

รหัสโครงการ SUT7-711-51-12-48



## รายงานการวิจัย

การบูรณะสถานะแวดล้อม 3 มิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ – กระจก  
และการไหลเชิงแสง

**3D ENVIRONMENT RECONSTRUCTION USING CATADIOPTRIC  
SENSOR AND OPTICAL FLOW**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การบูรณะสถานะแวดล้อม 3 มิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ – กระจก  
และการไหลเชิงแสง

**3D ENVIRONMENT RECONSTRUCTION USING CATADIOPTRIC  
SENSOR AND OPTICAL FLOW**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายเอกภาพ ทองอินตะ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2551

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2553

## บทคัดย่อ

ระบบการมองเห็น โดยคอมพิวเตอร์ (Computer vision) ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อลดผลของความยุ่งยากในการจะนำไปใช้งานจริง ยกตัวอย่างเช่นมุมมองในการมองเห็นที่แคบมีผลทำให้การประชุมทางไกล (Teleconference) ไม่สามารถมองเห็นสมาชิกผู้เข้าร่วมประชุมได้ครบคลุม เป็นผลให้อาจเกิดการสื่อสารที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ หรือความชัดเจนของการมองเห็นอาจมีผลต่อรูปร่างของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีความยุ่งยากของระบบการมองเห็นอีกหลายประการ จึงเป็นผลให้มีการศึกษาและวิจัยงานในด้านนี้ อย่างกว้างขวาง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก (Catadioptric sensor) ทำงานร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) และกระบวนการไหลเชิงแสง (Optical flow) ในการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ (3D reconstruction) ซึ่งตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยกล้อง 1 ตัว ร่วมกับกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพได้รอบทิศและหาตำแหน่งของวัตถุได้ ระบบโครงข่ายประสาทเทียมใช้ในการหาจุดสามมิติบนผิวกระจก ทำให้ลดความยุ่งยากและซับซ้อนของสมการ อีกทั้งยังลดความผิดพลาดที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และมีการใช้กระบวนการไหลเชิงแสง ทำให้สามารถรู้ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในระบบสามมิติได้ซึ่งระบบที่ได้สามารถตรวจจับวัตถุในระนาบสามมิติโดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5 เซนติเมตร

## Abstract

Nowadays, computer vision system has been considerably improved. This improvement is mainly to reduce any restriction for using in real-world applications. For example, in teleconference system, a narrow view of angle does not allow to perceive all audiences which can give an inefficient communication system. There have been many complications in computer vision that make this field of study still an active research area. This work presents a development of catadioptric vision system along with neural network and optical flow for 3D environment reconstruction. The catadioptric sensor consists of two imperfect half-sphere mirrors. A simple back-propagation artificial neural network has been sufficiently used as a model of mirror surface to overcome both two imperfect-curved mirrors and un-calibrated internal camera parameters. The optical flow on both omnidirectional images from two curved mirrors are extracted and applied to compute 3D positions of the moving object. The error of the proposed system is less than 5cm which is desirable in order to use for various applications that require tracking of moving object in 3D space.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือช่วยเหลือในด้านต่างๆ จากหลายๆ ฝ่าย จนสำเร็จไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความเอื้อเฟื้อเพื่อทั้งทางด้านสถานที่ เครื่องมือและบุคลากร ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสำนักวิศวกรรมศาสตร์สำหรับการสนับสนุนในทุกๆ ด้าน การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณพ.ศ. 2551

คณะผู้วิจัย



## สารบัญ

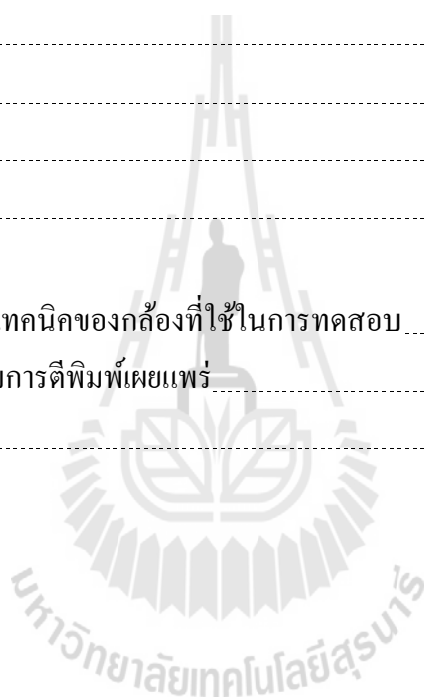
หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 บทนำ.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
<b>3 การหาจุดในพิกัดสามมิติ</b> .....	<b>11</b>
3.1 บทนำ.....	11
3.2 สมการการคำนวณหาจุดในพิกัดสามมิติ.....	11
3.3 สมการการสะท้อนของจุดสามมิติโดยใช้กระจกโค้ง 2 ตัว.....	14
3.4 การหาจุดสามมิติ บนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม.....	15
3.4.1 ผลการทดสอบ.....	20
3.5 การคำนวณหาจุดในพิกัดสามมิติจากจุดบนผิวกระจกโค้ง.....	21
3.6 สรุป.....	23
<b>4 การบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก</b> <b>และการไหลเชิงแสง</b> .....	<b>25</b>
4.1 บทนำ.....	25
4.2 การไหลเชิงแสง (Optical flow).....	25

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลการทดสอบระบบ.....	26
4.4 ทดสอบย่านการทำงานของระบบ.....	51
4.5 ตารางผลการทดสอบตอนที่ 4.3.....	81
4.6 ตารางผลการทดสอบตอนที่ 4.4.....	82
4.7 การเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ติดต่อกัน.....	86
4.8 วิเคราะห์และสรุป.....	88
<b>5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>93</b>
5.1 สรุป.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	94
รายงานอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดทางเทคนิคของกล่องที่ใช้ในการทดสอบ.....	99
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	103
ภาคผนวก ค. ประวัติผู้วิจัย.....	105



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กระจกโค้ง A) .....	19
3.2 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กระจกโค้ง B) .....	20
3.3 ผลการทดลองการคำนวณจุดในพิกัดสามมิติ .....	22
4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X .....	81
4.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z .....	82
4.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน XYZ .....	82
4.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 11 .....	82
4.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 12 .....	83
4.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 13 .....	83
4.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 21 .....	83
4.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 22 .....	84
4.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 23 .....	84
4.10 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 31 .....	84
4.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 32 .....	85
4.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 33 .....	85
4.13 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 41 .....	85
4.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 42 .....	86
4.15 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 43 .....	86
ก.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของกล้องทดสอบ .....	102



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มุมมองของกระจกแบบต่าง ๆ (ก) กระจกทรงไฮเปอร์โบล่า (ข) กระจกทรงกลม (ค) กระจกทรงกรวย.....	4
2.2 กระจกโค้งแบบต่าง ๆ (ก) ทรงวงรี (ข) ทรงไฮเปอร์โบล่า (ค) ทรงกรวย.....	6
2.3 การสะท้อนของผิวกระจกโค้ง (ก) การสะท้อนซึ่งตัดกับจุดโฟกัส (ข) การสะท้อนแบบตั้งฉาก.....	7
2.4 ผลการใช้สมการเชิงอนุพันธ์กับกระจกโค้ง (ก) ตารางเปรียบเทียบ (ข) ภาพที่ได้ จากกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม (ค) ภาพที่ได้จากกระจกโค้งรูปพาราโบล่า (ง) ภาพหลังจากใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแปลงตารางเปรียบเทียบ.....	8
2.5 แบบจำลองระบบกระจกของ Fiala and Basu (2002).....	9
3.1 แผนผังการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ.....	11
3.2 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ.....	12
3.3 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ ตัดขวางตามแนวแกน Z.....	13
3.4 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ ตัดขวางตามแนวแกน Z โดยใช้กระจกโค้ง 2 ตัว.....	15
3.5 ภาพด้านข้างของกระจกโค้ง A.....	16
3.6 ภาพด้านล่างของกระจกโค้ง A.....	17
3.7 เป้าหมายของระบบที่ได้จากการวัด (ก) กระจกโค้ง A (ข) กระจกโค้ง B.....	18
3.8 ผลจากการฝึกสอนด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (ก) กระจกโค้ง A (ข) กระจกโค้ง B.....	21
3.9 ภาพถ่ายตารางเปรียบเทียบ.....	22
3.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดจริง (*) กับจุดที่คำนวณได้ (o).....	23
4.1 โครงสร้างการคำนวณการไหลเชิงแสงแบบสามมิติ.....	25
4.2 แบบจำลองการทดสอบระบบ.....	26
4.3 ภาพวัตถุทดสอบ.....	27
4.4 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน X.....	27
4.5 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา $t$ (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ของวัตถุโดย $o$ เป็นจุดที่เวลา $t$ และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$ .....	28
4.6 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา $t$ (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุโดย $o$ เป็นจุดที่เวลา $t$ และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$ .....	30
4.7 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา $t$ (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุโดย $o$ เป็นจุดที่เวลา $t$ และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$ .....	32
4.8 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “ $o$ ” เป็นจุดเริ่มต้น “ $*$ ” เป็นจุดที่ 2 “ $+$ ” เป็นจุดที่ 3 “ $\times$ ” เป็นจุดที่ 4.....	34
4.9 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4.....	34
4.10 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน Z.....	35
4.11 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา $t$ (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุโดย $o$ เป็นจุดที่เวลา $t$ และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$ .....	36
4.12 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 ก (ก) ภาพที่เวลา $t$ (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุโดย $o$ เป็นจุดที่เวลา $t$ และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$ .....	38
4.13 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา $t$ (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุโดย $o$ เป็นจุดที่เวลา $t$ และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$ .....	40
4.14 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “ $o$ ” เป็นจุดเริ่มต้น “ $*$ ” เป็นจุดที่ 2 “ $+$ ” เป็นจุดที่ 3 “ $\times$ ” เป็นจุดที่ 4.....	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	42
4.16	43
4.17	44
4.18	46
4.19	48
4.20	50
4.21	50
4.22	51
4.23	52
4.24	52
4.25	53
4.26	53
4.27	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 12 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	55
4.29 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 12	55
4.30 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ ) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )	56
4.31 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 13 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5	57
4.32 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	57
4.33 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13	58
4.34 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ ) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )	58
4.35 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 21 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5	59
4.36 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 21 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	60
4.37 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 21	60
4.38 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ ) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )	61
4.39 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 22 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5	62
4.40 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 22 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	62
4.41 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 22	63
4.42 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ ) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )	63
4.43 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 23 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5 .....	64
4.44 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 23 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5 .....	65
4.45 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 23 .....	65
4.46 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→) .....	66
4.47 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 31 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5 .....	67
4.48 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 31 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5 .....	67
4.49 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 31 .....	68
4.50 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→) .....	68
4.51 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5 .....	69
4.52 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5 .....	70
4.53 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32 .....	70
4.54 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→) .....	71
4.55 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5 .....	72
4.56 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5 .....	72
4.57 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33 .....	73
4.58 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→) .....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.59 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5 .....	74
4.60 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5 .....	75
4.61 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41 .....	75
4.62 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→) .....	76
4.63 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5 .....	77
4.64 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5 .....	77
4.65 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42 .....	78
4.66 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→) .....	78
4.67 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5 .....	79
4.68 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5 .....	80
4.69 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43 .....	80
4.70 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→) .....	81
4.71 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบ .....	87
4.72 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบ โดยใช้การไหลเชิงแสง .....	88
4.73 ย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบ .....	91
5.1 ตัวอย่างมุมมองของระบบ (ก) กระจก B มีขนาดใหญ่ (ข) กระจก B มีขนาดเล็ก .....	95
ก.1 กิ่งที่นำมาทดสอบ .....	100
ก.2 รายละเอียดขนาดของตัวกิ่ง (มม.) (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านหน้า (ค) มุมมองด้านล่าง .....	101



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

ระบบการมองเห็นโดยคอมพิวเตอร์ (Computer vision) ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อลดผลของความยุ่งยากในการนำไปใช้งานจริง ยกตัวอย่างเช่น มุมมองในการมองเห็นที่แคบมีผลทำให้การประชุมทางไกล (Teleconference) ไม่สามารถมองเห็นสมาชิกผู้เข้าร่วมประชุมได้อย่างครอบคลุม เป็นผลให้อาจเกิดการสื่อสารที่ไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร หรือความชัดเจนของการมองเห็นอาจมีผลต่อรูปร่างของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีความยุ่งยากของระบบการมองเห็นอีกหลายประการ จึงเป็นผลให้มีการศึกษาและวิจัยงานในด้านนี้อย่างกว้างขวาง โดยข้อมูลในการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ได้จากตัวตรวจรู้ (Sensor) ซึ่งประกอบด้วยกล้อง CCD (Charge-coupled device) และเลนส์ที่มีประสิทธิภาพ

ต่อมาภายหลัง ได้มีการศึกษามุมมองภาพแบบรอบทิศ (Panorama) และวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพคือการใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก (Catadioptric sensor) ซึ่งจะเป็นการรวมกันของกระจกโค้งและเลนส์ ซึ่งต่อมาระบบการมองเห็นรอบทิศด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกนั้นได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่นใช้ในการนำทางของหุ่นยนต์ การนำเสนอรหัสไกล (Southwell, Basu, and Vandergrind, 1996; Boulton, 1998) ซึ่งข้อดีของตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก คือ สามารถมองเห็นภาพได้รอบทิศทาง แทนที่หมุนภาพคือแกนเดียวกับภาพต้นแบบ ดังนั้นทุก ๆ ส่วนของภาพที่เกิดขึ้นจาก ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก สามารถทำให้บิดงอใหม่ง่ายขึ้นเพื่อให้ได้ภาพที่สมมูลของกล้องแบบระนาบในทิศทางที่พอใจ

ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกนั้นสามารถใช้กับกระจกโค้งแบบต่าง ๆ ได้หลายชนิดเช่นกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม (Spherical mirror) กระจกโค้งรูปทรงกรวย (Conic mirror) กระจกโค้งรูปไฮเพอร์โบลา (Hyperbola mirror) เป็นต้น ซึ่งข้อดีและข้อด้อยจะได้กล่าวถึงในบทที่ 2 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัวในการใช้งาน เนื่องจากกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลมนั้นสามารถหาได้ง่ายและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ และการใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัวนั้นเพื่อให้ระบบสามารถระบุพิกัดในสามมิติได้ง่าย

### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบการรับภาพโดยใช้กล้องกับกระจกโค้ง

1.2.2 เพื่อพัฒนาระบบบูรณะสภาวะสามมิติจากระบบการมองเห็นรอบทิศด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์

- กระจกร่วมกับการไหลเชิงแสง



### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นในงานวิจัยหลาย ๆ ด้าน เช่น การพัฒนาหุ่นยนต์ การพัฒนาระบบอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติ การสำรวจระยะไกล ฯลฯ

1.3.2 สามารถสร้างการบูรณะสถานะสามมิติของสถานะแวดล้อมโดยใช้กล้องเพียงตัวเดียว



## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

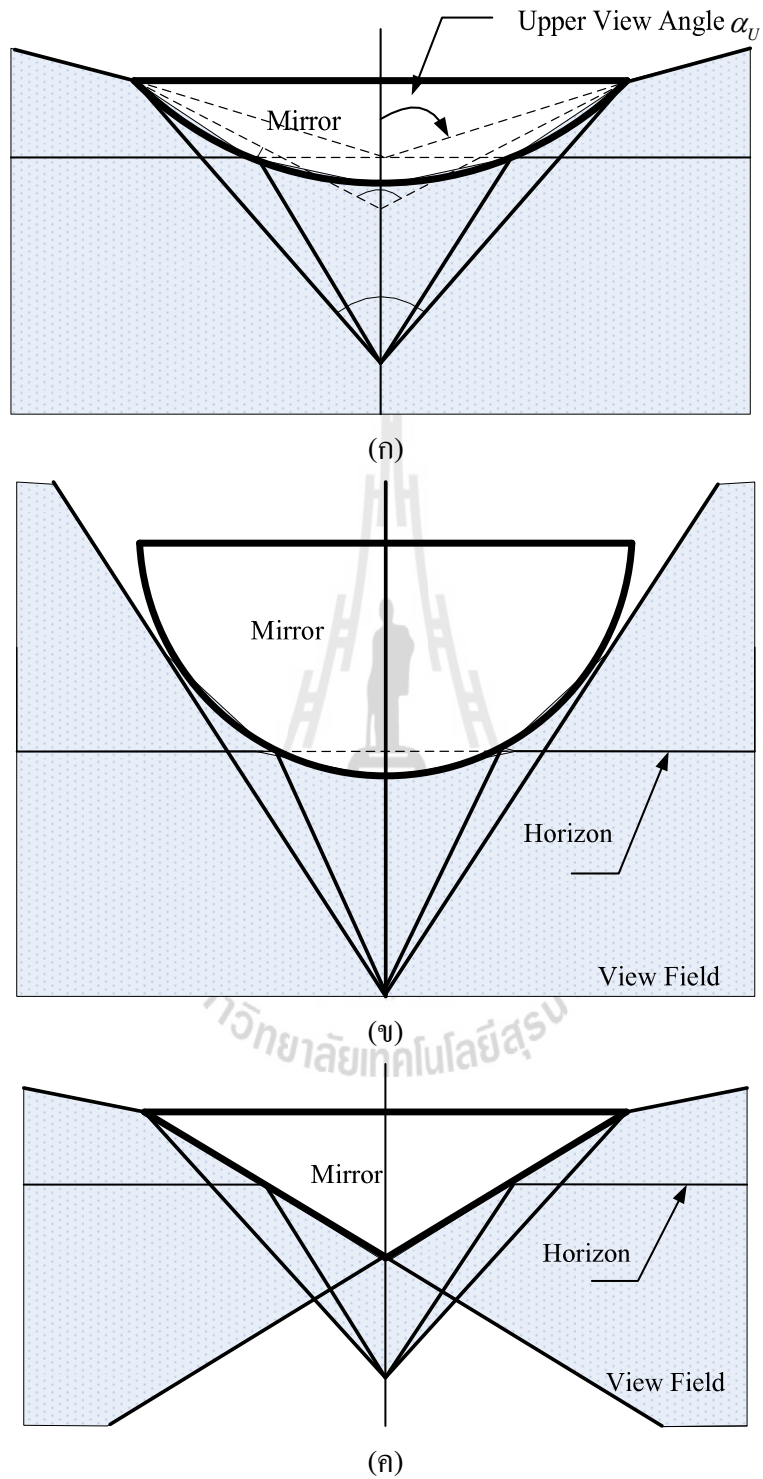
#### 2.1 บทนำ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม และมีการใช้กระบวนการไหลเชิงแสงช่วยในการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ โดยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วยกล้อง 1 ตัวร่วมกับกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพได้รอบทิศและหาตำแหน่งของวัตถุได้ ระบบโครงข่ายประสาทเทียม ใช้ในการหาจุดสามมิติบนผิวกระจกและกระบวนการไหลเชิงแสงทำให้สามารถรู้ทิศทางและการเคลื่อนที่ของวัตถุในระบบสามมิติได้ เนื้อหาในบ้นนี้ นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบการรับภาพแบบรอบทิศ ได้มีการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการแบบใหม่ขึ้นอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ในงานวิจัยระยะเริ่มแรกได้มีการศึกษาการมุมมองภาพแบบรอบทิศ (Panorama) โดย Yagi and Kawato (1990) นำเสนอภาพรอบทิศทางโดยใช้การสะท้อนของกระจกโค้งทรงกรวย (Conic mirror) ร่วมกับกล้อง CCD 1 ตัวและสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็ว ตัวตรวจรู้ชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า COPIS (Conic projection sensor) เพื่อนำมาใช้ในการหาช่องทางเดินของหุ่นยนต์ ซึ่งวิธีการในการหาตำแหน่งของวัตถุทำได้โดยการเคลื่อนที่ของกล้องและกระจกจากตำแหน่งที่เวลา  $t_1$  ไปที่ตำแหน่งที่เวลา  $t_2$  แล้วทำการวัดระยะการเคลื่อนที่และมุมเอซิมัทของจุด 2 จุดทั้งก่อนและหลังการเคลื่อนที่ โดยตำแหน่งของวัตถุจะคำนวณได้จาก triangulation แต่ข้อด้อยของกระจก โค้งทรงกรวยคือมีข้อจำกัดในการมองเห็น และไม่มีจุดโฟกัสของกระจกที่แน่นอน ดังนั้นจึงไม่สามารถแปลงภาพให้อยู่ในสัดส่วนที่สมบูรณ์ได้

ต่อมา Yagi and Kawato (1993) ได้นำเสนอกระจกโค้งรูปไฮเพอร์โบลา (Hyperbola mirror) ซึ่งให้ภาพบริเวณขอบภาพเหมือน COPIS แต่มีความละเอียดภาพบริเวณกลางภาพสูงเหมือนกระจกรูปโค้งรูปทรงกลม โดยเรียกตัวตรวจรู้ชนิดนี้ว่า HyperOmni Vision ซึ่งตัวตรวจรู้ชนิดนี้ได้นำมาใช้กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ในสถานะแวดล้อมที่ถูกสร้างขึ้น เช่น ในห้อง ระเบียบทางเดิน เป็นต้น โดย Yagi and Kawato (1993) ได้ใช้ HyperOmni Vision หาการฉายของเส้น (Projection of line) เพื่อใช้ในการหาเส้นขอบต่าง ๆ ของสิ่งแวดล้อม เช่น ขอบประตู หรือขอบทางเดิน เป็นต้น นอกจากนี้ Yagi and Kawato (1993) ยังได้เสนอมุมมองของ HyperOmni Vision โดยเปรียบเทียบกับกระจกโค้งทรงกรวย และ กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม ซึ่งมุมมองของภาพแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



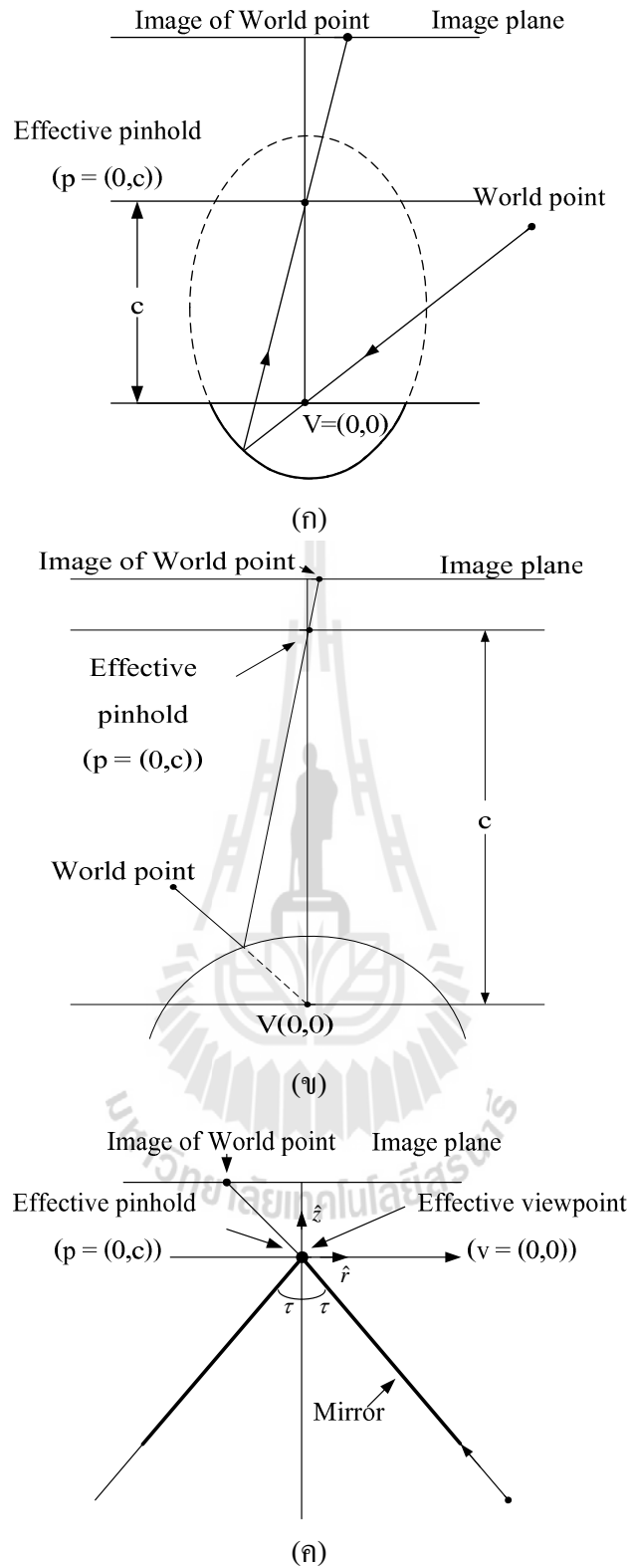
รูปที่ 2.1 มุมมองของกระจกรูปแบบต่าง ๆ (ก) กระจกรูปทรงไฮเพอร์โบล่า (ข) กระจกรูปทรงกลม  
(ค) กระจกรูปทรงกรวย (Yagi and Kawato, 1993)

ต่อมากล้องตรวจจับแบบรอบทิศถูกออกแบบให้สามารถรองรับงานที่มีความหลากหลายมากขึ้น การเจริญเติบโตอันรวดเร็วของมัลติมีเดียทำให้ตัวตรวจรู้แบบรอบทิศได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม เป็นผลให้ระบบการมองเห็นโดยคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนามากขึ้นตามไปด้วย และหลังจากนั้น Baker and Nayar (1999) ได้นำเสนอประเภทของการสะท้อนของผิวกระจกโค้งโดยใช้กล้อง 1 ตัวและกระจก 1 ตัวโดยประเภทของรูปร่างของผิวกระจกจะกำหนดโดยสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2)

$$\left(z - \frac{c}{2}\right)^2 + r^2 \left(1 - \frac{k}{2}\right) = \frac{c^2}{4} \left(\frac{k-2}{k}\right) (k \geq 2) \quad (2.1)$$

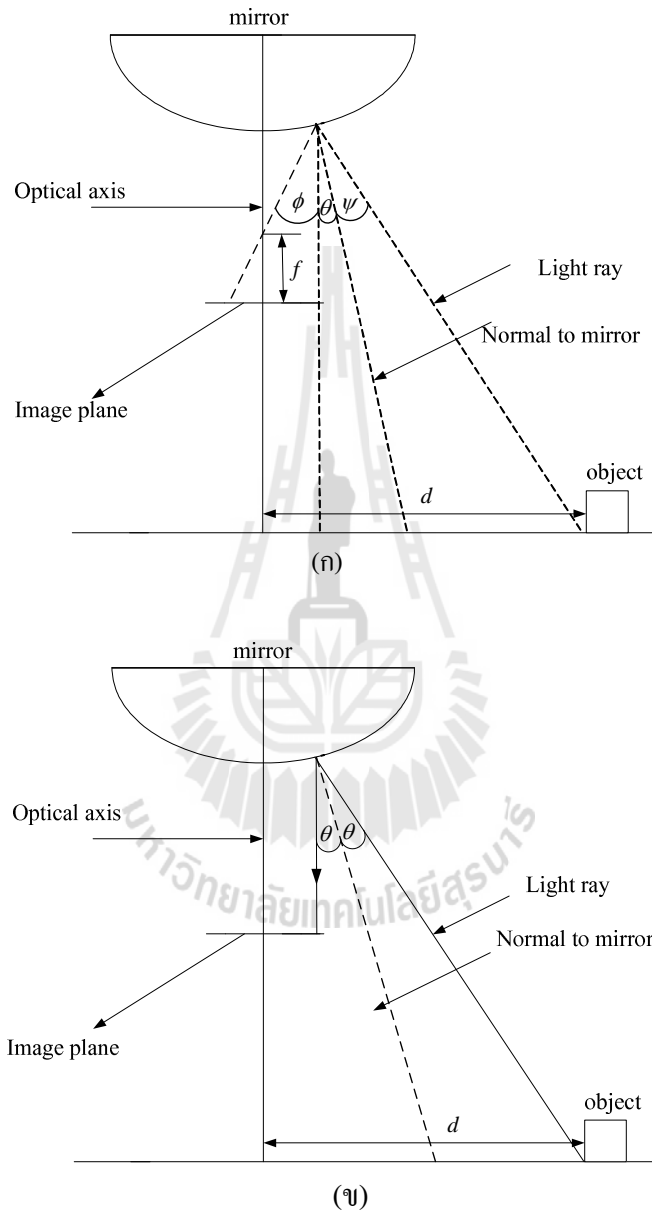
$$\left(z - \frac{c}{2}\right)^2 + r^2 \left(1 + \frac{c^2}{2k}\right) = \left(\frac{2k+c^2}{4}\right) (k > 2) \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) กำหนดให้  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  และ  $c$  เป็นระยะระหว่างรูกล้องถึงจุดโฟกัสของกระจกโค้ง ส่วนค่าของ  $k$  เป็นค่าคงที่ เมื่อค่า  $k \geq 2$  และ  $c = 0$  สมการที่ได้จะเป็นสมการกระจกโค้งทรงกรวย ถ้า  $k > 0$  และ  $c = 0$  สมการที่ได้จะเป็นสมการกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม ถ้า  $k > 0$  และ  $c > 0$  สมการที่ได้จะเป็นสมการกระจกโค้งทรงวงรี และเมื่อ  $k > 2$  และ  $c > 0$  สมการที่ได้จะเป็นสมการกระจกโค้งทรงไฮเพอร์โบล่า โดยแบบจำลองระบบการมองเห็นรอบทิศด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ด้วยกระจกโค้งแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (Baker and Nayar, 1999)



รูปที่ 2.2 กระจกโค้งแบบต่าง ๆ (ก) ทรงวงรี (ข) ทรงไฮเพอร์โบล่า (ค) ทรงกรวย

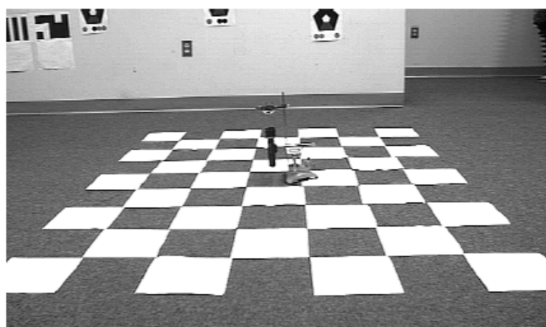
หลังจากนั้น Hicks and Bajcsy (2001) นำเสนอสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้ในการหาพื้นผิวแบบตัดขวางของกระจกโค้งโดยสมการเชิงอนุพันธ์นี้จะแบ่งได้ 2 ลักษณะตามการสะท้อนของผิวกระจกโค้งโดยแบ่งได้ คือการสะท้อนซึ่งตัดกับจุดโฟกัส (Perspective) และการสะท้อนแบบตั้งฉาก (Orthographic) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยสมการเชิงอนุพันธ์จะอยู่ในฟังก์ชันระยะห่างของวัตถุถึงแกนเชิงแสง (Optical axis)



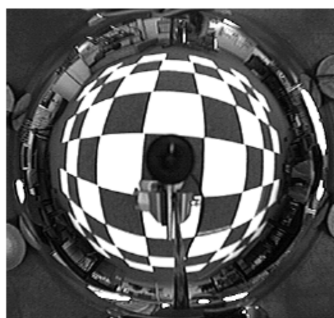
รูปที่ 2.3 การสะท้อนของผิวกระจกโค้ง (ก) การสะท้อนซึ่งตัดกับจุดโฟกัส และ (ข) การสะท้อนแบบตั้งฉาก (Hicks and Bajcsy, 1999)

ภาพที่ได้ในกระจกโค้งจะมีความผิดเพี้ยนไปจากวัตถุจริง และจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแปลงตารางเปรียบเทียบซึ่งอยู่บนพื้นราบ ที่สะท้อนจากผิวของกระจกโค้ง เพื่อให้ได้ภาพที่ใกล้เคียงกับภาพที่ได้จาก

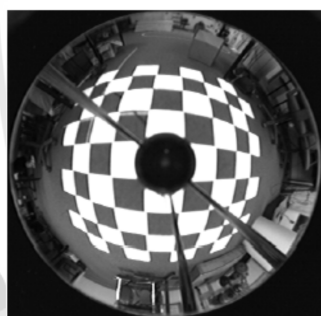
กล้อง ถึงแม้พื้นผิวของกระจกจะแตกต่างกัน ภาพที่ได้ก็จะเหมือนกัน โดยในการทดลองได้ใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลมกับกระจกโค้งทรงพาราโบลา ดังรูปที่ 2.4 โดยผลจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ได้กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ ในแง่ของการควบคุมและประมาณระยะของวัตถุได้



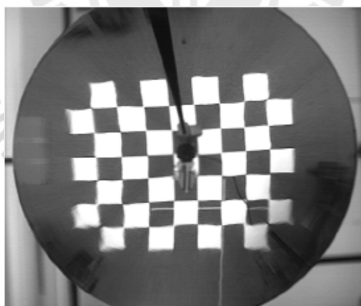
(ก)



(ข)



(ค)

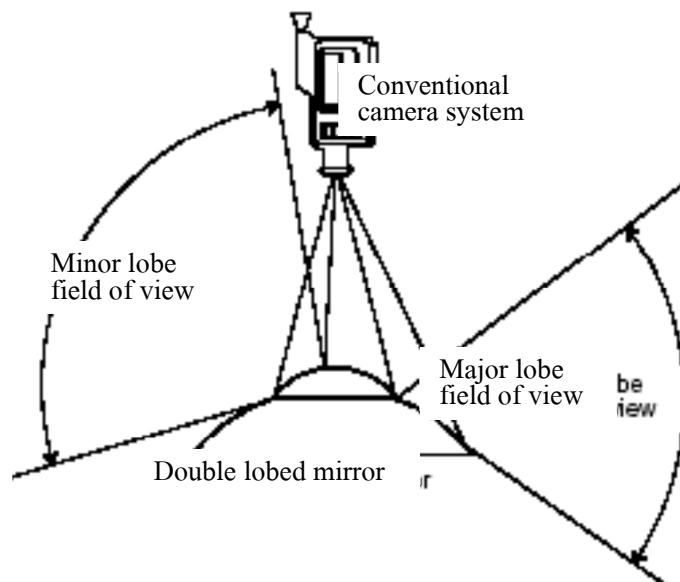


(ง)

รูปที่ 2.4 ผลการใช้สมการเชิงอนุพันธ์กับกระจกโค้ง (ก) ตารางเปรียบเทียบ (ข) ภาพที่ได้จากกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม (ค) ภาพที่ได้จากกระจกโค้งรูปพาราโบลา (ง) ภาพหลังจากใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแปลงตารางเปรียบเทียบ (Hicks and Bajcsy, 1999)

Fiala and Basu (2002) ได้ใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว ซ้อนกัน โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน เพื่อให้สามารถหาค่าแห่งของวัตถุในสามมิติได้โดยใช้การคำนวณเชิงเรขาคณิตในงานวิจัยนี้ได้ทำการแยกจากหลัง (Feature extraction) ของภาพโดยเส้นในแนวนอนสามารถหาได้จาก

การแปลงภาพมุมกว้างแบบเฮาท์ (Panoramic hough transform) และเส้นในแนวตั้งสามารถหาได้จากเส้นรัศมีซึ่งจะใช้วิธีการนี้กับกระจกโค้งทั้ง 2 ตัว เมื่อนำข้อมูลที่ได้มารวมกันจะได้ตำแหน่งของวัตถุในสามมิติ โดยวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงทั้งในสถานะแวดล้อมจริงและสถานะแวดล้อมจำลอง ซึ่งแบบจำลองระบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองระบบกระจกของ Fiala and Basu (2002)

Kim and Suga (2007) นำเสนอการใช้กระจกโค้งรูปไฮเพอร์โบลาร่วมกับการไหลเชิงแสงเพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในงานวิจัยนี้ได้นำค่าของเวกเตอร์ FOE (Focus of expansion) และเวกเตอร์ FOC (Focus of contraction) เพื่อประมาณค่าการไหลเชิงแสงทั้งในภาพจากกระจกโค้งและภาพมุมกว้าง (Panoramic image) โดยเวกเตอร์ FOE และเวกเตอร์ FOC นั้นจะใช้เป็นเวกเตอร์อ้างอิงสำหรับการหาค่าการไหลเชิงแสงที่เกี่ยวข้อง ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการทดสอบนั้นทำได้โดยการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 4 ทิศทาง ได้แก่ เคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา และหมุนรอบ ๆ ซึ่งผลของการทดสอบระบบโดยใช้ภาพจากการเคลื่อนที่จริง พบว่าสามารถตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ได้เป็นอย่างดี แต่ในงานวิจัยนี้มีจุดที่จะต้องปรับปรุงคือ การลดการสั่นสะเทือนเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่



