ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 3 มิติแบบเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว

นายกฤษณะ อุตมัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A REAL-TIME 3D TRACKING SYSTEM USING MULTIPLE CAMERAS

Mr. Kritsana Uttamang

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

490712

Thesis Title	A REAL-TIME 3D TRACKING SYSTEM USING MULTIPLE CAMERAS
By	Mr.Kritsana Uttamang
Filed of study	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Associate Professor Viboon Sangveraphunsiri, Ph.D.

Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Doctor's Degree

..... Dean of the Faculty of Engineering

(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE

..... Chairman

(Professor Somsak Chaiyapinunt, Ph.D.)

..... Thesis Advisor

(Associate Professor Viboon Sangveraphunsiri, Ph.D.)

..... Member

(Assistant Professor Ratchatin Chanchareon, Ph.D.)

..... Member

(Assistant Professor Wichai Sivakosit, Ph.D.)

..... Member

(Assistant Professor Witaya Wannasuphoprasit, Ph.D.)

กฤษณะ อุดมัง : ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 3 มิติแบบเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว. (A REAL-TIME 3D TRACKING SYSTEM USING MULTIPLE CAMERAS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 87หน้า.

การติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุในสามมิติเป็นหนึ่งในประเด็นหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการมองเห็น ปกติการหาพิกัดสามมิติของวัตถุด้วยระบบกล้องจะใช้กล้องสองตัว ในกรณีที่มีกล้องตัวใดตัวหนึ่งไม่สามารถจับภาพของวัตถุได้ระบบก็จะไม่สามารถหาตำแหน่งของวัตถุได้ การใช้กล้องหลายตัวสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ก็ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วย จึงเป็นไปได้ยากที่ระบบจะทำงานแบบเวลาจริง ในการทดลองนี้จึงได้พัฒนาระบบการมองเห็นที่ใช้กล้อง 3-4 ตัวเพื่อใช้ติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุในสามมิติทั้งตำแหน่งและความเร็ว โดยใช้กลุ่มของคอมพิวเตอร์ที่ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ 2 ตัว ช่วยกันคำนวณเพื่อลดเวลาในการประมวลผลทำให้ระบบทำงานได้แบบเวลาจริง คอมพิวเตอร์ทั้งสองอันได้แก่เครื่องคอมพิวเตอร์โลคอลและคอมพิวเตอร์รีโมท จะทำการถ่ายภาพวัตถุ กรองสัญญาณรบกวน และหาพิกัดภาพ 2 มิติของวัตถุพร้อมกันทั้งสองเครื่อง ก่อนที่คอมพิวเตอร์รีโมทจะส่งพิกัดภาพ 2 มิติที่ได้มาให้คอมพิวเตอร์โลคอลเพื่อให้เครื่องโลคอลประมวลผลหาพิกัด 3 มิติของวัตถุ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ทั้งสองทำงานสอดคล้องกัน งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบการทำงานร่วมกันระหว่างคอมพิวเตอร์สองเครื่องโดยใช้แผ่นวงจรแบบพีซีไอสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลผ่านใยแก้วนำแสง ระบบที่พัฒนาสามารถสอบเทียบกล้องโดยใช้ได้ทั้งระเบียบวิธีของ Tsai และ Zhang สำหรับการสอบเทียบด้วยระเบียบวิธีของ Zhang นั้นได้มีการปรับแก้แบบจำลองความบิดเพี้ยนของเลนส์เพื่อให้ใช้ในการคำนวณพิกัด 3 มิติได้เร็วขึ้น ในส่วนของการทดลองในงานวิจัยนี้ได้ใช้แขนกล PA10 เพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ พบว่าระบบที่พัฒนาสามารถติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 3 มิติแบบเวลาจริงได้ทั้งตำแหน่งและความเร็ว โดยมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติสำหรับงานวิศวกรรมย้อนกลับ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2549

4571801621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: MULTIPLE CAMERAS SYSTEM / REAL-TIME TRACKING / PC-CLUSTER
KRITSANA UTTAMANG : A REAL-TIME 3D TRACKING SYSTEM USING MULTIPLE CAMERAS. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 87 pp.

