การออกแบบและการสร้างโนดัลสไลดเบนช

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายประสาทพร จงรุจา

001581

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2525

I 16A11390

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF A NODAL SLIDE BENCH

Mr.Prasartporn Jongruja

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
Department of Physics
Graduate School
Chulalongkorn University
1980

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและการสร้างโนคัลสไลคเบนช
โดย	นายประสาทพร จงรุจา
ภาควิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ คร. รัชนี รักวีรธรรม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

........................คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ คร. สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

........................ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ คร. ระวี ภาวิไล)

........................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คร. ภิญโญ เจริญกูล)

........................กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คร. พัฒนะ ภวะนันท์)

........................กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ คร. รัชนี รักวีรธรรม)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและการสร้างโนคัลสไลดเบนช
ชื่อนิสิต นายประสาทพร จงรุจา
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.รัชนี รักวีรธรรม
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2522

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โนคัลสไลดเบนชเป็นทัศนอุปกรณ์สำหรับใช้วัดทางยาวโฟกัสของเลนส์หนา ประกอบด้วย คอลลิเมเตอร์ แท่นวางเลนส์ทดสอบ และกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน การออกแบบและการสร้างทัศนอุปกรณ์ แบ่งงานออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่เกี่ยวข้องกับทัศนศาสตร์ และส่วนที่เกี่ยวข้องกับกลไก

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับทัศนศาสตร์ ได้ออกแบบและสร้างเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ เลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ให้เป็นเลนส์คู่ประกบเพื่อแก้ความคลาดรงค์และโดยการแกะรอยรังสี ได้ออกแบบรูปร่างของเลนส์ทั้งสามเพื่อให้โคมาเป็นศูนย์ และลดความคลาดทรงกลมให้เหลือน้อยที่สุด ในการสร้างเลนส์ ต้องตัดแผ่นแก้วกลมขนาดต่าง ๆ กันจากแผ่นแก้วทัศนศาสตร์โดยให้มีความหนาตามที่ต้องการ นำแผ่นแก้วกลมเหล่านั้นมาฝนขัดเรียบและขัดใส แล้วนำมาประกบกันได้เป็นเลนส์คู่ประกบสามอัน จากนั้นจึงนำเลนส์ทั้งสามนี้มาทดสอบ

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกลไก ได้ประกอบกล้องคอลลิเมเตอร์และกล้องจุลทัศน์ ออกแบบและสร้างเบนชซึ่งประกอบด้วยแท่นวางเลนส์ทดสอบ และแท่นของกล้องจุลทัศน์ แท่นวางเลนส์ทดสอบนี้จะหมุนได้ในแนวระนาบรอบแกนดิ่ง โดยที่แกนของเลนส์ทดสอบเอียงทำมุมกับแกนของกล้องจุลทัศน์ได้ถึง 30 องศา ส่วนแท่นของกล้องจุลทัศน์จะเคลื่อนได้ในแนวตามขวางและตามยาวของเบนช

เมื่อต้องการวัดทางยาวโฟกัสของเลนส์หนา ต้องจัดให้แกนหมุนของแท่นวางเลนส์ทดสอบผ่านจุดโนคัลทุติยภูมิของเลนส์ ภาพที่ได้เมื่อแสงขนานจากคอลลิเมเตอร์ผ่านเลนส์

ทดสอบ จะสังเกตได้จากกล้องจุลทัศน์ ถ้าภาพไม่เคลื่อนที่ไปทางด้านข้างเมื่อบิดจานวางเลนส์ทดสอบไปเล็กน้อย แสดงว่า แกนหมุนของแท่นวางเลนส์ทดสอบผ่านจุดโนดัลทุติยภูมิของเลนส์นี้ ดังนั้น ระยะจากแกนหมุนถึงตำแหน่งภาพเป็นทางยาวโฟกัสของเลนส์นี้

โนดัลสไลดเบนชที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ สามารถใช้วัดทางยาวโฟกัสของเลนส์ที่มีค่าอยู่ในช่วง 50 มิลลิเมตร ถึง 200 มิลลิเมตร

Thesis Title The Design and Construction of a Nodal Slide Bench

Name Mr.Prasartporn Jongruja

Thesis Advisor Associate Professor Rachanee Rakveeradham,Ph.D.

Department Physics

Academic Year 1979

ABSTRACT

A nodal slide bench is an optical instrument for visually measuring the focal lengths of thick lenses. The instrument consists of three basic components : a collimator, a thick-lens holder and an examining microscope. The design and construction of the instrument are divided into two parts : an optical part and a mechanical part.