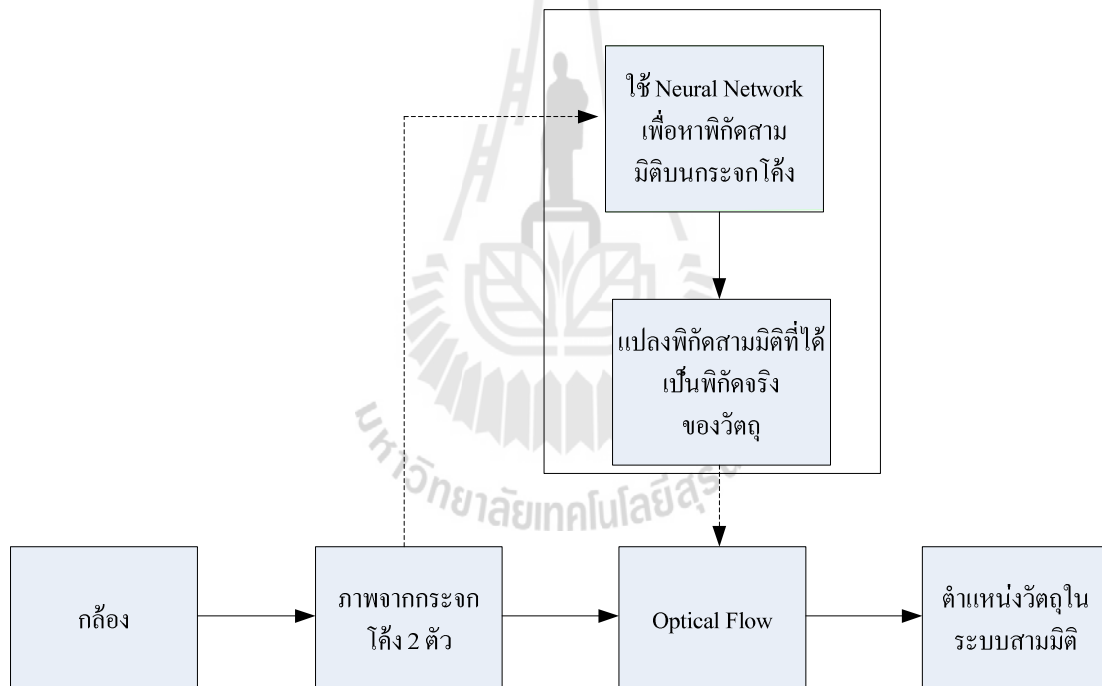


## บทที่ 3

### การหาจุดในพิกัดสามมิติ

#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการหาจุดในพิกัดสามมิติโดยใช้กล้อง 1 ตัวร่วมกับกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ช่วยในการหาจุดสามมิติ บนผิวกระจกเนื่องจากกระจกโค้งที่ใช้ นั้นไม่ได้ผลิตขึ้นเองทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระจกโค้งอาจมีความผิดเพี้ยนไปจึงมีผลให้เมื่อนำมาใช้ งานจริงจะมีค่าความผิดพลาดมาก และนอกจากการนี้การใช้โครงข่ายประสาทเทียมยังช่วยลดความยุ่งยาก และซับซ้อนของสมการอีกทั้งยังลดความผิดพลาดที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ในการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งมีผังการทำงานดังรูปที่ 3.1 โดยการไหลเชิงแสงจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

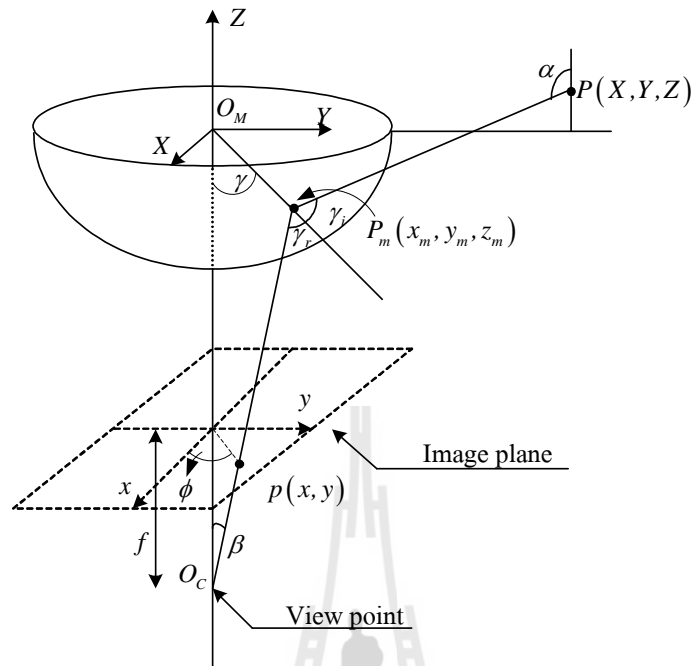


รูปที่ 3.1 แผนผังการบูรณะสภาวะแวดล้อมสามมิติ

#### 3.2 สมการการคำนวณหาจุดในพิกัดสามมิติ

แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีสมการทรงกลมเป็น

$$x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 = R^2 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ

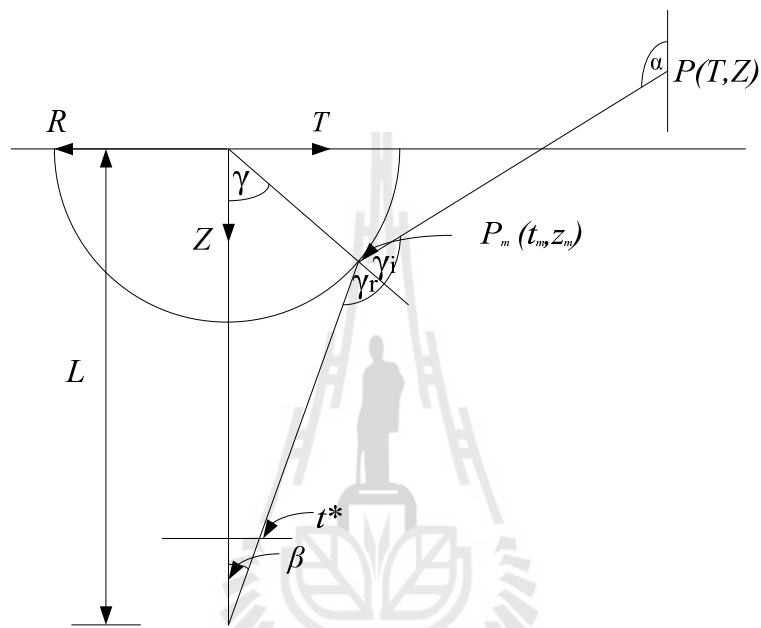
เมื่อ	$\alpha$	คือ มุมระหว่างแกนตั้งฉากกับจุดในสามมิติถึงจุดบนผิวของกระจก
	$\beta$	คือ มุมระหว่างแกนตั้งฉากกับจุดในระนาบของภาพ (Image plane) ถึงจุดศูนย์กลางการฉาย (Projection center)
	$P$	คือ จุดในสามมิติ
	$P_m$	คือ จุดที่ผิวกระจก
	$p$	คือ จุดในระนาบของภาพ
	$\gamma_i$	คือ มุมตกกระทบที่ผิวกระจกโค้ง
	$\gamma_r$	คือ มุมสะท้อนที่ผิวกระจกโค้ง
	$\phi$	คือ มุมระหว่างจุด $p$ กับแกน $x$
	$f$	คือ ความยาวโฟกัส

จากรูปที่ 3.2 จุดในพิกัดสามมิติ ( $P$ ) จะถูกฉายไปที่จุดที่ผิวของกระจกโค้ง ( $P_m$ ) และจะถูกฉายไปที่ระนาบของภาพ ( $p$ ) และสามารถเขียนรูปตามขวางตามแนวแกน  $Z$  ได้ดังรูปที่ 3.3 โดยกำหนดให้

$$t = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.2)$$

$$t_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \quad (3.3)$$

$$T = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติตัดขวางตามแนวแกน Z

จากรูปที่ 3.3 และสมการของ Gaspar and Victor (1999) ซึ่งได้กล่าวในบทที่ 2 จะได้สมการ

$$t_m^2 + z_m^2 = R^2 \quad (3.5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{t^*}{f} \right) \quad (3.6)$$

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{R^2 - z_m^2}}{L + z_m} \quad (3.7)$$

$$\gamma_r = \gamma i \Leftrightarrow 2 \tan^{-1} \left( \frac{r_m}{-z_m} \right) = \alpha - \beta \quad (3.8)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{Z - z_m}{T - t_m} \right) + \frac{\pi}{2} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ (3.7) ทำการแก้สมการหาค่า  $z_m$  จะได้

$$z_m = \frac{-[2L \tan^2 \beta] \pm \sqrt{[2L \tan^2 \beta]^2 - 4[(\tan^2 \beta) + 1][(L^2 \tan^2 \beta) - R^2]}}{2[(\tan^2 \beta) + 1]}$$

แทน  $z_m$  ลงในสมการที่ (3.5) เพื่อหาค่า  $t_m$

$$t_m = \sqrt{R^2 - z_m}$$

แทน  $z_m$  และ  $t_m$  ลงในสมการที่ (3.8) เพื่อหาค่า  $\alpha$

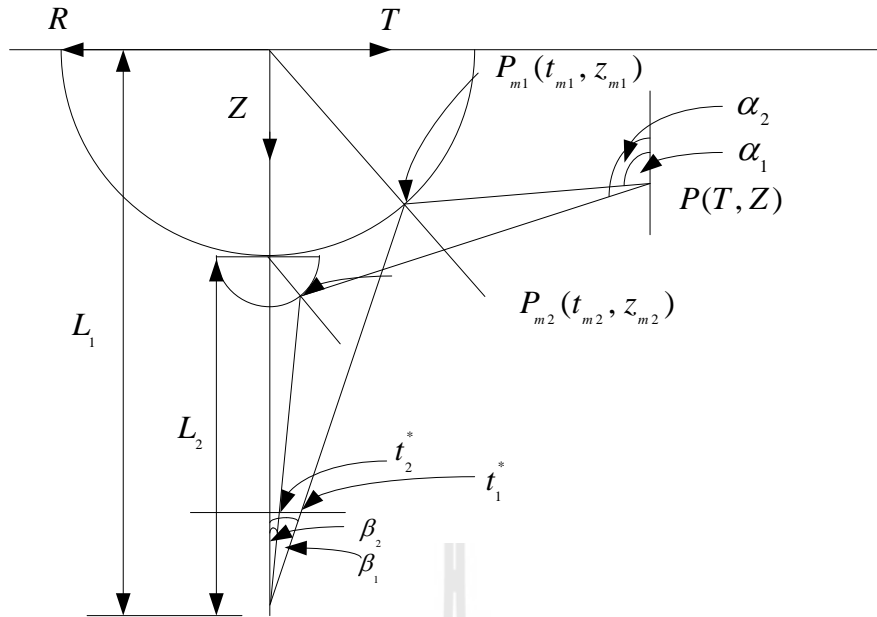
$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left( \frac{t_m}{-z_m} \right) + \beta$$

แทน  $z_m, t_m$  และ  $\alpha$  ลงในสมการที่ (3.9) จะได้

$$T = \frac{Z - z_m}{\tan \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right)} + t_m \quad (3.10)$$

### 3.3 สมการการสะท้อนของจุดสามมิติโดยใช้กระจกโค้ง 2 ตัว

จากสมการที่ (3.10) จะเห็นได้ว่ายังไม่สามารถหาพิกัดของจุดสามมิติได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้กระจกโค้ง 2 ตัว ตัวแรก (A) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.9 เซนติเมตร อีกตัวหนึ่ง (B) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.8 เซนติเมตร เพื่อเพิ่มสมการในการคำนวณหาค่า  $T$  และ  $Z$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ ตัดขวางตามแนวแกน Z โดยใช้กระจกโค้ง 2 ตัว

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าจากจุดสามมิติจะมีจุดสะท้อนที่ผิวของกระจกโค้ง 2 จุด คือจุดที่ผิวกระจก A กับที่ผิวกระจก B และมีภาพปรากฏบนระนาบของภาพ (Image plane) 2 จุด จึงสามารถเขียนสมการที่ (3.10) ได้ 2 สมการดังแสดงได้ในสมการที่

$$T = \frac{Z - z_{m1}}{\tan\left(\alpha_1 - \frac{\pi}{2}\right)} + t_{m1} \quad (3.11)$$

$$T = \frac{Z - (z_{m2} + 8.9)}{\tan\left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2}\right)} + t_{m2} \quad (3.12)$$

จากสมการที่ (3.11) และ (3.12) สามารถแก้สมการเพื่อคำนวณค่า  $T$  และ  $Z$  ได้

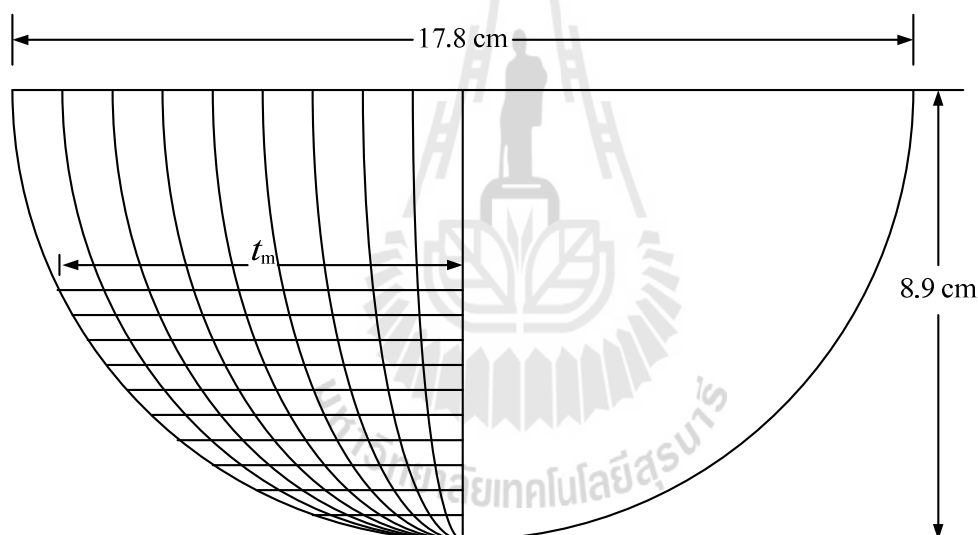
### 3.4 การหาจุดสามมิติ บนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากหัวข้อ 3.2 จะเห็นได้ว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณมีความยุ่งยากและซับซ้อน ทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความผิดพลาดมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีในการหาจุดพิกัดสามมิติ บนผิว

กระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับในการระบุจุดบนผิวกระจกโค้ง ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนและมีหลักการทำงานคือ มีการนำเสนอกลุ่มตัวอย่างให้กับโครงข่ายในรูปของคู่อินพุตและเป้าหมาย (Target) ที่ต้องการให้โครงข่ายตอบสนอง เมื่ออินพุตถูกป้อนให้กับระบบ เอาต์พุตของโครงข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายของอินพุต แล้วโครงข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักประสาทและไบอัสตามกฎการเรียนรู้ เพื่อให้เอาต์พุตของโครงข่ายลู่เข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนดังนี้

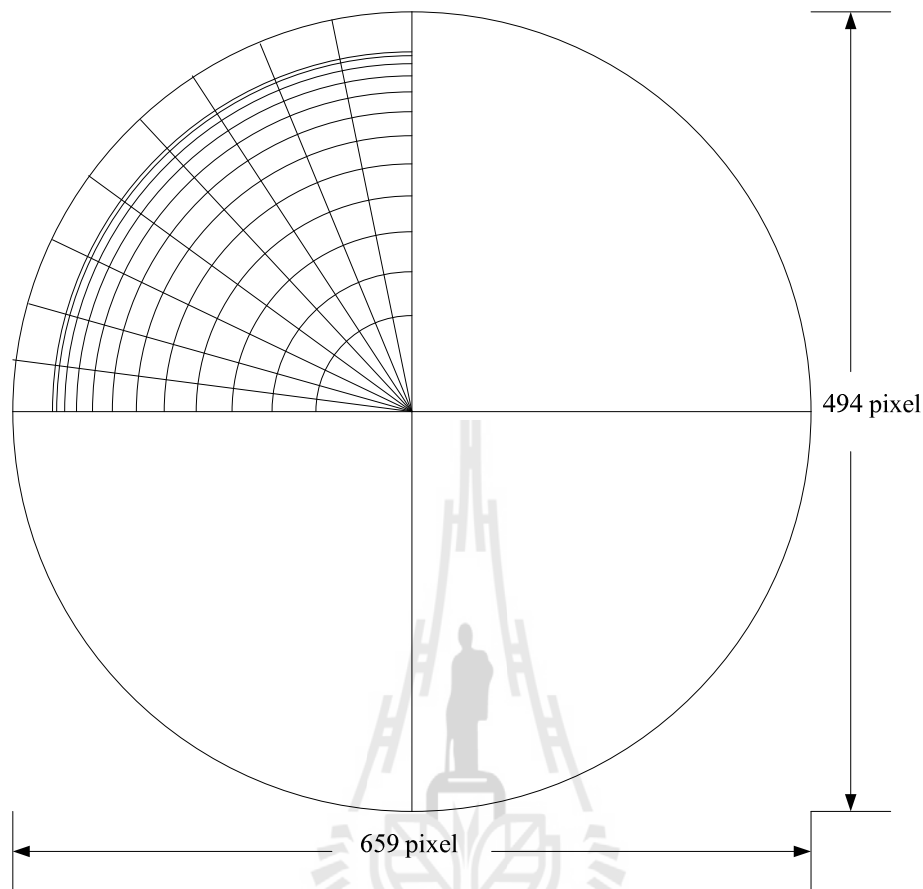
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดอินพุตและเป้าหมายของระบบ ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้จุดภาพเป็นอินพุต และใช้จุดบนผิวกระจกโค้งเป็นเป้าหมายของระบบ โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้

- วาดตารางลงบนผิวกระจกโค้งดังแสดงในรูปที่ 3.9 ถ่ายภาพด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 3.5 และวัดระยะ  $t_m$  ทุกจุดบนผิวกระจกโค้ง โดยระยะ  $t_m$  ที่ได้จะเป็นเป้าหมายของระบบ



รูปที่ 3.5 ภาพด้านข้างของกระจกโค้ง A

- ถ่ายภาพด้านล่างของกระจกโค้งดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยจะกำหนดให้จุดภาพที่ตำแหน่งจุดตัดกันของเส้นตรงเป็นอินพุต

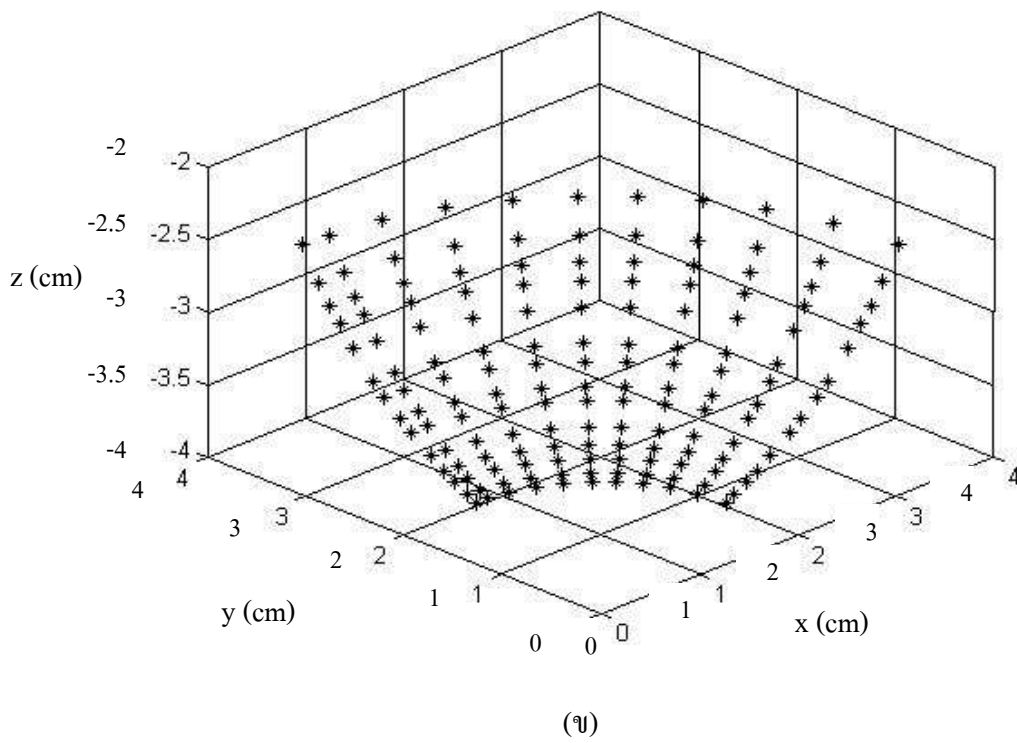
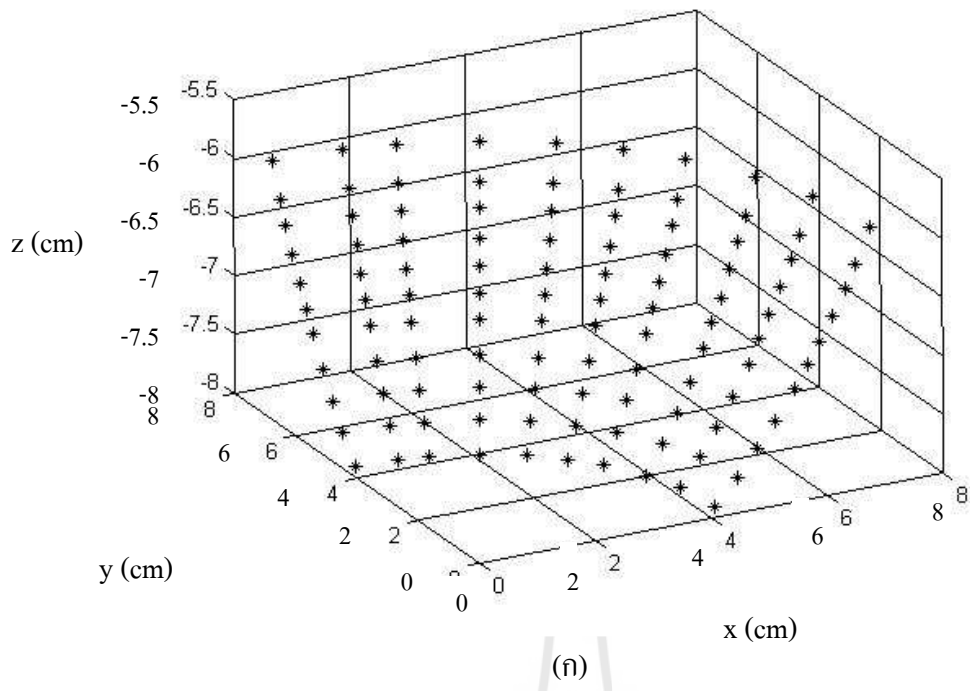


รูปที่ 3.6 ภาพด้านล่างของกระจกโค้ง A

โดยจุดที่วัดได้เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 3.7

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (Performance index) เมื่อระบบมีการนำเสนอคู่อินพุต และเป้าหมายให้โครงข่ายเรียนรู้ ทำการป้อนแต่ละอินพุตให้กับโครงข่าย เอาต์พุตที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมาย เพื่อให้ค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตและเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตและเป้าหมายนี้เองเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย (Mean-square error) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ





รูปที่ 3.7 เป้าหมายของระบบที่ได้จากการวัด (ก) กระจกโค้ง A (ข) กระจกโค้ง B

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ พารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ จำนวนชั้น จำนวนเซลล์ประสาทเทียม และฟังก์ชันถ่ายโอนเพื่อให้ระบบที่ได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบเลือกจำนวนชั้น จำนวนเซลล์ประสาทเทียม และฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสม ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับโดยให้มี 2 อินพุต 2 เอาต์พุต และมีชั้นซ่อนเร้น และฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 และใช้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบโดยใช้กระจกโค้ง A โครงข่ายที่ให้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดคือโครงข่าย 2-50-1 (ชั้นอินพุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์ มีชั้นซ่อนเร้น 1 ชั้นมีเซลล์ประสาทเทียม 50 เซลล์ และชั้นเอาต์พุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์) และใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอการิทึม ซิกมอยด์ (Log - Sigmoid) ได้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $1.22509 \times 10^{-9}$  และจากผลการทดสอบโดยใช้กระจกโค้ง B โครงข่ายที่ให้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดคือโครงข่าย 2-60-1 (ชั้นอินพุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์ มีชั้นซ่อนเร้น 1 ชั้นมีเซลล์ประสาทเทียม 60 เซลล์ และชั้นเอาต์พุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์) และใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอการิทึม ซิกมอยด์ (Log - Sigmoid) ได้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ  $4.25391 \times 10^{-8}$

ตารางที่ 3.1 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กระจกโค้ง A)

โครงข่าย	จำนวนรอบ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย
2-5-2	1,000	logsig - logsig	$2.52168 \times 10^{-4}$
2-10-2	1,000	logsig - logsig	$6.26449 \times 10^{-6}$
2-20-2	1,000	logsig - logsig	$2.60302 \times 10^{-6}$
2-40-2	1,000	logsig - logsig	$5.64627 \times 10^{-7}$
2-50-2	1,000	logsig - logsig	$1.22509 \times 10^{-9}$
2-60-2	1,000	logsig - logsig	$2.35471 \times 10^{-9}$
2-10-5-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$2.35679 \times 10^{-7}$
2-5-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$1.23141 \times 10^{-7}$
2-10-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$8.42854 \times 10^{-8}$
2-20-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$3.74963 \times 10^{-8}$
2-10-20-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$2.34257 \times 10^{-8}$

ตารางที่ 3.2 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กระจกโค้ง B)

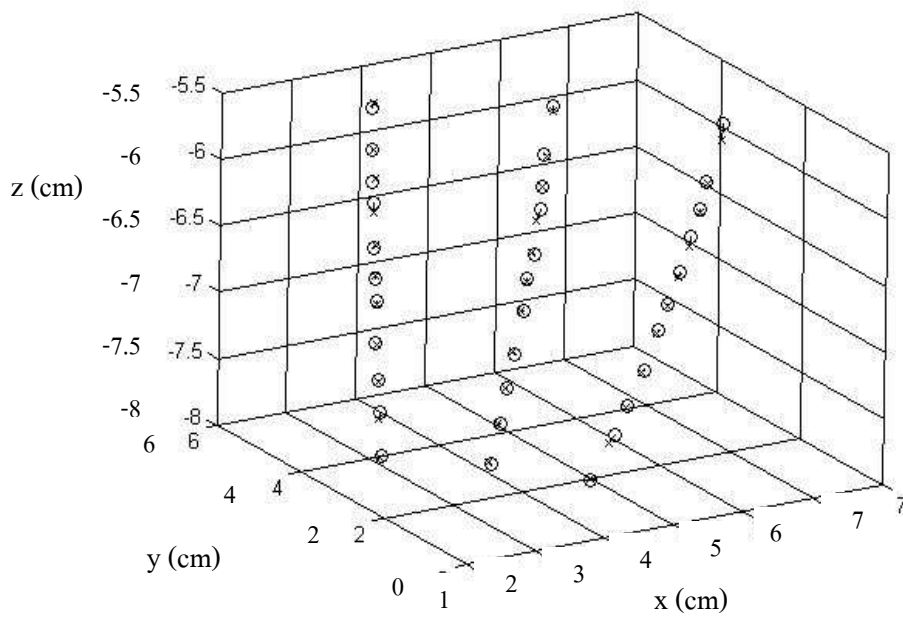
โครงข่าย	จำนวนรอบ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย
2-5-2	1,000	logsig - logsig	$5.24398 \times 10^{-3}$
2-10-2	1,000	logsig - logsig	$1.25419 \times 10^{-5}$
2-20-2	1,000	logsig - logsig	$9.14576 \times 10^{-5}$
2-40-2	1,000	logsig - logsig	$2.31294 \times 10^{-6}$
2-50-2	1,000	logsig - logsig	$5.67219 \times 10^{-7}$
2-60-2	1,000	logsig - logsig	$4.25391 \times 10^{-8}$
2-70-2	1,000	logsig - logsig	$7.89152 \times 10^{-8}$
2-5-5-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$5.16276 \times 10^{-5}$
2-10-5-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$4.84929 \times 10^{-6}$
2-5-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$6.42657 \times 10^{-6}$
2-10-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$8.59684 \times 10^{-7}$
2-20-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$2.26419 \times 10^{-7}$
2-10-20-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$8.75874 \times 10^{-8}$

ขั้นตอนที่ 4 ทำการฝึกสอนโครงข่ายที่ออกแบบไว้

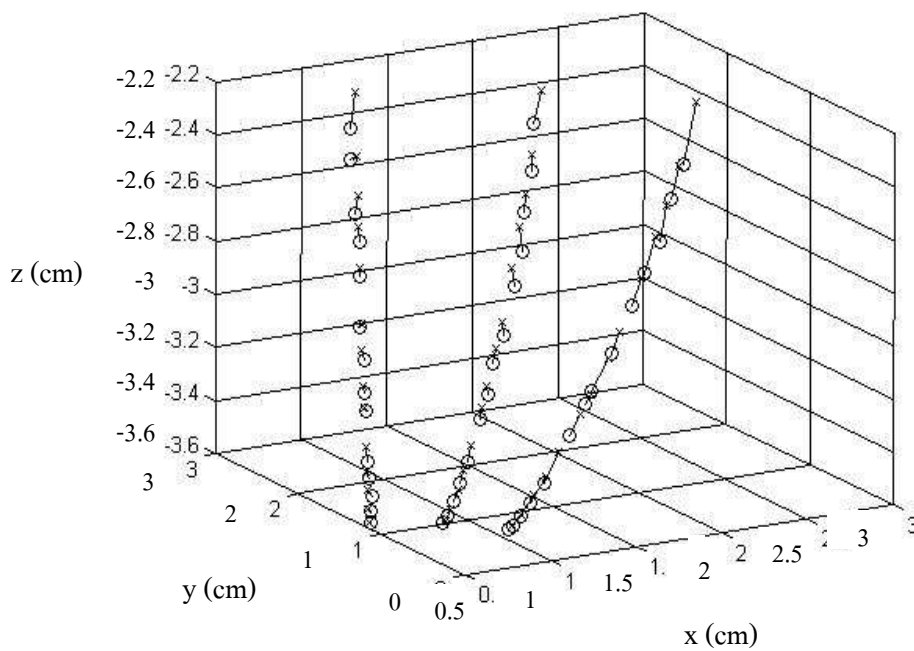
ขั้นตอนที่ 5 นำจุดทดสอบที่ได้มาทำการจำลอง (Simulation) กับโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับที่ได้ทำการฝึกสอนไว้แล้ว

#### 3.4.1 ผลการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบระบบ โดยใช้จุดทดสอบกระจกโค้ง A จำนวน 33 จุด และกระจกโค้ง B จำนวน 42 จุด และเมื่อนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 3.8



(ก)

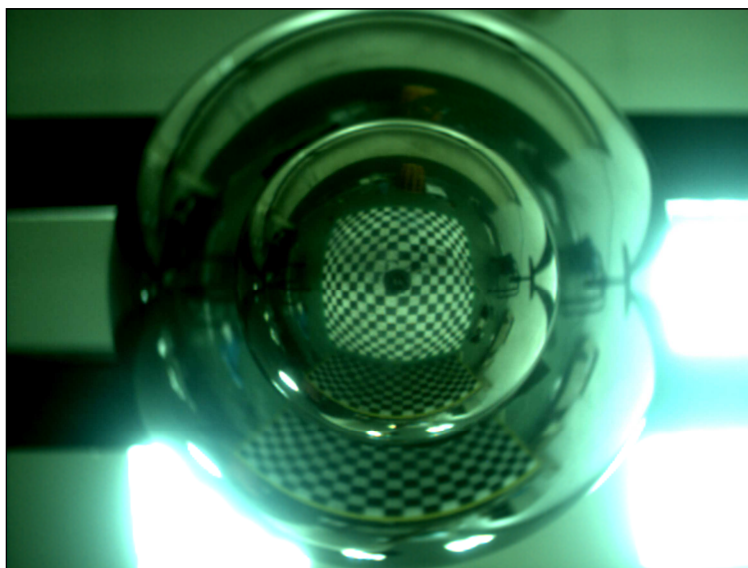


(ข)

รูปที่ 3.8 ผลจากการฝึกสอนด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (ก) กระจกโค้ง A (ข) กระจกโค้ง B

### 3.5 การคำนวณหาจุดในพิกัดสามมิติจากจุดบนผิวกระจกโค้ง

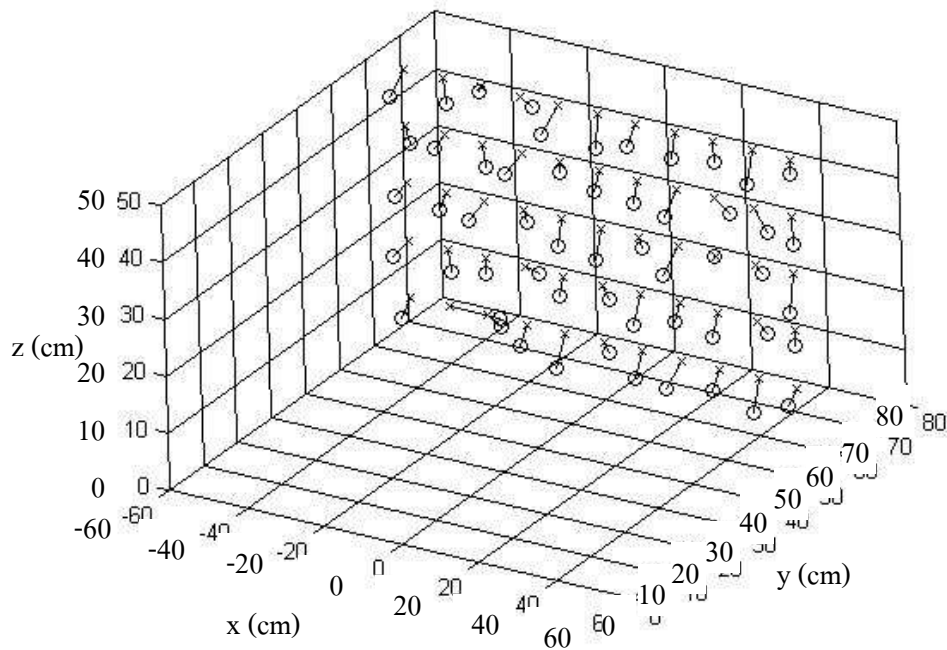
ทำการทดสอบระบบโดยใช้ตารางเปรียบเทียบโดยวางตั้งฉากกับพื้นดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยใช้จุดบนตารางจำนวน 55 จุดซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.3 และในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายตารางปรับเทียบ

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองการคำนวณจุดในพิกัดสามมิติ

จุดที่ใช้ทดสอบ (ซ.ม.)			จุดที่คำนวณได้ (ซ.ม.)			ค่าความคลาดเคลื่อน (ซ.ม.)		
x	y	z	x	y	z	x	y	z
50	60	10	49.04	58.55	7.25	0.96	1.45	2.75
0	60	10	1.11	60.47	8.2	1.11	0.47	1.8
50	60	20	51.24	58.32	18.24	1.24	1.68	1.76
20	60	30	19.32	57.37	27.34	0.68	2.63	2.66
40	60	40	43.21	63.55	35.96	3.21	3.55	4.04
-10	60	50	-11.46	56.22	46.21	1.46	3.78	3.79
40	60	50	42.12	55.91	46.26	2.12	4.09	3.74



รูปที่ 3.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดจริง (\*) กับจุดที่คำนวณได้ (o)

### 3.6 สรุป

ในบทนี้ช่วงแรกได้แสดงสมการเพื่อใช้ในการหาจุดในพิกัดสามมิติ โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อน ทั้งยังอาจมีความผิดพลาดจากการวัดระยะต่าง ๆ ของอุปกรณ์ นอกจากนั้นกระบอกโค้งที่ใช้ไม่ได้ผลดีขึ้นเอง ทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบอกโค้งอาจมีความผิดพลาดไปจึงมีผลให้เมื่อนำมาใช้งานจริงจะมีค่าความผิดพลาดมากดังนั้นจึงได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับในการฝึกสอนเพื่อหาพิกัดสามมิติบนผิวกระบอกโค้ง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับที่มีโครงข่าย 2-50-1 สำหรับกระบอกโค้ง A และโครงข่าย 2-60-1 สำหรับกระบอกโค้ง B และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้คือ ลอการิทึม ซิกมอยด์ เพื่อใช้ในการหาค่าจุดพิกัดในสามมิติ เมื่อทำการทดลองโดยการใส่จุดทดสอบจำนวน 55 จุดพบว่ามีความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 1.51 2.98 และ 2.75 เซนติเมตรตามลำดับ โดยค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 0.95 0.47 และ 1.51 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.21 4.60 และ 4.88 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งค่าความผิดพลาดน้อยอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทำให้สรุปได้ว่าการใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยในการคำนวณจุดในพิกัดสามมิติได้



## บทที่ 4

### การบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ

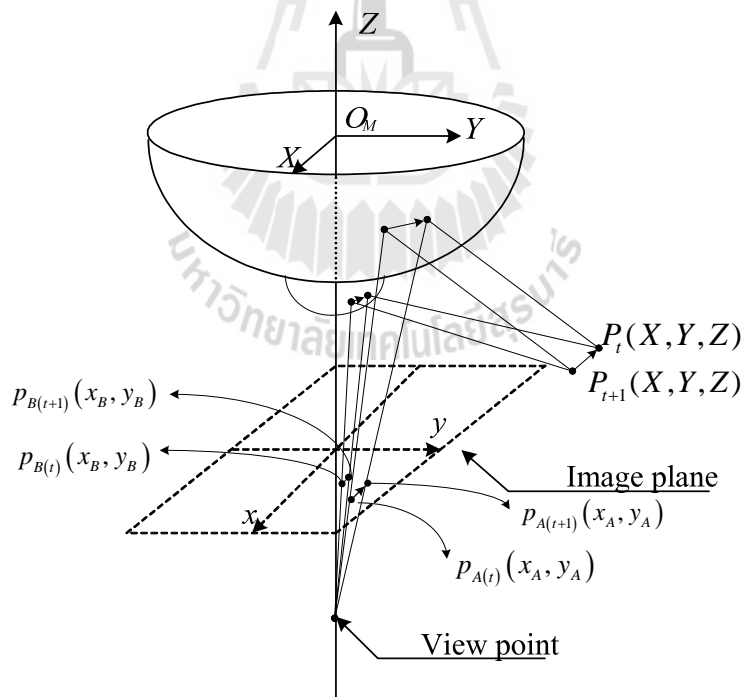
#### ด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกและการไหลเชิงแสง

