

**การบูรณะสถานะแวดล้อม 3 มิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก
และการไหลเชิงแสง**

นายเอกภาพ ทองอินตะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

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

Eakaphap Thonginta

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

การบูรณะสถานะแวดล้อม 3 มิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก
และการไหลเชิงแสง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกมล)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ร.อ. ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เอกภาพ ทองอินตะ : การบูรณะสถานะแวดล้อม 3 มิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก และการไหลเชิงแสง (3D ENVIRONMENT RECONSTRUCTION USING CATADIOPTRIC SENSOR AND OPTICAL FLOW) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, 128 หน้า.

ระบบการมองเห็นโดยคอมพิวเตอร์ (Computer vision) ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อลดผลของความยุ่งยากในการจะนำไปใช้งานจริง ยกตัวอย่างเช่นมุมมองในการมองเห็นที่แคบมีผลทำให้การประชุมทางไกล (Teleconference) ไม่สามารถมองเห็นสมาชิกผู้เข้าร่วมประชุม ได้ครอบคลุม เป็นผลให้อาจเกิดการสื่อสารที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ หรือความชัดเจนของการมองเห็นอาจมีผลต่อรูปร่างของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังมีความยุ่งยากของระบบการมองเห็นอีกหลายประการ จึงเป็นผลให้มีการศึกษาและวิจัยงานในด้านนี้ อย่างกว้างขวาง ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - 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 ทำให้สามารถรู้ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในระบบสามมิติได้ซึ่งระบบที่ได้สามารถตรวจจับวัตถุในระนาบสามมิติโดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 5 เซนติเมตร

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

EAKAPHAP THONGINTA : 3D ENVIRONMENT RECONSTRUCTION
USING CATADIOPTIC SENSOR AND OPTICAL FLOW : THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. ARTHIT SRIKAEW, Ph.D. 128 PP.

CATADIOPTIC/OMNIDIRECTIONAL/OPTICAL FLOW

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.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จสิ้นตามวัตถุประสงค์ล่วงหน้าด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ในทุก ๆ ด้าน ที่เกิดประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยคงมีอาจจะเลยที่จะกล่าวถึง บุคคล กลุ่มบุคคล และคณะ ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้ความรู้ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างมาก ได้สอนให้ข้าพเจ้าได้รู้จักความรับผิดชอบในการทำวิจัย ด้วยความเมตตาเสมอมา และสละเวลาตรวจสอบ แนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติ อัครกิจมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณอัญชุลี รักคำนกลาง คุณภัทราวรรณ สิทธิกวินกุล และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ พี่ชมพู ทรัพย์ปทุมสิน ภาณุพงษ์ เพชรเลิศ และน้องอัศวิน แซ่ตั้ง ที่ได้ให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในทุก ๆ ด้านจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณพิทยา ดิกกล้า คุณศุภกิตติ พรหมวิกร เพื่อนบัณฑิตที่ช่วยตรวจทานการจัดพิมพ์รูปเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ให้กำลังใจ รวมทั้งคอยช่วยเหลือทางด้านต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ศศิธร นาคราช ที่คอยช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา ในยามทุกข์และเวลาที่ผู้วิจัยท้อแท้ ก็ช่วยให้ผู้วิจัยมีกำลังใจที่จะเผชิญกับปัญหา ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความรัก ความเข้าใจ ไม่ว่าผู้วิจัยจะเกิดปัญหาอะไรก็เข้าใจผู้วิจัยเสมอมา อีกทั้งให้การอบรม เลี้ยงดู และส่งเสริมทางด้านการศึกษาของผู้วิจัยอย่างดีที่สุดมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

เอกภาพ ทองอินดี๊ะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	2
2 ปรัชมนวัตกรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 การไหลเชิงแสง (optical flow).....	6
2.2.1 Gradient Base Method.....	5
2.2.2 Region - Based Matching.....	9
2.3 โครงข่ายประสาทเทียม.....	9
2.3.1 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network architecture).....	10
2.3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงข่ายประสาทเทียม (Transfer function).....	12
2.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (Backpropagation Neuron Network).....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้อง..... 16
2.4.1	แบบจำลองภาพฉายที่สนะมิติ..... 17
2.4.2	แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาด..... 17
2.4.3	แบบจำลอง Affine..... 18
2.5	สมการการฉาย (Projection) ของจุดในพิกัดสามมิติ (3D point)..... 19
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 21
2.7	สรุป..... 28
3	การหาจุดในพิกัดสามมิติ..... 29
3.1	บทนำ..... 29
3.2	สมการการคำนวณหาจุดในพิกัดสามมิติ..... 30
3.3	สมการการสะท้อนของจุดสามมิติโดยใช้กระจกโค้ง 2 ตัว..... 33
3.4	การหาจุดสามมิติ บนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม..... 34
3.4.1	ผลการทดสอบ..... 40
3.5	การคำนวณหาจุดในพิกัดสามมิติจากจุดบนผิวกระจกโค้ง..... 41
3.6	สรุป..... 42
4	การบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก และการไหลเชิงแสง..... 43
4.1	บทนำ..... 43
4.2	การไหลเชิงแสง (Optical flow)..... 43
4.3	ผลการทดสอบระบบ..... 44
4.4	ทดสอบย่านการทำงานของระบบ..... 69
4.5	ตารางผลการทดสอบตอนที่ 4.3..... 99
4.6	ตารางผลการทดสอบตอนที่ 4.4..... 100
4.7	การเคลื่อนที่ของวัตถุซึ่งเคลื่อนที่ติดต่อกัน..... 105
4.8	วิเคราะห์และสรุป..... 106

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	110
5.1 สรุป.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
รายงานอ้างอิง.....	113
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดทางเทคนิคของกล้องที่ใช้ในการทดสอบ.....	115
ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กรณี A).....	38
3.2 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กรณี B).....	39
3.3 ผลการทดลองการคำนวณจุดในพิกัดสามมิติ.....	41
4.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X.....	99
4.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z.....	100
4.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน XYZ.....	100
4.4 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 11.....	100
4.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 12.....	101
4.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 13.....	101
4.7 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 21.....	101
4.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 22.....	102
4.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 23.....	102
4.10 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 31.....	102
4.11 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 32.....	103
4.12 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 33.....	103
4.13 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 41.....	103
4.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 42.....	104
4.15 ทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวที่ 43.....	104
ก.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของกล่องทดสอบ.....	118

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การไหลเชิงแสง.....	4
2.2 การไหลเชิงแสง (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade.....	8
2.3 แบบจำลองเซลล์ประสาทเทียมหลายอินพุต.....	11
2.4 รูปแบบสัญลักษณ์เซลล์ประสาทเทียม.....	11
2.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฮาร์ดลิมิต.....	12
2.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง.....	12
2.7 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอก ซิกมอยด์.....	13
2.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ซิกมอยด์.....	13
2.9 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	14
2.10 การกำหนดพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	14
2.11 แกนอ้างอิงสำหรับระบบกล้อง/เลนส์.....	17
2.12 แบบจำลองการสะท้อนของภาพ.....	19
2.13 มุมมองของกระจกแบบต่าง ๆ (ก) กระจกทรงไฮเปอร์โบล่า (ข) กระจกทรงกลม (ค) กระจกทรงกรวย.....	22
2.14 กระจกโค้งแบบต่าง ๆ (ก) ทรงวงรี (ข) ทรงไฮเปอร์โบล่า (ค) ทรงกรวย.....	24
2.15 การสะท้อนของผิวกระจกโค้ง (ก) การสะท้อนซึ่งตัดกับจุดโฟกัส (ข) การสะท้อนแบบตั้งฉาก.....	25
2.16 ผลการใช้สมการเชิงอนุพันธ์กับกระจกโค้ง (ก) ตารางเปรียบเทียบ (ข) ภาพที่ได้ จากกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม (ค) ภาพที่ได้จากกระจกโค้งรูปพาราโบล่า (ง) ภาพหลังจากใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแปลงตารางเปรียบเทียบ.....	26
2.17 แบบจำลองระบบกระจกของ Fiala and Basu (2002).....	27
3.1 แผนผังการบูรณะสภาวะแวดล้อมสามมิติ.....	29
3.2 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ ตัดขวางตามแนวแกน Z.....	31
3.4 แบบจำลองการฉายของจุดในพิกัดสามมิติ ตัดขวางตามแนวแกน Z โดยใช้กระจกโค้ง 2 ตัว.....	33
3.5 ภาพด้านข้างของกระจกโค้ง A.....	35
3.6 ภาพด้านล่างของกระจกโค้ง A.....	36
3.7 เป้าหมายของระบบที่ได้จากการวัด (ก) กระจกโค้ง A (ข) กระจกโค้ง B.....	37
3.8 ผลจากการฝึกสอนด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (ก) กระจกโค้ง A (ข) กระจกโค้ง B.....	40
3.9 ภาพถ่ายตารางเปรียบเทียบ.....	41
3.10 กราฟเปรียบเทียบระหว่างจุดจริง (*) กับจุดที่คำนวณได้ (o).....	42
4.1 โครงสร้างการคำนวณการไหลเชิงแสงแบบสามมิติ.....	43
4.2 แบบจำลองการทดสอบระบบ.....	44
4.3 ภาพวัตถุทดสอบ.....	45
4.4 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน X.....	45
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 ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$	47
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 ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$	49
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 ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4	52
4.9 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4	52
4.10 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน Z	53
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 ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ * เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$	55
4.12 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ * เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$	57
4.12 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ * เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$	59
4.14 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4	60
4.15 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4	60
4.16 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบในแนวแกน XYZ	61
4.17 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ * เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$	65
4.19 การไหลของแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่ที่เวลา $t+1$	67
4.20 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “ o ” เป็นจุดเริ่มต้น “ $*$ ” เป็นจุดที่ 2 “ $+$ ” เป็นจุดที่ 3 “ \times ” เป็นจุดที่ 4.....	68
4.21 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4.....	68
4.22 การเคลื่อนที่ในย่านทดสอบ.....	69
4.23 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 11 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	70
4.24 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 11 โดย “ o ” เป็นจุดเริ่มต้น “ $*$ ” เป็นจุดที่ 2 “ $+$ ” เป็นจุดที่ 3 “ \times ” เป็นจุดที่ 4 “ \bullet ” เป็นจุดที่ 5.....	71
4.25 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 11.....	71
4.26 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow).....	71
4.27 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 12 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	72
4.28 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 12 โดย “ o ” เป็นจุดเริ่มต้น “ $*$ ” เป็นจุดที่ 2 “ $+$ ” เป็นจุดที่ 3 “ \times ” เป็นจุดที่ 4 “ \bullet ” เป็นจุดที่ 5.....	73
4.29 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 12.....	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30	
เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)	
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow).....	74
4.31	
การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 13 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2	
(ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	75
4.32	
กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น	
“*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5.....	75
4.33	
เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13.....	76
4.34	
เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)	
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow).....	76
4.35	
การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 21 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2	
(ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	77
4.36	
กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 21 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น	
“*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5.....	78
4.37	
เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 21.....	78
4.38	
เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)	
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow).....	79
4.39	
การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 22 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2	
(ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	80
4.40	
กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 22 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น	
“*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5.....	80
4.41	
เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 22.....	81
4.42	
เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)	
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow).....	81
4.43	
การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 23 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2	
(ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 23 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	83
4.45 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 23	83
4.46 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)	84
4.47 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 31 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5	85
4.48 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 31 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	85
4.49 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 31	86
4.50 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)	86
4.51 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5	87
4.52 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	88
4.53 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32	88
4.54 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)	89
4.55 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5	90
4.56 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5	90
4.57 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33	91
4.58 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.59 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	92
4.60 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5.....	93
4.61 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41.....	93
4.62 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→).....	94
4.63 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	95
4.64 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5.....	95
4.65 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42.....	96
4.66 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→).....	96
4.67 การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5.....	97
4.68 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4 “•” เป็นจุดที่ 5.....	98
4.69 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 43.....	98
4.70 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→) กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→).....	99
4.71 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบ.....	105
4.72 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบโดยใช้การไหลเชิงแสง.....	106
4.73 ย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบ.....	109
5.1 ตัวอย่างมุมมองของระบบ (ก) กระจก B มีขนาดใหญ่ (ข) กระจก B มีขนาดเล็กลง.....	112
ก.1 กล้องที่นำมาทดสอบ.....	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2 รายละเอียดขนาดของตัวกล้อง (มม.) (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านหน้า (ค) มุมมองด้านล่าง.....	117

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) และวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพคือ การใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก (Catadioptric sensor) ซึ่งจะเป็นการรวมกันของกระจกโค้งและเลนส์ ซึ่งต่อมาระบบการมองเห็นรอบทิศด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกนั้น ได้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ในการนำทางของหุ่นยนต์ การนำเสนอรยะไกล (Southwell, Basu, and Vandergrriend, 1996; Boulton, 1998) ซึ่งข้อดีของตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก คือ สามารถมองเห็นภาพได้รอบทิศทาง แทนที่หมุนภาพคือแกนเดียวกับภาพต้นแบบ ดังนั้นทุก ๆ ส่วนของภาพที่เกิดขึ้นจาก ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก สามารถทำให้บิดงอใหม่ง่ายขึ้นเพื่อให้ได้ภาพที่สมมูลของกล้องแบบระนาบในทิศทางที่พอใจ

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

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบการรับภาพโดยใช้กล้องกับกระจกโค้ง
- เพื่อพัฒนาระบบบูรณะสถานะสามมิติจากระบบการมองเห็นรอบทิศทางด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ร่วมกับการไหลเชิงแสง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- ใช้กระจกโค้งที่สามารถคำนวณหาสมการพื้นผิวของกระจกได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- พัฒนาระบบการมองเห็นด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก
- สร้างระบบบูรณะสถานะสามมิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นในงานวิจัยหลาย ๆ ด้าน เช่น การพัฒนาหุ่นยนต์ การพัฒนาระบบอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติ การสำรวจระยะไกล ฯลฯ
- สามารถสร้างการบูรณะสถานะสามมิติของสถานะแวดล้อมโดยใช้กล้องเพียงตัวเดียว

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 5 บท และภาคผนวกโดยมีรายละเอียดของเนื้อหาในแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงวรรณกรรมของกระบวนการของการไหลเชิงแสงด้วยกระบวนการต่าง ๆ โครงข่ายประสาทเทียม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้อง สมการของการฉาย (Projection) ของจุดในพิกัดสามมิติ (3D point) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการหาจุดในพิกัดสามมิติ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมช่วยในการหาจุดสามมิติบนผิวกระจก โดยในงานวิจัยได้ใช้กล้อง 1 ตัวร่วมกับกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว

บทที่ 4 แสดงรายละเอียดการหาทิศทางและการเคลื่อนที่ของวัตถุในสถานะแวดล้อมจริง โดยการใช้กระบวนการไหลเชิงแสง ซึ่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสามส่วน โดยในส่วนแรกได้ทำ

การทดสอบระบบโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบเป็นระยะสั้น ๆ 4 จุด ไปทิศทางในแนวแกนของ X Y และแกน XYZ ในส่วนที่สองได้ทำการทดสอบย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบและสุดท้ายได้ทำการทดสอบระบบโดยใช้ลูกบอลเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่าง ๆ รอบตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองของงานวิจัยนี้ และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยและพัฒนาในอนาคต

ภาคผนวก ก. รายละเอียดทางเทคนิคของกล้องที่ใช้ในการทดสอบ

ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม และมีการใช้กระบวนการไหลเชิงแสงช่วยในการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ โดยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกที่ใช้ในการวิจัยประกอบไปด้วยกล้อง 1 ตัวร่วมกับกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพได้รอบทิศและหาตำแหน่งของวัตถุได้ ระบบโครงข่ายประสาทเทียม ใช้ในการหาจุดสามมิติบนผิวกระจกและกระบวนการไหลเชิงแสงทำให้สามารถรู้ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในระบบสามมิติได้

ในบทที่ 2 นี้ได้อธิบายถึงวรรณกรรมของกระบวนการในการสร้างการไหลเชิงแสงด้วยกระบวนการต่าง ๆ และทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคต่าง ๆ ที่วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ ตลอดจนนำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2 การไหลเชิงแสง (Optical flow)



รูปที่ 2.1 การไหลเชิงแสง

การไหลเชิงแสงเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุเคลื่อนที่ภายในภาพ ซึ่งการสร้างการไหลเชิงแสงนี้จะใช้การวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงภายในภาพ แต่ละลำดับภาพ (Image sequence) โดยที่การไหลเชิงแสงจะประกอบไปด้วยขนาดและทิศทางของความเข้มแสงที่เปลี่ยนตำแหน่งไปดังรูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของการไหลเชิงแสง การตรวจจับวัตถุโดยใช้การไหลเชิงแสงจะใช้การวิเคราะห์กลุ่มของความเข้มแสงของวัตถุที่เกิดขึ้นภายในภาพ ซึ่งความเข้มแสงของวัตถุที่เปลี่ยนตำแหน่งจะยังคงความเข้มแสงเท่าเดิม และทำให้ผลของการไหลเชิงแสงของกลุ่มแสงของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงตำแหน่งไป

2.2.1 Gradient Base Method

กรรมวิธีนี้ใช้วิธีการสร้างการไหลของแสงโดยแก้ปัญหาอนุพันธ์เป็นหลัก โดยอาศัยหลักการของความคงที่ของความเข้มแสงจากวัตถุภายในภาพที่เปลี่ยนแปลงไป กำหนดให้ I คือ ความเข้มแสง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I(x + dx, y + dy, t + dt) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} dx + \frac{\partial I}{\partial y} dy + \frac{\partial I}{\partial t} dt + \dots \quad (2.1)$$

จะได้ว่า

$$\nabla I(x, y, t)v + I_t = 0 \quad (2.2)$$

สมการที่ (2.2) ได้มาจากการแก้สมการ อนุกรมเทย์เลอร์ (Horn and Schunck, 1981) จากสมการที่ (2.1) โดย $v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{bmatrix}$ และ $\nabla I = \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial x} \\ \frac{\partial I}{\partial y} \end{bmatrix}^T$ เรียกสมการที่ (2.2) ว่า Optical flow constraint equation (Barron and Thacker, 1990) ในการพิจารณา ระบบสมการเส้นตรงที่มี 2 ตัวแปร 1 สมการ ซึ่งมีแนวทางการแก้ดังนี้

2.2.1.1 Horn and Schunck

Horn and Schunck (1993) ได้รวมเงื่อนไขของความลาดชัน (Gradient) จากสมการที่ (2.2) ซึ่งเป็นเทอมของความราบเรียบรวม (Global smoothness) เข้ากับเงื่อนไขของการประมาณความเร็ว $v(x, y, t) = (u, v)$ เพื่อพิจารณาค่าน้อยที่สุดของ

$$\int_D (\nabla I \cdot v + I_t)^2 + \lambda^2 (\| \nabla u \|_2^2 + \| \nabla v \|_2^2) dx \quad (2.3)$$

โดยที่ขนาด (Magnitude) ของ λ เป็นการแสดงให้เห็นถึงผลที่มีต่อเทอมของความราบเรียบ (Smoothness) ให้ $\lambda = 0.5$ (Horn and Schunck, 1993) จะทำให้ผลลัพธ์ของกรณีที่ทำ การทดสอบได้ดี พิจารณาได้จากสมการที่ (2.3) ในการวนซ้ำเพื่อทำการพิจารณาหาค่า น้อยที่สุดและได้ความเร็วของแสงของแต่ละจุดภาพ โดยการวนซ้ำจะเป็นไปตามสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.56)

$$u^{k+1} = u^k - \frac{I_x [I_x u^{-k} + I_y v^{-k} + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2} \quad (2.4)$$

$$v^{k+1} = v^k - \frac{I_y [I_x u^{-k} + I_y v^{-k} + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2} \quad (2.5)$$

โดยที่ k คือ จำนวนครั้งในการวนซ้ำ
 u^0, v^0 คือ ค่าเริ่มต้นในการประมาณความเร็ว
 u^{-k}, v^{-k} คือ ค่าของตำแหน่งใกล้เคียงของ u^k, v^k

ในกระบวนการแบบดั้งเดิม (Horn and Schunck, 1993) มีการใช้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งในการประมาณค่าความสว่าง ในที่นี้ได้พิจารณาการประมาณจาก ความสัมพันธ์ของสมการอนุพันธ์เชิงตัวเลข และสามารถพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อน

2.2.1.2 Lucas & Kanade

จากวิธีการของ Lucas & Kanade (1981) ได้นำเสนอวิธีการในการหาค่า น้ำหนักเหมาะสมของค่ากำลังสองน้อยสุด (LS) ของเงื่อนไขเฉพาะถิ่นอันดับหนึ่ง (Local first order) ของสมการที่ (2.2) เพื่อพิจารณาหาค่าเหมาะสมซึ่งเป็นค่าคงที่ของแบบจำลองสำหรับ v ในแต่ละจุดภาพโดยพิจารณาหาค่าน้อยที่สุดของสมการที่ (2.6)

$$\sum_{x \in \Omega} W^2(x) [\nabla I \cdot v + I_t]^2 \quad (2.6)$$

โดยที่ $W(x)$ คือ ฟังก์ชันหน้าต่าง (Windows function) ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาของสมการที่ (2.6) โดย n คือ จุดที่เวลา t มีดังนี้

$$A^T W^2 A v = A^T W^2 b \quad (2.7)$$

$$A = [\nabla I(x_1), \dots, \nabla I(x_n)]^T \quad (2.8)$$

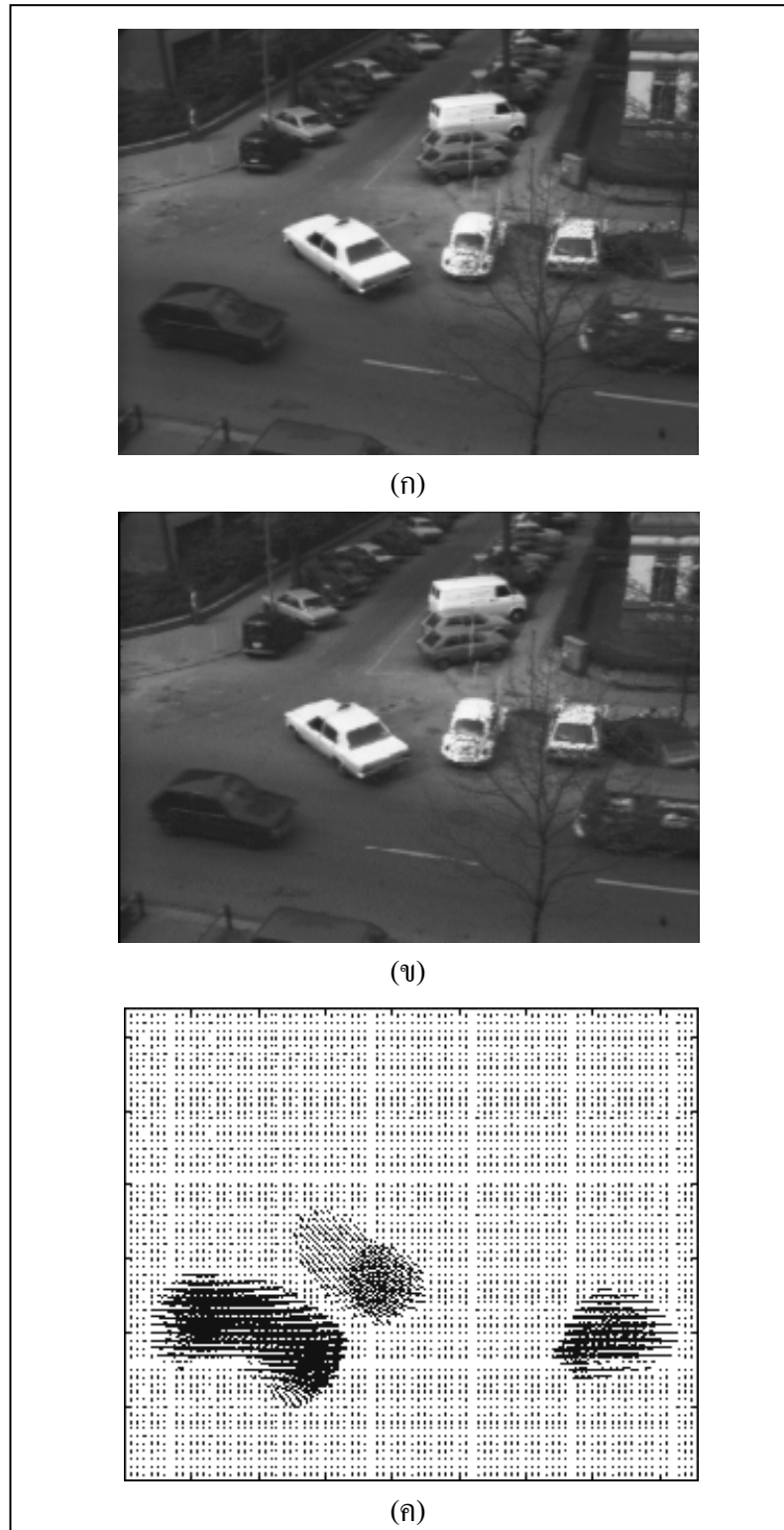
$$W = \text{diag}[W(x_1), \dots, W(x_n)] \quad (2.9)$$

$$b = -(I_t(x_1), \dots, I_t(x_n))^T \quad (2.10)$$

$$v = [A^T W^2 A]^{-1} A^T W^2 b \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะได้ผลลัพธ์ของสมการที่ (2.7) คือสมการที่ (2.11) ซึ่งรูปแบบของผลเฉลยจะเข้าใกล้รูปแบบของสมการ $A^T W^2 A$ ซึ่งไม่เป็นเอกพจน์ (Nonsingular) ที่มีเมทริกซ์ขนาด 2×2

$$A^T W^2 A = \begin{bmatrix} \sum W^2(x) I_x^2(x) & \sum W^2(x) I_x(x) I_y(x) \\ \sum W^2(x) I_y(x) I_x(x) & \sum W^2(x) I_y^2(x) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.2 การไหลเชิงแสง (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
(ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade

2.2.2 Region - Based Matching

วิธีการพิจารณาขอบเขตโดยความเหมือนของบริเวณหนึ่ง ๆ ซึ่งได้นำเสนอโดย Glazer, Reynolds, and Anandan, (1983); Anandan (1989); Burt, Yen, and Xu, (1983); Little, Bultho, and Poggio, (1988); Little and Verri, (1989) เป็นการอธิบายความเร็ว v ที่ได้ทำการเลื่อน $d = [d_x, d_y]$ เพื่อพิจารณาค่าเหมาะสมที่สุดที่สุดของขอบเขตของภาพที่เวลาต่างกันจากการค้นหาความเหมือนที่ดีที่สุดโดยทำการพิจารณาที่ค่ามากที่สุดของความเหมือน (บน d) ซึ่งในแต่ละวิธีจะปรับปรุงค่าความเร็วให้แม่นยำที่แตกต่างกัน แต่จะใช้หลักการที่มุ่งไปในทางเดียวกัน เช่น วิธีการบรรทัดฐานสหสัมพันธ์ไขว้ (Normalized cross - correlation) หรือพิจารณาค่าน้อยที่สุดของระยะทาง (Distance) อาทิเช่น วิธีการผลรวมรากที่สองของผลต่าง (Sum - squared difference : SSD) ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$SSD_{1,2}(x, d) = \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n W(i, j) [I_1(x + (i, j)) - I_2(x + d + (i, j))]^2 \quad (2.13)$$

$$SSD_{1,2}(x, d) = W(x) * [I_1(x) - I_2(x + d)]^2 \quad (2.14)$$

โดยที่ W คือ ฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องของหน้าต่าง 2 มิติ
 d คือ ค่าตัวเลขจำนวนเต็มของการเลื่อนตำแหน่ง

การพิจารณาค่าระยะทาง SSD การพิจารณาค่าความเหมือนแบบสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross - correlation) จะมีลักษณะวิธีการที่ใกล้เคียงกันในการพิจารณาค่าน้อยที่สุดของระยะทาง

การไหลเชิงแสงในแต่ละวิธีข้างต้น ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของความเร็วในแต่ละจุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ค) ผลการสร้างการไหลของแสงที่ได้จาก Lucas & Kanade โดยใช้ ลูกศรแทนขนาดและทิศทางของความเร็วการไหลของเชิงแสง

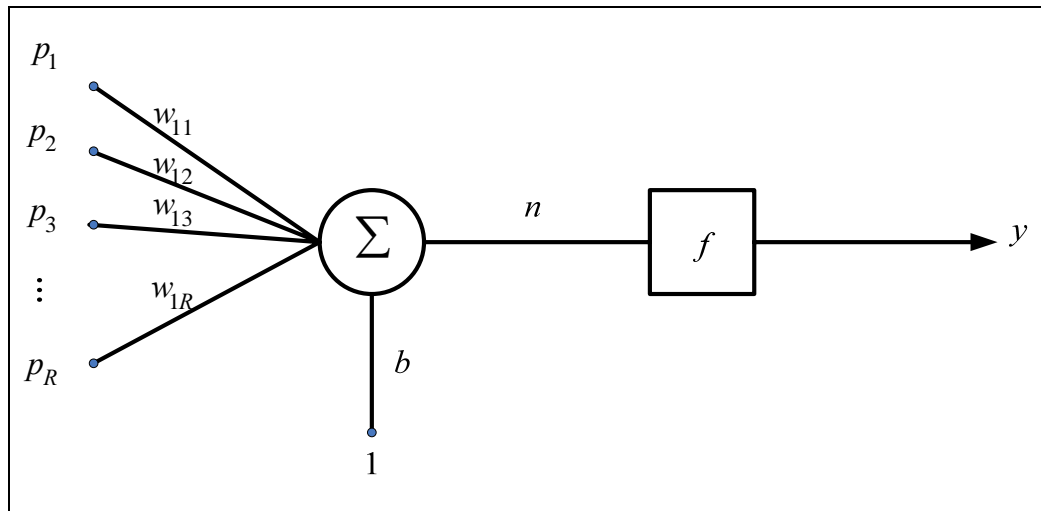
2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (อาทิพย์ ศรีแก้ว, 2552)

โครงข่ายประสาทเทียม เป็นโครงข่ายที่สามารถปรับตัวเองต่อการตอบสนองของอินพุต ตามกฎการเรียนรู้ (Learning rule) และเมื่อโครงข่ายได้เรียนรู้สิ่งที่ต้องการแล้ว โครงข่ายจะสามารถทำงานที่กำหนดไว้ได้ โดยโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกพัฒนา และคิดค้นมาจากหลักการทำงานของสมองมนุษย์ ซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลเรียกว่าเซลล์ประสาทเทียม (Neuron)

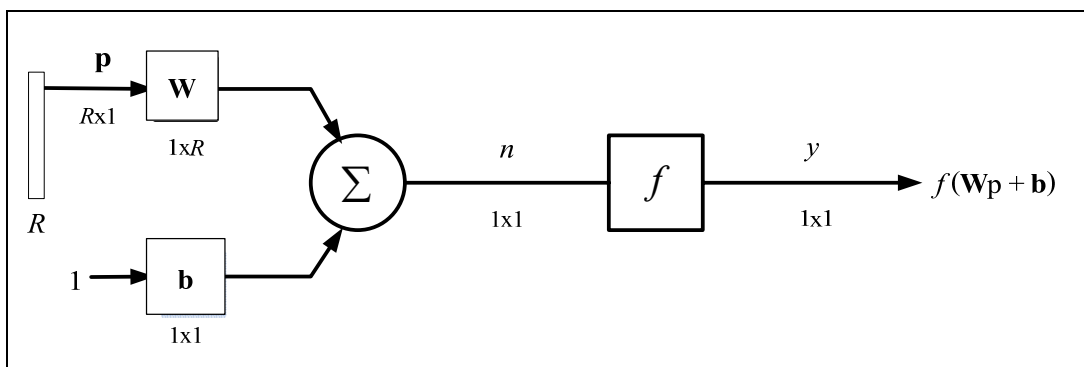
โดยจำนวนเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์นั้นมีอยู่ประมาณ 10^{11} เซลล์ และมีการเชื่อมต่อกันอย่างมากมาย สมองมนุษย์จึงเสมือนเป็นคอมพิวเตอร์ที่สามารถปรับตัวเองได้ ไม่เป็นเชิงเส้น และทำงานแบบขนานในการดูแลจัดการการทำงานร่วมกันของเซลล์ประสาทในสมอง ดังนั้น โครงข่ายประสาทเทียมที่เลียนแบบมาจากการทำงานของสมองมนุษย์นี้ จึงมีความสามารถในการเรียนรู้จากตัวอย่าง และการทำให้เป็นกรณีทั่วไป (Generalize) ซึ่งถือว่าเป็นคุณลักษณะสำคัญของโครงข่ายประสาทเทียม โดยโครงข่ายจะถูกฝึกสอนด้วยรูปแบบต่าง ๆ ที่ต้องการให้โครงข่ายเรียนรู้ผ่านกฎการเรียนรู้ ขบวนการเรียนรู้ได้ของโครงข่ายนั่นเองที่ทำให้โครงข่ายมีความแตกต่างจากการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่น ๆ และการที่โครงข่ายถูกทำให้เป็นกรณีทั่วไป ทำให้โครงข่ายสามารถจำแนกแยกแยะรูปแบบของอินพุตแบบใหม่ ๆ ที่โครงข่ายไม่รู้จักมาก่อนได้ โครงข่ายจะทำการเก็บข้อมูลความรู้ในระหว่างขั้นตอนของการเรียนรู้ โดยเก็บไว้ที่น้ำหนักประสาท (Synaptic weights) โครงสร้างของตัวเซลล์ประสาทเทียมภายในโครงข่ายมีอยู่หลายชนิด ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้คุณลักษณะต่าง ๆ ของโครงข่ายแตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นการจัดวางเรียงตัวของเซลล์ประสาทเทียม กฎการเรียนรู้ที่ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนค่าของจุดประสาท และเงื่อนไขในการฝึกฝนของโครงข่าย นอกจากนี้โครงข่ายประสาทเทียมยังมีข้อดีอีกมากมาย เช่น มีความทนทานต่อความบกพร่อง เพราะข้อมูลภายในโครงข่ายได้ถูกกระจายไปทั้งโครงข่ายตามเซลล์ประสาทเทียมต่าง ๆ การจะทำให้ทั้งระบบไม่สามารถทำงานได้นั้นจะต้องทำให้เกิดความเสียหายอย่างหนักเท่านั้น และโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการโต้ตอบและตอบสนองต่อสถานะแวดล้อมได้ โดยเมื่อสถานะแวดล้อมเปลี่ยนไป ตัวโครงข่ายจะสามารถตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงนั้น ๆ แล้วทำการฝึกฝนให้เข้ากับสถานะแวดล้อมใหม่ได้

2.3.1 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network architecture)

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ แบบจำลองเซลล์ประสาทเทียม และสถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายของเซลล์ประสาทเทียม โดยแบบจำลองของเซลล์ประสาทเทียมแสดงในรูปที่ 2.3 และรูปแบบสัญลักษณ์เซลล์ประสาทเทียมแสดงในรูปที่ 2.4 เซลล์ประสาทเทียมมี R อินพุต แต่ละอินพุตย่อย $p_1, p_2, p_3, \dots, p_R$ ถูกคูณด้วยค่าน้ำหนักประสาท (Weight) ของแต่ละตัว $w_{11}, w_{12}, w_{13}, \dots, w_{1R}$ และ ไบอัส b (Bias) เป็นอีกหนึ่งอินพุตที่มีค่าน้ำหนักประสาทคงที่เท่ากับ 1 โดยอินพุตทั้งสองถูกรวม (Sum) ได้เอาต์พุตเป็น n เรียกว่า เนตอินพุต (Net input) ซึ่งเป็นอินพุตให้กับฟังก์ชันถ่ายโอน f (Transfer function) และได้เอาต์พุตของเซลล์ประสาทเทียม คือ y โดยเอาต์พุตของเซลล์ประสาทเทียมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15



รูปที่ 2.3 แบบจำลองเซลล์ประสาทเทียมหลายอินพุต



รูปที่ 2.4 รูปแบบสัญลักษณ์เซลล์ประสาทเทียม

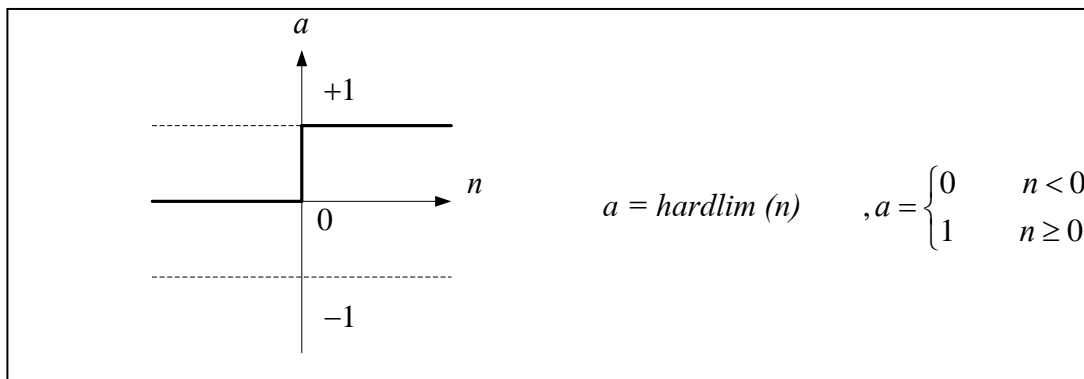
เห็นได้ว่า เอาต์พุตของเซลล์ประสาทเทียมขึ้นอยู่กับน้ำหนักประสาท \mathbf{W} และไบอัส \mathbf{b} ซึ่งถูกปรับค่าจากกฎการเรียนรู้

$$y = f(\mathbf{Wp} + \mathbf{b}) \quad (2.15)$$

2.3.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของโครงข่ายประสาทเทียม (Transfer function)

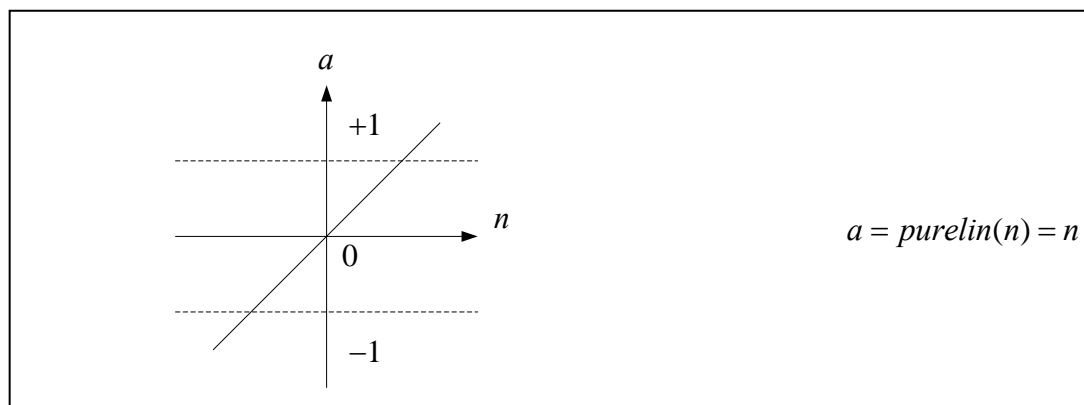
เป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้น หรือไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้กันแพร่หลายได้แก่

1. ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฮาร์ดลิมิต (Hard limit transfer function) ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้จะให้ค่าเอาต์พุต 2 ค่า ตามค่าอินพุต กล่าวคือถ้าอินพุตมีค่าต่ำกว่า 0 จะให้ค่าเอาต์พุตเป็น 0 และถ้าอินพุตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 จะให้ค่าเอาต์พุตเป็น 1



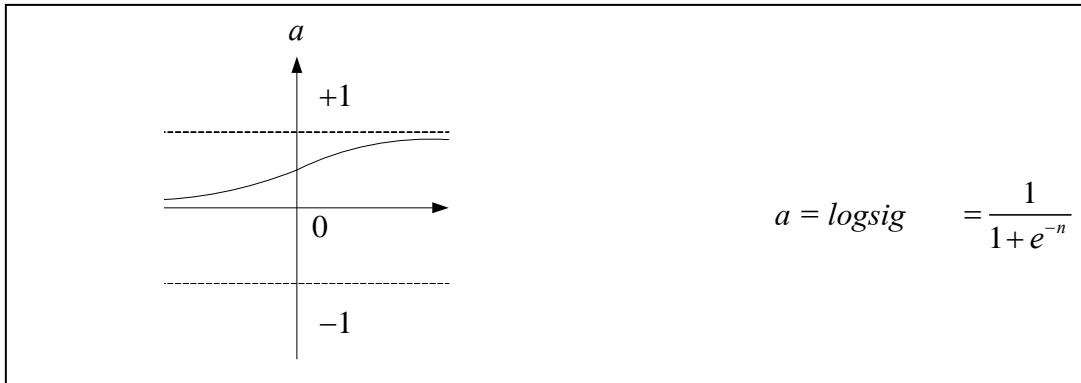
รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบฮาร์ดลิมิต

2. ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง (Linear transfer function) ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้จะให้ค่าเอาต์พุตเท่ากับค่าอินพุตที่ป้อนเข้ามา



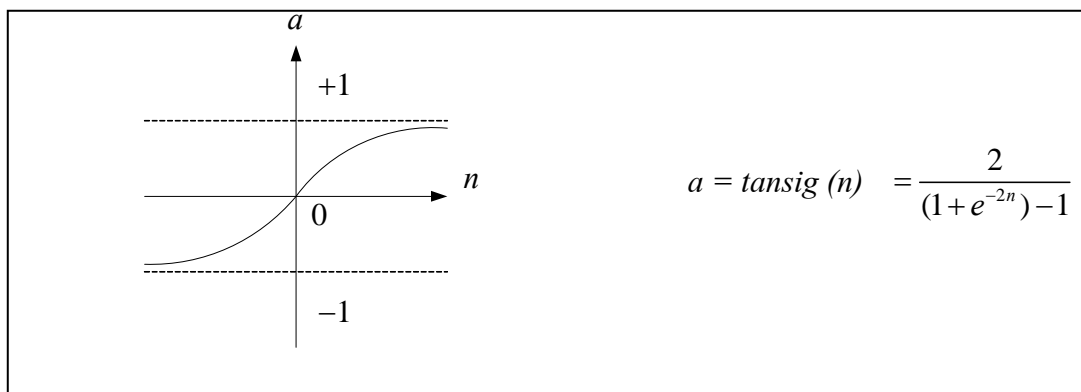
รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเส้นตรง

3. ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอก ซิกมอยด์ (Log - sigmoid transfer function) ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้จะให้ค่าเอาต์พุตอยู่ระหว่างช่วง 0 ถึง 1



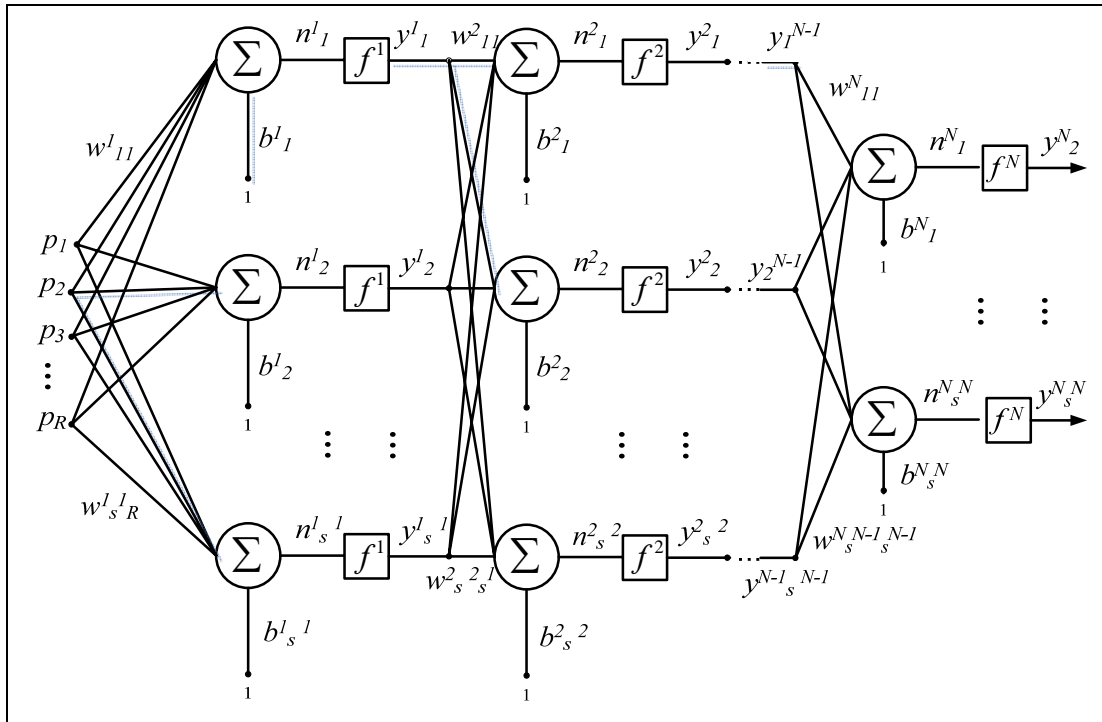
รูปที่ 2.7 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอก ซิกมอยด์

4. ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ซิกมอยด์ (Hyperbolic tangent sigmoid) ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดนี้จะให้ค่าเอาต์พุตอยู่ระหว่างช่วง 1 ถึง -1



