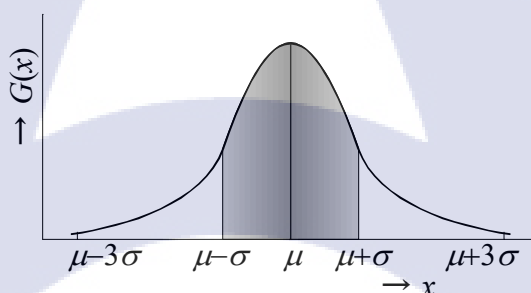
ดาตัมได้กำหนดใน JIS B 0022 คือ " มาตรฐานทางเรขาคณิตรูปร่างที่ถูกต้องตามหลักทฤษฎี เพื่อควบคุมขอบเขตพิกต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อระบุพิกต์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตที่สัมพันธ์กันของฟิวเจอร์" กลุ่มของดาตัมในแต่ละดาตัมจะถูกนำมาใช้ในการรวมกันเรียกว่าระบบดาตัม และในระบบพิกต์เชิงบวกสามารถทำได้ตามความต้องการของการออกแบบ ระบบพิกต์เชิงบวกนี้สามารถเป็นหมายเลขใด ๆ ในชิ้นส่วนก็ได้ ฟิวเจอร์ที่สามารถระบุได้สำหรับดาตัมคือ ระนาบทรงกระบอก แกน ระนาบกลาง และจุดพิกต์ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเลือกตามข้อกำหนดการออกแบบและประเภทความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตรูปร่าง

2.2.2 ความน่าจะเป็นของฟิวเจอร์ภายในพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

ในส่วนนี้จะอธิบายการคำนวณความน่าจะเป็นที่ข้อผิดพลาดทางเรขาคณิตของฟิวเจอร์ที่อยู่ในเขตพิกัดความคลาดเคลื่อน การพิจารณานี้สมมติว่าการกระจายความน่าจะเป็นสำหรับการเปลี่ยนแปลงในข้อผิดพลาดทางเรขาคณิตของฟิวเจอร์ที่ไม่แน่นอน ความน่าจะเป็นของการปรากฏตัวของฟิวเจอร์ภายในขอบเขตความคลาดเคลื่อนสามารถพิจารณาได้โดยใช้วิธีการหาค่าความน่าจะเป็นที่มีอยู่ของฟิวเจอร์จากค่าความคลาดเคลื่อนที่เสนอโดย Satonaka, N. และคณะ [12] ในการศึกษาี้ การส่งถ่ายและการเบี่ยงเบนการหมุนของพื้นผิวนำทาง (guide surface) ได้รับมาจากค่าความคลาดเคลื่อน

2.2.2.1 การแจกแจงแบบปกติ

การแจกแจงแบบปกติถูกใช้อย่างกว้างขวางในการแจกแจงความน่าจะเป็นเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของขนาดชิ้นส่วน ดังรูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของการแจกแจงแบบปกติ

สำหรับตัวแปรความน่าจะเป็นแทนด้วย x และถ้าค่าเฉลี่ยคือ μ , ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคือ σ , ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นคือ $G(x)$ ของการแจกแจงปกติจะแสดงด้วยสมการที่ 2.1

$$G(x) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (2.1)$$

การรวมกันของสมการที่ 2.1 ในช่วง (a, b) แสดงถึงความน่าจะเป็น P ที่ตัวแปรความน่าจะเป็น x ที่อยู่ในช่วง $(-\infty, \infty)$, $P = 1$ แสดงด้วยสมการที่ 2.2

$$P = \int_a^b G(x_i) dx \quad (2.2)$$

นอกจากนี้สำหรับ $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ มักใช้ในการควบคุมคุณภาพชิ้นส่วน ฯลฯ ความน่าจะเป็นที่มีอยู่ $P = 0.997$ สามารถทำสมการได้ดังสมการที่ 2.3

$$P = \int_{\mu-3\sigma}^{\mu+3\sigma} G(x_i) dx = 0.997 \quad (2.3)$$

2.2.2.2 การกระจายความน่าจะเป็นพร้อมกันของระบบหลายตัวแปร

การกำหนดตัวแปรสุ่มเป็น $x_1, x_2, \dots, x_N$ และความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแต่ละฟังก์ชันเป็น $G(x_1), G(x_2), \dots, G(x_N)$ และนี้สมมติว่า $x_1, x_2, \dots, x_N$ เป็นอิสระ และการรวมฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสามารถแสดงดังสมการที่ 2.4

$$G(x_1, x_2, \dots, x_N) = G(x_1)G(x_2) \cdots G(x_N) = \prod_{i=1}^N G(x_i) \quad (2.4)$$

เมื่อมีการกำหนดช่วง $(a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots, (a_N, b_N)$ สำหรับ $x_1, x_2, \dots, x_N$ ความน่าจะเป็น P ที่เกิดขึ้นพร้อมกันภายในช่วงความคลาดเคลื่อนนั้นแสดงโดยสมการที่ 2.5

$$P = \int_{a_1}^{b_1} \cdots \int_{a_N}^{b_N} G(x_1, x_2, \dots, x_N) dx_1 dx_2 \cdots dx_N \quad (2.5)$$

เมื่อค่าของแต่ละส่วนเบี่ยงเบนของรูปร่างแตกต่างกันไปตามเวลาของการผลิตชิ้นส่วน ซึ่งมันจะขึ้นอยู่กับกระบวนการรวมกันของค่าเหล่านี้ โดยเงื่อนไขข้อจำกัดอาจไม่เป็นที่พอใจและบางครั้งฟิวเจอร์ดังกล่าวอาจขยายเกินขอบเขตความคลาดเคลื่อน ดังนั้นการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับความเบี่ยงเบนของรูปร่างและการค้นหาความน่าจะเป็นที่มีอยู่ภายในขอบเขตความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตรูปร่างจะอยู่บนการสมมติฐาน สมมติว่าการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับการเบี่ยงเบนทางเรขาคณิต δ_i ของฟิวเจอร์เป็นไปตามการแจกแจงปกติ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น G_i สามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.6

$$G(x_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (2.6)$$

เมื่อ σ_i คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ δ_i และนอกจากนี้เกี่ยวกับค่าเฉลี่ย μ_i ของ δ_i มันถูกพิจารณาว่า $\mu_i = 0$ เนื่องจากขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนถูกจัดเรียงเพื่อให้มีความสมมาตรด้วยฟิวเจอร์ที่กำหนด หากพื้นที่ของความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตที่ควบคุมโดยขอบเขตความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตนั้นแสดงด้วย D , ความน่าจะเป็น P ซึ่งอยู่ในขอบเขตความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตนั้นก็จะได้จากสมการที่ 2.7

$$P = \int \cdots \int_D G(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N) d\delta_1 d\delta_2 \cdots d\delta_N \quad (2.7)$$

เมื่อ N แทนจำนวนค่าอิสระของฟิวเจอร์ที่ควบคุมภายในขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนทางรูปร่าง ระดับสูงสุดของค่าอิสระคือหก แต่ขึ้นอยู่กับประเภทของขอบเขตความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างดังสมการที่ 2.7 ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนคือ t การรวมพื้นที่ D จะได้รับเงื่อนไขข้อจำกัดที่แสดงโดยสมการที่ 2.8

$$-t/2 \leq D(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N) \leq t/2 \quad (2.8)$$

การอินทิเกรตพื้นที่ D แสดงถึงเงื่อนไขข้อจำกัดระหว่างการเบี่ยงเบนทางเรขาคณิต δ_i ที่เกี่ยวกับขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง t สำหรับในการศึกษานี้การตั้งสมมติฐานเพื่อให้ได้ความน่าจะเป็น แสดงโดยสมการที่ 2.8

ข้อสมมติฐานที่ 1: ความเบี่ยงเบนของรูปร่างแต่ละ δ_i เป็นตัวแปรความน่าจะเป็นอิสระซึ่งกันและกัน
ข้อสันนิษฐานที่ 2: ช่วงของค่าที่แต่ละส่วนเบี่ยงเบนของรูปร่าง δ_i สามารถทำได้อย่างอิสระที่ขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง t สอดคล้องกับ -3σ และ $+3\sigma$ ของการแจกแจงแบบปกติ

จากการสมมติฐานที่ 1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น G ของสมการที่ 2.7 ก็ได้รับโดยสมการที่ 2.9

$$G(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N) = G(\delta_1)G(\delta_2) \cdots G(\delta_N) = \prod_{i=1}^N G(\delta_i) \quad (2.9)$$

นอกจากนี้จากข้อสมมติฐาน 2 หากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแปรผันการส่งถ่ายและการหมุนของการเบี่ยงเบนคือ σ_u, σ_α ตามลำดับ มันก็สามารถแสดงดังสมการที่ 2.10

$$\begin{cases} \sigma_u = \frac{t}{6} \\ \sigma_\alpha = \frac{t}{3l} \end{cases}$$

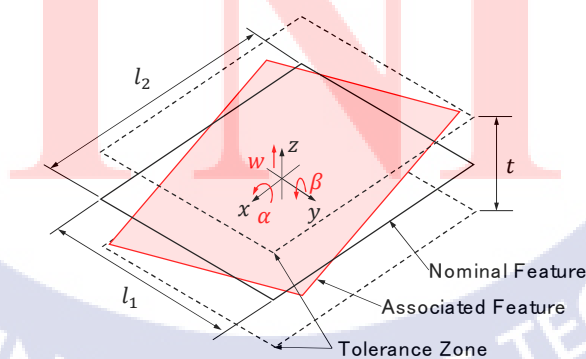
(2.10)

โดยที่ l คือความยาวของฟิวเจอร์ที่มีผลต่อการเบี่ยงเบนการหมุน

เพื่อให้ได้ความน่าจะเป็นที่คงอยู่โดยสมการที่ 2.7 มันจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการตอบสนองเงื่อนไขทั้งสองที่กำหนดโดยสมการที่ 2.10 ของช่วงค่าที่แต่ละส่วนเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตสามารถทำได้ และสมการที่ 2.8 ของเงื่อนไขข้อจำกัดของการเบี่ยงเบนทางรูปร่างด้วยความเกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อน

2.2.3 ช่วงพารามิเตอร์การเบี่ยงเบน

การพิจารณาพารามิเตอร์และช่วงของความเบี่ยงเบนจากตำแหน่งในอุดมคติและท่าทางของฟิวเจอร์รวมถึงความคลาดเคลื่อน รูปที่ 2.3 แสดงกรณีที่ระบุความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตสำหรับระนาบฟิวเจอร์และขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่อยู่ระหว่างระนาบสองระนาบ ฟิวเจอร์สำหรับการสวมพอดีของผลิตภัณฑ์จะมีความเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตสำหรับฟิวเจอร์ที่แสดงถึงระนาบอุดมคติ ซึ่งการเบี่ยงเบนของตำแหน่งสัมพัทธ์และท่าทางของส่วนต่อประสานที่เหมาะสมกับฟิวเจอร์ที่แสดงนั้นสามารถอธิบายได้โดยตัวแปรสามตัวที่แสดงในรูปที่ 2.3 นั่นคือมันสามารถอธิบายได้ด้วย w แทนค่าการเบี่ยงเบนของตำแหน่ง และ α และ β แสดงถึงความเบี่ยงเบนเชิงมุม พารามิเตอร์ที่แสดงถึงความเบี่ยงเบนของตำแหน่งและท่าทางของฟิวเจอร์ที่เหมาะสมนี้ถูกกำหนดโดยรูปร่างของฟิวเจอร์ที่มีขอบเขตความคลาดเคลื่อนและสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.3 การเบี่ยงเบนรูปร่างของระนาบฟิวเจอร์

ตารางที่ 2.2 การเบี่ยงเบนรูปร่างของฟิวเจอร์

Geometric tolerance zone	Geometric tolerance feature			
	Point	Line or axis	Plane	Cylinder
(a) sphere	u, v, w	—	—	—
(b) in a cylinder	—	u, v, α, β	—	—
(c) Between two coaxial cylinders	—	—	—	u, v, α, β
(d) Between two parallel planes	—	—	w, α, β	—
(e) 2 pairs of parallel two planes	—	u, v, α, β	—	—

u, v, w คือการเบี่ยงเบนของตำแหน่ง และ α, β คือการเบี่ยงเบนของท่าทาง และสิ่งเหล่านี้เรียกว่าพารามิเตอร์เบี่ยงเบน เพื่อให้หน่วยประมวลผลไม่มีข้อบกพร่อง ฟิวเจอร์ที่มีความเบี่ยงเบนจะต้องอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในกระบวนการผลิตหน่วยเงื่อนไขการตรวจสอบผลิตภัณฑ์และเงื่อนไขการประมวลผลได้รับการตั้งค่าอย่างเหมาะสมเพื่อให้อัตราที่ไม่บกพร่องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่แน่นอน ตัวอย่างเช่น มีการจัดการเพื่อให้อัตราที่ไม่ชำรุดเกินกว่าค่าที่แน่นอนโดยเลือกการตรวจสอบทั้งหมดหรือการสุ่มตัวอย่างการเลือกวิธีการตรวจสอบและอุปกรณ์ตรวจสอบและการตั้งค่าเงื่อนไขการประมวลผลอย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่มีฟิวเจอร์ความคลาดเคลื่อนซึ่งมีความเบี่ยงเบนอยู่ในช่วงค่าพอดี นั่นคือพารามิเตอร์ส่วนเบี่ยงเบนที่แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามด้านล่างนี้ โดยพิจารณาการแปรผันของพารามิเตอร์ส่วนเบี่ยงเบนในหน่วยที่มีการตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

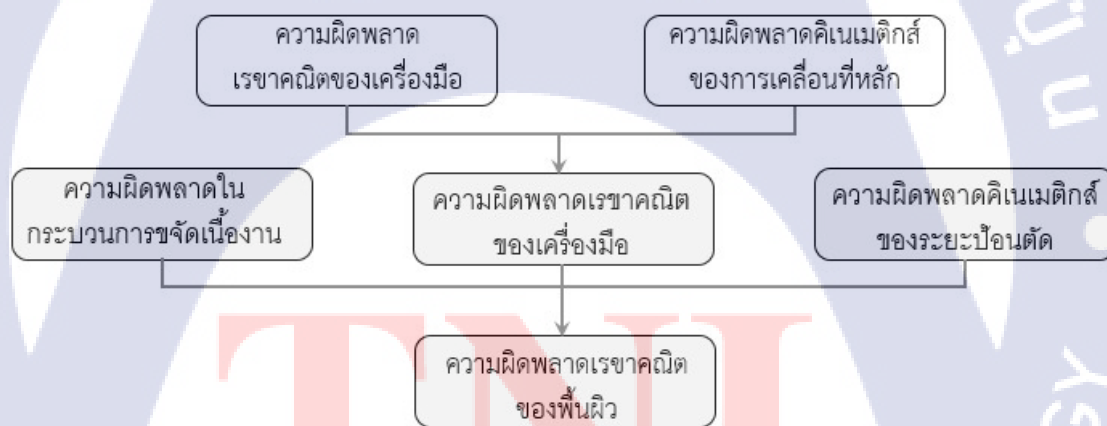
- (1) พารามิเตอร์ส่วนเบี่ยงเบนเป็นตัวแปรสุ่มที่ตามหลังการแจกแจงปกติ $N(0, \sigma)$
- (2) พารามิเตอร์ส่วนเบี่ยงเบนเป็นตัวแปรสุ่มอิสระซึ่งกันและกัน
- (3) การจัดการความคลาดเคลื่อนที่เหมาะสมจะดำเนินการในหน่วยกระบวนการผลิตและความน่าจะเป็นที่ฟิวเจอร์พอดีที่ไม่อยู่ในเขตการยอมรับและมีข้อบกพร่องคือ P_d

2.3 โมเดลการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ (Model of Shape Generation Motions)

ความผิดพลาดทางเรขาคณิตของผิวชิ้นงานเกิดมาจากความผิดพลาดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงาน ความผิดพลาดทางเรขาคณิตของเครื่องมือและความผิดพลาดใน

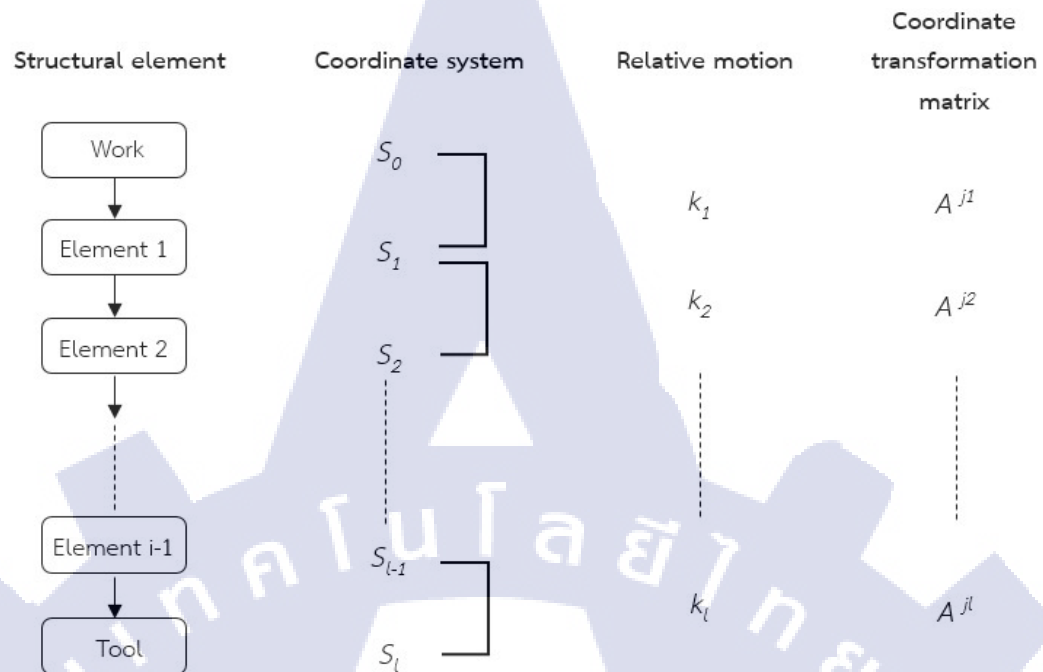
กระบวนการจัดเนื้องาน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดการกีดกันงานของพื้นผิวชิ้นงานและความสัมพันธ์จากมุมมองจุดพิกัดของกระบวนการสร้างรูปร่างจากเครื่องมือกล ความเที่ยงตรงทางเรขาคณิตของพื้นผิวชิ้นงานที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้มาจากปัจจัยในการออกแบบโครงสร้างและกระบวนการผลิตของทุกส่วนประกอบของเครื่องมือกล ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.4 นั้น แต่ละปัจจัยมีความซับซ้อนและไม่มีความชัดเจน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความผิดพลาดการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างเครื่องมือและชิ้นงาน

กระบวนการสร้างรูปร่างของเครื่องมือกลโดยทั่วไปนำเสนอด้วยวิธีการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่และรูปร่างเรขาคณิตของเครื่องมือ การสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของเครื่องมือต่อชิ้นงานที่ดำเนินการด้วยชุดของส่วนประกอบแข็งเกร็งของเครื่องมือ ซึ่งรูปที่ 2.5 แสดงภาพประกอบอธิบายส่วน ประกอบแข็งเกร็ง (rigid components) ที่เรียกว่าหน่วยย่อย (unit element) และการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ระหว่างแต่ละหน่วย

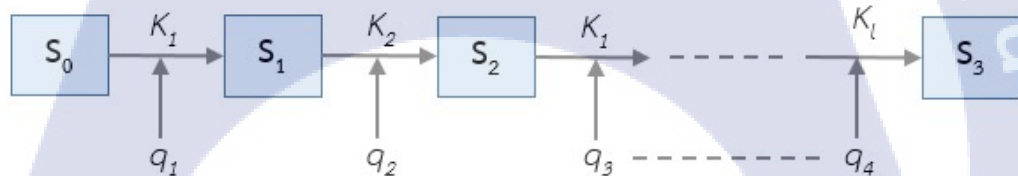


รูปที่ 2.4 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการกีดกันงาน

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพกลไกเชื่อมต่อแบบลูกโซ่ (chain-link diagram) ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่ ให้สัญลักษณ์ $S_0, S_1, \dots, S_l$ แทนกลไกเชื่อมต่อ โดยที่ S_0 คือชิ้นงานที่ต้องการตัดเฉือน S_l คือเครื่องมือตัด และ $S_1, \dots, S_{l-1}$ คือ กลไกเชื่อมต่อระดับกลาง และ $q_0, q_1, \dots, q_l$ คือพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของหน่วยส่วนประกอบ และ $k_1, k_2, \dots, k_l$ คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของหน่วยส่วนประกอบ



รูปที่ 2.5 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องมือกล



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพเซน-ลิงก์ ของการสร้างรูปร่างการเคลื่อนที่

2.3.1 จุดพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous point of coordinate)

จุดพิกัดโฮโมจีเนียสคือเวกเตอร์ลำดับที่สี่ในพื้นที่ 3 มิติ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ เวกเตอร์เจาะจง (eigenvectors) และเวกเตอร์ไม่เจาะจง (non-eigenvectors) โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างเรขาคณิต จุดพิกัดของเวกเตอร์ตำแหน่งจะเป็นของเวกเตอร์เจาะจง ส่วนเวกเตอร์ที่หาได้ด้วยวิธีอนุพันธ์หรือการแปลงรูปของเวกเตอร์ตำแหน่งจากเล็กน้อยไปจนถึงอนันต์จะเป็นของส่วนเวกเตอร์ไม่เจาะจง พิกัดของเวกเตอร์ลำดับที่สี่เรียกว่า พิกัดโฮโมจีเนียส (homogeneous coordinate)

เวกเตอร์เจาะจงจะมีอยู่สี่พิกัดโฮโมจีเนียสซึ่งเท่ากับความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน และเวกเตอร์ไม่เจาะจงจะมีอยู่สี่พิกัดโฮโมจีเนียสที่เท่ากับศูนย์

จุดของเวกเตอร์ตำแหน่งพิกัดคาร์ทีเซียน (cartesian coordinate) x, y, z เขียนในรูปแบบหลักของเวกเตอร์ลำดับที่สี่ได้ดังนี้

$$r = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

เพื่อให้ประหยัดพื้นที่ในการเขียน สามารถเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปแบบแถวได้ดังนี้

$$r = (x, y, z, 1)^T$$

โดยที่ T คือสัญลักษณ์ของทรานสโพสเมทริกซ์ (transpose of matrix) และเวกเตอร์ r สามารถแสดงได้ดังนี้

$$r = xe^1 + ye^2 + ze^3 + 1e^4$$

โดย e^1, e^2, e^3 คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ของระบบพิกัด ส่วน e^4 คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง (radius vector) ของพิกัด

$$e^4 = (0, 0, 0, 1)^T \quad (2.12)$$

2.3.2 การแปลงรูปพิกัด (Transformation of coordinate)

การแปลงรูปพิกัดสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$X_0 = A_{i,j}(q_1, q_2, \dots, q_l) X_l \quad (2.13)$$

โดยที่ X_l คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดพิกัดบนเครื่องมือตัดในระบบพิกัด

X_0 คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดในระบบพิกัดของชิ้นงาน

$A_{i,j}$ คือ เมทริกซ์ 4×4 ที่มีโครงสร้างดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เมทริกซ์ที่ด้านบนซ้ายขนาด 3×3 คือระบบการหมุน S_i และสัมพันธ์กับพิกัดเริ่มต้น O_i ซึ่งเมทริกซ์นี้แสดงในรูปเมทริกซ์ตั้งฉาก (orthogonal matrix) เช่น ที่ $i, j, k = 1, 2$ และ 3

$$\sum_{j=1}^3 a_{ij} a_{kj} = \sum_{j=1}^3 a_{ji} a_{jk} = \begin{cases} 0, & \text{if } i \neq k, \\ 1, & \text{if } i = k, \end{cases} \quad (2.15)$$

และนอกจากนี้ ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = 1 \quad (2.16)$$

ระบบ S_{i-1} และ S_i จะผูกกับสองกลไกเชื่อมโยงการสร้างรูปร่าง โดยที่การเคลื่อนที่สัมผัสของกลไกเชื่อมโยงจำกัดอยู่ที่หกการเชื่อมโยง จากสมการ (11) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$a_{ij}(q_1, q_2, \dots, q_l) = \prod_{i=1}^l A_{ji}^{\alpha_i}(\beta_i) \quad (2.17)$$

โดยที่ $A_{ji}^{\alpha_i}(\beta_i)$
 $\alpha(1, \dots, 6)$

คือ เมทริกซ์ 4×4 ที่แสดงการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่
คือ แสดงทิศทางของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่
หมายเลข 1, 2 และ 3 หมายถึงการเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและทิศทางตาม
แกน X, Y และ Z หมายเลข 4, 5 และ 6 การเคลื่อนที่แบบหมุนและ
ตำแหน่งรอบแกน X, Y และ Z

β

คือ แสดงค่าการการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และตำแหน่งเคลื่อนที่

γ คือ แสดงค่าระบบพิกัด

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์แสดงด้วย A^α คือ การเคลื่อนที่ตามแนวแกน X, Y และ Z หรือการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกน X, Y และ Z ซึ่งสามารถแสดงเมทริกซ์ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงเมทริกซ์การเคลื่อนที่แนวเส้นตรงและการเคลื่อนที่แบบหมุน

Motion type	Axis	Relative Motion	Transformation Matrix
Translation Motion (การเคลื่อนที่แนวเส้นตรง)	X	1	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Y	2	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Z	3	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotary Motion (การเคลื่อนที่แบบหมุน)	A	4	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	B	5	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotary Motion (การเคลื่อนที่แบบหมุน)	C	6	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

2.3.3 โฮโมจีเนียสทรานสฟอร์มเมชันเมทริกซ์ของความคลาดเคลื่อนการหมุนและการเคลื่อนที่ (Homogeneous Transformation Matrix of rotation and translation: HTM)

การศึกษาพฤติกรรมความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรนั้น รูปแบบคิเนแมติกส์ของเครื่องจักรสามารถจัดให้อยู่ในรูปของ HTM และความคลาดเคลื่อนแต่ละชนิดสามารถวิเคราะห์ได้ โดยการหาความคลาดเคลื่อนที่ส่งผลต่อความแม่นยำของตำแหน่งจุดตัดโดยพิจารณาจากตัวชิ้นงาน พารามิเตอร์ของความคลาดเคลื่อนสามารถแสดงด้วย HTM ได้ดังสมการที่ 2.18

$$E_{N \times N} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y & \delta_x \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x & \delta_y \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \delta_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

โดยที่ δ_y	คือ ความคลาดเคลื่อนตำแหน่งในทิศทางแกน Y
δ_x	คือ ความคลาดเคลื่อนทางตรงในทิศทางแกน X
δ_z	คือ ความคลาดเคลื่อนทางตรงในทิศทางแกน Z
ε_y	คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน Y (Roll movement)
ε_x	คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน X (Pitch movement)
ε_z	คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมของแกน X (Yaw movement)

2.4 การทบทวนวรรณกรรม

ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้วยการหาข้อมูลในฐานข้อมูลมาตรฐานต่าง ๆ อาทิเช่น จากเว็บไซต์ www.sciencedirect.com พร้อมทั้งหาบทความเพิ่มเติมที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของเครื่องจักรกล โดยได้พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังสรุปในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับที่	ผู้เขียน	ปีที่ตีพิมพ์	หัวข้องานวิจัยที่น่าสนใจ
1	Ibaraki S. <i>et al.</i> [16]	2010	การทดสอบการตัดเฉือนเพื่อระบุความคลาดเคลื่อนคิเนเมติกส์บนเครื่องมือกล 5 แกน
2	Soori M. <i>et al.</i> [17]	2013	มิติและความคลาดเคลื่อนของเครื่องกัดซีเอ็นซีสามแกนในระบบการตัดเฉือนเสมือนจริง
3	Takahashi A. <i>et al</i> [5]	2014	การวิเคราะห์การเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์บนพื้นฐานความคลาดเคลื่อนเรขาคณิต
4	Altintas Y. and Chao S. [18]	2016	ทิศทางการสะท้อนอิสระในงานกัด 5 แกนด้วยดอกกัดบอล-เอ็น
5	วิโรช ทศนะ และดอนแก้วตก [19]	2017	การตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกลึงด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ การสั่นหรือเครื่องมือตัด และการโก่งงอของชิ้นงาน

จากตารางที่ 2.4 ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการศึกษาการพิจารณาพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของเครื่องจักรกล ได้พบว่าการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของเครื่องมือกลและความคลาดเคลื่อนของรูปร่างด้วยการจำลองรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ 5 แกน สามชนิด คือ workpiece rotation type, tool & workpiece rotation type และ tool rotation type มีการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนเรขาคณิตของแต่ละตำแหน่งบนชุดการเคลื่อนที่ให้ผลที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นได้ว่ายังไม่มีการศึกษาการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

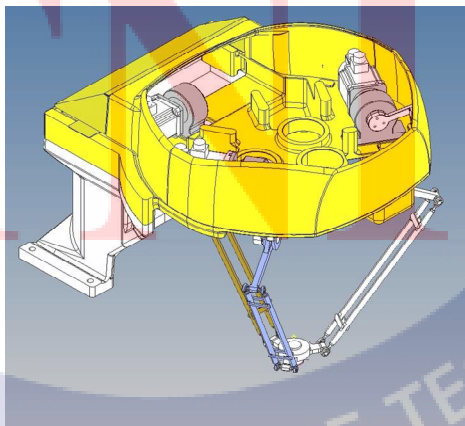
3.1 บทนำ

วิธีดำเนินการวิจัยในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนปฏิบัติดังต่อไปนี้

- บทนำ
- การออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ
- การวัดและการจำลองความแม่นยำการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน
- โมเดลจำลองความเปี่ยงเบนคิเนเมติกส์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน
- การออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน
- กรณีศึกษาการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

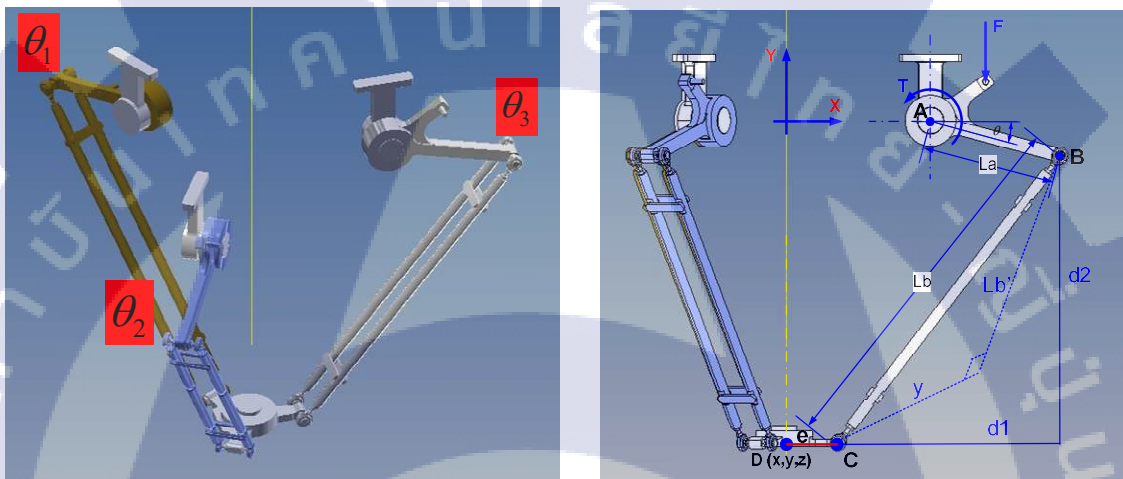
3.2 การออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ

การออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานโดยใช้โปรแกรม Autodesk Inventor Education ซึ่งทางเจ้าของลิขสิทธิ์คือ บริษัท Autodesk, Inc. ได้อนุญาตให้สถานศึกษาสมัครและดาวน์โหลดเพื่อใช้ในการเรียนการสอนและวิจัยที่ไม่ใช่เพื่อการพาณิชย์ได้ และรูปที่ 3.1 แสดงแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่ออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ



รูปที่ 3.1 การออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานด้วย CAD โมเดล Fanuc M-1iA /1H

การออกแบบแขนหุ่นยนต์โครงสร้างในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้วิธีแบบคิเนเมติกส์แบบผกผัน (inverse kinematics) โดยจุดประสงค์ของการพิจารณาคิเนเมติกส์ผกผันของหุ่นยนต์คู่นี้คือการสร้างแบบจำลองมุมที่ถูกต้องในแต่ละข้อต่อ ณ ตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจงของเอฟเฟกเตอร์ (effector) ของระบบองศาอิสระที่ถูกจำกัดดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ซึ่งจะบังคับใช้ในส่วนนี้ว่าพารามิเตอร์ของระบบโดยรวมสามารถรู้จกกันซึ่งรวมถึงช่วงของมุมที่ต้องการสำหรับ θ_1, θ_2 และ θ_3 ตามลำดับ และความยาวโดยรวมของแต่ละลิงค์ข้างบน L_a และความยาวโดยรวมของแต่ละลิงค์ข้างล่าง L_b ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการของเอฟเฟกเตอร์สุดท้ายในแกน x และ y ตามลำดับ และระยะห่างระหว่างเพลามอเตอร์ทั้งสอง (c)



รูปที่ 3.2 ห่วงโซ่คิเนเมติกส์ของหุ่นยนต์ Fanuc M-1iA / 1H

การวิเคราะห์เริ่มพิจารณาในแต่ละห่วงโซ่คิเนเมติกส์แยกกัน สำหรับห่วงโซ่แรกจะทำการฉายภาพกับระนาบ x, y ซึ่งให้ผลเวกเตอร์วงปิดที่แสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการที่ 3.1-3.3

$$d_1^2 + d_2^2 = L_b^2 \quad (3.1)$$

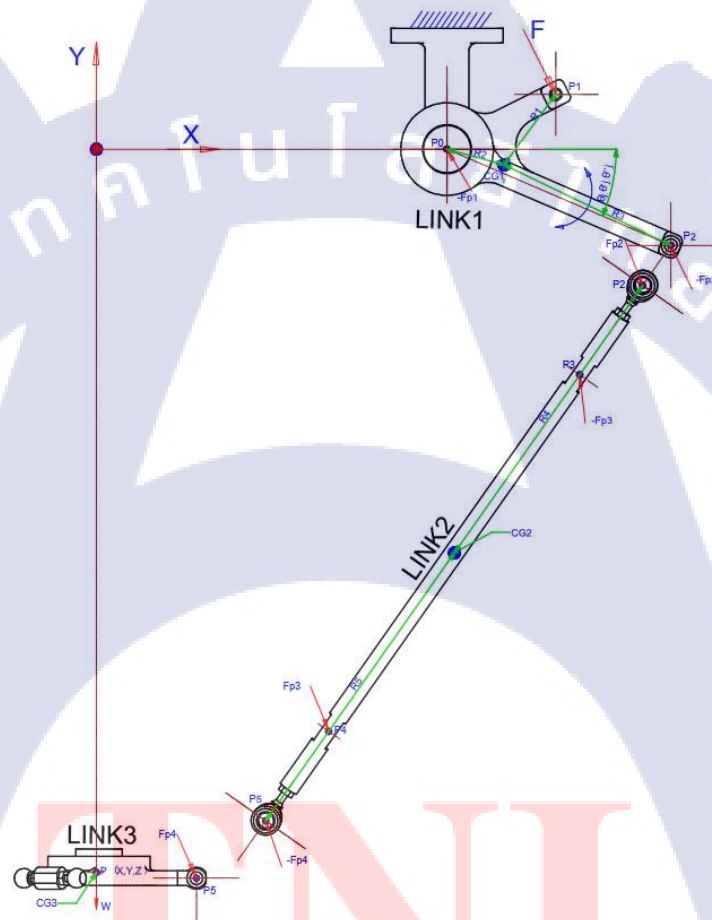
เมื่อ

$$L_b'^2 = L_b^2 - y^2 \quad (3.2)$$

ดังนั้นจากฟังก์ชันการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น สามารถหาค่าเชิงมุมดังแสดงในสมการที่ 3.3 [20]

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{4zL_a \pm \sqrt{(-4zL_a)^2 - 4(2TL_a + K)(-2TL_a + K)}}{2(2TL_a + K)} \right)$$

(3.3)



รูปที่ 3.3 FBD สำหรับการจำลองแบบไดนามิก

การจำลองแบบไดนามิกถูกนำไปใช้เพื่อการออกแบบ และภาพเคลื่อนไหวของผลลัพธ์จะดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Inventor Education ซึ่งพารามิเตอร์ของกลไกแบบขนาน 3 ลิงค์ทั่วไปแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของกลไกแบบขนาน 3 ลิงค์ทั่วไป

Parameter	Value
La	100 mm
Lb	270 mm
e	47 mm
Torque	2 Nm
Gravity	9810 mm/s ²
Velocity	5 deg/s

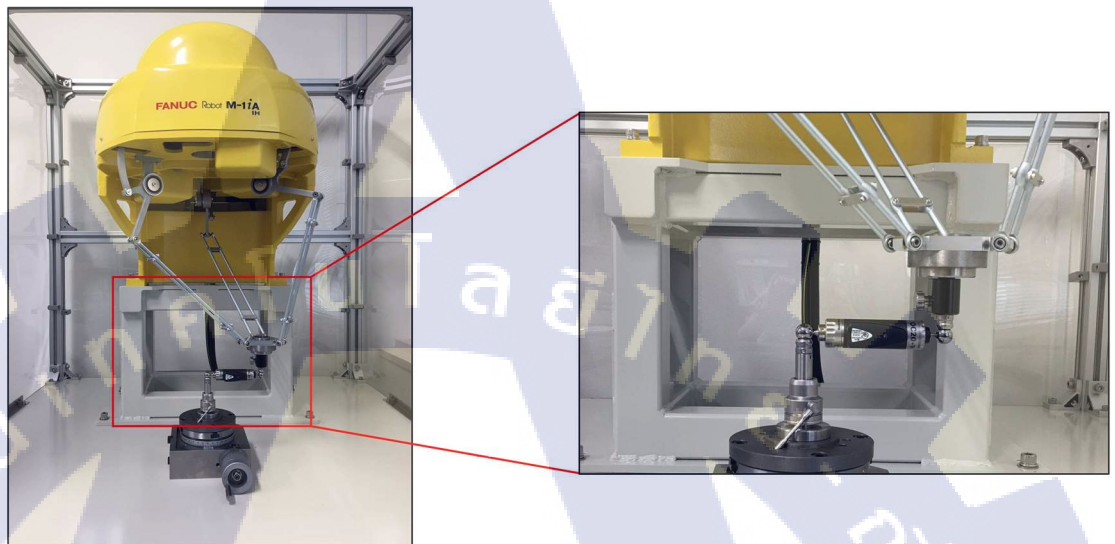
3.3 การวัดและการจำลองความแม่นยำการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

3.3.1 การวัดความแม่นยำของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

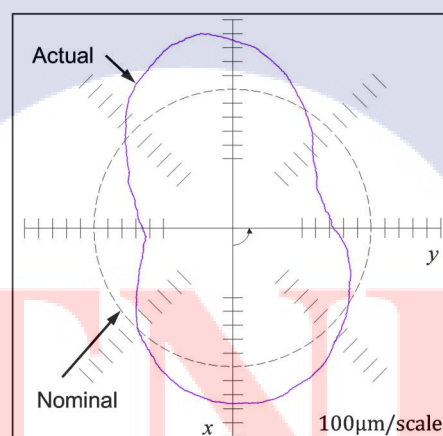
ความแม่นยำการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่ใช้การวัดด้วย DBB (double ball bar) ตามรูปที่ 3.4 เป็นเครื่องมือในการวัดซึ่งสามารถขยายตัวหรือหดตัวของบาร์ที่ติดกับทรงกลมที่ปลายทั้งสองในหน่วย 1/10,000 มม. ในการวัดรัศมีการเคลื่อนที่ผิดพลาดของการแก้ไขการเคลื่อนที่ของวงกลมด้วยแกนความตรงสองแกน และทำการตรวจความแม่นยำและสอบเทียบของเครื่องมือกลซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลาย วิธีการวัดแบบนี้ใช้กับการวัดของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานได้

รูปที่ 3.4 แสดงถึงแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานและระบบการวัดแบบ DBB ซึ่งแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานนี้เป็นรุ่น M-liA / 1H ผลิตโดยบริษัทฟานัค (Fanuc) และมี 3 ระดับองศาอิสระ (degree of freedom) สำหรับตัววัด DBB เป็นรุ่น BC20-W ผลิตโดยบริษัท Renishaw จำกัด ซึ่งค่าความแม่นยำในการวัดของเครื่องอยู่ที่ $\pm 1.25 \mu\text{m}$ โดยมีช่วงระยะการวัดที่ ± 1 มม. ของจุดอ้างอิงความยาว และการวัดความยาวอ้างอิงใช้ความยาว 100 มม. ด้านหนึ่งของ DBB ถูกกำหนดตำแหน่งคงที่ในจุดกึ่งกลางจุดหมุนที่ถูกติดตั้งในกึ่งกลางของโต๊ะและตำแหน่งคงที่อื่น ๆ ไปยังส่วนปลายของเอฟเฟกเตอร์ (effector) โดยการใช้ข้อต่อที่ 1200 มม. ต่อมา

ผลลัพธ์ของการวัดได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.5 จากผลของการวัดพบว่าสามารถมองเห็นตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟกเตอร์ที่เป็นรูปทรงไข่ ซึ่งมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางไปในแนวตำแหน่งแกน x และค่าความเบี่ยงเบนมากที่สุดของทิศทางรัศมีอยู่ที่ ± 0.4 มม.



รูปที่ 3.4 การทดลองวัดความแม่นยำด้วย DBB



รูปที่ 3.5 ผลการการวัดด้วย DBB

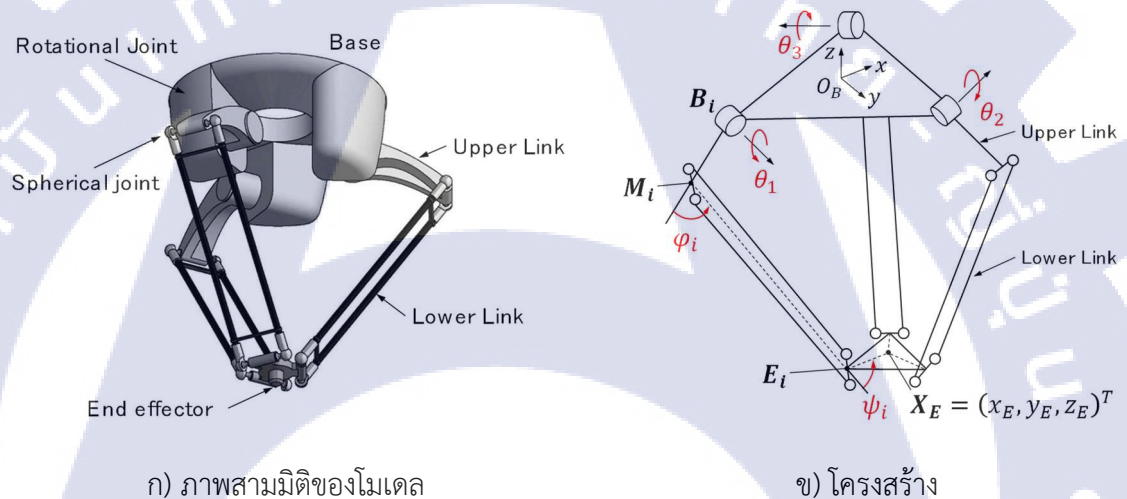
3.3.2 การเปรียบเทียบการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

ในการจำลองได้กำหนดข้อต่อหมุนจำนวนหนึ่งตัวของลิงค์ตัวบน (upper link) และลิงค์ตัวล่าง (lower link) ดังแสดงรูปที่ 3.6 รัศมี L_1 เป็นของเส้นรอบวงบนข้อต่อหมุนที่ถูกจัดวางไว้ ความยาวของลิงค์ตัวบนและความยาวของลิงค์ตัวล่างเป็น L_2, L_3 โดยมีการเปลี่ยนแปลงในระยยะ ± 1 มม.