##### 4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกพร้อมกับกระบวนการไหลเชิงแสงซึ่งจากบทที่ 3 นั้นการใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกจะสามารถคำนวณจุดในพิกัดสามมิติได้แต่ในการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ นั้นจำเป็นจะต้องใช้วิธีการอื่นร่วมด้วยซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการไหลเชิงแสง ซึ่งทำให้สามารถทราบถึงโครงสร้างและทิศทางของวัตถุที่เคลื่อนที่ได้

##### 4.2 การไหลของแสง (Optical flow)

จากทฤษฎีการไหลเชิงแสงเมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการคำนวณการไหลเชิงแสงแบบสามมิติ

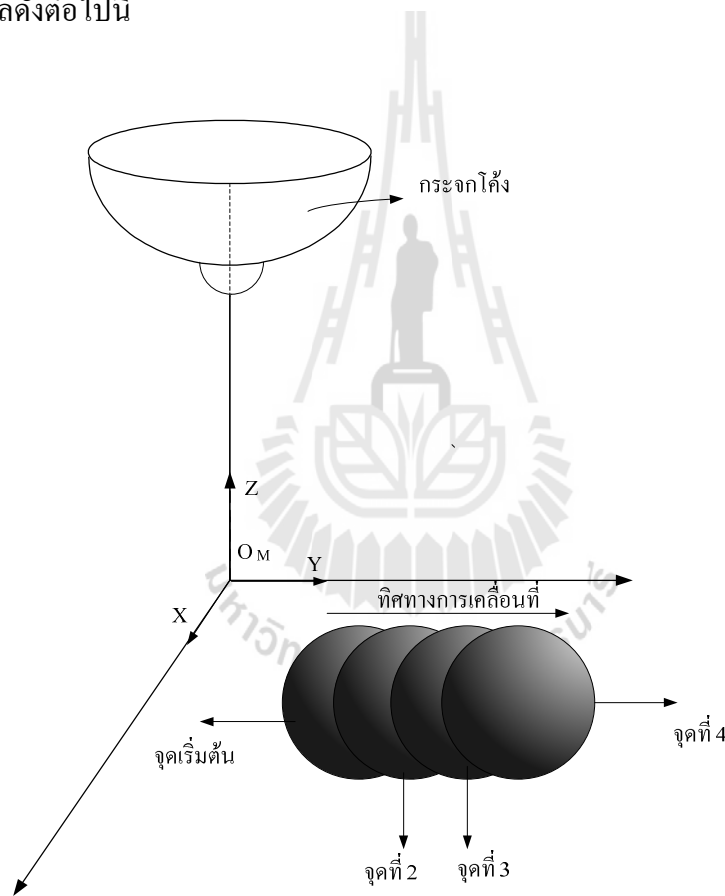
จากรูปที่ 4.1 เมื่อวัตถุอยู่ที่ตำแหน่ง  $P_t(X, Y, Z)$  ภาพที่ได้จะสะท้อนผ่านกระจกโค้ง A และกระจกโค้ง B ไปสู่ระนาบของภาพที่ตำแหน่ง  $P_{A(t)}(x_A, y_A)$  และ  $P_{B(t)}(x_B, y_B)$  ซึ่งเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง  $P_{t+1}(X, Y, Z)$



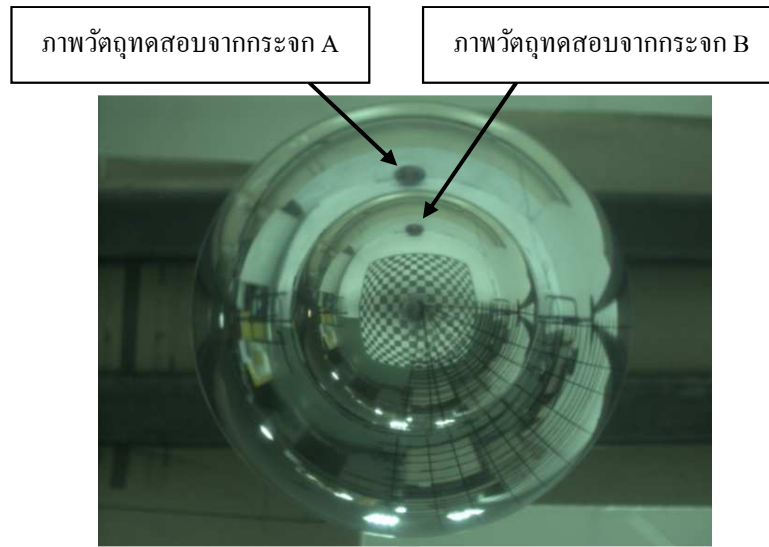
จะทำให้ตำแหน่ง  $p_{A(t)}(x_A, y_A)$  และ  $p_{B(t)}(x_B, y_B)$  บนระนาบของภาพเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง  $p_{A(t+1)}(x_A, y_A)$  และ  $p_{B(t+1)}(x_B, y_B)$  การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุนี้เป็นเวกเตอร์ระยะทางซึ่งจะแสดงได้เป็นรูปลูกศร โดยจะเรียกเวกเตอร์นี้ว่าการไหลเชิงแสง ซึ่งเมื่อนำเวกเตอร์ที่ปรากฏบนระนาบของภาพมาทำตามกระบวนการตามบทที่ 3 จะสามารถทำให้ทราบถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุในสามมิติได้

### 4.3 ผลการทดสอบระบบ

ทำการทดสอบระบบโดยใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก จับภาพวัตถุทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทำการเคลื่อนที่ของลูกบอลเป็น 4 ระยะ ตามแนวแกนต่าง ๆ แสดงตัวอย่างดังรูป 4.1 แล้วคำนวณการไหลของแสงด้วยวิธีของ Lucas & Kanade (1981) พร้อมทั้งพล็อตกราฟโครงสร้าง และทิศทางเคลื่อนที่ของลูกบอล ได้ผลดังต่อไปนี้

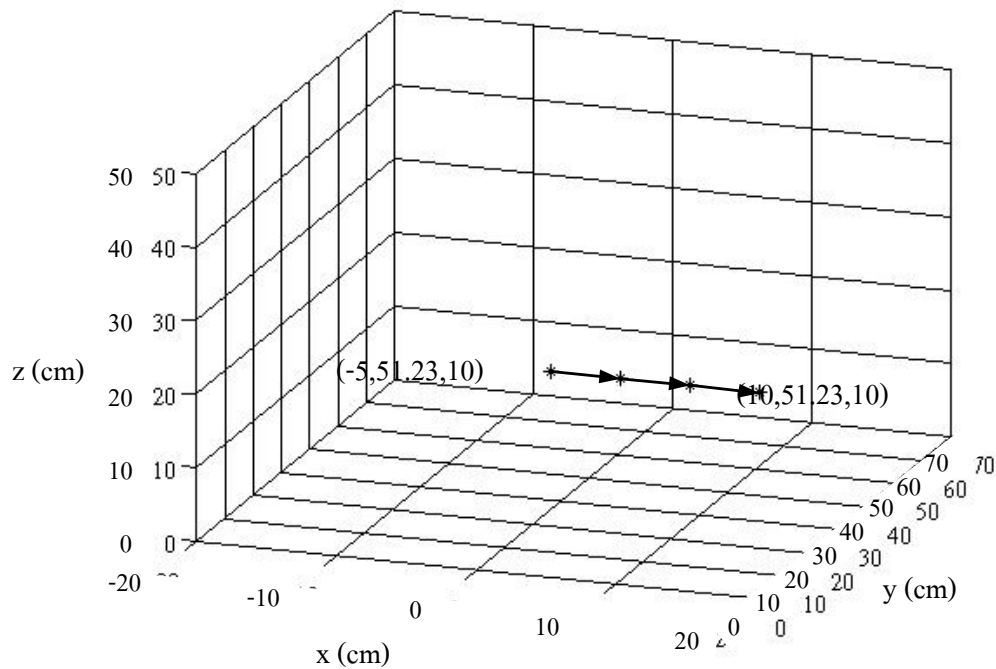


รูปที่ 4.2 แบบจำลองการทดสอบระบบ

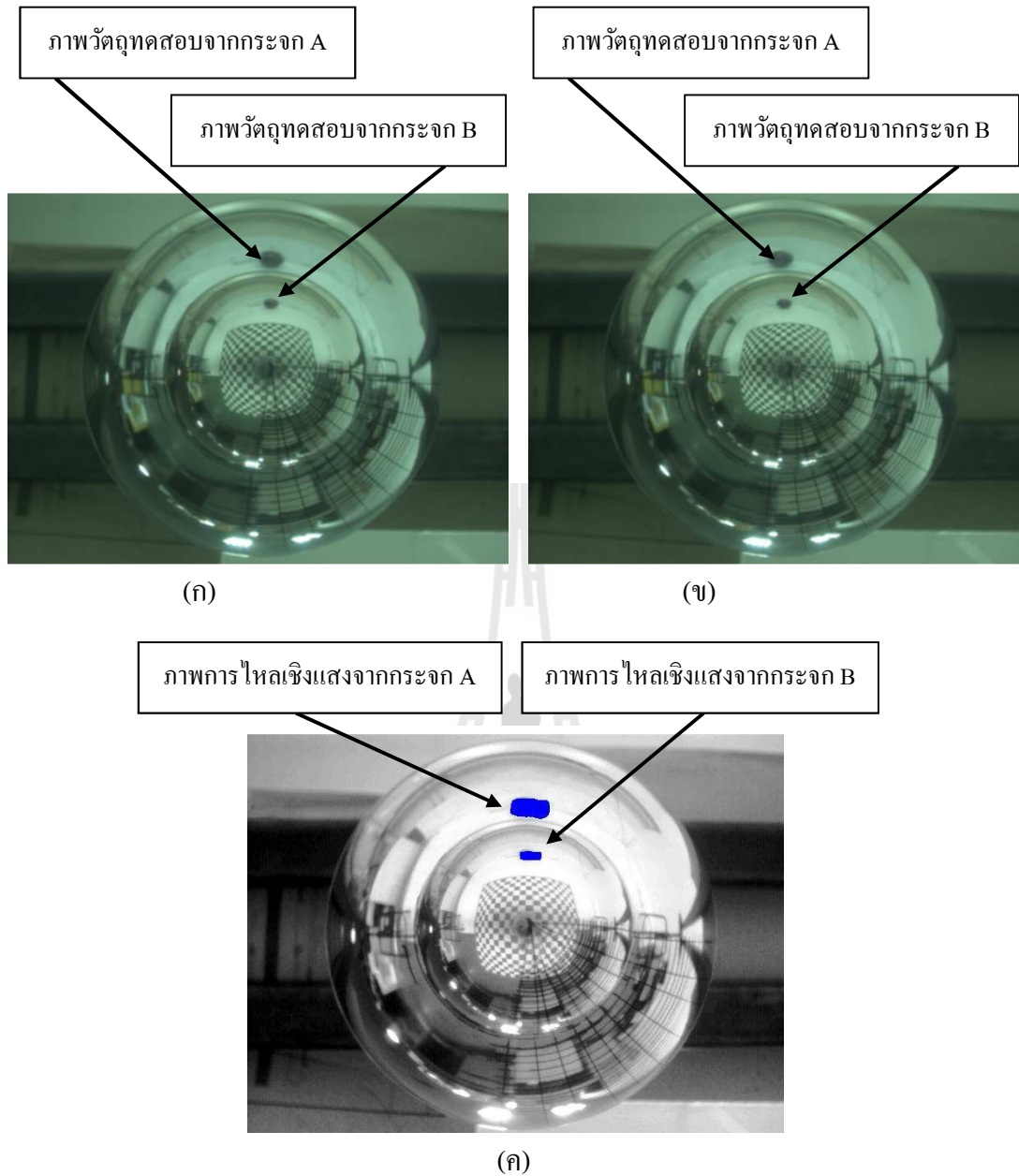


รูปที่ 4.3 ภาพวัตถุทดสอบ

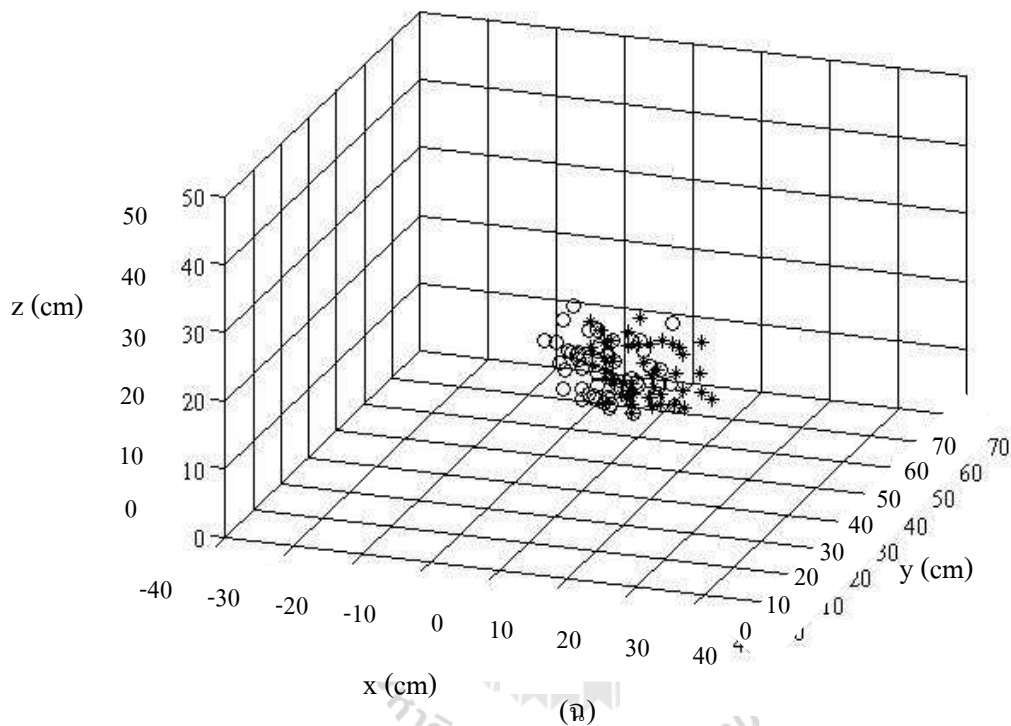
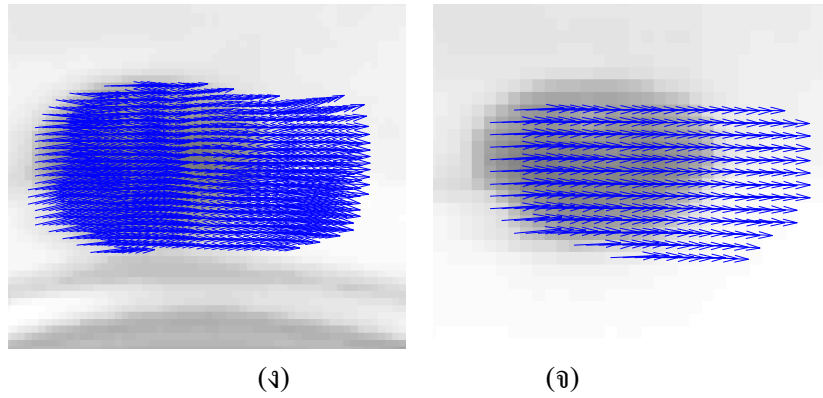
- เคลื่อนที่ตามแนวแกน X ดังแสดงในรูปที่ 4.4



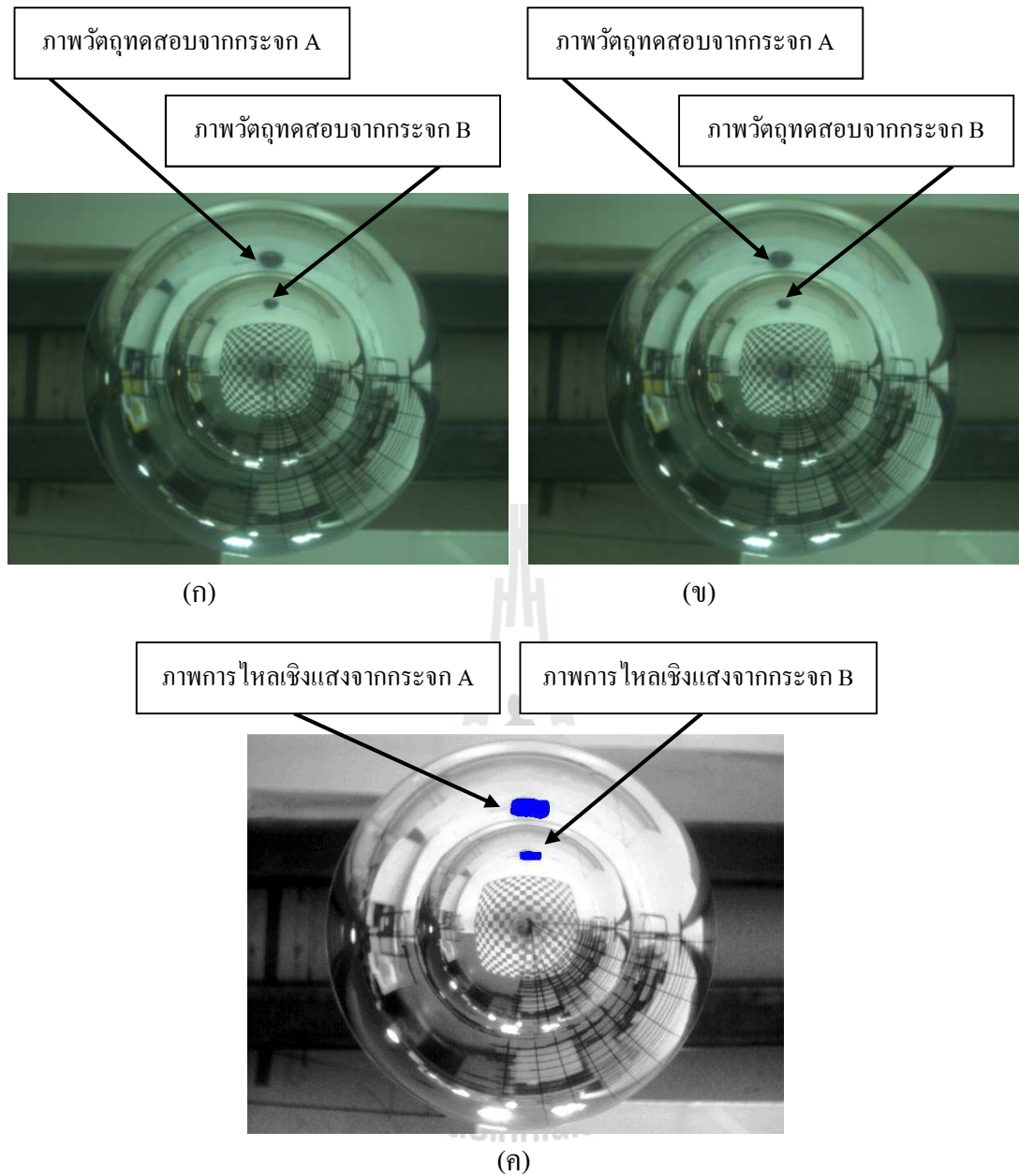
รูปที่ 4.4 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน X



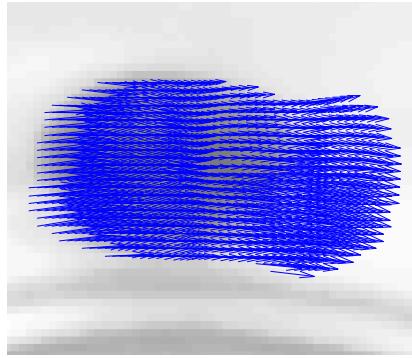
รูปที่ 4.5 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ \* เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



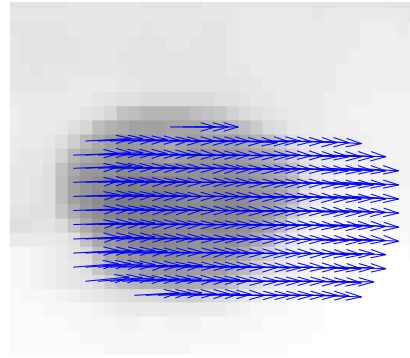
รูปที่ 4.5 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ \* เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)



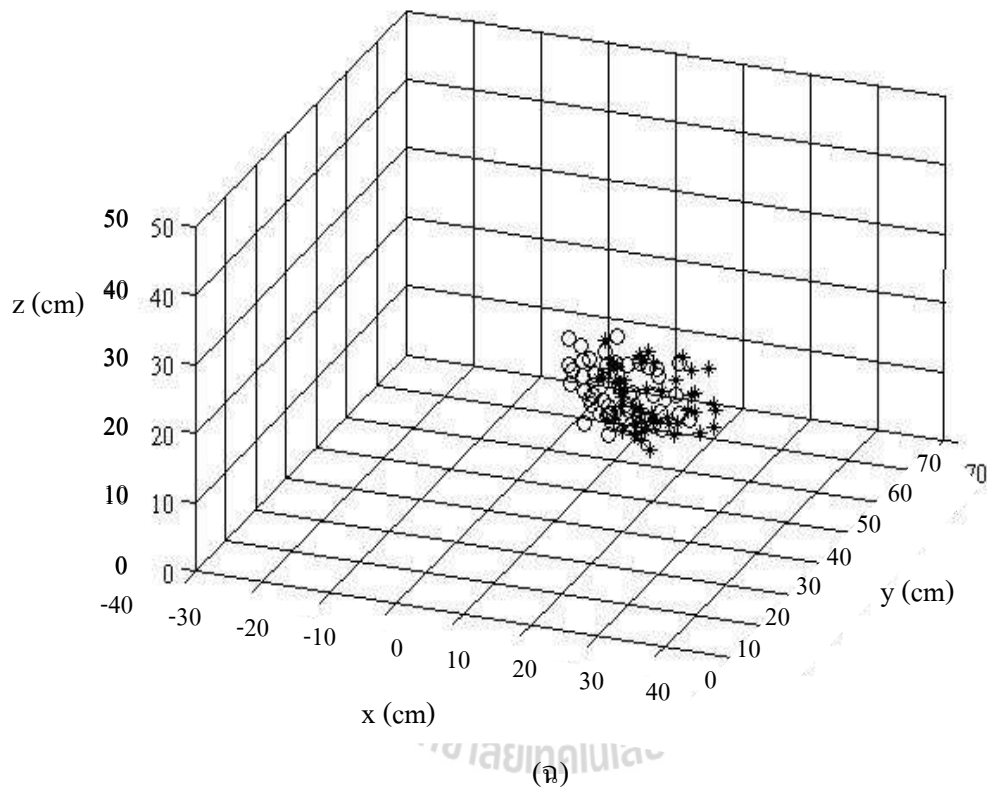
รูปที่ 4.6 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ \* เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



(ง)

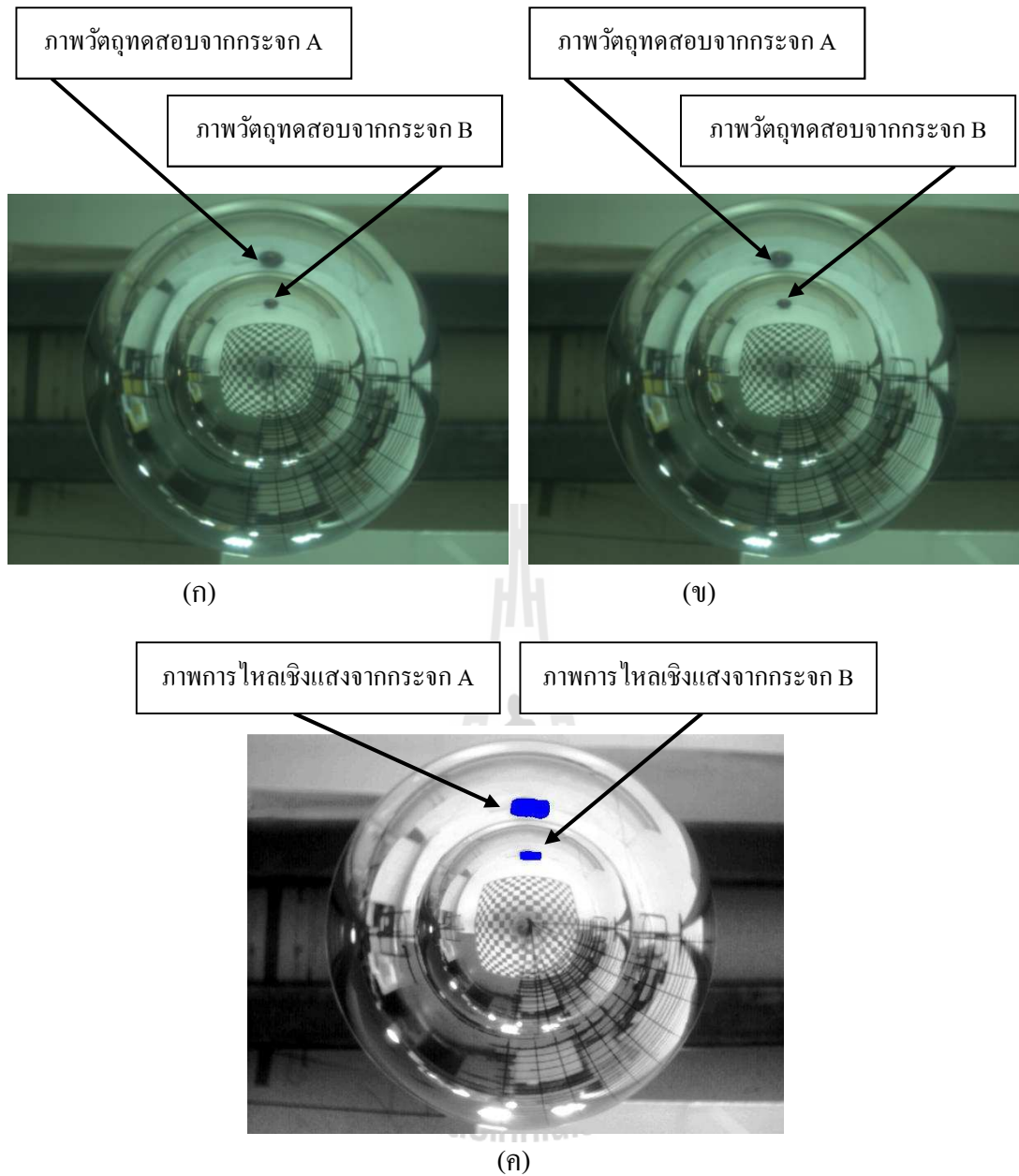


(จ)

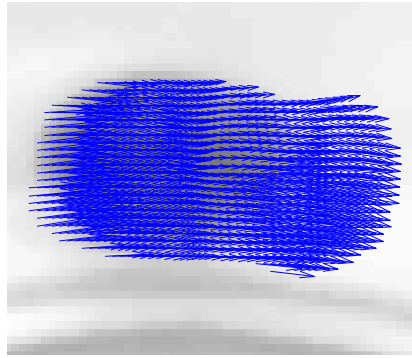


(ฉ)

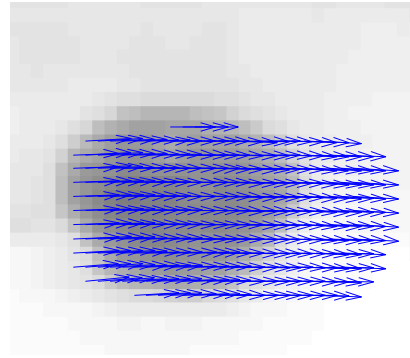
รูปที่ 4.6 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)



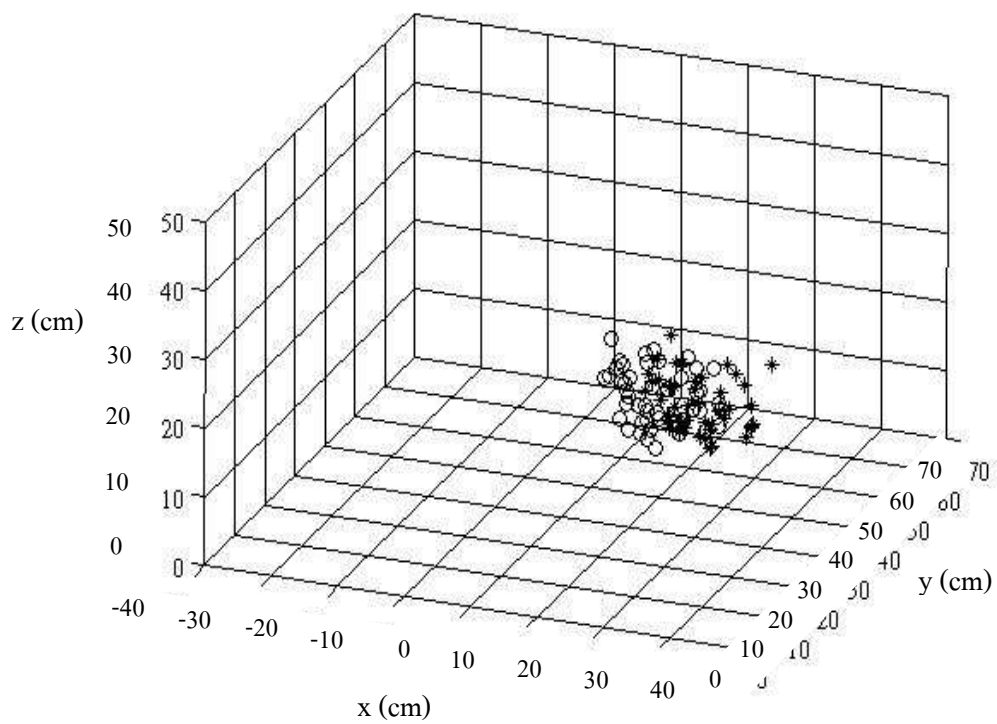
รูปที่ 4.7 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ \* เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



(ง)



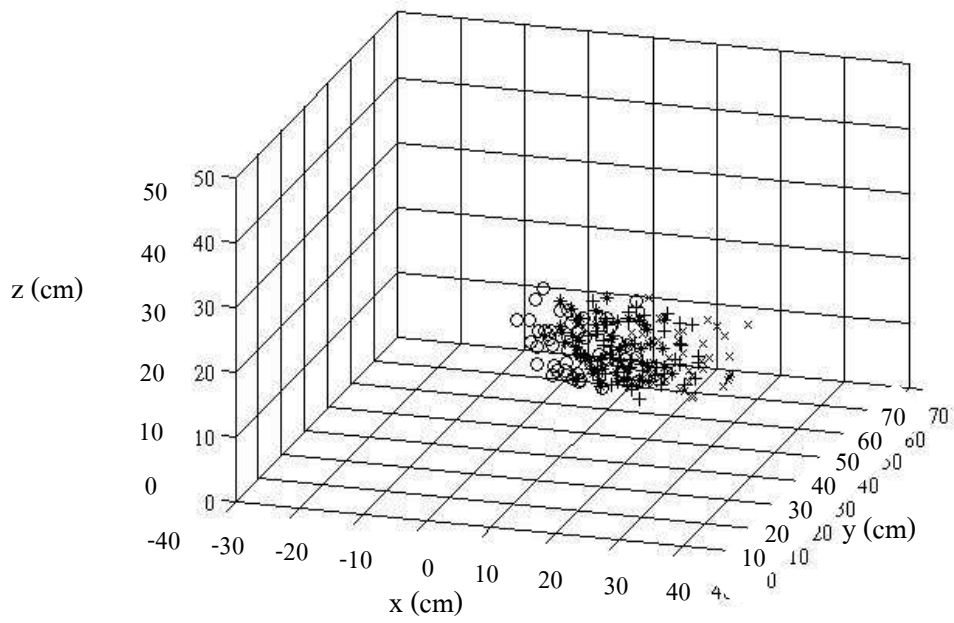
(จ)



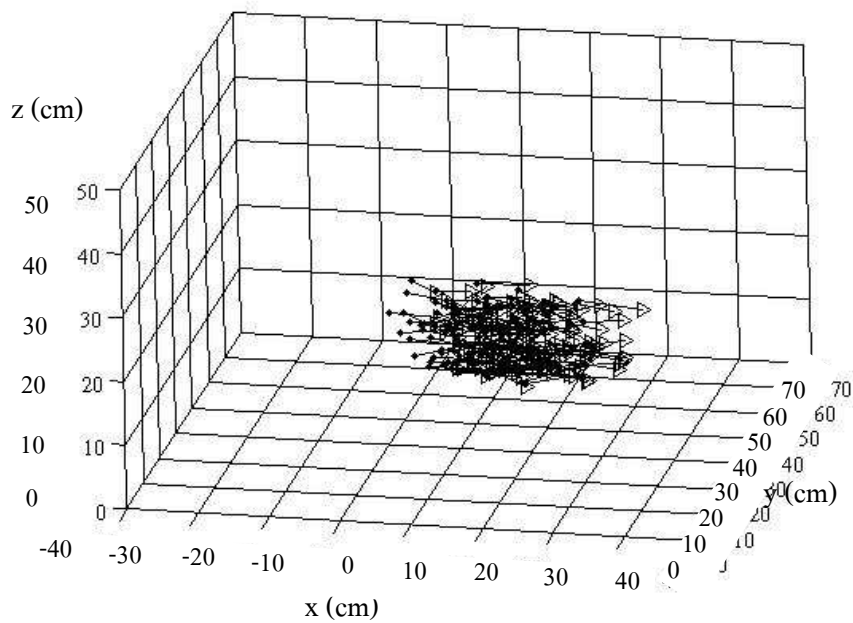
(ฉ)

รูปที่ 4.7 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ \* เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)

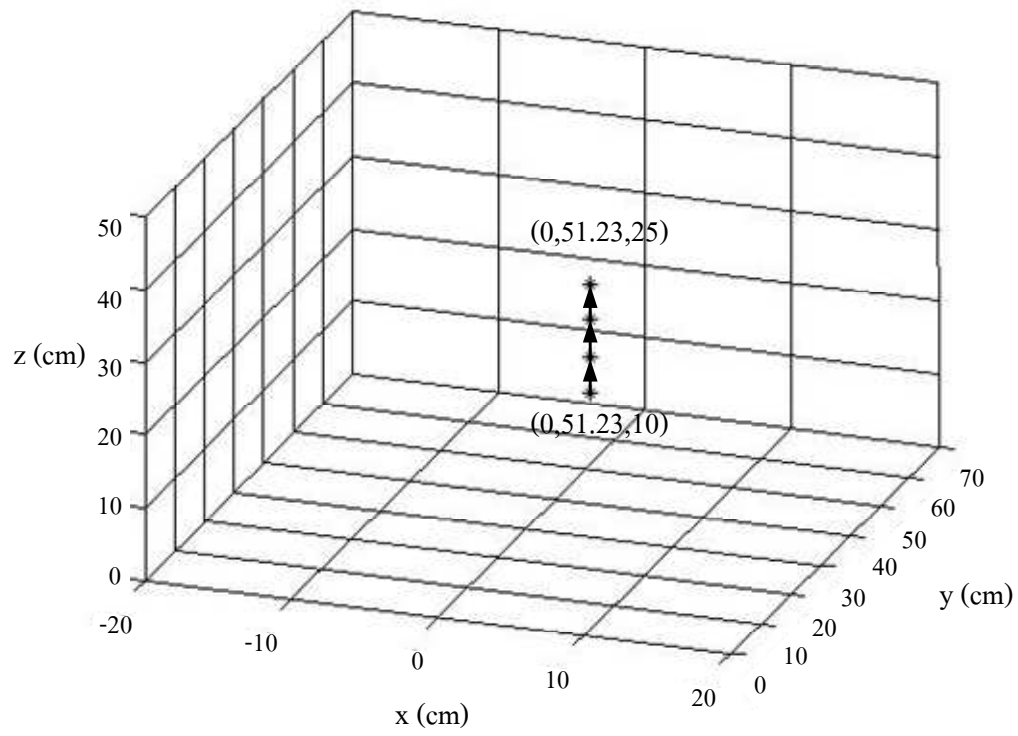




รูปที่ 4.8 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4

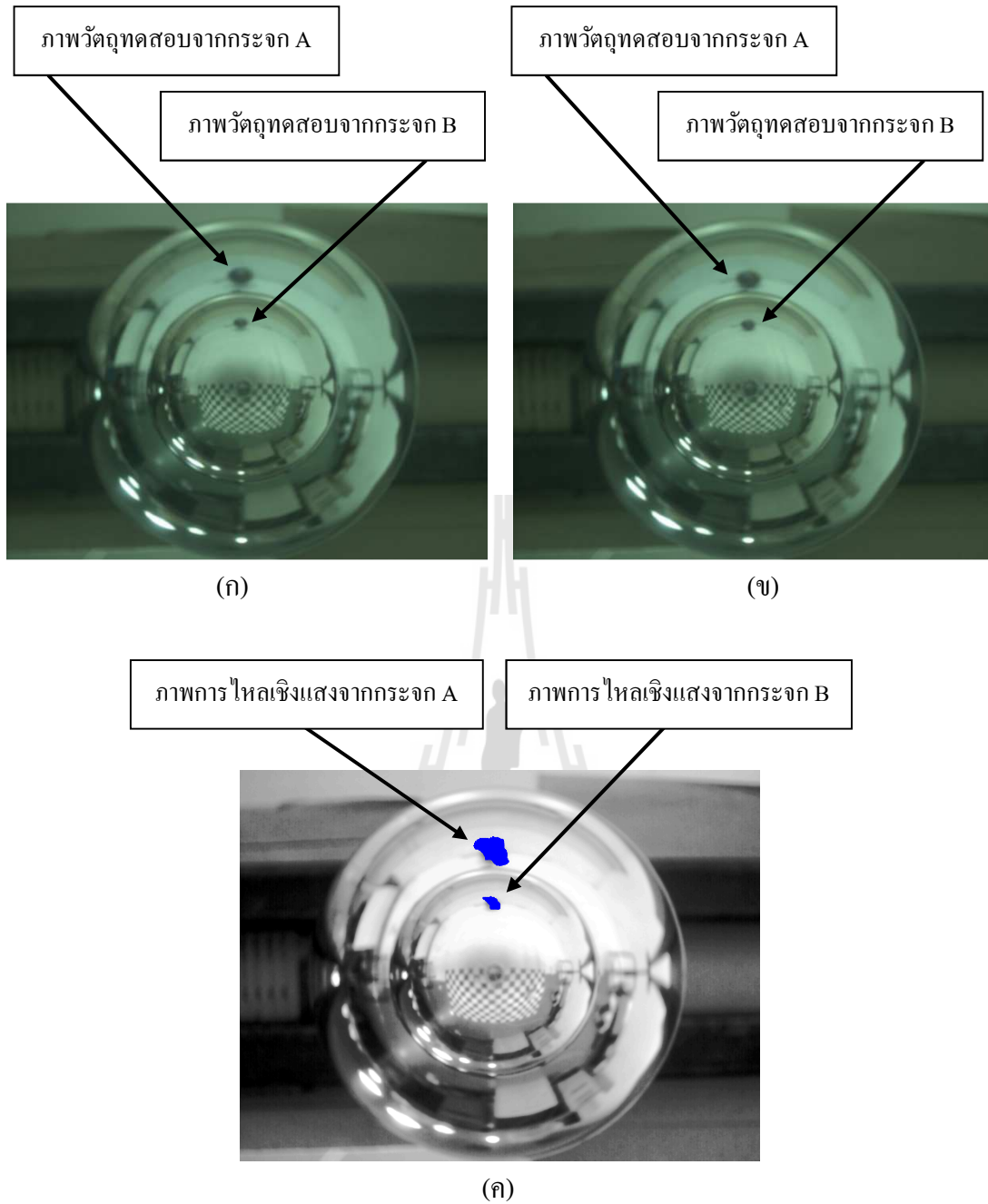


รูปที่ 4.9 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4  
 - เคลื่อนที่ตามแนวแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 4.10