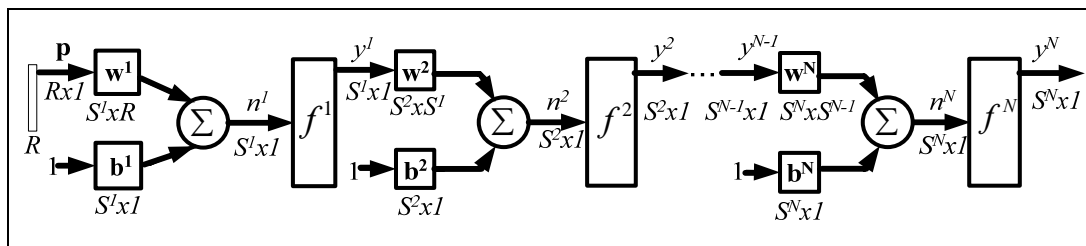
รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ ซิกมอยด์

โดยมากในทางปฏิบัติ โครงข่ายประสาทเทียมมีโครงสร้างหลายชั้น (Multiple layer) แต่ละชั้นมีเมทริกซ์น้ำหนักประสาท \mathbf{W} ไร้อิสเวกเตอร์ \mathbf{b} เนตเอาต์พุต n และเอาต์พุต y ของชั้นนั้นแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

จากโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น จำนวนเซลล์ประสาทเทียมของแต่ละชั้น คือ $R-S^1-S^2-\dots-S^N$ ซึ่งโดยปกติแล้วชั้นแรกจะเป็นชั้นอินพุต (Input layer) ทำหน้าที่รับอินพุตจากภายนอก โครงข่ายในชั้นสุดท้ายจะเป็นชั้นเอาต์พุตสำหรับส่งค่าเอาต์พุตออกจากโครงข่าย ส่วนชั้นระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเรียกว่าชั้นซ่อนเร้น (Hidden layer) และแต่ละชั้นสามารถมีจำนวนเซลล์ประสาทเทียมแตกต่างกันได้ โดยที่เอาต์พุตของแต่ละชั้นจะเป็นอินพุตให้กับชั้นถัดไปดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การกำหนดพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

และความสัมพันธ์ของค่าเอาต์พุตแต่ละชั้นแสดงในสมการที่ 2.16

$$y^{l+1} = f^{l+1}(W^{l+1}y^l + b^{l+1}) \quad (2.16)$$

โดยที่ $l=0,1,2,\dots,N-1$ ชั้นแรกเป็นชั้นอินพุตที่รับอินพุตโดยตรงจากภายนอก โครงข่าย คือ $y^0 = p$ และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นเอาต์พุต คือ y^N ซึ่งในโครงข่ายหลายชั้นจะมีพารามิเตอร์ค่อนข้างมาก ดังนั้นการจะนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องคำนึงถึงการออกแบบพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น จำนวนชั้น จำนวนเซลล์ประสาทเทียมในแต่ละชั้น จำนวนอินพุต จำนวนเอาต์พุต ชนิดของฟังก์ชันถ่ายโอน ฯลฯ ให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.3.3 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (Backpropagation neuron network)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น มีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised learning) คือ เรียนรู้ที่จะสร้างผลลัพธ์ที่ต้องการให้ได้ตามตัวอย่างที่ป้อนให้ และลดค่าความผิดพลาดของเอาต์พุตให้น้อยที่สุด โดยเทียบกับค่าน้ำหนักประสาท ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error) ในอัลกอริทึมแบบแพร่กลับ มีการนำเสนอคู่อินพุตและเป้าหมายให้โครงข่ายเรียนรู้ ดังแสดงในสมการที่ 2.17

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\} \quad (2.17)$$

เมื่อป้อนแต่ละอินพุตให้กับโครงข่าย เอาต์พุตที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมาย อัลกอริทึมจะทำการปรับพารามิเตอร์ของเครือข่ายซึ่งได้แก่น้ำหนักประสาทและไบอัส เพื่อให้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยของเอาต์พุตและเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด จะได้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (Performance index) คือ

$$F(\mathbf{x}) = E[(\mathbf{t} - \mathbf{y})^T (\mathbf{t} - \mathbf{y})] \quad (2.18)$$

โดยที่ \mathbf{x} เป็นเมตริกซ์ของน้ำหนักประสาทและไบอัส อัลกอริทึมแบบแพร่กลับสำหรับปรับค่าน้ำหนักประสาทและไบอัส ณ รอบที่ $k+1$ และค่าคงที่การเรียนรู้ α คือ

$$W_{ij}^m(k+1) = W_{ij}^m(k) - \alpha \delta_i^m(k) y_j^{m-1}(k) \quad (2.19)$$

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha \delta_i^m(k) \quad (2.20)$$

โดยที่ δ_i^m เป็นค่าความไวของค่าความผิดพลาด ณ ชั้น m ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ
กรณีชั้นที่ m เป็นชั้นเอาต์พุต จะได้

$$\delta_i^N = -2(t_i - y_i^N) f'(n_i^N) \quad (2.21)$$

และในกรณีชั้นที่ m เป็นชั้นซ่อนเร้น จะได้

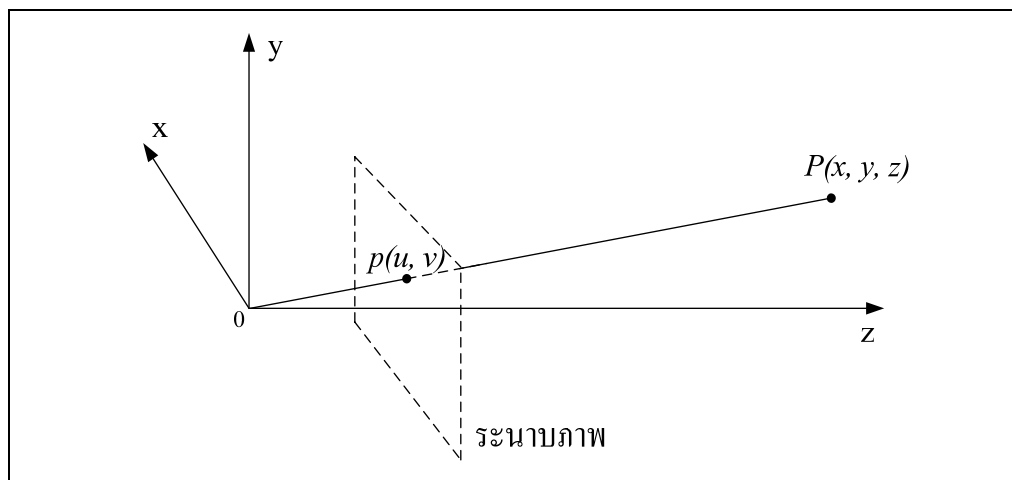
$$\delta_i^m = f'(n_i^m) \sum_{l=1}^{S^{m+1}} \delta_l^{m+1} w_{il}^{m+1} \quad (2.22)$$

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ค่าความไวของค่าความผิดพลาดที่ได้ในชั้นที่พิจารณา สามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบในชั้นถัดไป

2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้อง

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกล้อง ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุบนแกนอ้างอิงกับตำแหน่งของวัตถุที่ปรากฏบนฉากรับภาพหรือบนภาพที่บันทึกได้จากกล้อง กล้องจะมีเลนส์ที่ฉายวัตถุจริงสามมิติมาปรากฏเป็นรูปสองมิติบนฉากรับภาพ ลักษณะการฉายภาพแบบนี้จะทำให้ข้อมูลความลึกของวัตถุหายไป และตำแหน่งบนภาพก็จะสัมพันธ์กับเส้นทางเดินแสงในสามมิติ ดังนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลอื่นประกอบ เพื่อระบุตำแหน่งในสามมิติของจุดๆหนึ่งในภาพ ข้อมูลนี้อาจมาจากกล้องหลายตัวหรือใช้กล้องตัวเดียวแต่ถ่ายหลาย ๆ มุมมอง หรืออาศัยลักษณะรูปร่างของวัตถุที่ทราบมาก่อนล่วงหน้ามาพิจารณาประกอบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุจริงกับตำแหน่งของวัตถุบนภาพที่บันทึกได้ที่ใช้กัน โดยทั่วไปมี 3 แบบจำลองคือ แบบจำลองภาพฉายทัศนมิติ (Perspective projection) แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาด (Scaled orthographic projection) และแบบจำลองสัมพรรค (Affine projection) โดยต่อไปจะได้กล่าวถึงรายละเอียดของแบบจำลองทั้งสามแบบสั้น ๆ

สำหรับแบบจำลองทั้งสามที่จะกล่าวถึง กำหนดให้จุดศูนย์กลางของการฉายภาพจะเป็นจุดเดียวกันกับจุด Origin ของระบบพิกัดสามมิติ โดยจุดที่สนใจนี้จะแทนด้วยเวกเตอร์ $(x \ y \ z)$ ซึ่งเป็นระบบเดียวกันกับระบบการฉายภาพ โดยแกน x เป็นแกนในแนวนอน แกน y เป็นแกนในแนวตั้ง และแกน z เป็นแกนที่มองจากกล้องไปยังวัตถุระนาบภาพจะอยู่ในตำแหน่งที่ขนานกับระนาบ x และ y โดยอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางการฉายภาพ (Center of projection) เท่ากับระยะโฟกัส f ตำแหน่งของวัตถุบนฉากรับภาพจะถูกระบุด้วยแกน u และ v ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แกนอ้างอิงสำหรับระบบกล้อง/เลนส์

2.4.1 แบบจำลองภาพฉายทัศนมิติ

แบบจำลองนี้จะมีลักษณะเหมือนของจริงที่สุด โดยจะใช้หลักการพิจารณาทางเดินแสงเพื่อหาตำแหน่งที่ทางเดินนี้ตัดกับฉากรับภาพ จุด ${}^cP = [x, y, z]^T$ ซึ่งมีตำแหน่งสัมพันธ์กับแกนอ้างอิงของกล้อง โดยจะโปรเจกต์ลงบนฉากรับภาพที่ตำแหน่ง $p = [u, v]^T$ ตามสมการ

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{f}{z} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

2.4.2 แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาด

แบบจำลองภาพฉายทัศนมิติจะมีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้นซึ่งแม้ว่าจะมีความสมบูรณ์แต่ก็มีความซับซ้อน ในบางกรณีอาจประมาณความสัมพันธ์ให้เป็นแบบเชิงเส้นเพื่อให้แบบจำลองมีโครงสร้างที่ง่ายขึ้น ในแบบจำลองนี้ จุด ${}^cP = [x, y, z]^T$ จะได้จาก

$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

โดยที่ s คือ ตัวปรับลดที่มีค่าคงที่

แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาดนี้จะมีความแม่นยำในกรณีที่ความลึกสัมพัทธ์ระหว่างจุดต่าง ๆ มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับระยะทางระหว่างกล้องกับฉากรับภาพ

2.4.3 แบบจำลอง Affine

เป็นแบบจำลองเชิงเส้นที่ใช้ในการประมาณภาพถ่ายทัศนมิติในอีกลักษณะหนึ่ง หรืออาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองออร์โทกราฟิกแบบลดขนาดก็เป็นแบบจำลองแอฟฟินแบบหนึ่ง แบบจำลองแอฟฟินเป็นเพียงการประมาณเชิงเส้น โดยไม่คำนึงถึงลักษณะในการบันทึกภาพ จุด ${}^cP = [x, y, z]^T$ จะได้จาก

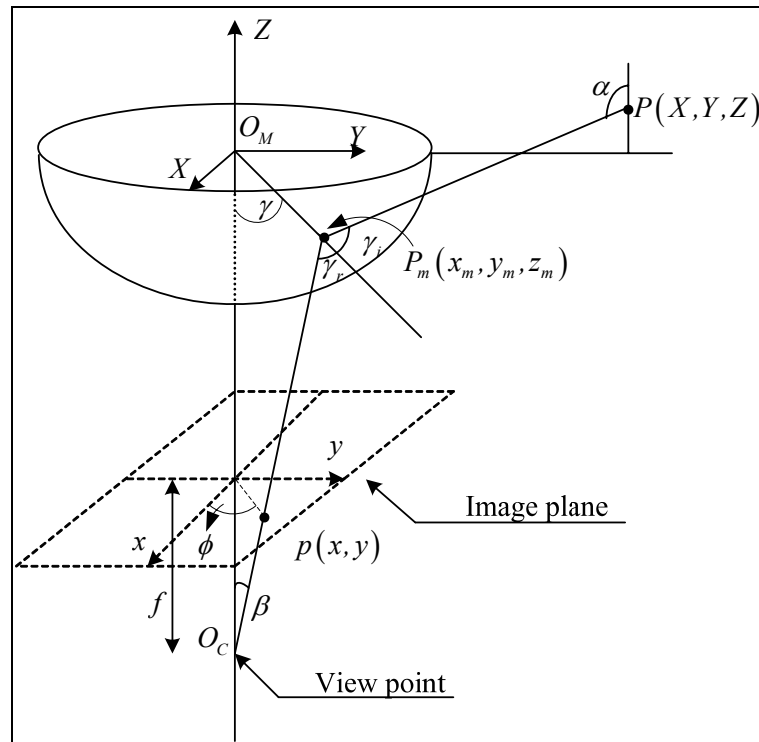
$$\pi(x, y, z) = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = A {}^cP + c \quad (2.25)$$

โดยที่ A คือ เมตริกซ์ขนาด 2×3 และ c เป็นเวกเตอร์ 1×2

แบบจำลองแอฟฟินจะรวมทั้งโครงสร้างภายในตัวอย่างเช่น เลนส์ และโครงสร้างภายนอกตัวอย่างเช่น ตำแหน่งของกล้อง และเนื่องจากแบบจำลองเป็นแบบเชิงเส้น ทำให้สามารถคำนวณหาค่า A และ c อย่างง่ายได้โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression technique) และจะทำให้สามารถปรับเทียบกล้องอย่างง่ายได้

2.5 สมการการฉาย (Projection) ของจุดในพิกัดสามมิติ (3D point)

Gaspar and Victor (1999) ได้ออกแบบสมการการฉายของจุดในพิกัดสามมิติของกระจกรูปครึ่งทรงกลมโดยสามารถเขียนภาพการสะท้อนของจุดได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แบบจำลองการสะท้อนของภาพ

เมื่อ	α	คือ มุมระหว่างแกนตั้งฉากกับจุดในสามมิติถึงจุดบนผิวของกระจก
	β	คือ มุมระหว่างแกนตั้งฉากกับจุดในระนาบของภาพถึงจุดศูนย์กลางการสะท้อน (Projection center)
	P	คือ จุดในสามมิติ
	P_m	คือ จุดที่ผิวกระจก
	p	คือ จุดในระนาบของภาพ
	λ_t	คือ มุมตกกระทบที่ผิวกระจกโค้ง
	λ_r	คือ มุมสะท้อนที่ผิวกระจกโค้ง
	ϕ	คือ มุมระหว่างจุด p กับแกน x
	f	คือ ความยาวโฟกัส

จากรูปที่ 2.12 กำหนดให้ $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ และ $r_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2}$ โดยจะสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.26) ถึงสมการที่ (2.28)

$$z_m = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) \cdot r - L \quad (2.26)$$

$$z_m^2 + r_m^2 = R^2 \quad (2.27)$$

$$\gamma_r = \gamma_i \Leftrightarrow 2 \tan^{-1}\left(\frac{r_m}{-z_m}\right) = \alpha - \beta \quad (2.28)$$

เมื่อ $P = [X, Y, Z]^T$ แทนตำแหน่งสามมิติของจุดเป้าหมาย เมื่อต้องการหาจุดภาพในระนาบของภาพ $p = [x, y]^T$ ต้องเริ่มจากการหาจุด P_m จากผิวกระจกและ P สามารถแสดงความสัมพันธ์ในพิกัดทรงกระบอกดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} \phi \\ r \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1}(Y/X) \\ \sqrt{X^2 + Y^2} \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

และ มุม α หาได้จาก

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Z - z_m}{r - r_m}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (2.30)$$

พารามิเตอร์ r_m z_m ϕ และ β หาได้จากสมการที่ (2.26) ถึงสมการที่ (2.29) และสามารถหาจุดในระนาบของภาพ $p = (x, y)$ ได้ดังสมการที่ (2.31) และสมการที่ (2.32)

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix} = f \tan \beta \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

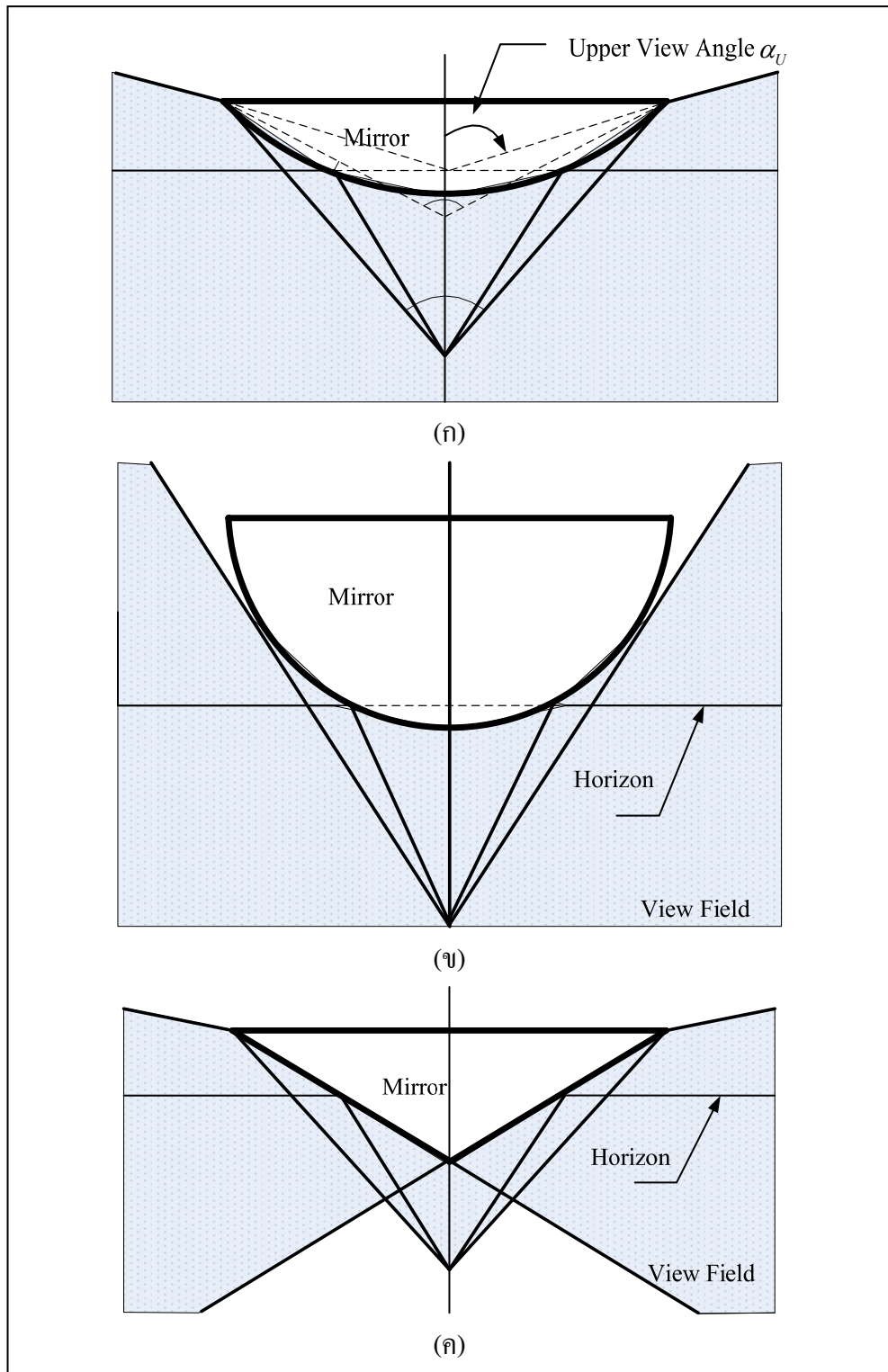
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & x_0 \\ 0 & \alpha_y & y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

เมื่อ α_x และ α_y แทนค่าของอัตราส่วนลักษณะของจุดภาพ (Pixel aspect ratio) ส่วน x_0 และ y_0 แทนจุดमुखสำคัญ (Principal point)

2.6 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 จุดทั้งก่อนและหลังการเคลื่อนที่โดยตำแหน่งของวัตถุจะคำนวณได้จาก triangulation แต่ข้อดีของกระจกโค้งทรงกรวยคือมีข้อจำกัดในการมองเห็น และไม่มีจุดโฟกัสของกระจกที่แน่นอน ดังนั้นจึงไม่สามารถแปลงภาพให้อยู่ในสัดส่วนที่สมบูรณ์ได้

ต่อมา Yagi and Kawato (1993) ได้นำเสนอกระจกโค้งรูปไฮเพอร์โบลา (Hyperbola mirror) ซึ่งให้ภาพบริเวณขอบภาพเหมือน COPIS แต่มีความละเอียดภาพบริเวณกลางภาพสูงเหมือนกระจกโค้งรูปทรงกลม โดยเรียกตัวตรวจรู้ชนิดนี้ว่า HyperOmni Vision ซึ่งตัวตรวจรู้ชนิดนี้ได้นำมาใช้กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ในสภาวะแวดล้อมที่ถูกสร้างขึ้น เช่นในห้อง ระเบียบทางเดิน เป็นต้น โดย Yagi and Kawato (1993) ได้ใช้ HyperOmni Vision หาการฉายของเส้น (Projection of line) เพื่อใช้ในการหาเส้นขอบต่าง ๆ ของสิ่งแวดล้อม เช่น ขอบประตู ขอบทางเดิน เป็นต้น นอกจากนี้ Yagi and Kawato (1993) ยังได้เสนอมุมมองของ HyperOmni Vision โดยเปรียบเทียบกับกระจกโค้งทรงกรวย และ กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม ซึ่งมุมมองของภาพแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



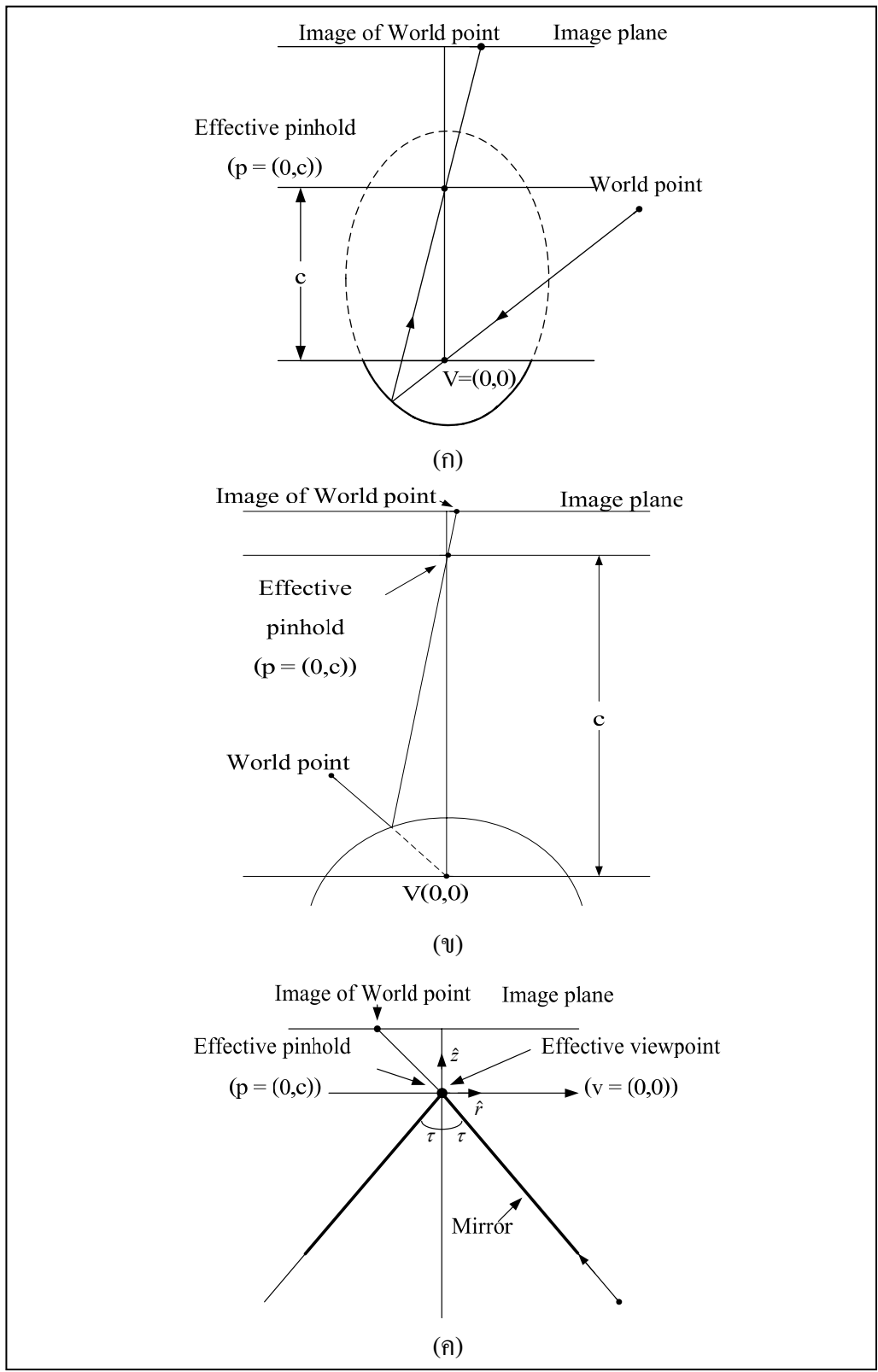
รูปที่ 2.13 มุมมองของกระจกแบบต่าง ๆ (ก) กระจกทรงไฮเปอร์โบล่า (ข) กระจกทรงกลม (ค) กระจกทรงกรวย (Yagi and Kawato, 1993)

ต่อมากล้องตรวจจับแบบรอบทิศทางออกแบบให้สามารถรองรับงานที่มีความหลากหลายมากขึ้น การเจริญเติบโตอันรวดเร็วของมัลติมีเดียทำให้ตัวตรวจรู้แบบรอบทิศได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม เป็นผลให้ระบบการมองเห็น โดยคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนามากขึ้นตามไปด้วย และหลังจากนั้น Baker and Nayar (1999) ได้นำเสนอประเภทของการสะท้อนของผิวกระจกโค้งโดยใช้กล้อง 1 ตัวและกระจก 1 ตัวโดยประเภทของรูปร่างของผิวกระจกจะกำหนดโดยสมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.34)

$$\left(z - \frac{c}{2}\right)^2 + r^2 \left(1 - \frac{k}{2}\right) = \frac{c^2}{4} \left(\frac{k-2}{k}\right) (k \geq 2) \quad (2.33)$$

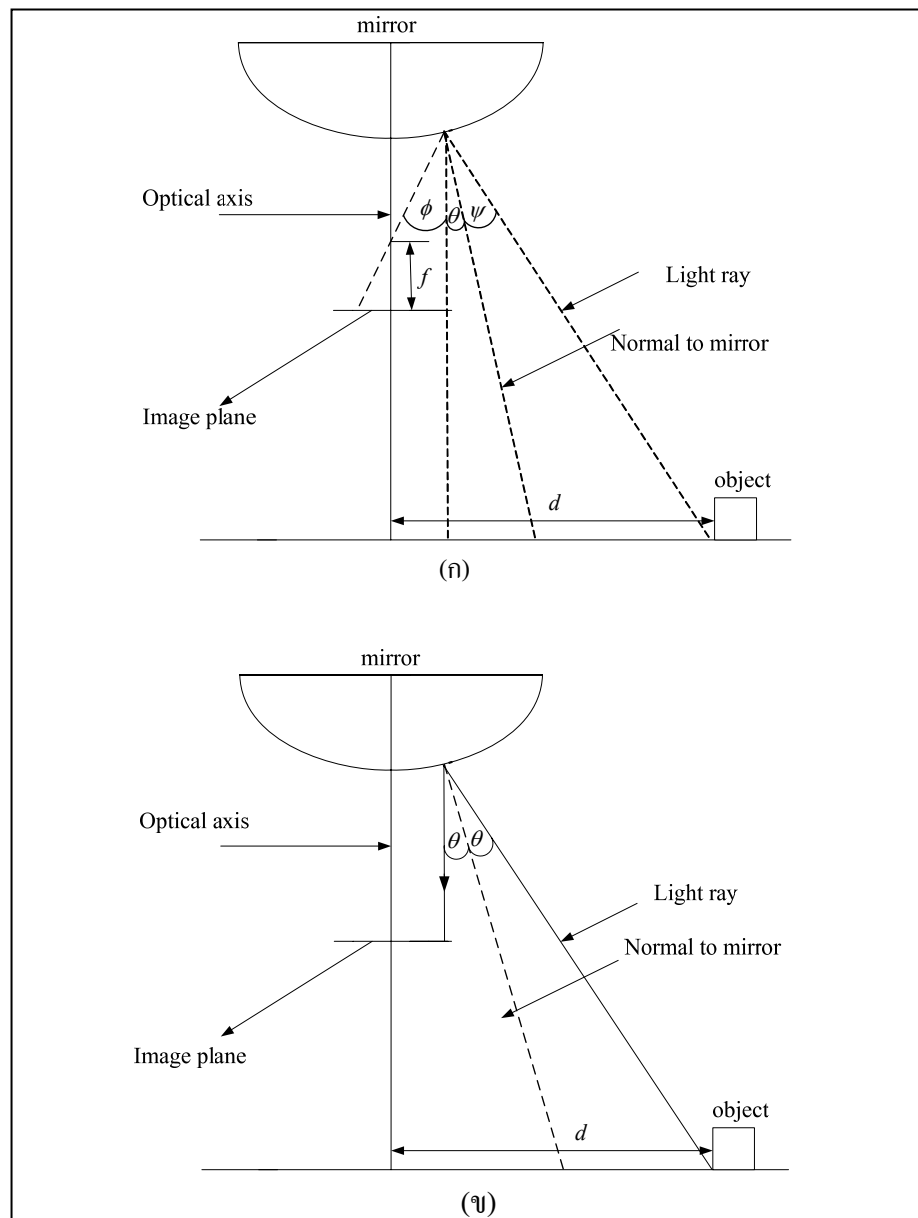
$$\left(z - \frac{c}{2}\right)^2 + r^2 \left(1 + \frac{c^2}{2k}\right) = \left(\frac{2k+c^2}{4}\right) (k > 2) \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.34) 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 $c > 0$ สมการที่ได้จะเป็นสมการกระจกโค้งทรงไฮเปอร์โบล่า โดยแบบจำลองระบบการมองเห็นรอบทิศด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ด้วยกระจกโค้งแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (Baker and Nayar, 1999)



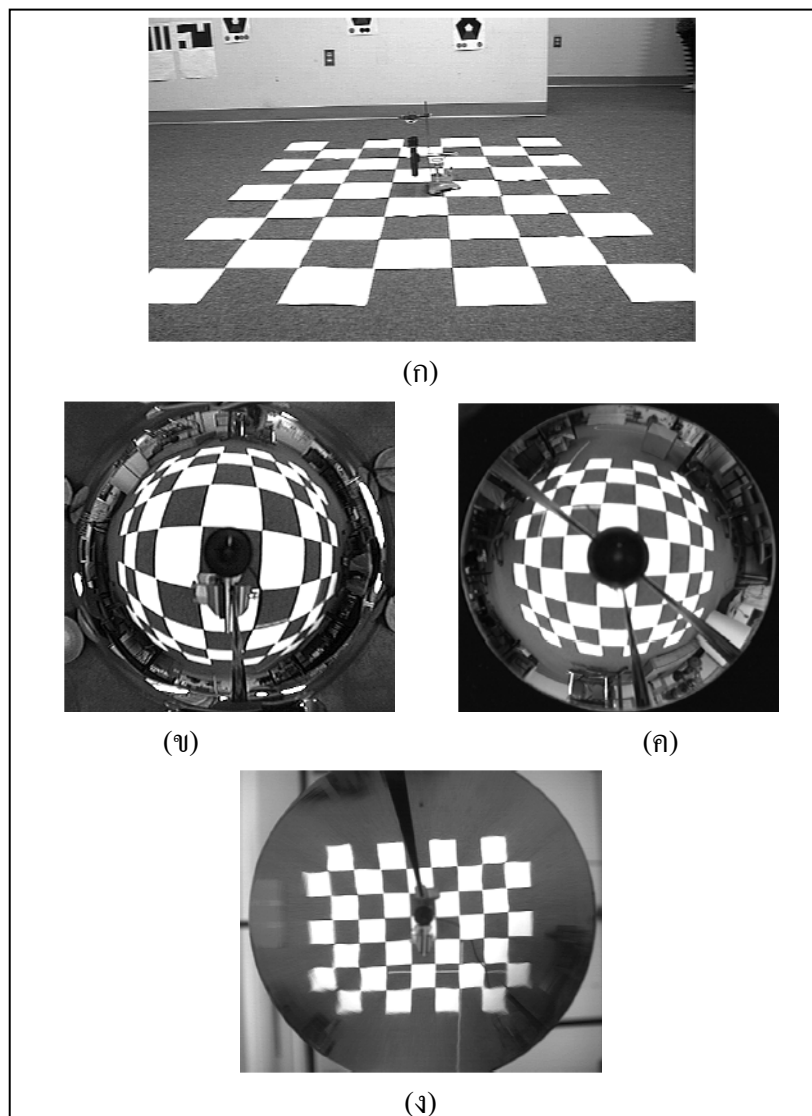
รูปที่ 2.14 กระจกโค้งแบบต่าง ๆ (ก) ทรงวงรี (ข) ทรงไฮเพอร์โบลา (ค) ทรงกรวย

หลังจากนั้น Hicks and Bajcsy (2001) นำเสนอสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้ในการหาพื้นผิวแบบตัดขวางของกระจกโค้งโดยสมการเชิงอนุพันธ์นี้จะแบ่งได้ 2 ลักษณะตามการสะท้อนของผิวกระจกโค้งโดยแบ่งได้ คือการสะท้อนซึ่งตัดกับจุดโฟกัส (Perspective) และการสะท้อนแบบตั้งฉาก (Orthographic) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยสมการเชิงอนุพันธ์จะอยู่ในฟังก์ชันระยะห่างของวัตถุถึงแกนเชิงแสง (Optical axis)



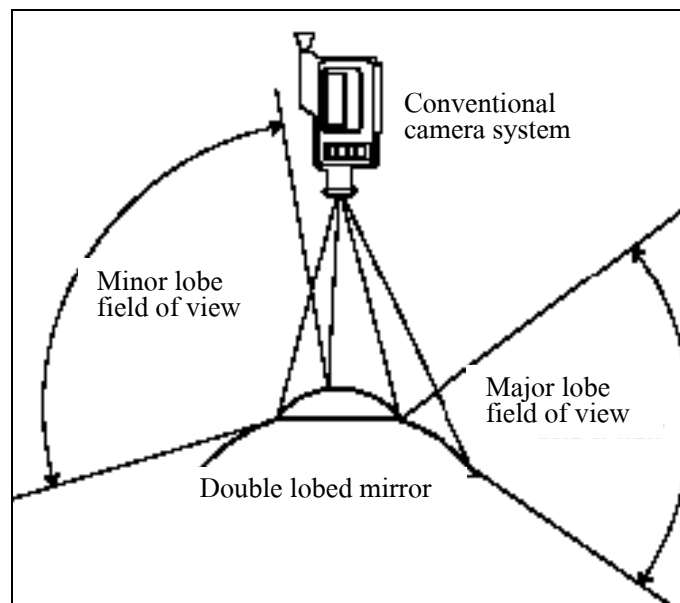
รูปที่ 2.15 การสะท้อนของผิวกระจกโค้ง (ก) การสะท้อนซึ่งตัดกับจุดโฟกัส และ (ข) การสะท้อนแบบตั้งฉาก (Hicks and Bajcsy, 1999)

ภาพที่ได้ในกระจกโค้งจะมีความผิดเพี้ยนไปจากวัตถุจริง และจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแปลงตารางเปรียบเทียบซึ่งอยู่บนพื้นราบ ที่สะท้อนจากผิวของกระจกโค้ง เพื่อให้ได้ภาพที่ใกล้เคียงกับภาพที่ได้จากกล้อง ถึงแม้พื้นผิวของกระจกจะแตกต่างกัน ภาพที่ได้ก็จะเหมือนกัน โดยในการทดลองได้ใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลมกับกระจกโค้งทรงพาราโบลา ดังรูปที่ 2.16 โดยผลจากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ได้กับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ ในแง่ของการควบคุมและประมาณระยะของวัตถุได้



รูปที่ 2.16 ผลการใช้สมการเชิงอนุพันธ์กับกระจกโค้ง (ก) ตารางเปรียบเทียบ (ข) ภาพที่ได้จากกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม (ค) ภาพที่ได้จากกระจกโค้งรูปพาราโบลา (ง) ภาพหลังจากใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแปลงตารางเปรียบเทียบ (Hicks and Bajcsy, 1999)

Fiala and Basu (2002) ได้ใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว ซ้อนกัน โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน เพื่อให้สามารถหาค่าตำแหน่งของวัตถุในสามมิติได้โดยใช้การคำนวณเชิงเรขาคณิต ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแยกฉากหลัง (Feature extraction) ของภาพโดยเส้นในแนวนอนสามารถหาได้จาก การแปลงภาพมุมกว้างแบบเฮาท์ (Panoramic hough transform) และเส้นในแนวตั้งสามารถหาได้จากเส้นรัศมีซึ่งจะใช้วิธีการนี้กับกระจกโค้งทั้ง 2 ตัว เมื่อนำข้อมูลที่ได้อาจนำมาใช้หาค่าตำแหน่งของวัตถุในสามมิติ โดยวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ได้จริงทั้งในสถานะแวดล้อมจริงและสถานะแวดล้อมจำลอง ซึ่งแบบจำลองระบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แบบจำลองระบบกระจกของ Fiala and Basu (2002)

Kim and Suga (2007) นำเสนอการใช้กระจกโค้งรูปไฮเปอร์โบลาร่วมกับการไหลเชิงแสง เพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 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

2.7 สรุป

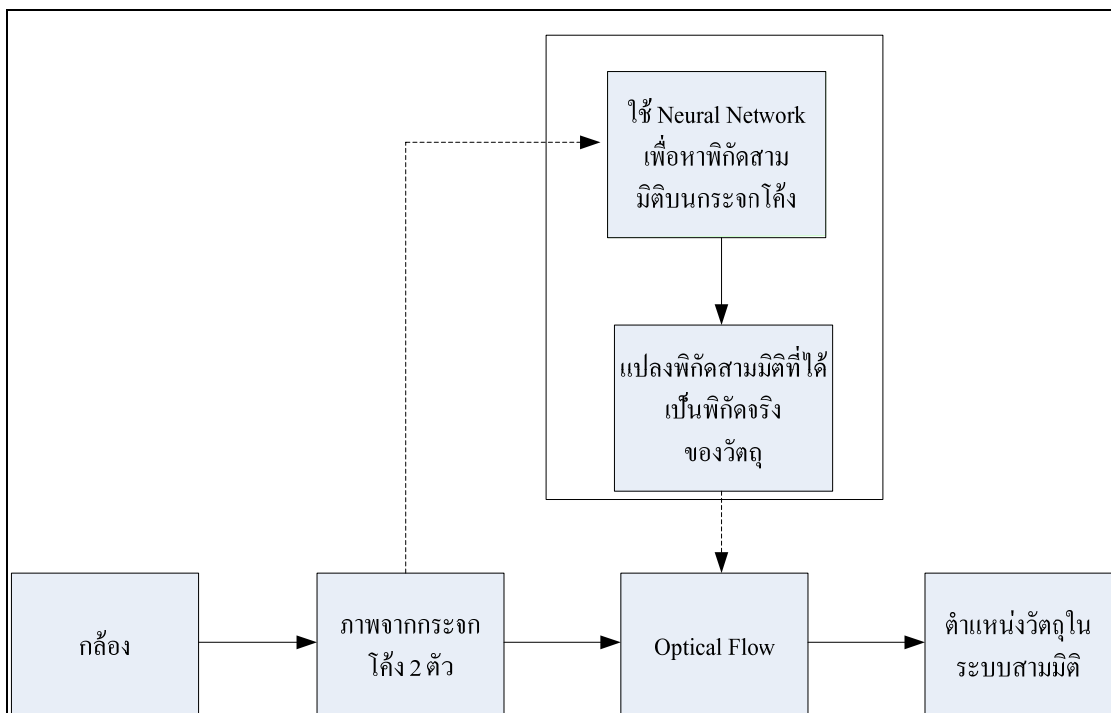
บทที่ 2 นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการจากฐานข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ากระจกโค้งที่ใช้ในตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกนั้นสามารถใช้ได้หลายรูปแบบเช่น กระจกโค้งทรงกรวย กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม กระจกโค้งทรงไฮเปอร์โบลา เป็นต้น ซึ่งกระจกโค้งแต่ละแบบนี้ก็มีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ยังสามารถใช้กล้อง 1 ตัวร่วมกับกระจกโค้งมากกว่า 1 ตัวเพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งในสามมิติได้ง่ายขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้อง 1 ตัวร่วมกับกระจกโค้ง 2 ตัว

บทที่ 3

การหาจุดในพิกัดสามมิติ

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการหาจุดในพิกัดสามมิติโดยใช้กล้อง 1 ตัวร่วมกับกระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ช่วยในการหาจุดสามมิติ บนผิวกระจกเนื่องจากกระจกโค้งที่ใช้ นั้นไม่ได้ผลิตขึ้นเองทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระจกโค้งอาจมีความผิดเพี้ยนไปจึงมีผลให้เมื่อนำมาใช้งานจริงจะมีค่าความผิดพลาดมาก และนอกจากการนี้การใช้โครงข่ายประสาทเทียมยังช่วยลดความยุ่งยากและซับซ้อนของสมการอีกทั้งยังลดความผิดพลาดที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ในการจัดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งมีผังการทำงานดังรูปที่ 3.1 โดยการไหลเชิงแสงจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

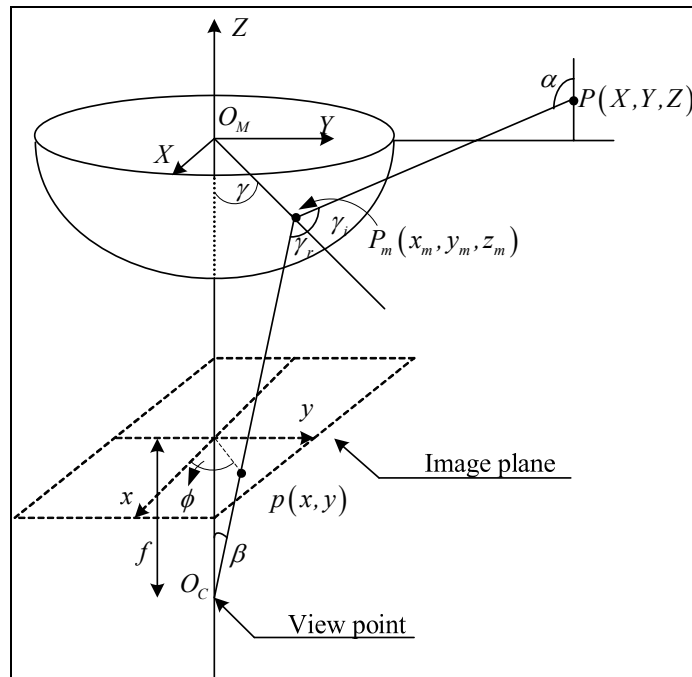


รูปที่ 3.1 แพนผังการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ

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 α คือ มุมระหว่างแกนตั้งฉากกับจุดในสามมิติถึงจุดบนผิวของกระจก
- β คือ มุมระหว่างแกนตั้งฉากกับจุดในระนาบของภาพ (Image plane) ถึงจุดศูนย์กลางการฉาย (Projection center)
- P คือ จุดในสามมิติ
- P_m คือ จุดที่ผิวกระจก
- p คือ จุดในระนาบของภาพ
- γ_i คือ มุมตกกระทบที่ผิวกระจกโค้ง
- γ_r คือ มุมสะท้อนที่ผิวกระจกโค้ง
- ϕ คือ มุมระหว่างจุด p กับแกน x
- f คือ ความยาวโฟกัส

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

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

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

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

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

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

แทน z_m และ t_m ลงในสมการที่ (3.8) เพื่อหาค่า α

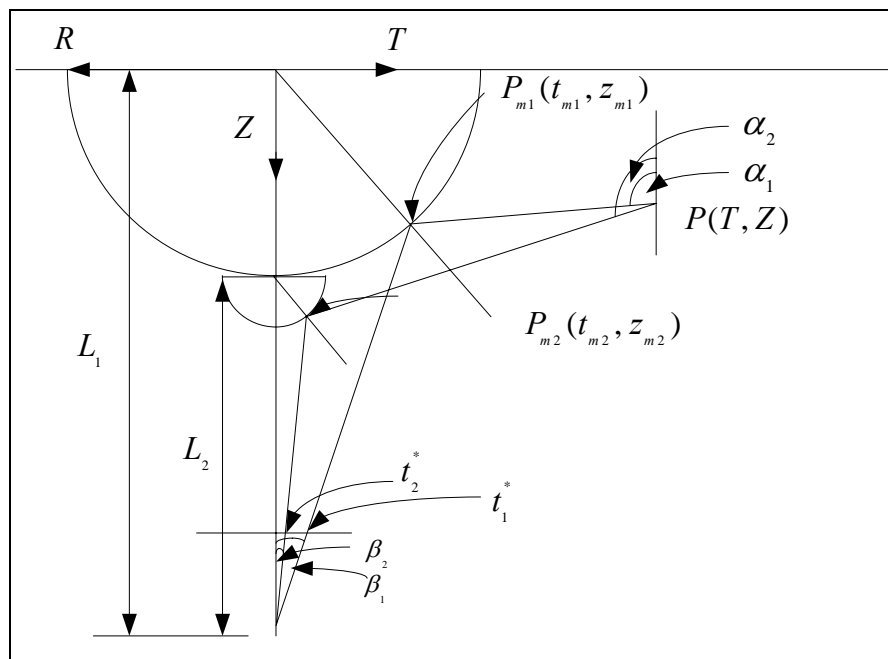
$$\alpha = 2 \tan^{-1}\left(\frac{t_m}{-z_m}\right) + \beta$$