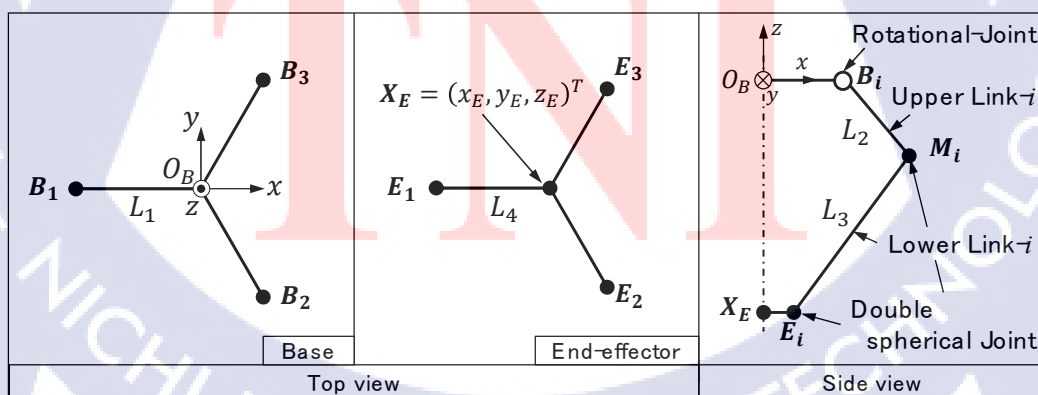
3.4 โมเดลจำลองความเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

3.4.1 โมเดลภาพรวม

จากรูปที่ 3.7 แสดงให้เห็นถึงโมเดลและพารามิเตอร์หลาย ๆ อย่างของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน สำหรับในการวิจัยนี้โมเดลประกอบไปด้วยฐานที่ยึดตำแหน่งไว้ ตัวบนและตัวล่างของลิงค์ ข้อต่อหมุน และเอ็นเอฟเฟคเตอร์ โดยที่ตัวเอ็นเอฟเฟคเตอร์จะมีแกนทั้งหมด 3 แกน ที่ประกอบไปด้วย X, Y, และ Z ตามตำแหน่งที่ยึดไว้กับฐาน ตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์จะถูกกำหนดโดยตำแหน่งของมุมการหมุน $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ของเซอร์โวมอเตอร์ ตำแหน่งมุมการหมุน $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ของเซอร์โวมอเตอร์จะถูกยึดไว้กับฐานและควบคุมแยกกันและเป็นอิสระต่อกัน โดยตัวลิงค์บนจะเชื่อมต่อกับเซอร์โวมอเตอร์ ลิงค์ตัวล่างจะเชื่อมต่อกับลิงค์บนและเอ็นเอฟเฟคเตอร์ด้วยข้อต่อบอลสองตัว



รูปที่ 3.7 โมเดลของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน



รูปที่ 3.8 พารามิเตอร์เรขาคณิตของลิงค์ที่ประกอบไปด้วยความยาวและตำแหน่งของข้อต่อ

3.4.2 การวิเคราะห์คิเนเมติกส์แบบผกผัน [10]

จากที่ได้อธิบายถึงวิธีการที่ได้รับมุมการหมุนของมอเตอร์และมุมระหว่างลิงค์ที่เป็นค่าป้อนเข้าในการวิเคราะห์ของความเปี่ยงเบนการเคลื่อนที่

การหมุนมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ของมอเตอร์ได้รับจากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบย้อนกลับ และมุม φ_i, ψ_i ระหว่างลิงค์ และระหว่างลิงค์กับตัวเอ็นเอฟเฟคเตอร์ โดยได้รับมาจากการใช้ปฎิภูมิเวคเตอร์ภายใน

ก) เกี่ยวกับ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

ตำแหน่งการหมุนมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ของตัวข้อต่อสามารถรับได้จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบผกผัน โดยมีพื้นฐานมาจากตำแหน่งของเวคเตอร์ X_E ของตัวเอ็นเอฟเฟคเตอร์ ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบผกผันจะเป็นการหาค่ากระจัดตัวข้อต่อ (มุมการหมุนหรือการเคลื่อนที่ที่กระจัด) จากตำแหน่งที่ได้รับจากเอ็นเอฟเฟคเตอร์ โดยวิธีการคำนวณจะแสดงตามบรรทัดข้างล่างนี้

จากค่าป้อนเข้าจะให้ตำแหน่งเวคเตอร์ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ตามสมการที่ 3.4

$$X_E = x_E, y_E, z_E \quad (3.4)$$

ตำแหน่งของเวคเตอร์ M_i, E_i ในรูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดงตามสมการที่ 3.5 ดังต่อไปนี้ ซึ่งใช้ในการหา ระยะของลิงค์ มุมการหมุน $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ และตำแหน่งเวคเตอร์ X_E ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์

$$\begin{aligned} M_1 &= (-L_1 - L_2 \cos \theta_1, 0, -L_2 \sin \theta_1)^T \\ M_2 &= \left(\frac{1}{2} L_1 + \frac{1}{2} L_2 \cos \theta_2, -\frac{\sqrt{3}}{2} L_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} L_2 \cos \theta_2, -L_2 \sin \theta_2 \right)^T \\ M_3 &= \left(\frac{1}{2} L_1 + \frac{1}{2} L_2 \cos \theta_3, \frac{\sqrt{3}}{2} L_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_2 \cos \theta_3, -L_2 \sin \theta_3 \right)^T \\ E_1 &= (x_E, -L_4, y_E, z_E)^T \\ E_2 &= \left(x_E + \frac{L_4}{2}, y_E - \frac{\sqrt{3}}{2} L_4, z_E \right)^T \\ E_3 &= \left(x_E + \frac{L_4}{2}, y_E + \frac{\sqrt{3}}{2} L_4, z_E \right)^T \end{aligned} \quad (3.5)$$

จากความสัมพันธ์ระยะระหว่างสองจุดและความยาวลิงค์ สามารถแสดงดังสมการที่ 3.6 ดังต่อไปนี้

$$L_3^2 = |E_i - M_i|^2$$

(3.6)

ด้วยการแทนสมการที่ 3.5 เข้าไปในสมการที่ 3.6 และจัดเรียง θ_i ใหม่ จากนั้นจะได้สมการที่ 3.7 ดังนี้

$$A_i \cos \theta_i + B_i \sin \theta_i = C_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$A_1 = x_E - L_4 + L_1, B_1 = z_E, C_1 = \frac{L_3^2 - L_2^2 - A_1^2 - y_E^2 - z_E^2}{2L_2}$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(-D_2 + \frac{1}{2}E_2), B_2 = z_E, C_2 = \frac{L_3^2 - L_2^2 - D_2^2 - E_2^2 - z_E^2}{2L_2}$$

$$D_2 = x_E + \frac{1}{2}L_4 - \frac{1}{2}L_1, E_2 = y_E - \frac{\sqrt{3}}{2}L_4 + \frac{\sqrt{3}}{2}L_1$$

$$A_3 = \frac{1}{2}(-D_3 + \sqrt{3}E_3), B_3 = z_E, C_3 = \frac{L_3^2 - L_2^2 - D_3^2 - E_3^2 - z_E^2}{2L_2}$$

$$D_3 = x_E + \frac{1}{2}L_4 - \frac{1}{2}L_1, E_3 = y_E + \frac{\sqrt{3}}{2}L_4 - \frac{\sqrt{3}}{2}L_1$$

(3.7)

จากการใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติสังเคราะห์และใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติแบบผกผันในสมการที่ 3.7 θ_i จะแสดงตามสมการที่ 3.8 ดังนี้

$$\theta_i = -\tan^{-1}(A_i/B_i) - \tan^{-1}(C_i/\sqrt{A_i^2 + B_i^2 - C_i^2})$$

(3.8)

ข) เกี่ยวกับมุม φ_i, ψ_i

มุม φ_i และ ψ_i ระหว่างลิงค์ และระหว่างลิงค์กับเอ็นเอฟเฟคเตอร์ในรูปที่ 3.7 จะแสดงตามสมการที่ได้รับจากปริภูมิเวกเตอร์ภายใน ดังสมการที่ 3.9

$$\varphi_i = \cos^{-1}\left(\frac{B_i M_i \cdot M_i E_i}{|B_i M_i| |M_i E_i|}\right)$$

$$\psi_i = \cos^{-1}\left(\frac{M_i E_i \cdot E_i X_E}{|M_i E_i| |E_i X_E|}\right)$$

(3.9)

เมื่อ

Φ_i : มุมระหว่างลิงค์

ψ_i : มุมระหว่างลิงค์ล่างและเอ็นเอฟเฟคเตอร์

$B_i M_i$: เวกเตอร์ระหว่าง B_i และ M_i

$M_i E_i$: เวกเตอร์ระหว่าง M_i และ E_i

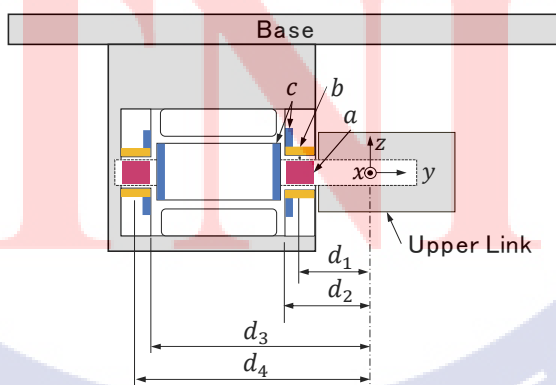
$E_i X_E$: เวกเตอร์ระหว่าง E_i และ X_E

3.4.3 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงแบบจำลองของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่รวมไปถึงค่าผิดพลาดเรขาคณิตของรูปร่าง แบบสมการจะรวมไปถึงค่าผิดพลาดเรขาคณิตสำหรับการหมุนของข้อต่อ ข้อต่อทรงกลมและลิงค์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีส่วนประกอบที่ถูกสร้างและถูกใช้เพื่อแสดงค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงจะอธิบายการเคลื่อนที่รวมไปถึงค่าเบี่ยงเบนของรูปร่าง โดยการใช้โมเดลรูปร่างการเคลื่อนที่ (model of shape generation motions) ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2

ก) การเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของข้อต่อหมุน

ในการเคลื่อนที่ของข้อต่อหมุนจะแสดงตามสมการที่ 3.10 ซึ่งประกอบไปด้วยค่าเบี่ยงเบนของรูปร่างรัศมีเพลลาแบร์ริง และเพลลาแรงขับแบร์ริง ตามรูปที่ 3.9 ที่แสดงถึงโมเดลของข้อต่อหมุนและการเคลื่อนที่ของเมทริกซ์ $A_R^0(\theta_i)$ ตามรายละเอียดข้างล่าง



รูปที่ 3.9 แบบจำลองของข้อต่อแบบหมุน

$$A_R^\sigma(\theta_i) = A_R \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \delta\gamma_{\theta 1} & \sin \theta_i & \delta x_\theta \\ \delta\gamma_{\theta 2} & 1 & \delta\alpha_{\theta 1} & \delta y_\theta \\ -\sin \theta_i & \delta\alpha_{\theta 2} & \cos \theta_i & \delta z_\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} A_R^{-1}$$

$$\alpha_{\theta 1} = \gamma_{ia} \sin \theta_i - \alpha_{ia} \cos \theta_i + \alpha_{jb}$$

$$\delta\alpha_{\theta 2} = -\gamma_{jb} \sin \theta_i - \alpha_{jb} \cos \theta_i + \alpha_{ia}$$

$$\delta\gamma_{\theta 1} = \gamma_{jb} \cos \theta_i - \alpha_{jb} \sin \theta_i - \gamma_{ia},$$

$$\delta\gamma_{\theta 2} = \gamma_{ja} \cos \theta_i + \alpha_{ja} \sin \theta_i - \gamma_{jb}$$

$$\delta x_\theta = \frac{1}{2}(-2\delta x_{jb} + d_1\gamma_{jb} + d_4\gamma_{jb}) \cos \theta_i - (d_1 + d_4)\gamma_{ia} - \frac{1}{2}(2\delta z_{jb} + d_1\alpha_{jb} + d_4\alpha_{jb}) \sin \theta_i + \delta x_{ia}$$

$$\delta y_\theta = \delta y_{ic} - \delta y_{jc}$$

$$\delta z_\theta = \frac{1}{2}(-2\delta x_{jb} + d_1\gamma_{jb} + d_4\gamma_{jb}) \sin \theta_i + (d_1 + d_4)\alpha_{ia} - \frac{1}{2}(2\delta z_{jb} + d_1\alpha_{jb} + d_4\alpha_{jb}) \cos \theta_i + \delta z_{ia}$$

(3.10)

เมื่อ

R : เวกเตอร์ที่แสดงแกนหมุนของข้อต่อหมุน

A_R : การเคลื่อนที่ตำแหน่งต่อเนื่องเมทริกซ์ที่จัดตำแหน่งแกน Y กับแกนหมุน

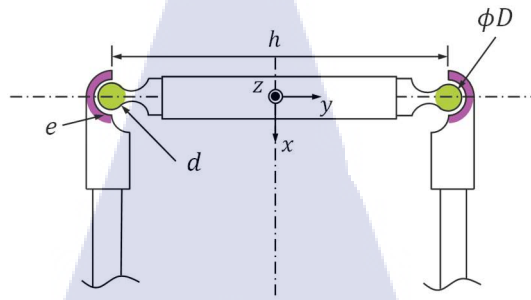
α_{mn}, γ_{mn} : ค่าเบี่ยงเบนของท่าทางรอบแกน X และแกน Z ของรูปร่าง n ขององค์ประกอบ m

โดยที่ $m = i, j$, และ $m = a, b$

$\delta x_{mn}, \delta y_{mn}, \delta z_{mn}$: ค่าความเบี่ยงเบนของตำแหน่ง x, y, z ทิศทางของรูปร่าง n ขององค์ประกอบ m โดยที่ $m = i, j$, และ $m = a, b$

ข) ค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของข้อต่อทรงกลม

การเคลื่อนที่ของข้อต่อทรงกลมสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 3.11 ซึ่งรวมค่าความเบี่ยงเบนของรูปร่าง ตามรูปที่ 4. 11 โดยแสดงถึงโมเดลข้อต่อทรงกลมและการเคลื่อนที่เมทริกซ์ $A_R^\sigma(\theta_i)$ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.10 โมเดลของข้อต่อทรงกลม

$$A_S^G(\varphi_i) = A_S \begin{pmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 & \delta x_\varphi \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 & \delta y_\varphi \\ 0 & 0 & 1 & \delta z_\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} A_S^{-1}$$

$$\delta x_\varphi = -\delta x_d \cos \varphi_i + \delta y_d \sin \varphi_i + \delta x_e,$$

$$\delta y_\varphi = -\delta x_d \sin \varphi_i - \delta y_d \cos \varphi_i + \delta y_e,$$

$$\delta z_\varphi = \delta z_e - \delta z_d$$

(3.11)

A_S : A coordinate transformation matrix that aligns the z axis with the rotation axis.

$\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n$: deviation of the position in the x, y, z direction of the guide surface n.

n = d, e.

เมื่อ

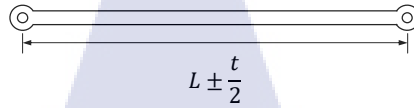
S : เป็นเวกเตอร์ที่แสดงถึงแกนหมุนตั้งฉากไปยังระนาบที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์ $B_i M_i$ และ $M_i E_i$ หรือเวกเตอร์ $M_i E_i$ และ $E_i X_E$

A_S : เป็นการแปลงพิกัดเมทริกซ์ที่จัดอยู่ในตำแหน่งแกน Z กับแกนหมุน

$\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n$: เป็นค่าเบี่ยงเบนของตำแหน่งในทิศ x, y, z ของพื้นผิว n, n = d, e

ค) ขนาดความเบี่ยงเบนของลิงค์บนและลิงค์ล่าง

การเคลื่อนที่เมทริกซ์ $A_L^G(L)$ รวมไปถึงขนาดความเบี่ยงเบนของลิงค์ ดังแสดงตามรูปที่ 3.11 สามารถอธิบายดังสมการที่ 3.12 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.11 โมเดลความยาวของลิงค์

$$A_L^\sigma(L) = A_L \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L + \delta_L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} A_L^{-1} \quad (3.12)$$

เมื่อ

L : ในกรณีของลิงค์บน เวกเตอร์จะเป็น $\frac{B_i M_i}{|B_i M_i|}$ และในลิงค์ล่าง เวกเตอร์จะเป็น $\frac{M_i E_i}{|M_i E_i|}$

A_L : การแปลงพิกัดเมทริกซ์บนแกน x กับทิศเวกเตอร์ L

δ_L : ค่าเบี่ยงเบนของขนาดลิงค์

จากการใช้สูตรสมการที่ 3.10 ถึง 3.12 ค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของจุด E_i ($i = 1, 2, 3$) จะได้รับจากสมการที่ 3.13 ดังนี้

$$E_i = (A_{L1i}(L_1)A_{Ri}^\sigma(\theta_i)A_{L2i}^\sigma(L_2)A_{L3i}^\sigma(L_3)A_{S2i}^\sigma(\varphi_i)A_{L1i}(L_1)A_{Ri}(\theta_i)A_{L2i}(\varphi_i)A_{L3i}(L_3)A_{S2i}(\varphi_i))X_0 \quad (3.13)$$

ดังนั้น

$A_{Lki}(L_k)$: เป็นการแปลงพิกัดการจัดของ L_k โดยปราศจากความเบี่ยงเบน

$A_{Lki}^\sigma(L_k)$: เป็นการแปลงพิกัดการจัดของ L_k โดยรวมความเบี่ยงเบน

$A_{Vi}^\sigma(\theta_i)$: เป็นการแปลงพิกัดของการหมุนการจัดของ θ_i โดยรวมความเบี่ยงเบน

X_0 : เวกเตอร์ศูนย์

เมื่อพิกัดของเอ็นเอฟเพคเตอร์เป็นจุดศูนย์กลางของทั้งสามจุด E_1, E_2, E_3 ตำแหน่งเวกเตอร์ของเอ็นเอฟเพคเตอร์สามารถแสดงดังสมการที่ 3.14 ดังนี้

$$X_E = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 E_i$$

(3.14)

ดังนั้นเมื่อตำแหน่งเวกเตอร์ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ได้รับค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งเอ็นเอฟเฟคเตอร์ สามารถแสดงสมการที่อธิบายตั้งแต่สมการที่ 3.7 ถึง 3.14 เมื่อค่าเบี่ยงเบนนั้นได้รับมาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการที่ 3.15 ซึ่งจะถูกใช้กับการสร้างเมทริกซ์ที่รวมไปถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\sigma_{ij}^c = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (\mu_{kj}^b)^2 (\sigma_{ik}^a)^2 + \sum_{k=1}^4 (\mu_{kj}^a)^2 (\sigma_{ik}^b)^2}$$

(3.15)

เมื่อ

i, j : หมายเลขบรรทัดและหมายเลขคอลัมน์ขององค์ประกอบในเมทริกซ์ homogeneous coordinate transformation matrices แบบ 4×4

μ^a, μ^b : ค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบน

$\sigma_{ik}^a, \sigma_{ik}^b, \sigma_{ij}^c$: ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเบี่ยงเบน

3.5 การออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

จากที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานได้รับผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและขนาดความคลาดเคลื่อนของส่วนประกอบ ดังนั้นจากมุมมองของการออกแบบความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของค่าความคลาดเคลื่อนจึงเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อค่าคลาดเคลื่อนถูกลดลง การประมวลผลจะยากมากขึ้นและจะใช้ต้นทุนในการประมวลผลมากขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้ค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดให้ใหญ่มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ขณะทำการรักษาค่าความแม่นยำของการเคลื่อนที่ในค่าที่กำหนดไว้

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอถึงวิธีสำหรับการได้รับค่ารวมกันที่เหมาะสมของความคลาดเคลื่อนของลิงค์และข้อต่อกับค่ายอมรับได้ของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ โครงสร้างขนาน และเอ็นเอฟเคเตอร์ที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดด้วยการใช้วิธีการปรับค่าที่เหมาะสม ซึ่งสูตรการออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนของหุ่นยนต์สามารถอธิบายดังต่อไปนี้

ก) ตัวแปรการออกแบบ

จากตารางที่ 3.3 แสดงการออกแบบตัวแปร พื้นผิวของไก้นำทาง $a \sim e$ ที่แสดงในตารางที่ 3.3 เป็นการแสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 ซึ่งการออกแบบจะต้องถูกเก็บไว้ทั้งหมด 7 ค่า $t = (t_1, t_2, \dots, t_7)^T$ ในทั้งหมดด้วยการรวมกันของความคลาดเคลื่อนรูปร่าง t_1 ถึง t_5 และขนาดความคลาดเคลื่อนรูปร่าง t_6, t_7 ตามตารางที่ 3.3 แสดงขนาดของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ครั้งนี้

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรการออกแบบ

Symbol	Meaning	Guide-way	Symbol	Length (mm)
t_1	Radial axes	a	L_1	110
t_2	Radial bearings	b	L_2	100
t_3	Thrust bearings	c	L_3	270
t_4	Spherical joints (Ball)	d	L_4	40
t_5	Spherical joints (Socket)	e	d_1	50
t_6	Dimensional tolerance of upper links		d_2	60
t_7	Dimensional tolerance of lower links		d_3	80
			d_4	90

ข) เงื่อนไขจำกัด

จากการใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเบี่ยงเบนเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเคเตอร์เป็นตัวจำกัด จะสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 3.16

$$F(t) = \sigma_{x_E} = \sqrt{\sigma^2(x_E) + \sigma^2(y_E) + \sigma^2(z_E)} \leq \sigma_{max} \quad (3.16)$$

เมื่อ

$\sigma(x_E), \sigma(y_E), \sigma(z_E)$: ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในทิศ x, y, z ของตำแหน่งเวกเตอร์ X_E

σ_{max} : เป็นค่ายอมรับได้ของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเคเตอร์

ค) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

จากสมการที่ 3.17 เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยมีฐานบนค่าคลาดเคลื่อน IT ดังนั้นจึงได้ใช้สมการที่รวมความยากและต้นทุนของการตัดเฉือน ซึ่งถูกพิจารณาโดยค่าความคลาดเคลื่อน และขนาดของฟิวเจอร์ด้วยขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนที่ระบุ

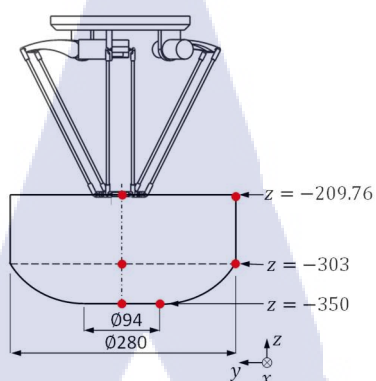
$$G_{obj}(t) = \sum_{i=1}^7 \frac{r_i^{0.34}}{t_i} \quad (3.17)$$

เมื่อ r_i : เป็นขนาดตัวแทนของฟิวเจอร์กับขอบเขตพิกัดความคลาดเคลื่อนที่ระบุ

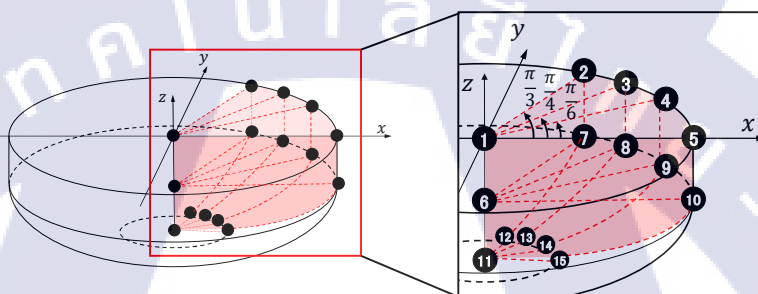
ดังนั้นการออกแบบปัญหาค่าความคลาดเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานจะถูกแก้ปัญหาด้วยการปรับค่าปัญหาให้เหมาะสม ซึ่งจะใช้ค่าต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ภายใต้สภาพเงื่อนไขกำหนดของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนไหวของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ กับค่าความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรการออกแบบ

3.6 กรณีศึกษาการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

ในส่วนหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายถึงกรณีศึกษาของการดำเนินการตรวจสอบประสิทธิภาพของวิธีการที่ใช้ในการวิจัยนี้จากเงื่อนไขการออกแบบความคลาดเคลื่อน ระยะช่วงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะแสดงในรูปที่ 3.12 ตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์และพิกัดของทั้ง 15 จุด ที่แสดงในรูปที่ 3.13 และตารางที่ 3.4 เนื่องจากความสมมาตรของหุ่นยนต์ ตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์จะแคบลงจนอยู่ในช่วง 1/6 ของระยะการเคลื่อนที่ อาจจะเป็นไปได้ที่จะรับประกันค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยจะตอบสนองกับเงื่อนไขที่การค้นหาค่าความคลาดเคลื่อนรวมที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 15 จุด และทำงานเก็บค่าต่ำสุดทั้ง 15 จุดของแต่ละค่าคลาดเคลื่อนเพื่อหาทางแก้ปัญหาที่ดีที่สุด ในส่วนของค่ายอมรับได้ของความเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะถูกตั้งค่าไว้ที่ $\sigma_{max} = 0.05$ มม.