Tracking an object in three dimensional space is a major issue in computer vision which is normally solved through the extraction of representative features of the object, and two-dimension coordinates of the series of these image features are used to compute the position of the object. Typical system uses a binocular stereovision system. For environment with obstruction, only two cameras is not practical, multiple cameras are used instead. When multiple cameras are used, a certain similarity measure among extracted features from any two stereoscopic images helps to match the correspondences. In this way, three-dimensional measurement can be obtained from the 2-D coordinate of the features extracted from the different cameras. In this research, a multiple cameras system (four cameras) and PC-cluster (two microcomputers) are used for estimating both position and velocity of a specified moving object. Noise filtering and features extraction of images are performed in the PC-cluster at video rate. Then, the extracted features from every camera will be used to locate the object. This is done in the main computer. The synchronization mechanism between computers has been developed using PCI-to-PCI data movers with fiber optic connection. The developed system can use both Tsai's method and Zhang's method for calibrating the system. For Zhang's method, we purpose a modified distortion model to reduce the computation time in 3-D reconstruction process. In our experiments, we setup the system to track 3-D paths which are generated by the PA10 robotic arm. The results show that the system can track both position and velocity of moving object in real-time with acceptable accuracy. Moreover, we show that the system can be adapted to be used for the reverse engineering application.

Department Mechanical Engineering Student's signature Kritsana Uttamang
Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature
Academic year 2006

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank Assoc.Prof.Viboon Sangveraphunsiri for giving me the opportunity to work in the Advanced Manufacturing Laboratory, have technical assistance and support for many years. Thanks to Asst.Prof.Satian Wongsarasert and my colleagues at Advanced Manufacturing Laboratory for their help on my research.

I would like to thank my parents, my sister and my wife for their care and support during research.

TABLE OF CONTENTS

Page

Abstract in Thai iv

Abstract in English v

Acknowledgements vi

Table of Contents vii

List of Figures x

List of Tables xv

Chapter I Introduction 1

1.1 Motivation 1

1.2 Objective 1

1.3 Specifications 1

1.4 Procedures 2

1.5 Benefits 3

Chapter II Literature Review 4

2.1 Real-Time 3-D Pose Estimation System 4

2.2 Camera Calibration 4

2.2.1 Photogrammetric Calibration 5

2.2.2 Self-Calibration 5

2.3 3-D Reconstruction 6

2.3.1 Midpoint 6

2.3.2 Least-Squares and Iterative Least-Squares 6

2.3.3 Bundle Adjustment 7

Chapter III Theory 8

3.1 Camera Model 8

3.2 Lens Distortion 12

3.3 Camera Calibration 14

3.3.1 Simple Photogrammetric Calibration 15

3.3.2 Tsai's Calibration Method 15

3.3.3 Zhang's Calibration Method 17

Page

3.4 3-D Reconstruction 20
3.4.1 Midpoint 21
3.4.2 Linear Triangulation 22
3.4.3 Bundle Adjustment 23
3.5 Circular Hough Transform 24

Chapter IV Hardware 26
4.1 PixeLINK Camera Model PL-A741-BL 26
4.1.1 Specifications 26
4.1.2 Extended Machine Vision Interface 26
4.1.3 Synchronous Image Capturing Using PL-A741-BL 27
4.2 PixeLINK 16-mm Lens Model PL-16MM-CM 28
4.3 dataBLIZZARD PCI to PCI Data Mover Card Model DB0-PCI-PCI 28
4.4 Mitsubishi PA10-7C Robotic Arm 30
4.5 Chessboard Calibration Pattern 31
4.6 Personal Computer 32
4.7 System Setup 32

Chapter V System and Software Design 34
5.1 Conceptual Design 34
5.2 Software Application 35
5.2.1 Service Application 35
5.2.2 Control Application 35
5.3 Processing Modules 36
5.3.1 PC to PC Communication Module 36
5.3.2 Image Capturing Module 37
5.3.3 Camera Calibration Module 38
5.3.4 2-D Image Processing Module 40
5.3.5 3-D Pose Estimation Module 40