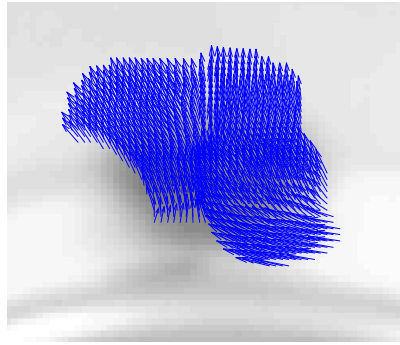


รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน Z

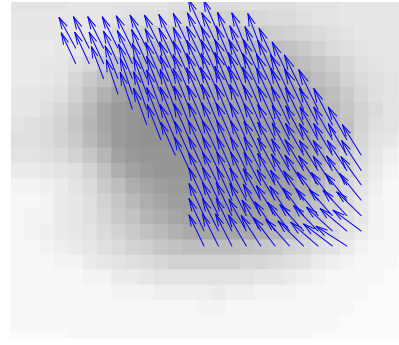




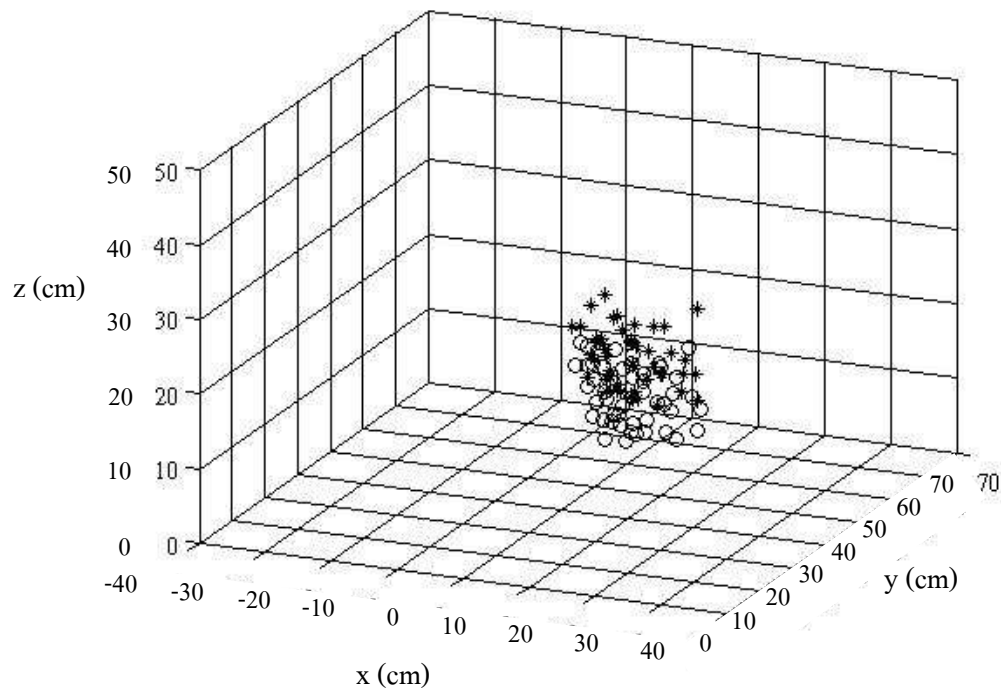
รูปที่ 4.11 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



(ง)

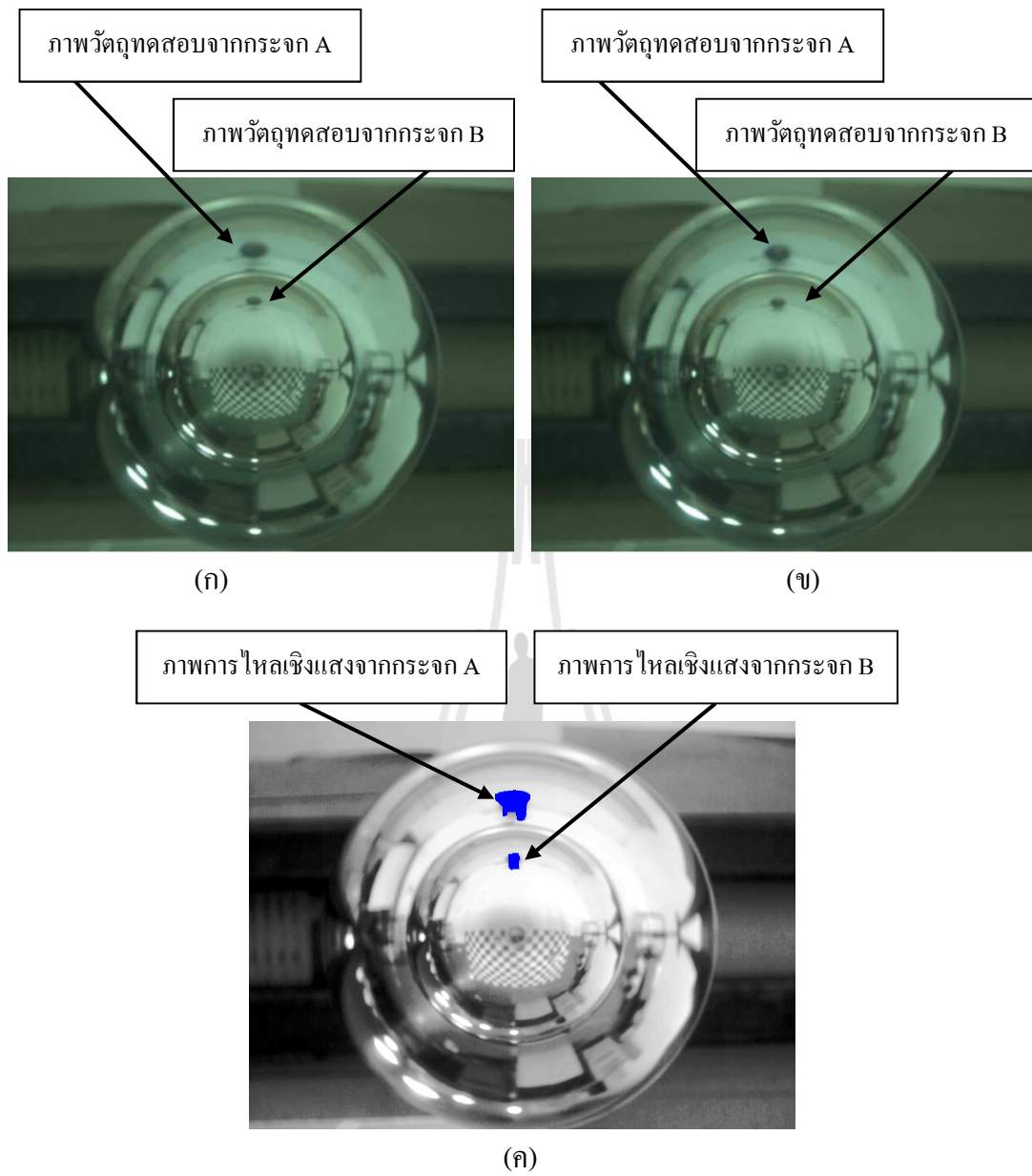


(จ)

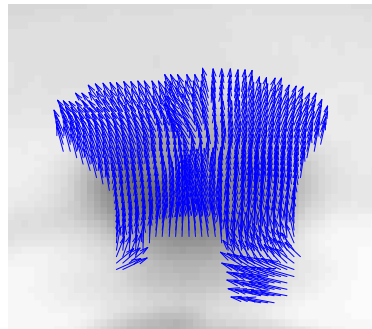


(ฉ)

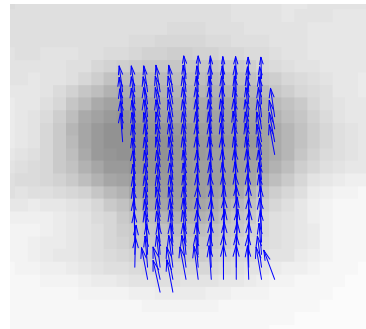
รูปที่ 4.11 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)



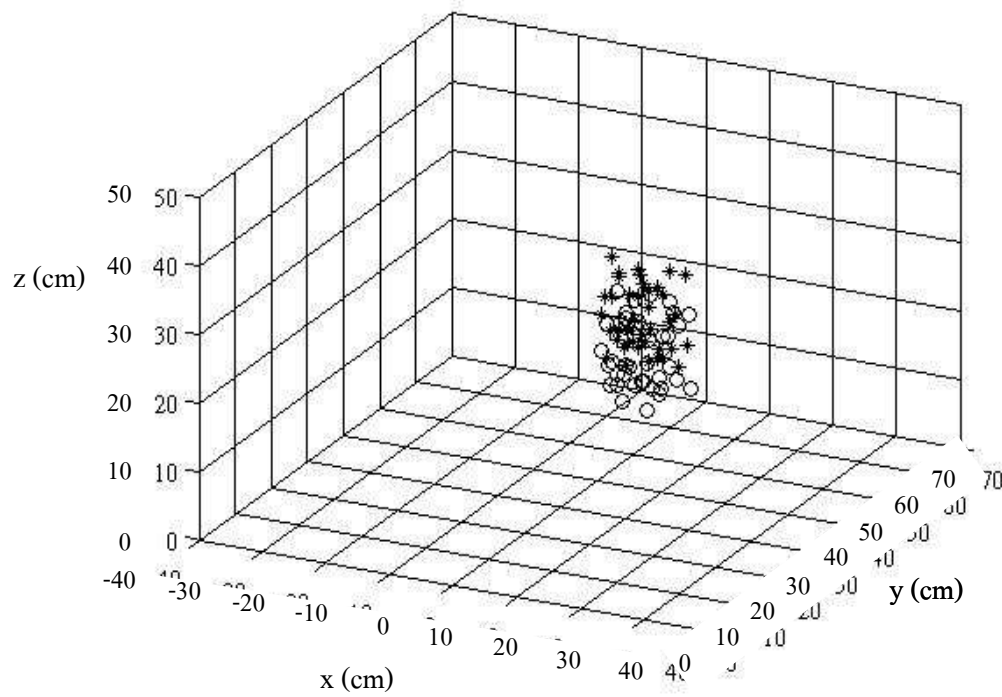
รูปที่ 4.12 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $\circ$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



(ง)



(จ)



(ฉ)

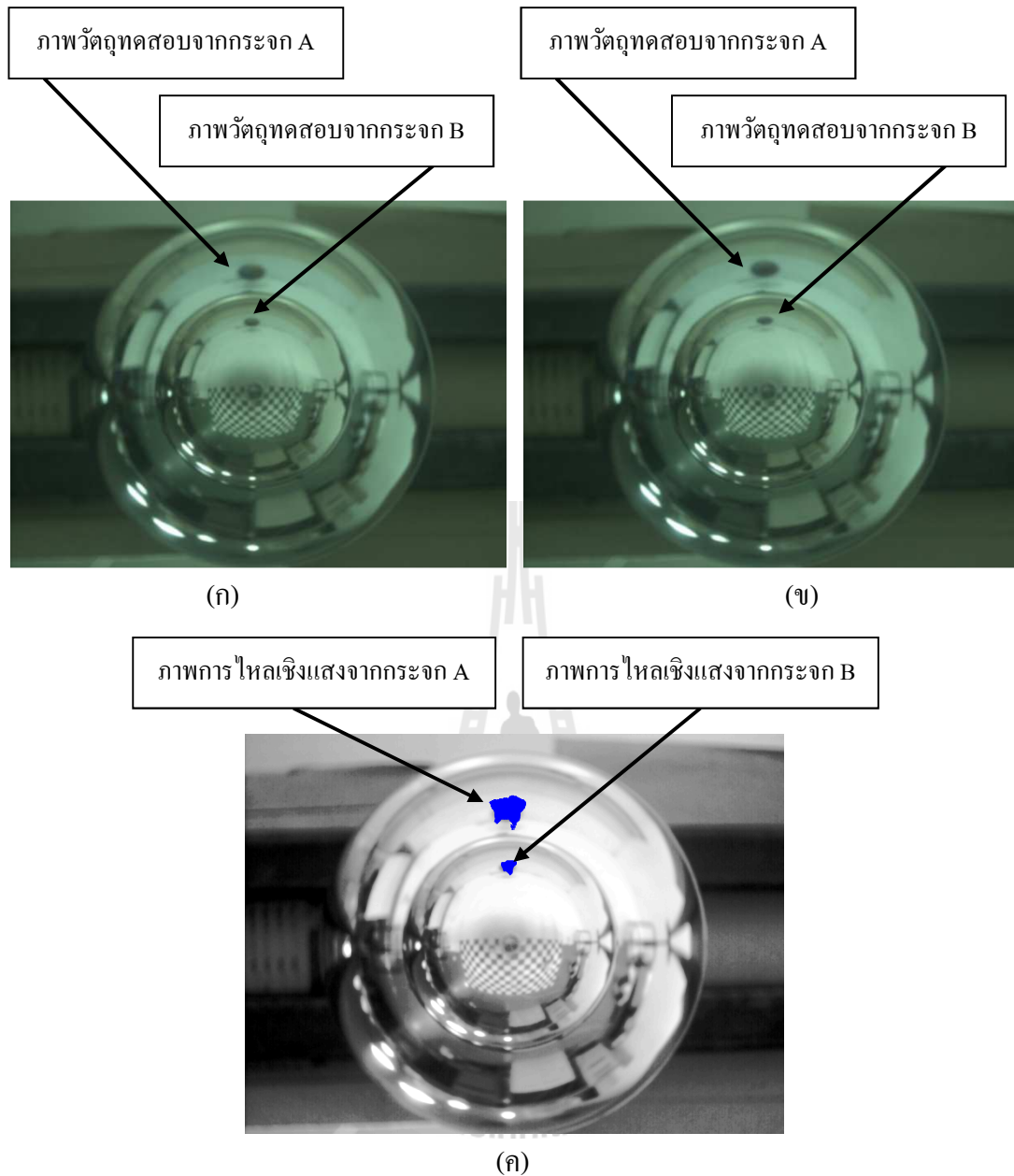
รูปที่ 4.12 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$

(ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ

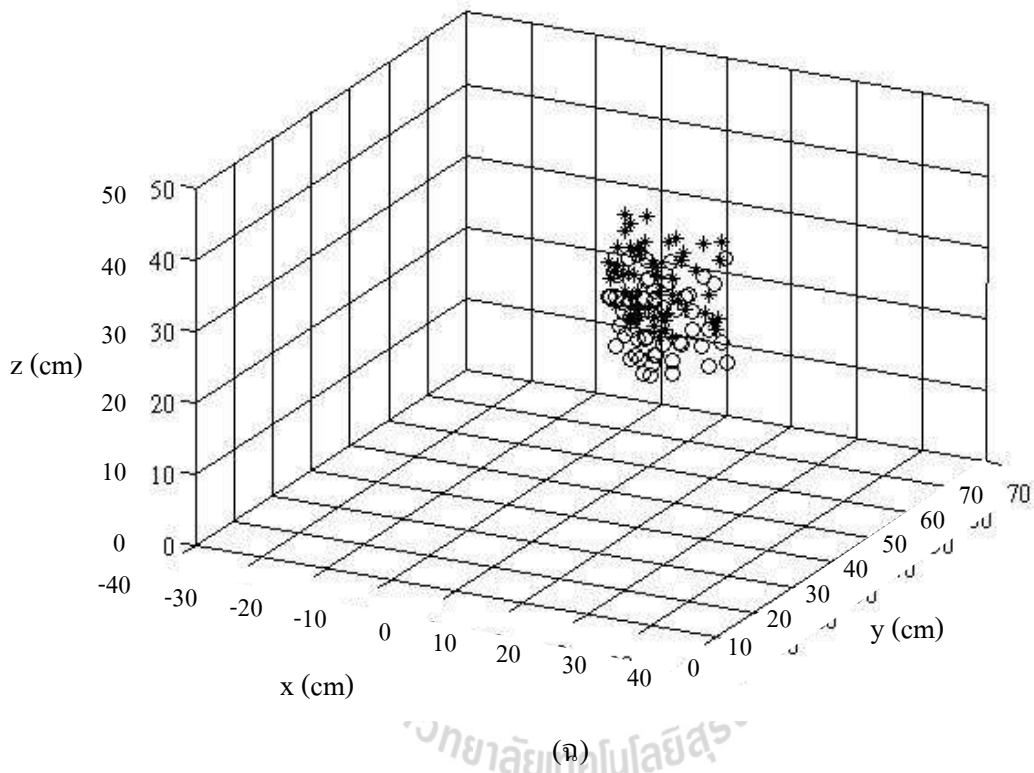
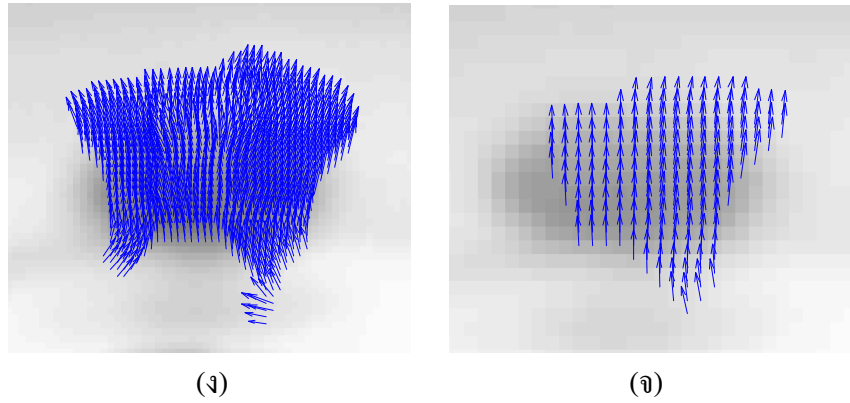
จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B

(ฉ) กราฟที่แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $\circ$  เป็นจุด

ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)

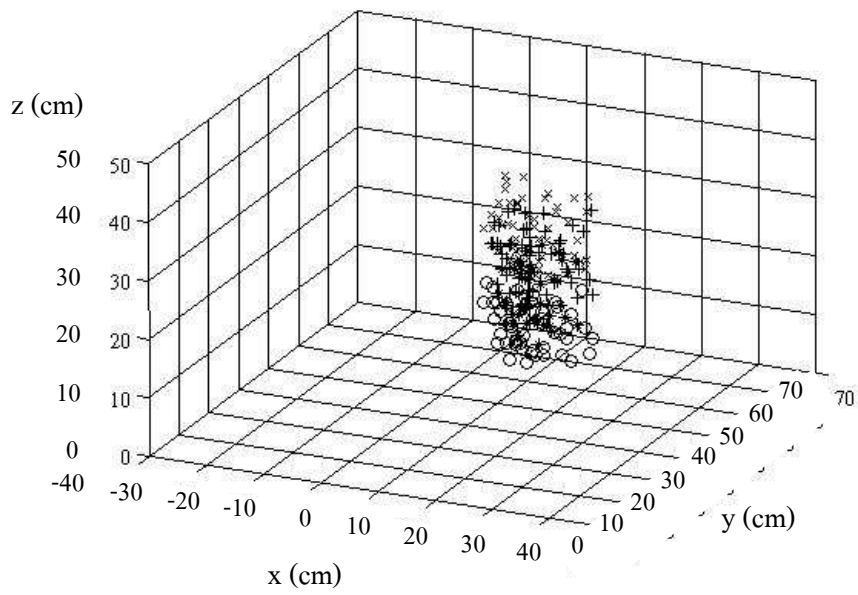


รูปที่ 4.13 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$

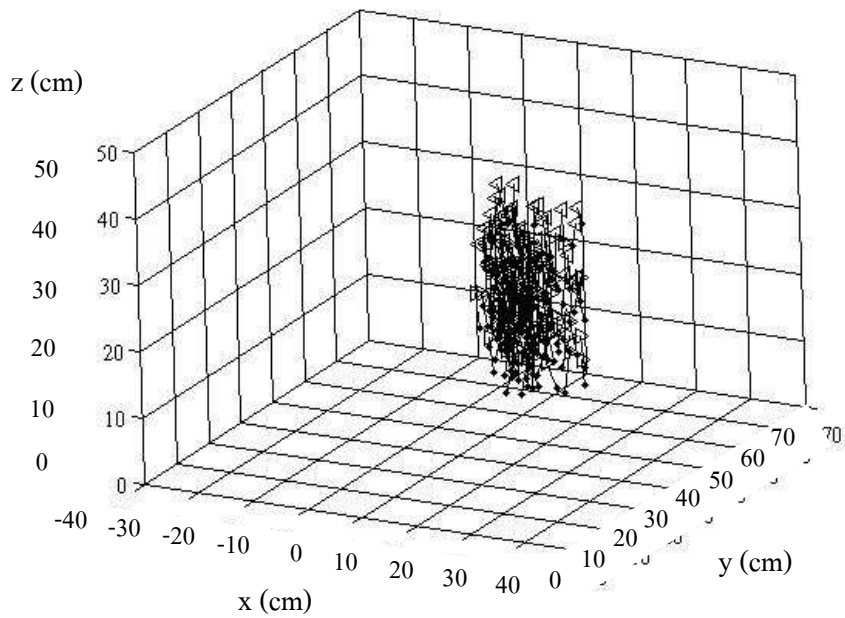


รูปที่ 4.13 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟที่示ทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)



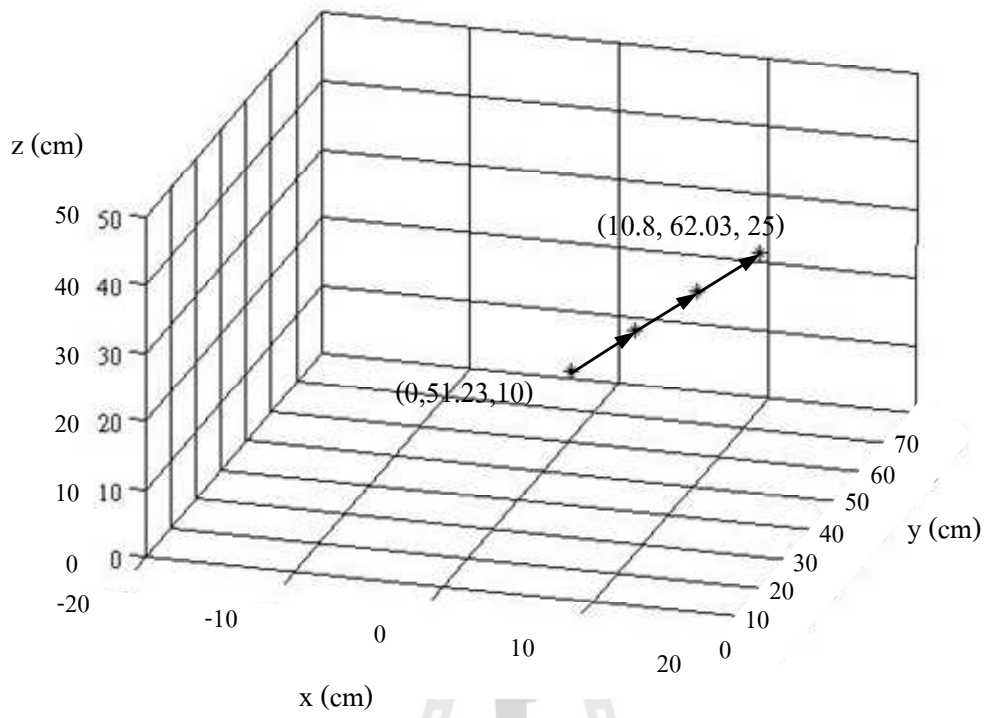


รูปที่ 4.14 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4

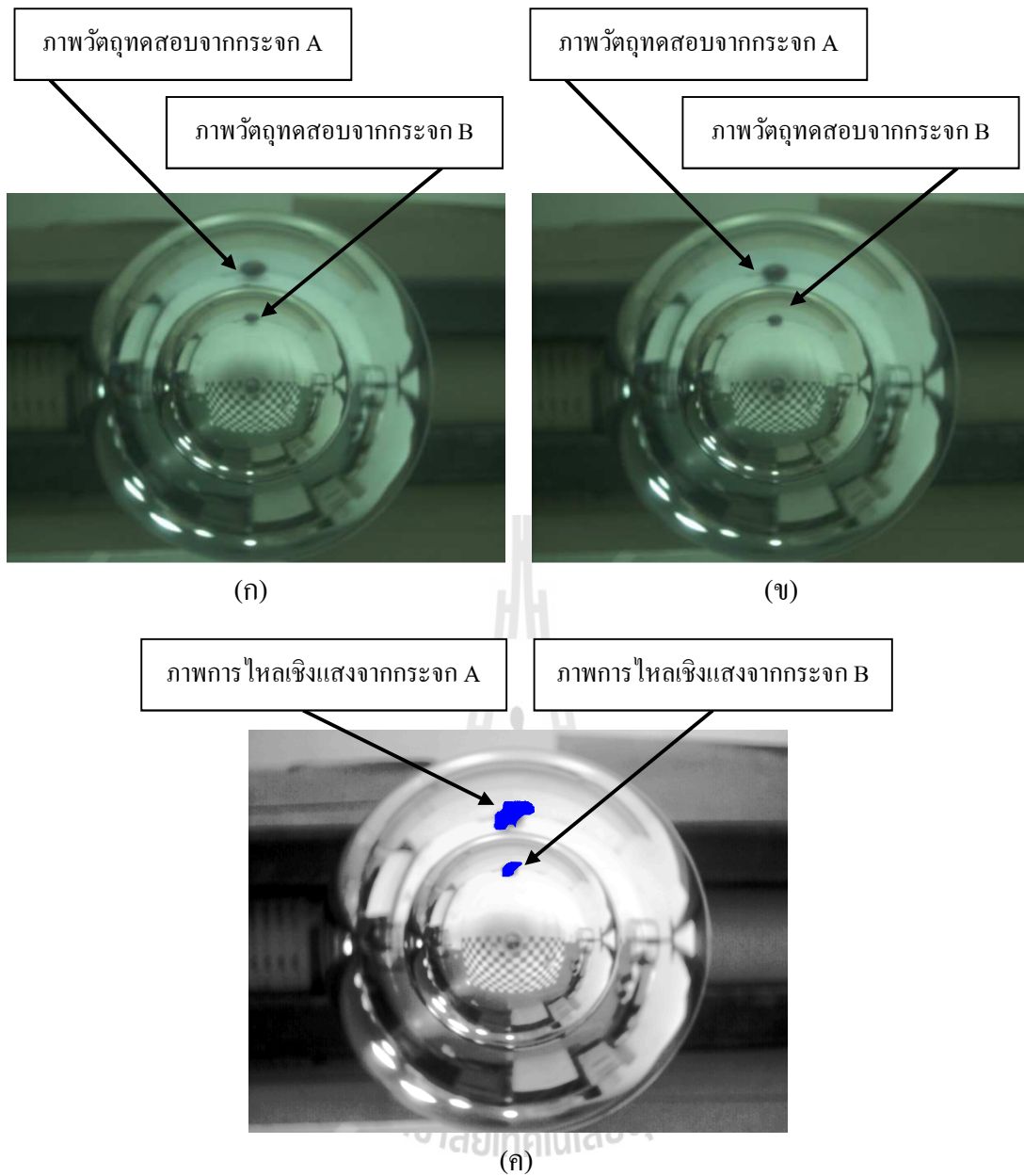


รูปที่ 4.15 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4

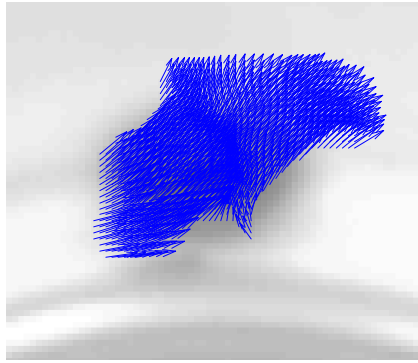
- เคลื่อนที่ตามแนวแกน XYZ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



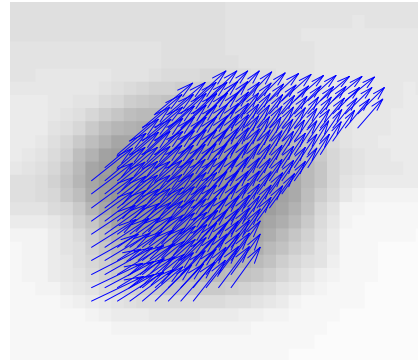
รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบในแนวแกน XYZ



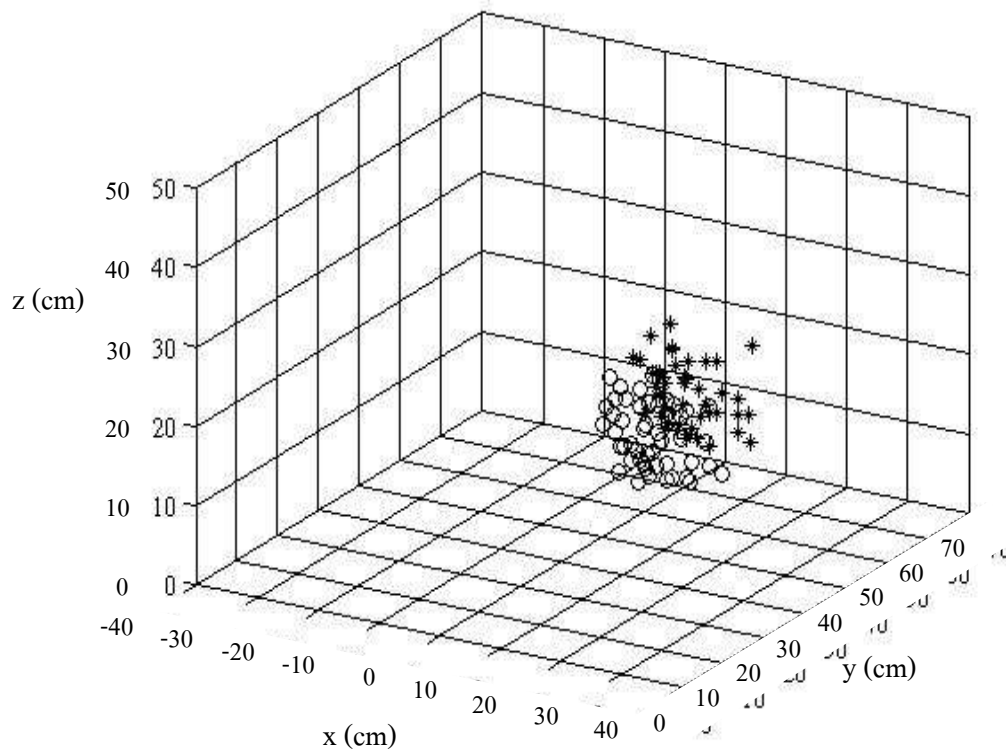
รูปที่ 4.17 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



(ง)

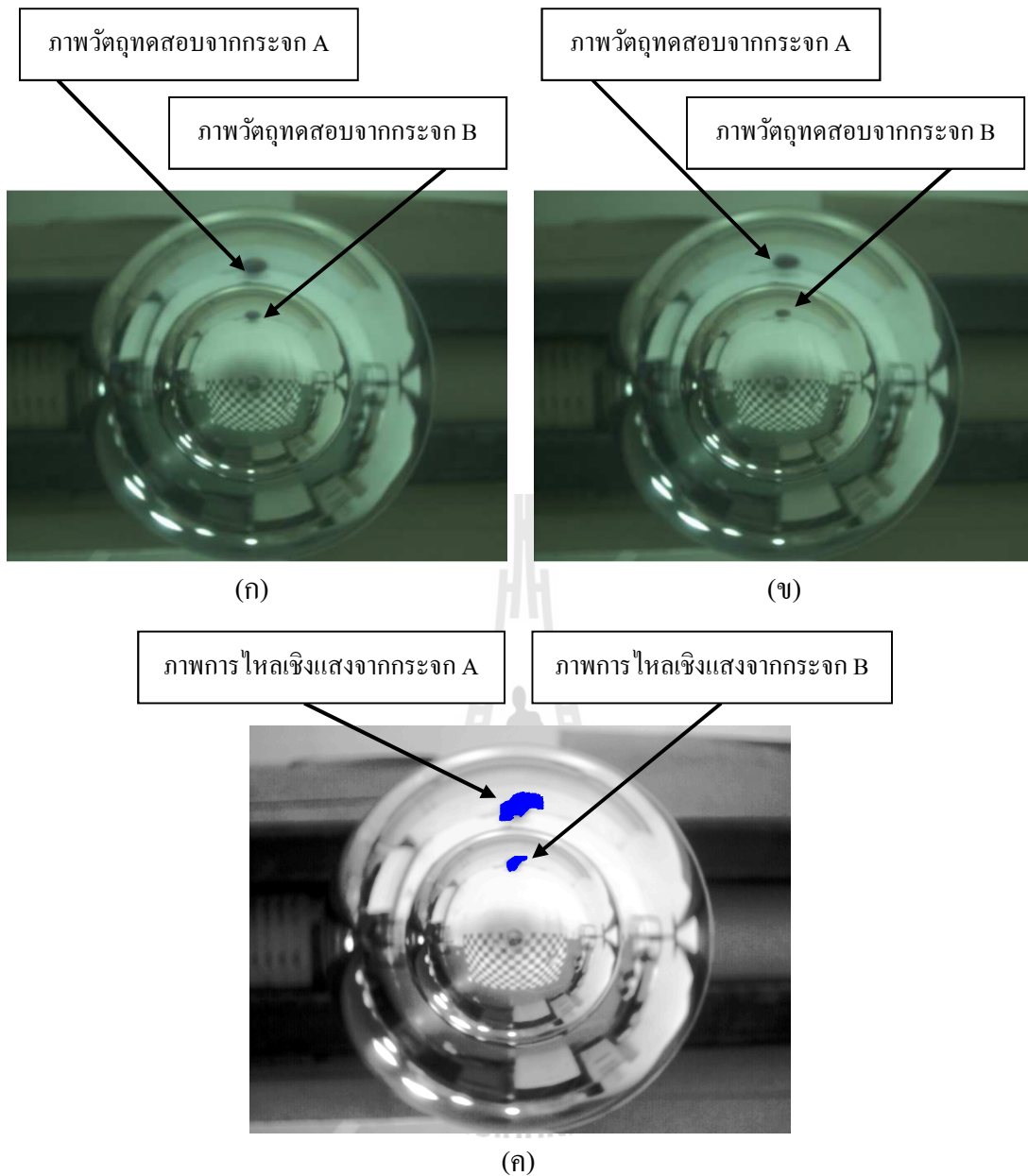


(จ)

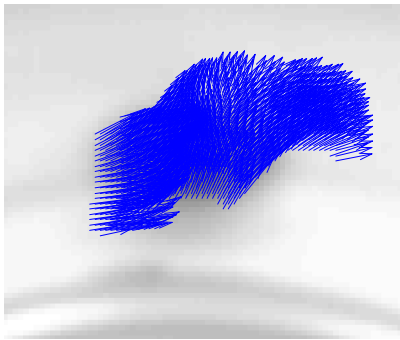


(ฉ)