รูปที่ 3.12 ช่วงการเคลื่อนไหว



รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟกเตอร์ที่พิจารณาในการออกแบบความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 3.4 ตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟกเตอร์

Cases	Positions		
	X	Y	Z
1	0.000	0.000	-209.76
2	70.00	121.2	-209.76
3	98.99	98.99	-209.76
4	121.2	70.00	-209.76
5	140.0	0.000	-209.76
6	0.000	0.000	-303.35
7	70.00	121.2	-303.35
8	98.99	98.99	-303.35
9	121.2	70.00	-303.35
10	140.0	0.000	-303.35
11	0.000	0.000	-350.85
12	23.50	40.7	-350.85
13	33.23	33.2	-350.85
14	40.70	23.5	-350.85
15	47.00	0.0	-350.85

บทที่ 4

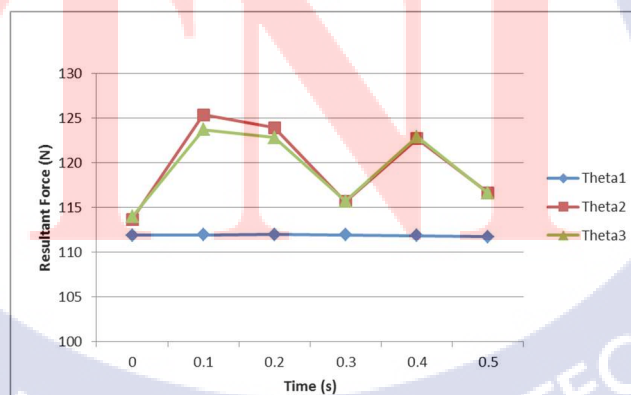
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

บทนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผลการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนานบนพื้นฐานโมเดลคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (computer aided design: CAD) ที่รวมทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง ซึ่งอภิปรายผลตามหัวข้อดังต่อไปนี้

- ผลการจำลองการเคลื่อนที่แบบไดนามิกของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน
- การเปรียบเทียบการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน
- ผลของข้อพิจารณาการออกแบบที่ยอมรับได้จากกรณีศึกษา

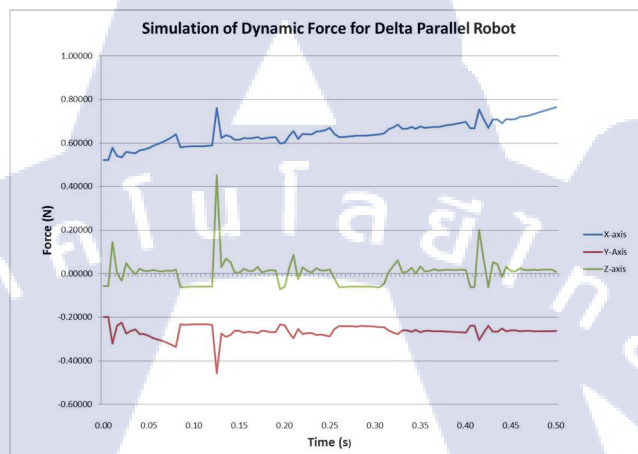
4.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่แบบไดนามิกของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

ผลการจำลองการเคลื่อนที่แบบไดนามิกของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้วิธีแบบคิเนเมติกส์แบบผกผัน (inverse kinematics) โดยจุดประสงค์ของการศึกษาคิเนเมติกส์ผกผันของหุ่นยนต์คู่ขนานนี้คือการสร้างแบบจำลองมุมที่ถูกต้องในแต่ละข้อต่อ ณ ตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจงของเอฟเฟคเตอร์ (effector) ของระบบองศาอิสระที่ถูกจำกัด จากรูปที่ 4.1 ของแรงลัพธ์จากการจำลองแบบไดนามิกด้วยมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ของการเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลม 100 มม. ที่มุม 20 องศา 0.5 วินาที ผลการจำลองพบว่า θ_1, θ_2 มีทิศทางแรงลัพธ์รวมเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกัน แต่ θ_3 มีทิศทางแรงลัพธ์รวมคงที่ในช่วงเวลาเดียวกัน และทิศทางของแรงไม่สัมพันธ์กับมุม θ_1, θ_2 ซึ่งเป็นผลมาจากแต่ละลิงค์ข้างบน L_a และความยาวโดยรวมของแต่ละลิงค์ข้างล่าง L_b ของตำแหน่งที่ต้องการของเอ็นเอฟเฟคเตอร์สุดท้ายในแกน x, y และ z มีความผิดพลาด



รูปที่ 4.1 ผลของแรงลัพธ์เทียบกับเวลาของการจำลองแบบไดนามิกสำหรับมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

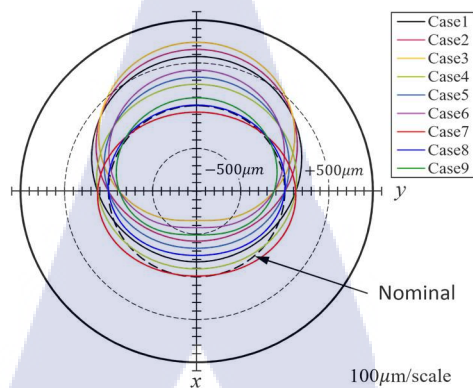
จากรูปที่ 4.2 แสดงแรงจากการจำลองแบบไดนามิกเทียบกับเวลาของแกน x, y, และ z ของการเคลื่อนที่เป็นรูปวงกลม 100 มม. ที่มุม 20 องศา 0.5 วินาที ผลการจำลองพบว่าแรงที่ส่งผลกระทบต่อลิงค์ในการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของแกน y และ z มีทิศทางแรงในแนวเดียวกัน แต่แกน x มีทิศทางแรงที่ไม่คงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากแต่ละลิงค์ของเอ็นเอฟเพคเตอร์สุดท้ายในแกน x, y และ z มีค่าความถูกต้องแม่นยำที่ไม่ถูกต้องในการชดเชยของการออกแบบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง



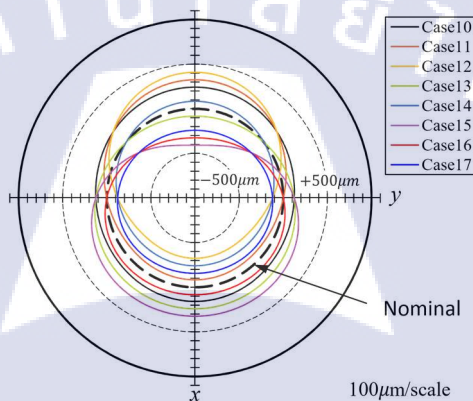
รูปที่ 4.2 ผลของแรงลัพท์เทียบกับเวลาของการจำลองแบบไดนามิกสำหรับมุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

4.2 การเปรียบเทียบการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เชื่อมต่อคู่ขนาน

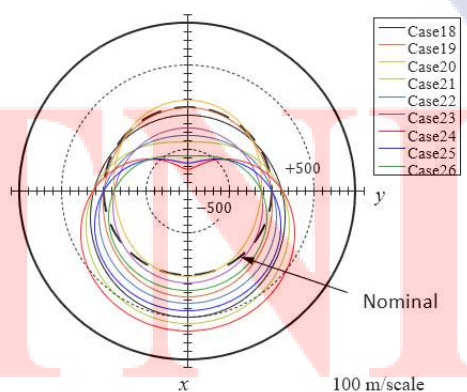
การทดลองการจำลองการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเพคเตอร์ เมื่อมีความผิดพลาดในระยการประกอบของหุ่นยนต์และตำแหน่งการหมุนของข้อต่อควบคุมตำแหน่งของเอ็นเอฟเพคเตอร์ สามารถแสดงการเปรียบเทียบการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน ดังแสดงรูปที่ 4.3 ถึง 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตั้งแต่ตัวอย่างที่ 20 รูปทรงวงรีจะมีแกนหลักบนแกน X เมื่อรูปทรงวงรีมีทิศทางติดลบของแกน X ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.6 (ข) ที่ได้รับเมื่อความยาวของ L_1 คือ -1.1 มม. ในตัวอย่างทดลองที่ 20 ผลจากการทดลองและผลจากการจำลองในรูปที่ 4.7 (ข) แสดงถึงค่าความผิดพลาดของรูปร่างของลิงค์ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน ดังนั้นเพื่อที่จะปรับปรุงความแม่นยำในการเคลื่อนที่จำเป็นต้องมีการจัดการขนาดความคลาดเคลื่อนและความคลาดเคลื่อนของรูปร่างเพื่อที่จะควบคุมค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น



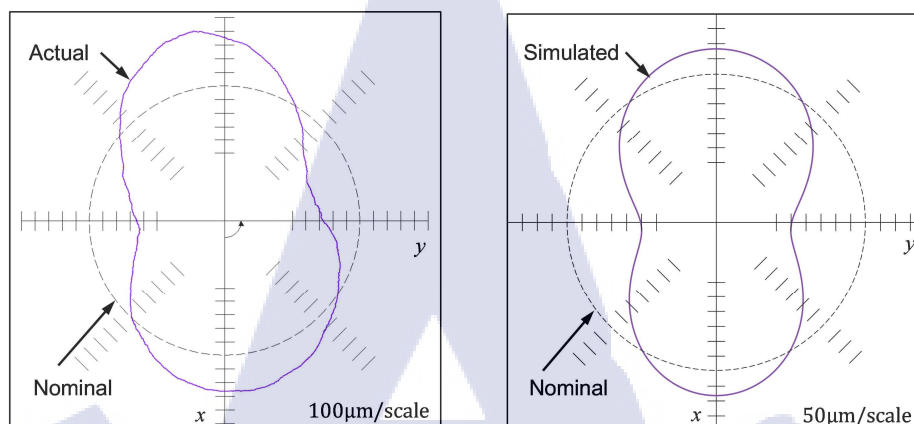
รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์การจำลองของตัวอย่างที่ 1 ถึง 9



รูปที่ 4.4 ผลลัพธ์การจำลองของตัวอย่างที่ 10 ถึง 17



รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์การจำลองของตัวอย่างที่ 18 ถึง 26



(ก) ผลลัพธ์จากการทดลอง

(ข) ผลลัพธ์จากการจำลอง

รูปที่ 4.6 ผลของการวัดและการจำลองของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน

4.3 ผลของข้อพิจารณาการออกแบบที่ยอมรับได้จากกรณีศึกษา

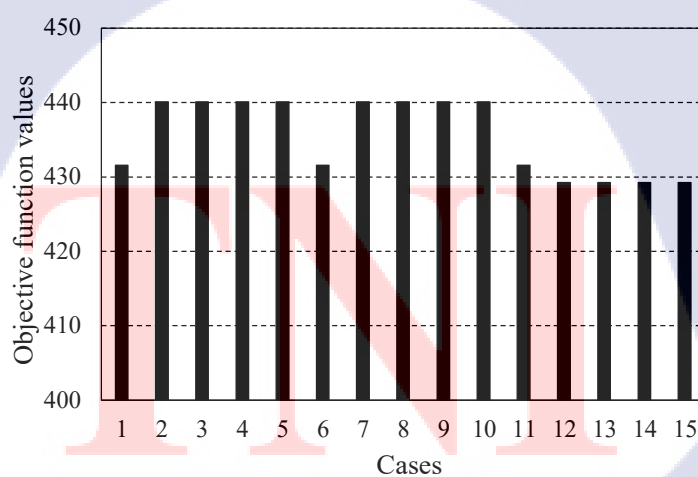
ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลกรณีศึกษาของการดำเนินการตรวจสอบประสิทธิภาพของการออกแบบความคลาดเคลื่อน ระยะช่วงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้ง 15 จุด ที่ได้อธิบายในบทที่ 3 เพื่อหาผลเฉลี่ยที่ดีที่สุด ในส่วนของค่ายอมรับได้ของความเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะถูกตั้งค่าไว้ที่ $\sigma_{max} = 0.05$ มม. และผลลัพธ์การออกแบบความคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 4.1 และค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะแสดงตามรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 การแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดของค่ามาตรฐานการเบี่ยงเบนของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คือ 0.045 มม. ซึ่งอยู่ภายในข้อจำกัดที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์ของการออกแบบความคลาดเคลื่อน

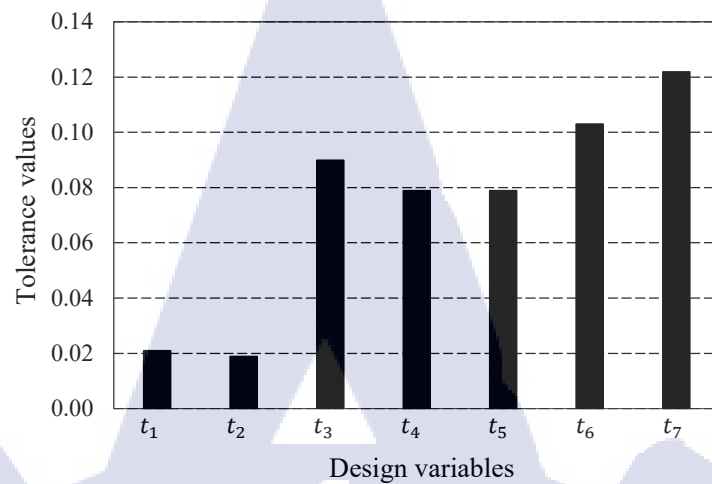
Cases	G_{obj}	Design variables						
		Radial axis	Radial bearing	Thrust axis and bearing	Ball	Socket	Upper link	Lower link
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
1	431.6	0.023	0.024	0.090	0.079	0.079	0.103	0.122
2	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135
3	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135
4	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์ของการออกแบบความคลาดเคลื่อน (ต่อ)

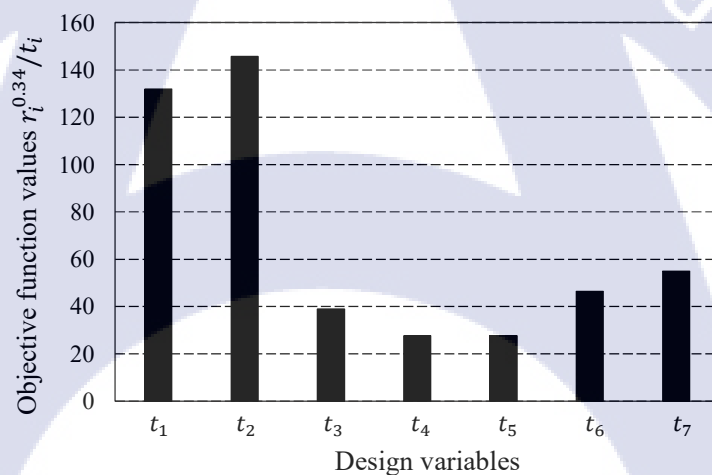
Cases	G_{obj}	Radial axis	Radial bearing	Thrust axis and bearing	Ball	Socket	Upper link	Lower link
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
5	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135
6	431.6	0.023	0.024	0.090	0.079	0.079	0.103	0.122
7	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135
8	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135
9	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135
10	440.1	0.024	0.019	0.102	0.081	0.081	0.117	0.135
11	431.6	0.023	0.024	0.090	0.079	0.079	0.103	0.122
12	429.3	0.021	0.025	0.096	0.079	0.079	0.110	0.131
13	429.3	0.021	0.025	0.096	0.079	0.079	0.110	0.131
14	429.3	0.021	0.025	0.096	0.079	0.079	0.110	0.131
15	429.3	0.021	0.025	0.096	0.079	0.079	0.110	0.131
Optimal solution	473.4	0.021	0.019	0.090	0.079	0.079	0.103	0.122



รูปที่ 4.7 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตัวอย่างการทดลองที่ 1 ถึง 15



รูปที่ 4.8 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.9 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของผลเฉลยที่ดีที่สุด

จากการพิจารณาค่าที่ได้รับจากกรณีศึกษาผลลัพธ์แสดงตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

(1) ในความเป็นจริงของค่าความคลาดเคลื่อน t_1, t_2 ของผลเฉลยที่ดีที่สุดนั้นจะเล็กกว่าขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนค่าอื่น ๆ

ค่าความคลาดเคลื่อน t_1, t_2 เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ถูกกำหนดไว้บนแกนของข้อต่อหมุนและบนผิวทรงกระบอกของแบริ่ง และค่าความคลาดเคลื่อนสองค่าจะมีอิทธิพลมากบนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน เมื่อค่าความคลาดเคลื่อน t_1, t_2 มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าของแกนหมุนในแต่ละช่วงมีขนาดใหญ่ขึ้น ระยะของลิงค์จะมี

ขนาดใหญ่เท่ากับ 200 มม. และความเปี่ยงเบนเนื่องจากมีแนวโน้มของแกนหมุนที่มีขนาดเพิ่มขึ้นในส่วนปลายของลิงค์สูงสุด ดังนั้นจึงได้พิจารณาว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ t_1, t_2 ลดลง

(2) เกี่ยวกับความจริงของค่าความคลาดเคลื่อนของ t_4, t_5 จะไม่เปลี่ยนแปลงโดยไม่คำนึงถึงตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์

จากผลลัพธ์ของการออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 15 จุด จากตารางที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อน t_4, t_5 แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งในทุกจุด ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ถูกกำหนดไว้สำหรับบอลและรูของข้อต่อทรงกลมตามลำดับ ความเปี่ยงเบนในข้อต่อทรงกลมเป็นความเปี่ยงเบนของตำแหน่งในทิศ X, Y, Z และได้รับค่าเหมือนกันในทั้งสามทิศทาง เช่นเดียวกันนั้นจึงทำให้ไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์และมุมของการหมุนของข้อต่อ ดังนั้นตั้งแต่อิทธิพลบนค่าเปี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเปี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์เป็นค่าคงที่ที่ไม่คำนึงถึงตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ โดยมาจากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของ t_4, t_5 ที่แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในทุกจุด

(3) เกี่ยวกับความจริงของผลลัพธ์เหมือนที่รับมาจากค่าส่วนใหญ่ของจุดการออกแบบความคลาดเคลื่อน

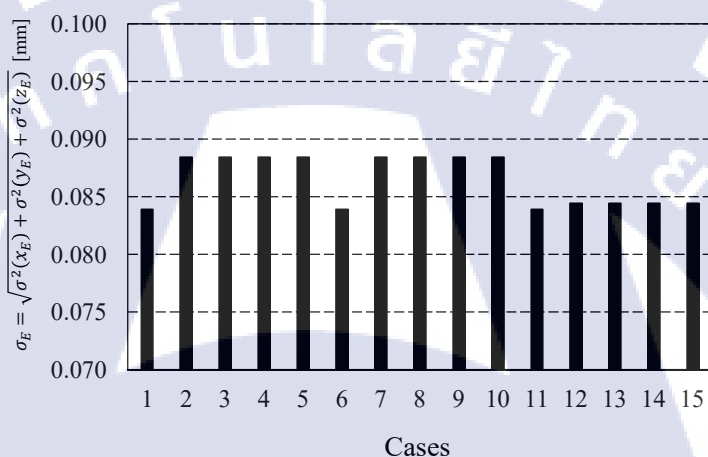
ตามตารางที่ 4.1 การรวมกันของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความคลาดเคลื่อนในกลุ่มเดียวกันของตำแหน่งทั้ง 3 ที่แสดงในกรณีที่ 1, 6 และ 11, กรณีที่ 2 หรือ 5 และ 7 ถึง 10, และกรณีที่ 11 ถึง 15 เป็นผลลัพธ์มาจากการออกแบบค่าความคลาดเคลื่อน เพราะว่าค่าเปี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ถูกประเมินผลด้วยสมการที่ (3.16) และเป็นสมการที่ใช้รากกำลังสองของผลรวมของกำลังสองของค่าเปี่ยงเบนมาตรฐานในทิศ X, Y, และ Z ดังนั้นรากกำลังสองของผลรวมของกำลังสองในทิศทางทั้งสามจึงถูกกำหนดให้เหมือนกันในแต่ละกลุ่มตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.13 แสดงถึงค่าเปี่ยงเบนมาตรฐานของ σ_{x_e} ของค่าเปี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ที่ทั้ง 15 และองค์ประกอบ X, Y, Z (เป็นส่วนประกอบ), $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ เมื่อค่าความคลาดเคลื่อน $t = (t_1, t_2, \dots, t_7)^t$ ที่ถูกกำหนดใช้เป็นตัวเลขสุ่มระหว่าง 0.001 และ 0.1 มม.