Chapter VI Experiments 43
6.1 Calibration and Reconstruction Error 43

Page

6.2 3-D Tracking for Direct Linear Motion with S-Curve Profile 46
6.2.1 Using 4-Cameras 48
6.2.2 Using 3-Cameras 53
6.3 3-D Tracking for Circular Motion on a Plane 58
6.3.1 Using 4 Cameras 58
6.3.2 Using 3 Cameras 61
6.4 3-D Tracking for Helical Motion 65
6.4.1 Using 4 Cameras 65
6.4.2 Using 3 Cameras 68
6.5 3-D Tracking for 3-D Surface Scanning 72

Chapter VII Conclusions and Suggestions 75
7.1 Conclusions 75
7.2 Suggestions 76
7.2.1 Tracking Accuracy 76
7.2.2 Close-Range Calibration Effect 76
7.2.3 Tracking Speed 76
7.2.4 Complex Shape Object Tracking 77

References 78
Appendices 80
Appendix A: Notation and Definition 81
A.1 Notation 81
A.2 Definition 81
Appendix B: Levenberg-Marquardt Algorithm 83
B.1 Introduction 83
B.2 The Levenberg-Marquardt Algorithm 83
B.3 Pseudocode 86
Biography 87

LIST OF FIGURES

Page

Figure 3.1	Pinhole camera geometry.	8
Figure 3.2	Similar triangles of pinhole camera geometry.	9
Figure 3.3	Image and camera coordinate system.	10
Figure 3.4	The transformation between the world and camera coordinate frame	11
Figure 3.5	(a) is an image of squares pattern that have been obtained under a perfect linear lens. (b) and (c) are images that have been obtained under a real lens.	13
Figure 3.6	Ideal reconstruction.	21
Figure 3.7	Real world reconstruction.	21
Figure 4.1	PixeLINK Camera model PL-A741-BL	26
Figure 4.2	Schematic of camera system for synchronous image capturing.	27
Figure 4.3	PixeLINK 16-mm Lens Model PL-16MM-CM.	28
Figure 4.4	dataBLIZZARD PCI to PCI Data Mover Card model DB0-PCI-PCI.	28
Figure 4.5	Programmed Interrupt to Transmitter	29
Figure 4.6	Programmed Interrupt to Receiver	30
Figure 4.7	Mitsubishi PA10-7C Robotic Arm.	30
Figure 4.8	8×8 rectangles chessboard pattern with 20 mm in width and height.	31
Figure 4.9	6×6 rectangles chessboard pattern with 40 mm in width and height.	31
Figure 4.10	The developed multiple cameras system.	33
Figure 5.1	The arrangement of the processing modules.	34
Figure 5.2	PC to PC communication module schematic.	36
Figure 5.3	COM objects in camera calibration module.	38
Figure 5.4	Camera calibration process.	39
Figure 5.5	COM objects in 2-D image processing module.	40
Figure 5.6	COM objects in 3-D pose estimation module.	41
Figure 5.7	3-D pose estimation process.	42
Figure 6.1	System set up for 3-D tracking experiments.	48
Figure 6.2	Linear motion in x direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 20 mm/s2, velocity 40 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras)	48

Page

Figure 6.3 Linear motion in x direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 25 mm/s2, velocity 50 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 49

Figure 6.4 Linear motion in x direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 30 mm/s2, velocity 60 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 49

Figure 6.5 Linear motion in y direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 20 mm/s2, velocity 40 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 50

Figure 6.6 Linear motion in y direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 25 mm/s2, velocity 50 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 50

Figure 6.7 Linear motion in y direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 30 mm/s2, velocity 60 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 51

Figure 6.8 Linear motion in z direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 20 mm/s2, velocity 40 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 51

Figure 6.9 Linear motion in z direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 25 mm/s2, velocity 50 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 52

Figure 6.10 Linear motion in z direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 30 mm/s2, velocity 60 mm/s and displacement 300 mm. (4-Cameras) 52

Figure 6.11 Linear motion in x direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 20 mm/s2, velocity 40 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 53

Figure 6.12 Linear motion in x direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 25 mm/s2, velocity 50 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 53