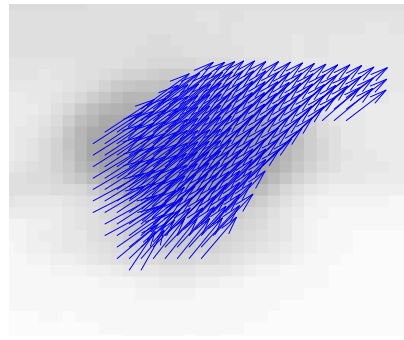
รูปที่ 4.17 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟที่สททางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)



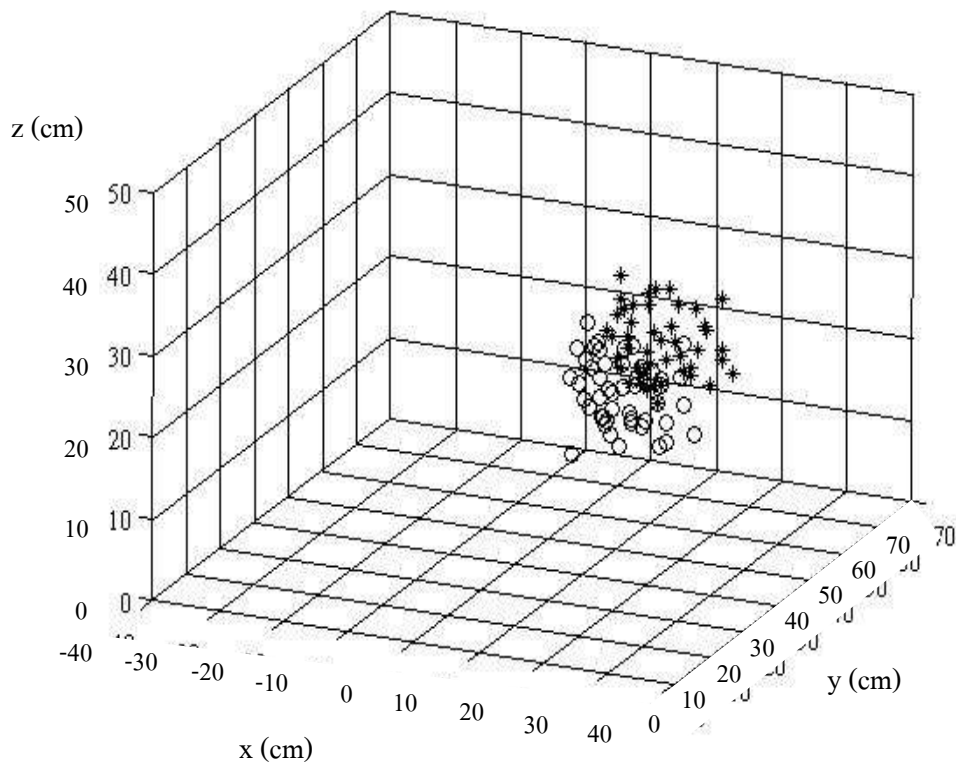
รูปที่ 4.18 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



(ง)



(จ)



(ค)

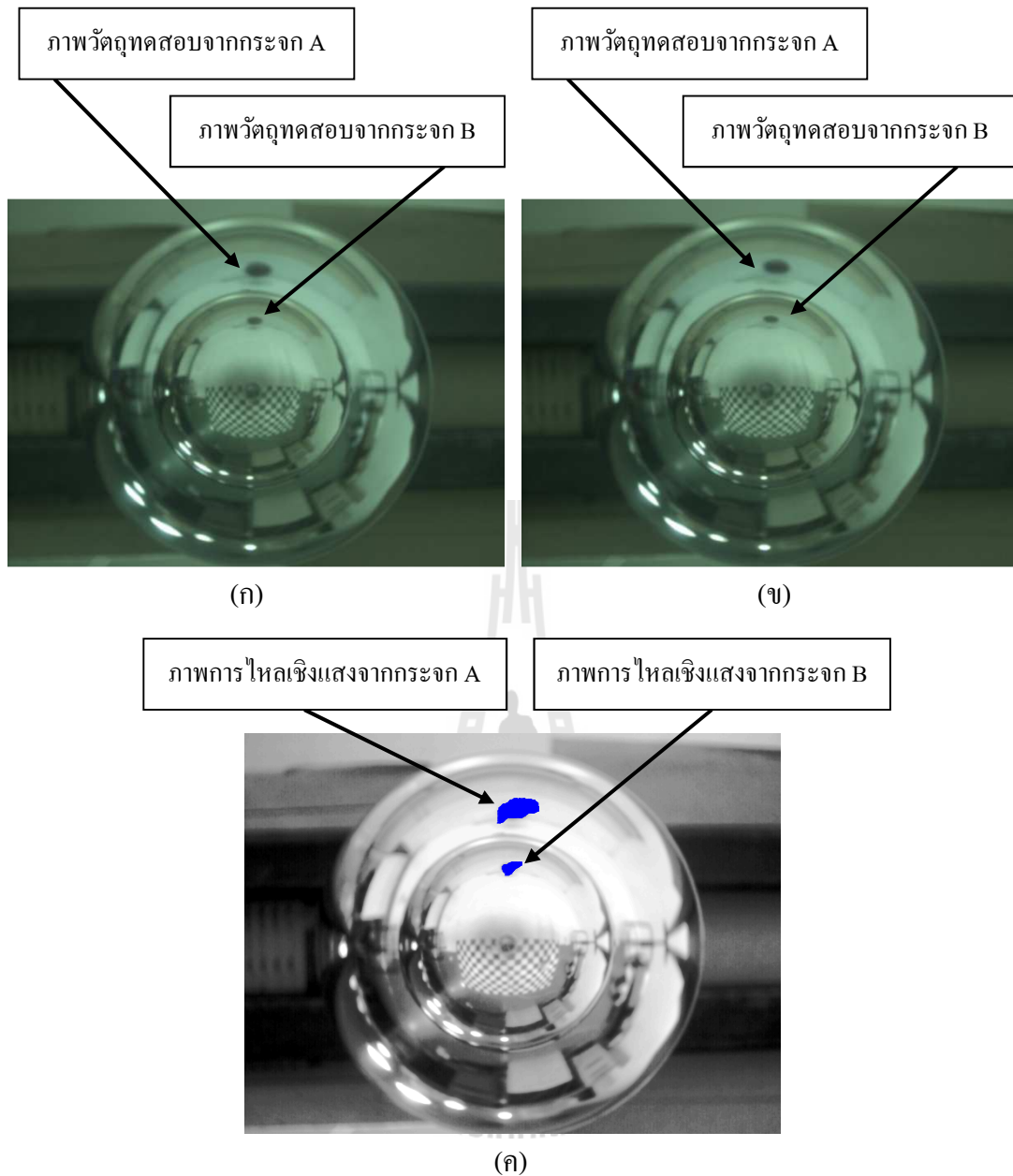
รูปที่ 4.18 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$

(ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ

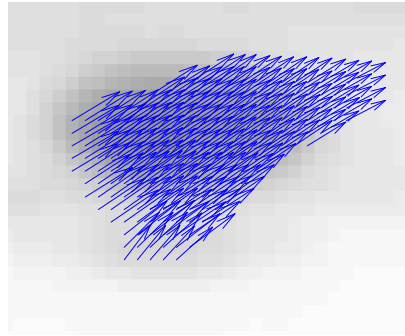
จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B

(ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด

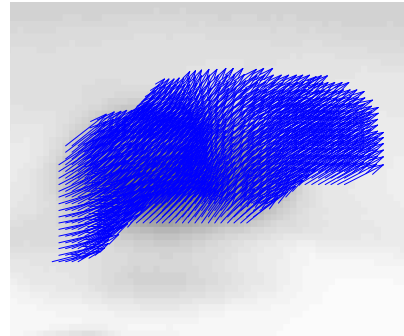
ที่เวลา  $t$  และ \* เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)



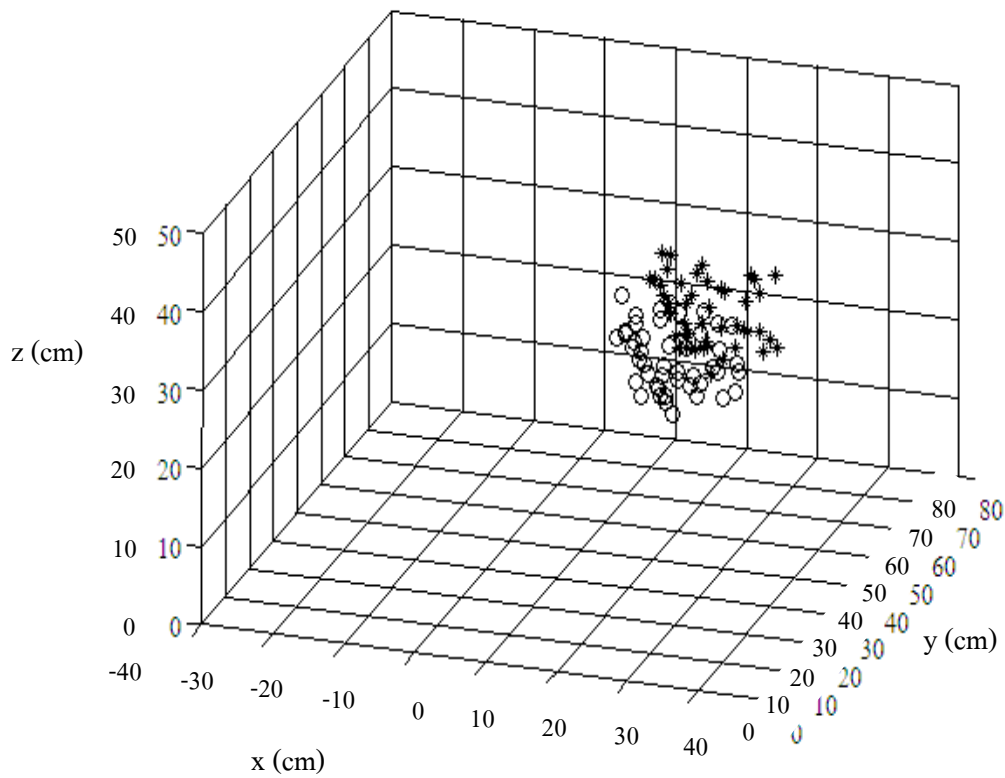
รูปที่ 4.19 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $\circ$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$



(ง)



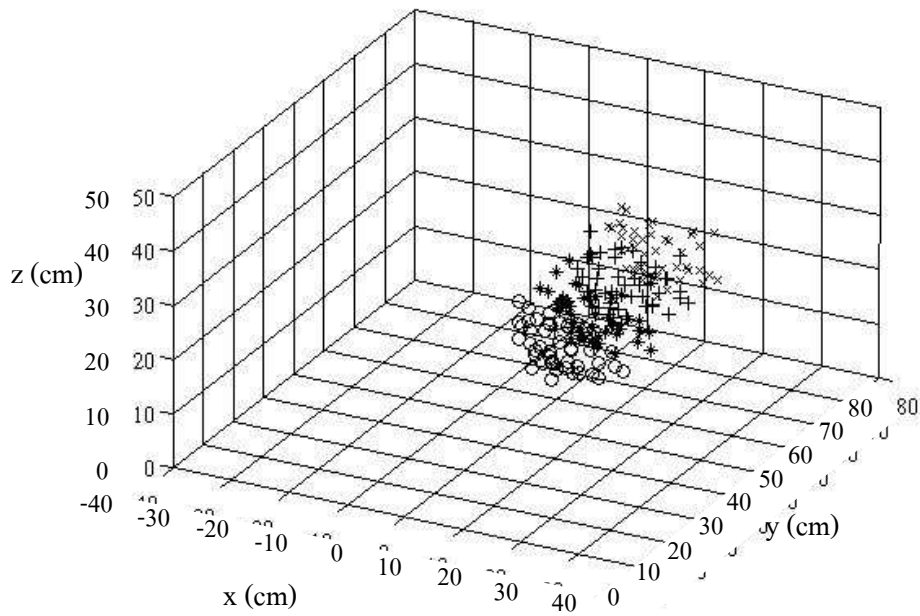
(จ)



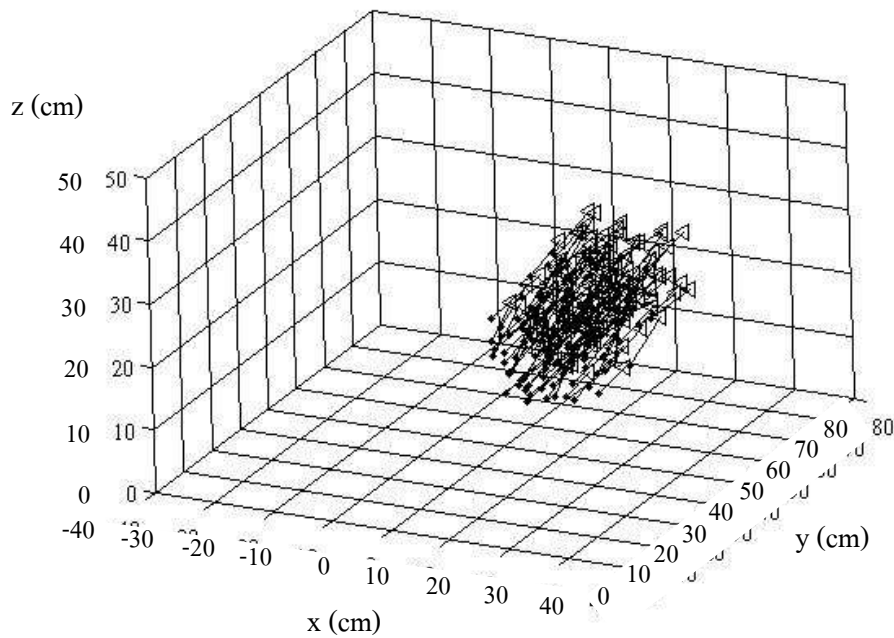
(ค)

รูปที่ 4.19 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา  $t$  (ข) ภาพที่เวลา  $t+1$   
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ  
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B  
 (ค) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย  $o$  เป็นจุด  
 ที่เวลา  $t$  และ  $*$  เป็นจุดที่เวลา  $t+1$  (ต่อ)





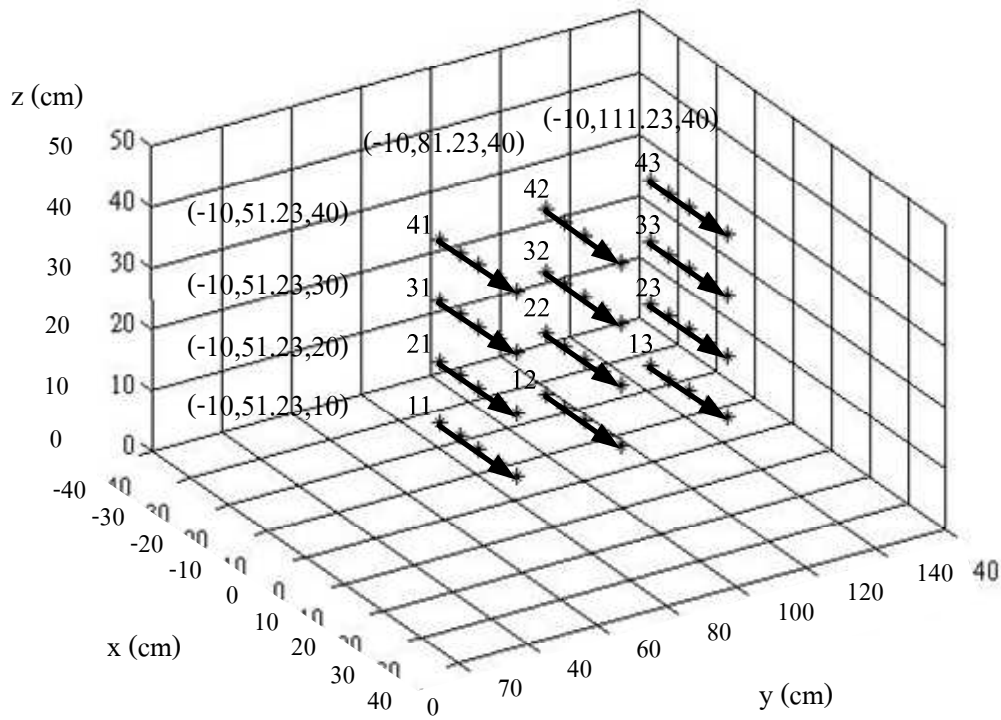
รูปที่ 4.20 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4



รูปที่ 4.21 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4

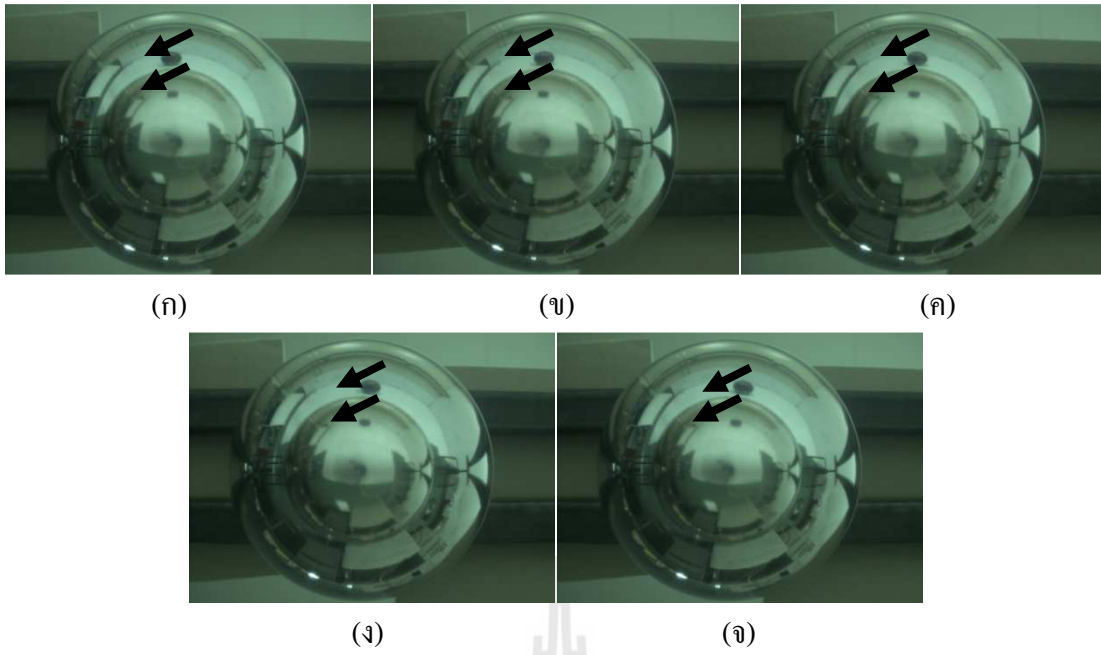
#### 4.4 ทดสอบย่านการทำงานของระบบ

ทำการทดลองโดยเคลื่อนที่วัตถุทดสอบที่ระยะต่างๆ ดังรูปที่ 4.22

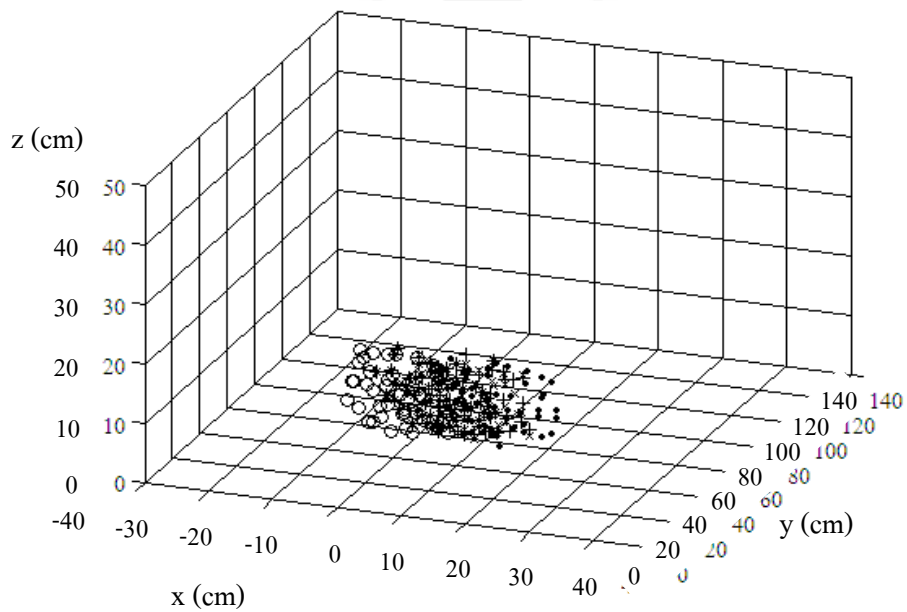


รูปที่ 4.22 การเคลื่อนที่ในย่านทดสอบ

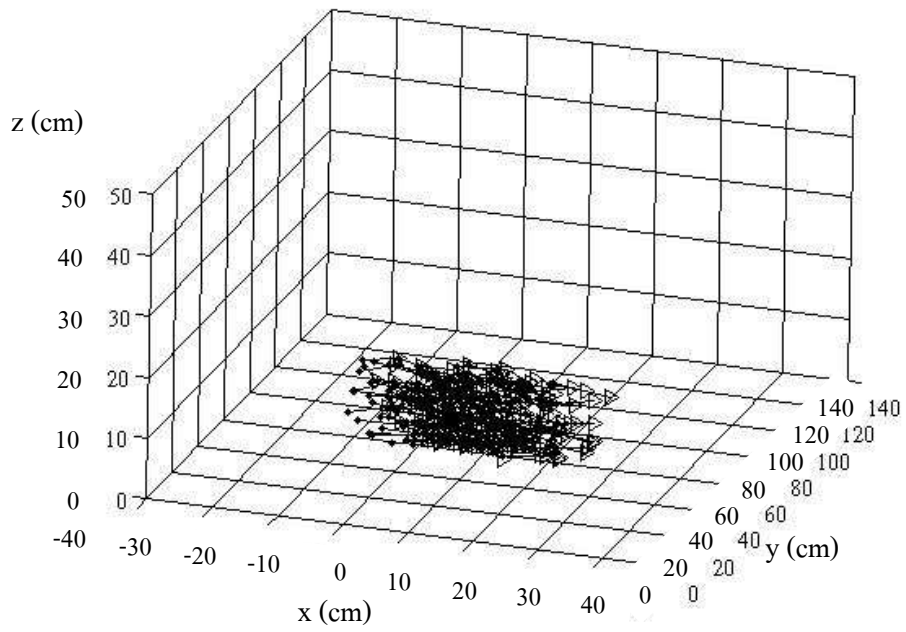
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.24 รูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26



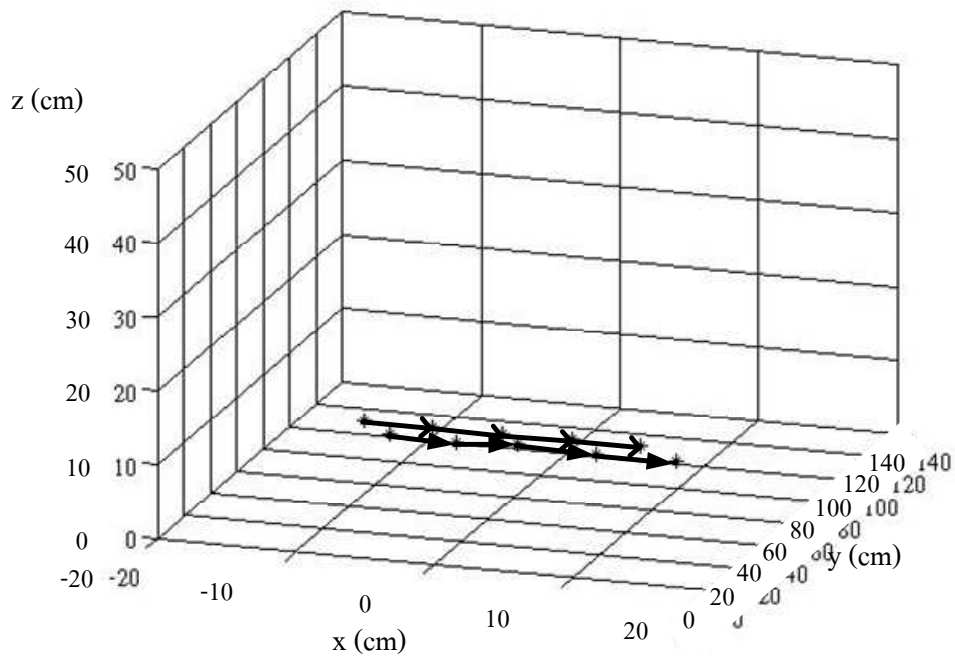
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 11 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.24 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 11 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

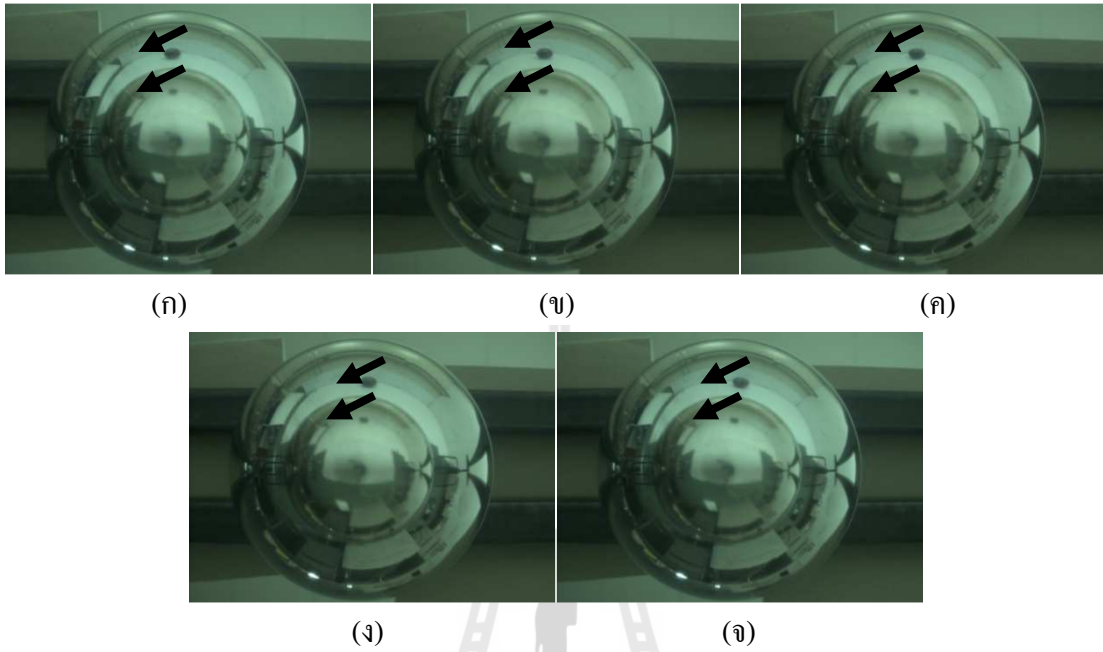


รูปที่ 4.25 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 11

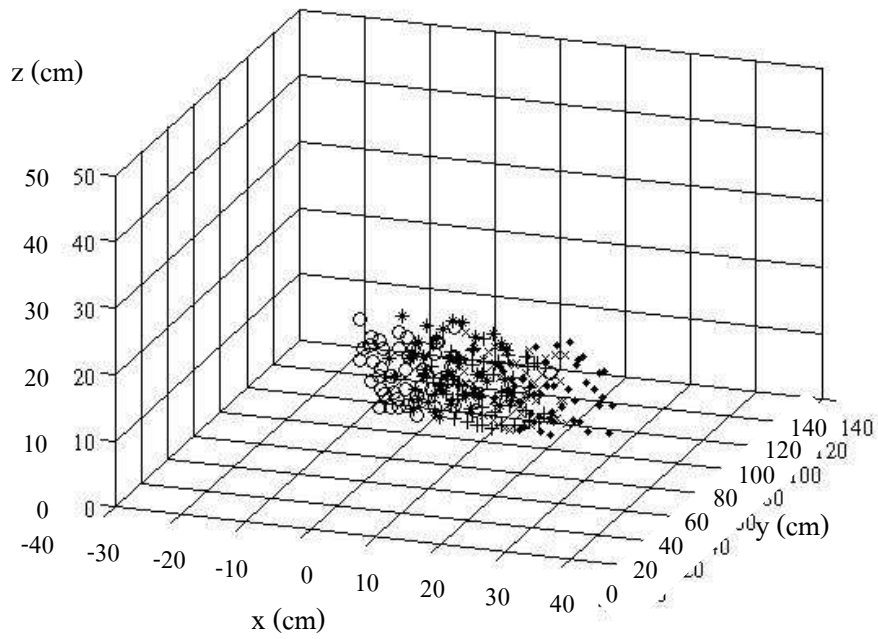


รูปที่ 4.26 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

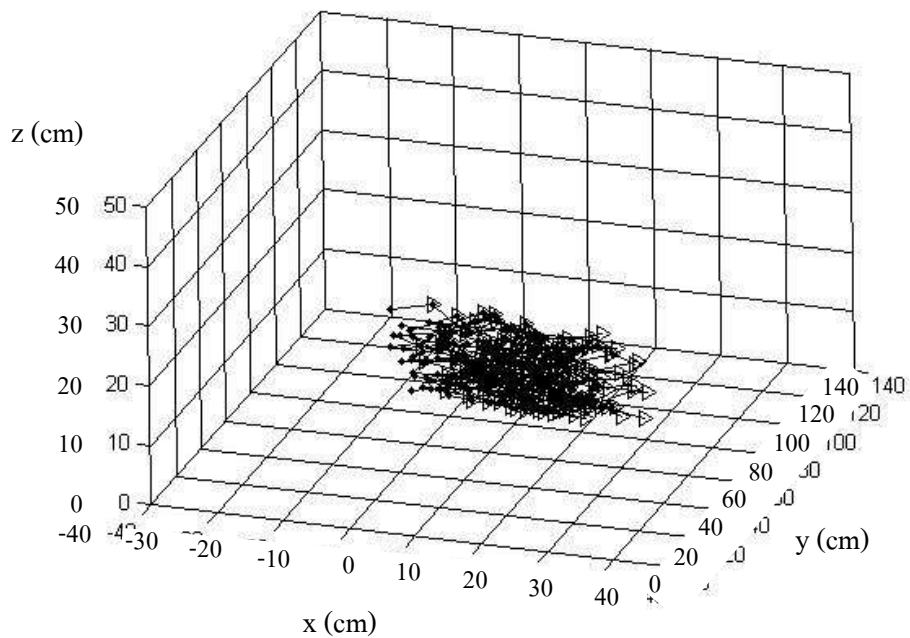
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 12 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.28 รูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30



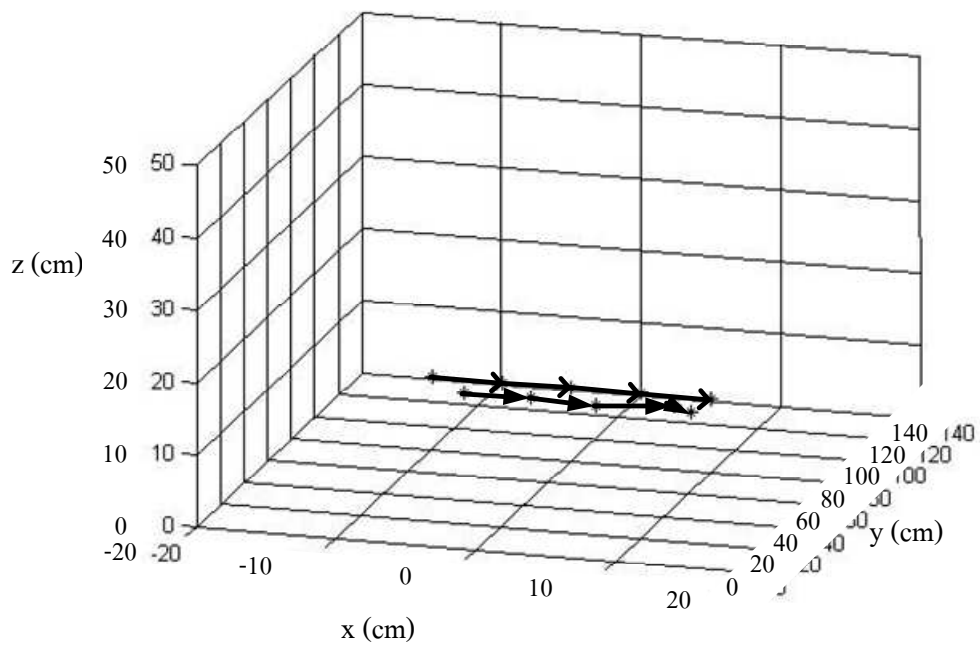
รูปที่ 4.27 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 12 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.28 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 12 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

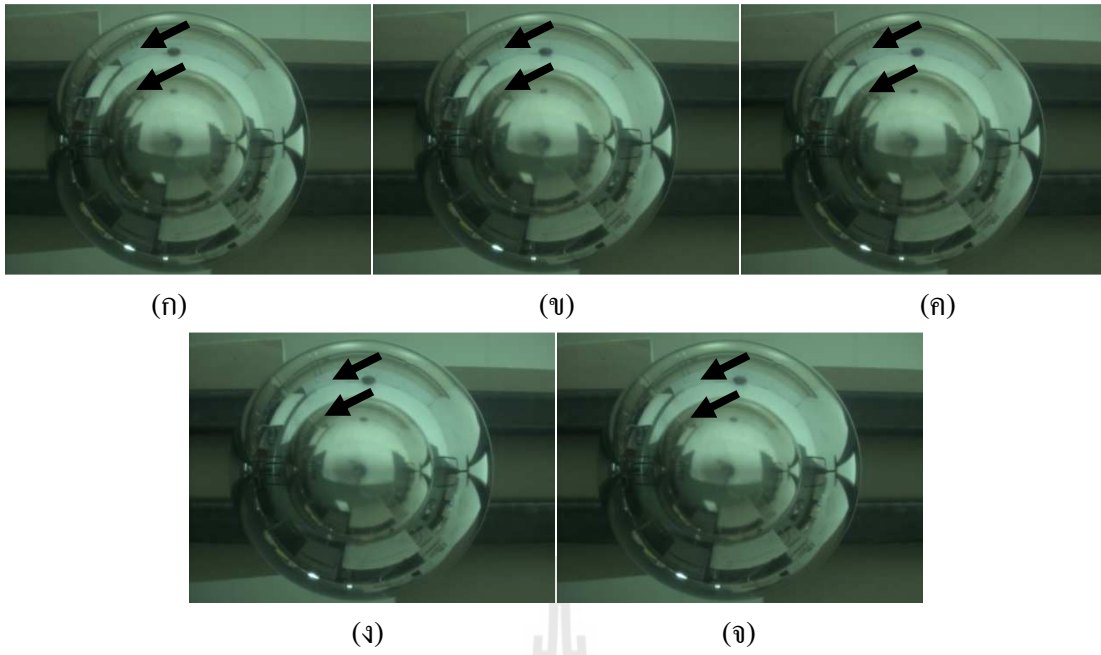


รูปที่ 4.29 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 12

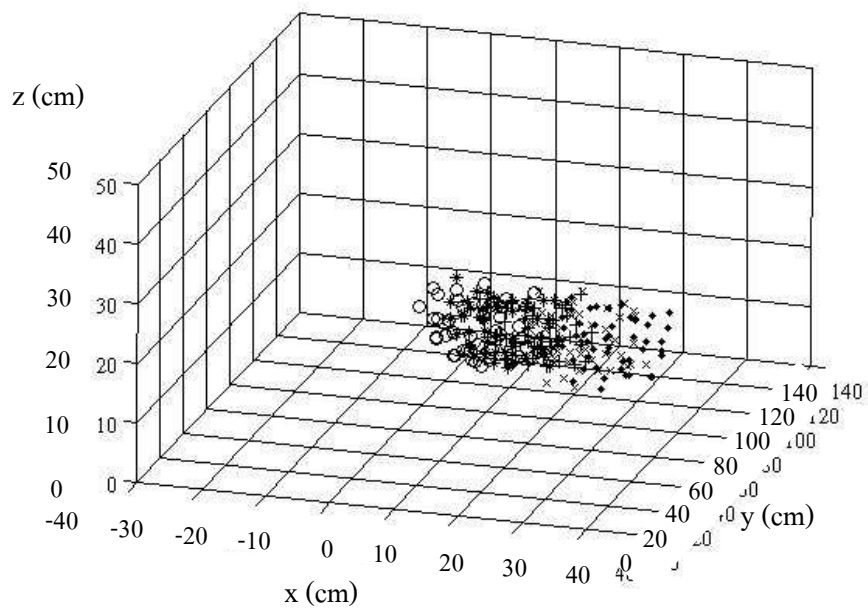


รูปที่ 4.30 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 13 ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.32 รูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34