แทน z_m , t_m และ α 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 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้กระจกโค้ง 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

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

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

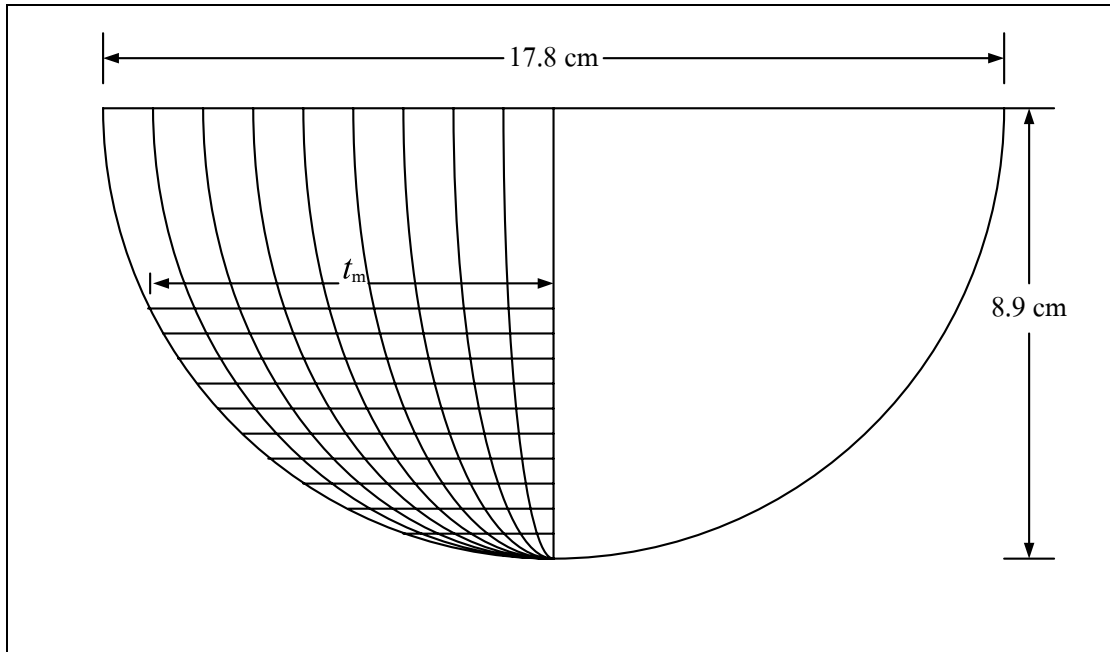
จากสมการที่ (3.11) และ (3.12) สามารถแก้สมการเพื่อคำนวณค่า T และ Z ได้

3.4 การหาจุดสามมิติ บนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

จากหัวข้อ 3.2 จะเห็นได้ว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณมีความยุ่งยากและซับซ้อน ทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความผิดพลาดมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการหาจุดพิกัดสามมิติ บนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับในการระบุจุดบนผิวกระจกโค้ง ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนและมีหลักการทำงานคือ มีการนำเสนอกลุ่มตัวอย่างให้กับโครงข่ายในรูปของอินพุตและเป้าหมาย (Target) ที่ต้องการให้โครงข่ายตอบสนอง เมื่ออินพุตถูกป้อนให้กับระบบ เอาต์พุตของโครงข่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเป้าหมายของอินพุต แล้วโครงข่ายจะทำการปรับค่าน้ำหนักประสาทและไบอัสตามผลการเรียนรู้ เพื่อให้เอาต์พุตของโครงข่ายเข้าสู่เป้าหมายที่ต้องการ โดยมีขั้นตอนดังนี้

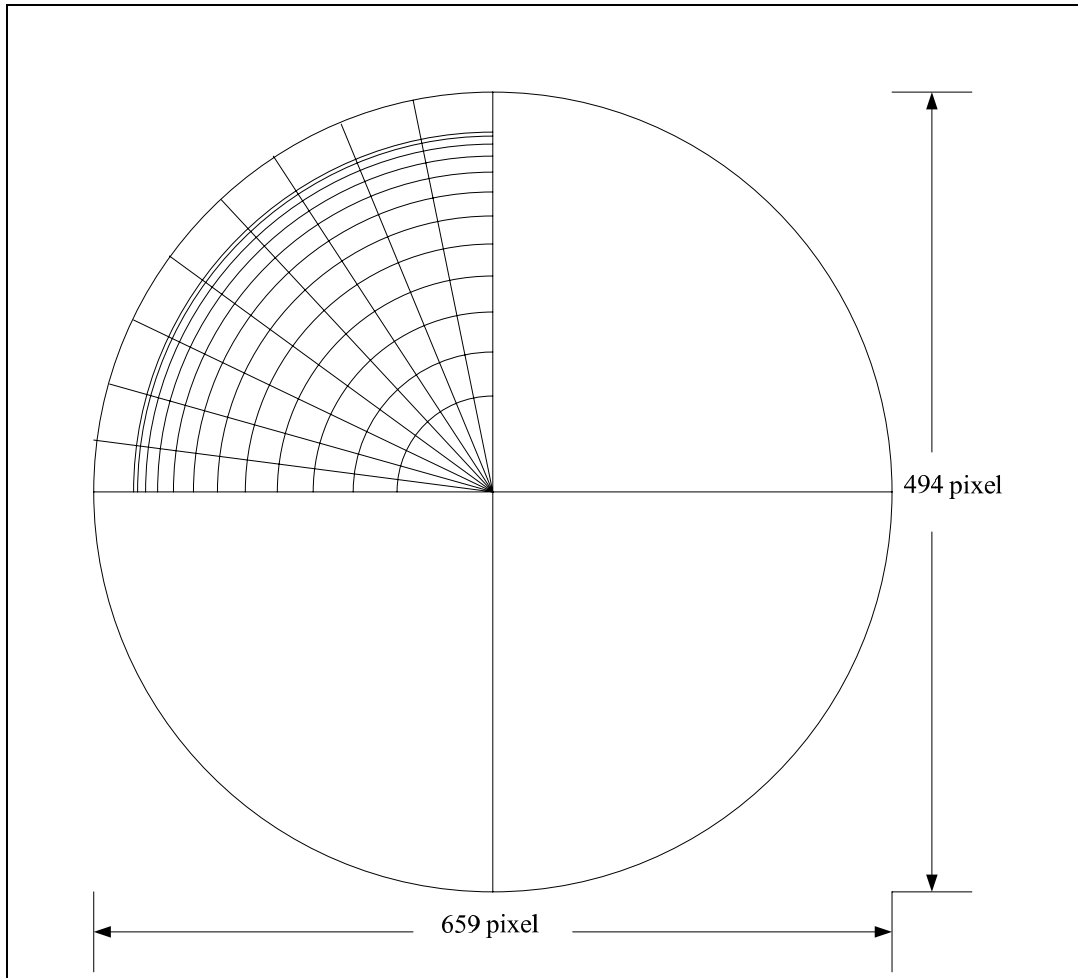
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดอินพุตและเป้าหมายของระบบ ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้จุดภาพเป็นอินพุต และใช้จุดบนผิวกระจกโค้งเป็นเป้าหมายของระบบ โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้

- วาดตารางลงบนผิวกระจกโค้งดังแสดงในรูปที่ 3.9 ถ่ายภาพด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 3.5 และวัดระยะ t_m ทุกจุดบนผิวกระจกโค้ง โดยระยะ t_m ที่ได้จะเป็นเป้าหมายของระบบ



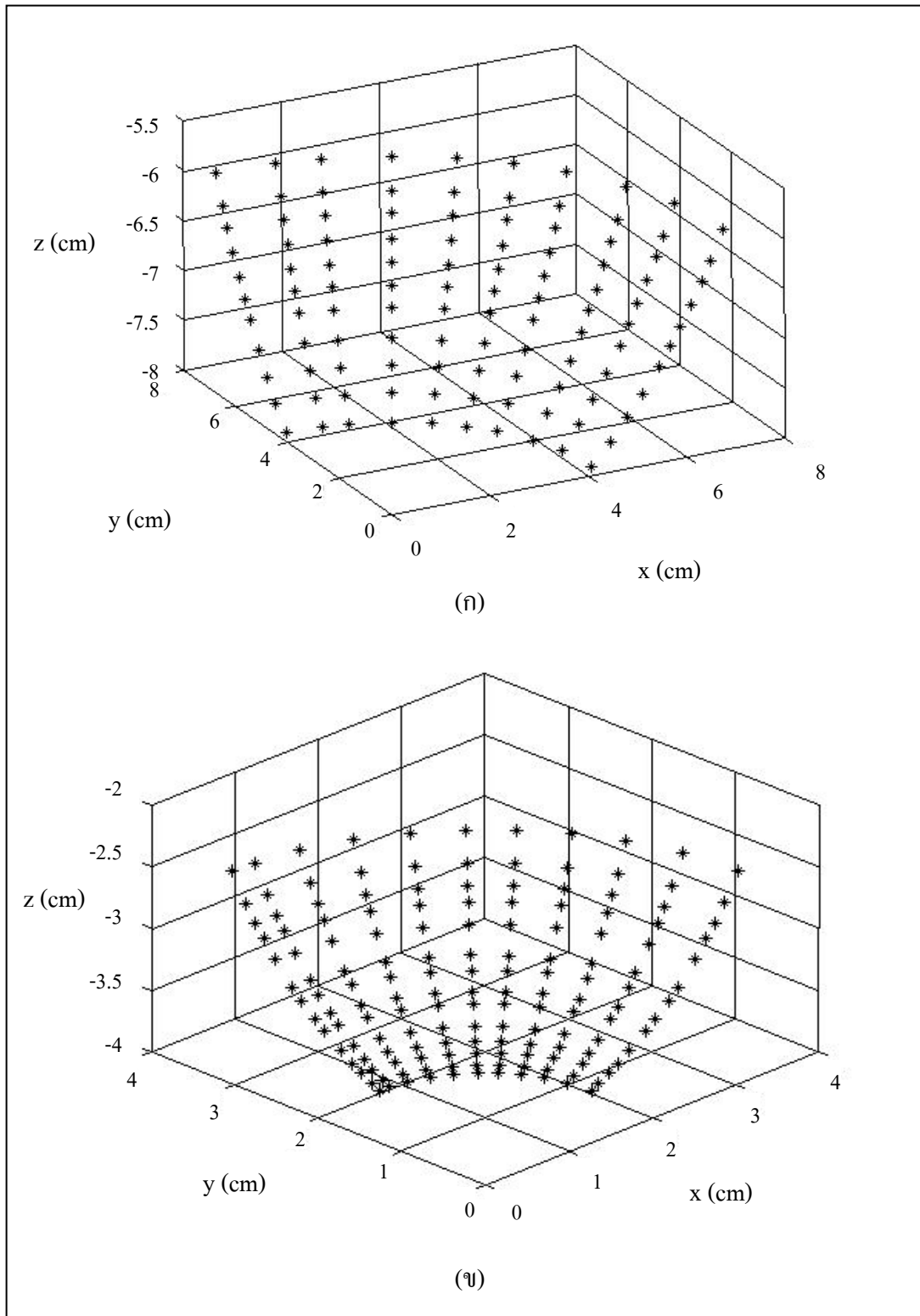
รูปที่ 3.5 ภาพด้านข้างของกระบอกโค้ง A

- ถ่ายภาพด้านล่างของกระบอกโค้งดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยจะกำหนดให้จุดภาพที่ตำแหน่งจุดตัดกันของเส้นตรงเป็นอินพุต



รูปที่ 3.6 ภาพด้านล่างของกระจกโค้ง A

โดยจุดที่วัดได้เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 3.7



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

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

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ พารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ จำนวนชั้น จำนวนเซลล์ประสาทเทียม และฟังก์ชันถ่ายโอน เพื่อให้ระบบที่ได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบเลือกจำนวนชั้น จำนวนเซลล์ประสาทเทียม และฟังก์ชันถ่ายโอนที่เหมาะสม ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับโดยให้มี 2 อินพุต 2 เอาต์พุต และมีชั้นซ่อนเร้น และฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 และใช้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบโดยใช้กระจกโค้ง A โครงข่ายที่ให้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดคือโครงข่าย 2-50-1 (ชั้นอินพุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์ มีชั้นซ่อนเร้น 1 ชั้น มีเซลล์ประสาทเทียม 50 เซลล์ และชั้นเอาต์พุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์) และใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอการิทึม ซิกมอยด์ (Log - Sigmoid) ได้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.22509×10^{-9} และจากผลการทดสอบโดยใช้กระจกโค้ง B โครงข่ายที่ให้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดคือโครงข่าย 2-60-1 (ชั้นอินพุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์ มีชั้นซ่อนเร้น 1 ชั้น มีเซลล์ประสาทเทียม 60 เซลล์ และชั้นเอาต์พุตมีเซลล์ประสาทเทียม 2 เซลล์) และใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลอการิทึม ซิกมอยด์ (Log - Sigmoid) ได้ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.25391×10^{-8}

ตารางที่ 3.1 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กระจกโค้ง A)

โครงข่าย	จำนวนรอบ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย
2-5-2	1,000	logsig - logsig	2.52168×10^{-4}
2-10-2	1,000	logsig - logsig	6.26449×10^{-6}
2-20-2	1,000	logsig - logsig	2.60302×10^{-6}
2-40-2	1,000	logsig - logsig	5.64627×10^{-7}
2-50-2	1,000	logsig - logsig	1.22509×10^{-9}
2-60-2	1,000	logsig - logsig	2.35471×10^{-9}

ตารางที่ 3.1 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ
(กระจกโค้ง A) (ต่อ)

โครงข่าย	จำนวนรอบ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย
2-10-5-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$2.35679 \times 10e-7$
2-5-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$1.23141 \times 10e-7$
2-10-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$8.42854 \times 10e-8$
2-20-10-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$3.74963 \times 10e-8$
2-10-20-2	1,000	logsig - logsig- logsig	$2.34257 \times 10e-8$

ตารางที่ 3.2 ผลการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อเลือกพารามิเตอร์ของระบบ (กระจกโค้ง B)

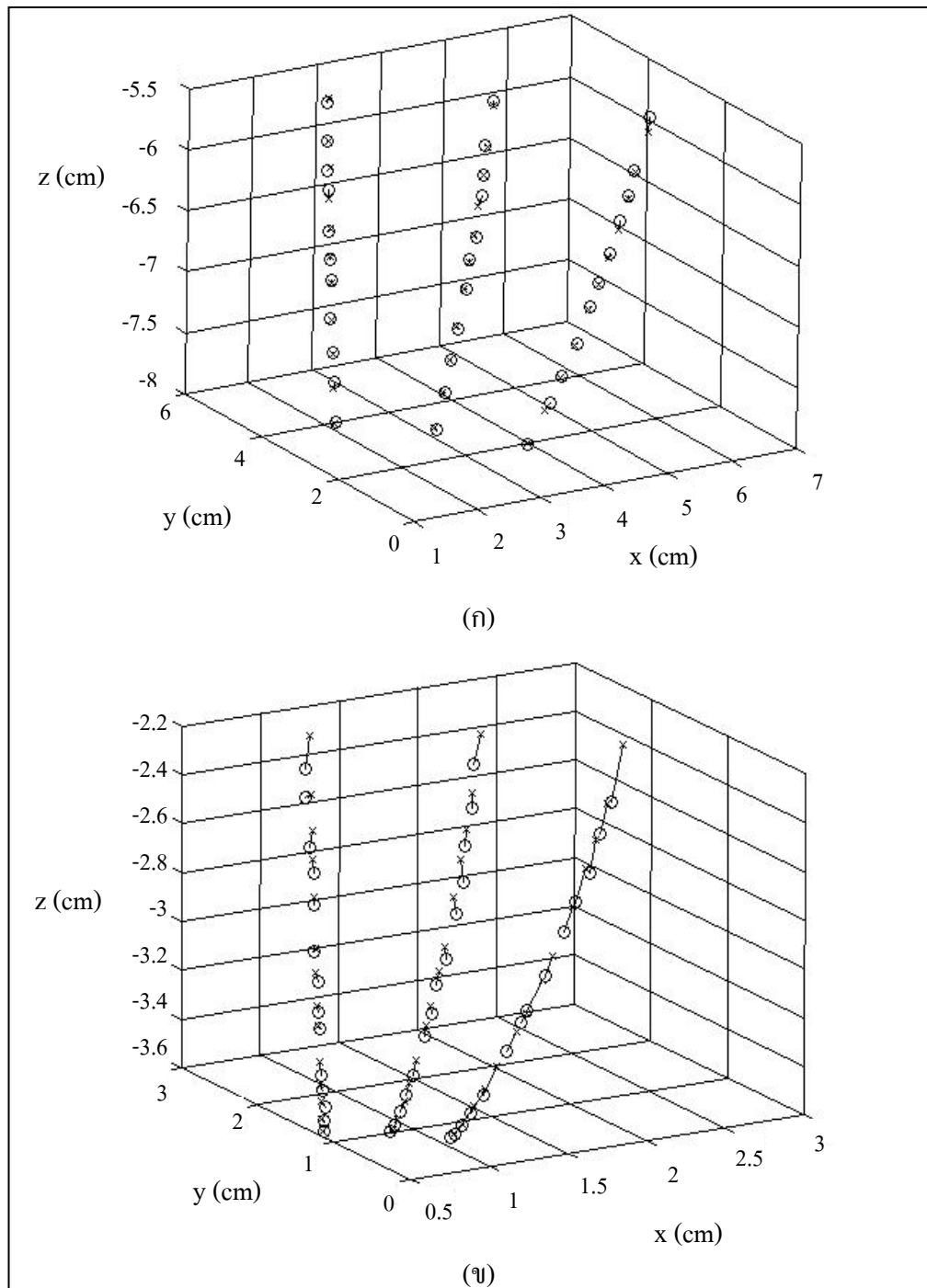
โครงข่าย	จำนวนรอบ	ฟังก์ชันถ่ายโอน	ค่าความผิดพลาดแบบกำลังสองเฉลี่ย
2-5-2	1,000	logsig - logsig	$5.24398 \times 10e-3$
2-10-2	1,000	logsig - logsig	$1.25419 \times 10e-5$
2-20-2	1,000	logsig - logsig	$9.14576 \times 10e-5$
2-40-2	1,000	logsig - logsig	$2.31294 \times 10e-6$
2-50-2	1,000	logsig - logsig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

ขั้นตอนที่ 4 ทำการฝึกสอนโครงข่ายที่ออกแบบไว้

ขั้นตอนที่ 5 นำจุดทดสอบที่ได้มาทำการจำลอง (Simulation) กับโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับที่ได้ทำการฝึกสอนไว้แล้ว

3.4.1 ผลการทดสอบ

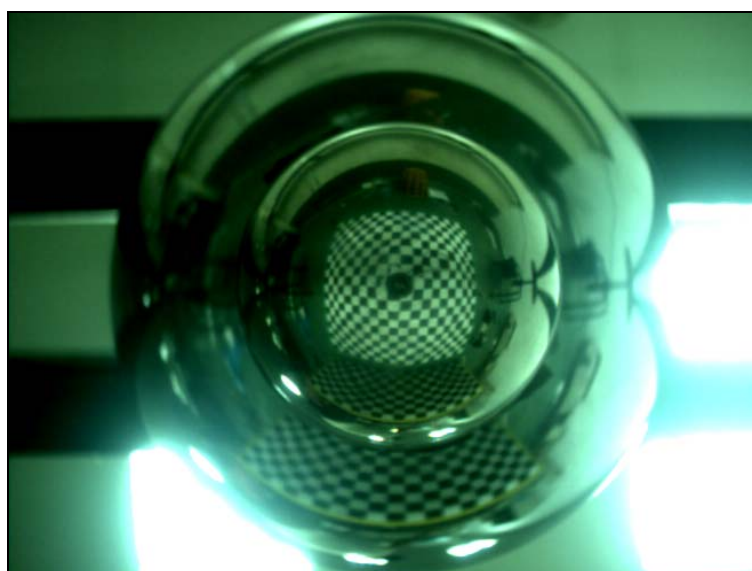
เมื่อทำการทดสอบระบบ โดยใช้จุดทดสอบกระจกโค้ง A จำนวน 33 จุด และกระจกโค้ง B จำนวน 42 จุด และเมื่อนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟจะได้ผลดังรูปที่ 3.8



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

3.5 การคำนวณหาจุดในพิกัดสามมิติจากจุดบนผิวระจกโค้ง

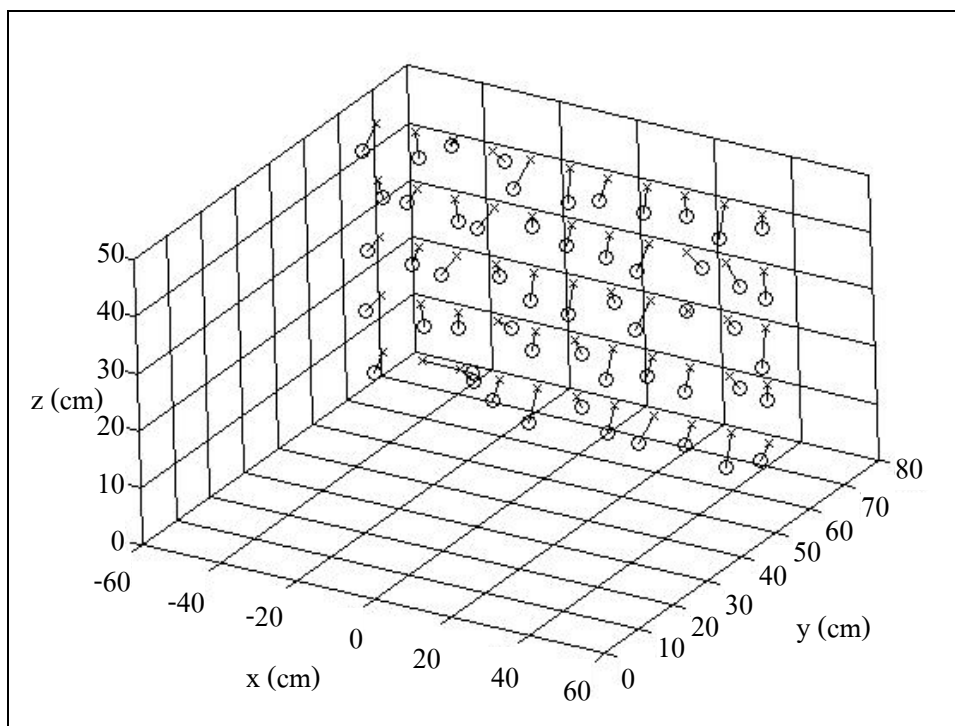
ทำการทดสอบระบบโดยใช้ตารางเปรียบเทียบโดยวางตั้งฉากกับพื้นดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยใช้จุดบนตารางจำนวน 55 จุดซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.3 และในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายตารางเปรียบเทียบ

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 นอกจากนั้นกระจกโค้งที่ใช้ในนั้นไม่ได้ผลิตขึ้นเอง ทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระจกโค้งอาจมีความผิดพลาดไปจึงมีผลให้เมื่อนำมาใช้งานจริงจะมีค่าความผิดพลาดมากดังนั้นจึงได้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับในการฝึกสอนเพื่อหาพิกัดสามมิติบนผิวกระจกโค้ง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับที่มีโครงข่าย 2-50-1 สำหรับกระจกโค้ง A และโครงข่าย 2-60-1 สำหรับกระจกโค้ง B และฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้คือ ลอการิทึม ซิกมอยด์ เพื่อใช้ในการหาค่าจุดพิกัดในสามมิติ เมื่อทำการทดลองโดยการนำจุดทดสอบจำนวน 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 ซึ่งค่าความผิดพลาดนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทำให้สรุปได้ว่าการใช้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการคำนวณจุดในพิกัดสามมิติได้

บทที่ 4

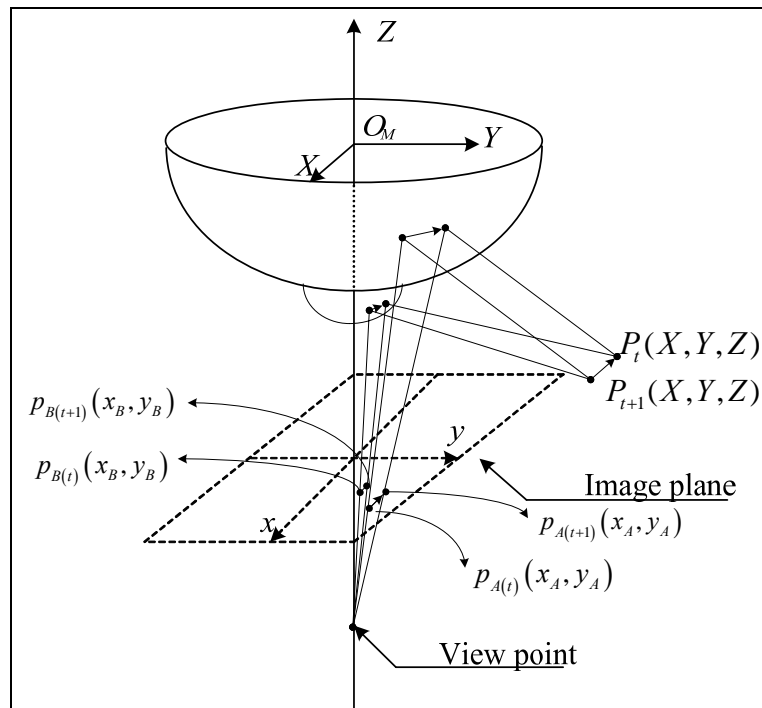
การบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก และการไหลเชิงแสง

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกพร้อมกับกระบวนการไหลเชิงแสงซึ่งจากบทที่ 3 นั้นการใช้ตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกจะสามารถคำนวณจุดในพิกัดสามมิติได้แต่ในการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ นั้นจำเป็นจะต้องใช้วิธีการอื่นร่วมด้วยซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการไหลเชิงแสง ซึ่งทำให้สามารถทราบถึงโครงสร้างและทิศทางของวัตถุที่เคลื่อนที่ได้

4.2 การไหลของแสง (Optical flow)

จากทฤษฎีการไหลเชิงแสงซึ่งได้กล่าวในบทที่ 2 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกสามารถเขียนแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.1

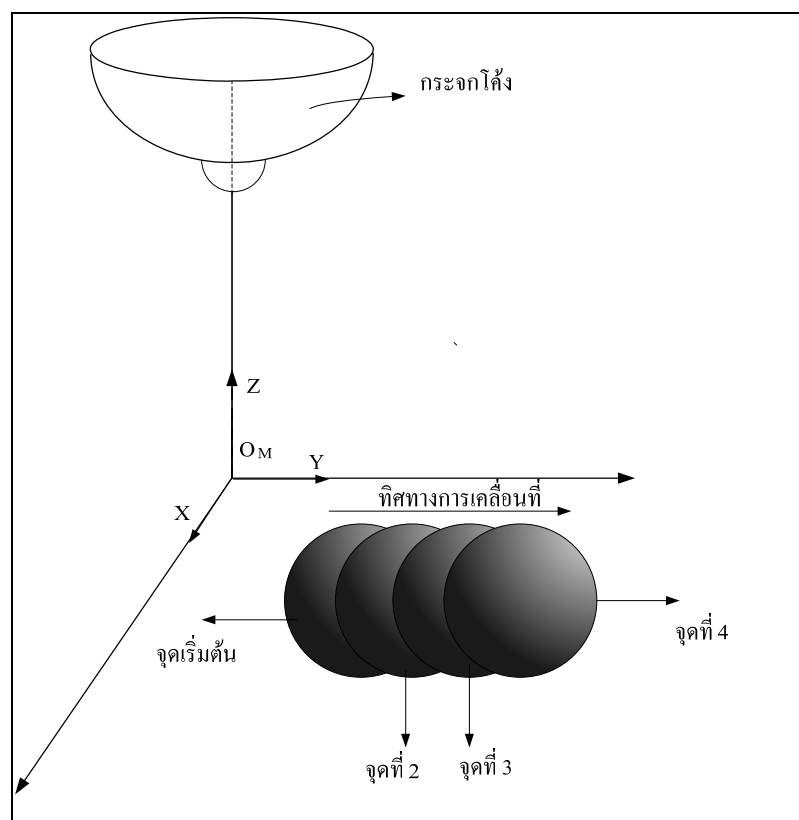


รูปที่ 4.1 โครงสร้างการคำนวณการไหลเชิงแสงแบบสามมิติ

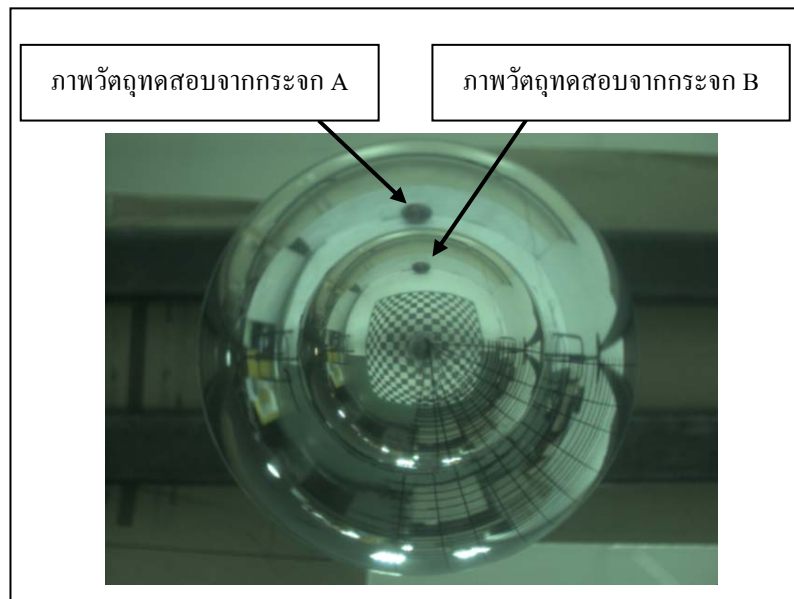
จากรูปที่ 4.1 เมื่อวัตถุอยู่ที่ตำแหน่ง $P_i(X,Y,Z)$ ภาพที่ได้จะสะท้อนผ่านกระจกโค้ง A และกระจกโค้ง B ไปสู่ระนาบของภาพที่ตำแหน่ง $p_{A(i)}(x_A,y_A)$ และ $p_{B(i)}(x_B,y_B)$ ซึ่งเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง $P_{i+1}(X,Y,Z)$ จะทำให้ตำแหน่ง $p_{A(i)}(x_A,y_A)$ และ $p_{B(i)}(x_B,y_B)$ บนระนาบของภาพเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง $p_{A(i+1)}(x_A,y_A)$ และ $p_{B(i+1)}(x_B,y_B)$ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุนี้เป็นเวกเตอร์ระยะทาง ซึ่งจะแสดงได้เป็นรูปลูกศร โดยจะเรียกเวกเตอร์นี้ว่าการไหลเชิงแสง ซึ่งเมื่อนำเวกเตอร์ที่ปรากฏบนระนาบของภาพมาทำตามกระบวนการตามบทที่ 3 จะสามารถทำให้ทราบถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ของวัตถุในสามมิติได้

4.3 ผลการทดสอบระบบ

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

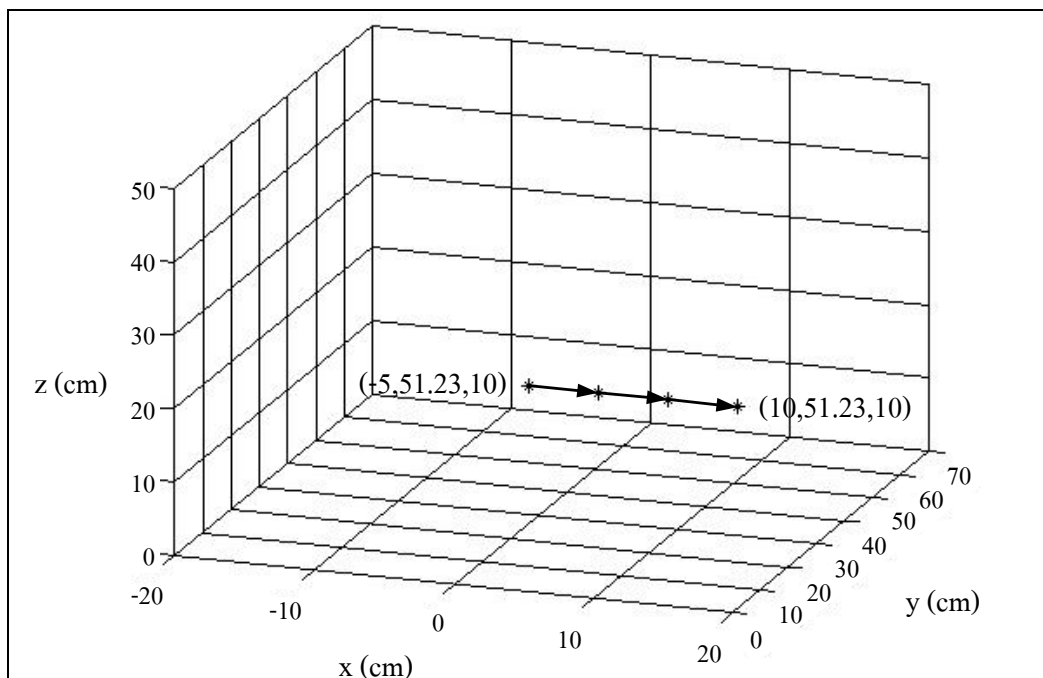


รูปที่ 4.2 แบบจำลองการทดสอบระบบ

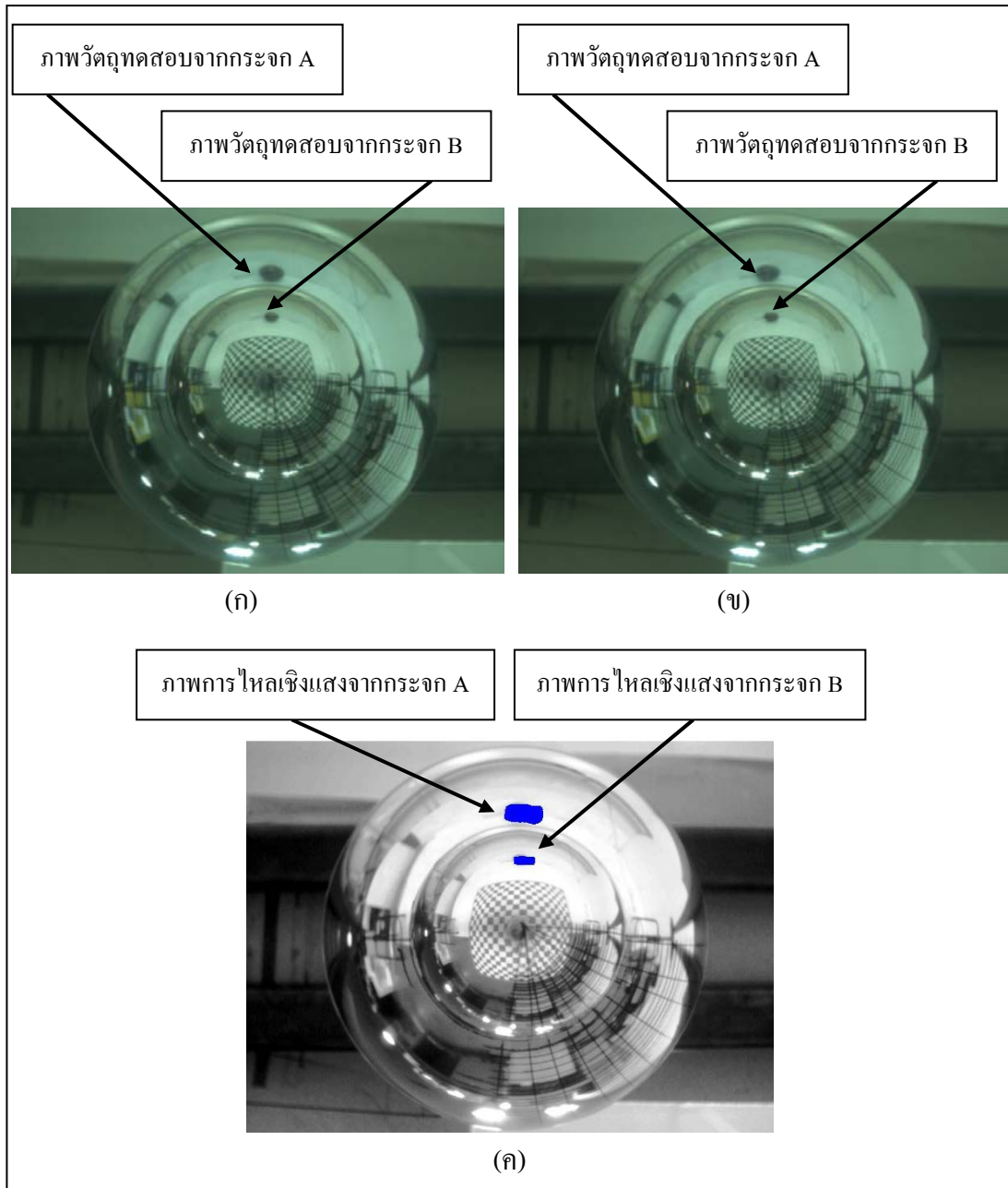


รูปที่ 4.3 ภาพวัตถุทดสอบ

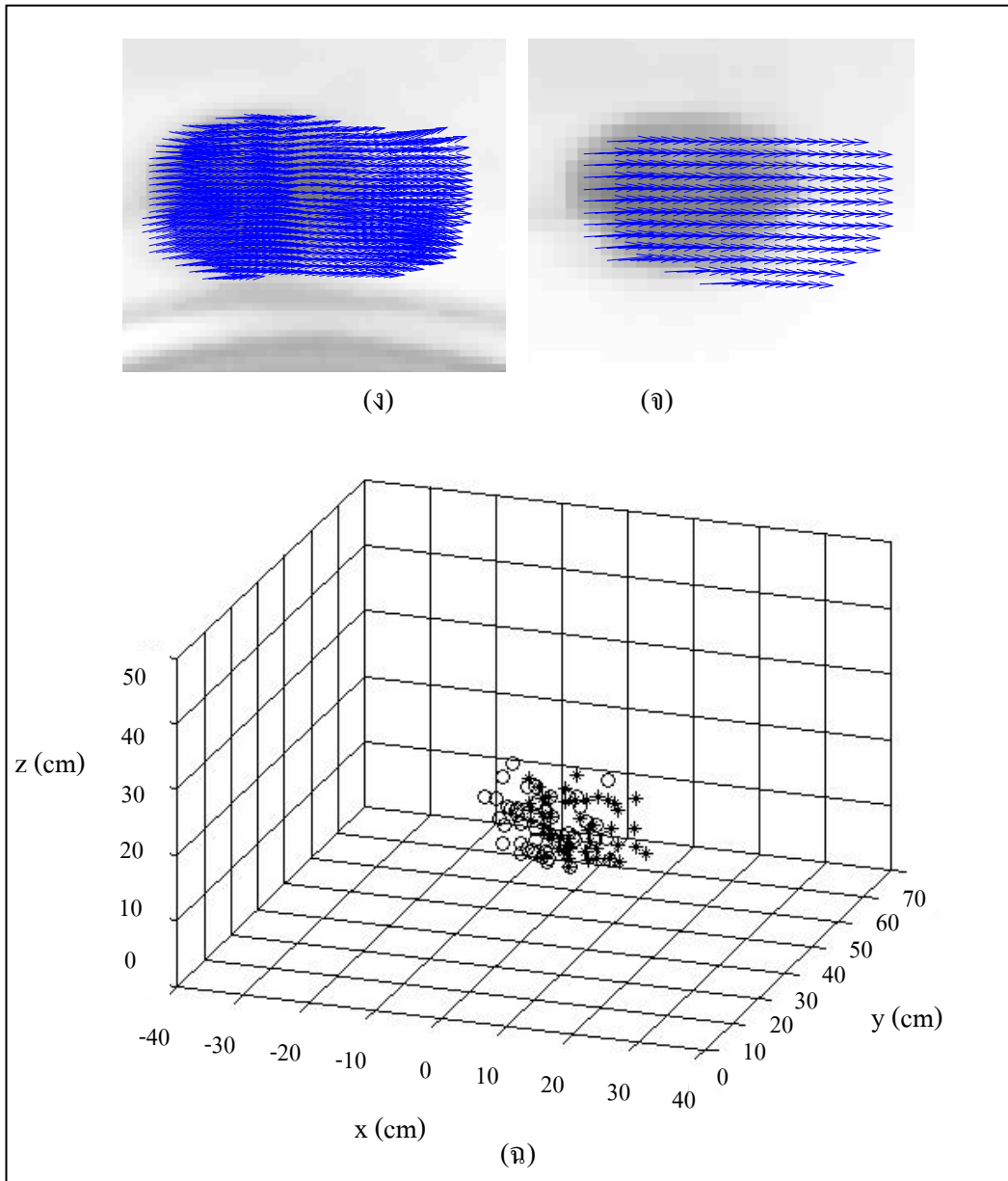
- เคลื่อนที่ตามแนวแกน X ดังแสดงในรูปที่ 4.4



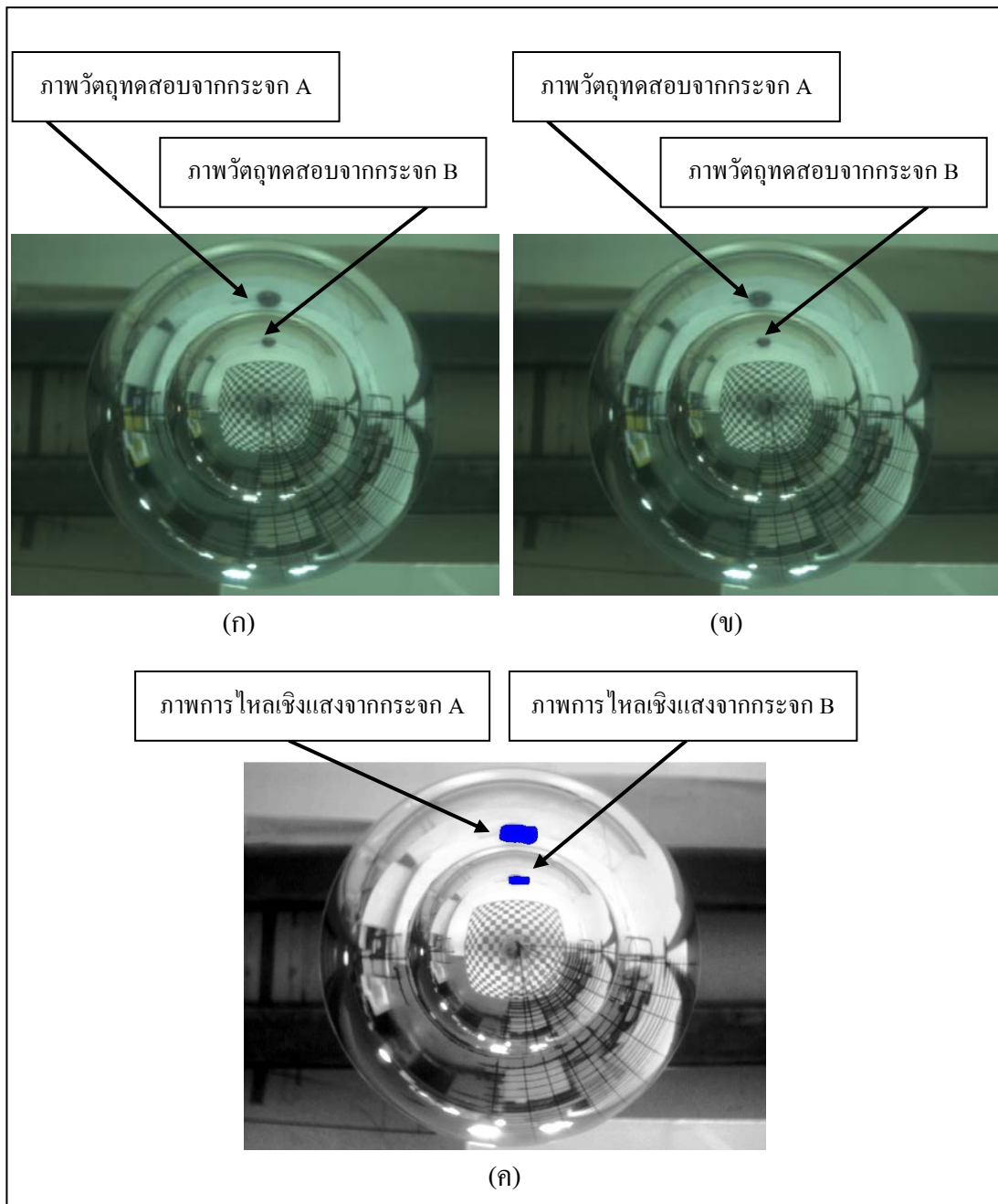
รูปที่ 4.4 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน X