In the optical part, the lens for the collimator, the objective and the eyepiece of the microscope were designed and constructed as cemented doublets for correcting chromatic aberration. By ray tracing, all of the three lenses were designed to eliminate coma completely and to reduce spherical aberration down to minimum. Each of these lenses was cut from an originally flat piece of optical glass of suitable thickness as a circular disc which was further subjected to grinding, smoothing and polishing. Finally, the three doublets were tested.

In the mechanical part, the collimator and the compound microscope were constructed. The designed and constructed bench consisted of a lens holder and an examining microscope. The lens

holder could be rotated about a vertical axis. The angle between axes of the lens and microscope can be varied up to 30°. the movement of the examining microscope is either lateral and longitudinal to the bench.

The focal length of a thick lens could be measured by adjusting the vertical axis of the lens holder to pass through its secondary nodal point. The parallel beam from the collimator passing through the thick lens would form the image which could be seen through the microscope. If a small rotation of the lens about its vertical axis produced no sideways displacement of the image, the distance from the vertical axis to the image was the focal length of the testing lens.

This nodal slide bench is suitable for the visual measurement of the focal lengths of the thick lenses whose focal lengths are 50 mm. up to 200 mm.

กิติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ ผู้เขียนได้รับคำแนะนำ สั่งสอน ทั้งในด้านความรู้และการทำวิจัย ตลอดจนวิธีแก้ปัญหาต่าง ๆ จากรองศาสตราจารย์ ดร.รัชนี รักวีรธรรม อาจารย์ที่ปรึกษา ด้วยความกรุณาอันประมาณมิได้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ระวี ภาวิไล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ เจริญกูล ที่ได้กรุณาให้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิติกรรมประกาศ	ซ
รายการตารางประกอบ	ฐ
รายการรูปประกอบ	ฒ
บทที่	
1. บทนำ	1
1. เลนส์หนา	1
1.1 จุดโฟกัส	2
1.1.1. จุดโฟกัสปฐมภูมิ	2
1.1.2 จุดโฟกัสทุติยภูมิ	2
1.2 จุดมุขยสำคัญ	3
1.2.1 จุดมุขยสำคัญปฐมภูมิ	3
1.2.2 จุดมุขยสำคัญทุติยภูมิ	3
1.3 จุดโนดัล	5
1.4 สัญญนิยมทางเครื่องหมายของการหักเหผ่านผิวทรงกลมเดี่ยว	8
1.5 กำลังขยายเชิงมุมและเชิงเส้นแนวตั้ง	10
2. โนดัลสไลดเบนช	13
2.1 คอลลิเมเตอร์	14
2.2 แท่นวางเลนส์ทดสอบ	14
2.3 กล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน	14
3. วัตถุประสงค์	15
4. วิธีดำเนินงาน	15
4.1 การออกแบบและการสร้างคอลลิเมเตอร์	15

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

4.2 การออกแบบและการสร้างกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน 15

4.3 การทดสอบเลนส์อรงค์ที่สร้างขึ้น 16

4.4 การออกแบบและการสร้างโนดัลสไลดเบนช 16

2. ทฤษฎีการออกแบบเลนส์ 17

1. ความคลาดรงค์ 17

2. เลนส์อรงค์ 18

3. ความคลาดเอกรงค์ 23

3.1 ความคลาดทรงกลม 24

3.2 โคมา 25

3.3 ความคลาดเอียงและความโค้งของสนาม 28

3.4 ความบิดเบี้ยว 32

4. การแกะรอยรังสี 35

5. การคำนวณหาผลต่างของทางเดินเชิงทัศนศาสตร์ 39

6. ฟังก์ชันของความคลาดปฐมภูมิ 43

7. การคำนวณหาค่าความคลาดเชิงหน้าคลื่น 51

3. การคำนวณออกแบบและการสร้างเลนส์ 55

1. การคำนวณออกแบบเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ 55

1.1 การคำนวณออกแบบรูปร่างเลนส์ 55

1.2 การคำนวณและเลือกรูปร่างของเลนส์เพื่อลดความคลาด
เอกรงค์ 61

2. การออกแบบกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน 76

2.1 การคำนวณออกแบบรูปร่างของเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตา 81