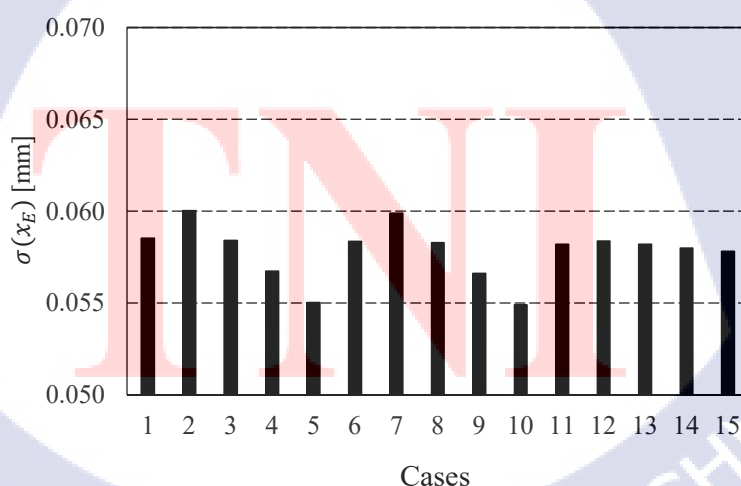
จากรูปที่ 4.10 สามารถเห็นได้ถึงค่าความคลาดเคลื่อนรวมที่เหมือนกันในการออกแบบค่าความคลาดเคลื่อน ค่าเปี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเปี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์จะเท่ากันในกลุ่มของทั้ง 3 ตำแหน่ง เมื่อผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกัน ดังนั้นค่าเปี่ยงเบนมาตรฐานของการ

เคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์จะเท่ากัน เมื่อพิจารณาถึงผลลัพธ์ของการออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนก็จะกลายเป็นเท่ากัน

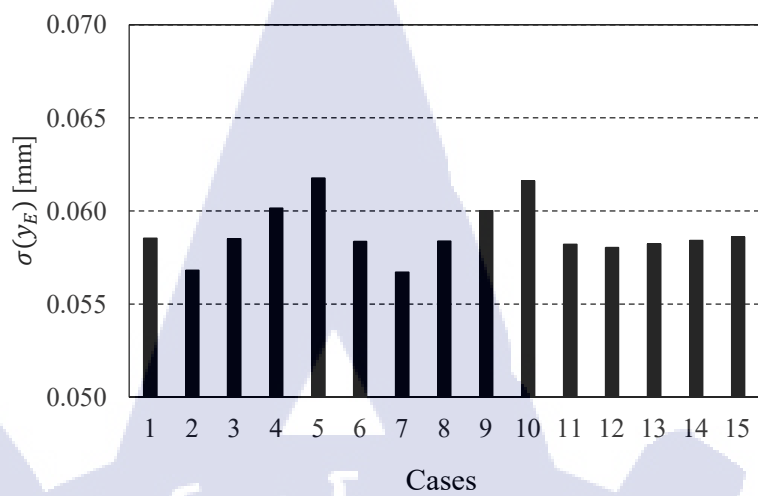
จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 ที่จุดของผลลัพธ์ของค่าออกแบบความคลาดเคลื่อนที่เท่ากันในตำแหน่งขององค์ประกอบ $x, y, z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ของค่ามาตรฐานเบี่ยงเบนของค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ ในส่วนองค์ประกอบของ x, y, z จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์ เนื่องจากเพราะว่าอิทธิพลแนวโน้มของแกนหมุนและอิทธิพลของขนาดความผิดพลาดที่แตกต่างกันในทิศ x, y, z ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเอ็นเอฟเฟคเตอร์



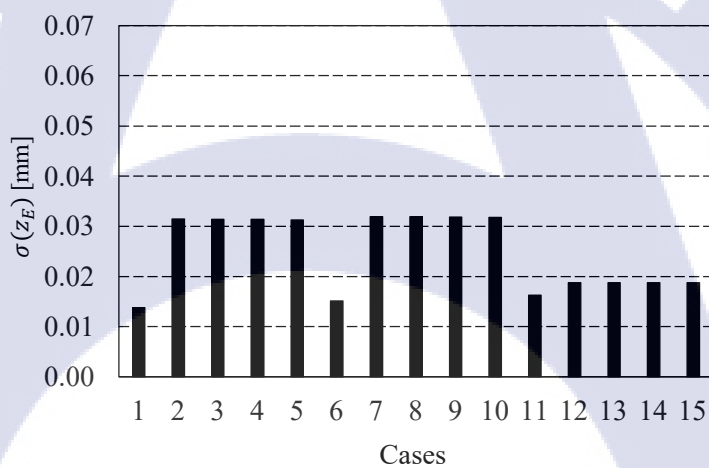
รูปที่ 4.10 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์



รูปที่ 4.11 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทิศทาง X ของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์



รูปที่ 4.12 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทิศทาง Y ของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์



รูปที่ 4.13 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทิศทาง Z ของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์การเคลื่อนที่ของเอ็นเอฟเฟคเตอร์

บทที่ 5

บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การสร้างโมเดลจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน ซึ่งได้เสนอสูตรสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ โดยอ้างอิงจากการเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตของพื้นผิวโค้งของส่วนประกอบหุ่นยนต์ การออกแบบความคลาดเคลื่อนของส่วนประกอบหุ่นยนต์ ซึ่งใช้วิธีการสร้างแบบจำลองสำหรับเครื่องมือกลกับหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน และขึ้นอยู่กับวิวัฒนาการทางเรขาคณิตของการเชื่อมโยงและข้อต่อลิงค์ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่พิจารณาการออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนของรูปร่างของข้อต่อและการเชื่อมต่อเมื่อมีการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่

ในการสร้างแบบจำลองและการออกแบบความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้คือ

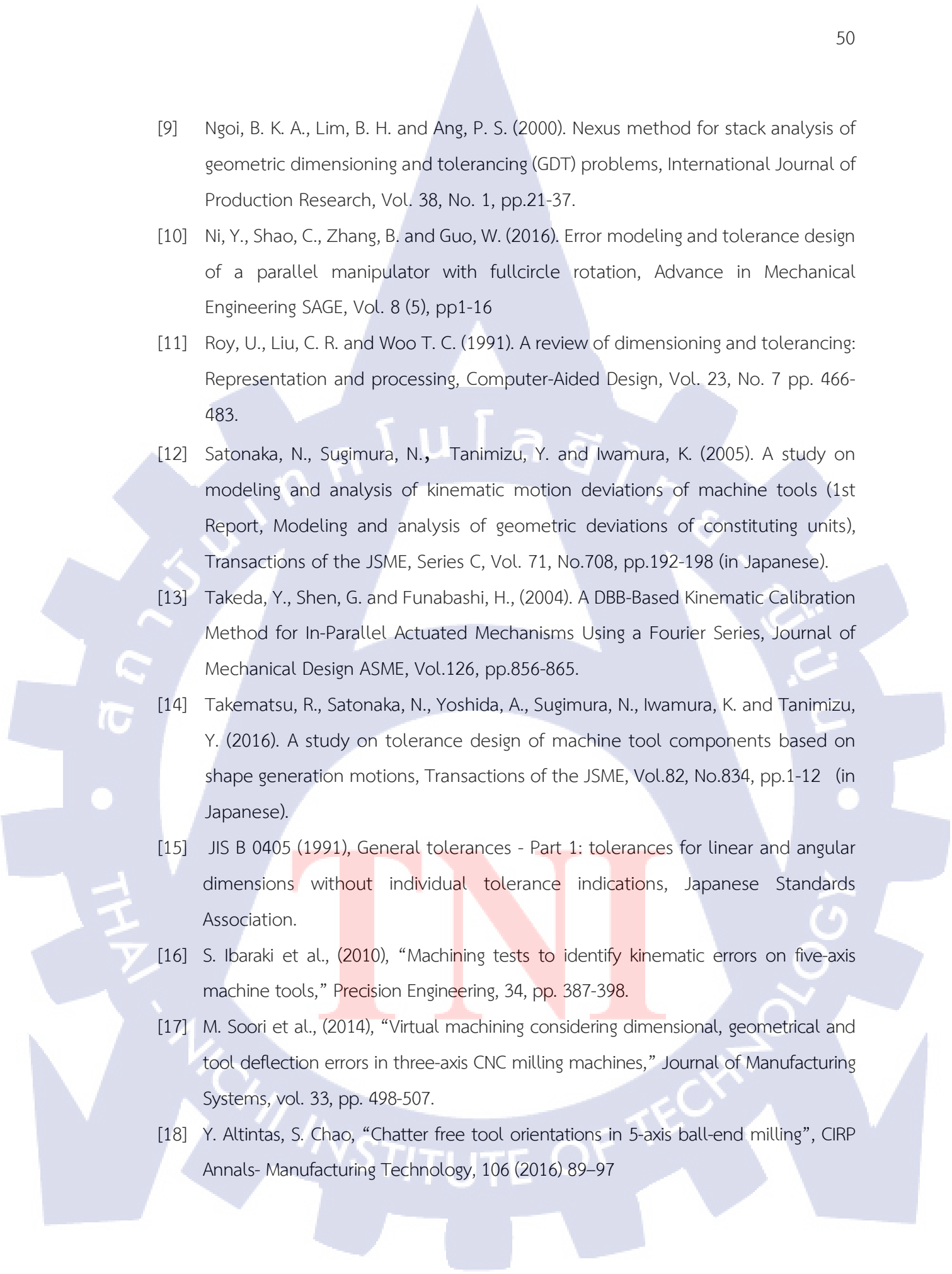
1. ความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานถูกวัดโดยใช้ DBB และผลการคำนวณตามแบบจำลองการเคลื่อนไหว จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตของการเชื่อมโยงและข้อต่อของหุ่นยนต์มีผลต่อการเบี่ยงเบนการเคลื่อนไหว
2. วิธีการคำนวณการหมุนของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน ในการเคลื่อนไหวทางเรขาคณิตของหุ่นยนต์ อ้างอิงจากความเบี่ยงเบนทางเรขาคณิตและการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวในรูปแบบที่ไม่รวมถึงส่วนเบี่ยงเบน
3. แบบจำลองที่ประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบของแขนหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนาน และวิธีการที่เสนอเพื่อให้ได้มาซึ่งการผสมผสานที่เหมาะสมระหว่างความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและความคลาดเคลื่อนทางมิติของการเชื่อมโยงและข้อต่อโดยใช้วิธีการที่เสนอ เป็นผลให้มีความชัดเจนว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อต่อมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเอฟเฟกต์สุดท้าย และผลกระทบของการเคลื่อนไหว ควรตั้งค่าให้เล็กกว่าค่าความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์แขนหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน ควรพิจารณาโมเดลของการจับยึดตรงปลายของหุ่นยนต์ที่มีน้ำหนักเข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนสามารถประยุกต์ใช้จริงกับกระบวนการผลิต เช่น กระบวนการหยิบยกชิ้นงาน กระบวนการเชื่อม กระบวนการตัดเฉือน เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศกระทรวงพาณิชย์ (2016), “สินค้าออกสำคัญ10 อันดับแรกของประเทศไทยปีพุทธศักราช 2560,”[Online].Available: <http://www2.ops3.moc.go.th/>. [Accessed: 8 เมษายน 2561].
- [2] Thasana, W. and Chianrabutra, S. (2019). A comparison between simulation and experiment of virtual machining in CNC turning machine considering kinematic motion deviations, tool wear and workpiece deflection errors, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.13, No. 1, Paper No .18-00250
- [3] Takematsu, R., Satonaka, N., Thasana, W., Iwamura, K .and Sugimura, N. (2018). A study on tolerances design of parallel link robots based on mathematical models, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.12, No. 1, Paper No. 17-00342
- [4] Sugimura, N., Watabiki, H., Thasana, W., Iwamura, K. and Tanimizu, Y. (2012). Analysis of kinematic motion deviations of rotary tables based on geometric tolerances, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, Vol. 6, No. 7, pp.1132-1142.
- [5] Takahashi, A., Yoshida, A., Thasana, W., Sugimura, N., Iwamura, K. and Tanimizu, Y. (2014). Analysis of kinematic motion deviations of machining centers based on geometric tolerances, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME, Vol. 8, No. 4, pp.1-12.
- [6] Mathieu, L., Clement, A. and Bourdet, P., Modelling. (1997). Representation, processing and inspection of tolerances: A survey, Proceedings of the 5th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Toronto (Canada), pp.138.
- [7] Narahari, Y., Sudarson, R., Lyous, K., Duffy, M. R. and Sriran, R. D. (1999). Design for tolerance of electro-mechanical assemblies: An integrated approach, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 6, pp.1062-1079.
- [8] Ngoi, B. K. A. and Agarwal, M. (1998). The generic capsule approach to tolerance stack analysis, International Journal of Production Research, Vol. 36, No. 12, pp.3273-3293.

- 
- [9] Ngoi, B. K. A., Lim, B. H. and Ang, P. S. (2000). Nexus method for stack analysis of geometric dimensioning and tolerancing (GDT) problems, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 1, pp.21-37.
- [10] Ni, Y., Shao, C., Zhang, B. and Guo, W. (2016). Error modeling and tolerance design of a parallel manipulator with fullcircle rotation, *Advance in Mechanical Engineering SAGE*, Vol. 8 (5), pp1-16
- [11] Roy, U., Liu, C. R. and Woo T. C. (1991). A review of dimensioning and tolerancing: Representation and processing, *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 7 pp. 466-483.
- [12] Satonaka, N., Sugimura, N., Tanimizu, Y. and Iwamura, K. (2005). A study on modeling and analysis of kinematic motion deviations of machine tools (1st Report, Modeling and analysis of geometric deviations of constituting units), *Transactions of the JSME, Series C*, Vol. 71, No.708, pp.192-198 (in Japanese).
- [13] Takeda, Y., Shen, G. and Funabashi, H., (2004). A DBB-Based Kinematic Calibration Method for In-Parallel Actuated Mechanisms Using a Fourier Series, *Journal of Mechanical Design ASME*, Vol.126, pp.856-865.
- [14] Takematsu, R., Satonaka, N., Yoshida, A., Sugimura, N., Iwamura, K. and Tanimizu, Y. (2016). A study on tolerance design of machine tool components based on shape generation motions, *Transactions of the JSME*, Vol.82, No.834, pp.1-12 (in Japanese).
- [15] JIS B 0405 (1991), *General tolerances - Part 1: tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications*, Japanese Standards Association.
- [16] S. Ibaraki et al., (2010), "Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools," *Precision Engineering*, 34, pp. 387-398.
- [17] M. Soori et al., (2014), "Virtual machining considering dimensional, geometrical and tool deflection errors in three-axis CNC milling machines," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, pp. 498-507.
- [18] Y. Altintas, S. Chao, "Chatter free tool orientations in 5-axis ball-end milling", *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 106 (2016) 89–97

- [19] วิโรช ทศนะ และดอน แก้วตก (2560), “การตัดเฉือนเสมือนจริงของกระบวนการกลึงด้วยวิธีการพิจารณาการเบี่ยงเบนคิเนแมติกส์ การสึกหรอเครื่องมือตัด และการโค้งงอของชิ้นงาน,”การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2560, จังหวัดเชียงใหม่, 12-15 กรกฎาคม 2560.
- [20] Hamdallah A. H. Alashqar. (2007). Modeling and High Precision Motion Control of 3 DOF Parallel Delta Robot Manipulator.



ภาคผนวก ก.
บทความประชุมวิชาการ

TNI

Oral Presentation

The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering
13-16 December 2016



AMM0015

A Study on Tolerances Design of Parallel Link Robots Based on Mathematical Models

Ryo Takematsu^{1,*}, Wiroj Thasana², Koji Iwamura³, Yoshitaka Tanimizu¹ and Nobuhiro Sugimura³

¹ Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

² Advanced Design and Manufacturing Technology Research Laboratory, Thai-Nichi Institute of Technology
1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250, Thailand

³ Graduate School of Humanities and Sustainable System Science, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

* Corresponding Author: ryotakematsu@edu.osakafu-u.ac.jp, Tel. +81722549211

Abstract

The precision and accuracy of the movement of the parallel link robots are one of the key features that are essential in the production processes, which control the position and speed of the mechanism linking, and have the movement of the final control motors mounted within the linkage mechanism on the basis of a number of mathematical models. Recently, 3-dimensional CAD/CAE systems are widely applied and mechanical design has become complicated. Therefore, the tolerance design of the products is becoming more difficult and complicated. The objective of this research is to propose a mathematical model of the parallel link robots, which applies to tolerance designs for the parallel link robots based on the geometric tolerances of the components. The proposed method provides us with a systematic method to design the geometric dimensioning and tolerancing of the components, under the constraints of the kinematic motion accuracy.

Keywords: Tolerance Design, Geometric Dimensioning and Tolerancing, Modeling, Kinematic Motion Deviations.

1. Introduction

The precision and accuracy of the movement of the parallel link robots are one of the key features that are essential in the production processes, which control the position and speed of the mechanism linking, and have the movement of the final control motors mounted within the linkage mechanism on the basis of a number of mathematical models. Recently, 3-dimensional CAD/CAE systems are widely applied and mechanical design has become complicated. Therefore, the period of the tolerance designs of the mechanical products has become shortened and more difficult. In the designing phase, it is required that tolerances of the components with high accuracy are set properly. In the production process, it is required to keep the geometric and dimensional deviations within the range of tolerances.

As regards the geometric tolerances, some researches have been carried out to deal with the dimensional tolerances and the geometric tolerances, aimed at realizing statistical analysis and design methodologies for 3-dimensional machine products [1-11]. In the previous papers, a systematic procedure determines the tolerance values of the guide-ways theoretically under the constraints on the basis of kinematic motion deviations of 5-axis machining centers by applying mathematical models.

The objective of the present research is to propose a mathematical model to deal with parallel link robots which are applied to assembly works and picking works for utilizing high-speed. The mathematical models are proposed to represent the kinematic motion deviations

of parallel link robots, on the basis of the dimensions and geometric tolerances of the components, and are applied to systematic procedure which determines the both dimensional tolerances and geometric tolerances of the guide-ways under the constraints on the basis of kinematic motion deviations of parallel link robots.

2. Geometric Tolerances and Deviations of Features [7-9]

The geometric tolerances of the features specify the allowable areas named "tolerance zones," which constrain the position and orientation deviations of the associated features against the nominal features, as shown in Fig. 1 (a). The associated features and the nominal features mean the features of the manufactured products and the ideal features defined in the design phase, respectively. The geometric deviations of the associated features from the nominal features are represented by sets of parameters named "deviation parameters." For example, one position parameter w and two rotational parameters α and β are required to represent the geometric deviations of the associated plane features against the nominal plane features, for the case where the tolerance zone is given by the area between a pair of parallel planes. In the research, the followings are assumed for the ease of the modeling and the analysis of the geometric deviations.

- (1) The deviation parameters δ_i representing the position and orientation deviations of the associated features follow the normal distribution $N(\mu_i, \sigma_i)$, and $\mu_i = 0$. Where, μ_i and σ_i are the

Oral Presentation

The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering
13-16 December 2016



AMM0015

mean values and the standard deviations, respectively.

- (2) The manufacturing processes of the components are well controlled, and the proportion of the non-conforming components, which means the tolerated features exceed the tolerance zones, is as small as a value P_d called "Defective rate".
- (3) Eq. (1) represents the relationships between the standard deviations σ_i of the deviation parameters of the tolerance features and the maximum values of the deviation parameters.

$$\sigma_i = \delta_{i\max} / C_{Pd} \quad (1)$$

Where,

$\delta_{i\max}$: Maximum values of the deviation parameters δ_i , if the other deviation parameters are $\delta_j = 0$, ($i \neq j$).

C_{Pd} : A constant representing the ratio of the maximum values $\delta_{i\max}$ and the standard deviations σ_i .

Let us consider a case of the plane feature shown in Fig. 1(a), as an example. The maximum values $\delta_{i\max}$ are given as follows.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= w, \delta_2 = a, \delta_3 = \beta \\ \delta_{1\max} &= \frac{t}{2}, \delta_{2\max} = \frac{t}{L_1}, \delta_{3\max} = \frac{t}{L_2} \end{aligned} \quad (2)$$

Where,

L_1, L_2 : Length and width of the plane feature.
 t : Tolerance values, e.g. the distance between two planes representing the tolerance zones.

From Eqs. (1) - (2), the standard deviation of three parameters are given as follows:

$$\sigma_1 = \frac{t}{2C_{Pd}}, \sigma_2 = \frac{t}{L_1 C_{Pd}}, \sigma_3 = \frac{t}{L_2 C_{Pd}} \quad (3)$$

The following equation gives the conditions that the plane features are included within the tolerance zone between a pair of planes.

$$-\frac{t}{2} \leq \delta_1 + \frac{L_1 \delta_2}{2} + \frac{L_2 \delta_3}{2} \leq \frac{t}{2} \quad (4)$$

The probability that the tolerance features are included the tolerance zone is given by the following equation. This probability $1 - P_d$ means yield rate.

$$1 - P_d = \left(\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \right)^3 \int_{-t/2}^{t/2} \int_{-t/2}^{t/2} \int_{-t/2}^{t/2} \left(\prod_{i=1}^3 \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \right) dx_1 dx_2 dx_3 \quad (5)$$

Where,

$$x_1 = \frac{2C_{Pd}\delta_1}{t}, x_2 = \frac{L_1 C_{Pd}\delta_2}{t}, x_3 = \frac{L_2 C_{Pd}\delta_3}{t}$$

If the defective rate P_d is set to 0.27%, the constant C_{Pd} can be estimated as " $C_{Pd} = 5.83$ ", through the numerical analysis of Eq. (5).

In the case of a cylinder shown in Fig. 1(b), the following equation gives the standard deviations of the parameters:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= u, \delta_2 = w, \delta_3 = a, \delta_4 = \gamma \\ \delta_{1\max}, \delta_{2\max} &= \frac{t}{2}, \delta_{3\max}, \delta_{4\max} = \frac{t}{L} \\ \sigma_1, \sigma_2 &= \frac{t}{2C_{Pd}}, \sigma_3, \sigma_4 = \frac{t}{LC_{Pd}} \end{aligned} \quad (6)$$

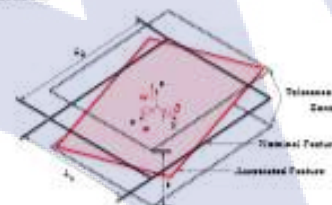
In this case, the C_{Pd} is estimated as " $C_{Pd} = 5.06$ ", of the defective rate P_d is set to be 0.27%.

In the case of a sphere shown in Fig. 1(c), the following equation gives the standard deviations of the parameters:

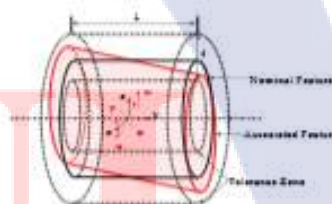
$$\begin{aligned} \delta_1 &= u, \delta_2 = v, \delta_3 = w \\ \delta_{1\max}, \delta_{2\max}, \delta_{3\max} &= \frac{t}{2}, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = \frac{t}{2C_{Pd}} \end{aligned} \quad (7)$$

In this case, the C_{Pd} is estimated as " $C_{Pd} = 3.57$ ", of the defective rate P_d is set to be 0.27%.