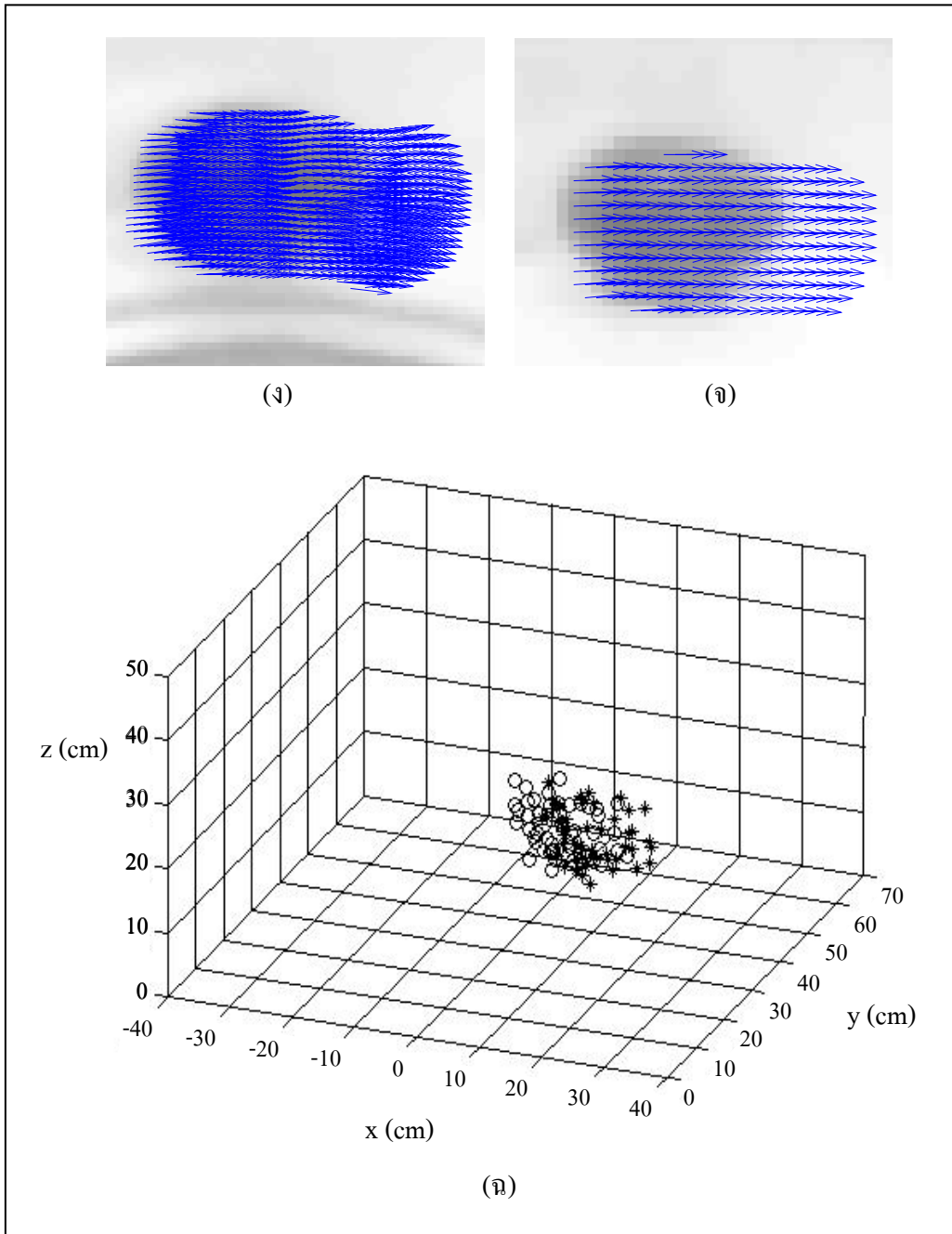
รูปที่ 4.5 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



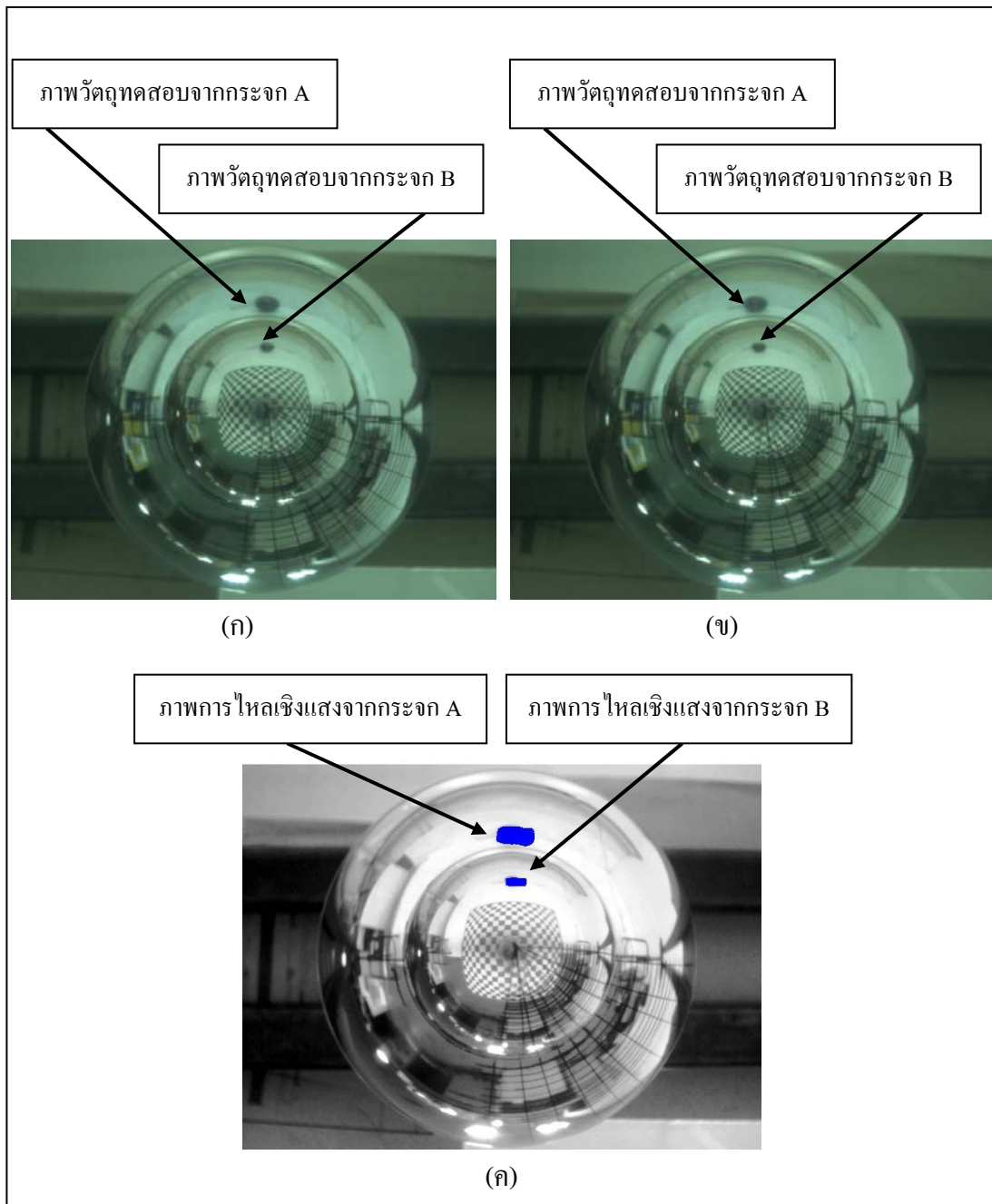
รูปที่ 4.5 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B
 (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)



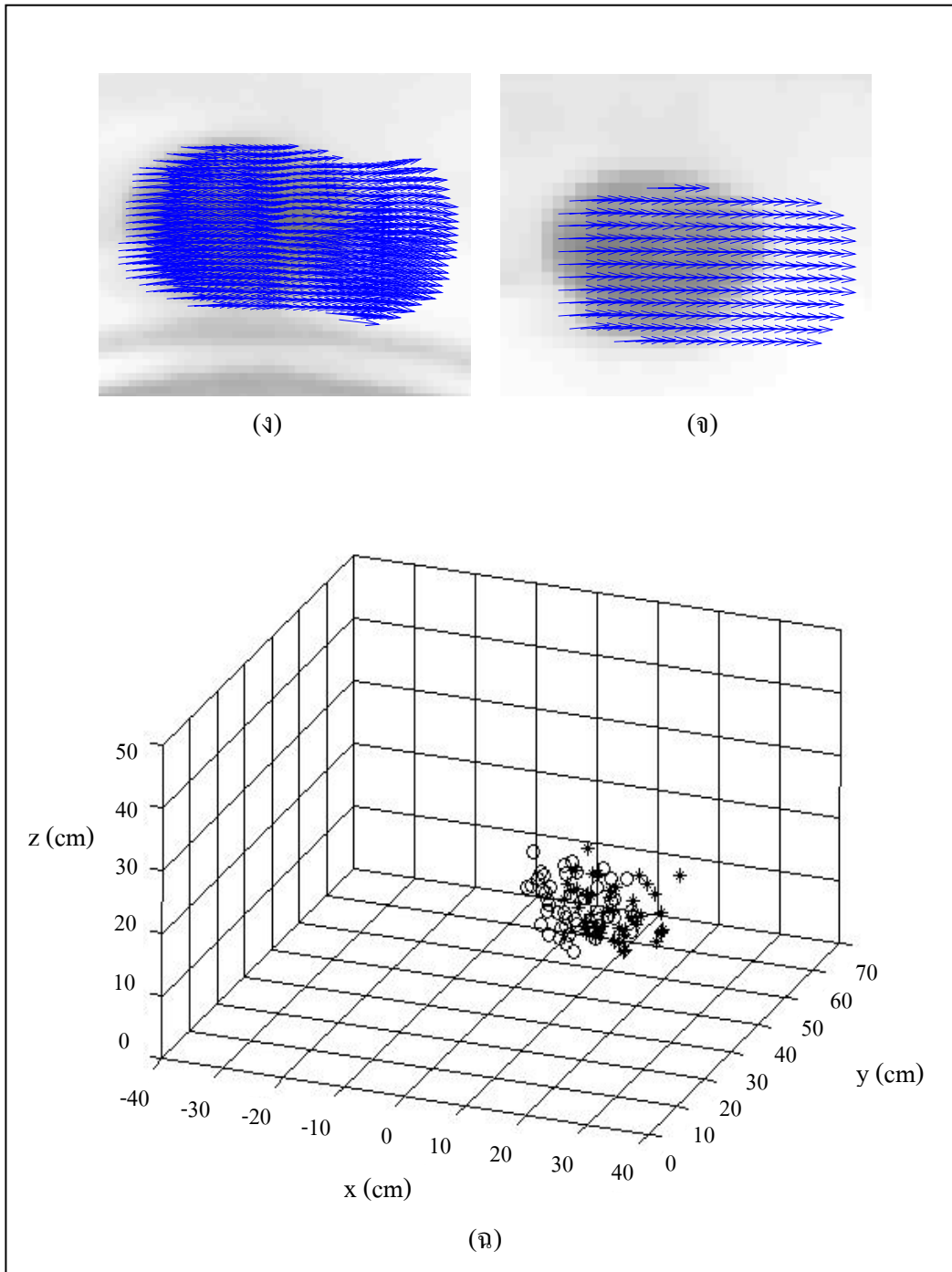
รูปที่ 4.6 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



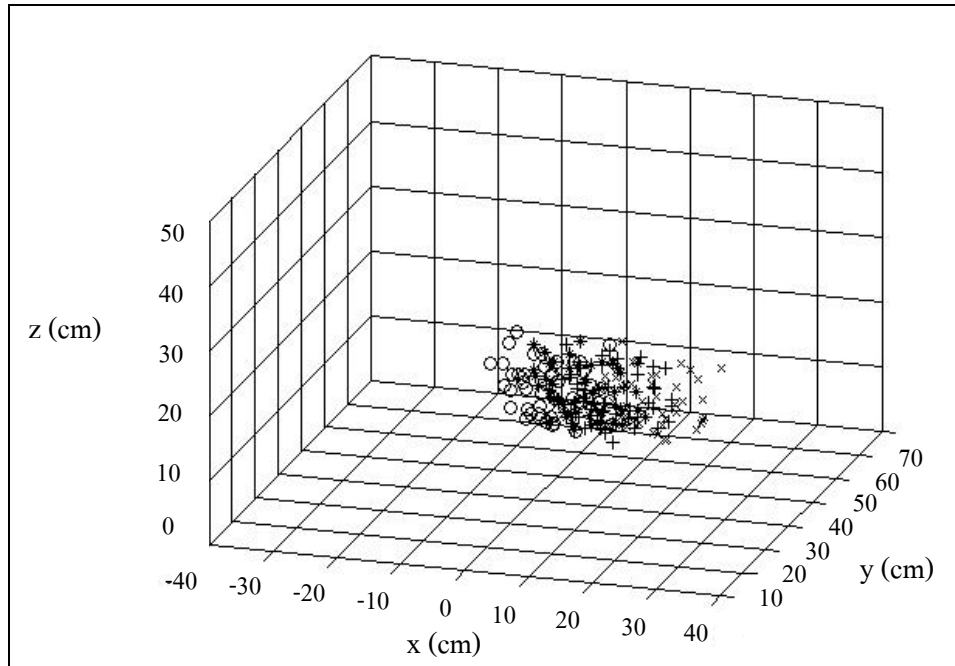
รูปที่ 4.6 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)



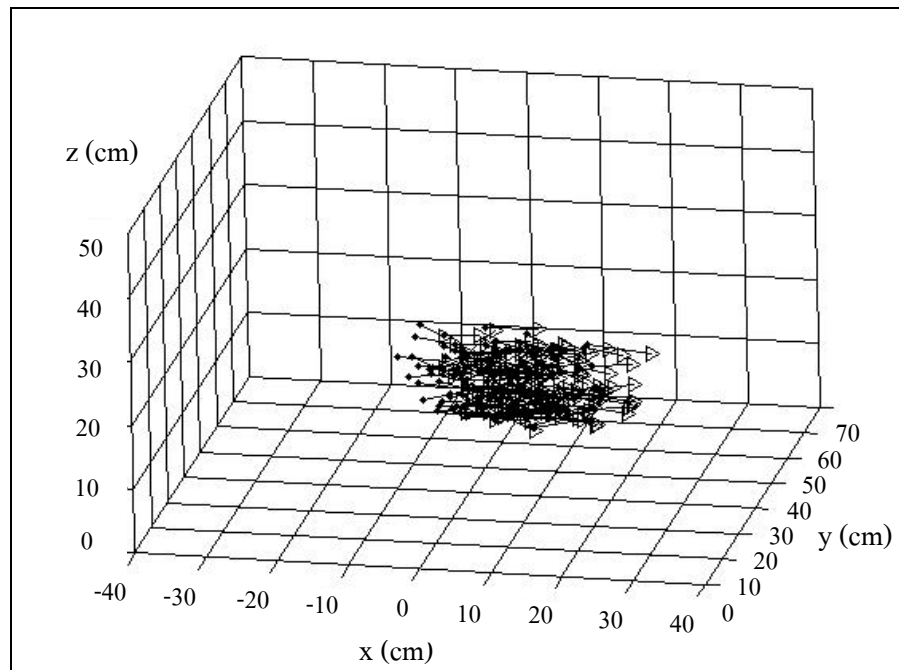
รูปที่ 4.7 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B
 (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



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)

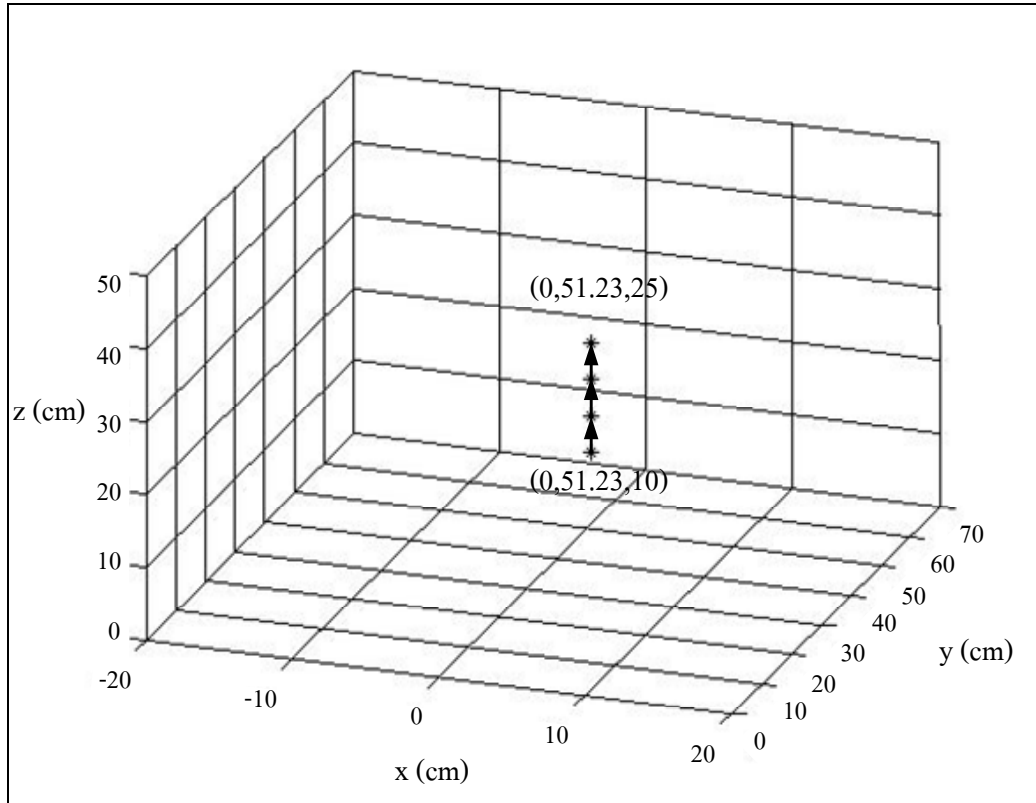


รูปที่ 4.8 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น
 “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4

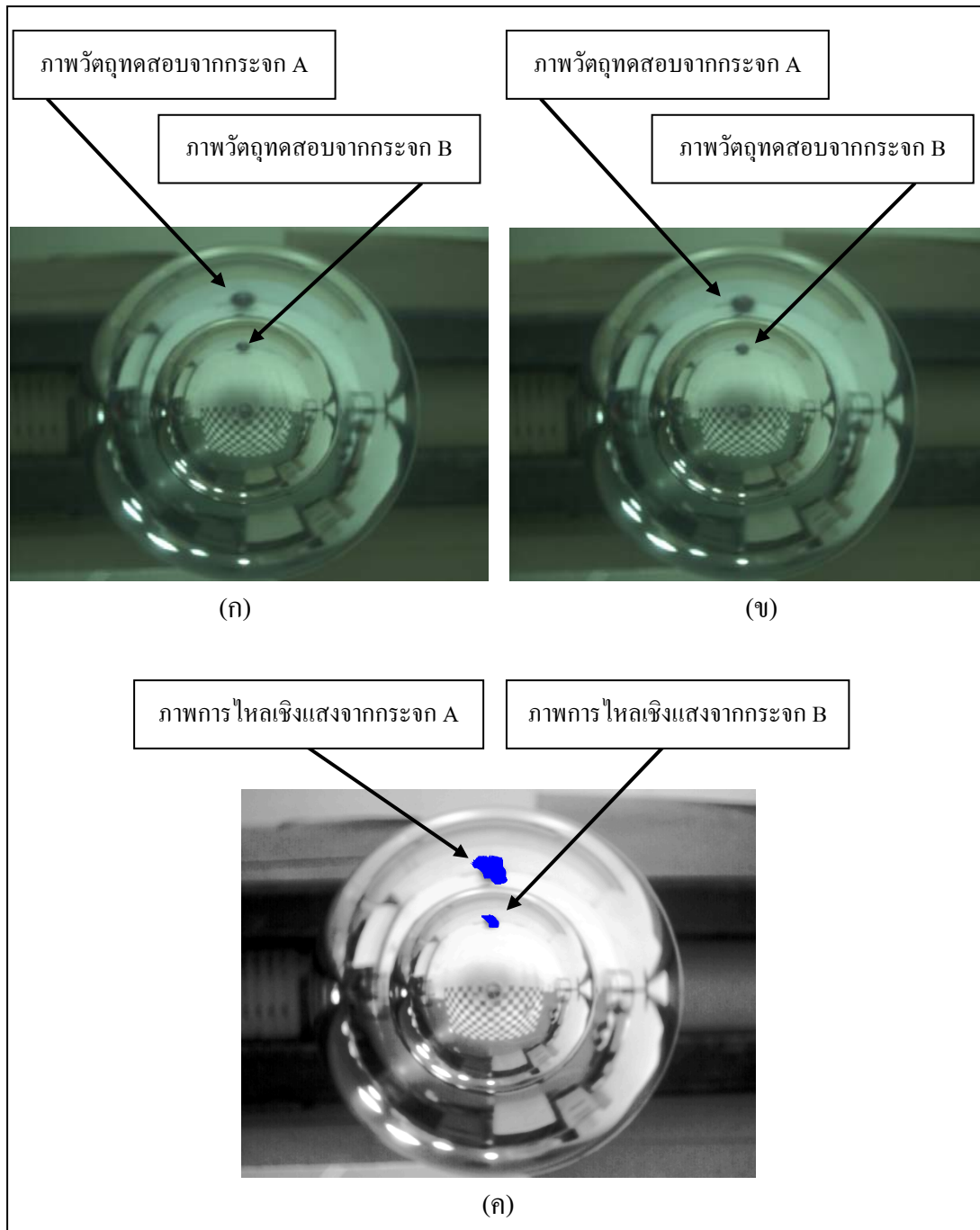


รูปที่ 4.9 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4

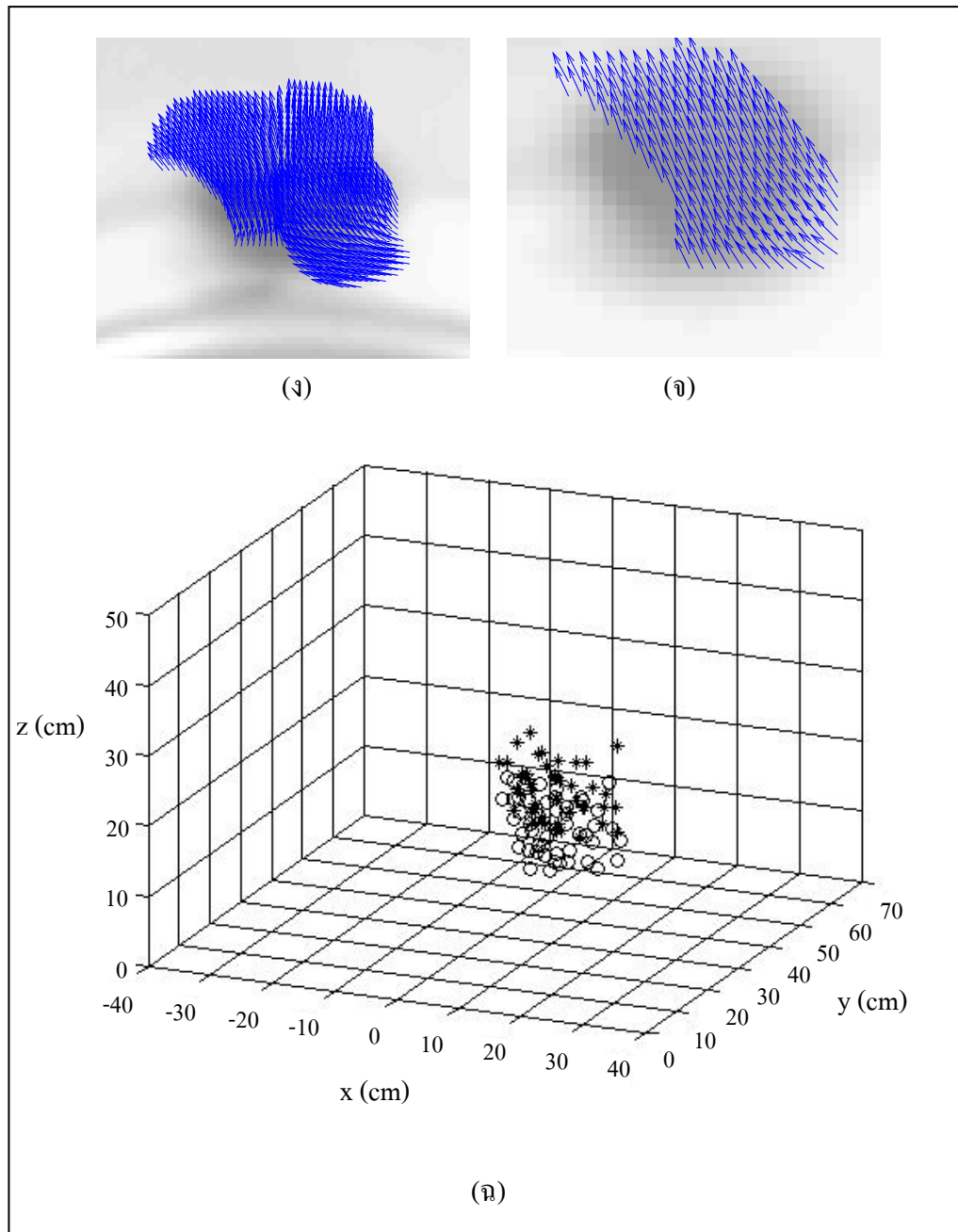
- เคลื่อนที่ตามแนวแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 4.10



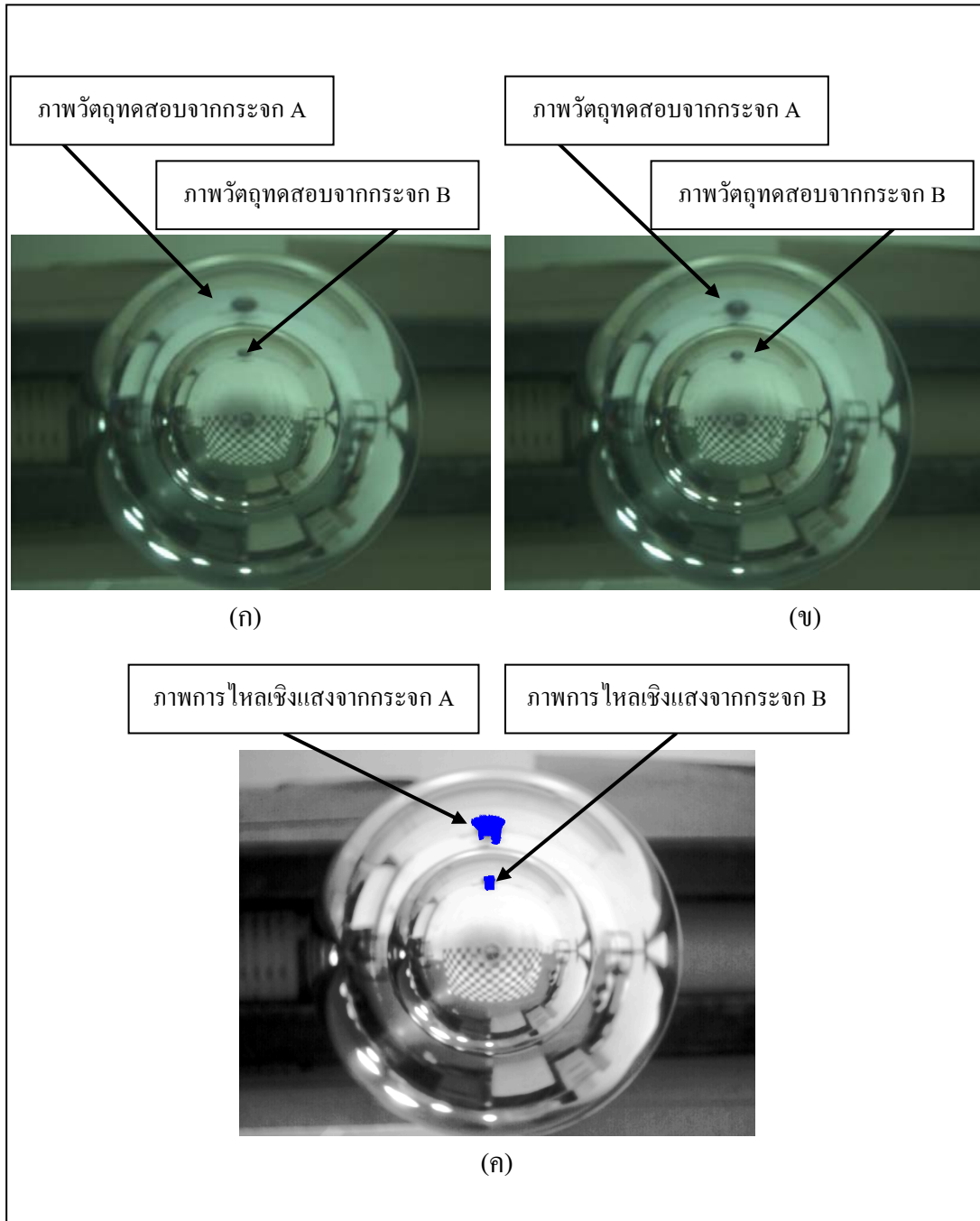
รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบตามแนวแกน Z



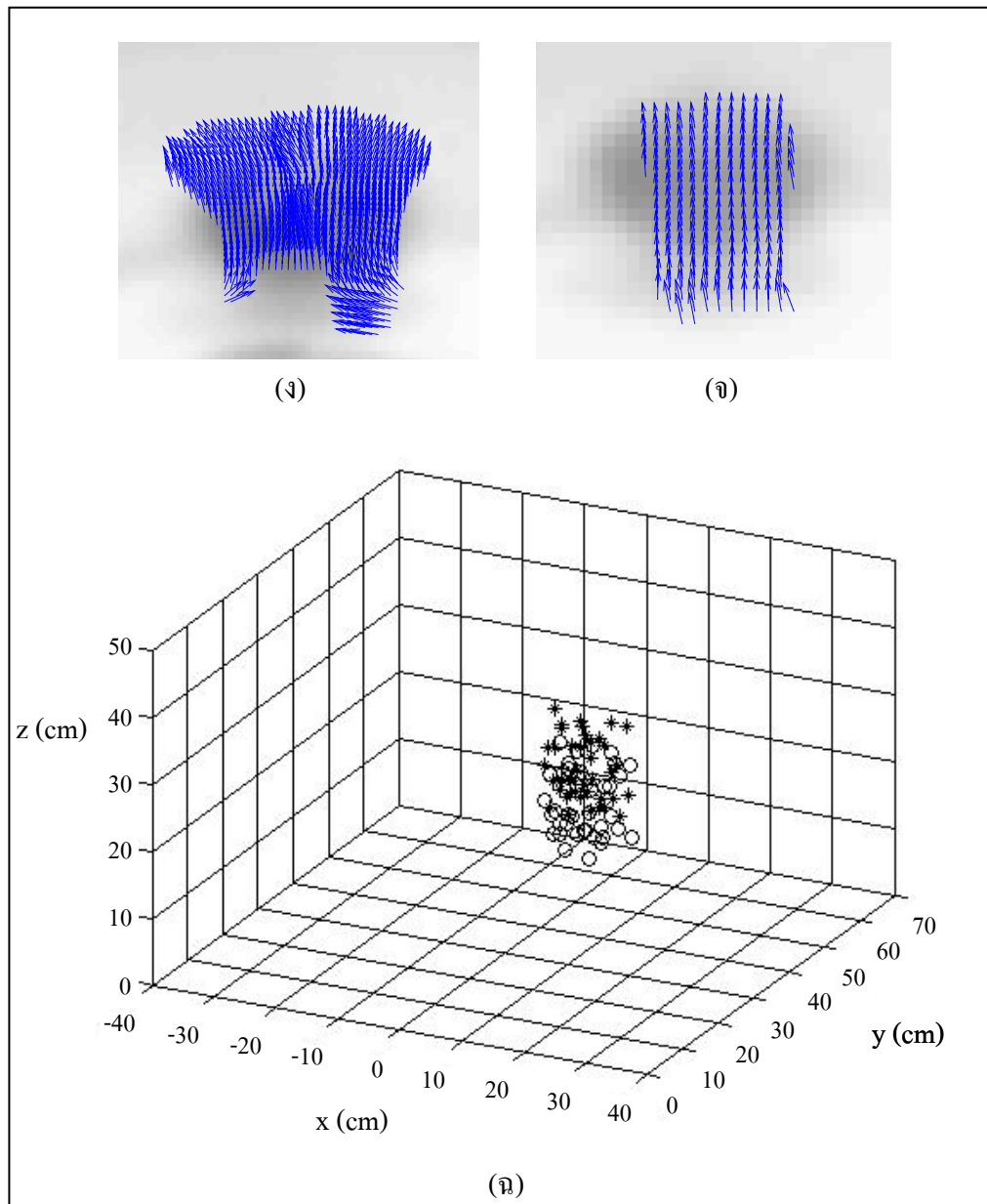
รูปที่ 4.11 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



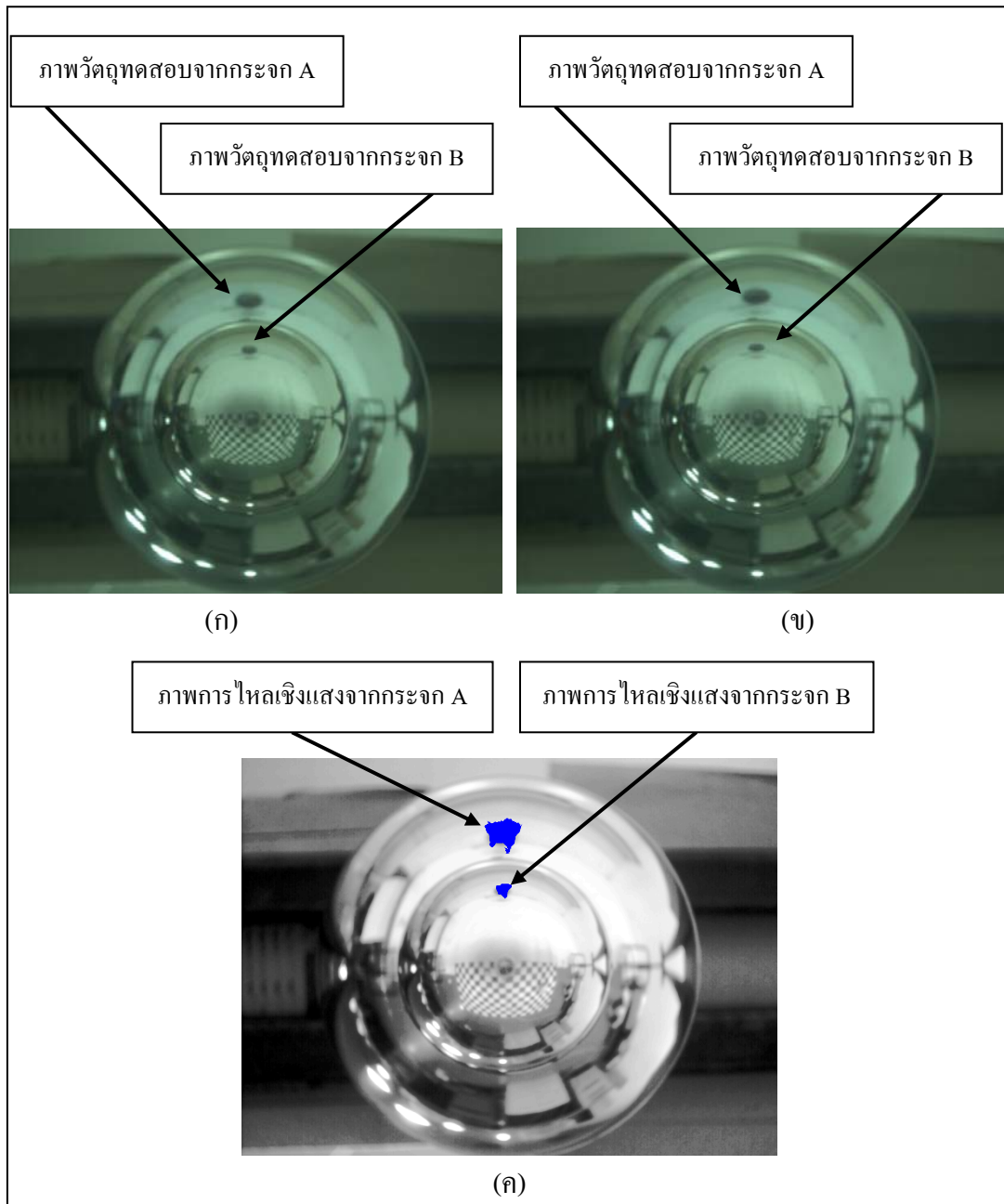
รูปที่ 4.11 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)



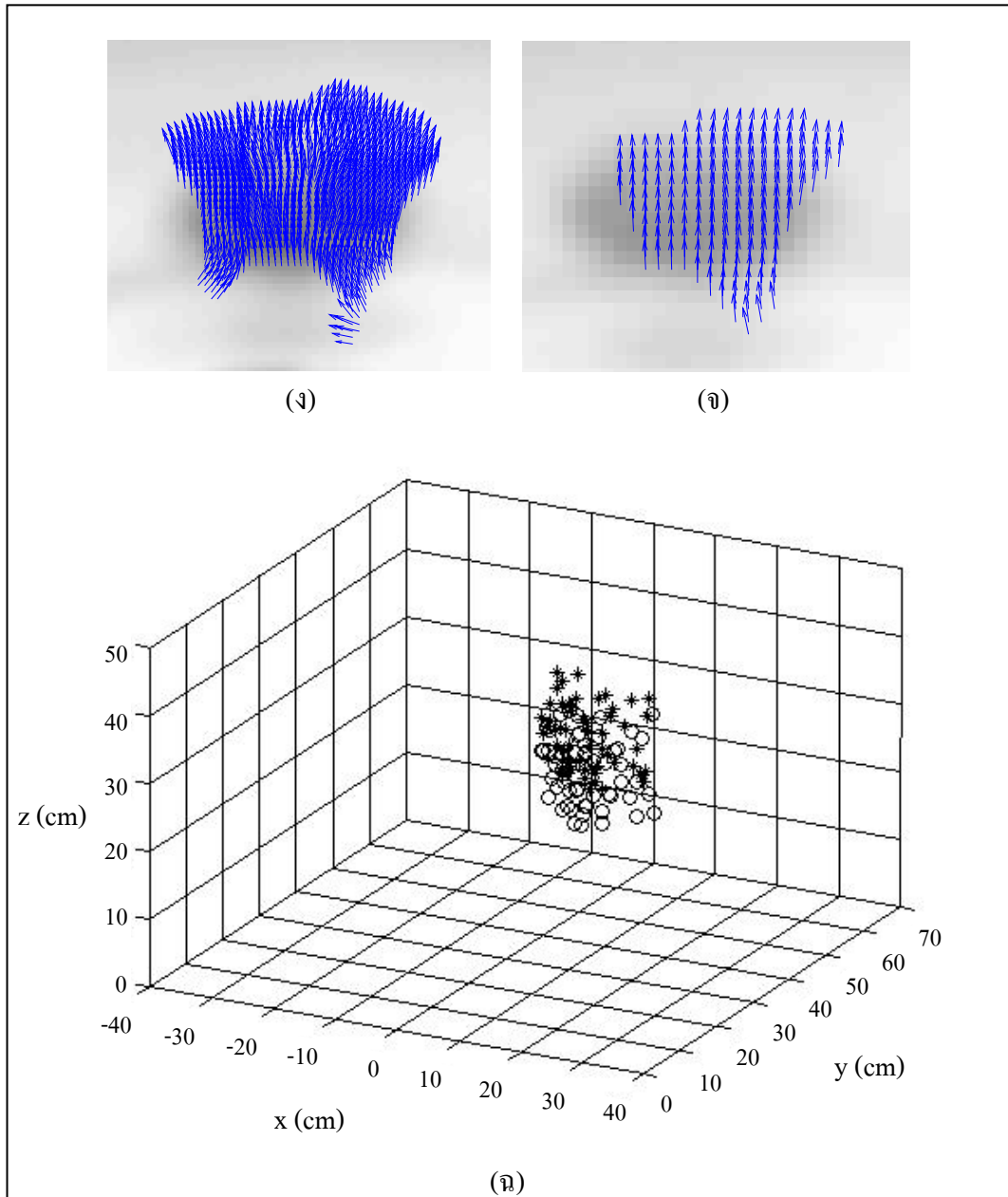
รูปที่ 4.12 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



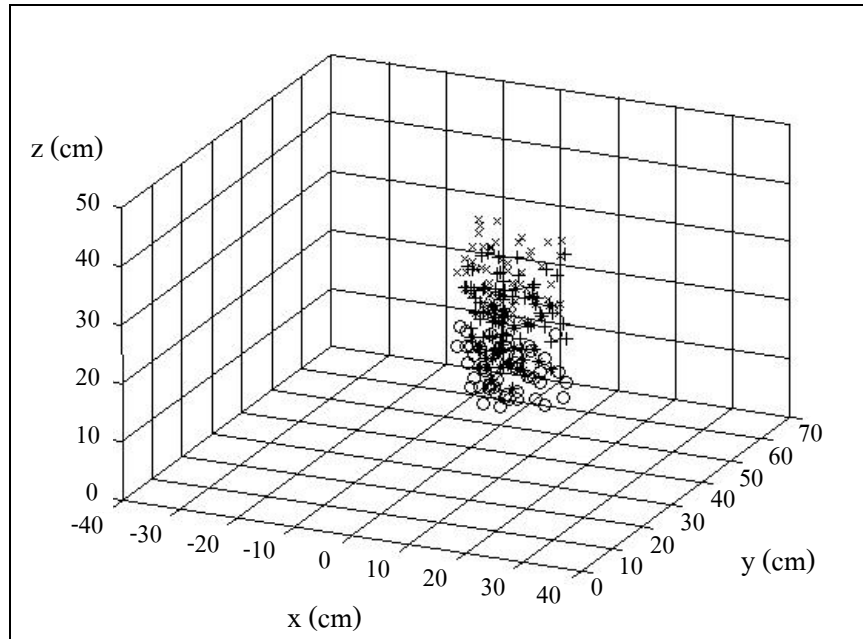
รูปที่ 4.12 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)



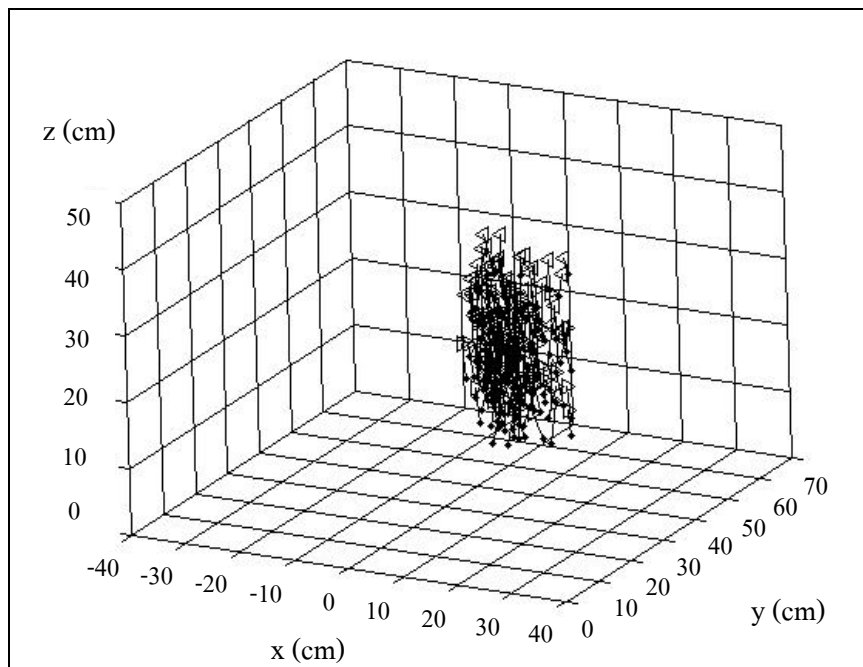
รูปที่ 4.13 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



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) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)