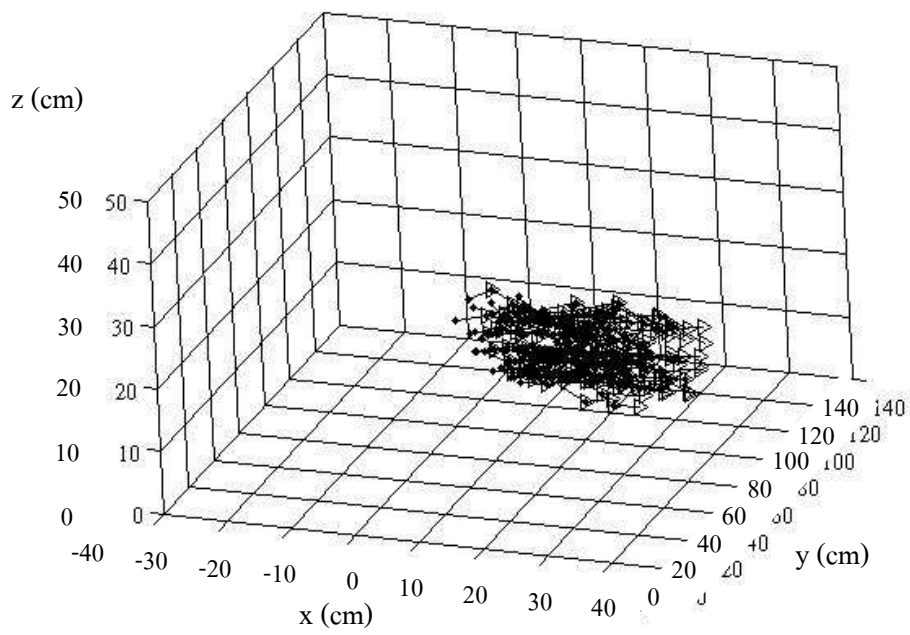


รูปที่ 4.31 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 13 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5

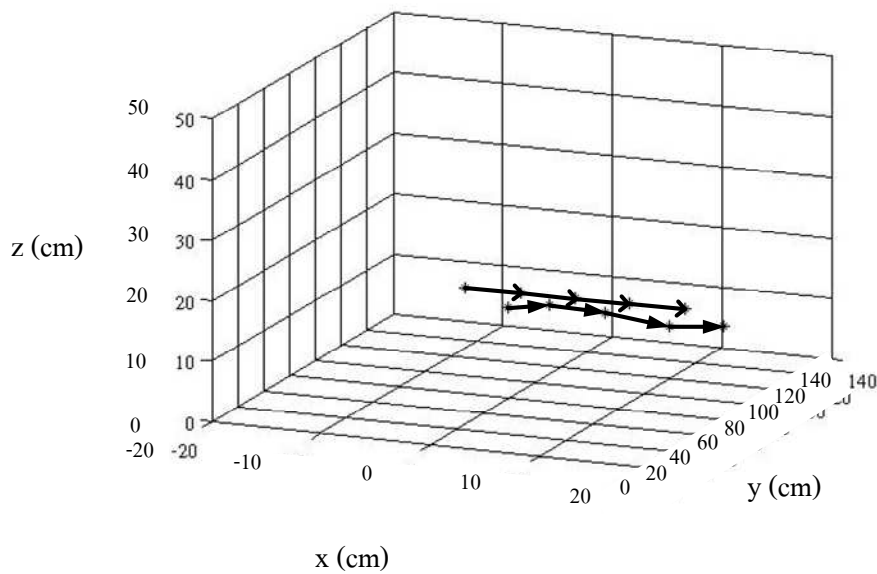


รูปที่ 4.32 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5





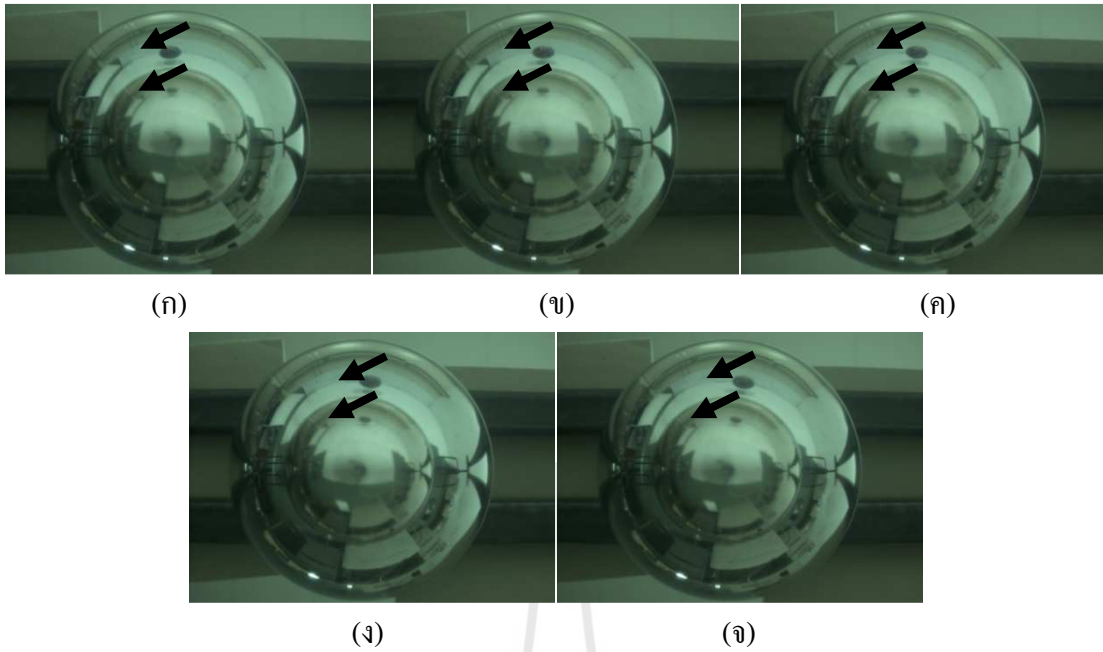
รูปที่ 4.33 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13



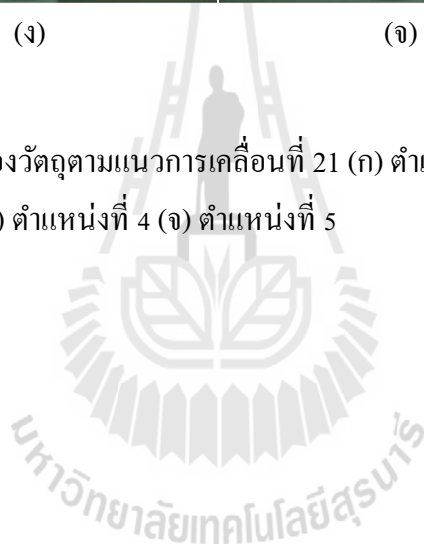
รูปที่ 4.34 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )

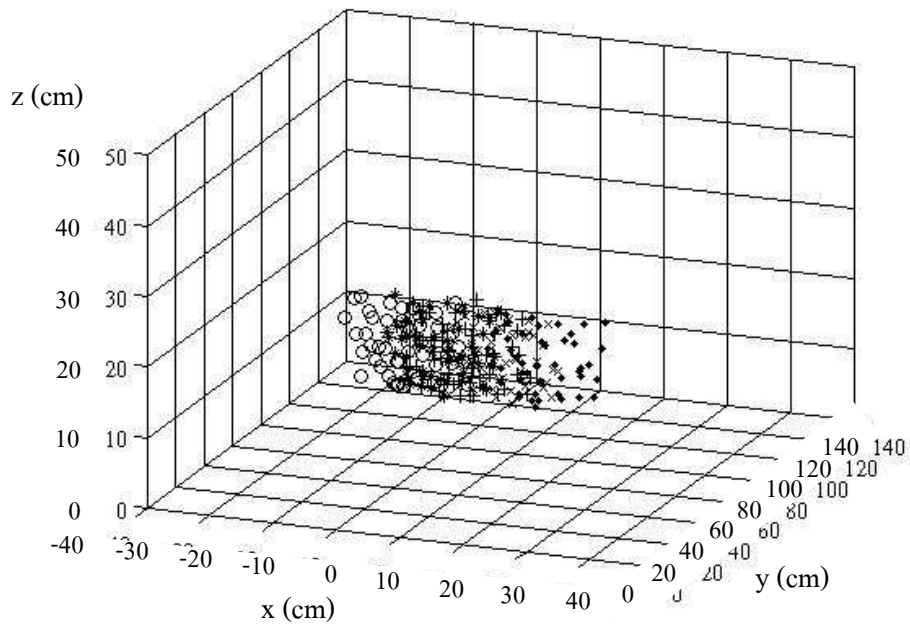
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 21 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.36 รูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38

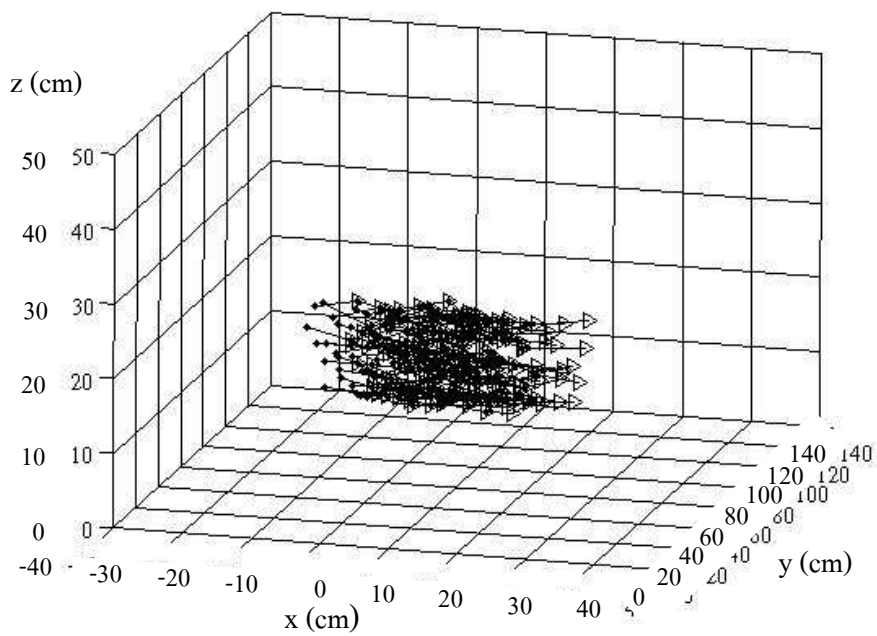


รูปที่ 4.35 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 21 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5

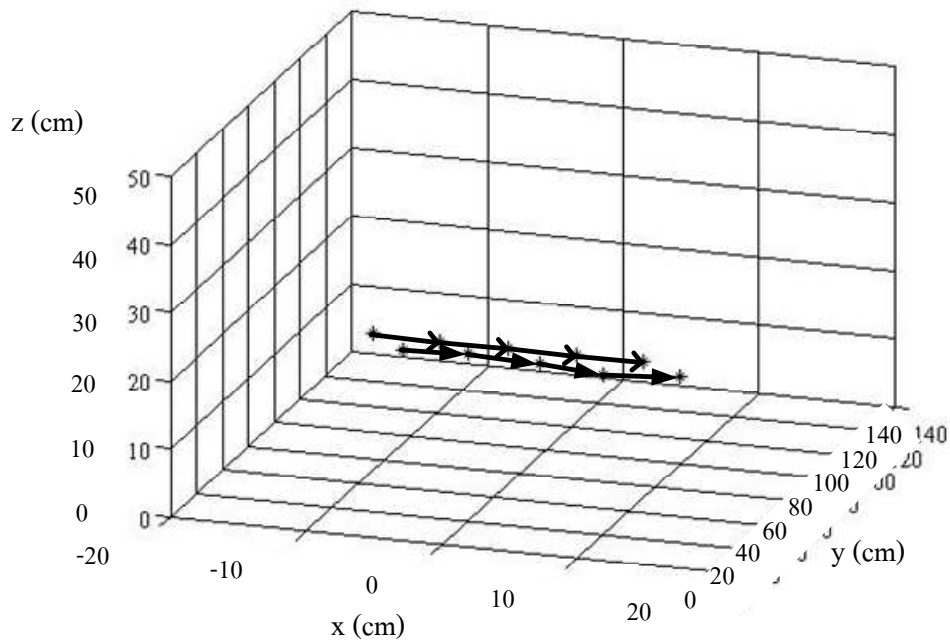




รูปที่ 4.36 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 21 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

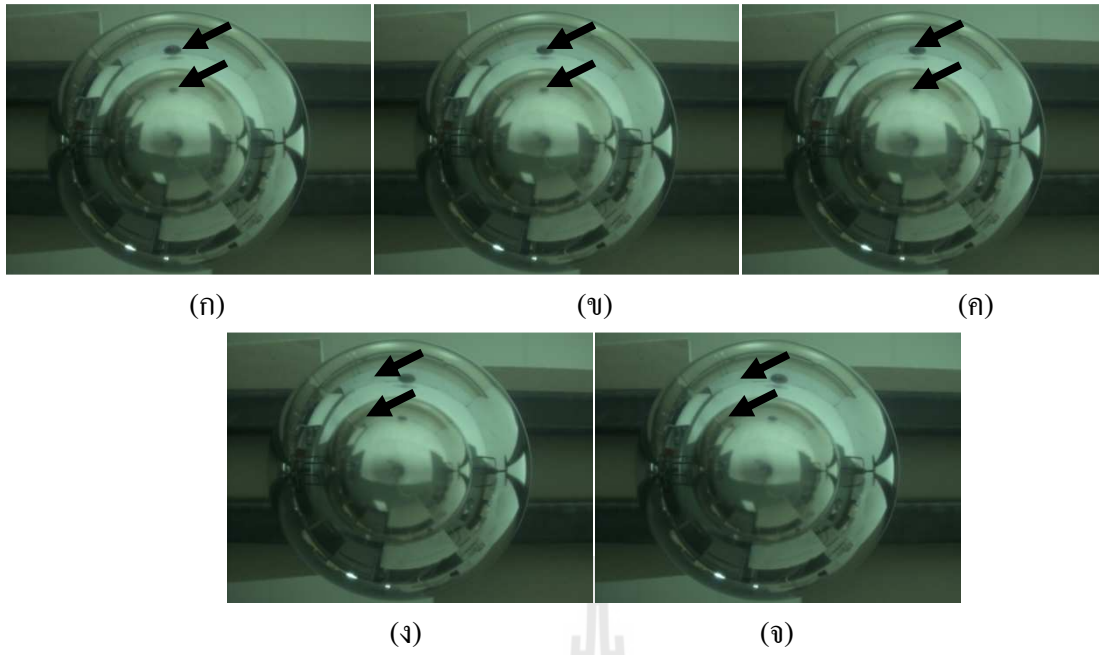


รูปที่ 4.37 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 21

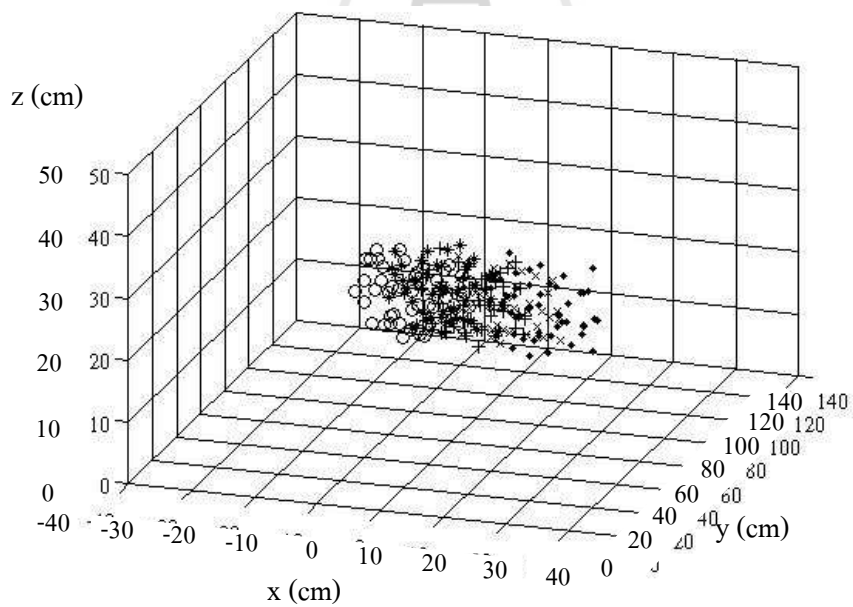


รูปที่ 4.38 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

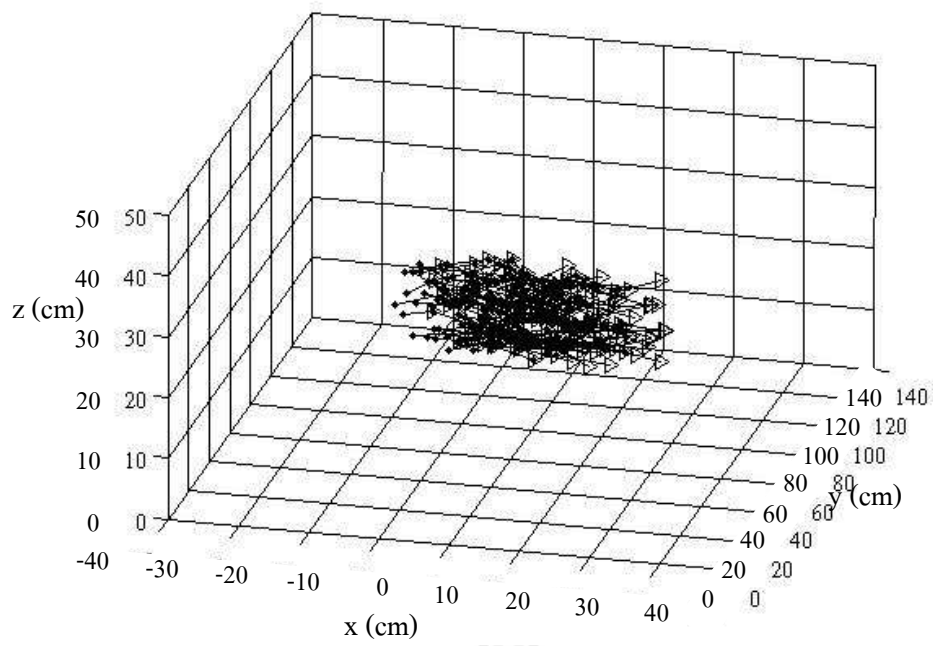
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 22 ดังแสดงในรูปที่ 4.39 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.40 รูปที่ 4.41 และรูปที่ 4.42



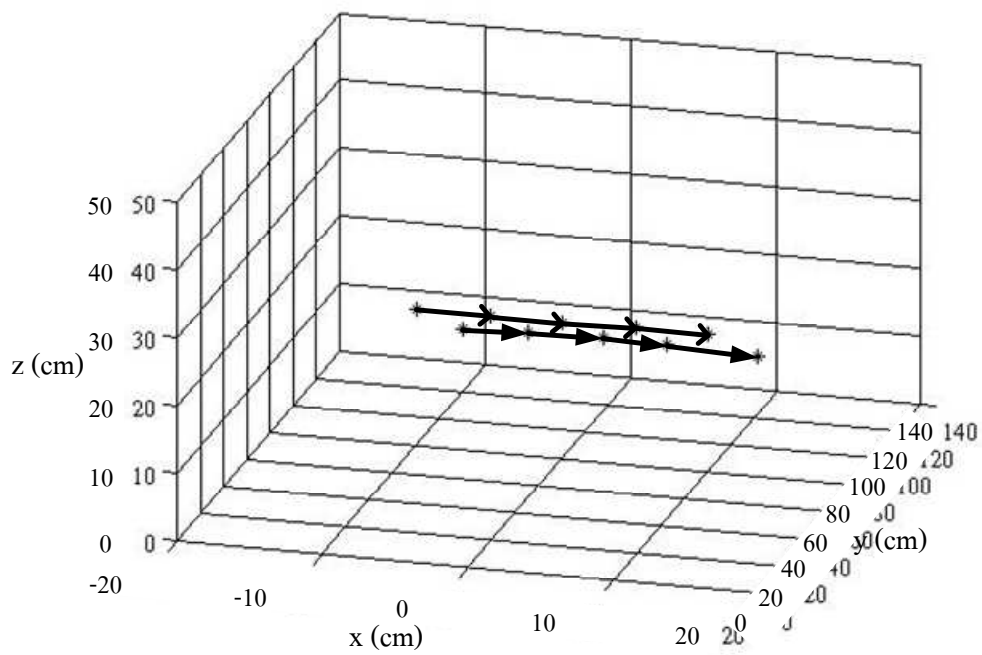
รูปที่ 4.39 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 22 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.40 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

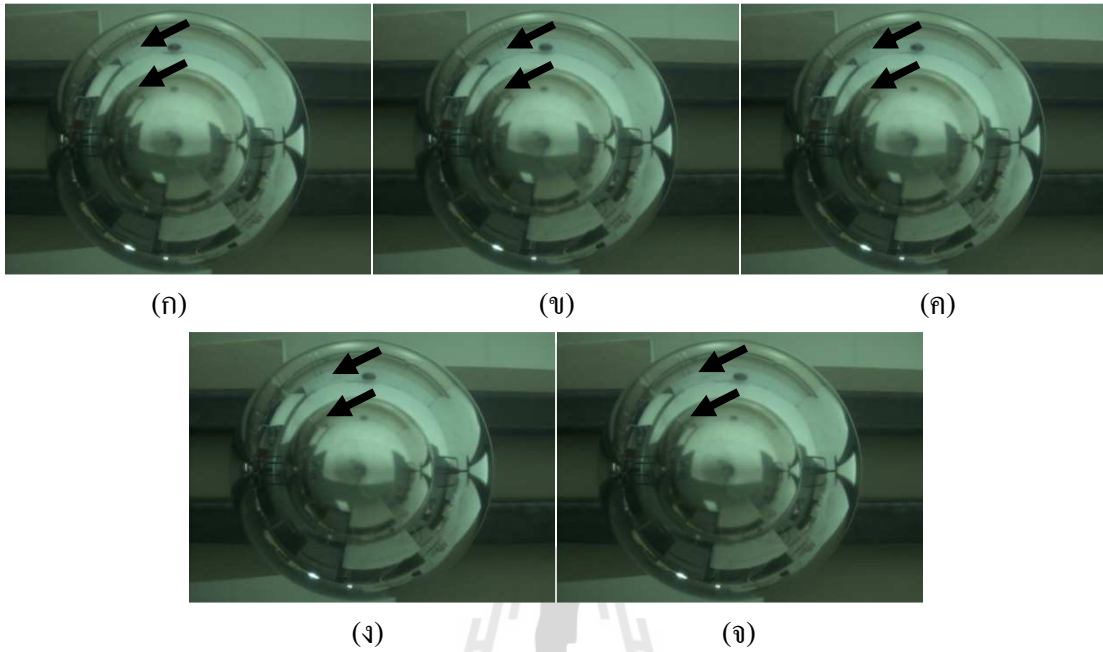


รูปที่ 4.41 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 22

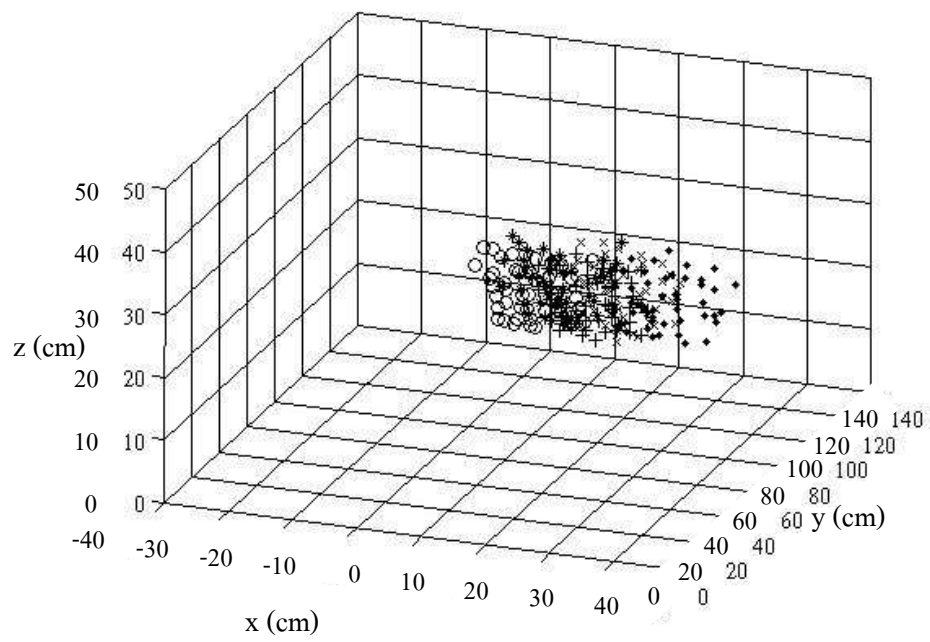


รูปที่ 4.42 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

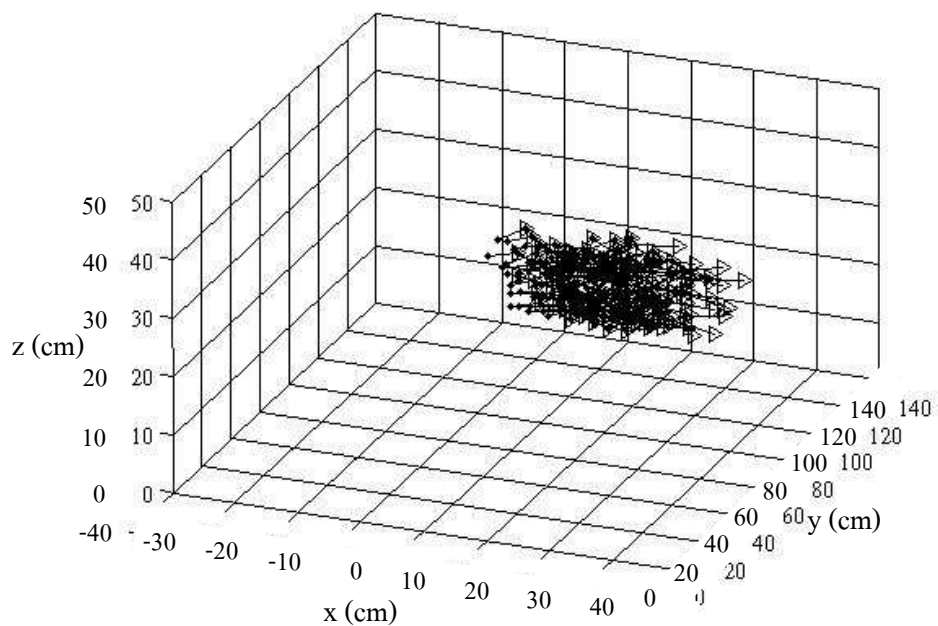
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 23 ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.44 รูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.43 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 23 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5

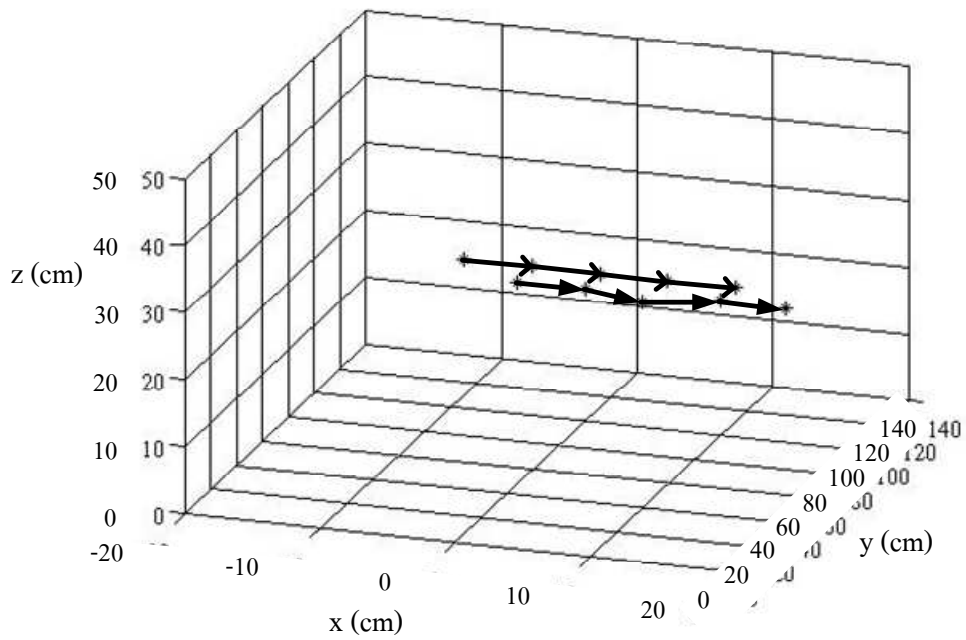


รูปที่ 4.44 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 23 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5



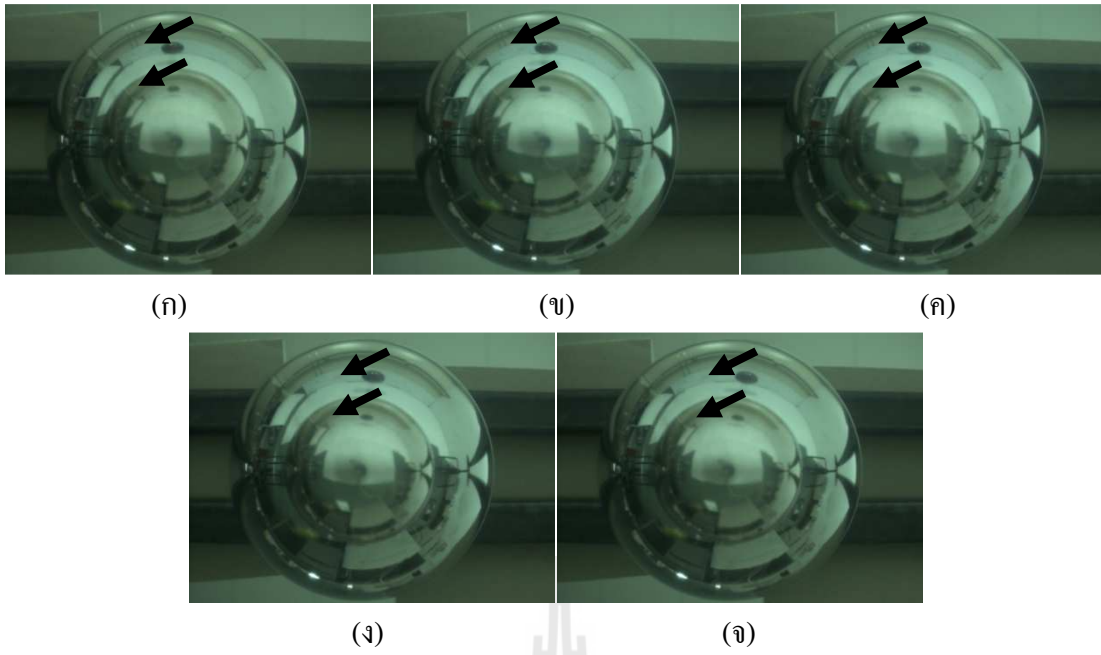
รูปที่ 4.45 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 23



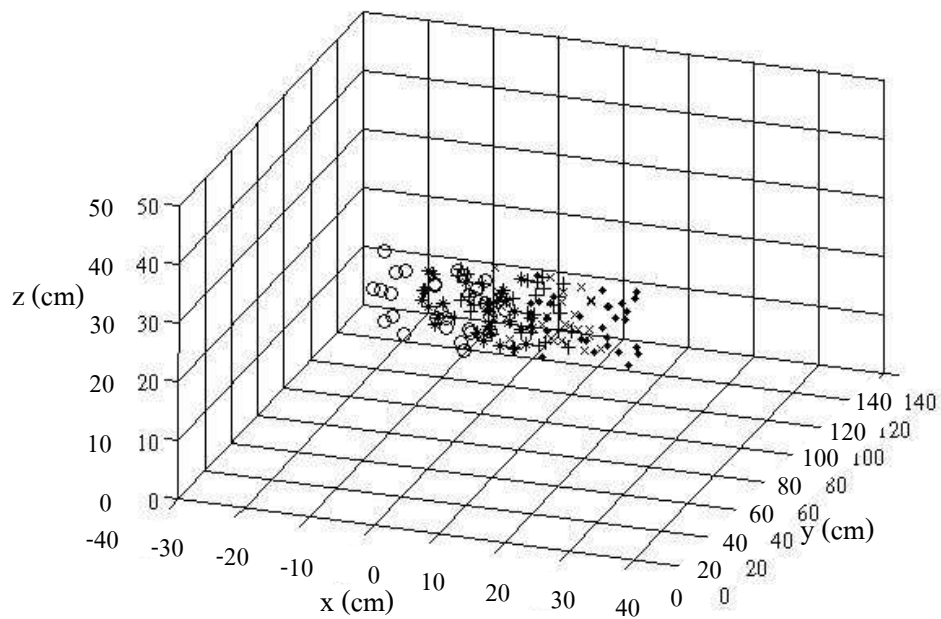


รูปที่ 4.46 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

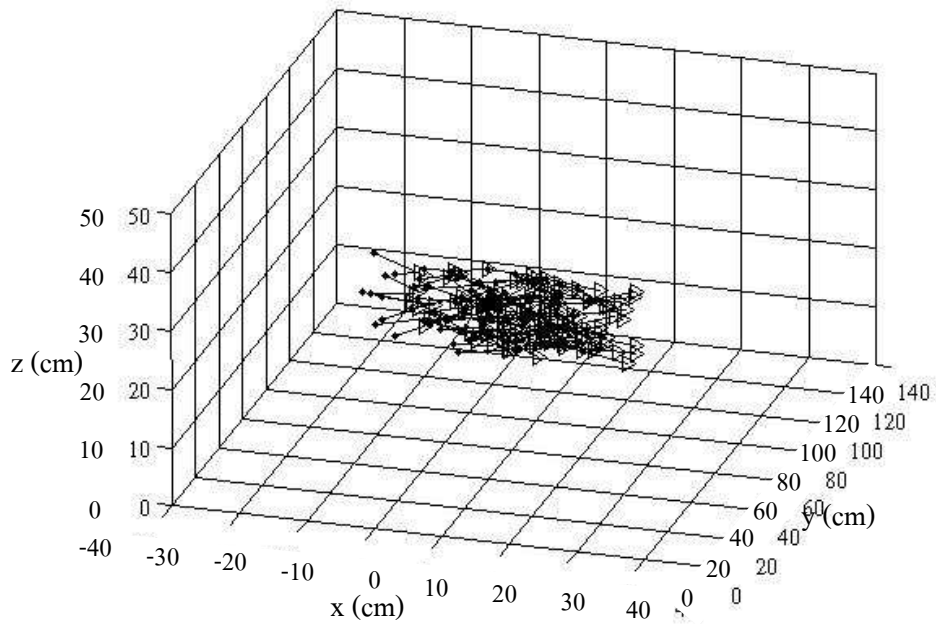
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 31 ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.48 รูปที่ 4.49 และรูปที่ 4.50



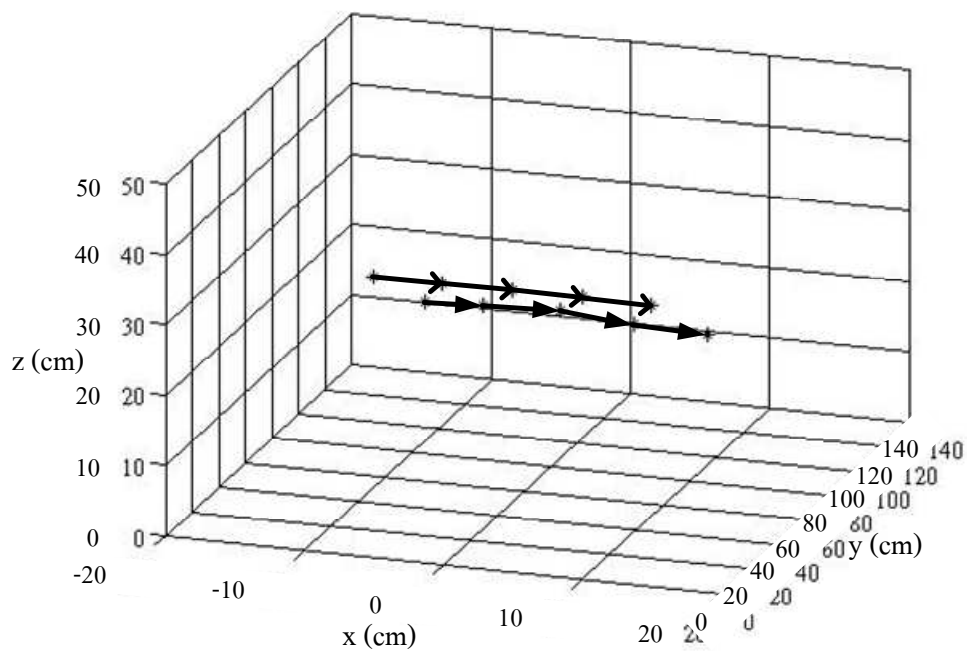
รูปที่ 4.47 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 31 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.48 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 31 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