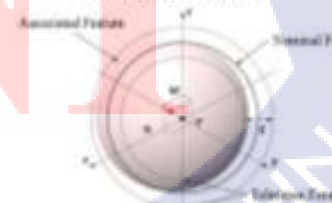
The C_{Pd} varies with features because it is calculated by Eq. (5) and the number of parameter varies with features.



(a) Plane feature



(b) Cylinder feature



(c) Sphere feature

Fig. 1 Definition of geometric tolerance of features

Oral Presentation

The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering



AMM0015

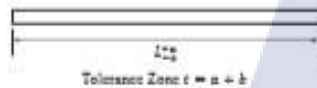


Fig. 2 Tolerance zone of the link errors

The dimensional tolerances are shown in Fig.2, the tolerance zone values are expressed as $t = a + b$, assumed to be $\pm 3\sigma$ and the following equation gives the standard deviation of the parameters. In this case, the C_{Pd} is estimated as " $C_{Pd} = 3$ ", of the defective rate P_d is set to be 0.27%.

$$\delta_{max} = \frac{t}{2}, \sigma = \frac{t}{2C_{Pd}} \quad (8)$$

3. Kinematic Analysis of Parallel Link Robots

3.1 System description

The parallel link robot in this study is shown in Fig. 3. It has three degrees of freedom (DOF) and motion along X, Y, Z-axis that consist a fixed base, three branched chains and the active links. These are connected to the servo motors, and one end of each passive link is connected to its active link by spherical joints. While the opposite end side is connected to the moving end-effector. A schematic diagram of the 3-DOF parallel link robot and its parameters are shown in Fig.4,5.

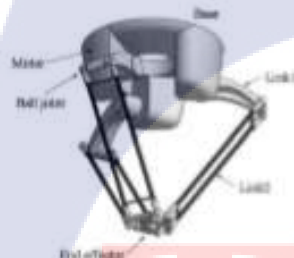


Fig. 3 The parallel link robot

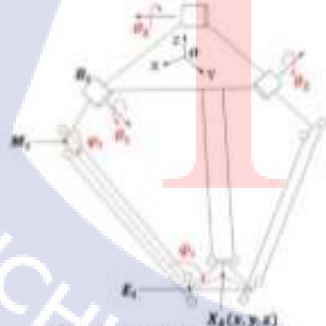


Fig. 4 The kinematic diagram

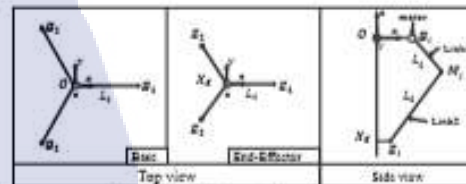


Fig. 5 The kinematic parameters

3.2 Inverse kinematics analysis

Denavit Hartenberg has proposed the D-H method, which is commonly utilized in robot kinematic models. In this research, inverse kinematic analysis is considered to determine the active link position angle $\theta_i (i=1,2,3)$ according to the position (x, y, z) of the moving end-effector. As three chains have the same structure and form of motions, we can consider them together.

The kinematic diagram is shown in Fig. 4, the state of three applicable constraints that the lower lengths must have to accuracy, constant length L_2 is shown in Eq. (9).

$$L_2 = |E_i - M_i| \quad (i = 1,2,3) \quad (9)$$

In order to convenient square both side of the constraint equations in Eq. (9) to avoid the square-root, the constraint equation is given in Eq. (10).

$$L_2^2 = |E_i - M_i|^2 \quad (i = 1,2,3) \quad (10)$$

The variable values are the position $X_e = \{x, y, z\}^T$ of the end-effector. The constant vector values are points B_i, E_i were given previously. The vectors M_i are dependent on the joint variables $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}^T$ by applying the following equation.

$$\begin{aligned} M_1 &= \begin{Bmatrix} L_1 + L_2 \cos \theta_1 \\ 0 \\ -L_2 \sin \theta_1 \end{Bmatrix} \\ M_2 &= \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} L_1 - \frac{1}{2} L_2 \cos \theta_2 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} L_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} L_2 \cos \theta_2 \\ -L_2 \sin \theta_2 \end{Bmatrix} \\ M_3 &= \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} L_1 - \frac{1}{2} L_2 \cos \theta_3 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} L_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} L_2 \cos \theta_3 \\ -L_2 \sin \theta_3 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E_1 &= \{x + L_4, y, z\} \\ E_2 &= \left\{x - \frac{L_4}{2}, y + \frac{\sqrt{3}}{2} L_4, z\right\} \\ E_3 &= \left\{x - \frac{L_4}{2}, y - \frac{\sqrt{3}}{2} L_4, z\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

From Eqs. (9) - (12), the three independent equations are obtained in the Eq. (13), as shown below.

$$A_i \cos \theta_i + B_i \sin \theta_i = C_i \quad (13)$$

Oral Presentation

The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering
13-16 December 2018



AMM0015

where:

$$\begin{aligned} A_1 &= x + L_4 - L_1, B_1 = z, C_1 = \frac{L_1^2 - L_2^2 - A_1^2 - y^2 - z^2}{2L_2} \\ A_2 &= \frac{1}{2}(D_2 + \sqrt{3}E_2), B_2 = z, C_2 = \frac{L_1^2 - L_2^2 - D_2^2 - E_2^2 - z^2}{2L_2} \\ D_2 &= x - \frac{1}{2}L_4 + \frac{1}{2}L_1, E_2 = y + \frac{\sqrt{3}}{2}L_4 - \frac{\sqrt{3}}{2}L_1 \\ A_3 &= \frac{1}{2}(D_3 + \sqrt{3}E_3), B_3 = z, C_3 = \frac{L_1^2 - L_2^2 - D_3^2 - E_3^2 - z^2}{2L_2} \\ D_3 &= x - \frac{1}{2}L_4 + \frac{1}{2}L_1, E_3 = y + \frac{\sqrt{3}}{2}L_4 + \frac{\sqrt{3}}{2}L_1 \end{aligned}$$

According to the assembly mode, inverse kinematics analysis gives θ_i as Eq. (14).

$$\begin{aligned} \theta_i &= -\tan^{-1}(B_i/A_i) \\ &\quad -\tan^{-1}\left(C_i/\sqrt{A_i^2+B_i^2-C_i^2}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

For the angle between Link 1 and Link 2, Link 2 and end-effector are determined by the inner product of M_iB_i , M_iE_i , E_iM_i and E_iX_E , respectively. The equation is given in Eq. (15).

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \cos^{-1}\left(\frac{M_iB_i \cdot M_iE_i}{|M_iB_i||M_iE_i|}\right) \\ \psi_i &= \cos^{-1}\left(\frac{E_iM_i \cdot E_iX_E}{|E_iM_i||E_iX_E|}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

4. Modeling of Parallel Link Robots

The model of the parallel link robot is formulated by the kinematic motion matrixes. The matrixes are consistency to relate the kinematic motion deviations among bearings, spherical joints, and links, respectively. It is predicted from geometric deviations of guide-ways and dimensional deviations of the length of links. The method to obtain geometric deviations from geometric dimensioning and tolerancing are explained in the previous section.

4.1 Kinematic motion deviations of motors

The model and kinematic motion matrix of motors are shown in Fig. 6 and Eq. (16). The standard deviations of parameters $\delta\alpha$, $\delta\gamma$, δx , δy , δz are calculated by Eqs. (3) - (6), as shown in the following equation.

$$A_m^g(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \delta\gamma_{\theta 1} & \sin \theta & \delta x_{\theta} \\ \delta\gamma_{\theta 2} & 1 & \delta\alpha_{\theta 1} & \delta y_{\theta} \\ -\sin \theta & \delta\alpha_{\theta 2} & \cos \theta & \delta z_{\theta} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

Where,

$$\begin{aligned} \delta\alpha_{\theta 1} &= \gamma_{ia} \sin \theta - \alpha_{ia} \cos \theta + \alpha_{jb} \\ \delta\alpha_{\theta 2} &= -\gamma_{jb} \sin \theta - \alpha_{jb} \cos \theta + \alpha_{ia} \\ \delta\gamma_{\theta 1} &= \gamma_{jb} \cos \theta - \alpha_{jb} \sin \theta - \gamma_{ia} \\ \delta\gamma_{\theta 2} &= \gamma_{ia} \cos \theta + \alpha_{ia} \sin \theta - \gamma_{jb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta x_{\theta} &= \frac{1}{2}(-2\delta x_{jb} + l_1 y_{jb} + l_4 y_{jb}) \cos \theta - \\ &\quad (l_1 + l_4) y_{ia} - \frac{1}{2}(2\delta x_{jb} + l_1 \alpha_{jb} + \\ &\quad l_4 \alpha_{jb}) \sin \theta + \delta x_{ia} \\ \delta y_{\theta} &= \delta y_{ia} - \delta y_{jb} \\ \delta z_{\theta} &= \frac{1}{2}(-2\delta x_{jb} + l_1 y_{jb} + l_4 y_{jb}) \sin \theta + (l_1 + l_4) \alpha_{ia} \\ &\quad - \frac{1}{2}(2\delta x_{jb} + l_1 \alpha_{jb} + l_4 \alpha_{jb}) \cos \theta + \delta z_{ia} \\ \alpha_{mn}, \gamma_{mn} &: \text{Orientation deviations of guide-way } n \text{ in} \\ &\quad \text{Unit-}m \text{ (} m = i, j, n = a, b \text{)} \\ \delta x_{mn}, \delta y_{mn}, \delta z_{mn} &: \text{Position deviations of guide-way } n \\ &\quad \text{in Unit-}m \text{ (} m = i, j, n = a, b \text{)} \end{aligned}$$

4.2 Kinematic motion deviations of spherical joints

The model and kinematic motion matrix of ball-joints are shown in Fig. 5 and Eq.(17). The standard deviations of parameters δx , δy , δz are calculated by Eq. (7), as shown in the following equation.

$$A_s^g(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & \delta x_{\varphi} \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & \delta y_{\varphi} \\ 0 & 0 & 1 & \delta z_{\varphi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Where,

$$\begin{aligned} \delta x_{\varphi} &= -\delta x_d \cos \varphi + \delta y_d \sin \varphi + \delta x_c, \\ \delta y_{\varphi} &= -\delta x_d \sin \varphi - \delta y_d \cos \varphi + \delta y_c, \\ \delta z_{\varphi} &= \delta z_c - \delta z_d \end{aligned}$$

$\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n$: Position deviations of guide-way n

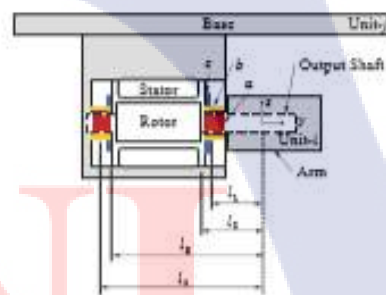


Fig. 6 The model of motors



Fig. 7 The model of spherical joints

Oral Presentation

The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering
13-16 December 2016



AMM0015

4.3 Modeling of kinematic motions of parallel link robots

The position X_E of the end-effector is determined by the position E_1, E_2, E_3, E_4 are given in the following Eq. (18).

$$E_i = A_1(L_1)A_2^s(\theta)A_3(L_2)A_4(\alpha_i)A_5^s(\pi - \varphi_i)A_6(L_3)A_7(\beta_i)A_8^s(\pi - \psi_i) \quad (18)$$

Where,

$A_1(L_1)$: Translation between the coordinates system

$A^s(\alpha_i, \beta_i)$: Rotation between the coordinates system

$A^s(\theta)$: Rotation of the motors

$A^s(\pi - \varphi_i, \pi - \psi_i)$: Rotation of the spherical joints

Then, the position X_E is calculated by Eq. (19) because X_E is the gravity center of the positions E_1, E_2, E_3, E_4 .

$$\begin{aligned} \sigma_{X_E} &= (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) \\ \sigma_x &= \frac{1}{3} \sqrt{\sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2 + \sigma_{x3}^2}, \sigma_y = \frac{1}{3} \sqrt{\sigma_{y1}^2 + \sigma_{y2}^2 + \sigma_{y3}^2}, \\ \sigma_z &= \frac{1}{3} \sqrt{\sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2 + \sigma_{z3}^2} \end{aligned} \quad (19)$$

Where,

$\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}$: Standard deviation of the position E_i

5. Tolerance Design

The design a suitable set of tolerance values of mechanical products plays an important role from the viewpoint of the both product quality and production costs. The tolerance design is considered here means the allocation processes of the tolerance values. In order to reduce the manufacturing cost, the tolerances should be eased as far as possible subject to the premise that the standard deviation of the kinematic motion deviation of the end-effector, which depend on the design variables t_i , are less than allowable values. Then, giving the allowance of the standard deviation of the kinematic motion deviation of the end-effector and taking each tolerance values as the constraints factors, the tolerance design of each component is converted into a constrained optimization problem, as shown in Eq. (20) - (21), which assumed that seven kinds of tolerances $t_i (i = 1 \sim 7)$ shown in Table 2 are design variables and that tolerance manufacturing cost is the objective function. The position of guide-ways $a \sim e$ in Fig.2 are indicated in Fig.6,7. Eq.(20) represents the relationship between dimensions and tolerances and formulated based on ISO Tolerance.

$$\min g = \sum_{i=1}^7 \frac{r_i^{0.24}}{t_i} \quad (20)$$

Where, r_i is the dimension of the components.

$$f \leq f_{max}, f = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (21)$$

Table. 2 Design variables for seven kinds of tolerances

Symbol	Meaning	Guide-way
t_1	Radial axis	a
t_2	Radial bearing	b
t_3	Thrust bearing	c
t_4	Spherical joints (Ball)	d
t_5	Spherical joints (Socket)	e
t_6	Dimensional tolerance of the 1st link	
t_7	Dimensional tolerance of the 2nd link	

Where, f_{max} is the allowable range of the standard deviation of the kinematic deviation of the end-effector, and σ_i is standard deviations in i -direction of the position X_E .

6. Case Study

The proposed method is applied to the tolerance design of the parallel link robot shown in Fig. 3 by setting the allowable kinematic deviation to 0.05 mm. Fig. 8 shows the optimum solutions.

The designed tolerances of t_1, t_2 are smaller than other tolerance values, as shown in Fig. 8. This means that the kinematic motion deviations of end-effector is deeply influenced by tolerance values of those guide-ways, therefore those tolerance values are rather important to reduce the standard deviations of kinematic motion of the end-effector.

7. Conclusion

Systematic procedure is proposed to design both the geometric tolerances of the guide-ways connecting components and dimensional tolerances of the links, based on allowance of the kinematic motion deviations of the end-effector. This method is to design tolerances under the constraints on the kinematic motion deviations of the end-effector by applying mathematical models.

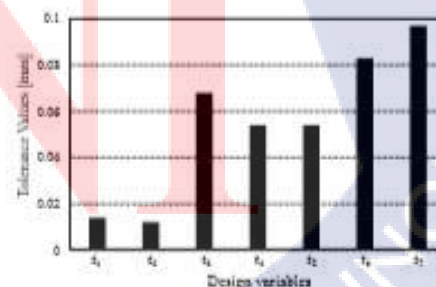


Fig. 8 The result of tolerance design values

Oral Presentation

The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering
13-16 December 2016



AMM0015

8. References

- [1] Carrino, L., Moroni, G., Polini, W. and Semeraro, W. (2001). 3D Tolerance analysis involving geometric tolerances, paper presented in the 34th CIRP International Seminar of Manufacturing Systems, Athens, Greece, pp. 29-38.
- [2] Mathieu, L., Clement, A. and Bourdet, P. (1997). Modelling, representation, processing and inspection of tolerances: A survey, paper presented in the 5th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Toronto, Canada, pp. 1-38.
- [3] Narahari, Y., Sudarson, R., Lyous, K., Duffy, M. R. and Sriran, R. D. (1999). Design for tolerance of electro-mechanical assemblies: An integrated approach, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15(6), pp. 1062-1079.
- [4] Ngoi, B. K. A. and Agarwal, M. (1998). The generic capsule approach to tolerance stack analysis, *International Journal of Production Research*, vol. 36(12), pp. 3273-3293.
- [5] Ngoi, B. K. A., Lim, B. H. and Ang, P. S. (2000). Nexus method for stack analysis of geometric dimensioning and tolerancing (GDT) problems, *International Journal of Production Research*, vol. 38(1), pp. 21-37.
- [6] Roy, U., Liu, C. R. and Woo T. C. (1991). A review of dimensioning and tolerancing: Representation and processing, *Computer-Aided Design*, vol.23(7), pp. 466-483.
- [7] Satonaka, N., Sugimura, N., Tanimizu, Y. and Iwamura, K. (2005). A study on modeling and analysis of kinematic motion deviations of machine tools (1st Report, Modeling and analysis of geometric deviations of constituting units), *Transactions of the JSME, Series C*, vol.71(708), pp. 192-198 (in Japanese).
- [8] Satonaka, N., Sugimura, N., Tanimizu, Y. and Iwamura, K. (2007). Analysis of geometric deviations of machine products under Maximum Material Conditions, *Transactions of the JSME, Series C*, vol. 73(730), pp. 285-291(in Japanese).
- [9] Satonaka, N., Sugimura, N., Tanimizu, Y. and Iwamura, K. (2008). A study on modeling and analysis of kinematic motion deviations of machine tools (2nd Report, Modeling and Analysis of Linear Tables and Machine Tools), *Transactions of the JSME, Series C*, Vol.74(737), pp. 198-205 (in Japanese).
- [10] Sugimura, N., Watabiki, H., Thasana, W., Iwamura, K. and Tanimizu, Y. (2012). Analysis of Kinematic Motion Deviations of Rotary Tables Based on Geometric Tolerances, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME*, vol. 6(7), pp. 1132-1142.
- [11] Takahashi, A., Yoshida, A., Thasana, W., Sugimura, N., Iwamura, K. and Tanimizu, Y. (2014). Analysis of Kinematic Motion Deviations of Machining Centers Based on Geometric Tolerances, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME*, vol. 8(4), pp. 1-12.
- [12] Takematsu, R., Sugimura, N., Yoshida, A., Thasana, W., Tanimizu, Y. and Iwamura, K. (2015). A Study on Tolerance Design for Machine Tools based on Shape Generation Functions, paper presented in The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering (the 6th TSME-ICoME 2015), Hua-Hin, Thailand.
- [13] Tsumura, T. and Ohnishi, K. (2001). Machine Design and Drawing Handbook based on JIS, Rikogakusya Co. Ltd. pp. 17-85 (in Japanese).

ภาคผนวก ข.
บทความวารสารวิชาการ

TNI



A study on tolerances design of parallel link robots based on mathematical models

Ryo TAKEMATSU*, Naoki SATONAKA**, Wiroj THASANA***, Koji IWAMURA**** and Nobuhiro SUGIMURA****

* Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan

** College of Technology, Osaka Prefecture University
26-12 Sawai-cho, Neyagawa-shi, Osaka 572-8572, Japan

*** Advanced Design and Manufacturing Technology Research Laboratory, Thai-Nichi Institute of Technology
1771/1 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250, Thailand

**** Graduate School of Humanities and Sustainable System Science, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka 599-8531, Japan
E-mail: sugimura@me.osakafu-u.ac.jp

Received: 7 July 2017; Revised: 13 October 2017; Accepted: 21 January 2018

Abstract

Parallel link robots are now being applied to various assembling tasks for small products and components. One of the important issues for design of the parallel link robots is to improve their kinematic motion deviations due to the complex link structures. The kinematic motion deviations of the parallel link robots are deeply influenced by the geometric deviations of the components, such as joints and links. A systematic design method is required for specifying suitable geometric tolerances of the joints and the links, in order to improve the kinematic motion deviations of the parallel link robots. The objective of the present research is to establish a computer-aided design system for specifying a suitable set of the geometric tolerances of the components considering the trade-off between the requirements on the kinematic motion deviations and the ease of the manufacturing processes. A mathematical model is formulated to represent the standard deviations of the kinematic motions of the end effectors, based on the tolerance values of the joints and the links. A systematic method is proposed here, by applying an optimization method, to determine a suitable set of the tolerance values of all the joints and the links under the constraints on the kinematic motion deviations of the end effectors. The method is applied to some design problems of the geometric tolerances of the parallel link robots.

Keywords : Parallel link robots, Kinematic motion deviations, Geometric tolerances, Tolerance design, Design optimization

1. Introduction

Three-dimensional CAD/CAM/CAE (Computer Aided Design/Manufacturing/Engineering) systems are now being widely applied to design, analysis and manufacturing of machine products and components. One of the important issues to be considered in the applications of CAD/CAM/CAE systems is how to deal with the geometric tolerancing and the dimensional tolerancing in the three dimensional product modeling systems.

Many researches have been carried out to deal with the dimensional tolerances, aimed at realizing statistical analysis and design methodologies for the three dimensional machine products (Mathieu et al., 1997), (Narahari et

al., 1999), (Roy et al., 1991), (Voelcker, 1993). The dimensional tolerances deal only with the deviations of the one-dimensional tolerances, and their applications are relatively limited for representation and analysis of the geometric deviations in three-dimensional spaces. Therefore, much emphasis has recently been given to the modeling and analysis of the three-dimensional geometric tolerances in the three dimensional product modeling (Carrino et al., 2001), (Ngoi and Agarwal, 1998), (Ngoi et al., 2000). However, most of the research works have not yet considered the statistical analysis of the three-dimensional tolerances.

A set of research works have been carried out to represent and to analyze the three-dimensional kinematic motion deviations of the machine tools based on the statistical characteristics of the geometric tolerances of the machine tools (Satonaka et al. 2005), (Satonaka et al. 2007), (Satonaka et al. 2008), (Sugimura et al., 2012), (Takahashi et al., 2014), (Takematsu, et al. 2016). The methods proposed in the previous papers are applicable to the machine products other than the machine tools.

Parallel link robots are now being applied to various assembling tasks for small products and components. One of the important issues for design of the parallel link robots is to improve their kinematic motion deviations due to the complex link structures. The kinematic motion deviations of the parallel link robots are deeply influenced by the geometric deviations of the components, such as joints and links. A systematic design method is required for specifying suitable geometric tolerances of the joints and the links, in order to improve the kinematic motion deviations of the parallel link robots. The objective of the present research is to establish a computer-aided design system for specifying a suitable set of the geometric tolerances of the components considering the trade-off between the requirements on the kinematic motion deviations and the ease of the manufacturing processes. A mathematical model is formulated to represent the standard deviations of the kinematic motions of the end effectors, based on the tolerance values of the joints and the links. A systematic method is proposed here, by applying an optimization method, to determine a suitable set of the tolerance values of all the joints and the links under the constraints on the kinematic motion deviations of the end effectors. The method is applied to some design problems of the geometric tolerances of the parallel link robots.