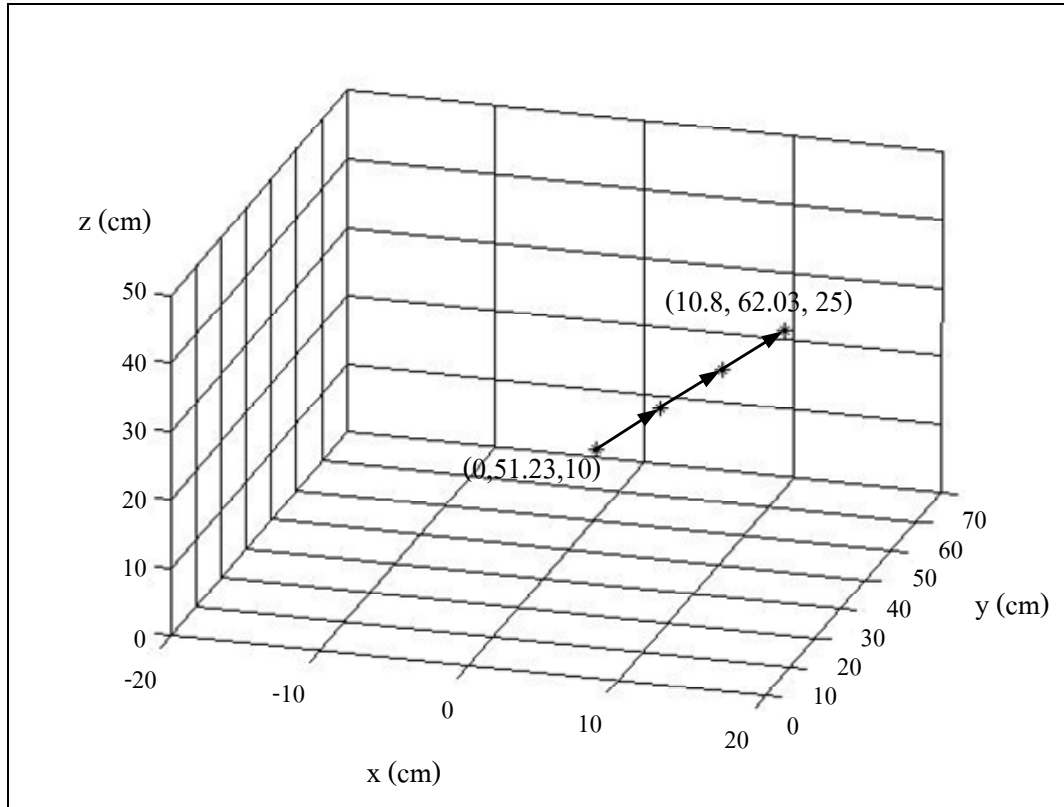


รูปที่ 4.14 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น
 “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4

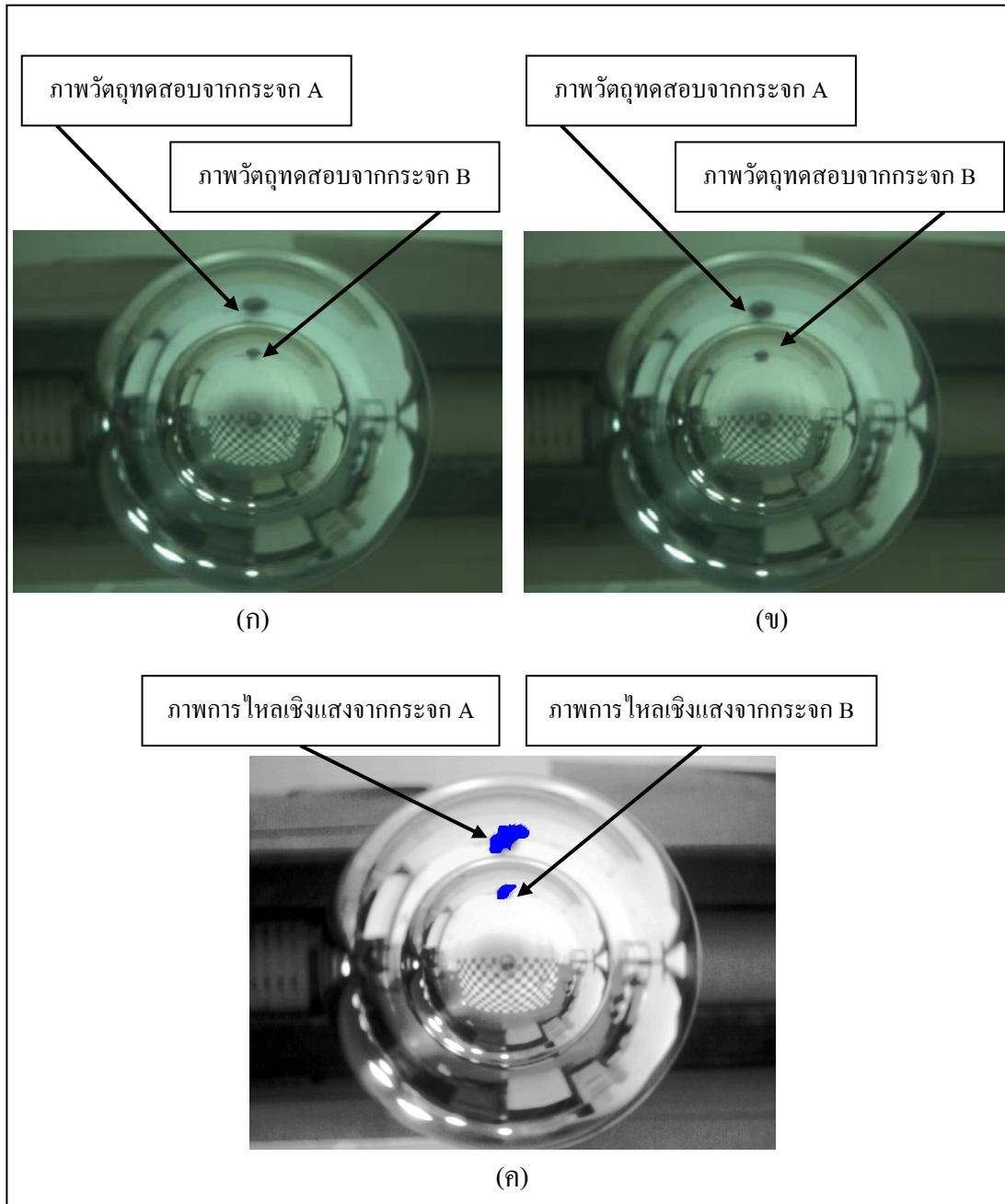


รูปที่ 4.15 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4

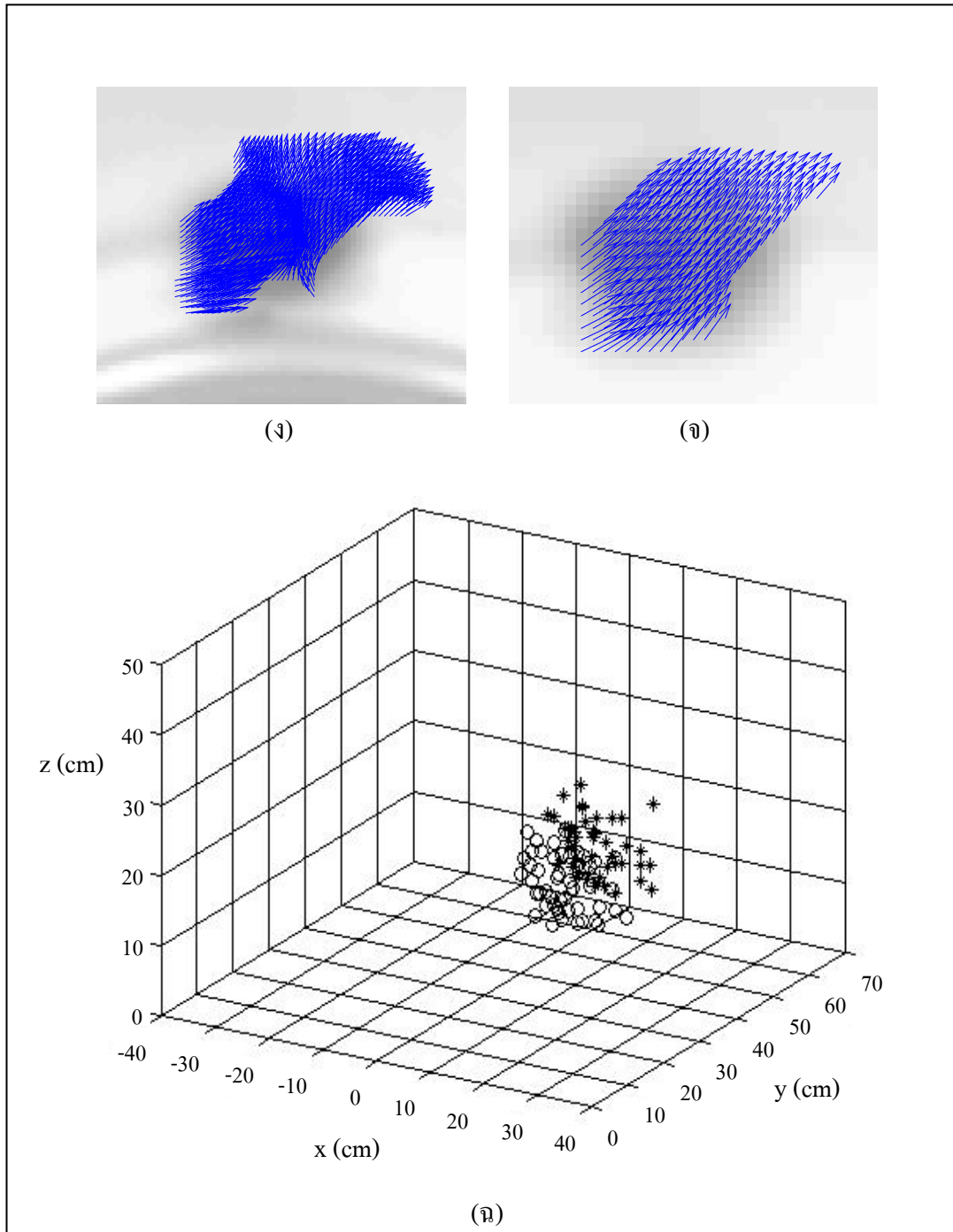
- เคลื่อนที่ตามแนวแกน XYZ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



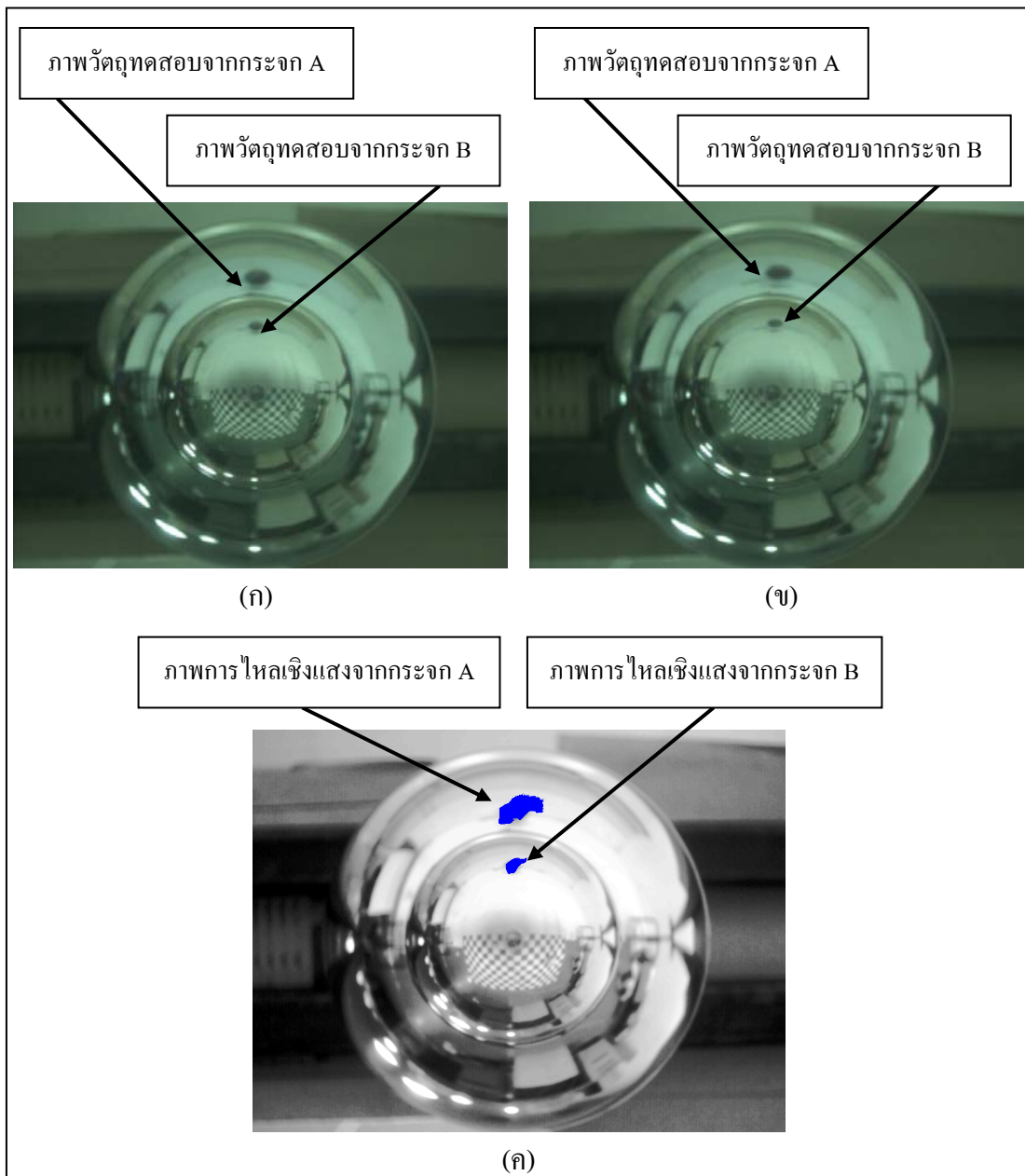
รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบในแนวแกน XYZ



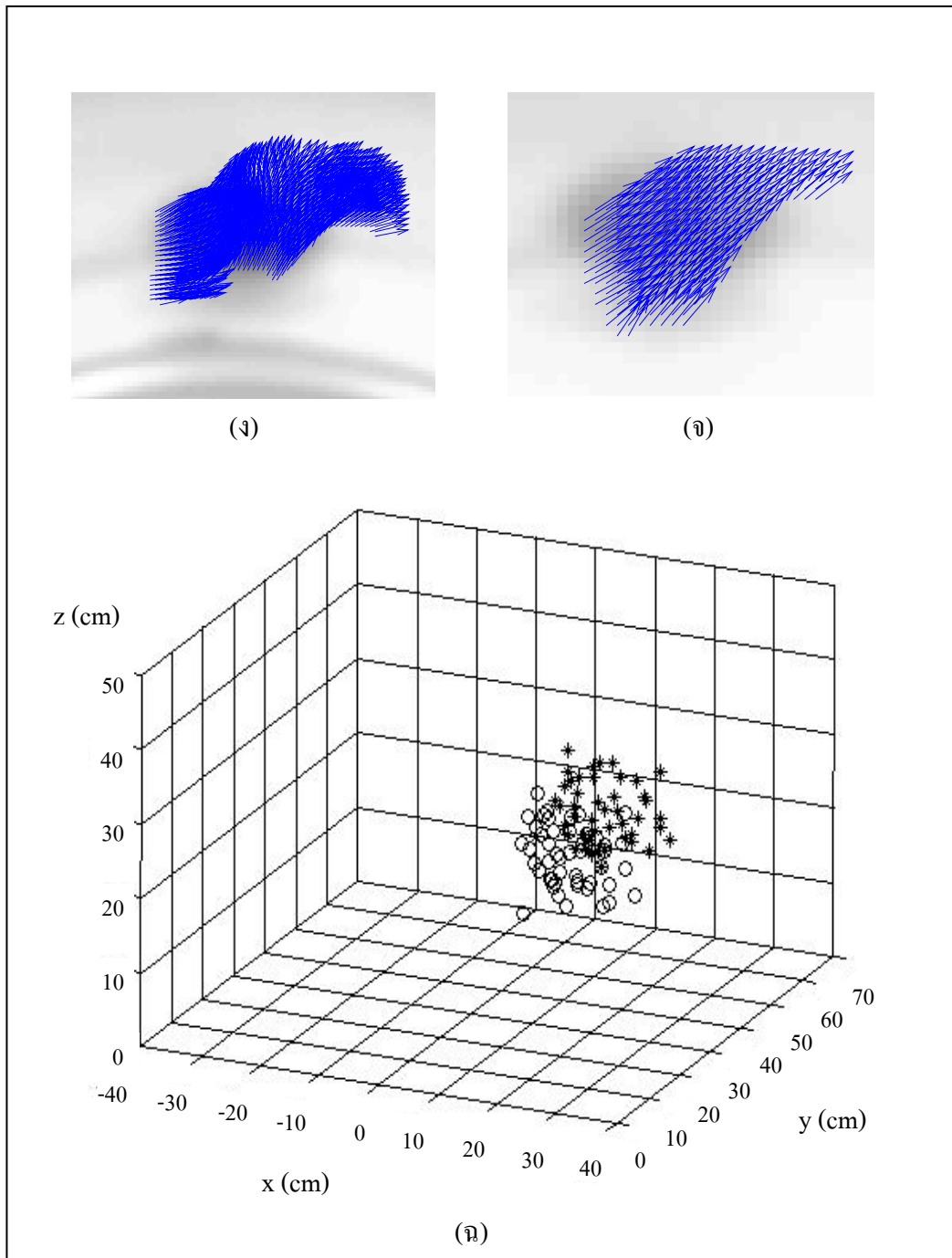
รูปที่ 4.17 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



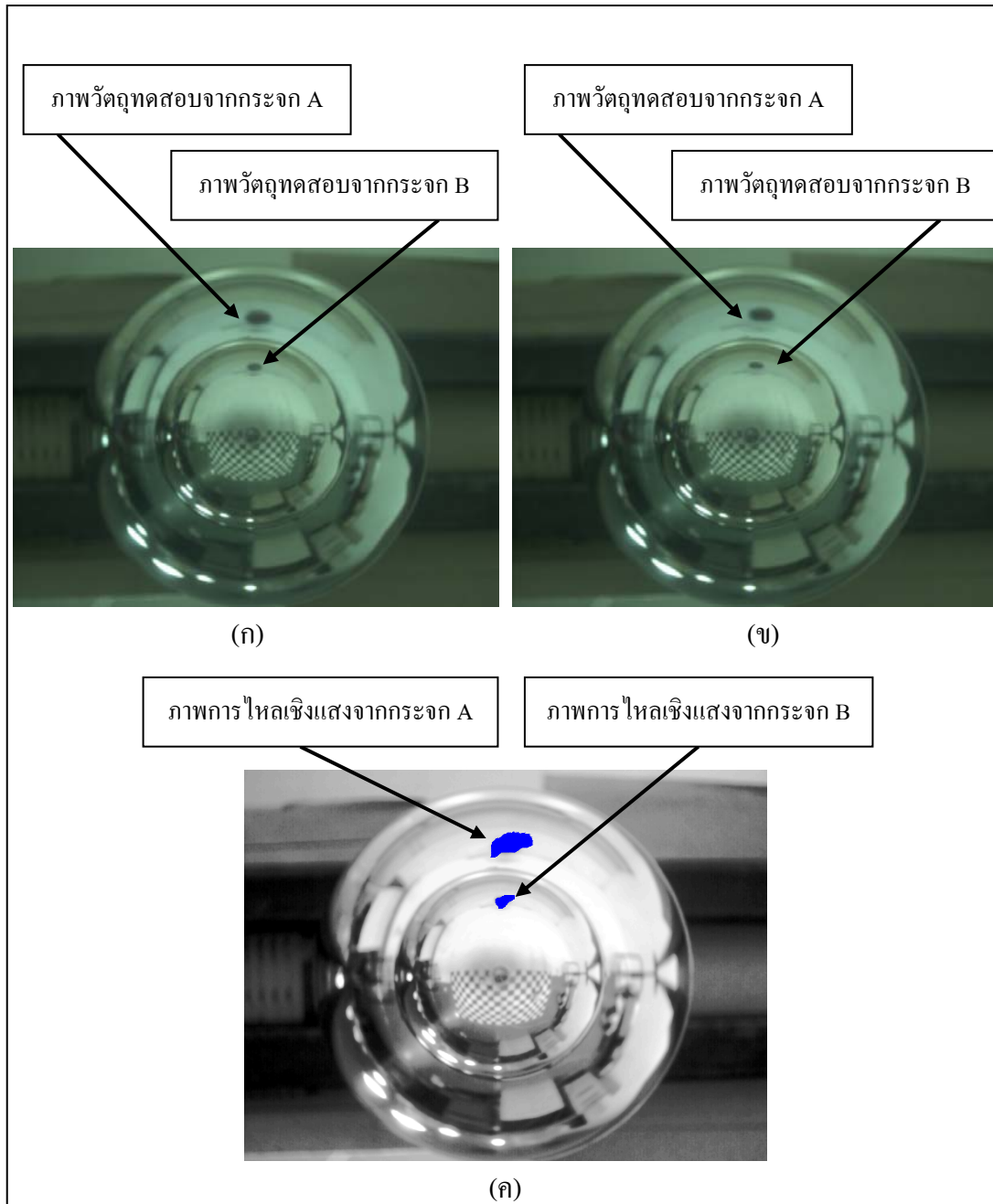
รูปที่ 4.17 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 2 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B
 (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)



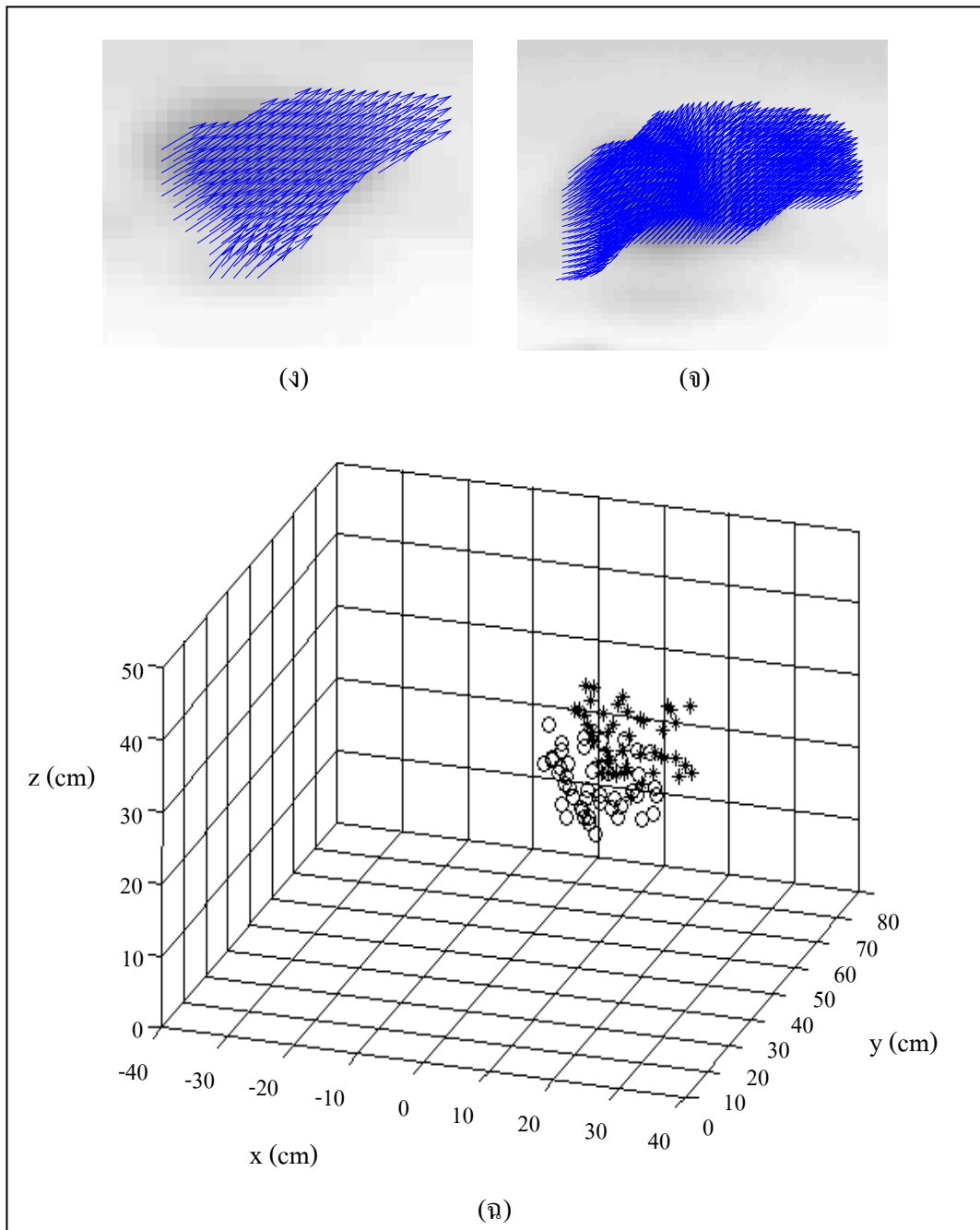
รูปที่ 4.18 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B
 (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



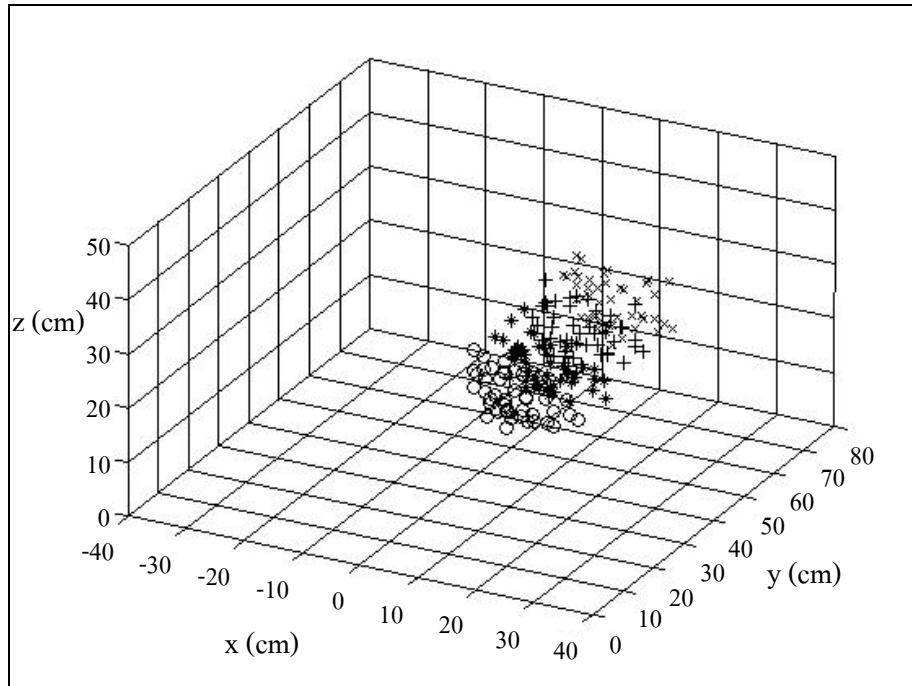
รูปที่ 4.18 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 2 ไป 3 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$
 (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบ
 จากกระจก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระจก B
 (ฉ) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย \circ เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)



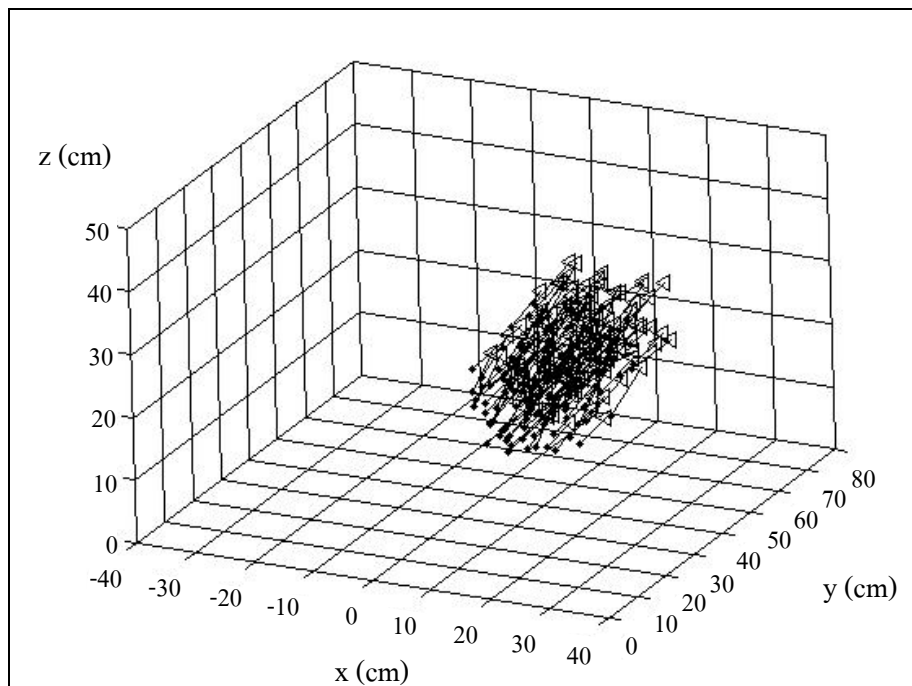
รูปที่ 4.19 การไหลเชิงแสงของวัตถุจากระยะที่ 3 ไป 4 (ก) ภาพที่เวลา t (ข) ภาพที่เวลา $t+1$ (ค) ผลที่ได้จากวิธี Lucas & Kanade (ง) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก A (จ) ภาพขยายของวัตถุทดสอบจากกระบอก B (ฉ) กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุดที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$



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) กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุ โดย o เป็นจุด
 ที่เวลา t และ $*$ เป็นจุดที่เวลา $t+1$ (ต่อ)



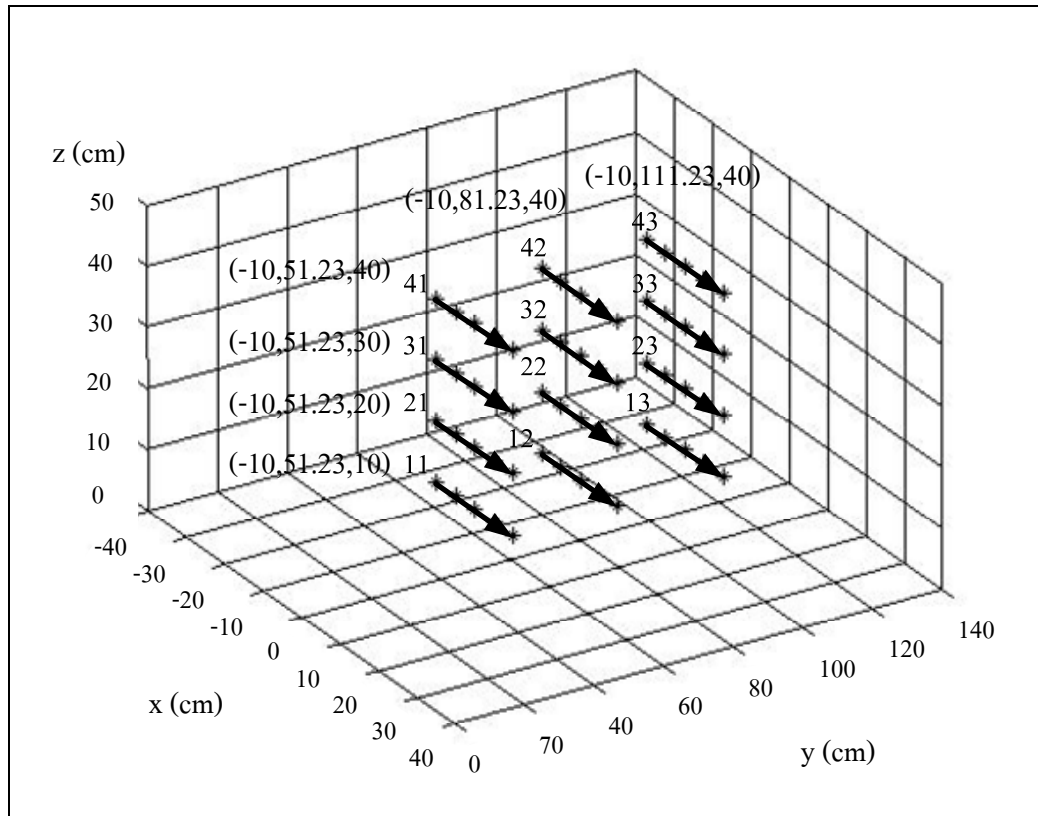
รูปที่ 4.20 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4 โดย “o” เป็นจุดเริ่มต้น
 “*” เป็นจุดที่ 2 “+” เป็นจุดที่ 3 “x” เป็นจุดที่ 4



รูปที่ 4.21 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุจากระยะที่ 1 ไป 4

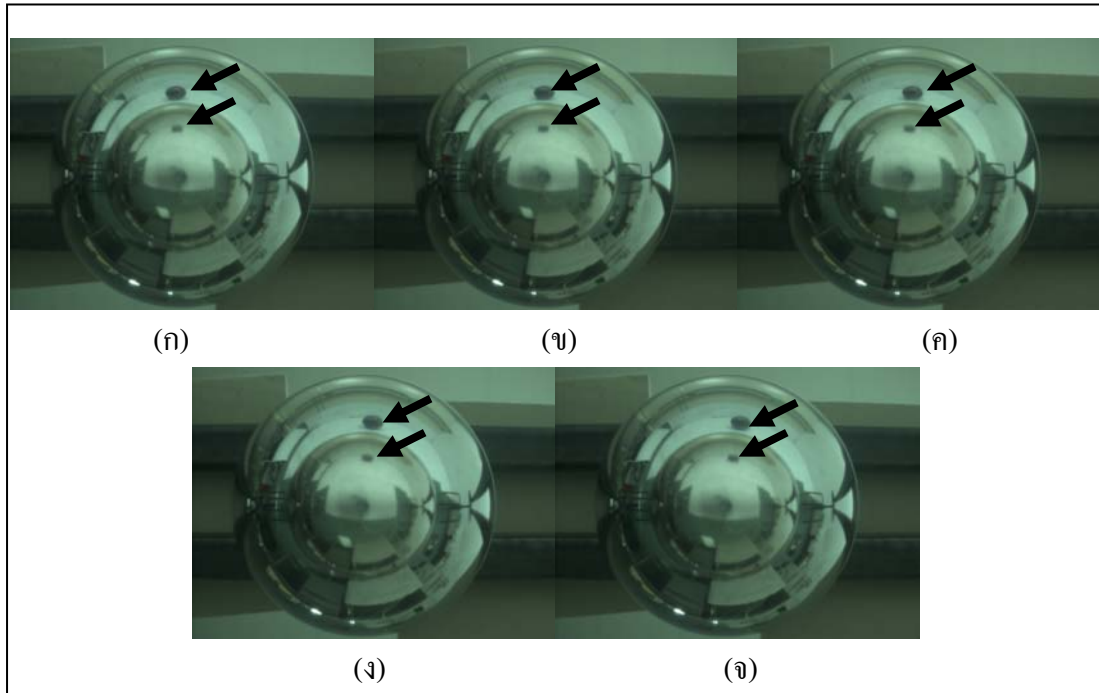
4.4 ทดสอบย่านการทำงานของระบบ

ทำการทดลองโดยเคลื่อนที่วัตถุทดสอบที่ระยะต่างๆ ดังรูปที่ 4.22

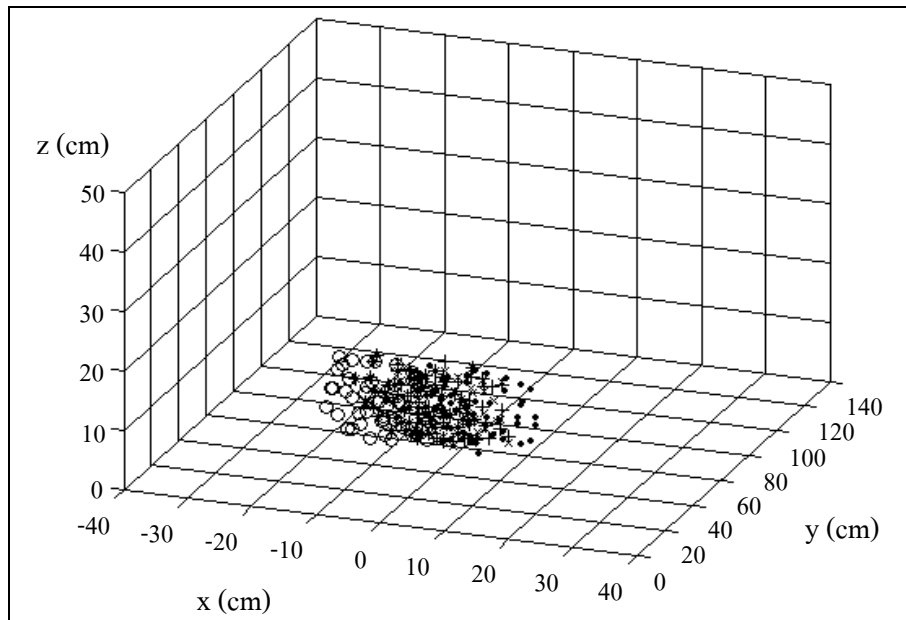


รูปที่ 4.22 การเคลื่อนที่ในย่านทดสอบ

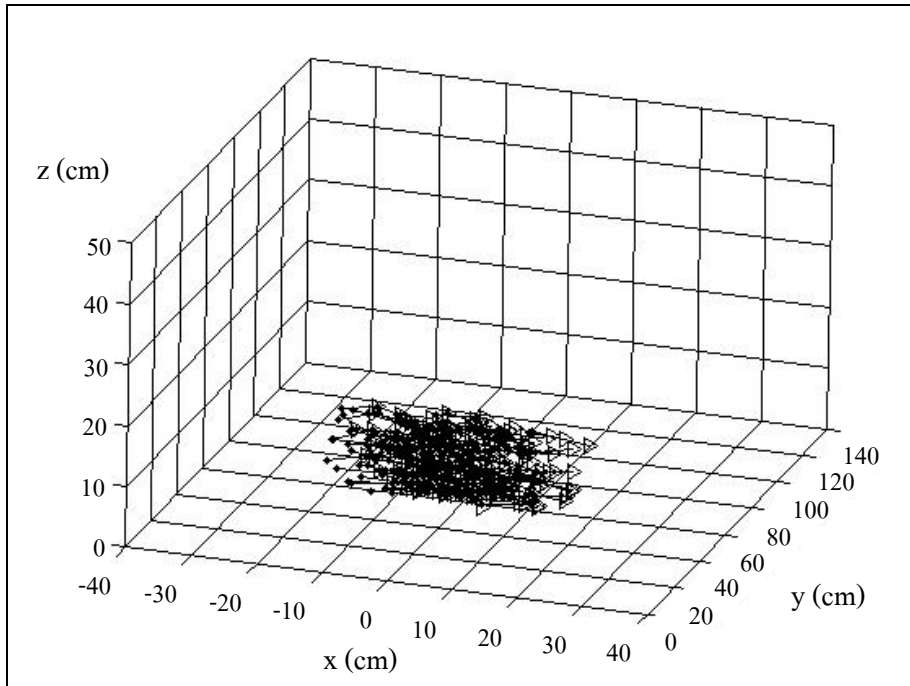
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 11 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.24 รูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26



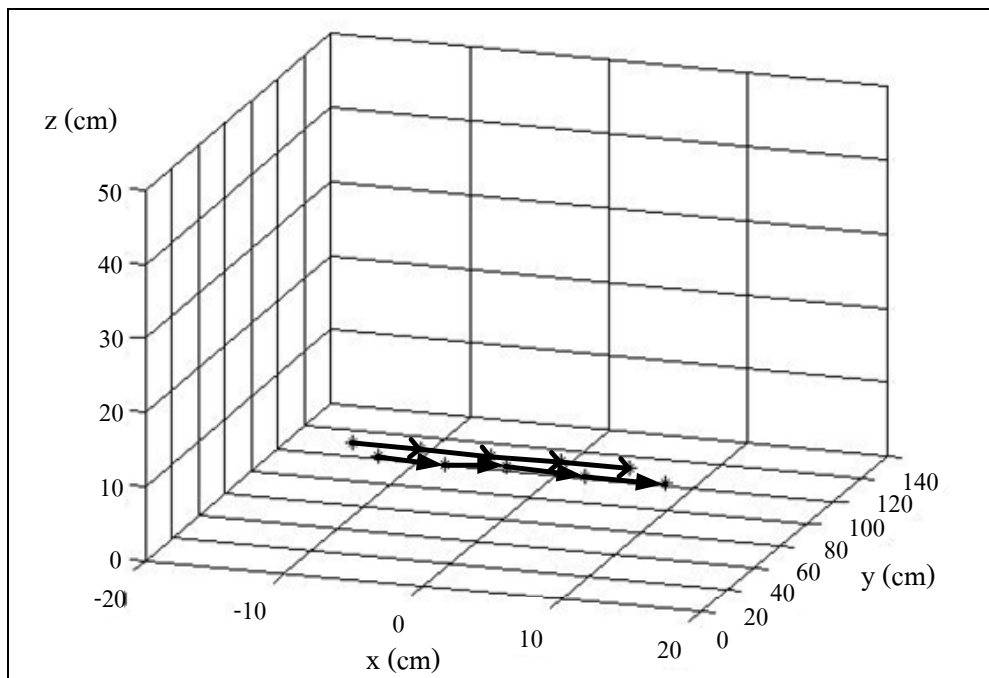
รูปที่ 4.23 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 11 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

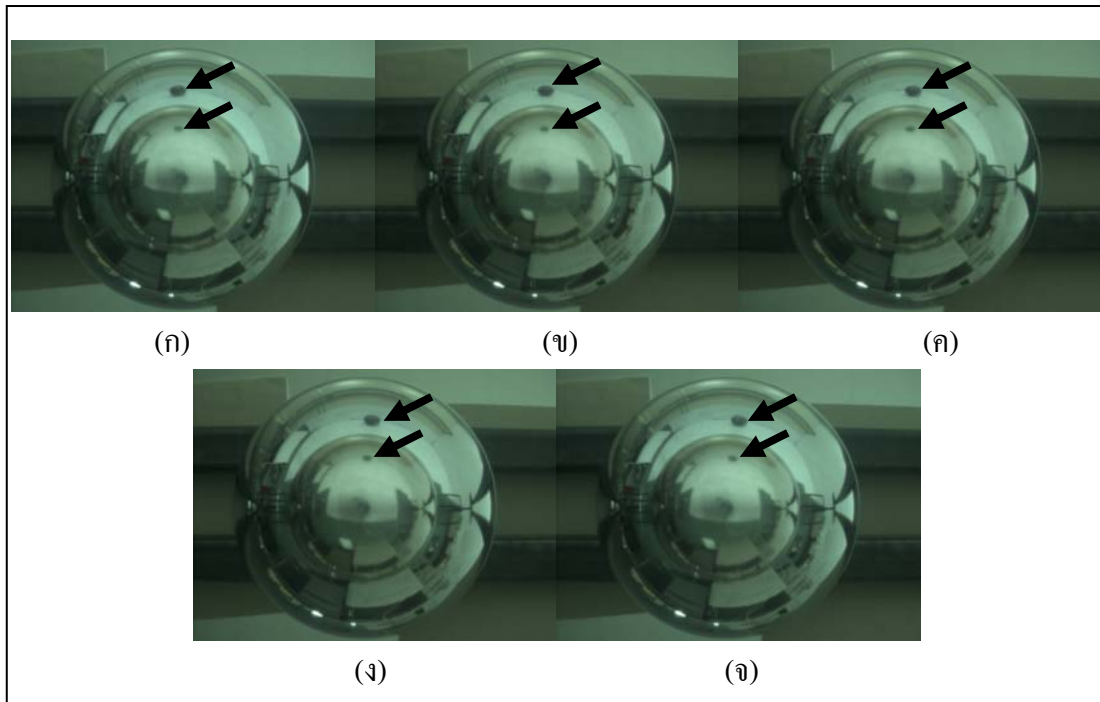


รูปที่ 4.25 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 11

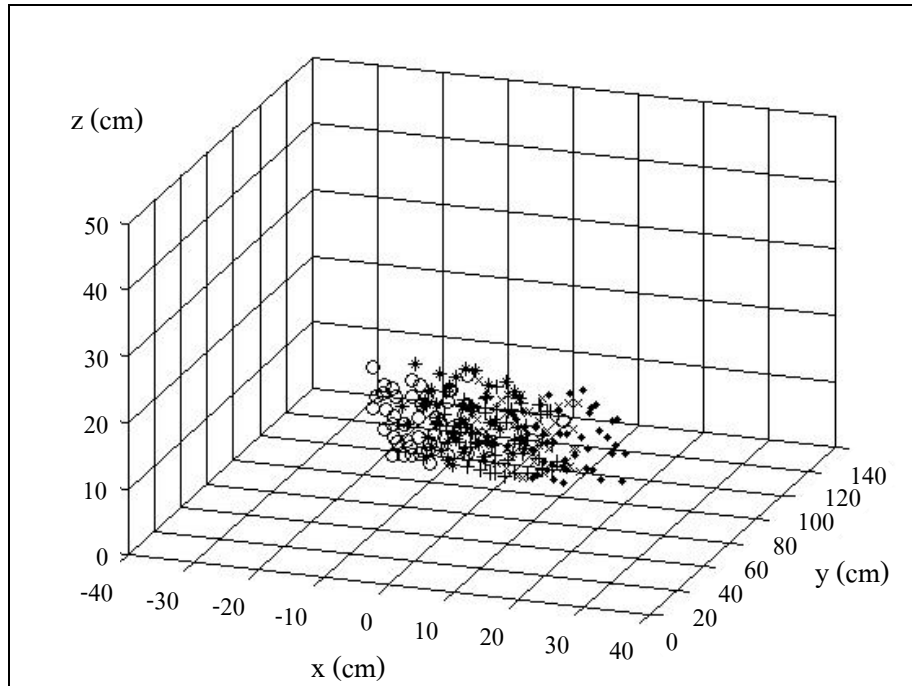


รูปที่ 4.26 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

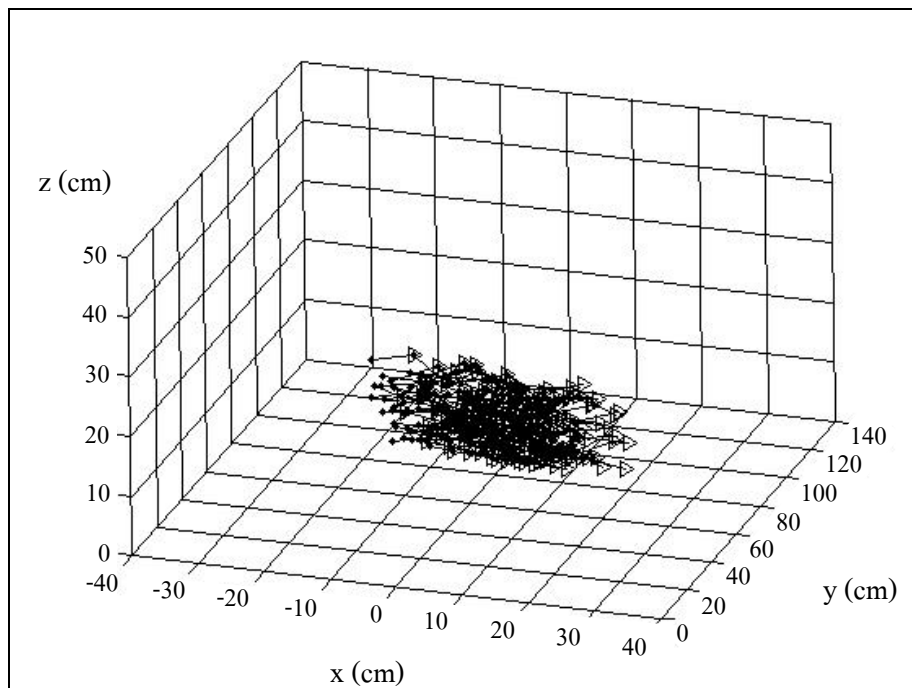
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 12 ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.28 รูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30