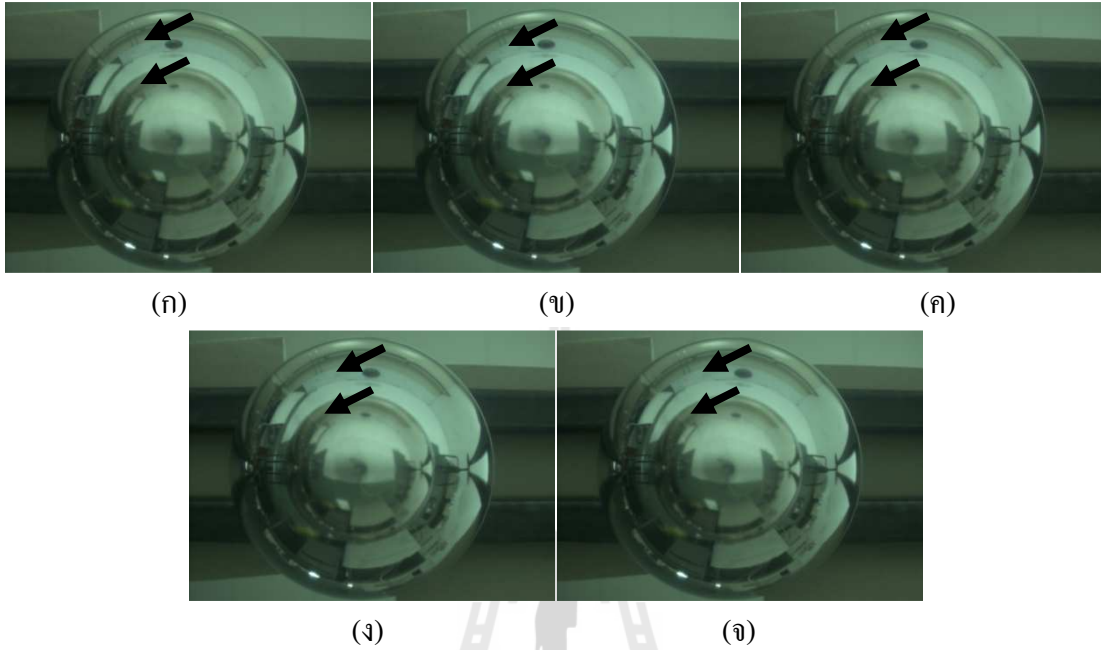


รูปที่ 4.49 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 31

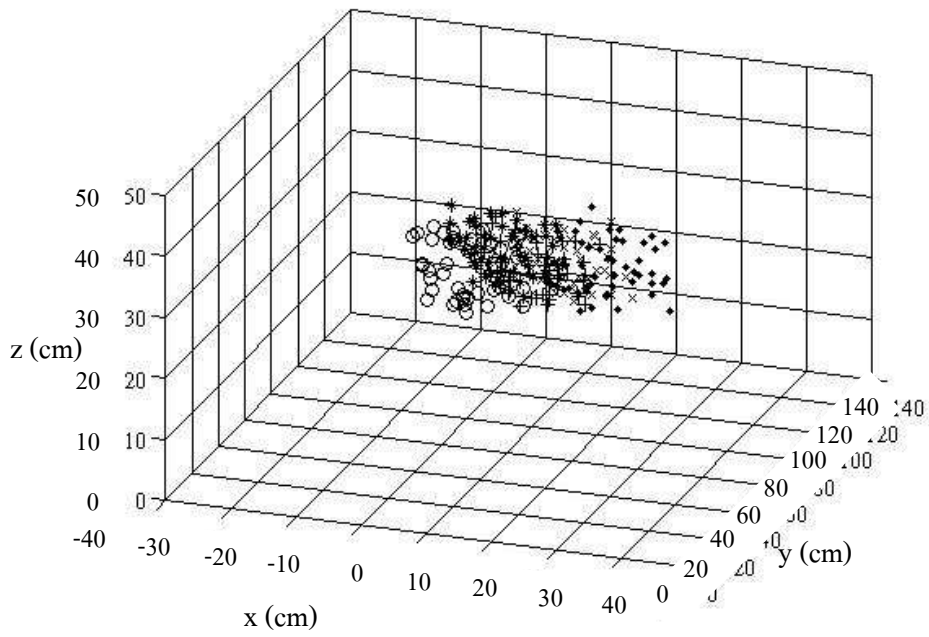


รูปที่ 4.50 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

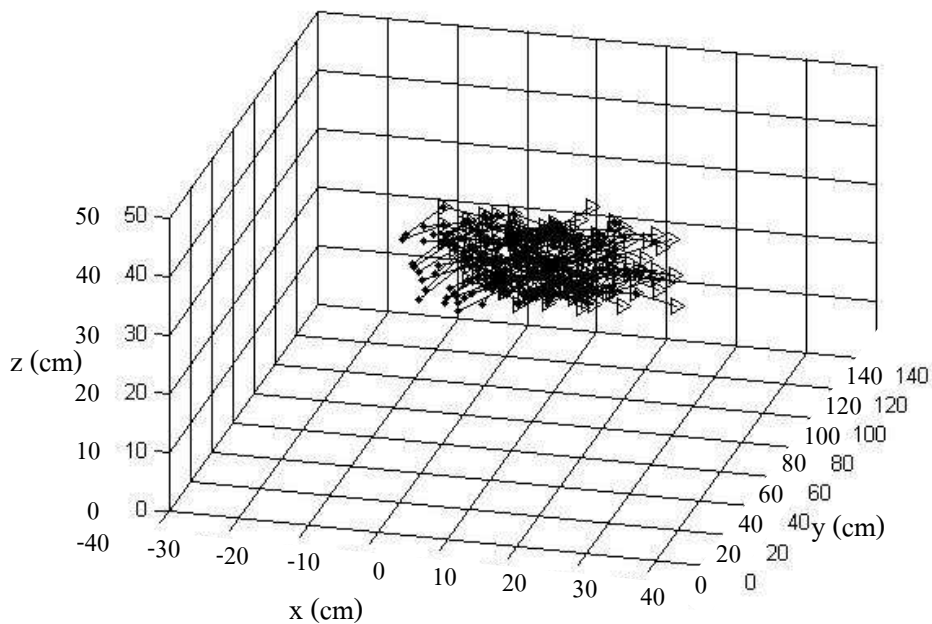
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 32 ดังแสดงในรูปที่ 4.51 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.52 รูปที่ 4.53 และรูปที่ 4.54



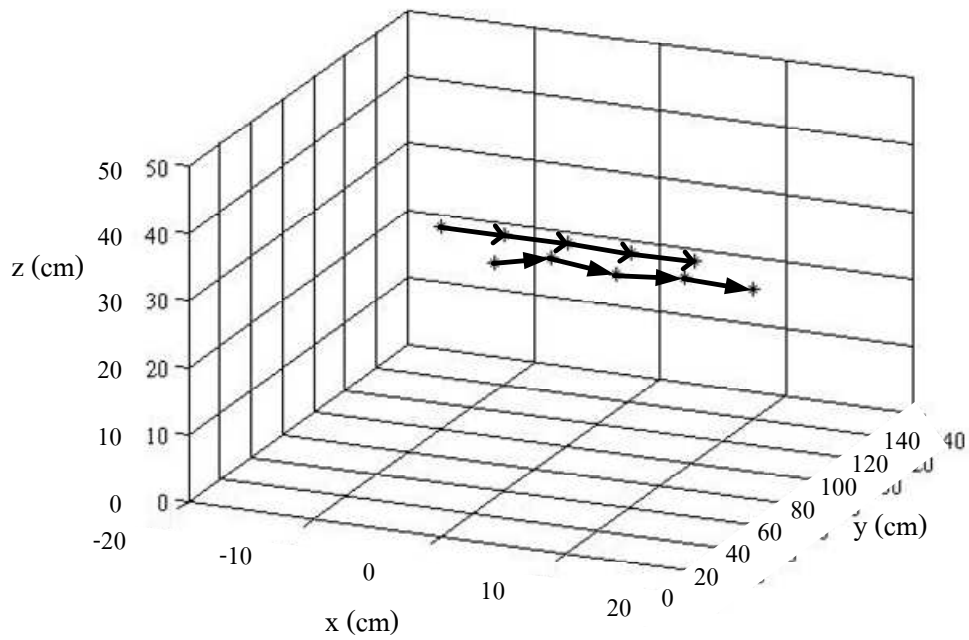
รูปที่ 4.51 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 32 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.52 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

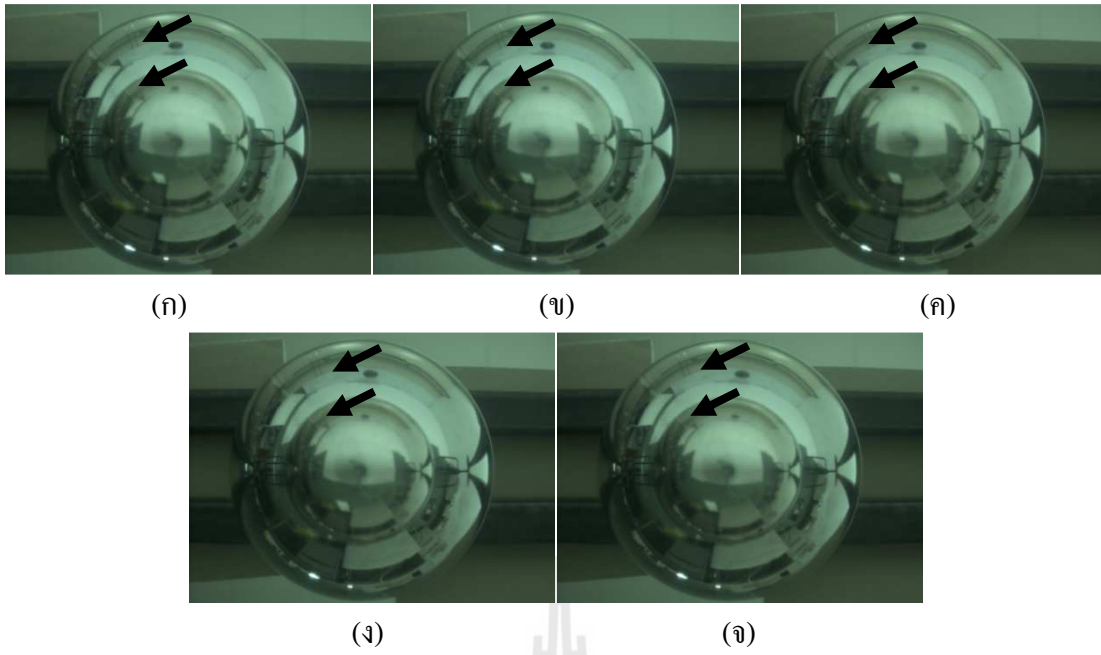


รูปที่ 4.53 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32

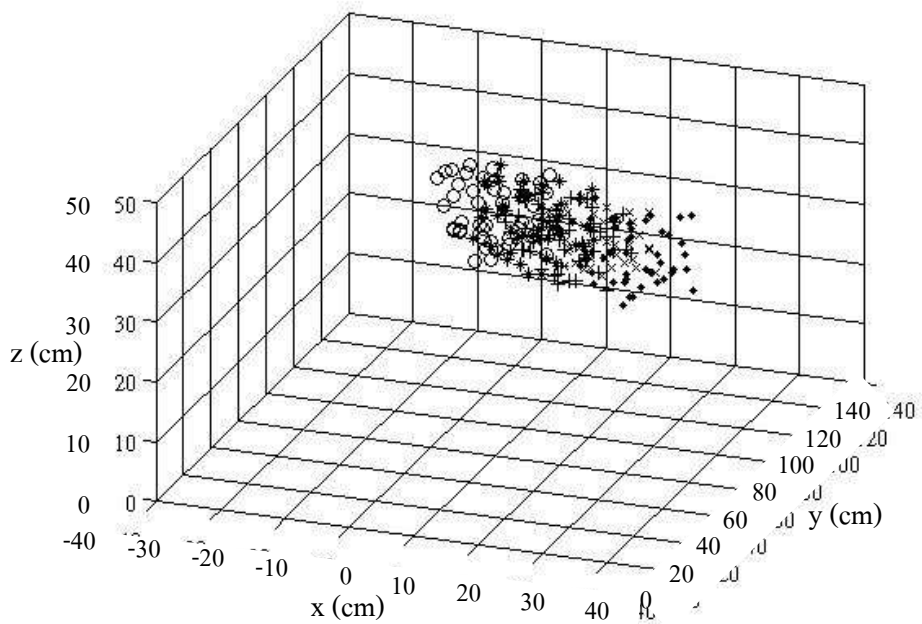


รูปที่ 4.54 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

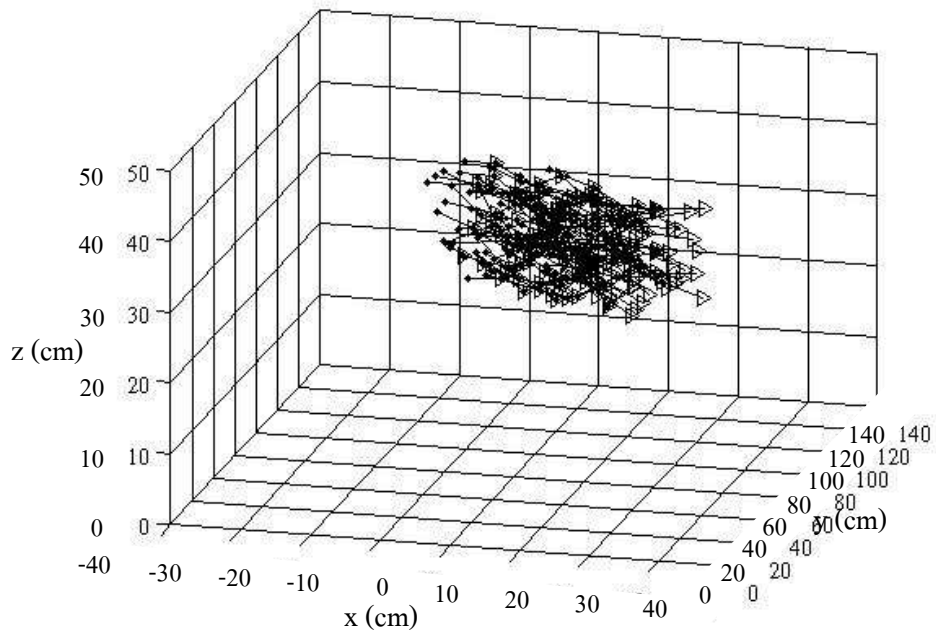
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 33 ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.56 รูปที่ 4.57 และรูปที่ 4.58



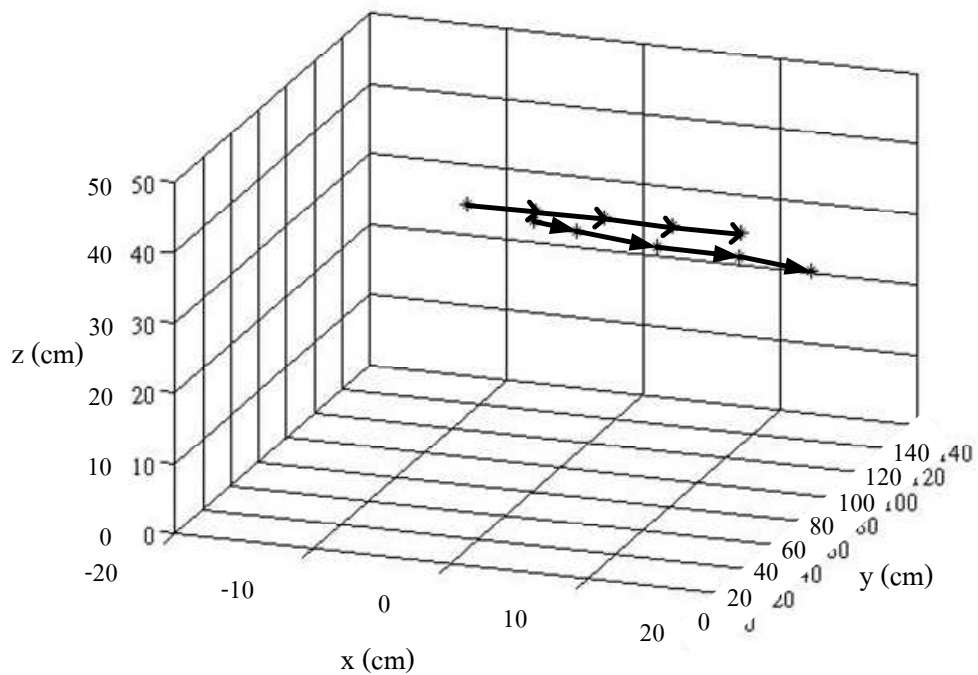
รูปที่ 4.55 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 33 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.56 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5



รูปที่ 4.57 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33

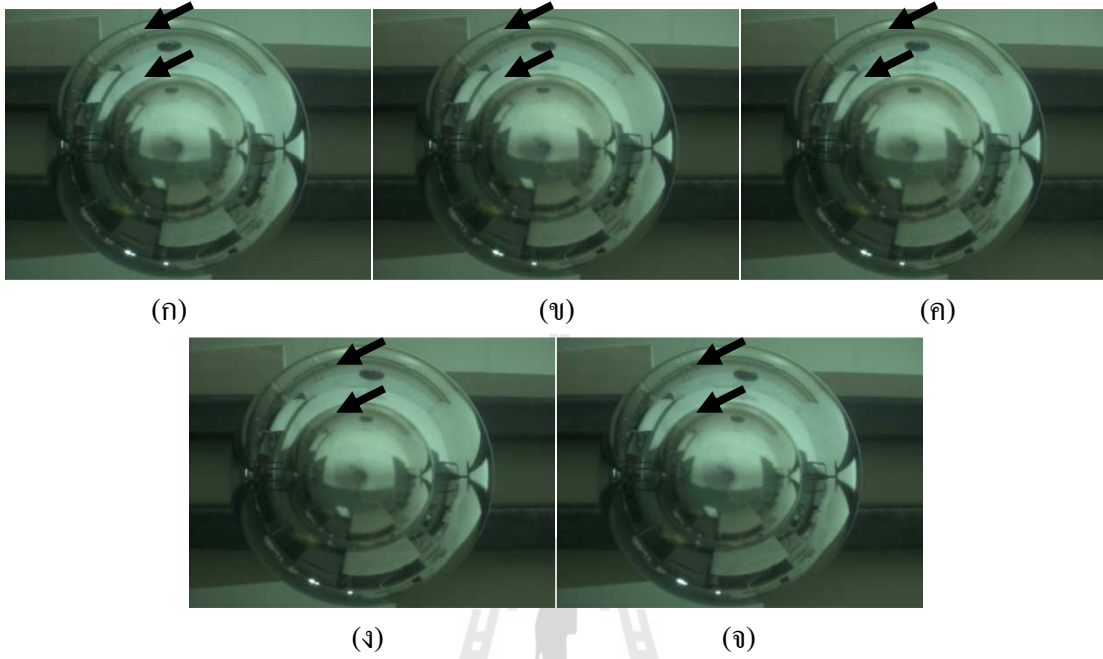


รูปที่ 4.58 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )

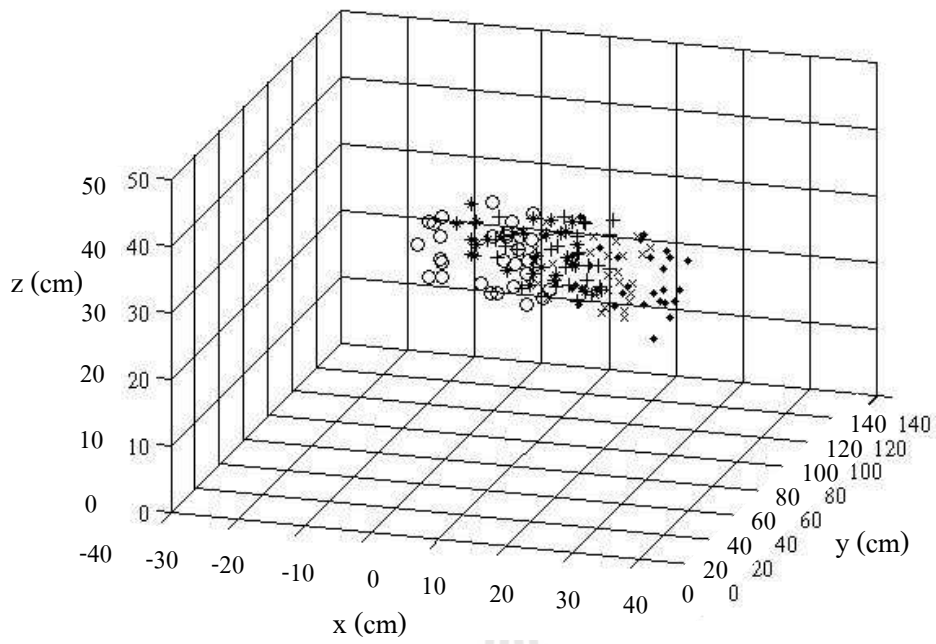
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )



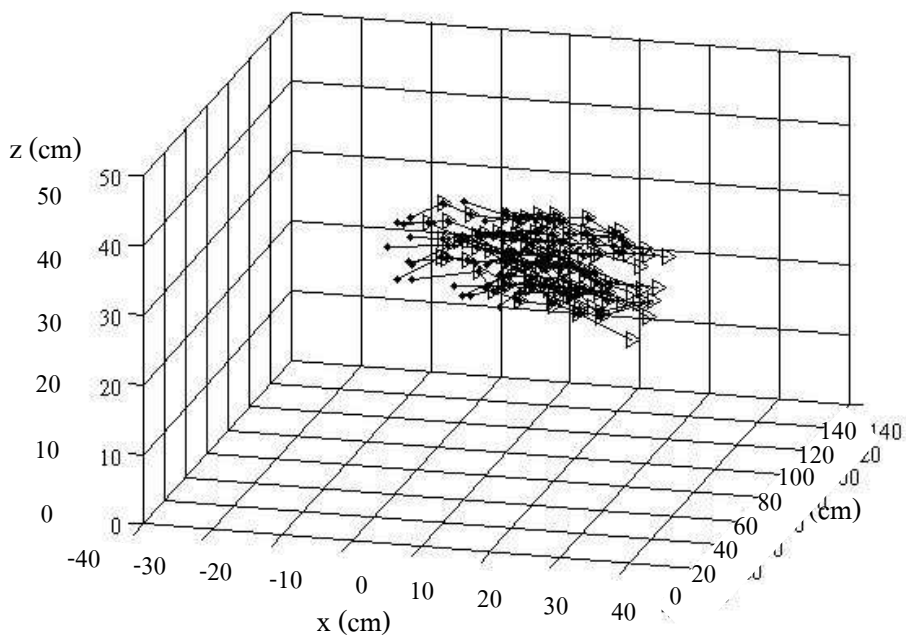
- เลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 41 ดังแสดงในรูปที่ 4.59 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.60 รูปที่ 4.61 และรูปที่ 4.62



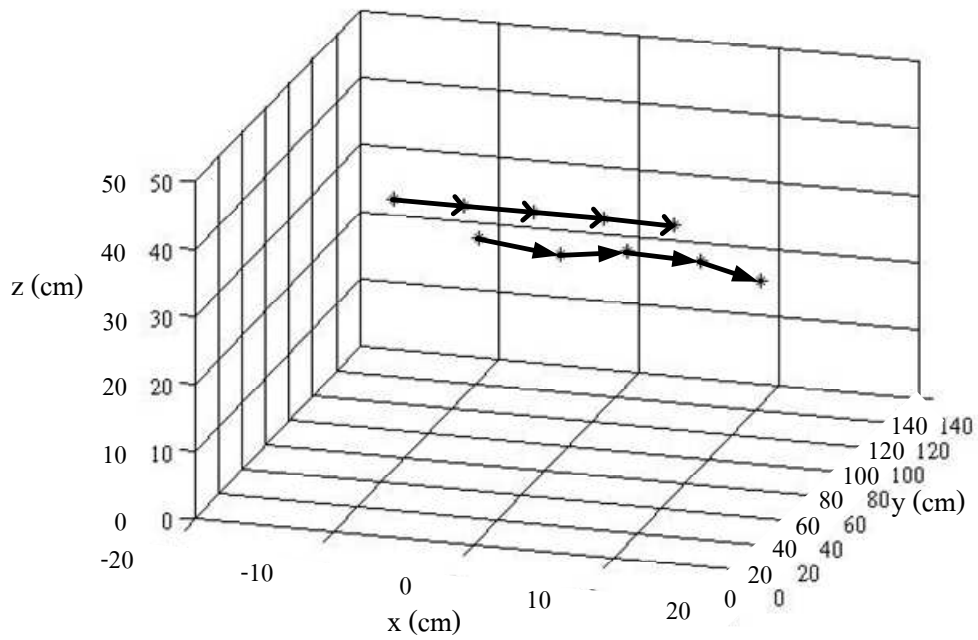
รูปที่ 4.59 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 41 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.60 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41 โดย o เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

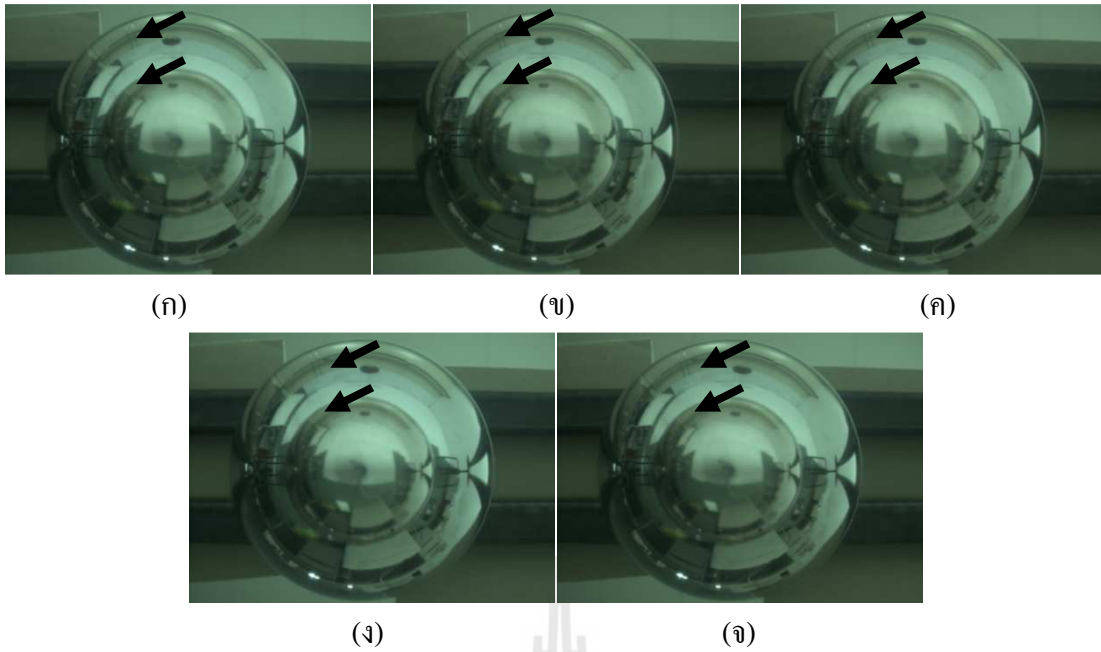


รูปที่ 4.61 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41

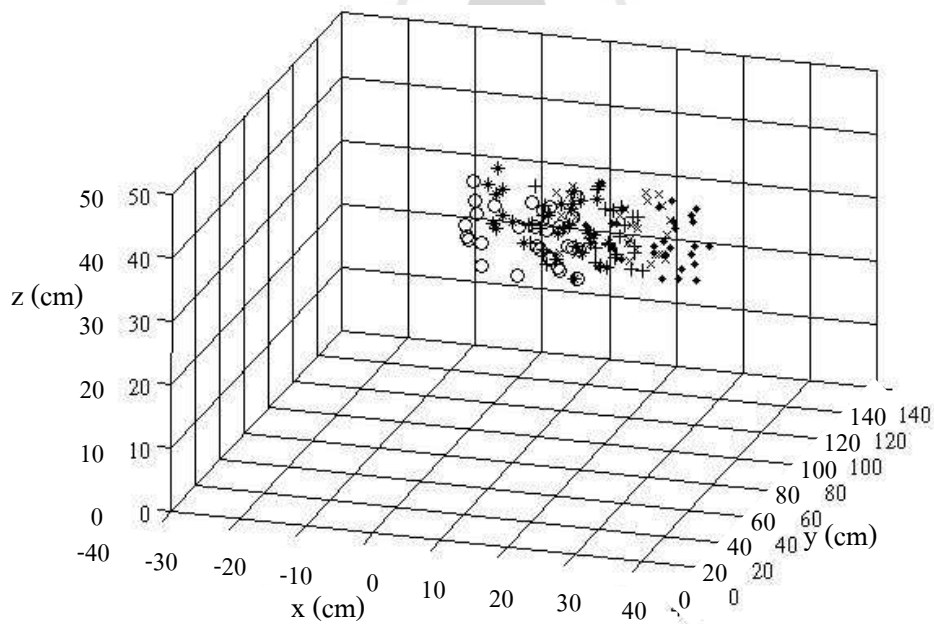


รูปที่ 4.62 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

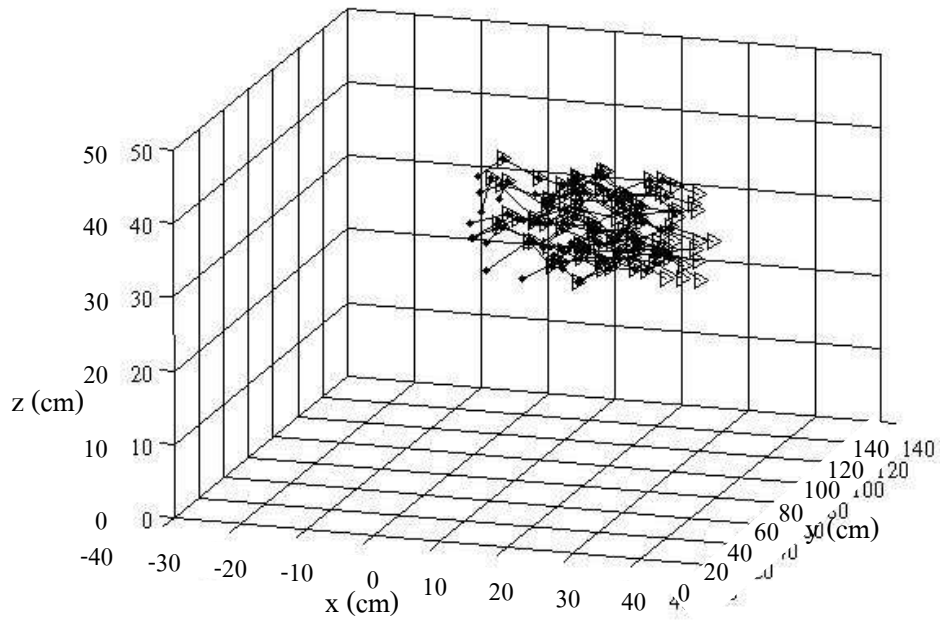
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 42 ดังแสดงในรูปที่ 4.63 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.64 รูปที่ 4.65 และรูปที่ 4.66



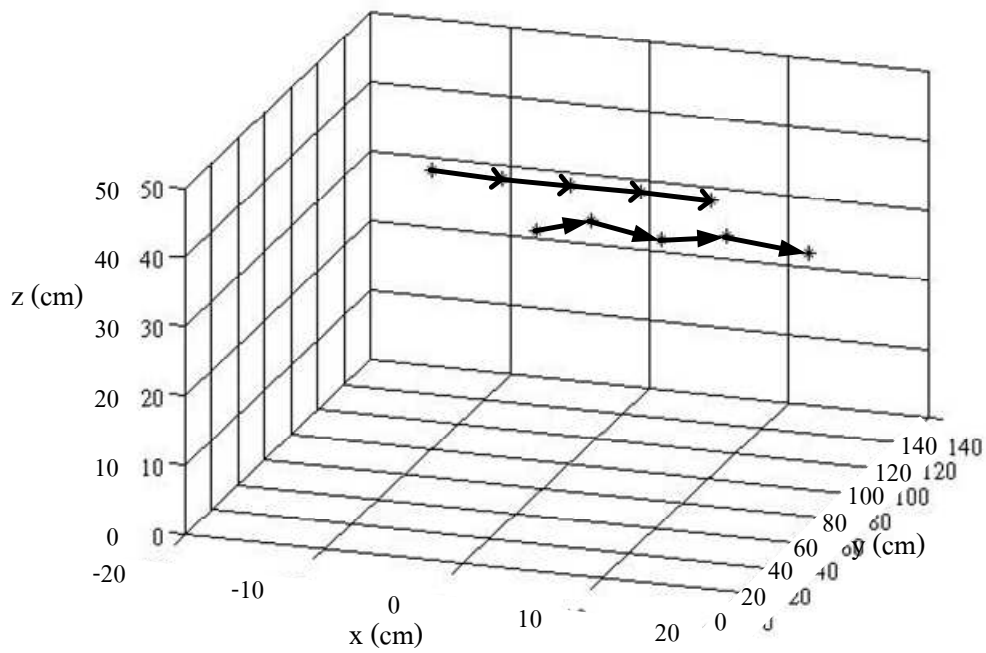
รูปที่ 4.63 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 42 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.64 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
“\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5

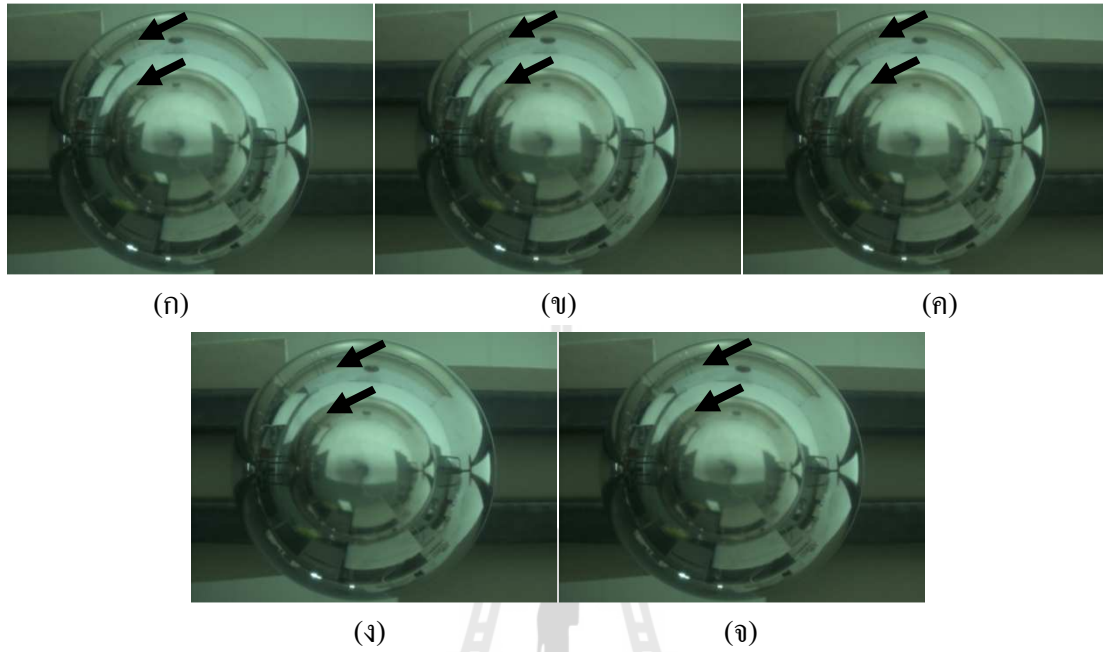


รูปที่ 4.65 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42

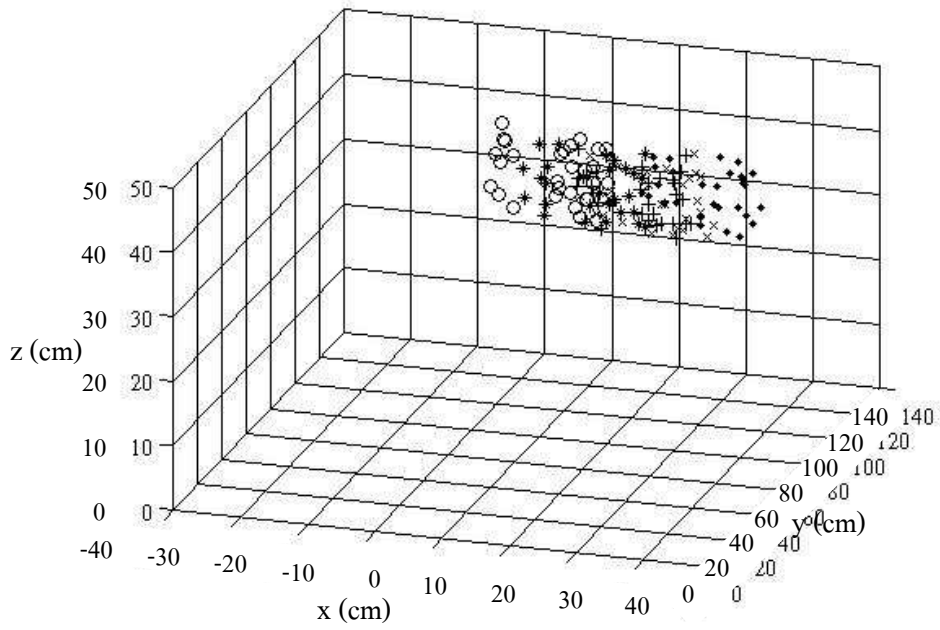


รูปที่ 4.66 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

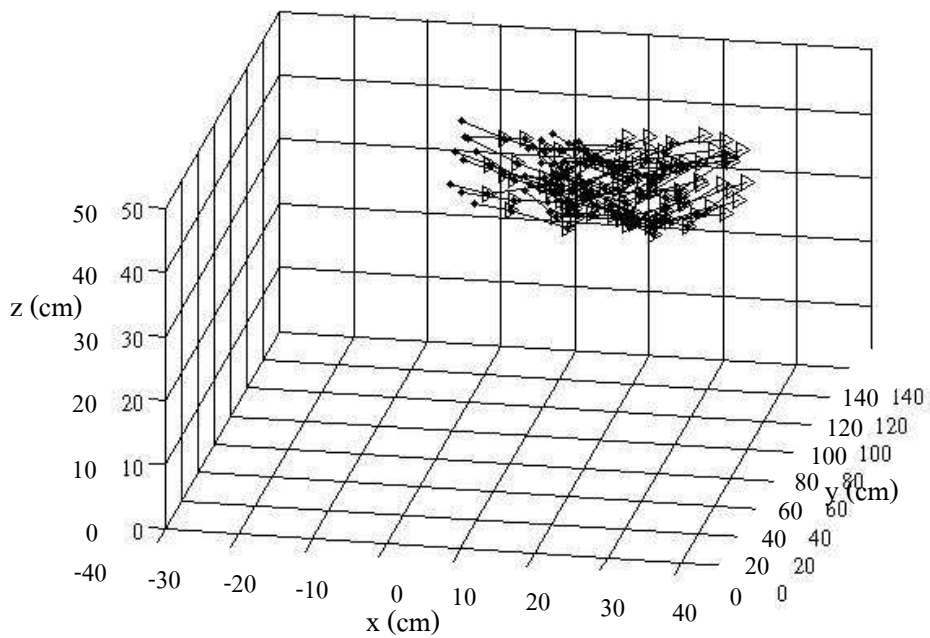
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 43 ดังแสดงในรูปที่ 4.67 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.68 รูปที่ 4.69 และรูปที่ 4.70