Page

Figure 6.13 Linear motion in x direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 30 mm/s2, velocity 60 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 54
Figure 6.14 Linear motion in y direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 20 mm/s2, velocity 40 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 54
Figure 6.15 Linear motion in y direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 25 mm/s2, velocity 50 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 55
Figure 6.16 Linear motion in y direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 30 mm/s2, velocity 60 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 55
Figure 6.17 Linear motion in z direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 20 mm/s2, velocity 40 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 56
Figure 6.18 Linear motion in z direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 25 mm/s2, velocity 50 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 56
Figure 6.19 Linear motion in z direction of PA10 arm with acceleration and deceleration 30 mm/s2, velocity 60 mm/s and displacement 300 mm. (3-Cameras) 57
Figure 6.20 Circular motion on xy-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.05 rps. (4-Cameras) 58
Figure 6.21 Circular motion on xy-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.2 rps. (4-Cameras) 59
Figure 6.22 Circular motion on yz-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.05 rps. (4-Cameras) 59
Figure 6.23 Circular motion on yz-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.2 rps. (4-Cameras) 60
Figure 6.24 Circular motion on zx-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.05 rps. (4-Cameras) 60

Page

Figure 6.25 Circular motion on zx-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.2 rps. (4-Cameras) 61
Figure 6.26 Circular motion on xy-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.05 rps. (3-Cameras) 61
Figure 6.27 Circular motion on xy-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.2 rps. (3-Cameras) 62
Figure 6.28 Circular motion on yz-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.05 rps. (3-Cameras) 62
Figure 6.29 Circular motion on yz-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.2 rps. (3-Cameras) 63
Figure 6.30 Circular motion on zx-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.05 rps. (3-Cameras) 63
Figure 6.31 Circular motion on zx-plane of PA10-7C arm with angular velocity 0.2 rps. (3-Cameras) 64
Figure 6.32 Helical motion in x direction with velocity 2.5 mm/s and angular velocity 0.05 rps. (4-Cameras) 65
Figure 6.33 Helical motion in x direction with velocity 10 mm/s and angular velocity 0.2 rps. (4-Cameras) 66
Figure 6.34 Helical motion in y direction with velocity 2.5 mm/s and angular velocity 0.05 rps. (4-Cameras) 66
Figure 6.35 Helical motion in y direction with velocity 10 mm/s and angular velocity 0.2 rps. (4-Cameras) 67
Figure 6.36 Helical motion in z direction with velocity 2.5 mm/s and angular velocity 0.05 rps. (4-Cameras) 67
Figure 6.37 Helical motion in z direction with velocity 10 mm/s and angular velocity 0.2 rps. (4-Cameras) 68
Figure 6.38 Helical motion in x direction with velocity 2.5 mm/s and angular velocity 0.05 rps. (3-Cameras) 68
Figure 6.39 Helical motion in x direction with velocity 10 mm/s and angular velocity 0.2 rps. (3-Cameras) 69
Figure 6.40 Helical motion in y direction with velocity 2.5 mm/s and angular velocity 0.05 rps. (3-Cameras) 69

Page

Figure 6.41 Helical motion in y direction with velocity 10 mm/s and angular velocity 0.2 rps. (3-Cameras) 70
Figure 6.42 Helical motion in z direction with velocity 2.5 mm/s and angular velocity 0.05 rps. (3-Cameras) 70
Figure 6.43 Helical motion in z direction with velocity 10 mm/s and angular velocity 0.2 rps. (3-Cameras) 71
Figure 6.44 Camera models used in 3-D surface scanning experiment. 73
Figure 6.45 Original surface that used in 3-D surface scanning 73
Figure 6.46 Detected cloud points 74
Figure 6.47 Triangular mesh of detected cloud points. 74

LIST OF TABLES

		Page
Table 4.1	9-pin serial port pin-out description of EMV interface.	26
Table 6.1	Camera number with corresponding serial number.	43
Table 6.2	Camera No.1 calibration result from Tsai and Zhang.	43
Table 6.3	Camera No.2 calibration result from Tsai and Zhang.	44
Table 6.4	Camera No.3 calibration result from Tsai and Zhang.	44
Table 6.5	Camera No.4 calibration result from Tsai and Zhang.	45
Table 6.6	Geometric distance.	45
Table 6.7	3-D reconstruction error from linear triangulation method.	46
Table 6.8	Camera parameters of camera models used in motion tracking experiments.	47
Table 6.9	Camera parameters of camera models used in 3-D surface scanning.	72