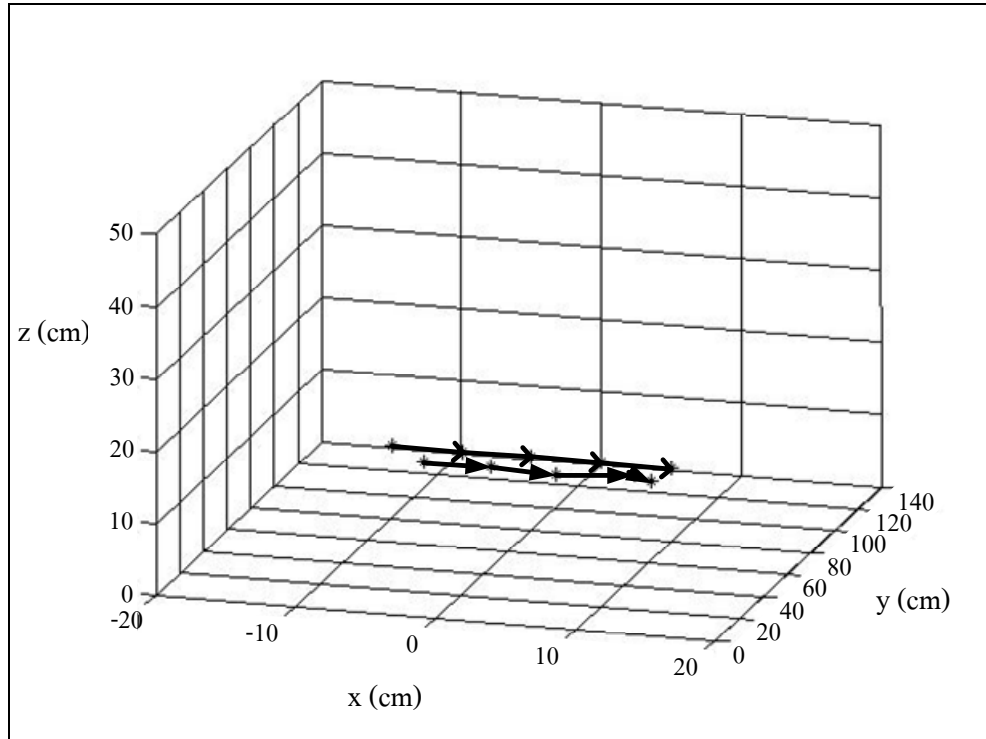
รูปที่ 4.27 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 12 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

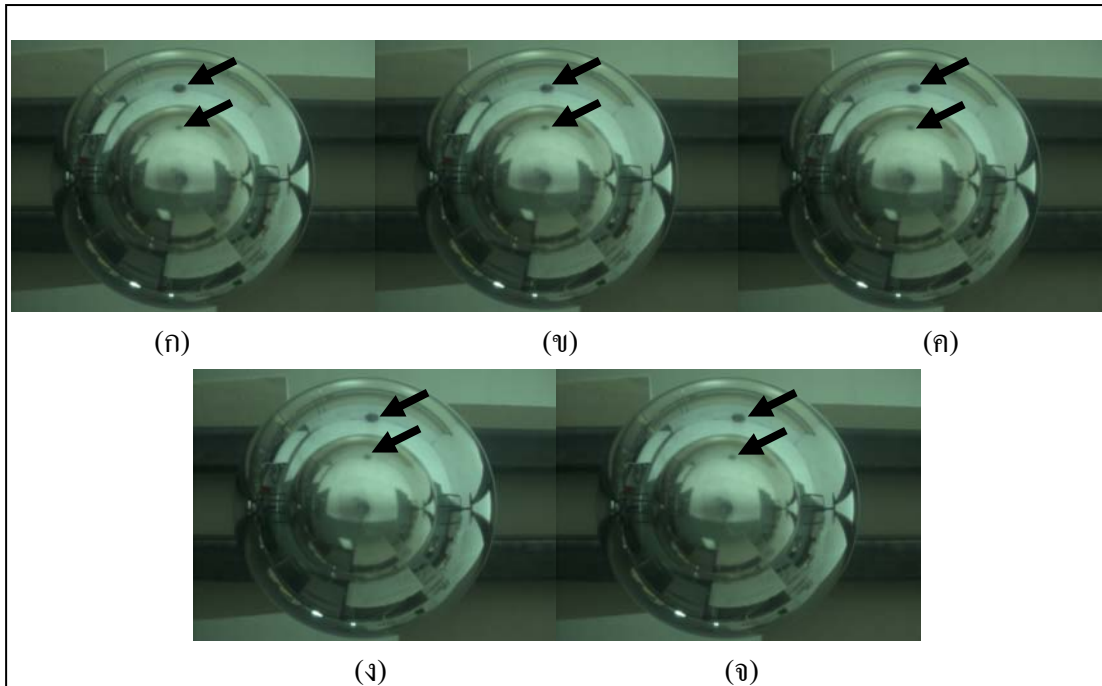


รูปที่ 4.29 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 12

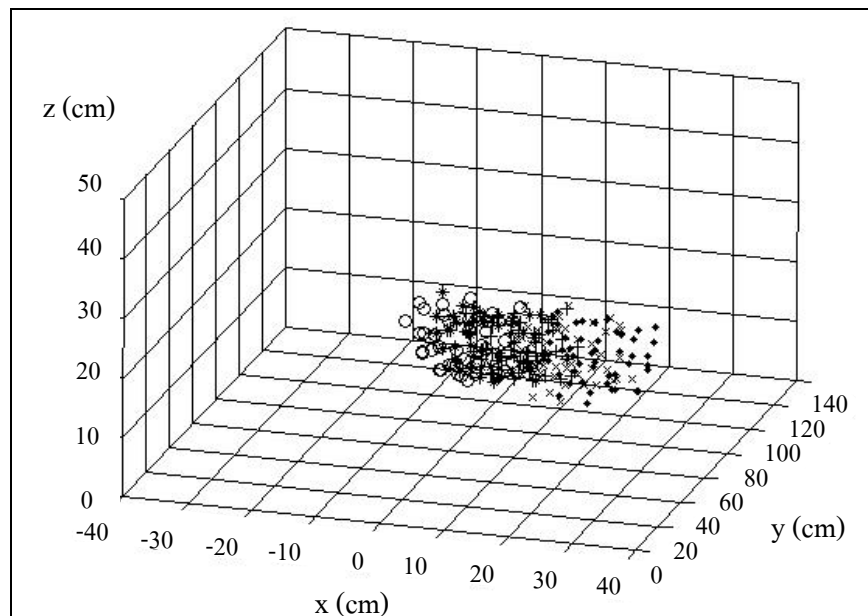


รูปที่ 4.30 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

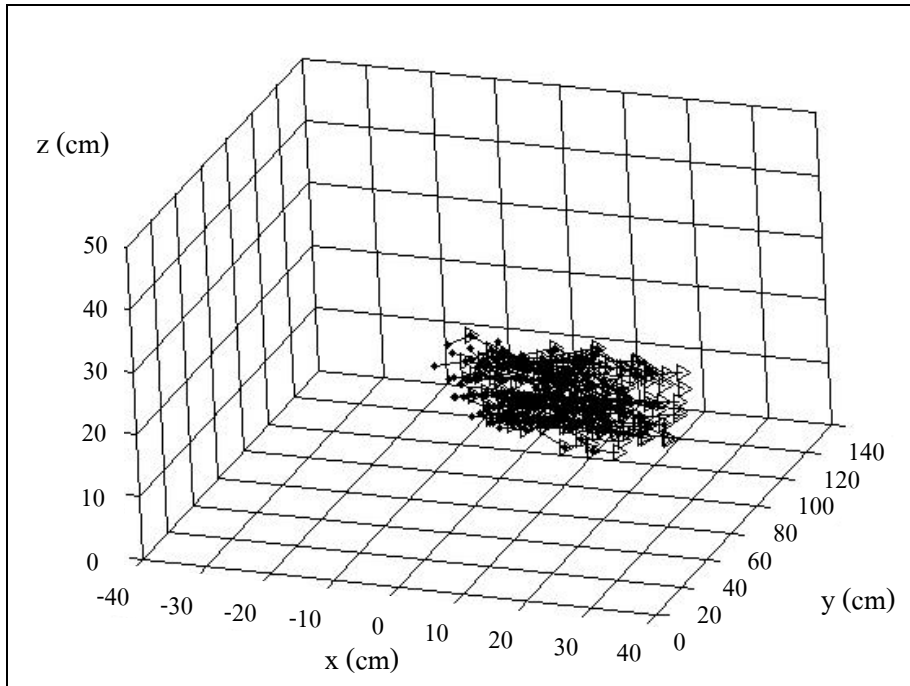
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 13 ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.32 รูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34



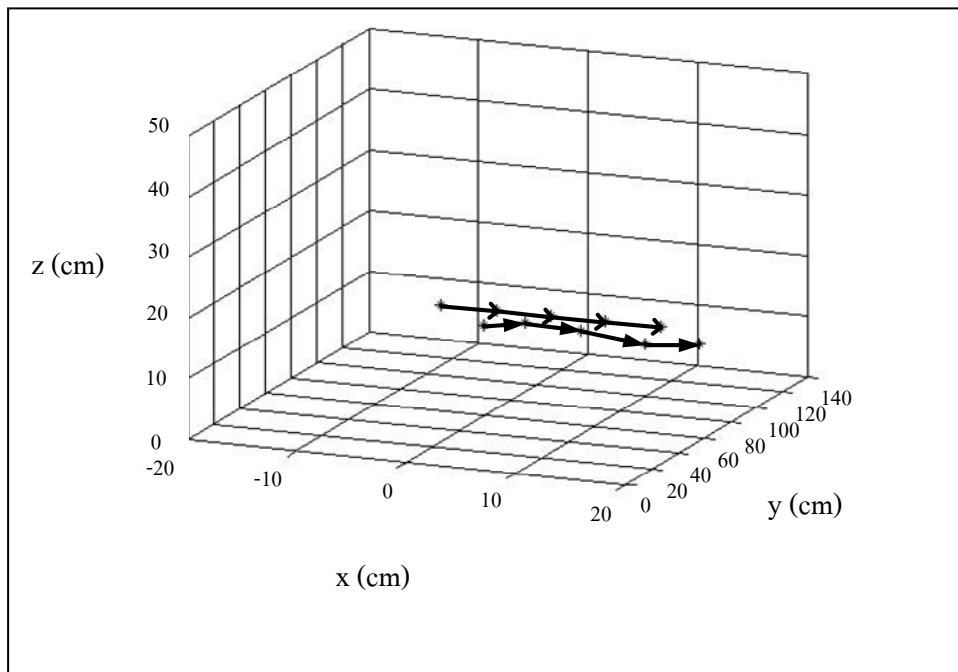
รูปที่ 4.31 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 13 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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



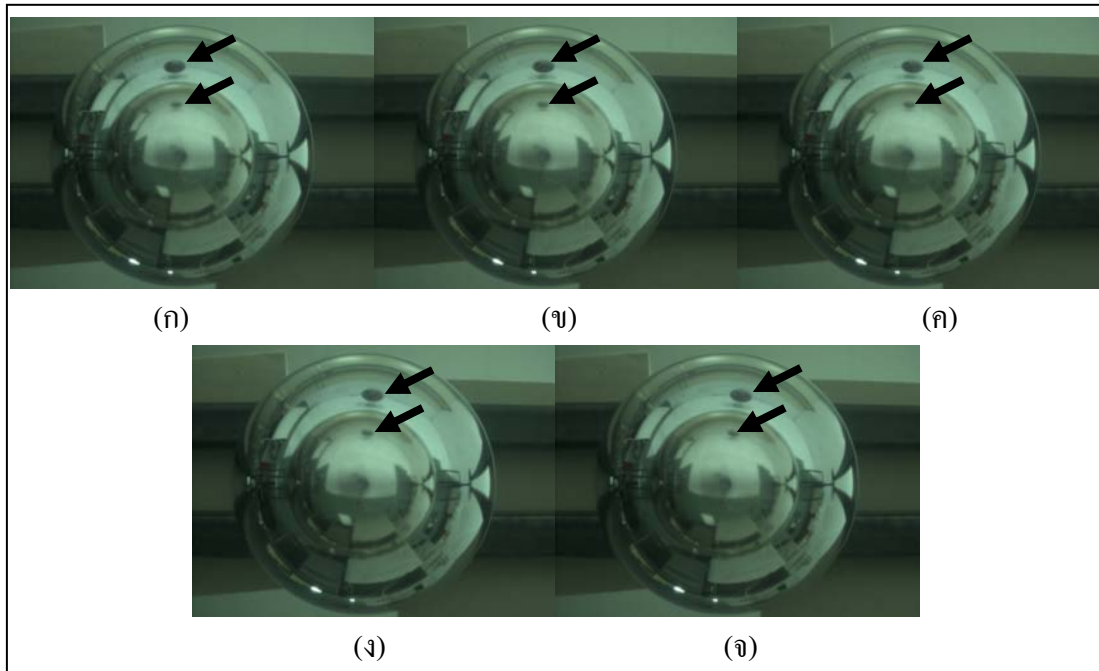
รูปที่ 4.33 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 13



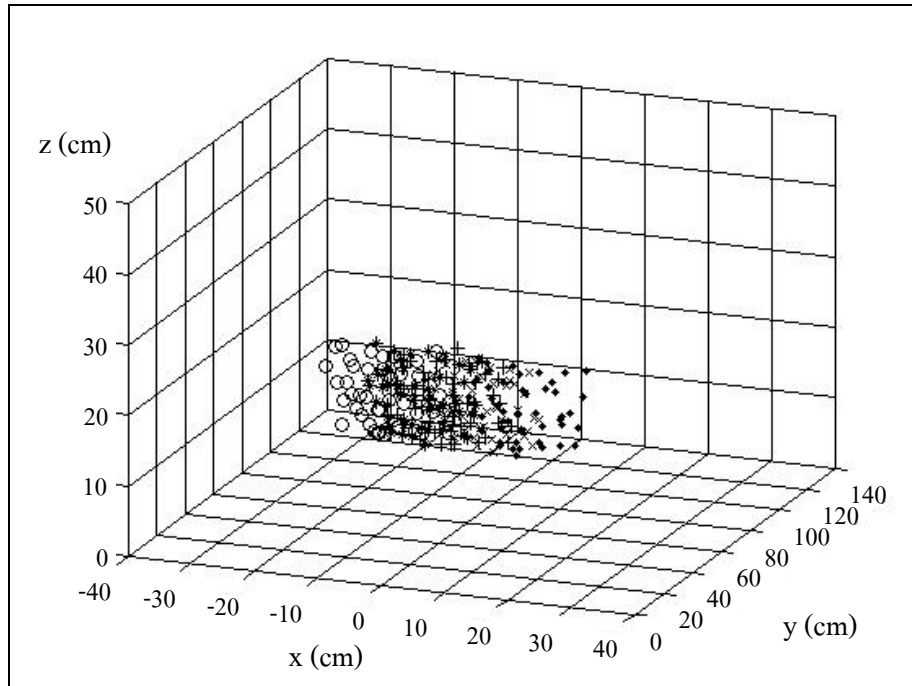
รูปที่ 4.34 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)

กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

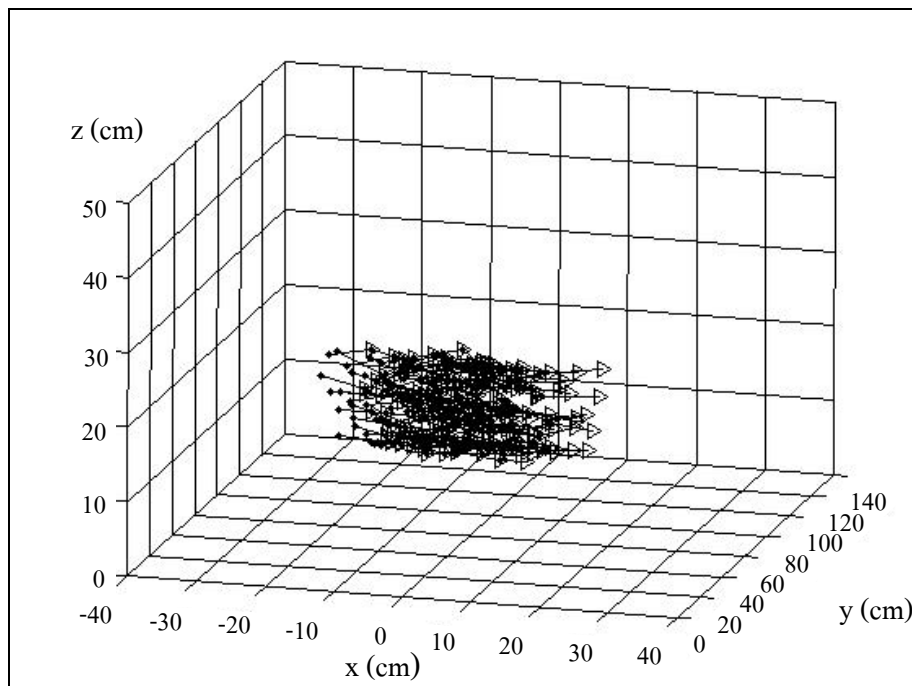
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 21 ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.36 รูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38



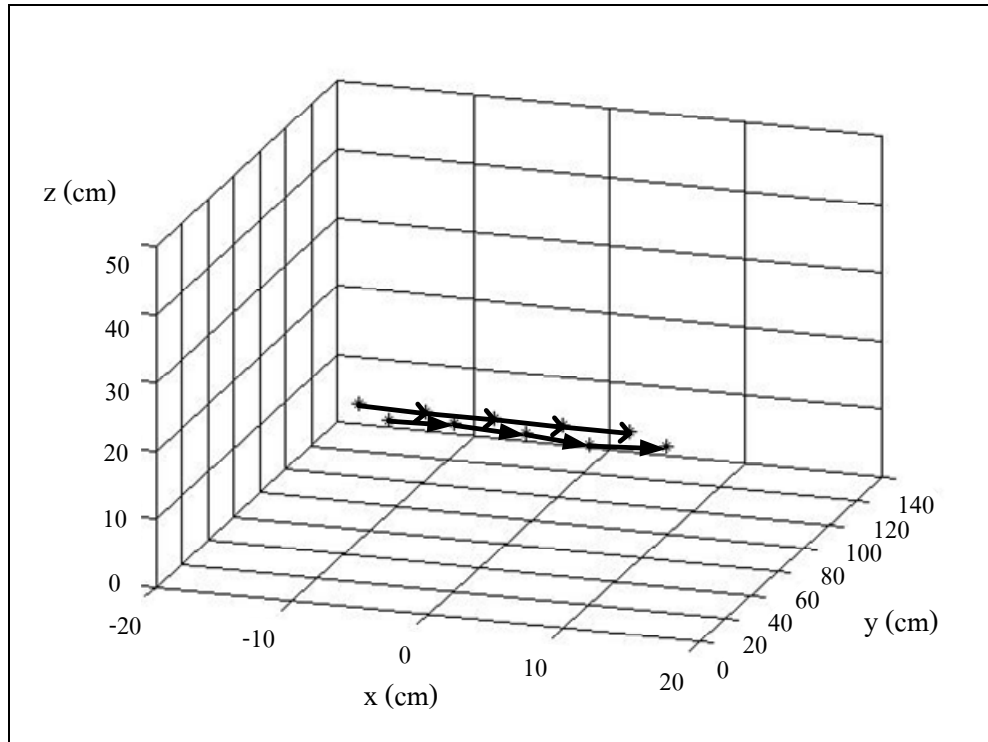
รูปที่ 4.35 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 21 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

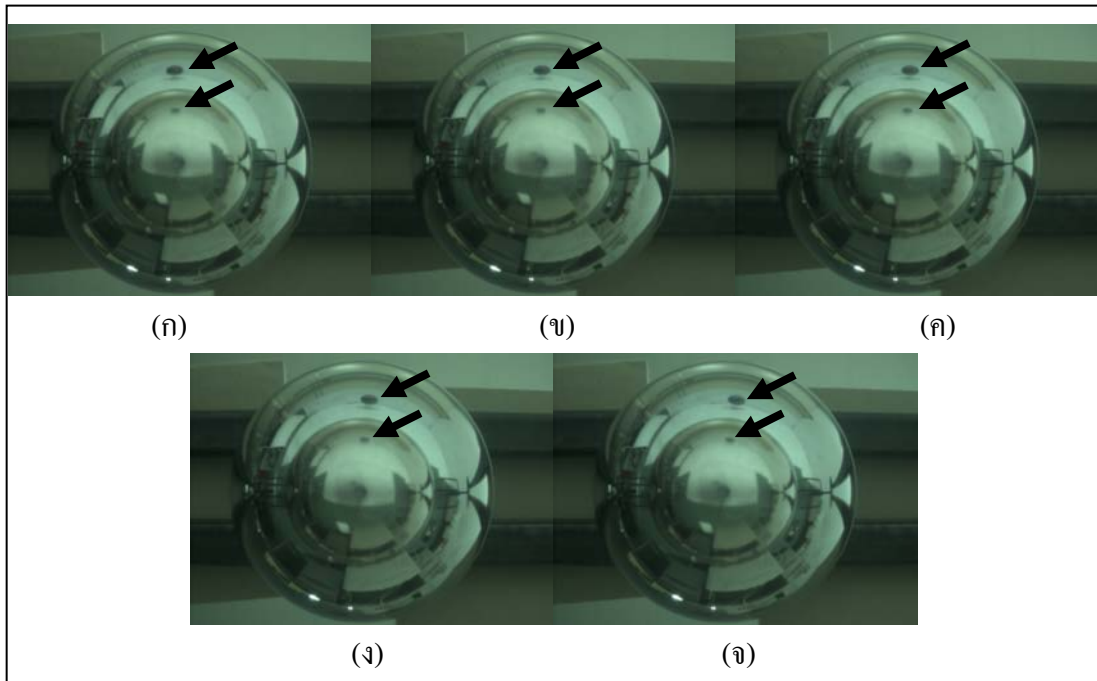


รูปที่ 4.37 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 21

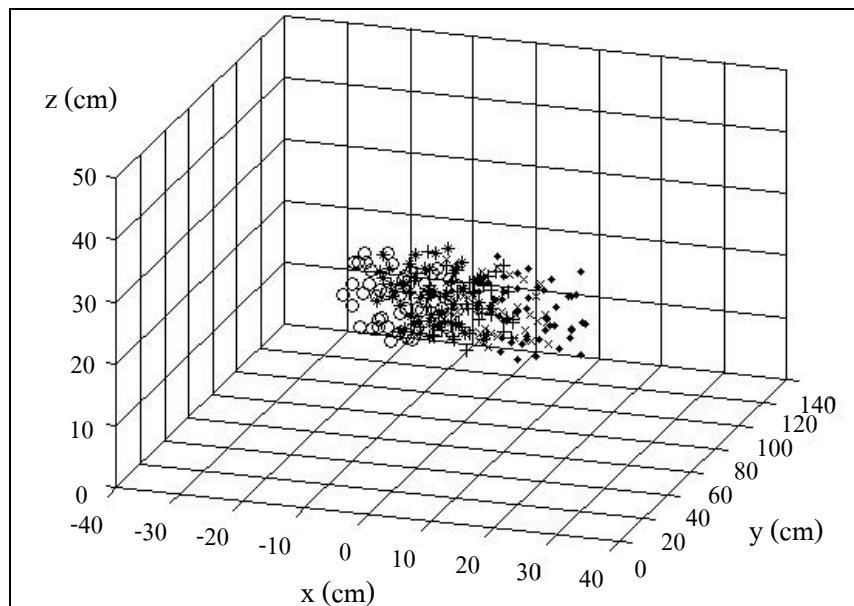


รูปที่ 4.38 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

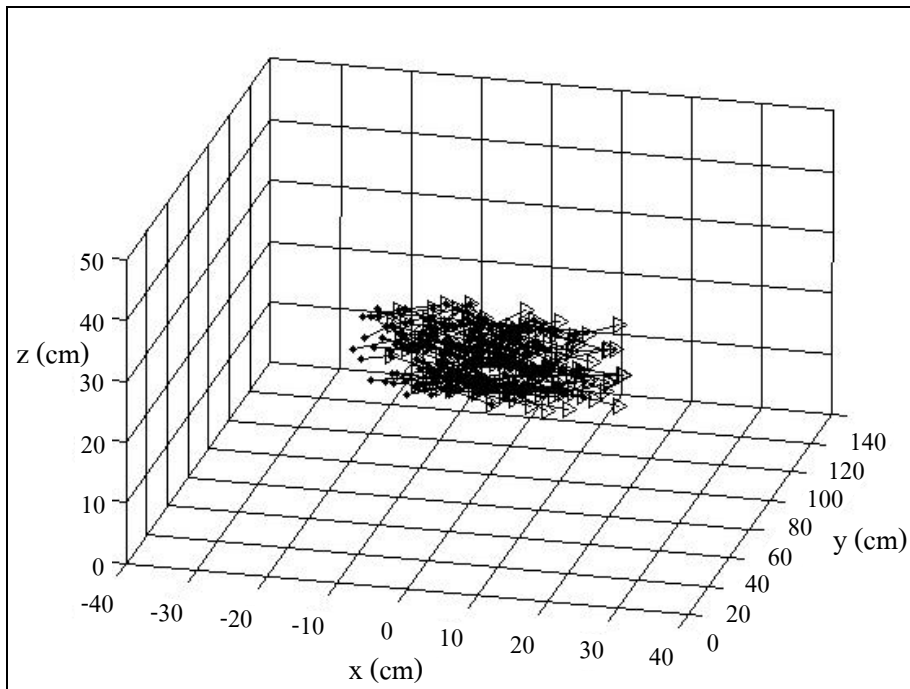
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 22 ดังแสดงในรูปที่ 4.39 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.40 รูปที่ 4.41 และรูปที่ 4.42



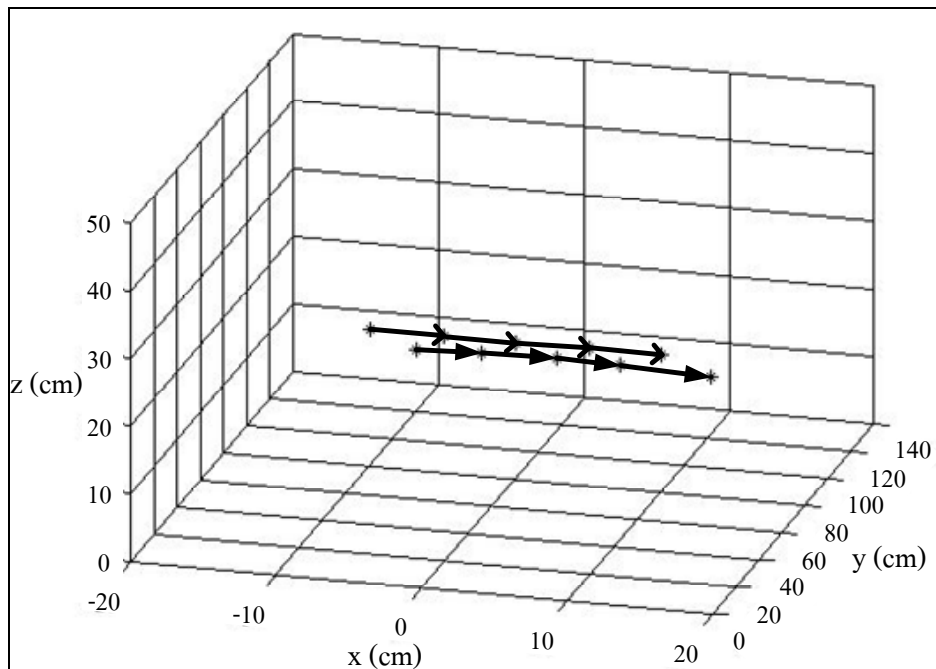
รูปที่ 4.39 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 22 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

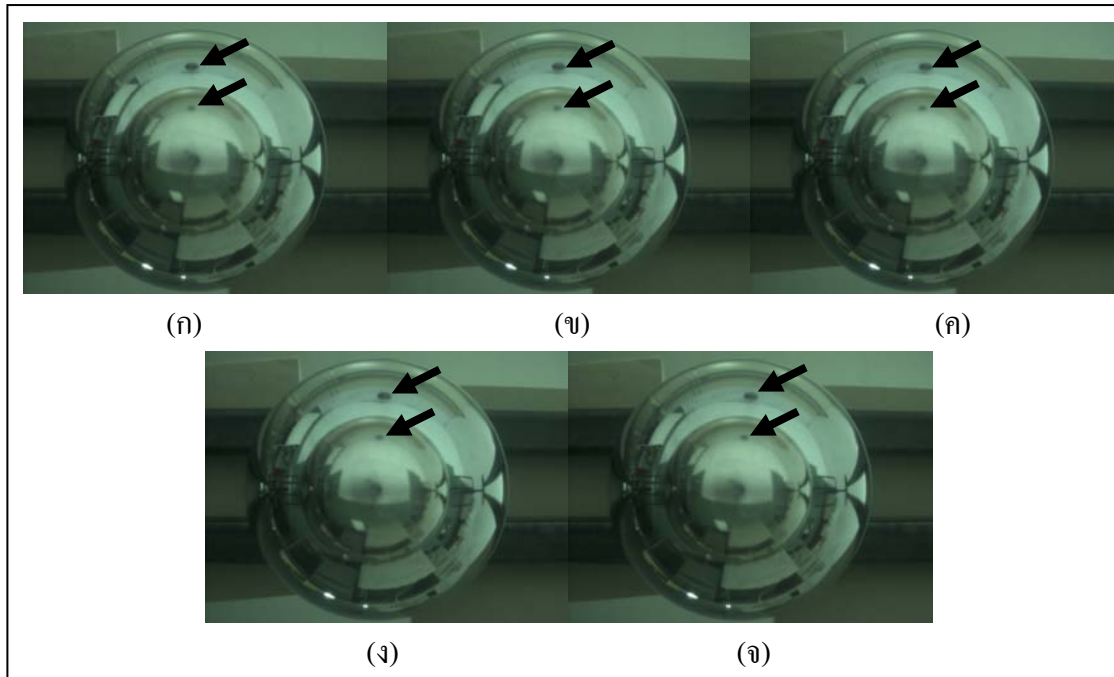


รูปที่ 4.41 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 22

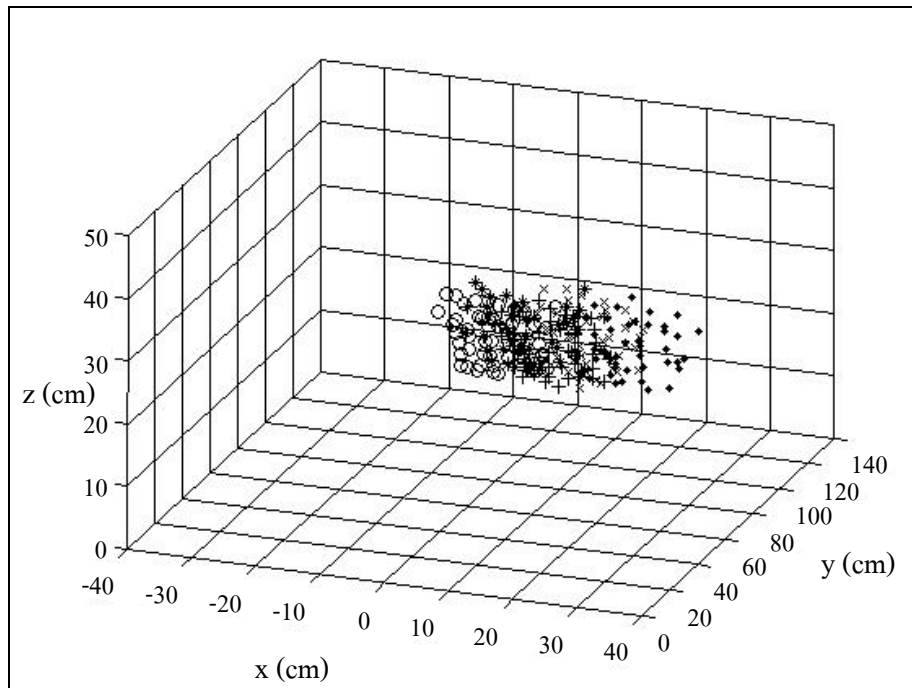


รูปที่ 4.42 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

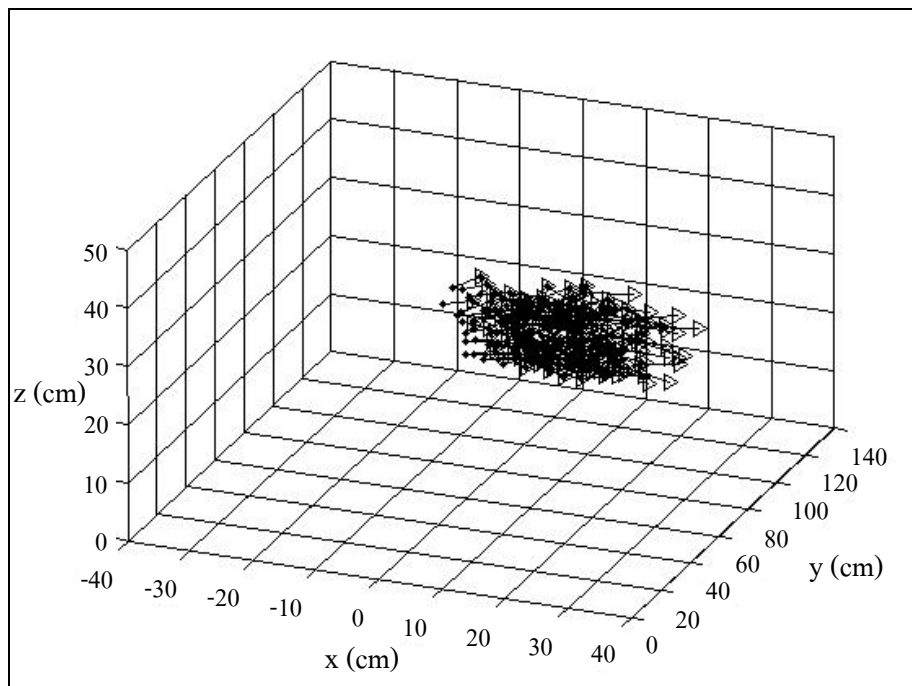
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 23 ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.44 รูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46



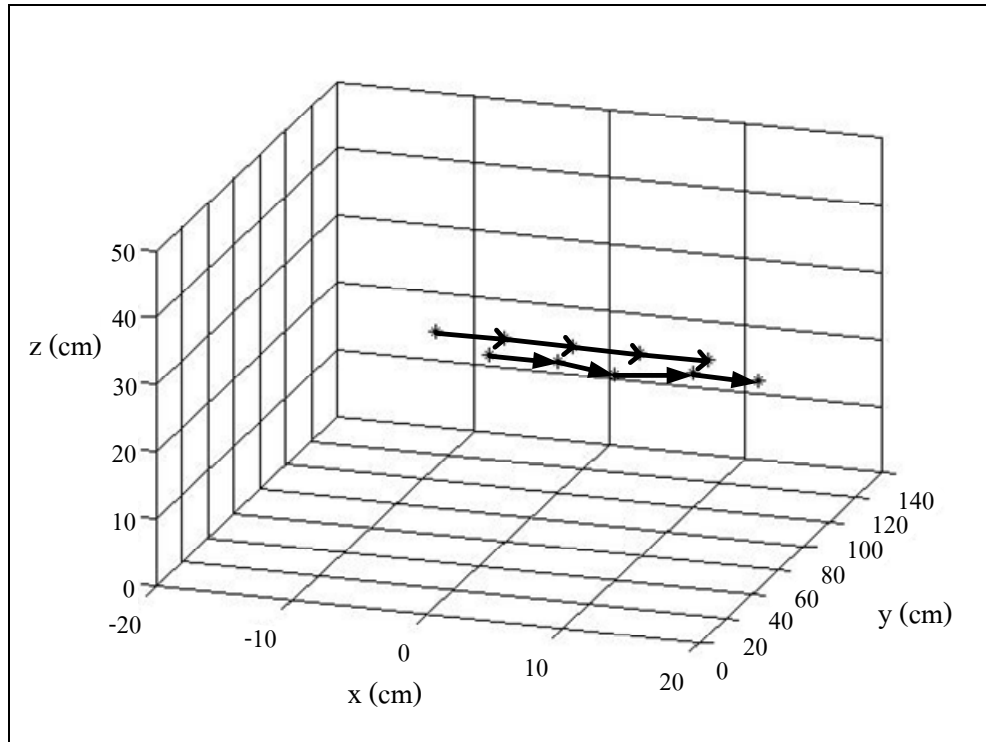
รูปที่ 4.43 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 23 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

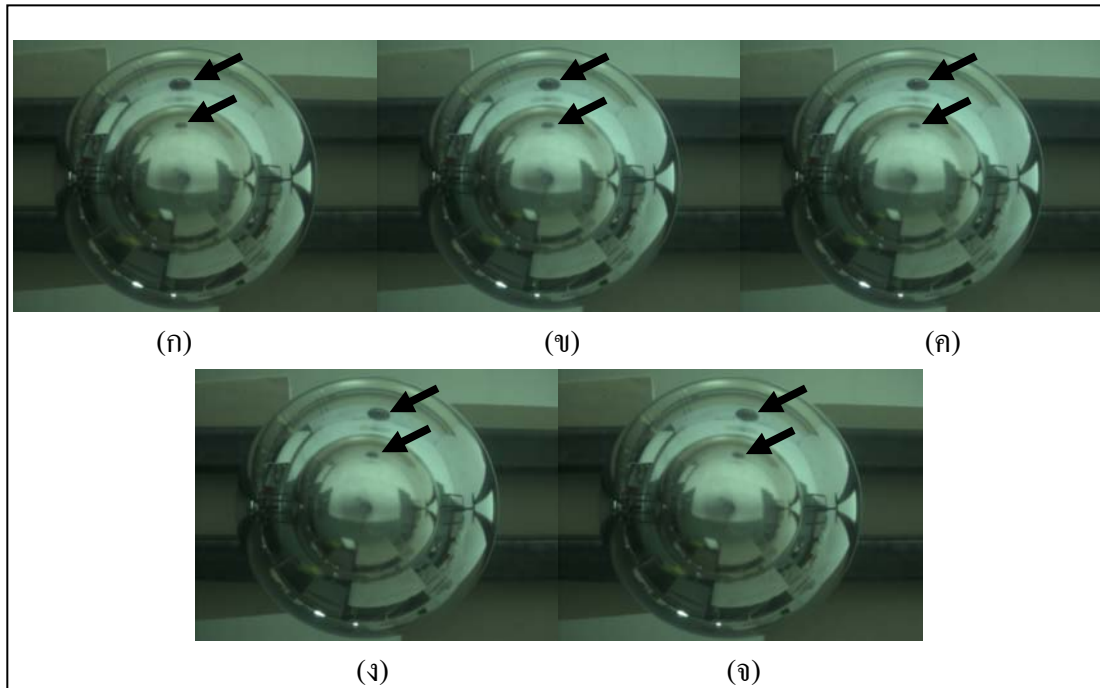


รูปที่ 4.45 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 23

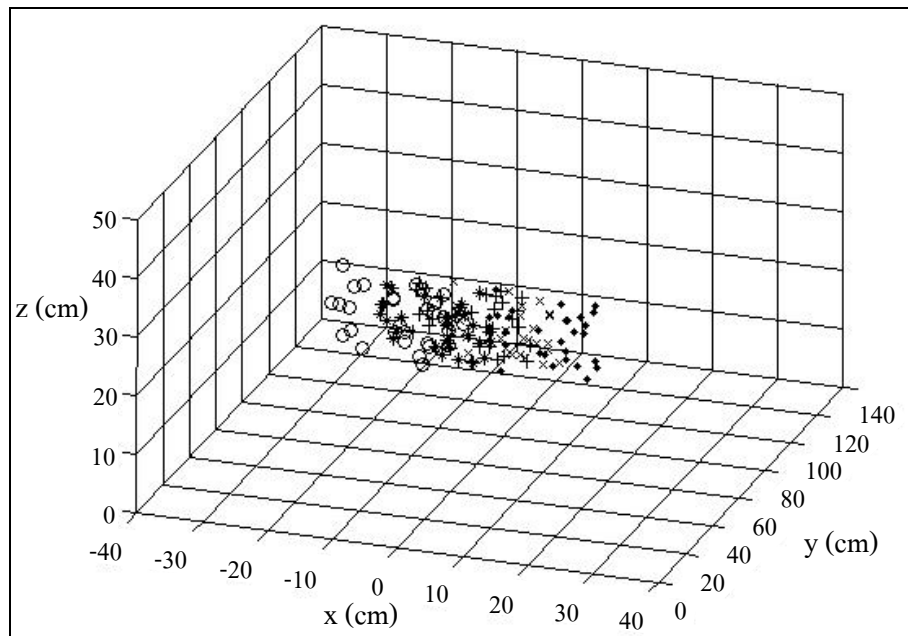


รูปที่ 4.46 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

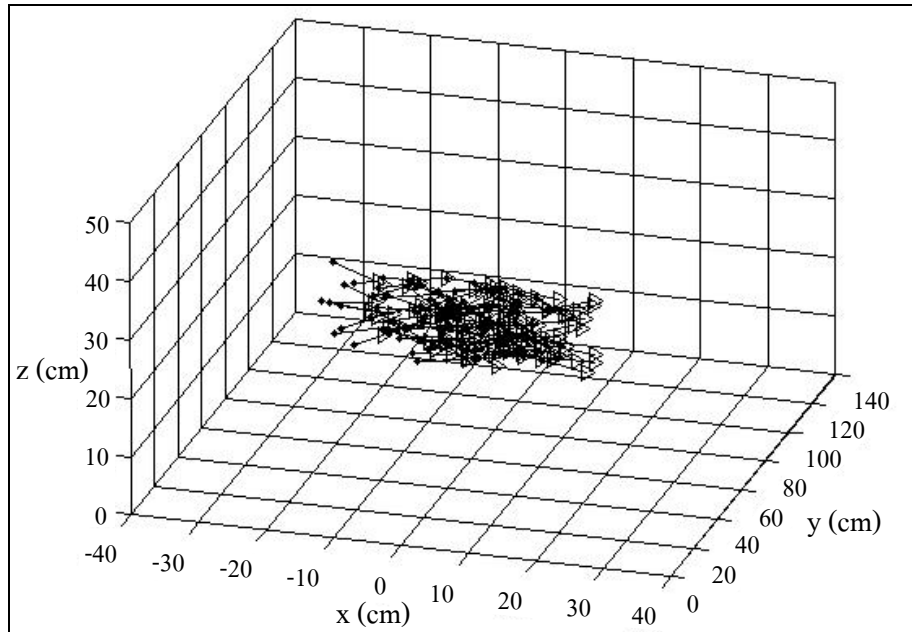
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 31 ดังแสดงในรูปที่ 4.47 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.48 รูปที่ 4.49 และรูปที่ 4.50