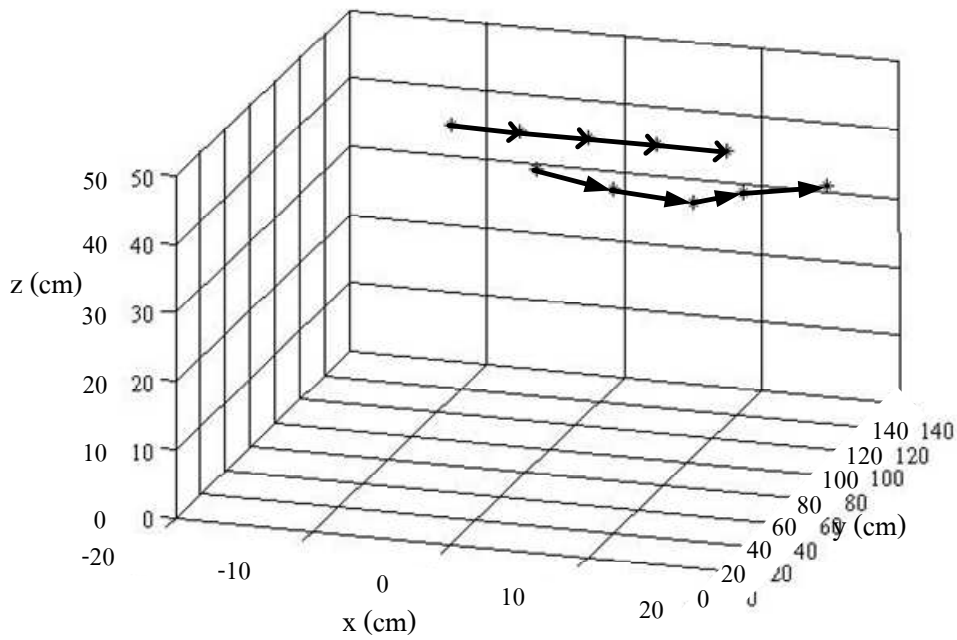
รูปที่ 4.67 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 43 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.68 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น  
 “\*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5



รูปที่ 4.69 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43



รูปที่ 4.70 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง ( $\rightarrow$ )  
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง ( $\rightarrow$ )

#### 4.5 ตารางผลการทดสอบตอนที่ 4.3

จากการทดลองที่ 4.3 สามารถแสดงตำแหน่งของวัตถุทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 โดยค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุทดสอบหาได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งพิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบกับพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-5,51.23,10)	(-6.55,52.92,8.17)	(1.55,1.69,1.83)
2	(0,51.23,10)	(-1.12,53.31,8.71)	(1.12,2.08,1.29)
3	(5,51.23,10)	(4.03,54.14,8.12)	(0.97,2.91,1.88)
4	(10,51.23,10)	(8.75,52.9,7.53)	(1.25,1.67,2.47)



ตารางที่ 4.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของวัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(0,51.23,10)	(-1.21,53.16,8.12)	(1.21,1.93,1.88)
2	(0,51.23,15)	(-0.94,52.92,12.71)	(0.94,1.69,2.29)
3	(0,51.23,20)	(-1.46,55.32,18.96)	(1.46,4.09,1.04)
4	(0, 51.23,25)	(-1.32,54.87,23.12)	(1.32,3.64,1.88)

ตารางที่ 4.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน XYZ

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของวัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(0,51.23,10)	(-1.34,53.31,8.11)	(1.34,2.08,1.89)
2	(3.6,54.83,15)	(2.46,57.52,14.14)	(1.14,2.69,0.86)
3	(7.2,58.43,20)	(6.05,60.18,17.85)	(1.15,1.75,2.15)
4	(10.8,62.03,25)	(9.56,65.21,22.04)	(1.24,3.18,2.96)

#### 4.6 ตารางผลการทดสอบตอนที่ 4.4

จากการทดลองที่ 4.3 สามารถแสดงตำแหน่งของวัตถุทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ถึงตารางที่ 4.15 โดยค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุทดสอบหาได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งของพิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบกับพิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ

ตารางที่ 4.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 11

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,51.23,10)	(-8.25,53.12,8.14)	(1.75,1.89,1.86)
2	(-5,51.23,10)	(-3.54,53.59,7.78)	(1.46,2.36,2.22)
3	(0,51.23,10)	(1.05,52.45,8.56)	(1.05,1.22,1.44)
4	(5,51.23,10)	(6.59,53.17,8.09)	(1.59,1.94,1.91)
5	(10,51.23,10)	(12.34,53.84,7.91)	(2.34,2.61,2.09)

ตารางที่ 4.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 12

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,81.23,10)	(-7.94,84.21,7.51)	(2.06,2.98,2.49)
2	(-5,81.23,10)	(-3.14,83.87,7.65)	(1.86,2.64,2.35)
3	(0,81.23,10)	(1.52,84.05,7.34)	(1.52,2.82,2.63)
4	(5,81.23,10)	(7.12,84.55,8.12)	(2.12,3.32,1.88)
5	(10,81.23,10)	(8.29,83.92,7.46)	(1.71,2.69,2.54)

ตารางที่ 4.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 13

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,111.23,10)	(-6.48,114.37,6.92)	(3.52,3.14,3.08)
2	(-5,111.23,10)	(-2.76,115.11,7.86)	(2.24,3.88,2.14)
3	(0,111.23,10)	(2.28,114.71,7.61)	(2.28,3.48,2.39)
4	(5,111.23,10)	(8.29,114.43,6.58)	(3.29,3.2,3.42)
5	(10,111.23,10)	(13.24,113.96,7.43)	(3.24,2.73,2.57)

ตารางที่ 4.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 21

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,51.23,20)	(-7.95,53.74,17.65)	(2.05,2.51,2.35)
2	(-5,51.23,20)	(-3.23,54.16,18.07)	(1.77,2.93,1.93)
3	(0,51.23,20)	(2.15,53.56,17.71)	(2.15,2.33,2.29)
4	(5,51.23,20)	(6.84,52.73,17.24)	(1.84,1.5,2.76)
5	(10,51.23,20)	(12.35,54.27,17.82)	(2.35,3.04,2.18)

ตารางที่ 4.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 22

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,81.23,20)	(-7.12,84.69,16.94)	(2.88,3.46,3.06)
2	(-5,81.23,20)	(-2.64,85.14,17.23)	(2.36,3.91,2.77)
3	(0,81.23,20)	(2.52,84.31,17.51)	(2.52,3.08,2.49)
4	(5,81.23,20)	(6.83,84.97,17.16)	(1.83,3.74,2.84)
5	(10,81.23,20)	(13.14,84.32,16.74)	(3.14,3.09,3.26)

ตารางที่ 4.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 23

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,111.23,20)	(-6.57,115.82,16.35)	(3.43,4.59,3.65)
2	(-5,111.23,20)	(-1.54,115.96,16.43)	(3.46,4.73,3.57)
3	(0, 111.23,20)	(2.76,114.78,15.68)	(2.76,3.55,4.32)
4	(5,111.23,20)	(8.59,114.69,17.24)	(3.59,3.46,2.76)
5	(10,111.23,20)	(13.24,115.78,16.67)	(3.24,4.55,3.33)

ตารางที่ 4.10 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 31

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,51.23,30)	(-6.57,54.46,26.59)	(3.43,3.23,3.41)
2	(-5,51.23,30)	(-2.36,54.57,26.71)	(2.64,3.34,3.29)
3	(0,51.23,30)	(3.09,55.14,27.15)	(3.09,3.91,2.85)
4	(5,51.23,30)	(8.49,54.37,26.42)	(3.49,3.14,3.58)
5	(10,51.23,30)	(13.76,54.21,26.13)	(3.76,2.98,3.87)

ตารางที่ 4.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 32

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้จากวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,81.23,30)	(-6.22,84.91,25.08)	(3.78,3.68,4.92)
2	(-5,81.23,30)	(-1.85,85.32,26.79)	(3.15,4.09,3.21)
3	(0,81.23,30)	(3.26,85.67,25.61)	(3.26,4.44,4.39)
4	(5,81.23,30)	(8.74,85.29,26.54)	(3.74,4.06,3.46)
5	(10,81.23,30)	(14.16,85.63,26.17)	(4.16,4.40,3.83)

ตารางที่ 4.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 33

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้จากวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,111.23,30)	(-5.61,115.69,27.57)	(4.39,4.46,2.43)
2	(-5,111.23,30)	(-2.44,115.94,26.78)	(2.56,4.71,3.22)
3	(0,111.23,30)	(3.54,114.89,26.16)	(3.54,3.66,3.84)
4	(5,111.23,30)	(9.32,116.21,25.75)	(4.32,4.98,4.25)
5	(10,111.23,30)	(14.62,115.74,25.06)	(4.62,4.51,4.94)

ตารางที่ 4.13 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 41

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้จากวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,51.23,40)	(-4.65,59.31,33.72)	(5.35,8.08,6.28)
2	(-5,51.23,40)	(1.24,58.41,32.53)	(6.24,7.18,7.47)
3	(0,51.23,40)	(5.88,60.31,33.46)	(5.88,9.08,6.54)
4	(5,51.23,40)	(11.06,60.79,32.93)	(6.06,9.56,7.07)
5	(10,51.23,40)	(15.67,57.26,31.58)	(5.67,6.03,8.42)

ตารางที่ 4.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 42

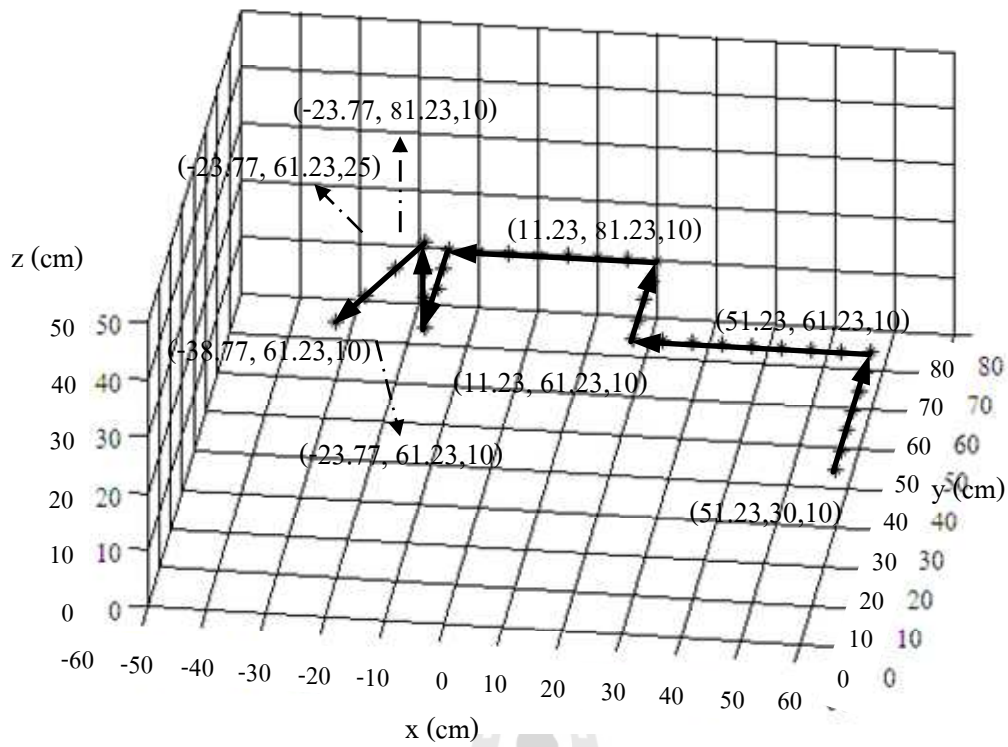
ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,81.23,40)	(-3.21,88.94,31.41)	(6.79,7.71,8.59)
2	(-5,81.23,40)	(0.64,89.16,33.65)	(5.64,7.93,6.35)
3	(0,81.23,40)	(5.87,87.61,32.25)	(5.87,6.38,7.75)
4	(5,81.23,40)	(10.32,90.07,33.21)	(5.32,8.84,6.79)
5	(10,81.23,40)	(16.25,89.23,32.11)	(6.25,8.00,7.89)

ตารางที่ 4.15 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 43

ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,111.23,40)	(-4.54,119.56,33.26)	(5.46,8.33,6.74)
2	(-5,111.23,40)	(1.24,117.73,31.81)	(6.24,6.5,8.19)
3	(0,111.23,40)	(6.76,120.74,30.19)	(6.76,9.51,9.81)
4	(5,111.23,40)	(10.65,117.53,32.93)	(5.65,6.3,7.07)
5	(10,111.23,40)	(16.48,120.35,34.53)	(6.48,9.12,5.47)

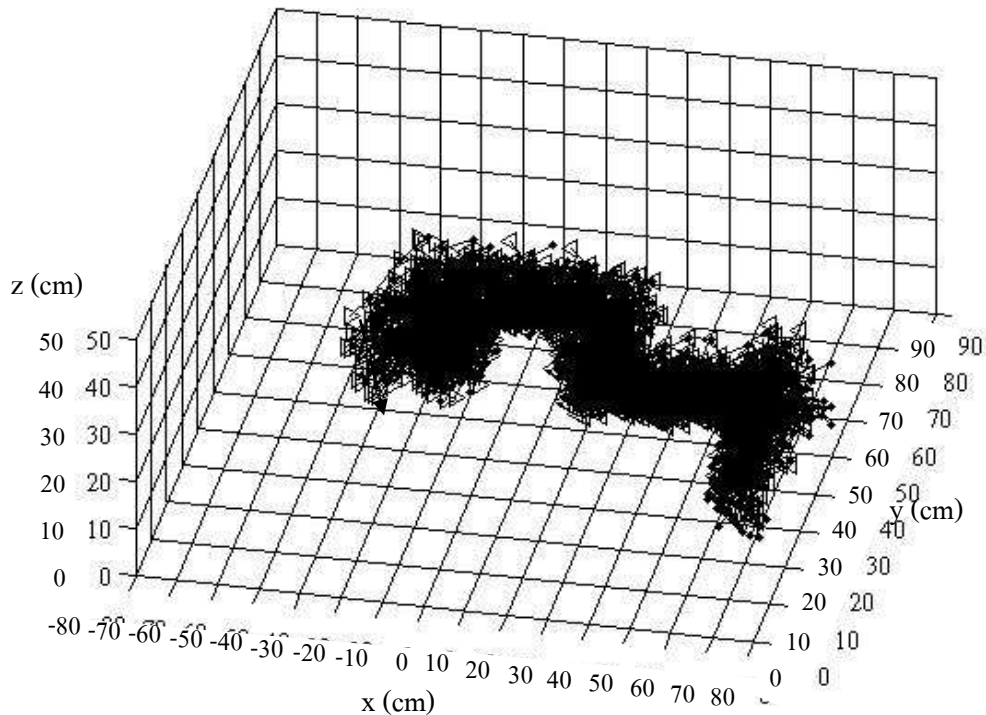
#### 4.7 การเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ติดต่อกัน

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยให้วัตถุเคลื่อนที่ในระยะทางที่ยาวขึ้นโดยเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่าง ๆ ในย่านการทำงานของระบบ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.71 และทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบที่คำนวณได้จากการไหลเชิงแสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.72



รูปที่ 4.71 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบ





รูปที่ 4.72 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบ โดยใช้การไหลเชิงแสง

จากรูปที่ 4.71 จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากระบบสอดคล้องกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจริง แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในย่านการทำงานของระบบ ระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.8 วิเคราะห์และสรุป

จากตารางที่ 4.1 เป็นการเคลื่อนที่ในแนวแกน X จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 0.97 1.67 และ 1.29 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดใแนวแกน X Y และ Z เป็น 1.55 2.91 และ 2.47 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 1.22 2.09 และ 1.87 เซนติเมตรตามลำดับ

จากตารางที่ 4.2 เป็นการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 0.94 1.69 และ 1.04 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดใแนวแกน X Y และ Z เป็น 1.46 4.09 และ 2.29 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 1.23 2.84 และ 1.77 เซนติเมตรตามลำดับ





จากตารางที่ 4.11 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 32 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.15 3.68 และ 3.21 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 4.16 4.44 และ 4.92 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.62 4.13 และ 3.96 เซนติเมตรตามลำดับ

จากตารางที่ 4.12 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 33 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 2.56 3.66 และ 2.43 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 4.62 4.98 และ 4.94 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.89 4.46 และ 3.74 เซนติเมตรตามลำดับ

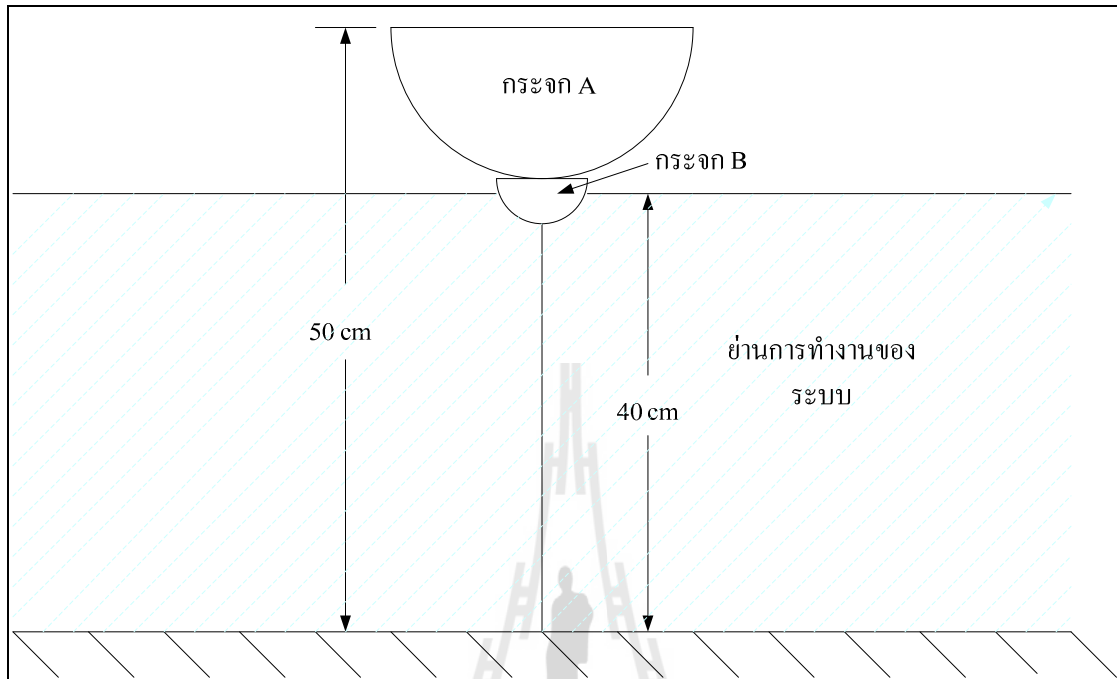
จากตารางที่ 4.13 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 41 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.35 6.03 และ 6.28 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 6.24 9.56 และ 8.42 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.84 7.99 และ 7.16 เซนติเมตรตามลำดับ

จากตารางที่ 4.14 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 42 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.32 6.38 และ 6.35 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 6.79 8.84 และ 8.59 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.97 7.77 และ 7.47 เซนติเมตรตามลำดับ

จากตารางที่ 4.15 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 43 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.46 6.30 และ 5.47 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 6.76 9.51 และ 9.81 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 6.12 7.95 และ 7.46 เซนติเมตรตามลำดับ

จากผลการทดลองที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดลองโดยการเคลื่อนที่วัตถุในแนวแกนต่าง ๆ ในบริเวณที่อยู่ใกล้กับแกนเชิงแสงในระยะ 51.23-62.03 เซนติเมตร และสูงจากพื้นไม่เกิน 25 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุจะมีค่าความผิดพลาดน้อยคือน้อยกว่า 3 เซนติเมตร จากนั้นในการทดลองที่ 4.4 ได้ทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.15 ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่อวัตถุทดสอบอยู่สูงขึ้นจากพื้นไม่เกิน 40 เซนติเมตรค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่า 5 เซนติเมตรซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการทำงานของระบบ และเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นจากพื้นมากกว่า 40 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่า 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นภาพที่ปรากฏบนกระจกโค้งจะอยู่ตรงขอบภาพซึ่งมีความละเอียดของภาพต่ำ โดยย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบแสดงดังรูปที่ 4.72 จากนั้นในการทดลองที่ 4.6 ได้ทำการทดลองโดยทำการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบในช่วงการทำงานของระบบที่มีประสิทธิภาพ ในระยะทางที่ยาวขึ้นซึ่งโดยแนวทางการเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 4.71 โดยผลที่ได้จากรูปที่ 4.72 จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของระบบสอดคล้อง

กับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจริง แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในย่านการทำงานของระบบ ระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.73 ย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบ





## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างระบบการมองเห็น โดยคอมพิวเตอร์เพื่อให้มองเห็นได้รอบทิศทาง ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับและกระบวนการไหลเชิงแสงในการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ โดยทั้งระบบได้ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับหาจุดสามมิติบนผิวกระจกโค้ง การดำเนินงานวิจัยดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดของโครงสร้างระบบการหาตำแหน่งของวัตถุในสถานะแวดล้อมแบบสามมิติ ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งโครงสร้างระบบประกอบไปด้วยการหาพิกัดสามมิติบนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับเนื่องจากกระจกโค้งที่ใช้นั้นไม่ได้ผลิตขึ้นเองทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระจกโค้งอาจมีความผิดเพี้ยนไปจึงมีผลให้เมื่อนำมาใช้งานจริงจะมีค่าความผิดพลาดมาก และนอกจากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมยังช่วยลดความยุ่งยากและซับซ้อนของสมการ อีกทั้งยังลดความผิดพลาดที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ในการจัดตั้งอุปกรณ์ และเพื่อให้ระบบสามารถระบุตำแหน่งในพิกัดสามมิติได้จึงได้ใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว ซึ่งจากการทดสอบโดยการนำตารางปรับเทียบนั้นพบว่ามีความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 1.51 2.98 และ 2.75 เซนติเมตรตามลำดับ โดยค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 0.95 0.47 และ 1.51 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.21 4.6 และ 4.88 เซนติเมตรตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการหาพิกัดสามมิติบนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการคำนวณจุดในพิกัดสามมิติได้

ในบทที่ 4 แสดงรายละเอียดการหาทิศทางและการเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่ในสถานะแวดล้อมจริง โดยการใช้กระบวนการไหลเชิงแสง ซึ่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสามส่วน โดยในส่วนแรกได้ทำการทดสอบระบบโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบเป็นระยะสั้น ๆ 4 จุด ไปในแนวแกน X Y และ XYZ โดยการเคลื่อนที่ที่อยู่ในบริเวณที่ห่างจากแกนเชิงแสงในระยะ 51.23 - 62.03 เซนติเมตร และสูงจากพื้นไม่เกิน 25 เซนติเมตร ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นั้นทั้งทิศทางและตำแหน่งของวัตถุทดสอบที่ได้จากระบบนั้นมีความใกล้เคียงกับทิศทางและตำแหน่งของวัตถุทดสอบที่ได้จากการเคลื่อนที่จริง โดยค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุทดสอบจะมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 3 เซนติเมตร ในส่วนที่สองได้ทำการทดสอบย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งในการทดสอบระบบได้ทำการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบเป็นระยะสั้น ๆ 5 จุดไปแนวแกน X ซึ่งห่างจากกระจกโค้งไปแนวแกน Y เป็นระยะ 51.23

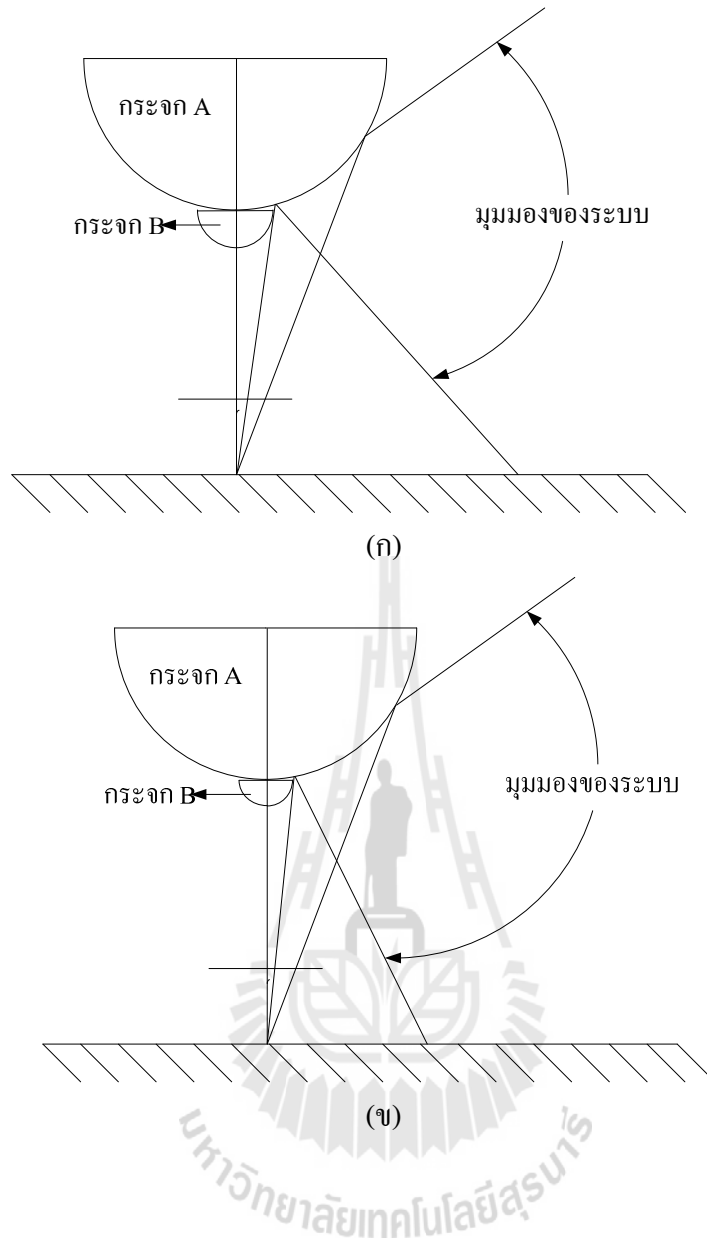
เซนติเมตร แล้วทำการเปลี่ยนตำแหน่งของแนวการเคลื่อนที่ให้สูงขึ้นจากพื้นไปในแนวแกน Z เป็นระยะ 20 30 และ 40 เซนติเมตรตามลำดับ หลังจากนั้นได้เคลื่อนตำแหน่งแนวการเคลื่อนที่ให้ห่างออกจากกระจกโค้งไปในแนวแกน Y เป็นระยะ 81.23 และ 111.23 เซนติเมตรตามลำดับ และเปลี่ยนตำแหน่งของแนวการเคลื่อนที่ให้สูงขึ้นจากพื้นไปในแนวแกน Z เป็นระยะ 20, 30 และ 40 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบทำให้ทราบงานการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบได้ โดยผลที่ได้จากการทดสอบคือเมื่อวัตถุทดสอบอยู่สูงขึ้นไปไม่เกิน 40 เซนติเมตรค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่า 5 เซนติเมตรซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการทำงานของระบบ และเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นไปมากกว่า 40 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่า 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นไปปรากฏบนกระจกโค้งจะอยู่ตรงขอบภาพซึ่งมีความละเอียดของภาพต่ำ และสุดท้ายได้ทำการทดสอบระบบโดยการใส่ลูกบอลเคลื่อนที่ติดต่อกันไปในทิศทางต่าง ๆ ในย่านการทำงานของตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าทิศทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากระบบสอดคล้องกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจริง แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในย่านการทำงานของระบบ ระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคตคือ

1. ในการใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัวจะทำให้มุมมองตรงกลางภาพขาดหายไป ดังนั้นเพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงควรใช้กระจก B ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ระบบมีมุมมองที่กว้างขึ้น และกล้องที่ใช้ควรมีความละเอียดสูงขึ้น โดยตัวอย่างมุมมองของระบบเมื่อกระจก B มีการเปลี่ยนแปลงขนาดแสดงดังรูปที่ 5.1

2. กระจกโค้งที่ใช้ควรจะเป็นกระจกโค้งที่ผลิตขึ้นเองโดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระจกโค้งจะต้องมีความถูกต้องแม่นยำและผิวของกระจก โค้งจะต้องเรียบสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถคำนวณตำแหน่งของวัตถุในสามมิติได้อย่างถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างมุมมองของระบบ (ก) กระฉาก B มีขนาดใหญ่ (ข) กระฉาก B มีขนาดเล็ก



## รายการอ้างอิง

- อาทิตย์ ศรีแก้ว. (2552). **ปัญญาเชิงคำนวณ**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Anandan, P. (1989). A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion. **Int. J. Comp. Vision 2**, pp. 283 - 310
- Baker, S., and Nayar, S. K. (1999). A theory of Single viewpoint catadioptric image formation, **International Journal. on Computer Vision 35(2)**, pp.175 - 196.
- Barron, J.L., and Thacker, N.A. (2005). Tutorial: Computing 2D and 3D Optical Flow, **Tina Memo No.** 2004 - 012.
- Boult, T.E. (1998). Remote reality demonstration. **In IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition**, pp. 966 - 967, Santa Barbara, CA, pp. 23 - 25.
- Burt, P.J., Yen, C. and Xu X. (1983). Multiresolution flow - through motion analysis. **Proc. IEEE CVPR**, Washington, pp. 246 - 252.
- Fiala, M. and A. Basu, A. (2002). Panoramic stereo reconstruction using non-svp optics. **In: 16th International Conference on Pattern Recognition**. Vol. 4. pp. 27 - 30.
- Gaspar, J., and Santos-Victor, J. (1999). Visual path following with a catadioptric panoramic camera. **In Proc. of the 7th International Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS'99)**, pp. 139 - 147.
- Glazer, F., Reynolds, G., and Anandan, P. (1983). Scene matching by hierarchical correlation. **Proc. IEEE CVPR**, Washington, June 1983, pp 432 - 441.
- Hicks, R.A. and Bajcsy, R. (2001). Reflective surfaces as computational sensors. **IVC 19(11)**, pp.773 - 777.
- Horn, B.K.P., Schunck, B.G. (1981). Determining optical flow. **Artificial Intelligence 17**, pp. 185 - 204.
- Horn, B.K.P. and Schunck, B.G. (1993). Determining Optical Flow a Retrospective, **Artificial Intelligence 59(1-2)**, pp. 81 - 87.
- Jongcheol, K., and Yasuo, S. (2007). An Omnidirectional Vision-Based Moving Obstacle Detection in Mobile Robot. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, 5(6),pp. 663-673.
- Little, J.J., and Verri, A. (1989) Analysis of differential and matching methods for optical flow. **IEEE Workshop on Visual Motion**, Irvine CA, pp. 173 - 180.



- Little, J.J., Bulthoff, H.H., and Poggio, T.A. (1988) Parallel optical flow using local voting. **Proc. IEEE ICCV**, pp. 454 - 459.
- Lucas, B.D. and Kanade, T. (1981). An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision, **Proc. DARPA IU Workshop**, pp. 121 - 130.
- Onoe, Yamazawa, Y. K., Takemura, H. and Yokoya, N., (1998). Telepresence by real-time viewdependent image generation from omnidirectional video streams. **Computer Vision and Image Understanding**, 71, pp.588 - 592.
- Southwell, D., A. Basu, A. and Vandergriend, B. (1996). A conical mirror pipeline inspection system. **In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation**, pp. 3253 - 3258.
- Yagi, Y., and Kawato, S. (1990). Panorama Scene Analysis with Conic Projection. **IEEE International Workshop Intelligent Robots and Systems**, Vol. 1, pp.181 - 187.
- Yamasawa, K., Yagi, Y. and Yachida, M. (1993). Omnidirectional Imaging with Hyperboloidal Projection. **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. Vol. 2, 1029 - 1034.



ภาคผนวก ก

รายละเอียดทางเทคนิคของกล่องที่ใช้ในการทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดข้อมูล และคุณสมบัติของกล้องที่นำมาใช้ในการทดสอบรวม ไปถึงขนาดความกว้างและความยาวของตัวกล้อง

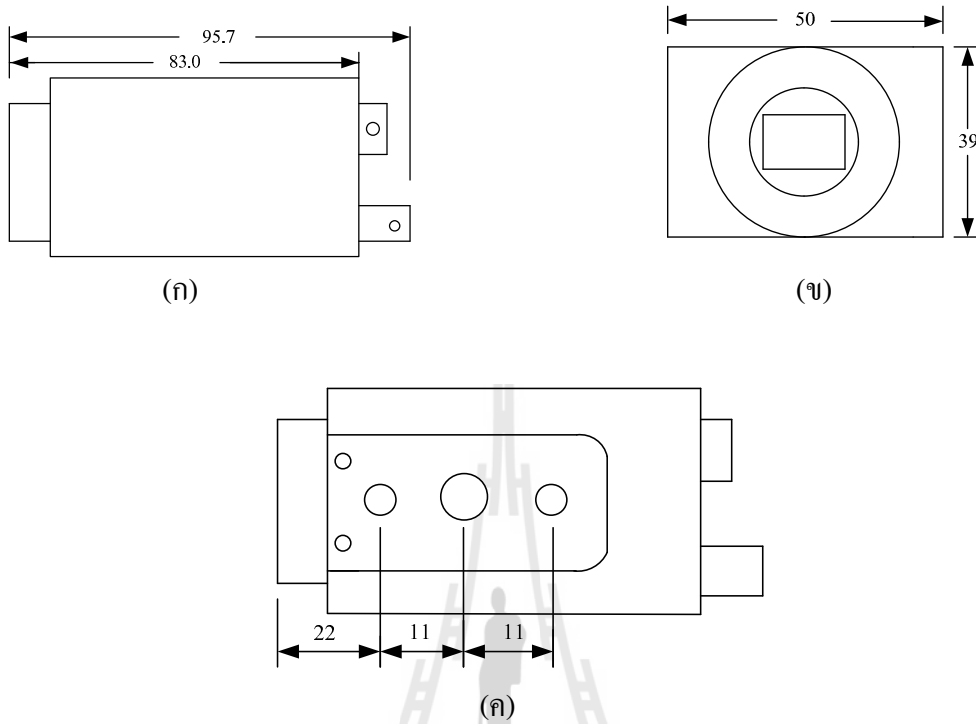


รูปที่ ก.1 กล้องที่นำมาทดสอบ

#### ก.1 ข้อมูลคุณลักษณะ

- 1/2" Progressive scan CCD imager (R, G, B primary color filters)
- 659 x 494 active pixels
- 10-bit RS-644 (LVDS) /Camera Link output
- Full frame shutter
- <56 dB
- Asynchronous reset
- 110 Hz frame rate
- 40 MHz pixel clock
- RS232C interface control
- C-mount lens

## ก.2 ขนาดของตัวกล้อง



รูปที่ ก.2 รายละเอียดขนาดของตัวกล้อง (มม.) (ก) มุมมองด้านข้าง  
(ข) มุมมองด้านบน (ค) มุมมองด้านล่าง

### ก.3 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิค

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของกล้องทดสอบ

CCD Sensor	1/2" Progressive scan CCD (R, G, B primary color mosaic filters)
Chip Size	7.48 mm x 6.15 mm
Unit Cell Size (H x V)	9.9 mm x 9.9 mm
Effective Pixels (H x V)	659 x 494
Pixel Clock	40 MHz (80 MHz for master clock)
Frame Rate	110 fps
Sync.	HD: 55.6 KHz; VD: 110.0 Hz
Digital Video Output	10-bit RS-644
Analog Video Output	1 V p-p, 75ohm (BNC or 12 pin Hirose)
S/N Ratio	<56 dB
Min. Illumination	3 lux
Gain	MGC
Gamma	1.0
Electronic Shutter	1/110 ~ 1/110,000 selectable
Lens Mount	C-Mount
Operating Temperature	-10 °C ~ +50 °C
Power Requirement	12V DC, 280 mA, 3.4 W
Dimension	50mm x 39mm x 83mm
Ext. Sync.	Internal/External Auto Switch
Asynchronous Reset	Standard
Weight	200 g

ภาคผนวก ข  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Srikaew, A. and Thonginta, E. (2010). 3D Object Tracking System Base On Neural Network And Imperfect - Curved - Mirror Omnivision. **Proceedings of Neural, Parallel, and Scientific Computations 4 (2010), Georgia, USA.**



ภาคผนวก ค

ประวัติผู้วิจัย





### ประวัติผู้วิจัย

**ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว** เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2515 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีใน สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาโทและปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Vanderbilt University ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อ พ.ศ. 2540 และ 2543 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรม ไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความสนใจงานวิจัยทางด้าน การมองเห็นของคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ การประมวลผลภาพ และระบบทางปัญญาประดิษฐ์

**นายเอกภาพ ทองอินตะ** เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนท่าวังผาพิทยาคม จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรม ไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ได้สอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ (2) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1