The following issues are discussed in the paper.

- (1) Measurement and simulation of a parallel link robot,
- (2) Inverse kinematics of parallel link robots,
- (3) Modeling and analysis of parallel link robots including geometric deviations, and
- (4) Design method for tolerance values for joints and links.

2. Measurement and Simulation of a Parallel Link Robot

Kinematic motion deviations of a parallel link robot are firstly measured by applying the DBB (Double Ball Bar) system, as shown in Fig. 1. The robot and the measuring system applied are FANUC M-11A/1H and Renishaw BC20-W, respectively. The terminals of the DBB are fixed on both the table center and the end effector, and the end effector is controlled to rotate around the table center. The rotational radius and the feed speed are set to 100 mm and 1,200 mm/sec, respectively. An example of the measurement results is shown in Fig. 2 (a) representing the radial position deviations of the end effector. As shown in the figure, the trajectory of the end effector has an ellipsoidal shape, and the radial positioning deviations reach about ± 0.4 mm. The patterns and the ranges of the radial deviations obtained here are almost same as the results published by the other papers (Takeda et al. 2004).

Mathematical simulation method is also applied to estimation of the effects of the deviations in the lengths of the links constituting the parallel link robots and the alignment deviations of the rotational joints of the upper links which control the positions of the end effectors. The mathematical simulations have been carried out for the configurations with various link lengths and rotational joint positions of the robot shown in Fig. 3. The robot has three set of the rotational joints, the upper links and the lower links as shown in Fig. 3 (a) and (b). One set of the rotational joint, the upper link and the lower link in $-x$ direction in Fig. 3 (b) and Fig. 4 are selected, and the position the joint and the lengths of the links are changed in the simulation. The parameters changed in the simulations are the position of the rotational joint L_1 , the length L_2 of the upper link and the length L_3 of the lower link.

The nominal values of L_1 , L_2 and L_3 are 110 mm, 100mm and 270 mm, respectively. In the simulation, these parameters are changed in the range of ± 1.1 mm. One example of the trajectories obtained in the simulation is shown in Fig. 2 (b) under the conditions of $L_1 = 110 - 1.1$, $L_2 = 100 + 1.0$ and $L_3 = 270 - 1.0$. The trajectory obtained here has a similar pattern with the trajectory shown in Fig. 2 (a) obtained in the experiments.

The results obtained through both the experiments and the simulations show that it is important to design the geometric deviations of the link lengths and the alignment deviations of the rotational joints from the viewpoint of

improving the kinematic motion deviations of the end effectors.

A systematic tolerance design methodology is discussed in the following sections, in order to establish a design method which determines a suitable set of the tolerance values under the constraints on the kinematic motion deviations of the end effectors of the parallel link robots. Especially, the emphasis is given to design a suitable set of the tolerance values of the rotational joints, the spherical joints and the links included in the robots. The tolerance values of the components deeply affect the position deviations of the end effectors.

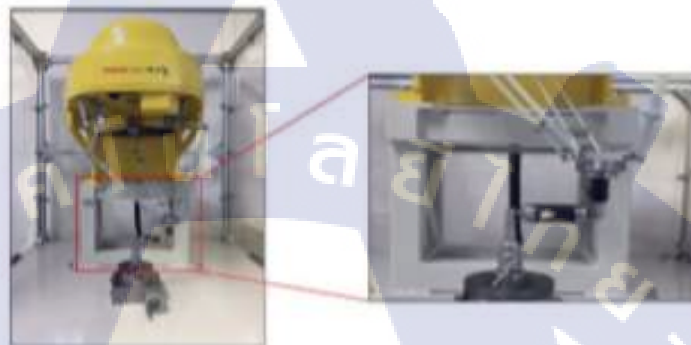


Fig.1 Experimental setups of double-ball-bar (DBB) system

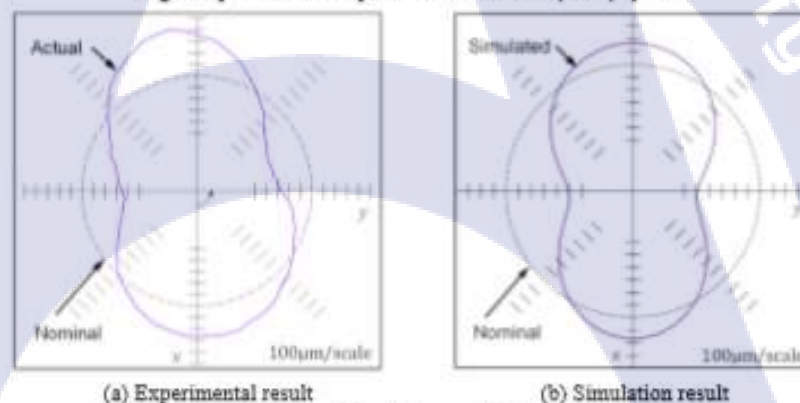


Fig.2 Measurement and simulation results of parallel link robot

3. Inverse Kinematics of Parallel Link Robots

3.1 Kinematic Model

The parallel link robots considered in the study are shown in Figs 3 (a) and (b), which represent the three dimensional model and the kinematic model, respectively. The end effectors move in the three dimensional space against the fixed bases. The motions of the end effectors are limited to the parallel motions with three degree of freedom. The motions are controlled by the rotational angles θ_1 , θ_2 and θ_3 of the upper links in the kinematic model shown in Fig. 3 (b).

Three servo-motors are equipped within the bases to control independently the rotational angles θ_1 , θ_2 and θ_3 of the upper links. The lower links shown in Fig. 3 (a) are connected by two double spherical joints with the upper links in one ends and with the end effectors in the opposite ends. By connecting using the double spherical joints, the motions of the end effectors are limited to the parallel motions without rotations.

Figure 4 summarizes the geometric parameters representing the link lengths and the positions of the joints which connect the bases, the upper links, the lower links and the end effectors.

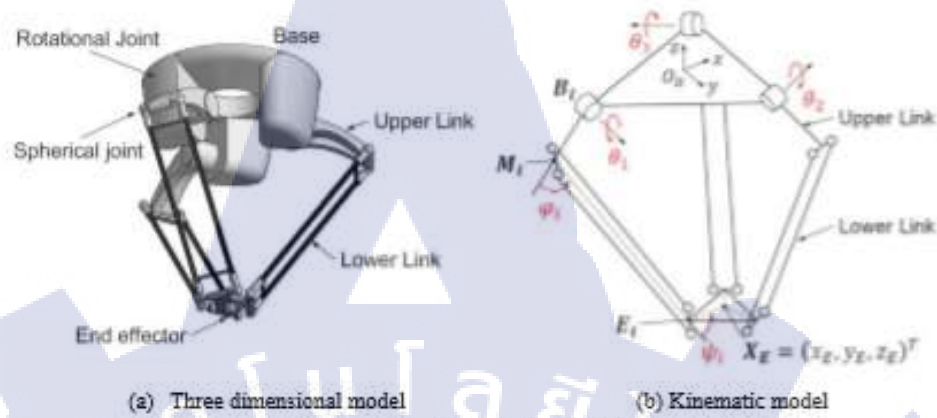


Fig. 3 Model of parallel link robots

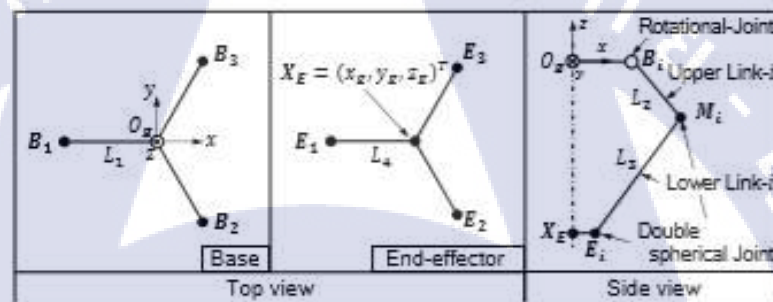


Fig.4 Geometric parameters representing links' lengths and positions of joints

3.2 Inverse kinematics

The inverse kinematic analysis is required to determine the joint angles θ_1 , θ_2 and θ_3 of the upper links based on the position of the end effectors. This section deals with the method to determine these joint angles. The input information about the position of the end effector is given by a position vectors X_E representing the centers of the end effectors.

$$X_E = (x_E, y_E, z_E)^T \quad (1)$$

Equation (2) gives the basic conditions to determine the joint angles θ_1 , θ_2 and θ_3 based on X_E .

$$L_2^2 = |E_i - M_i|^2 \quad (2)$$

where,

L_2 : Lengths of the lower links.

M_i : Position vectors of the upper end of the i -th lower link, which is connected with the i -th upper link driven by the servo motor.

E_i : Position vectors of the lower end of the i -th lower link, which is connected with the end effector.

The M_i and E_i are given by Eqs. (3) and (4)

$$\begin{aligned} M_1 &= (-L_1 - L_2 \cos \theta_1, 0, -L_2 \sin \theta_1)^T \\ M_2 &= \left(\frac{1}{2}L_1 + \frac{1}{2}L_2 \cos \theta_2, -\frac{\sqrt{3}}{2}L_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}L_2 \cos \theta_2, -L_2 \sin \theta_2 \right)^T \\ M_3 &= \left(\frac{1}{2}L_1 + \frac{1}{2}L_2 \cos \theta_3, \frac{\sqrt{3}}{2}L_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}L_2 \cos \theta_3, -L_2 \sin \theta_3 \right)^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_1 &= (x_E - L_4, y_E, z_E)^T \\ E_2 &= \left(x_E + \frac{L_4}{2}, y_E - \frac{\sqrt{3}}{2}L_4, z_E \right)^T \\ E_3 &= \left(x_E + \frac{L_4}{2}, y_E + \frac{\sqrt{3}}{2}L_4, z_E \right)^T \end{aligned} \quad (4)$$

where,

L_1 : Radius of the circle on which the rotational joints of the upper links are arranged.

L_2 : Lengths of the upper links.

The following equations are obtained for the joint angles θ_i from Eqs. (3) and (4).

$$A_i \cos \theta_i + B_i \sin \theta_i = C_i \quad (5)$$

$$A_1 = x_E - L_4 + L_1, B_1 = z_E, C_1 = \frac{L_1^2 - L_2^2 - A_1^2 - y_E^2 - z_E^2}{2L_2}$$

$$A_2 = \frac{1}{2}(-D_2 + \sqrt{3}E_2), B_2 = z_E, C_2 = \frac{L_2^2 - L_1^2 - D_2^2 - E_2^2 - z_E^2}{2L_2}$$

$$D_2 = x + \frac{1}{2}L_4 - \frac{1}{2}L_1, E_2 = y_E - \frac{\sqrt{3}}{2}L_4 + \frac{\sqrt{3}}{2}L_1$$

$$A_3 = -\frac{1}{2}(D_3 + \sqrt{3}E_3), B_3 = z_E, C_3 = \frac{L_3^2 - L_1^2 - D_3^2 - E_3^2 - z_E^2}{2L_2}$$

$$D_3 = x_E + \frac{1}{2}L_4 - \frac{1}{2}L_1, E_3 = y_E + \frac{\sqrt{3}}{2}L_4 - \frac{\sqrt{3}}{2}L_1$$

The joint angles θ_i are finally obtained by the following equations.

$$\theta_i = -\tan^{-1}(A_i/B_i) - \tan^{-1}(C_i/\sqrt{A_i^2 + B_i^2 - C_i^2}) \quad (6)$$

The angles φ_i and ψ_i shown in Fig. 3 (b) are obtained by the following equations. These angles are required to estimate the position of the end effectors taking into consideration of the geometric deviations of both the joints and the link lengths.

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \cos^{-1} \left(\frac{B_i M_i \cdot M_i E_i}{|B_i M_i| |M_i E_i|} \right) \\ \psi_i &= \cos^{-1} \left(\frac{M_i E_i \cdot E_i X_E}{|M_i E_i| |E_i X_E|} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

where,

φ_i : Angles between the upper links and the lower links.

ψ_i : Angles between the lower links and the end effectors.

$B_i M_i$: Vectors connecting from B_i to M_i .

$M_i E_i$: Vectors connecting from M_i to E_i .

$E_i X_E$: Vectors connecting from E_i to X_E .

4. Modeling and Analysis of Parallel Link Robots

4.1 Modeling of Geometric Deviations of Joints and Links

The geometric deviations of the joints and the links are constrained by the geometric tolerances defined on the geometric elements called "features" constituting the joints and the links. (Satonaka et al. 2005), (Satonaka et al., 2008) (Sugimura et al. 2012).

The geometric tolerances of the features specify the allowable areas named "tolerance zones," which constrain the position and orientation deviations of the associated features against the nominal features, as shown in Fig. 5. The geometric deviations of the associated features from the nominal features are represented by sets of parameters named "deviation parameters." For example, one position parameter w and two rotational parameters α and β are required to represent the geometric deviations of the associated plane features against the nominal plane features, for the case where the tolerance zone is given by the area between a pair of parallel planes shown in Fig. 5(a). The tolerance values t mean here the dimensions of the allowable areas of the associated features. For an example, the tolerance value of the plane feature is the distance t between a pair of faces representing the allowable area of the associated feature.

In the research, the followings are assumed for the ease of the modeling and the analysis of the geometric deviations.

- (1) The deviation parameters δ_i representing the position and orientation deviations of the associated features follow the normal distribution $N(\mu_i, \sigma_i)$, and $\mu_i = 0$. Where, μ_i and σ_i are the mean values and the standard deviations, respectively.
- (2) The manufacturing processes of the components are well controlled, and the proportion of the non-conforming components, which means that the tolerated features exceed the tolerance zones, is as small as a value P_d called "percent defective".
- (3) Eq. (8) represents the relationships between the standard deviations σ_i of the deviation parameters of the tolerated features and the maximum values of the deviation parameters.

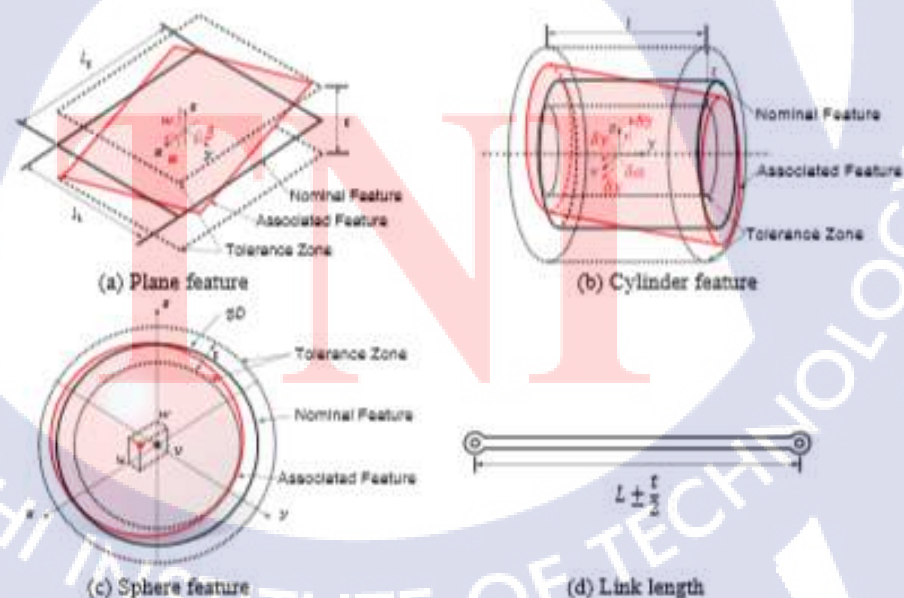


Fig.5 Definition of geometric tolerance of features

$$\sigma_i = \delta_{i\max} / C_{pd} \quad (8)$$

where,

$\delta_{i\max}$: Maximum values of the deviation parameters δ_i , if the other deviation parameters are $\delta_j = 0, (i \neq j)$.

C_{pd} : A constant representing the ratio of the maximum values $\delta_{i\max}$ and the standard deviations σ_i .

Let us consider a simple case of the link lengths shown in Fig. 5(d), as an example. The deviation parameter in the case is given by δ representing the length deviation. If δ follows the normal distribution $N(\mu, \sigma)$, the percent defective P_d , that is the percentage of the cases where the length deviation δ exceeds the range of $\pm 3\sigma$, equals to 0.27%. This is the basic character of the normal distributions. So, if $t/2$ is the maximum allowable deviation in $\pm$ directions of the link length and standard deviation σ equals $t/6$ in the case shown in Fig. 5 (d), P_d equals 0.27%. This means that $P_d = 0.27\%$ for the case $C_{pd} = 3$.

Let us consider another case of the plane feature shown in Fig. 5(a) including more than one deviation parameters. The maximum values $\delta_{i\max}$ are given as follows.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= w, \delta_2 = a, \delta_3 = \beta \\ \delta_{1\max} &= \frac{t}{2}, \delta_{2\max} = \frac{t}{l_1}, \delta_{3\max} = \frac{t}{l_2} \end{aligned} \quad (9)$$

where,

l_1, l_2 : Length and width of the plane feature.

t : Tolerance values, e.g. the distance between two planes representing the tolerance zones.

The following equation gives the conditions that the plane features are included within the tolerance zone between a pair of planes

$$-\frac{t}{2} \leq \delta_1 + \frac{l_1 \delta_2}{2} + \frac{l_2 \delta_3}{2} \leq \frac{t}{2} \quad (10)$$

The probability that the tolerated features are included within the tolerance zone is given by the following equation.

$$\begin{aligned} 1 - P_d &= \left(\frac{2}{\sqrt{2\pi}} \right)^3 \int_0^{C_{pd}} \int_0^{C_{pd}-x_1} \int_0^{C_{pd}-x_1-x_2} \left(\prod_{i=1}^3 \exp\left(-\frac{x_i^2}{2}\right) \right) dx_2 dx_1 dx_3 \\ x_1 &= \frac{2C_{pd}\delta_1}{t}, x_2 = \frac{l_1 C_{pd}\delta_2}{t}, x_3 = \frac{l_2 C_{pd}\delta_3}{t} \end{aligned} \quad (11)$$

If P_d is set to 0.27%, the constant C_{pd} in Eq. (8) can be estimated as " $C_{pd} = 5.83$ ", through the numerical analysis of Eq. (11).

For the cases of the cylinder features and the sphere features shown in Figs. 5 (b) and (c), the constant C_{pd} in Eq. (8) are estimated as " $C_{pd} = 5.06$ " for the cylinder features and " $C_{pd} = 3.87$ " for the sphere features, by applying the same methods as ones for the plane features, if P_d is set to be 0.27%.

4.2 Kinematic Motion Deviations of End Effectors

(1) Kinematic Motion Deviations of Rotational Joints

4 by 4 homogeneous transformation matrices are applied to represent the kinematic motions and their deviations in the previous and present research works (Satonaka et al. 2005), (Satonaka et al. 2007), (Satonaka et al. 2008), (Sugimura et al., 2012), (Takahashi et al., 2014), (Takematsu, et al., 2016). The kinematic motions at the rotational joints shown in Fig. 6(a) are represented by the following equation taking into consideration of the geometric deviations of the faces.

$$A_R^g(\theta_i) = A_R \begin{pmatrix} \cos \theta_i & \delta \gamma_{\theta 1} & \sin \theta_i & \delta x_\theta \\ \delta \gamma_{\theta 2} & 1 & \delta \alpha_{\theta 1} & \delta y_\theta \\ -\sin \theta_i & \delta \alpha_{\theta 2} & \cos \theta_i & \delta z_\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} A_R^{-1} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \delta \alpha_{\theta 1} &= \gamma_{ia} \sin \theta_i - \alpha_{ia} \cos \theta_i + \alpha_{jb} \\ \delta \alpha_{\theta 2} &= -\gamma_{jb} \sin \theta_i - \alpha_{jb} \cos \theta_i + \alpha_{ia} \\ \delta \gamma_{\theta 1} &= \gamma_{jb} \cos \theta_i - \alpha_{jb} \sin \theta_i - \gamma_{ia} \\ \delta \gamma_{\theta 2} &= \gamma_{ia} \cos \theta_i + \alpha_{ia} \sin \theta_i - \gamma_{jb} \\ \delta x_\theta &= \frac{1}{2}(-2\delta x_{jb} + d_1 \gamma_{jb} + d_4 \gamma_{jb}) \cos \theta_i - (d_1 + d_4) \gamma_{ia} - \frac{1}{2}(2\delta z_{jb} + d_1 \alpha_{jb} + d_4 \alpha_{jb}) \sin \theta_i + \delta x_{ia} \\ \delta y_\theta &= \delta y_{ia} - \delta y_{jb} \\ \delta z_\theta &= \frac{1}{2}(-2\delta x_{jb} + d_1 \gamma_{jb} + d_4 \gamma_{jb}) \sin \theta_i + (d_1 + d_4) \alpha_{ia} - \frac{1}{2}(2\delta z_{jb} + d_1 \alpha_{jb} + d_4 \alpha_{jb}) \cos \theta_i + \delta z_{ia} \end{aligned}$$

where,

R : Unit vector representing the rotational axis in the parallel link robots.

A_R : Transformation matrix which transforms the y-axis to the rotational axis R .

$A_R^g(\theta_i)$: Transformation matrix including the kinematic motion deviations due to the geometric deviations of the guide-ways of the rotational joint.

θ_i : Rotation angle of the rotational joint.

α_{mn}, γ_{mn} : Orientation deviations of n -th guide-way of the rotational joints in Unit- m ($m = i, j, n = a, b$).

$\delta x_{mn}, \delta y_{mn}, \delta z_{mn}$: Position deviations of n -th guide-way of the rotational joints in Unit- m ($m = i, j, n = a, b$).

(2) Kinematic Motion Deviations of Spherical Joints

The geometric deviations of the lower links are represented by the dimensional deviations between the centers of the upper double spherical joints and the centers of the lower ones show in Fig. 3 (b), and the dimensional deviations between the pairs of the centers are represented by the average lengths of the pair of lower links connected with each other. It is assumed, in the research, that the average length of the pair of lower links connected with each other is approximated by one link with two ball joints on both side of the link, and that the approximation errors are small. Therefore, the double spherical joints of the lower links are represented by the single spherical joints in the model for the ease of the analysis.