2.2 การคำนวณและเลือกรูปร่างของเลนส์หน้าเพื่อลดความคลาด
เอกรงค์ 86

หน้า

2.3 การคำนวณและเลือกรูปร่างของเลนส์ใกล้ตาเพื่อลดความคลาดเอกรงค์ 91
3. การสร้างเลนส์อรงค์ 97
4. การทดสอบเลนส์ที่สร้างขึ้น 100
1. การหารัศมีความโค้งของแต่ละผิวของเลนส์โดยวิธีวงแหวนนิวตัน 100
1.1 การหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ประกอบของเลนส์อรงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์ 102
1.2 การหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ประกอบของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน 108
1.3 การหารัศมีความโค้งของผิวเลนส์ประกอบของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน 113
2. การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์โดยการแกะรอยรังสี 118
2.1 การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ 120
2.2 การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องจุลทัศน์ .. 127
2.3 การหาตำแหน่งของจุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์ใกล้ตา 132
3. การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์โดยวิธีทดสอบกำลังขยาย 138
3.1 การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ 139
3.2 การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์หน้ากล้องจุลทัศน์ 140
3.3 การหาทางยาวโฟกัสของเลนส์ใกล้ตา 141
4. วิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์ 141
5. วิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์ 146
6. การทดสอบด้วยดาว 149
7. การทดสอบหากำลังแยก 151

หน้า

5. การออกแบบและการสร้างแท่นยึด 153

1. หลักของโนดัลสไลดเบนช 153

2. ลำกล้องของคอลลิเมเตอร์และกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน 154

3. การออกแบบและการสร้างแท่นวางเลนส์ทดสอบและแท่นของกล้องจุลทัศน์ 156

4. วิธีการใช้โนดัลสไลดเบนช 159

6. สรุปและข้อเสนอแนะ 160

เอกสารอ้างอิง 166

ภาคผนวก 168

ประวัติ 190

รายการตารางประกอบ

หน้า

ตารางที่

3.1 ชุดความโค้งของผิวของเลนส์อรงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์ มีหน่วยเป็นต่อมิลลิเมตร 60

3.2 สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์อรงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์ 73

3.3 ชุดค่าความโค้งของผิวของเลนส์หน้าและเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ มีหน่วยเป็นต่อมิลลิเมตร 85

3.4 สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมและสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์หน้า 87

3.5 สัมประสิทธิ์ของความคลาดทรงกลมกับสัมประสิทธิ์ของโคมาของเลนส์ใกล้ตา 94

4.1 ผลจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนและรังสีขอบเลนส์ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ 122

4.2 ผลจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนกับรังสีขอบเลนส์ของเลนส์หน้า ... 128

4.3 ผลจากการแกะรอยรังสีใกล้แกนกับรังสีขอบเลนส์ของเลนส์ใกล้ตา 133

4.4 หาทางยาวโฟกัสของเลนส์ด้วยวิธีทดสอบกำลังขยายของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ 140

4.5 ผลการทดลองด้วยวิธีทดสอบกำลังขยายของเลนส์หน้ากล้องจุลทัศน์ 140

4.6 ผลการทดลองด้วยวิธีทดสอบกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา 141

4.7 ผลของการทดลองหาทางยาวโฟกัสของโซนต่าง ๆ ของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ด้วยวิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์ แต่ละค่ามีหน่วยเป็นมิลลิเมตร 143

4.8 ทางยาวโฟกัสแต่ละโซน โดยวิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์ 145

หน้า

ตารางที่

4.9 ทางยาวโฟกัสของแต่ละโซน โดยวิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์ 148

6.1 ผลจากการคำนวณออกแบบเลนส์ที่ให้ความคลาดรงค์เป็นศูนย์และโคมาเป็นศูนย์ 160

6.2 เปรียบเทียบรัศมีความโค้งของผิวที่ได้ออกแบบและจากการสร้าง .. 161

6.3 ทางยาวโฟกัสของเลนส์จากวิธีต่าง ๆ 162

6.4 ความคลาดเชิงหน้าคลื่นจากการคำนวณ 163

รายการรูปประกอบ

หน้า

รูปที่

1.1 จุดโฟกัสปฐมภูมิของเลนส์นูนและเลนส์เว้า (F) 2

1.2 จุดโฟกัสทุติยภูมิของเลนส์นูนและเลนส์เว้า (F') 2

1.3 ระนาบมุขยสำคัญปฐมภูมิและระนาบมุขยสำคัญทุติยภูมิ (HP และ H'P') 3

1.4 ตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญขึ้นกับรูปร่างของเลนส์หนา 4