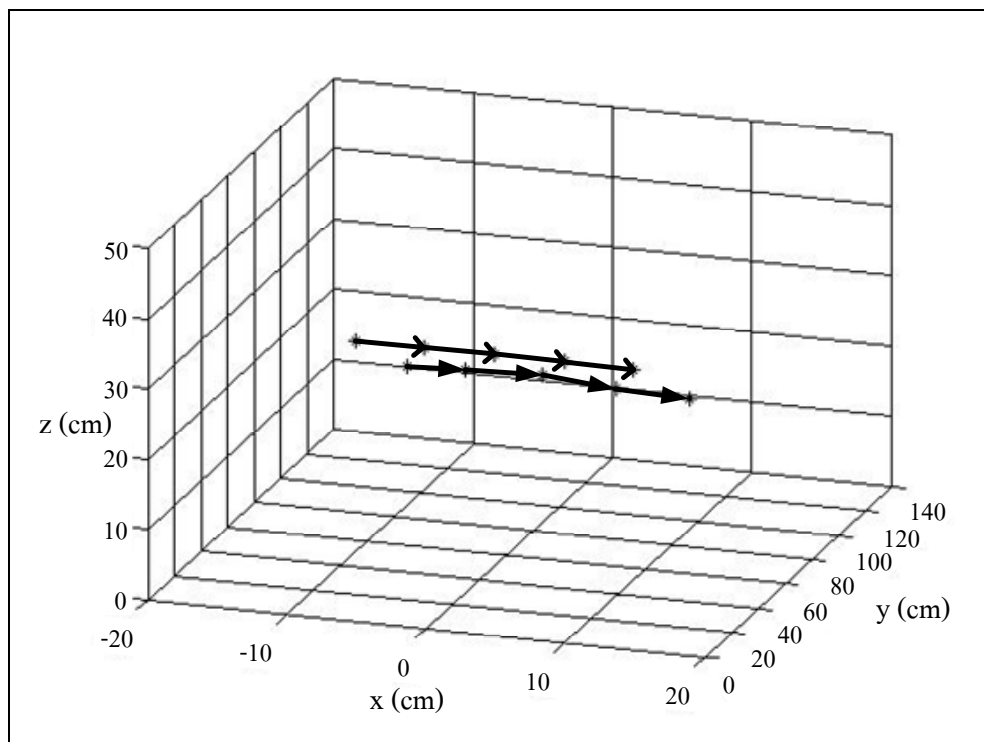
รูปที่ 4.47 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 31 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

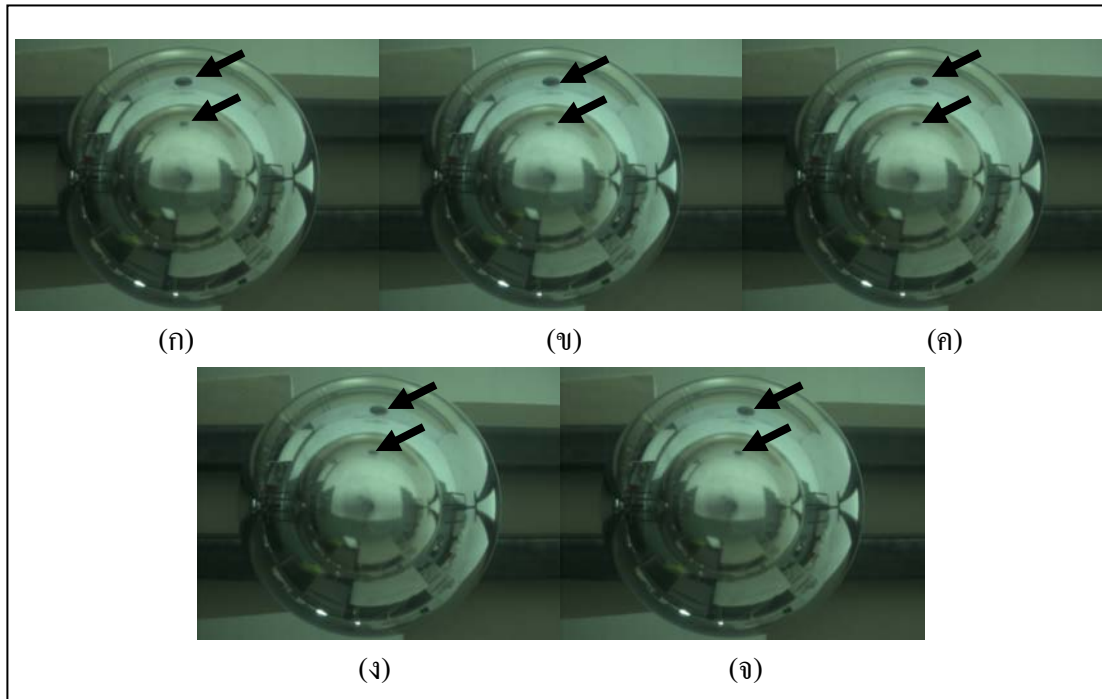


รูปที่ 4.49 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 31

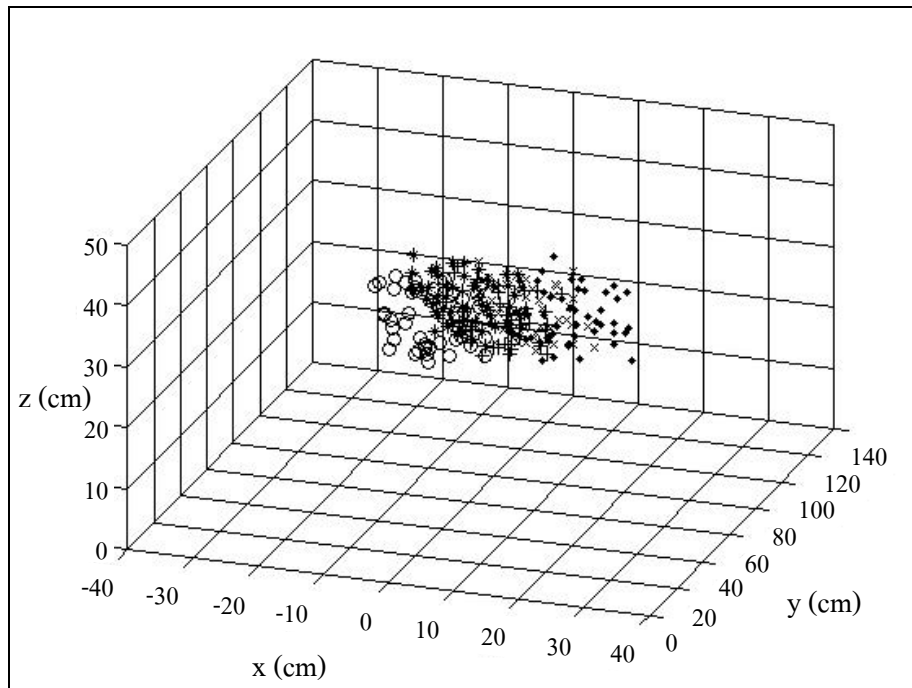


รูปที่ 4.50 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

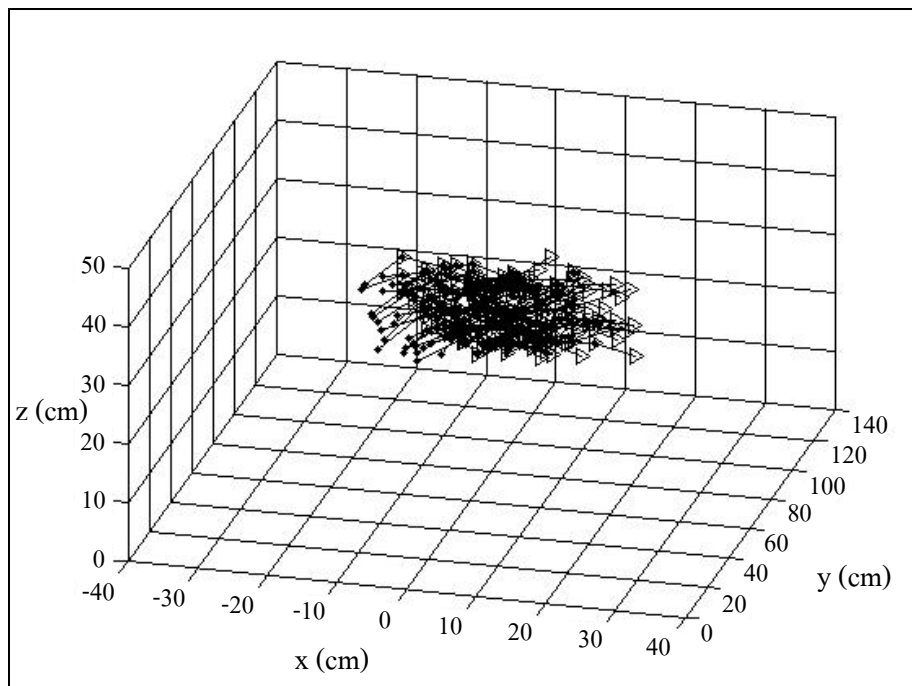
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 32 ดังแสดงในรูปที่ 4.51 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.52 รูปที่ 4.53 และรูปที่ 4.54



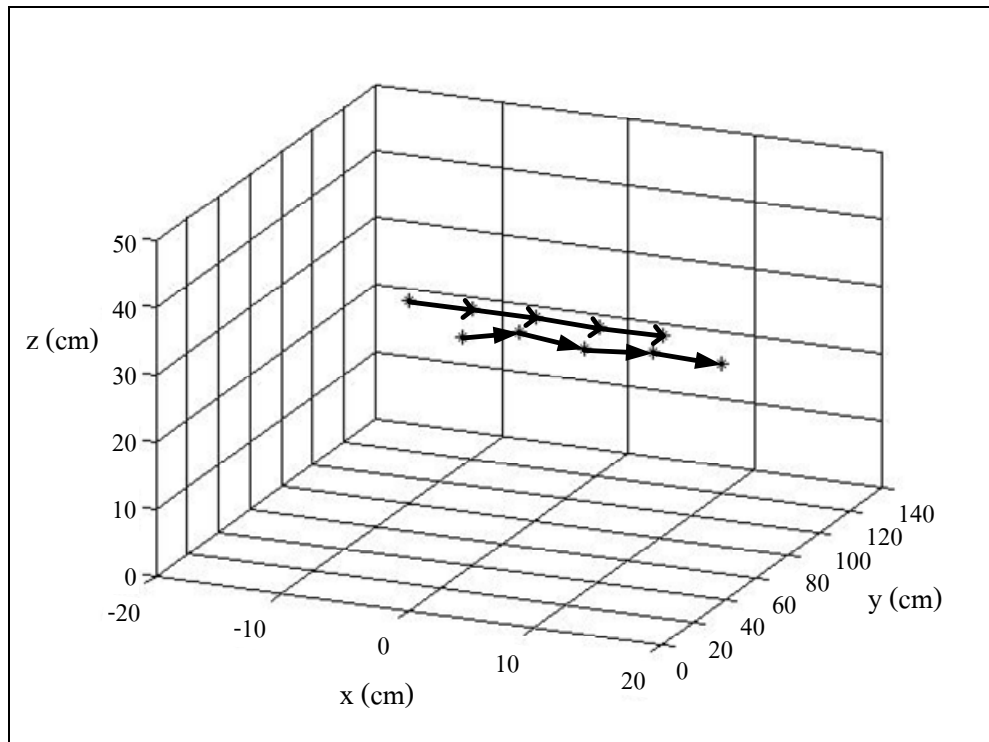
รูปที่ 4.51 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 32 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

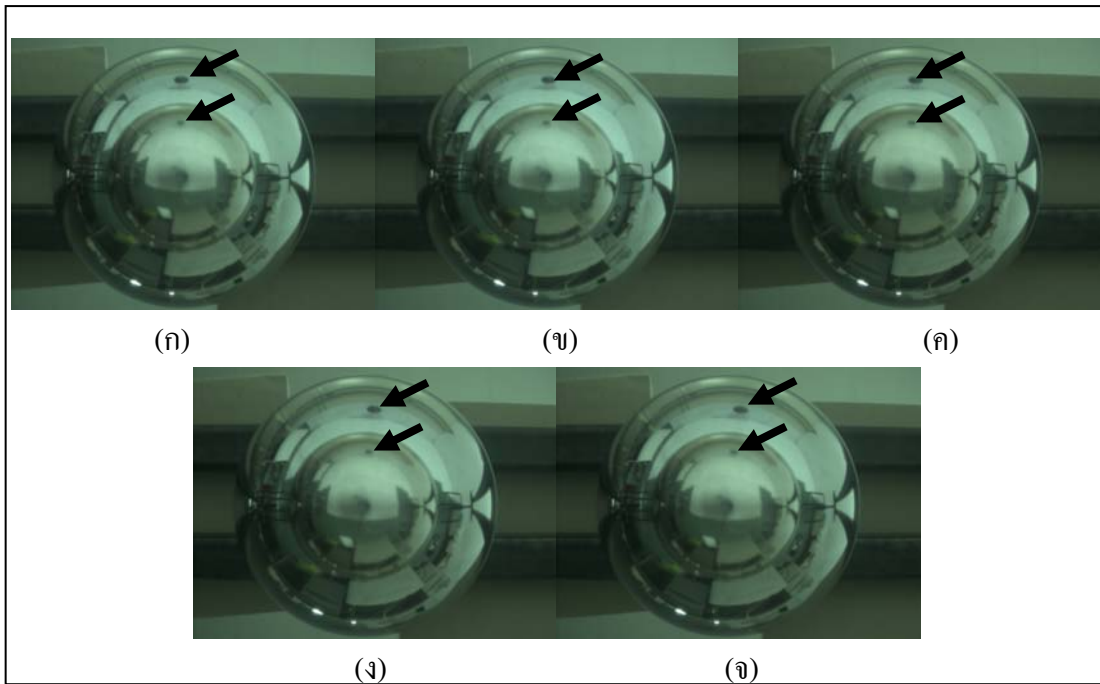


รูปที่ 4.53 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 32

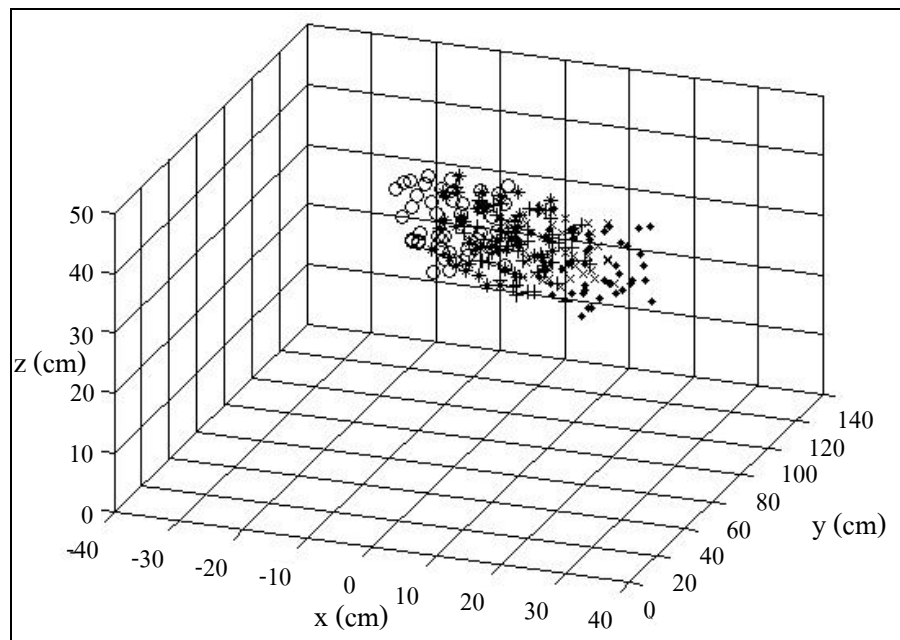


รูปที่ 4.54 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากไหลเชิงแสง (\rightarrow)

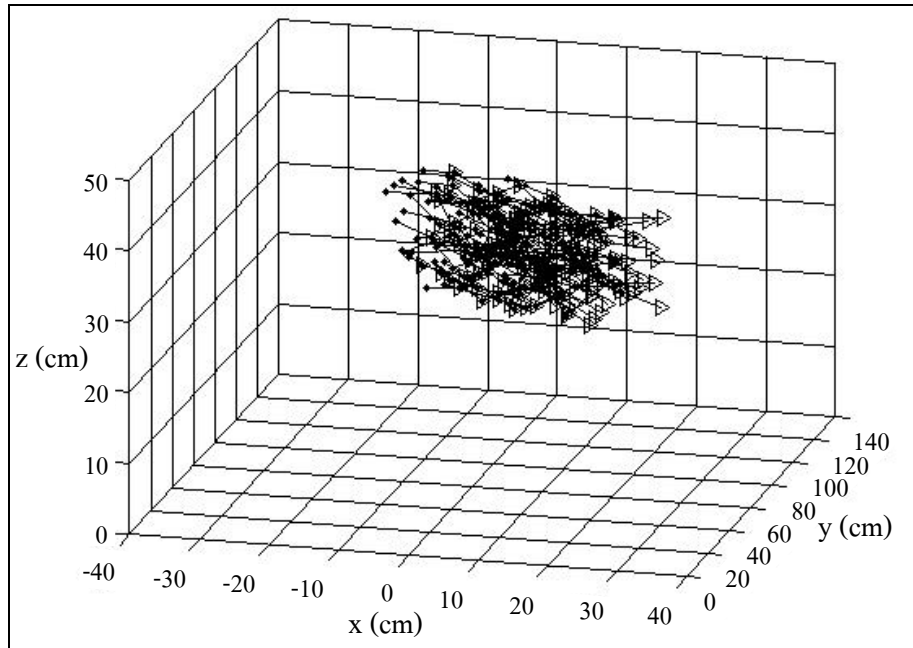
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 33 ดังแสดงในรูปที่ 4.55 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.56 รูปที่ 4.57 และรูปที่ 4.58



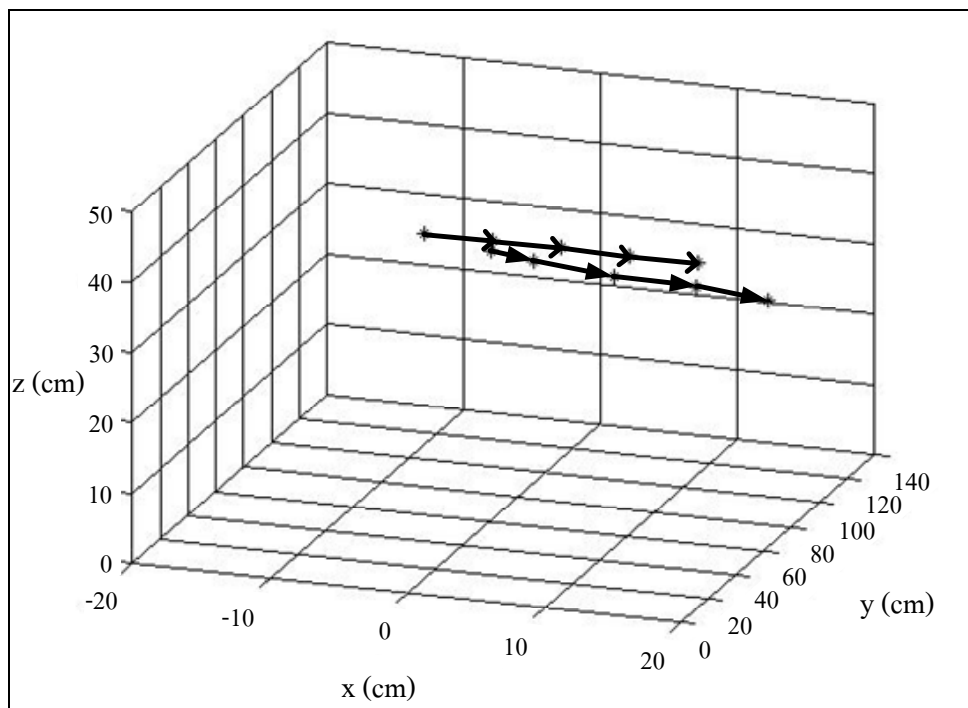
รูปที่ 4.55 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 33 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

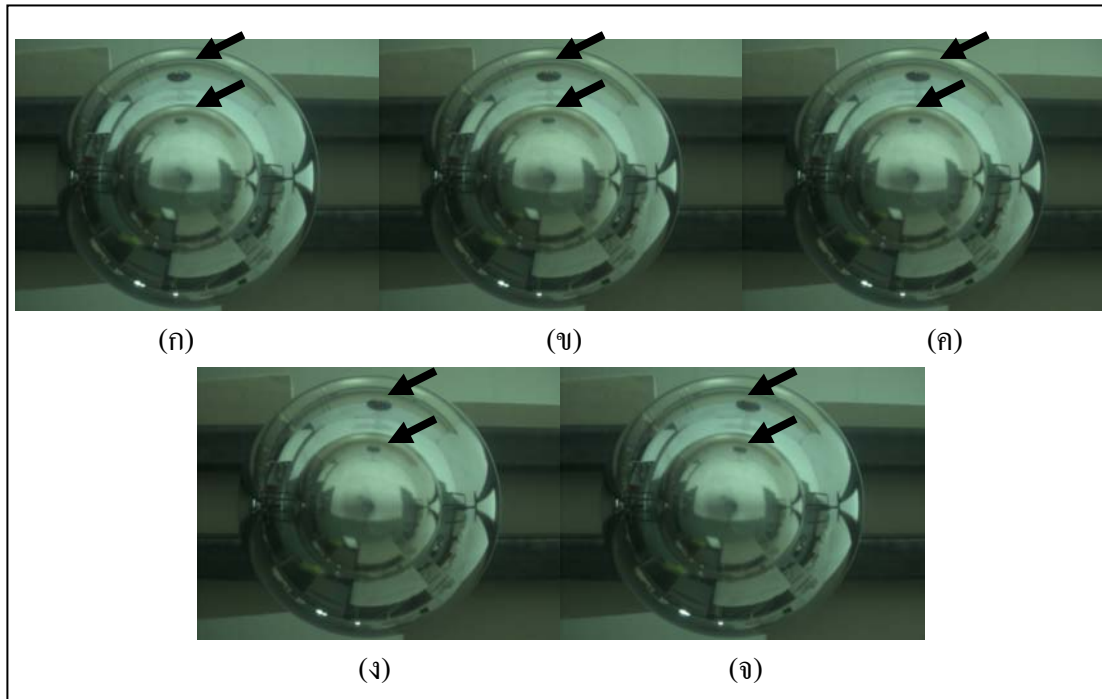


รูปที่ 4.57 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 33

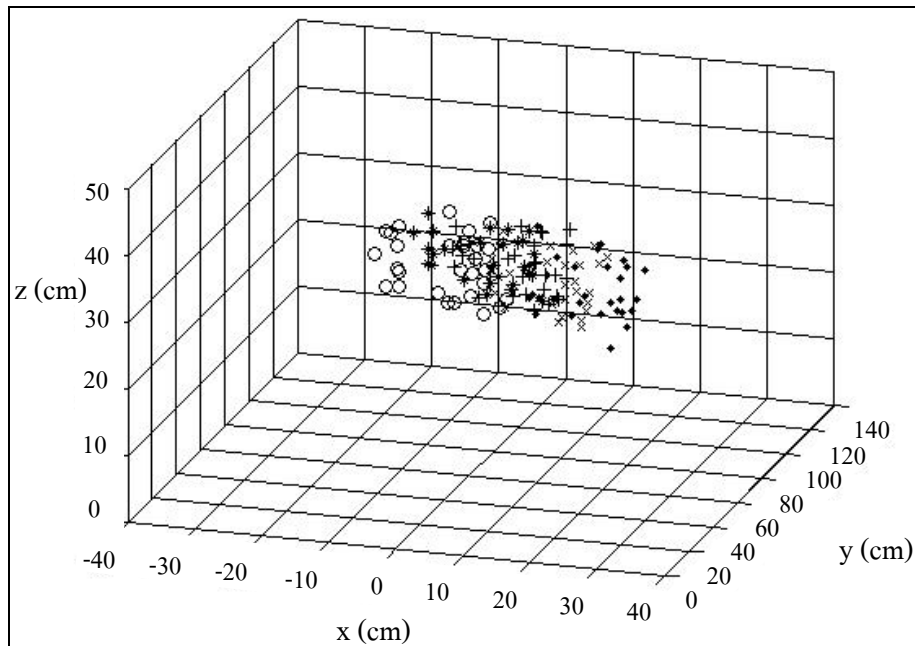


รูปที่ 4.58 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

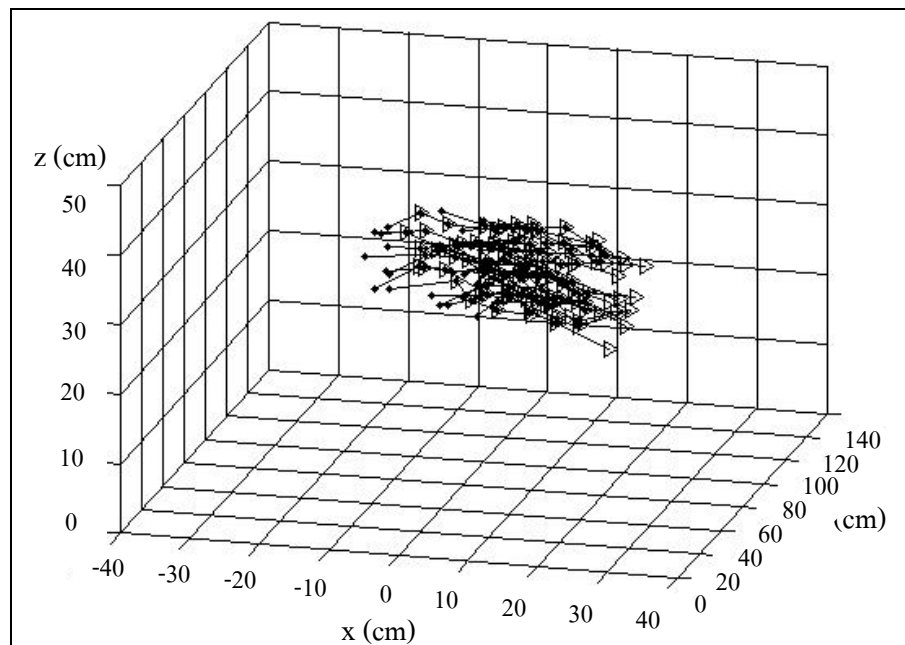
- เลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 41 ดังแสดงในรูปที่ 4.59 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.60 รูปที่ 4.61 และรูปที่ 4.62



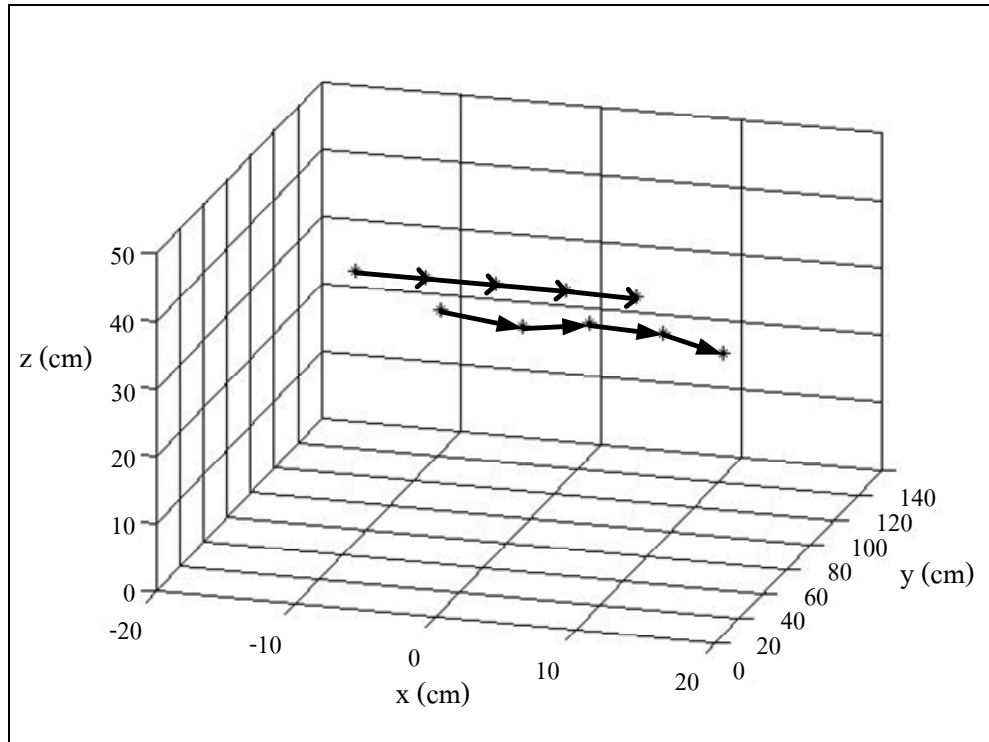
รูปที่ 4.59 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 41 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



รูปที่ 4.60 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41 โดย \circ เป็นจุดเริ่มต้น
 $*$ เป็นจุดที่ 2 $+$ เป็นจุดที่ 3 \times เป็นจุดที่ 4 \bullet เป็นจุดที่ 5

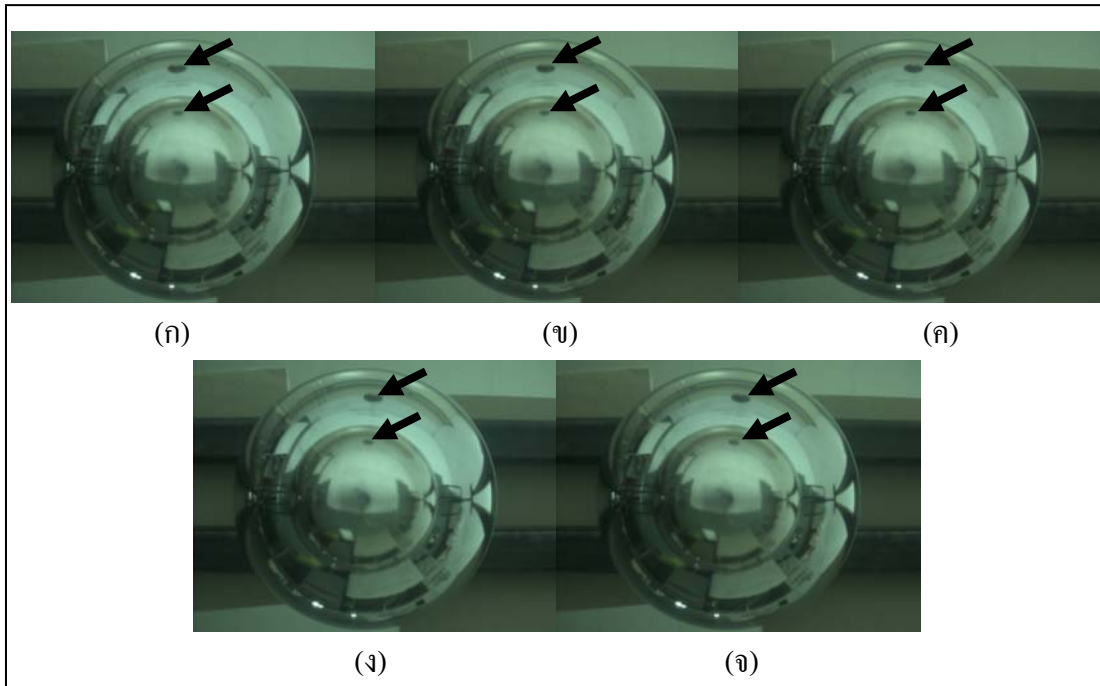


รูปที่ 4.61 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 41

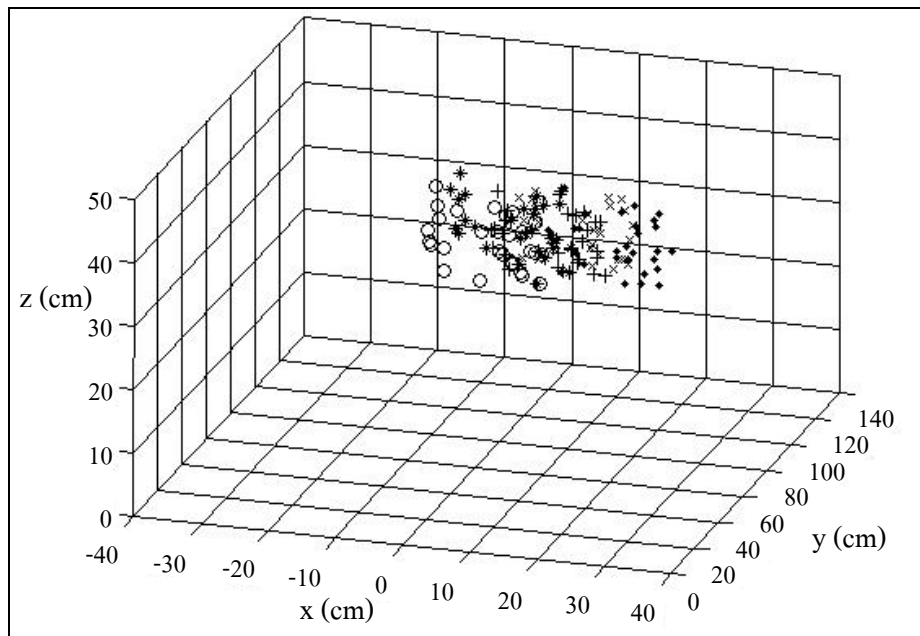


รูปที่ 4.62 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (\rightarrow)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (\rightarrow)

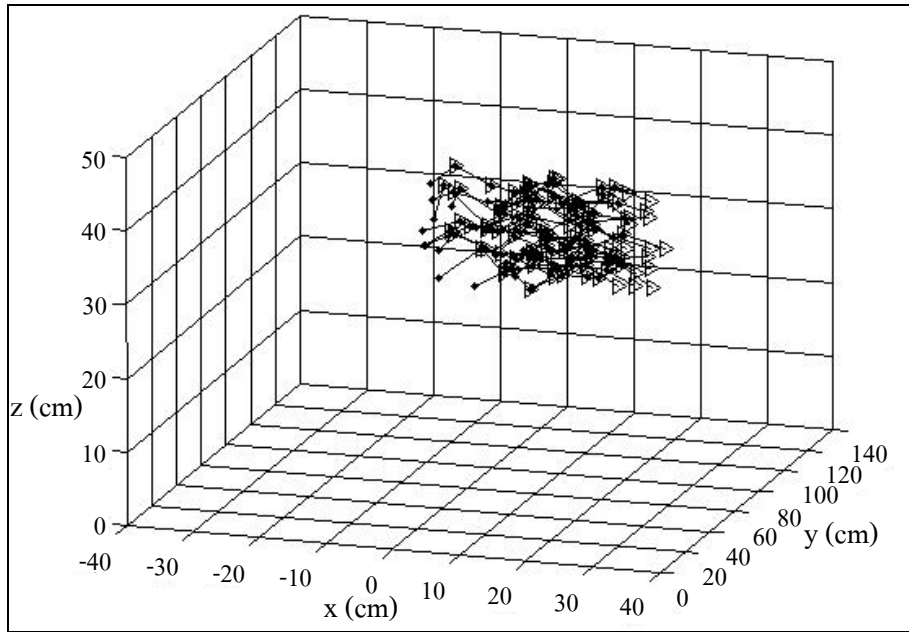
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 42 ดังแสดงในรูปที่ 4.63 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.64 รูปที่ 4.65 และรูปที่ 4.66



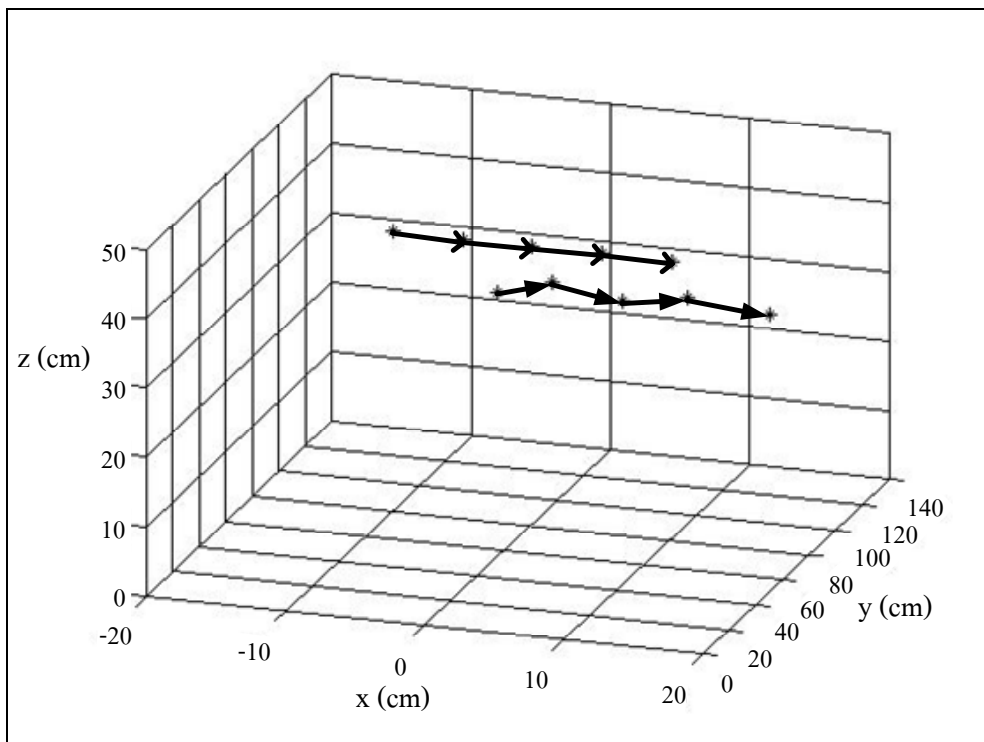
รูปที่ 4.63 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 42 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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

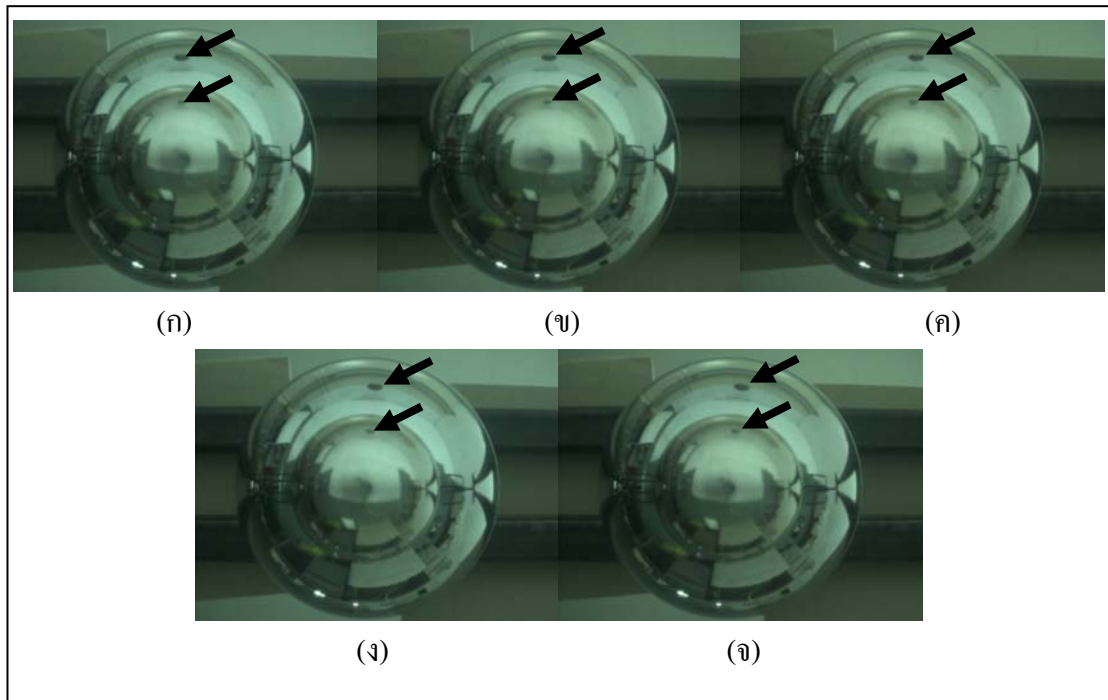


รูปที่ 4.65 กราฟทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 42

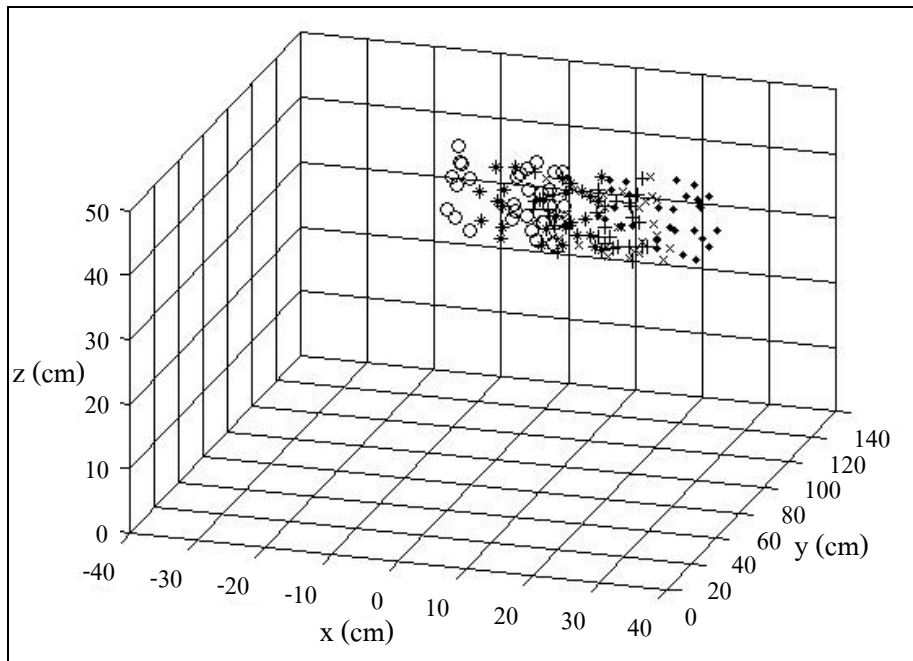


รูปที่ 4.66 เวกเตอร์เปรียบเทียบระหว่างเวกเตอร์จริง (→)
กับเวกเตอร์จากการไหลเชิงแสง (→)

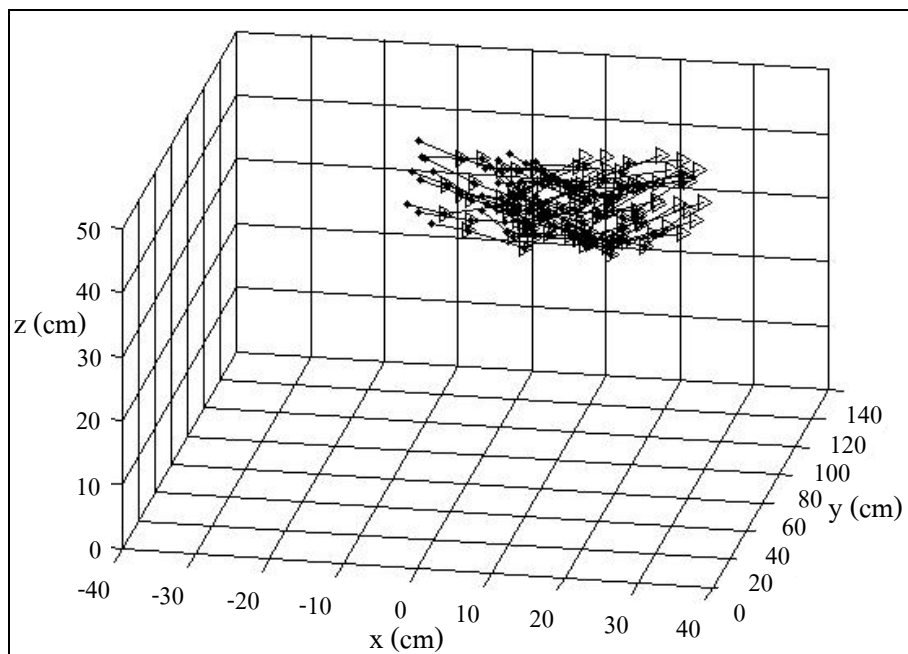
- การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 43 ดังแสดงในรูปที่ 4.67 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.68 รูปที่ 4.69 และรูปที่ 4.70



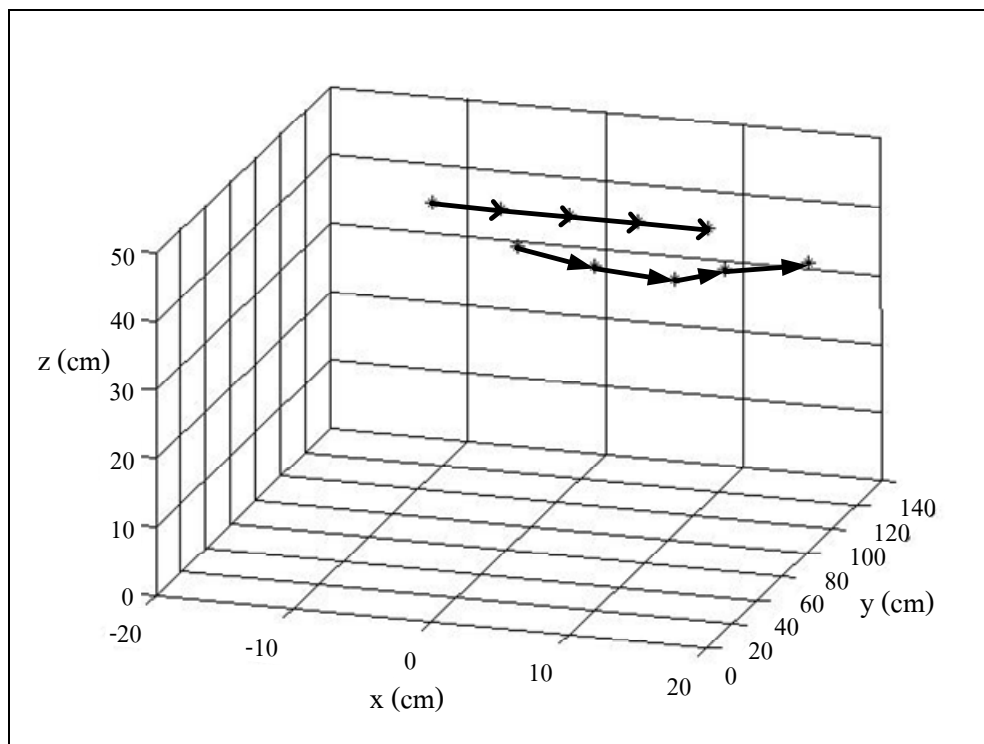
รูปที่ 4.67 การเคลื่อนที่ของวัตถุตามแนวการเคลื่อนที่ 43 (ก) ตำแหน่งที่ 1 (ข) ตำแหน่งที่ 2 (ค) ตำแหน่งที่ 3 (ง) ตำแหน่งที่ 4 (จ) ตำแหน่งที่ 5