The kinematic motions in the spherical joints are represented by only the angles of φ_i or ψ_i , as shown in Fig. 3 (b), and the transformation matrix for the spherical joints with geometric deviations is given by the following equations.

$$A_S^g(\varphi_i) = A_S \begin{pmatrix} \cos \varphi_i & -\sin \varphi_i & 0 & \delta x_\varphi \\ \sin \varphi_i & \cos \varphi_i & 0 & \delta y_\varphi \\ 0 & 0 & 1 & \delta z_\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} A_S^{-1} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \delta x_\varphi &= -\delta x_d \cos \varphi_i + \delta y_d \sin \varphi_i + \delta x_e, \\ \delta y_\varphi &= -\delta x_d \sin \varphi_i - \delta y_d \cos \varphi_i + \delta y_e, \\ \delta z_\varphi &= \delta z_e - \delta z_d \end{aligned}$$

where,

S : Unit vector representing the rotational axis which is perpendicular to either the planes defined by two vectors of $B_i M_i$ and $M_i E_i$ or the planes defined by two vectors of $M_i E_i$ and $E_i X_E$.

A_S : Transformation matrix which transforms the x-axis to the rotational axis S .

A_S^g : Transformation matrix including the kinematic motion deviations due to the geometric deviations of the guide-ways of the spherical joints.

φ_i : Angles given in Eq. (7).

$\delta x_n, \delta y_n, \delta z_n$: Position deviations of guide-way n of the spherical joint.

Equation (13) give the transformation of the spherical joints at M_i . For the cases of the spherical joints at E_i , the angles φ_i is replaced by ψ_i .

(3) Deviations of Upper Links and Lower Links

The deviations of the upper and lower links shown in Fig. 3 are represented by the following equation.

$$A_L^{\delta}(L) = A_L \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & L + \delta_L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} A_L^{-1} \quad (14)$$

where,

L : Unit vector representing either the vectors $B_i M_i / |B_i M_i|$ for the upper links or the vectors $M_i E_i / |M_i E_i|$ for the lower links.

A_L : Transformation matrix, which transform the x-axis to either the vectors of $B_i M_i / |B_i M_i|$ or the ones of $M_i E_i / |M_i E_i|$.

δ_L : Length deviations of the links.

(4) Kinematic Motion Deviations of End Effectors

The kinematic motion deviations of the centers of the end effectors are estimated by applying the following equations. The motions deviations of the points E_i are firstly estimated by the following equation.

$$E_i = (A_{L1i}(L_1)A_{Ri}^{\theta_i}A_{L2i}^{\sigma}(L_2)A_{S1i}^{\varphi}(\varphi_i)A_{L3i}^{\sigma}(L_3)A_{S2i}^{\psi}(\psi_i) - (A_{L1i}(L_1)A_{Ri}(\theta_i)A_{L2i}(L_2)A_{S1i}(\varphi_i)A_{L3i}(L_3)A_{S2i}(\psi_i))X_0 \quad (15)$$

where,

$A_{Lki}(L_k)$: Transformation matrices representing linear transformations in Lki direction without the deviations.

$A_{Lki}^{\sigma}(L_k)$: Transformation matrices representing linear transformations in Lki direction with the deviations.

$A_{Vi}^{\theta_i}(\theta_i)$: Transformation matrices representing rotational transformations around Vi direction with the deviations.

X_0 : Zero vectors.

The position vectors of the central point of the end effectors X_E are obtained by the following equation.

$$X_E = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 E_i \quad (16)$$

The mean values and the standard deviations of the position vectors of X_E are estimated by applying the Equations from (5) to (16) when the positions of the nominal vector X_E are specified.

5. Design Method for Tolerance Values for Joints and Links

5.1 Formulation of Problem

The tolerance design of the parallel link robots plays an important role from the viewpoints of both the kinematic motion accuracy and the production costs. The tolerance values should be as large as possible for the ease of manufacturing processes. On the other hands, the end effectors of the parallel link robots should be controlled so that their kinematic motion deviations are kept within the allowable ranges.

A systematic procedure is proposed here, by applying an optimization method, to determine a suitable set of the tolerance values of all the joints and the links under the constraints on the kinematic motion deviations of the centers of the end effectors. The tolerance design problem considered here is formulated as shown in the followings, in order to consider the trade-off between the high kinematic motion accuracy and the ease of the manufacturing processes.

(a) Design variables

The design variables summarized in Table 1 include five geometric tolerance values from t_1 to t_5 of the joints shown in Fig. 6 (a) and (b) and two dimensional tolerance values t_6 and t_7 of the upper links and the lower links shown in Fig. 3(d). The tolerance values t_i mean here the dimensions of the allowable areas of the associated features shown in Fig. 5 (a) to (c) for all the features and the dimensions shown in Fig. 5 (d) for the link lengths.

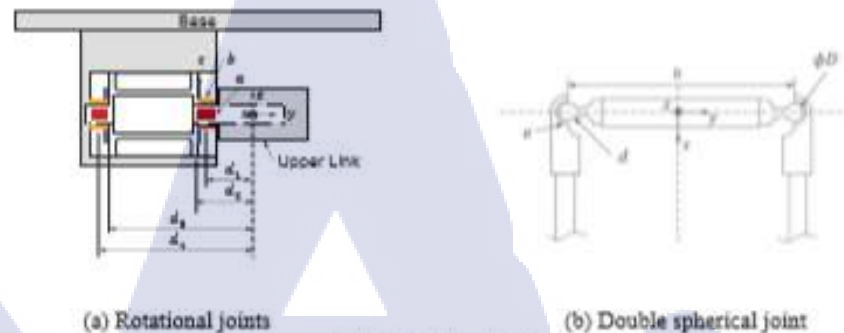


Fig.6 Models of joints

Table 1 Design variables

Symbol	Meaning	Guide-way
t_1	Radial axes	a
t_2	Radial bearings	b
t_3	Thrust bearings	c
t_4	Spherical joints (Ball)	d
t_5	Spherical joints (Socket)	e
t_6	Dimensional tolerance of upper links	
t_7	Dimensional tolerance of lower links	

Table 2 Dimensions

Symbol	Length (mm)
L_1	110
L_2	100
L_3	270
L_4	40
d_1	50
d_2	60
d_3	80
d_4	90

Totally, seven tolerance values $\mathbf{t} = (t_1, t_2, \dots, t_7)^T$ are considered in the tolerance design of the parallel link robots. The dimensions of the robots considered in the case studies are summarized in Table 2.

(b) Constraints

The following Equation gives the constraints on the kinematic motion deviations of the end effectors estimated by the equations from (5) to (16).

$$F(\mathbf{t}) = \sqrt{\sigma^2(x_E) + \sigma^2(y_E) + \sigma^2(z_E)} \leq \sigma_{\max} \quad (17)$$

where,

$\sigma(x_E), \sigma(y_E), \sigma(z_E)$: Standard deviations in x, y and z directions of the position vectors of $\mathbf{X}_E$.

$\sigma_{\max}$: Allowance of the standard deviations of the kinematic motion deviations of the end effectors.

(c) Objective function

The following equation gives the objective function including the tolerance values and the representative dimensions of the geometric elements of the joints and the links.

$$G_{obj}(\mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n r_i^{0.24} / t_i \quad (18)$$

where,

r_i : Representative dimensions of the geometric elements on which tolerances are specified.

t_i : Tolerance values representing the allowable areas of the associated features.

The objective function Eq. (18) is formulated on the basis of the relations between the tolerance values and the representative dimensions of the features defined in the IT standard tolerance (JIS, 1988). Figure 7 summarizes how the tolerance value is changed according to the diameters of the cylinder features of the holes and the pins. Three lines in the figure correspond to IT6, IT8 and IT10, respectively.

It is assumed that the individual lines of IT6, IT8 and IT10 correspond to the difficulties in the manufacturing processes of the features. The least mean square method is applied to approximation of the lines in the figure, and

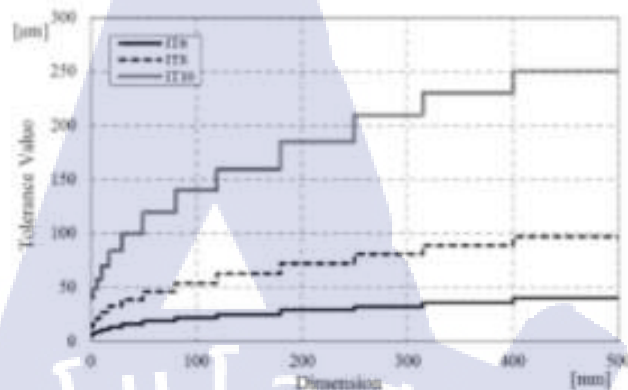


Fig. 7 Relations between tolerance value and representative dimension of feature

the formulas $r_i^{0.74}/t_i = \gamma$ (constant) are obtained for the individual lines. So, the objective function $G_{obj}(t) = \sum_{i=1}^7 r_i^{0.74}/t_i$ is set to be minimized in the tolerance design processes.

The representative dimensions considered here are the diameters and/or the lengths of the features shown in Fig. 5 (a) to (c) for the cases of the joints and the link lengths shown in Fig. 5 (d) for the cases of the links, respectively.

The objective function given in Eq. (13) should be minimized under the constraints presented by Eq. (17) in the design process of the tolerance values. The design process are proposed in the previous paper (Takematsu, et al, 2016), and summarized in the next section.

5.2 Design Process

The problems considered here is to select optimum tolerance values $t = (t_1, t_2, \dots, t_7)^T$, which minimize the objective function values described by Eq. (13) under the constraints on the kinematic motion deviations given by Eq. (17). As the tolerance values are increased, the objective function values are decreased, however the kinematic motion deviations are increased and sometimes exceed the constrained value given by Eq. (13). So, the optimum tolerance values t are obtained at the border of the constraints given by $F(t) = \sqrt{\sigma^2(x_x) + \sigma^2(y_x) + \sigma^2(z_x)} = \sigma_{max}$.

The following three steps are applied to selection of the optimum tolerance values $t = (t_1, t_2, \dots, t_7)^T$ on the border the constraints.

STEP 1: Search of the maximum tolerance values $t_{max} = (t_{1max}, t_{2max}, \dots, t_{7max})^T$

The maximum values t_{imax} of the i -th tolerance are searched through the following procedures.

STEP 1.1

All the tolerance values $t_1, t_2, \dots, t_7$ are firstly set to be the minimum value of 0.001mm.

STEP 1.2:

A tolerance value of t_i is increased by a step value of 0.001 and the kinematic motion deviation $F(t)$ is calculated and verified $F(t) = \sigma_{max}$. This step is terminated when $F(t) = \sigma_{max}$, and the maximum values of the i -th tolerance t_{imax} is obtained.

The two steps above mentioned are repeated for all the tolerances $t_1, t_2, \dots, t_7$ to obtain the maximum values of all the tolerances.

STEP 2: Search of a candidate solution $t_{initial} = (t_{1initial}, t_{2initial}, \dots, t_{7initial})^T$

A candidate solution $t_{initial}$ is obtained by applying the following procedures.

STEP 2.1

An initial tolerance values $t_0 = (t_{01}, t_{02}, \dots, t_{07})^T$ are generated randomly as the uniform random numbers. The initial values of the i -th tolerance t_{0i} is generated as an uniform random number between the minimum values of 0.001 mm and the maximum values t_{imax} .

STEP 2.2

The steepest descent method is applied to find an of a candidate solution $t_{initial}$ from the initial values t_0 . The initial value t_0 is updated by applying the following formulas until the t_{i+1} satisfies the constraints $F(t) = \sigma_{max}$.

$$\begin{aligned} t_{i+1} &= t_i - \varepsilon \nabla F(t_i) \\ \varepsilon \nabla F(t_i) &= (\partial F / \partial t_1, \partial F / \partial t_2, \dots, \partial F / \partial t_r)^T \end{aligned} \quad (19)$$

where,

$\nabla F(t_i)$: Gradient vectors obtained through the numerical partial differentiation of $F(t_i)$.

ε : Constant to obtain t_{i+1} from t_i .

A candidate solution of t_{initial} is obtained on the border of the constraints by applying the two steps.

STEP 3: Search of the optimum solution

The optimum solution is obtained by applying the following procedures.

STEP 3.1

All the component values $t_{1\text{initial}}, t_{2\text{initial}}, \dots, t_{r\text{initial}}$ are rounded off to the third decimal place, because the tolerance values are usually specified in 0.001 mm unit. The tolerance values are manipulated in 0.001 mm unit in STEP 3.2 and STEP 3.3.

STEP 3.2

If t_{initial} satisfies the constraint $F(t_{\text{initial}}) \leq \sigma_{\text{max}}$, STEP 3.3 is carried out. If not so, one of the tolerance values $t_{i\text{initial}}$ with the largest gradient $\partial F / \partial t_{i\text{initial}}$ is deduced by 0.001 mm until $F(t_{\text{initial}})$ satisfies the constraints. After t_{initial} satisfies the constraint $F(t_{\text{initial}}) \leq \sigma_{\text{max}}$, STEP 3.3 is carried out.

STEP 3.3

The gradient vector $\nabla G_{\text{obj}}(t_{\text{initial}})$ of the objective function is firstly calculated, and the tolerance values $t_{i\text{initial}}$ are arranged from the largest one to the smallest one according to the absolute values of the gradient vector components $|\nabla G_{\text{obj}} / \partial t_{i\text{initial}}|$. The following three steps are repeated from the tolerance value $t_{k\text{initial}}$ with largest gradient vector component to the smaller one.

- (1) t_{initial} is modified by adding 0.001 mm to the tolerance value $t_{k\text{initial}}$.
- (2) If modified t_{initial} does not satisfies the constraint $F(t_{\text{initial}}) \leq \sigma_{\text{max}}$, then t_{initial} is restored to the original value.
- (3) The tolerance value with next largest gradient vector component are selected and then (1) and (2) are carried out.

The procedures mentioned above are repeated until all the tolerance values are manipulated, and an optimum solution is obtained.

The procedures of STEP 2 and STEP 3 are repeated for ten times to obtain the final optimum solution, since the solutions obtained through the procedures mentioned above are influenced by initial tolerance values t_0 randomly generated in STEP 2.1.

5.3 Case Studies

The proposed method is applied to the tolerance design of the parallel link robot shown in Fig. 3. The geometric deviations of the features are represented by the standard deviations given in Eq. (8), and the kinematic motion deviations of the end-effectors are also represented by the standard deviations by applying Eqs. (12) to (14). Therefore, both the geometric deviations and the motion deviations are symmetry in plus and minus directions of the deviation parameters.

The parallel link robot considered here has $1/3\pi$ rotationally symmetric structures, and the motion areas of the end effector are limited within the range shown in Fig. 8 (a). Therefore, the motion deviations of the end effector are verified at totally 15 positions show in Fig. 8 (b). The optimum tolerance values $t = (t_1, t_2, \dots, t_r)^T$ are firstly designed for the 15 positions independently by setting the allowable motion deviations to 0.05 mm, based on Eqs. (17) and (18). The final optimum tolerance values are obtained by selecting the minimum values of the individual optimum tolerance values $t = (t_1, t_2, \dots, t_r)^T$ for all the 15 positions.

The optimum design results are shown in Fig. 9. The horizontal axis of Fig. 9 (a) and (b) represent the design variables $t = (t_1, t_2, \dots, t_r)^T$. The vertical axes of Fig. 9 (a) and (b) represent tolerance values and the individual

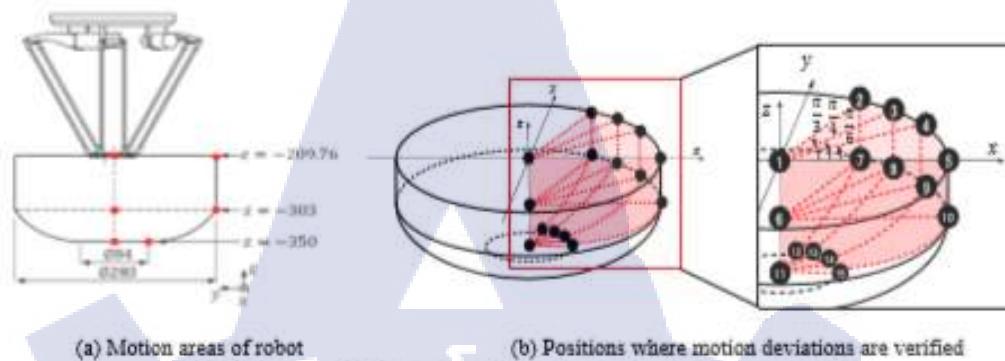


Fig. 8 Motion area of robot and positions where motion deviations are verified

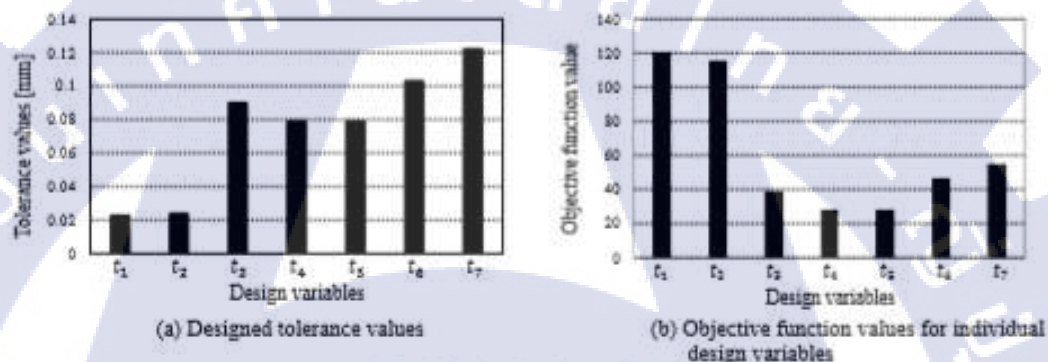


Fig. 9 Result of tolerance design

components of the objective function values $r_i^{0.24}/t_i$ for the individual tolerance values in Eq. (18), respectively. The designed tolerances of t_1 and t_2 are smaller than other tolerance values, as shown in Fig. 9. This means that the kinematic motion deviations of end effectors are deeply influenced by the tolerance values of the geometric elements of the rotational joints of the upper links, therefore these tolerance values are very important to minimize the standard deviations of kinematic motions of the end effectors.

6. Conclusions

A systematic method is proposed, by applying an optimization method, to determine a suitable set of the tolerance values of the geometric elements of the joints and the links constituting the parallel link robots, under the constraints on the kinematic motion deviations of the end effectors. The results are summarized as follows:

- (1) Kinematic motion deviations of a parallel link robot were measured and compared with the simulation results based on the kinematic model. The results show that the kinematic motion deviations of the end effectors of the robot are deeply affected by the geometric tolerances of the joints and the links constituting the robots.
- (2) A mathematical model of the parallel link robots was proposed to estimate the kinematic motion deviations of the robots based on the geometric deviations of the joints and the links. The inverse kinematic method was also discussed to obtain the joint angles of the upper links to control the end effectors, based on the nominal model without the geometric deviations.
- (3) A tolerance design method was proposed and applied to a design problem of the parallel link robots to design a suitable set of the tolerance values of the geometric elements of the joints and the links. The method provide us with a systematic method to determine the suitable set of the tolerance values taking into consideration of both the constraints of the kinematic motion deviations of the end effectors and the ease of the manufacturing process of the robots and their components.

Takematsu, Satonaka, Thasana, Iwamura and Sugimura,
Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.12, No.1 (2018)

References

- Carrino, L., Moroni, G., Polini, W. and Semeraro, W., 3D Tolerance analysis involving geometric tolerances, Proceedings of the 34th CIRP International Seminar of Manufacturing Systems, Athens (Greece) (2001), pp.29-38. *JIS, B 0401-1*: 1998(1998).
- Mathieu, L., Clement, A. and Bourdet, P., Modelling, representation, processing and inspection of tolerances: A survey, Proceedings of the 5th CIRP Seminar on Computer Aided Tolerancing, Toronto (Canada) (1997), pp.1-38.
- Narahari, Y., Sudarson, R., Lyous, K., Duffy, M. R. and Sriran, R. D., Design for tolerance of electro-mechanical assemblies: An integrated approach, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 6 (1999), pp.1062-1079.
- Ngoi, B. K. A. and Agarwal, M., The generic capsule approach to tolerance stack analysis, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 12 (1998), pp.3273-3293.
- Ngoi, B. K. A., Lim, B. H. and Ang, P. S., Nexus method for stack analysis of geometric dimensioning and tolerancing (GDT) problems, *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 1 (2000), pp.21-37.
- Ni, Y., Shao, C., Zhang, B. and Guo, W., Error modeling and tolerance design of a parallel manipulator with full-circle rotation, *Advance in Mechanical Engineering SAGE*, Vol. 8(5) (2016), pp1-16
- Roy, U., Liu, C. R. and Woo T. C., A review of dimensioning and tolerancing: Representation and processing, *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 7 (1991), pp. 466-483.
- Satonaka, N., Sugimura, N., Tanimizu, Y. and Iwamura, K., A study on modeling and analysis of kinematic motion deviations of machine tools (1st Report, Modeling and analysis of geometric deviations of constituting units), *Transactions of the JSME, Series C*, Vol. 71, No.708(2005), pp.192-198 (in Japanese).
- Satonaka, N., Sugimura, N., Tanimizu, Y. and Iwamura, K., Analysis of geometric deviations of machine products under Maximum Material Conditions, *Transactions of the JSME, Series C*, Vol. 73, No.730 (2007), pp.285-291(in Japanese).
- Satonaka, N., Sugimura, N., Tanimizu, Y. and Iwamura, K., A study on modeling and analysis of kinematic motion deviations of machine tools (2nd Report, Modeling and Analysis of Linear Tables and Machine Tools), *Transactions of the JSME, Series C*, Vol. 74, No. 737(2008), pp.198-205 (in Japanese).
- Sugimura, N., Watabiki, H., Thasana, W., Iwamura, K. and Tanimizu, Y., Analysis of Kinematic Motion Deviations of Rotary Tables Based on Geometric Tolerances, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME*, Vol. 6, No. 7(2012), pp.1132-1142.
- Takeda, Y., Shen, G. and Funabashi, H., A DBB-Based Kinematic Calibration Method for In-Parallel Actuated Mechanisms Using a Fourier Series, *Journal of Mechanical Design ASME*, Vol.126 (2004), pp.856-865
- Takahashi, A., Yoshida, A., Thasana, W., Sugimura, N., Iwamura, K. and Tanimizu, Y., Analysis of Kinematic Motion Deviations of Machining Centers Based on Geometric Tolerances, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME*, Vol. 8, No. 4(2014), pp.1-12.
- Takematsu, R., Satonaka, N., Yoshida, A., Sugimura, N., Iwamura, K. and Tanimizu, A study on tolerance design of machine tool components based on shape generation motions, *Transactions of the JSME*, Vol.82, No.834(2016), pp.1-12 (in Japanese).
- Voelcker, H. B., A current perspective on tolerancing and metrology, Proceedings of 1993 International Forum on Dimensional Tolerancing and Metrology, New York, ASME CRTD-Vol. 27 (1993), pp.49-60.