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



รูปที่ 4.69 กราฟทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวการเคลื่อนที่ 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)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (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)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (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)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (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

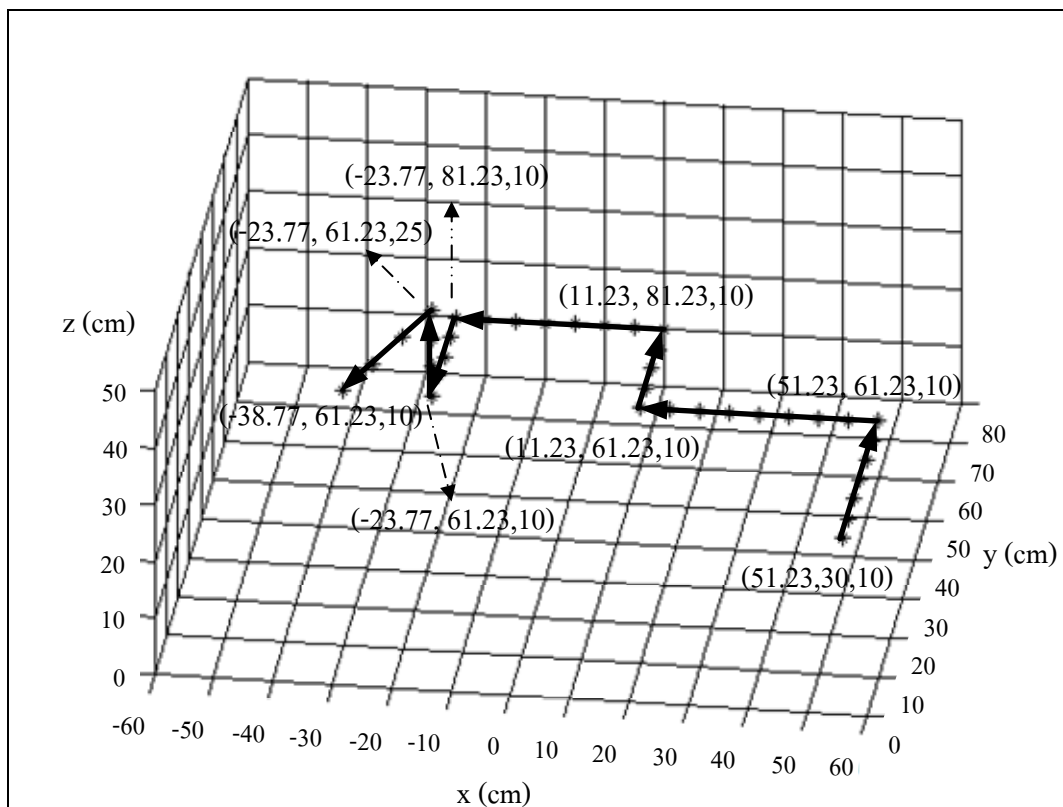
ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,81.23,40)	(-3.21,88.94,31.41)	(6.79,7.71,8.59)
2	(-5,81.23,40)	(0.64,89.16,33.65)	(5.64,7.93,6.35)
3	(0,81.23,40)	(5.87,87.61,32.25)	(5.87,6.38,7.75)
4	(5,81.23,40)	(10.32,90.07,33.21)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

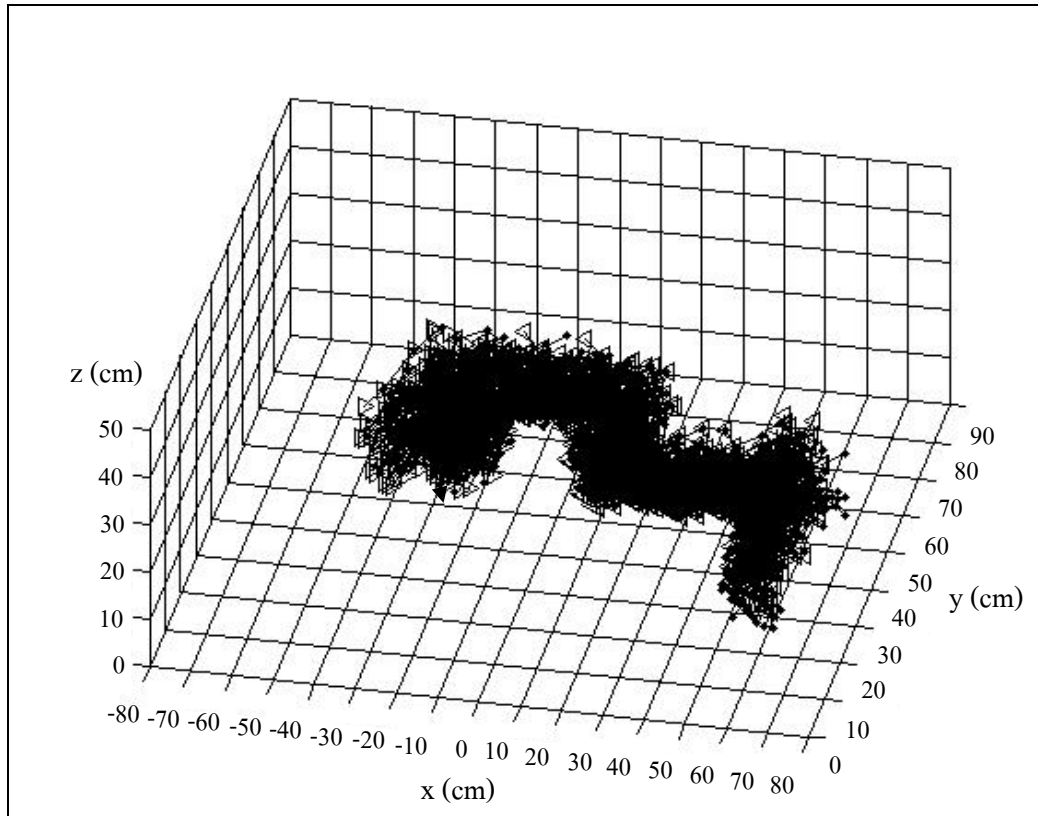
ลำดับการเคลื่อนที่	พิกัดเฉลี่ยของพื้นผิววัตถุทดสอบ (cm)	พิกัดเฉลี่ยที่คำนวณได้ของวัตถุทดสอบ (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)
1	(-10,111.23,40)	(-4.54,119.56,33.26)	(5.46,8.33,6.74)
2	(-5,111.23,40)	(1.24,117.73,31.81)	(6.24,6.5,8.19)
3	(0,111.23,40)	(6.76,120.74,30.19)	(6.76,9.51,9.81)
4	(5,111.23,40)	(10.65,117.53,32.93)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

ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยให้วัตถุเคลื่อนที่ในระยะทางที่ยาวขึ้น โดยเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่าง ๆ ในย่านการทำงานของระบบ โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.71 และทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบที่คำนวณได้จากการไหลเชิงแสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.72



รูปที่ 4.71 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบ



รูปที่ 4.72 ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบโดยใช้การไหลเชิงแสง

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 ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน 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 ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในแนวแกน 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

ผิดพลาดมากที่สุดใในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.76 3.91 และ 3.87 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.28 3.32 และ 3.40 เซนติเมตรตามลำดับ

จากตารางที่ 4.11 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 32 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 3.15 3.68 และ 3.21 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดใในแนวแกน 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 ค่าความผิดพลาดมากที่สุดใในแนวแกน 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

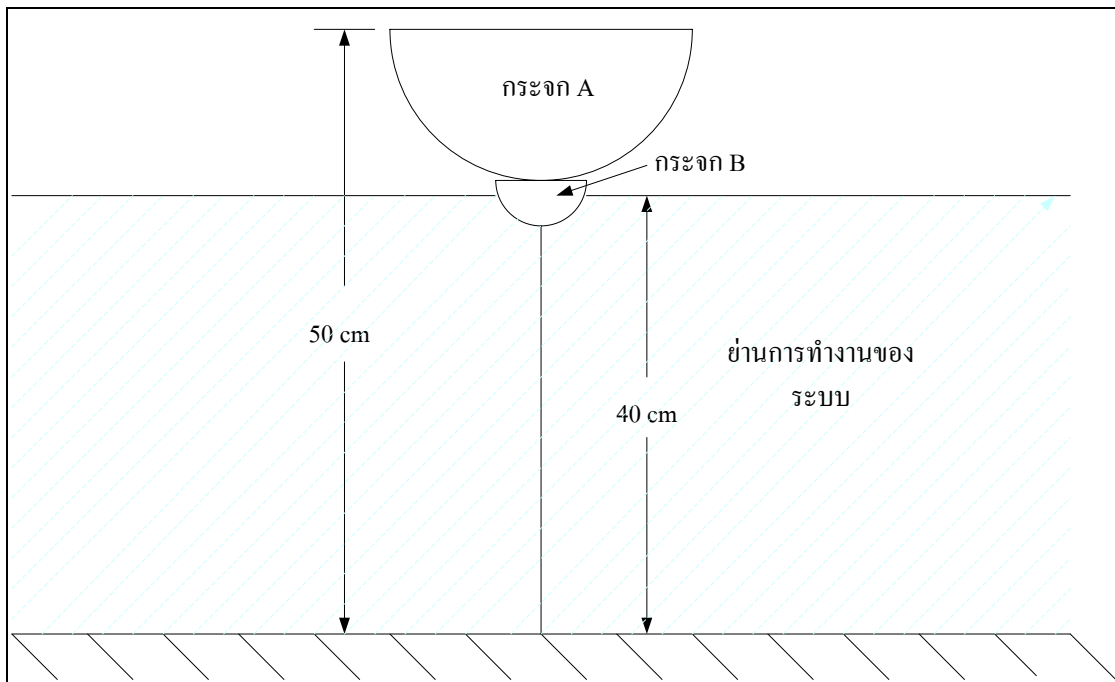
จากตารางที่ 4.13 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 41 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.35 6.03 และ 6.28 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดใในแนวแกน X Y และ Z เป็น 6.24 9.56 และ 8.42 เซนติเมตรตามลำดับ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.84 7.99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

จากตารางที่ 4.14 เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแนวที่ 42 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดในแนวแกน X Y และ Z เป็น 5.32 6.38 และ 6.35 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดใในแนวแกน 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 ค่าความผิดพลาดมากที่สุดใในแนวแกน 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 ได้ทำการทดลองเพื่อหาข่างานการทำงานของระบบที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.15 ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่อวัตถุทดสอบอยู่สูงขึ้นจากพื้นไม่เกิน 40 เซนติเมตรค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่า 5 เซนติเมตรซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการทำงานของระบบ และเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นจากพื้นมากกว่า 40 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่า 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นภาพที่ปรากฏบนกระจกโค้งจะอยู่ตรงขอบภาพซึ่งมีความละเอียดของภาพต่ำ โดยข่างานการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบ

แสดงดังรูปที่ 4.72 จากนั้นในการทดลองที่ 4.6 ได้ทำการทดลองโดยทำการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบในช่วงการทำงานของระบบที่มีประสิทธิภาพ ในระยะทางที่ยาวขึ้นซึ่งโดยแนวทางการเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 4.71 โดยผลที่ได้จากรูปที่ 4.72 จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของระบบสอดคล้องกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจริง แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในย่านการทำงาน of ระบบ ระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.73 ย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบ

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างระบบการการมองเห็นโดยคอมพิวเตอร์เพื่อให้มองเห็นได้รอบทิศทาง ซึ่งระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ร่วมกับ โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับและกระบวนการไหลเชิงแสงในการบูรณะสถานะแวดล้อมสามมิติ โดยทั้งระบบได้ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับหาจุดสามมิติบนผิวกระจกโค้ง การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

ในบทที่ 2 นี้ได้อธิบายถึงวรรณกรรมของกระบวนการสร้างการไหลเชิงแสงด้วยกระบวนการต่าง ๆ และทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคต่าง ๆ ที่วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ ตลอดจนนำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจกที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดของโครงสร้างระบบการหาตำแหน่งของวัตถุในสถานะแวดล้อมแบบสามมิติได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งโครงสร้างระบบประกอบไปด้วยการหาพิกัดสามมิติบนผิวกระจกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับเนื่องจากกระจกโค้งที่ใช้ไม่ได้ผลผลิตขึ้นเองทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระจกโค้งอาจมีความผิดเพี้ยนไปจึงมีผลให้เมื่อนำมาใช้งานจริงจะมีค่าความผิดพลาดมาก และนอกจากการนี้ใช้โครงข่ายประสาทเทียมยังช่วยลดความยุ่งยากและซับซ้อนของสมการ อีกทั้งยังลดความผิดพลาดที่เกิดจากค่าพารามิเตอร์ในการจัดตั้งอุปกรณ์และเพื่อให้ระบบสามารถระบุตำแหน่งในพิกัดสามมิติได้จึงได้ใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัว ซึ่งจากการทดสอบโดยการใส่ตารางปรับเทียบนั้นพบว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน 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 แสดงรายละเอียดการหาทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุที่อยู่ในสถานะแวดล้อมจริงโดยการใช้กระบวนการไหลเชิงแสง ซึ่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็นสามส่วน โดยในส่วนแรกได้ทำการทดสอบระบบโดยการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบเป็นระยะสั้น ๆ 4 จุด ไปในแนวแกน X Y และ XYZ โดยการเคลื่อนที่จะอยู่ในบริเวณที่ห่างจากแกนเชิงแสงในระยะ 51.23 - 62.03 เซนติเมตร

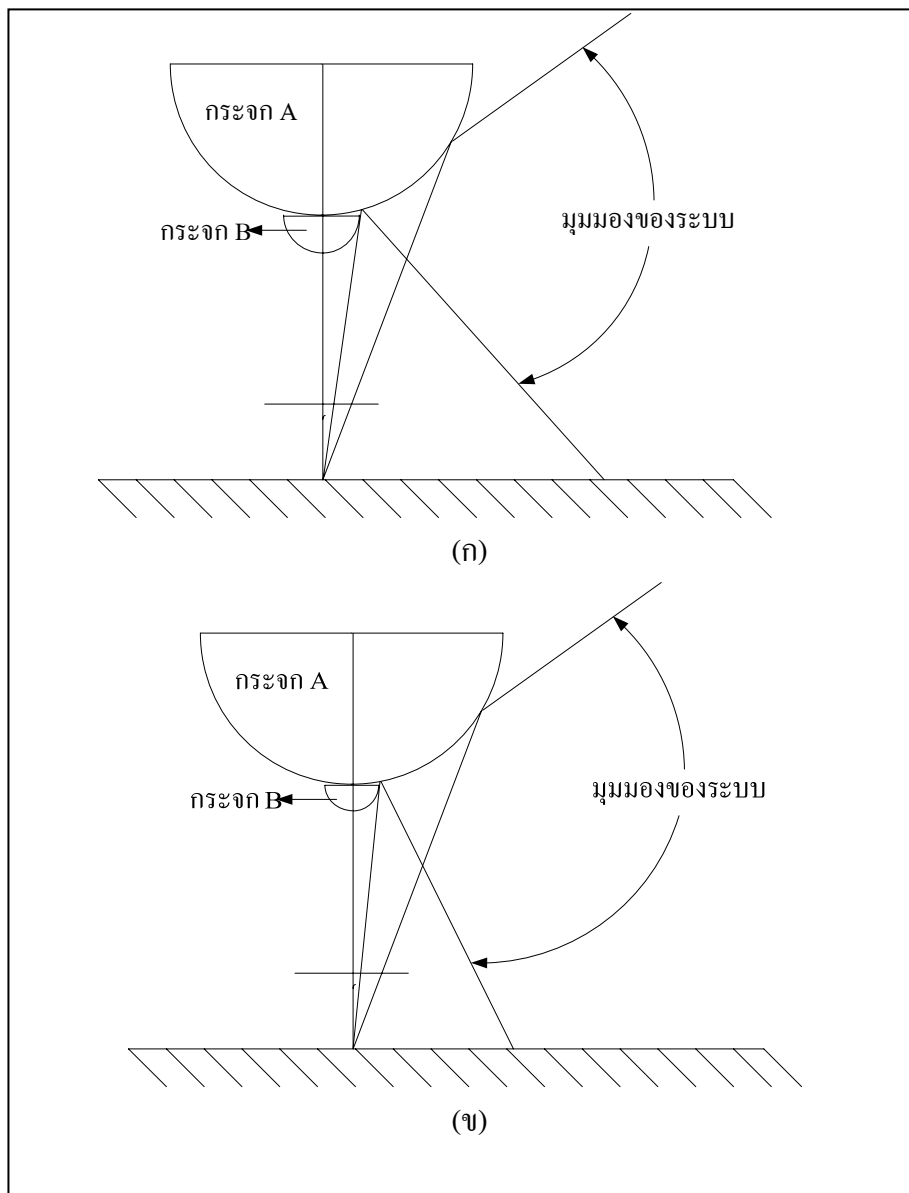
และสูงจากพื้นไม่เกิน 25 เซนติเมตร ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เน้นทั้งทิศทางและตำแหน่งของวัตถุทดสอบที่ได้จากระบบนั้นมีความใกล้เคียงกับทิศทางและตำแหน่งของวัตถุทดสอบที่ได้จากการเคลื่อนที่จริง โดยค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุทดสอบจะมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 3 เซนติเมตร ในส่วนที่สองได้ทำการทดสอบย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งในการทดสอบระบบได้ทำการเคลื่อนที่ของวัตถุทดสอบเป็นระยะสั้น ๆ 5 จุดไปในแนวแกน X ซึ่งห่างจากกระจกโค้งไปในแนวแกน 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 ซึ่งจากการทดสอบทำให้ทราบย่านการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบได้ โดยผลที่ได้จากการทดสอบคือเมื่อวัตถุทดสอบอยู่สูงขึ้นจากพื้นไม่เกิน 40 เซนติเมตรค่าความผิดพลาดจะมีค่าน้อยกว่า 5 เซนติเมตรซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการทำงานของระบบ และเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นจากพื้นมากกว่า 40 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากกว่า 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อวัตถุอยู่สูงขึ้นภาพที่ปรากฏบนกระจกโค้งจะอยู่ตรงขอบภาพซึ่งมีความละเอียดของภาพต่ำ และสุดท้ายได้ทำการทดสอบระบบโดยการใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่ติดต่อกันไปในทิศทางต่าง ๆ ในย่านการทำงานของตัวตรวจรู้แบบเลนส์ - กระจก ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าทิศทางเคลื่อนที่ที่ได้จากระบบสอดคล้องกับทิศทางเคลื่อนที่ของวัตถุจริง แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ในย่านการทำงานของระบบ ระบบจะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคตคือ

1. ในการใช้กระจกโค้งรูปครึ่งทรงกลม 2 ตัวจะทำให้มุมมองตรงกลางภาพขาดหายไป ดังนั้นเพื่อพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงควรใช้กระจก B ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้ระบบมีมุมมองที่กว้างขึ้น และกล้องที่ใช้ควรจะมีค่าความละเอียดสูงขึ้น โดยตัวอย่างมุมมองของระบบเมื่อกระจก B มีการเปลี่ยนแปลงขนาดแสดงดังรูปที่ 5.1

2. กระจกโค้งที่ใช้ควรจะเป็นกระจกโค้งที่ผลิตขึ้นเองโดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระจกโค้งจะต้องมีความถูกต้องแม่นยำและผิวของกระจกโค้งจะต้องเรียบสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถคำนวณตำแหน่งของวัตถุในสามมิติได้อย่างถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างมุมมองของระบบ (ก) กระจก B มีขนาดใหญ่ (ข) กระจก 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 Vandergrind, 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

รายละเอียดทางเทคนิคของกล้องที่ใช้ในการทดสอบ

ในภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดข้อมูล และคุณสมบัติของกล้องที่นำมาใช้ในการทดสอบรวมไปถึงขนาดความกว้างและความยาวของตัวกล้อง

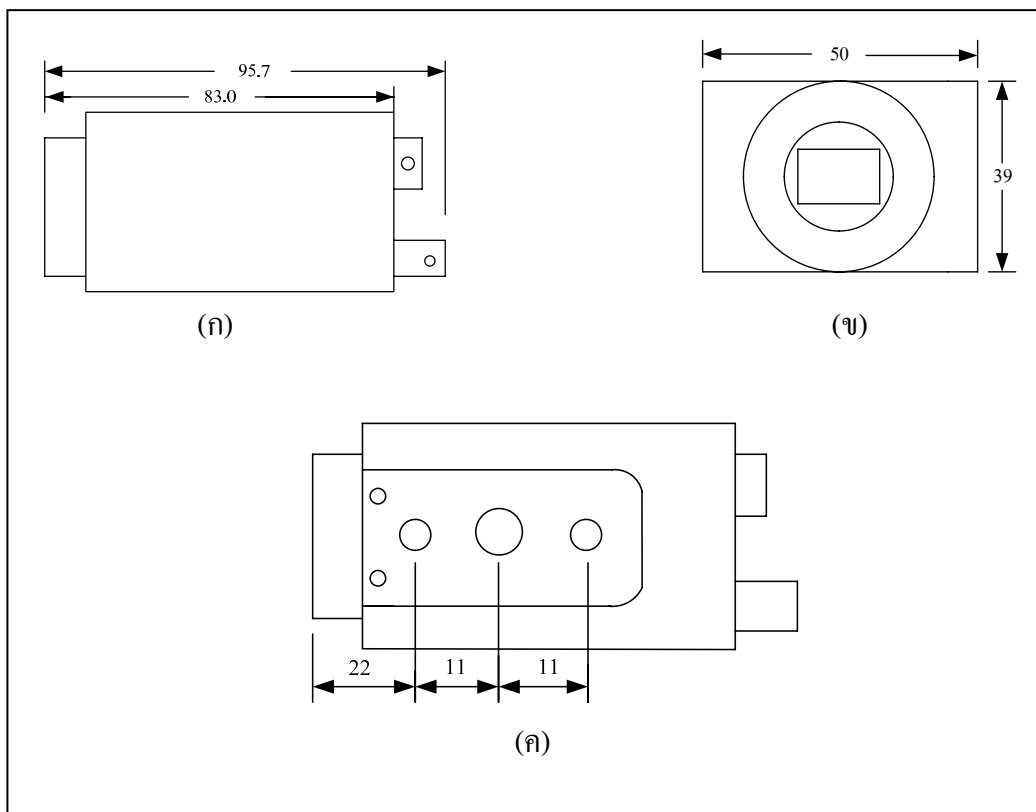


รูปที่ ก.1 กล้องที่นำมาทดสอบ

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 ขนาดของตัวกล่อง



รูปที่ ก.2 รายละเอียดขนาดของตัวกล่อง (มม.) (ก) มุมมองด้านข้าง
(ข) มุมมองด้านหน้า (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

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

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, (Accepted).**

3D OBJECT TRACKING SYSTEM BASE ON NEURAL NETWORK AND IMPERFECT-CURVED-MIRROR OMNIVISION

ARTHIT SRIKAEW AND EAKAPHAP THONGINTA

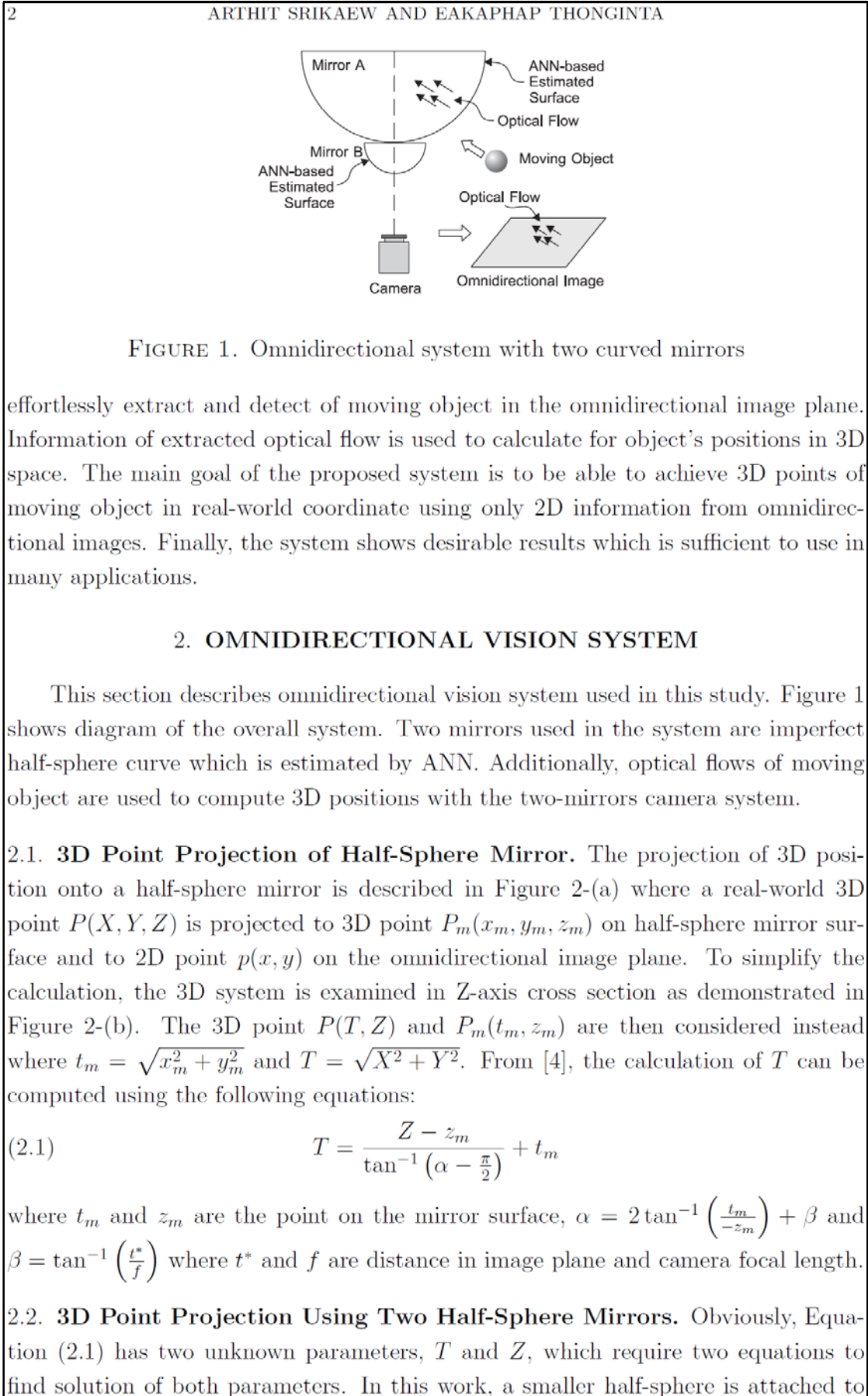
Robotics & Automation Research Unit for Real-World Applications,
School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

ABSTRACT. This work presents a development of omnidirectional vision system to track moving object in 3D space. Two imperfect half-sphere mirrors have been combined in the system to achieve the calculation of 3D positions in space. 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 result of the proposed system is desirable in order to use for various applications that require tracking of moving object in 3D space.

1. INTRODUCTION

Recently, robot vision has been widely used in reducing complications for many real-world applications. With more advanced technology in both hardware and software allows developers to attack various scenarios of problem. The traditional monocular system has a confined view angle while stereo vision system provides depth information which is very useful in many situations. Not long ago, there are many studies and developments in several types of omnidirectional vision system [9, 1, 2]. Such systems can yield more information including wider view of angle and depth of field. Great number of applications can then utilize the advantage of such system e.g. the motion estimation [7], detection [6], tracking [3], environment classification [10] and navigation [4].

This work presents a 3D object tracking system using catadioptric sensor. The system is mainly composed of two curved mirrors for a simple calculation of object's 3D positions. Due to difficulty of making a curved mirror, the mirrors used in this system have imperfect shape which can be estimated their surface by using technique of an artificial neural network (ANN). The optical flow technique is then applied to



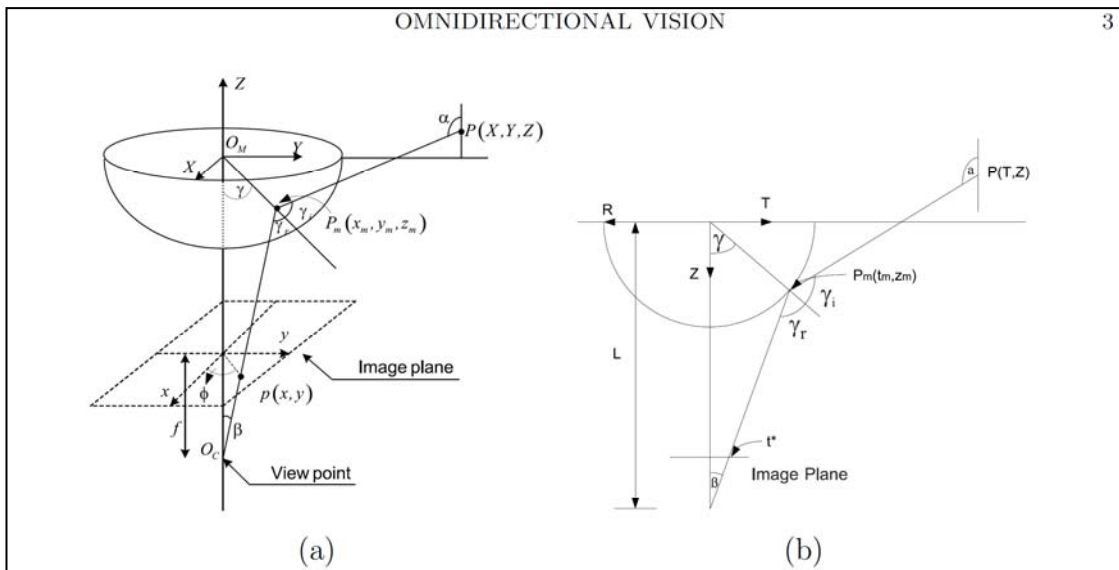


FIGURE 2. Projection of 3D position onto half-sphere mirror surface

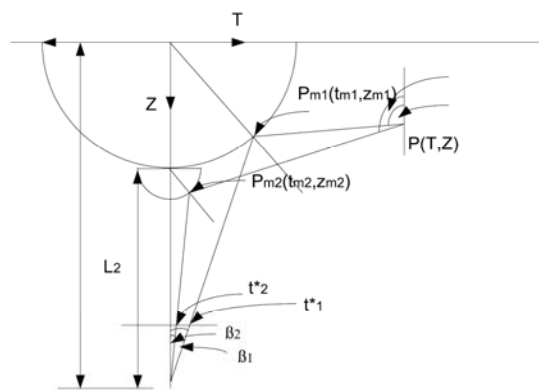


FIGURE 3. 3D point projection onto two half-sphere mirrors

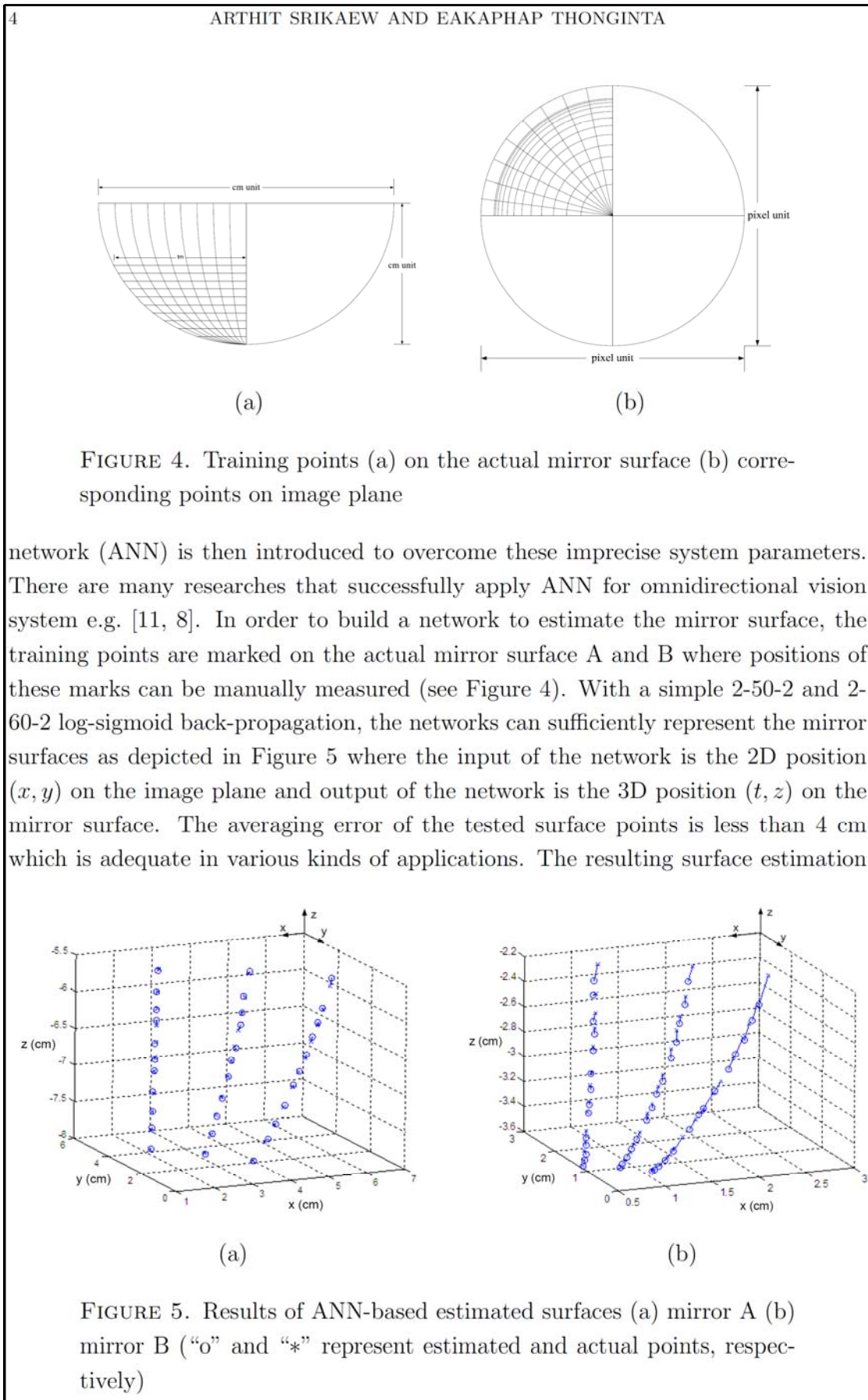
the system in order to obtain another equation to solve for T and Z . Consequently, two equations with two different points on both mirror surfaces and image plane can be achieved for which both T and Z can then be computed as follows:

$$(2.2) \quad T = \frac{Z - z_{m1}}{\tan^{-1} \left(\alpha_1 - \frac{\pi}{2} \right)} + t_{m1}$$

$$(2.3) \quad T = \frac{Z - z_{m2}}{\tan^{-1} \left(\alpha_2 - \frac{\pi}{2} \right)} + t_{m2}$$

3. 3D MIRROR SURFACE ESTIMATION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Consider Equation (2.1), (2.2), and (2.3), there are also internal camera parameters which are required to calibrate first. Moreover, the mirror surface which is assumed to be a half-sphere mirror is also imperfect to fabricate or measure. An artificial neural



is used together with actual mirror surface to calculate 3D points (see Figure 6-(a)). Examples of 3D point calculation are displayed in Figure 6-(b).

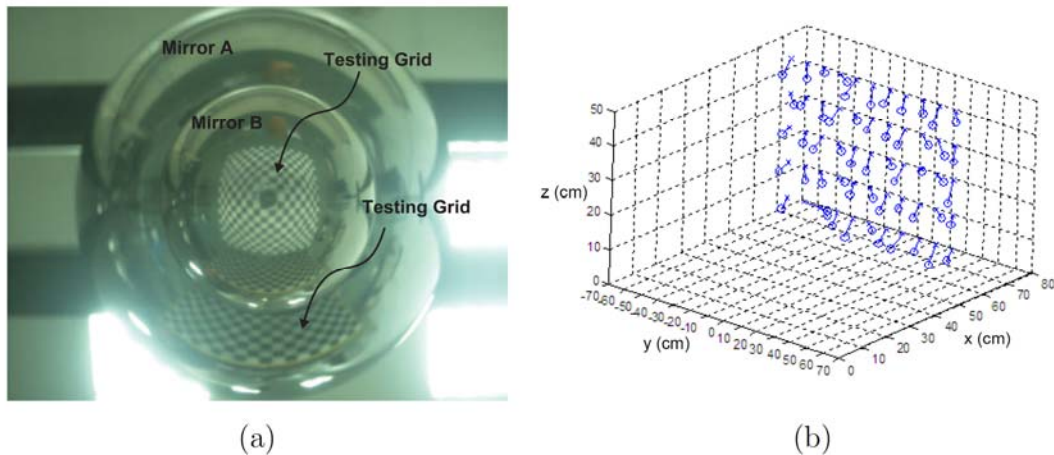


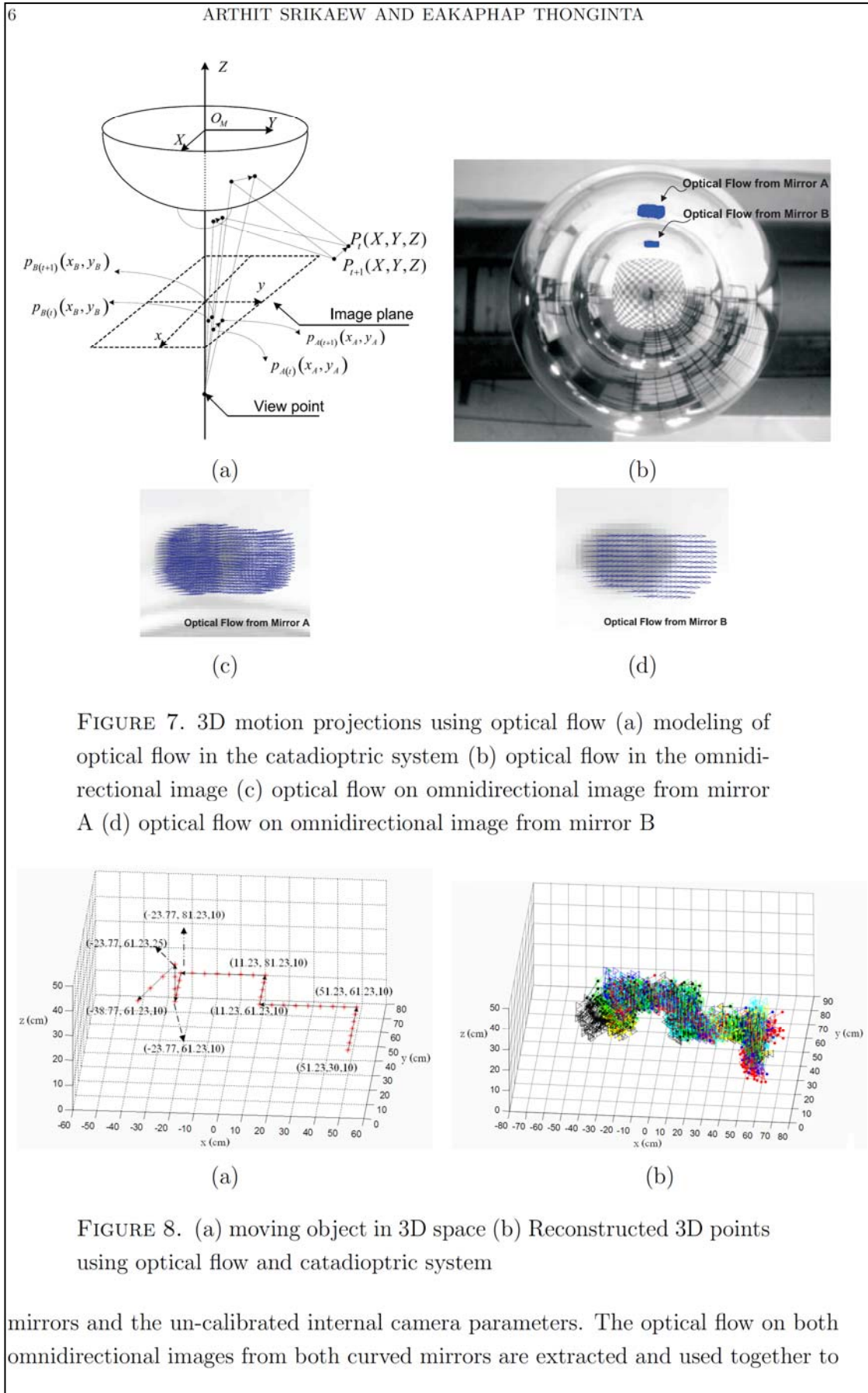
FIGURE 6. (a) Omnidirectional image example with grid sheet for testing (b) Example 3D points from calculation using estimated mirror surfaces (“o” and “*” represent estimated and actual points, respectively)

4. 3D MOVING OBJECT TRACKING USING OPTICAL FLOW & OMNIVISION SYSTEM

The proposed system has been tested for 3D moving object tracking. The moving object is extracted by using the optical flow calculation [5]. In this work, the 3D points of moving object are computed from the flow vectors appeared in the omnidirectional images. Figure 7-(a) depicts the calculation of 3D position using positions from optical flow from the image plane. The 3D points of moving object at time t and $t+1$ are represented by P_t and P_{t+1} , respectively. Examples of optical flows that appear in the omnidirectional image is shown in Figure 7-(b), (c), and (d). The proposed system has been tested for tracking moving object as demonstrated in Figure 8. The moving points have been examined through out the workspace around the system. The results show that the proposed system is capable of tracking moving in 3D space.

5. DISCUSSIONS & CONCLUSIONS

This work presents the development of catadioptric system to track moving object in 3D space. Two imperfect half-sphere mirrors have been combined in the system to achieve the calculation of 3D points in space. The simple back-propagation ANN has been used as a mirror surface model to overcome these two imperfect curve of



compute 3D position of the moving object. The resulting shows that the system can efficiently track moving object. The error of 3D position estimation is depend on position around the camera system. The higher range along z-axis, the greater error for estimation. Because the higher 3D point appears on the edge of the mirror and the omnidirectional image, the pixel resolution is then less than the image which is near center part of the mirror. This results in greater error for 3D estimation. Also, the smaller mirror which is attached at the center of the bigger mirror can obscure the view in the omnidirectional image. Using the smaller mirror with higher resolution camera can alleviate such limitation. However, the result of the proposed system is still desirable in order to use for various applications that require tracking of moving object in 3D space.

ACKNOWLEDGEMENT. This research is supported by School of Mechanical Engineering (Mechatronics), Institute of Engineering and Suranarce University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

REFERENCES

- [1] S. Baker and S. Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation. In *International Journal of Computer Vision*, volume 35, pages 1–22, 1999.
- [2] K. Daniilidis and C. Geyer. Omnidirectional vision: Theory and algorithms. In *Proceeding of International Conference on Pattern Recognition*, volume 1, pages 89–96, September 2000.
- [3] W. Feng, Y. Liu, and Z. Cao. Omnidirectional vision tracking and positioning for vehicles. In *The 4th International Conference on Natural Computation*, volume 6, pages 183–187, 2008.
- [4] J. Gasper, N. Winters, and J. A. Santos-Victor. Vision-based navigation and environmental representations with an omnidirectional camera. In *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 16, pages 890–898, December 2000.
- [5] B. K. P. Horn and B. G. Schunck. Determining optical flow: A retrospective. In *Artificial Intelligence*, volume 59, pages 81–87. Elsevier, 1993.
- [6] J. Kim and Y. Suga. An omnidirectional vision-based moving obstacle detection in mobile robot. In *International Journal of Control, Automation, and Systems*, volume 5, pages 663–673, 2007.
- [7] J. W. Lee, S. You, and U. Neumann. Large motion estimation for omnidirectional vision. In *Proceeding IEEE Workshop on Omnidirectional Vision*, pages 161–168, June 2000.
- [8] Y. Mokri and M. Jamzad. Omni-stereo vision system for an autonomus robot using neural network. In *Conference on Electrical and Computer Engineering*, pages 1590–1593, 2005.
- [9] S. Nayar. Catadioptric omnidirectional camera. In *IEEE Conference in Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 482–488, June 1997.
- [10] L. L. Silva, M. L. Tronco, H. A. Vian, R. Souza, and A. Porto. Classification and characterization of places for mapping of environment using hierarchical neural network and omnivision. In *The 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing*, pages 487–490, 2008.
- [11] T. Zhe, S. H. Lian, and S. Zengqi. A neural network based localization from distorted image in omnidirectional catadioptric vision system. In *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing*, volume 2 of 701-704, 2002.

ประวัติผู้เขียน

นายเอกภาพ ทองอินตะ เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่อำเภอท่าวังผา จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนท่าวังผาพิทยาคม จังหวัดน่าน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ได้สอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ (2) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และ (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดัง ภาคนวค ข.