1.5 แนวของรังสีตกกระทบและรังสีหักเหจะขนานกันเมื่อแสงตกมีแนวผ่านจุดโนดัลปฐมภูมิ 5

1.6 ก. การหักเหของรังสีเมื่อผ่านผิวนูนพร้อมทั้งเครื่องหมายของค่าต่าง ๆ 9

1.6 ข. การหักเหของรังสีเมื่อผ่านผิวเว้าและเครื่องหมายของค่าต่าง ๆ ในรูป 9

1.7 กำลังขยายเชิงมุมและกำลังขยายเชิงเส้นแนวตั้ง 10

1.8 การหมุนของเลนส์รอบจุดโนดัลทุติยภูมิทำให้รังสีหักเหเปลี่ยนไปแต่ภาพยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม 13

1.9 ส่วนประกอบหลักของโนดัลสไลดเบนช 14

2.1 ความคลาดรงค์ตามยาวของเลนส์นูนเดี่ยว 17

2.2 ความคลาดรงค์ตามขวางของเลนส์นูนเดี่ยว 18

2.3 เลนส์อรงค์ 19

2.4 สเปกตรัมทุติยภูมิ 23

2.5 ความคลาดทรงกลมของเลนส์ 24

2.6 การเกิดโคมา 26

2.7 ก. โซนของหน้าเลนส์ 27

2.7 ข. ภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากโซนต่าง ๆ ของหน้าเลนส์ 27

รูปที่		หน้า
2.8	การเกิดความคลาดเอียง	28
2.9	ผิวของภาพปฐมภูมิและผิวของภาพทุติยภูมิ	29
2.10	ความโค้งของสนาม	30
2.11	ความคลาดเอียงและความโค้งของสนาม	31
2.12	ระบบทัศนศาสตร์รูเข็ม	32
2.13	ก. ภาพของความบิดเบี้ยวรูปหมอนปักเข็ม	33
2.13	ข. ภาพของความบิดเบี้ยวรูปถัง	33
2.13	ค. ภาพไม่มีความบิดเบี้ยว	33
2.14	ผลของตำแหน่งตัวจำกัดลำแสงที่มีต่อเลนส์เดี่ยว ทำให้เกิดความบิดเบี้ยวแบบต่าง ๆ	34
2.15	การหักเหที่ผิวทรงกลมเดี่ยว	35
2.16	การหักเหของรังสีผ่านผิวทรงกลมสองผิว	38
2.17	การหักเหของรังสีผ่านผิวทรงกลมเดี่ยว	40
2.18	ความคลาดเชิงหน้าคลื่นและความคลาดเชิงรังสี	43
2.19	การเปลี่ยนระนาบอ้างอิง	44
2.20	ก. การหักเหของรังสีผ่านผิวทรงกลมเมื่อระบบมีตัวจำกัดลำแสง	47
2.20	ข. ระนาบของตำแหน่งลำแสงขาออกเล็กสุดมองจากทางด้านภาพ	47
3.1	ความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่ความโค้งต่าง ๆ ของผิวเลนส์	74
3.2	รูปร่างที่คำนวณได้ของเลนส์อรงค์สำหรับคอลลิเมเตอร์	76
3.3	หลักการของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อน	76
3.4	สนามของการเห็นของกล้องจุลทัศน์	80

รูปที่		หน้า
3.5	สนามของการเห็นของกล้องจุลทัศน์เชิงซ้อนที่สร้างขึ้น	80
3.6	กราฟของความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์หน้า	88
3.7	เลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ที่ออกแบบ	90
3.8	กราฟของความคลาดทรงกลมและโคมาของเลนส์ใกล้ตา	95
3.9	เลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์ที่ออกแบบ	96
4.1	การจัดตั้งเครื่องมือของการทดลองวงแหวนนิวตัน	100
4.2	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	103
4.3	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	105
4.4	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	105
4.5	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 4 ของเลนส์คอลลิเมเตอร์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	106
4.6	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	111
4.7	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	112
4.8	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	112
4.9	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 4 ของเลนส์หน้าของกล้องจุลทัศน์ โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	113
4.10	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 1 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	115

รูปที่		หน้า
4.11	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 2 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	115
4.12	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 3 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	116
4.13	กราฟของการหารัศมีความโค้งของผิวที่ 4 ของเลนส์ใกล้ตา โดยวิธีวงแหวนนิวตัน	116
4.14	การหักเหที่ผิวทรงกลมเดี่ยว เมื่อรังสีตกกระทบเป็นรังสีขนานกับแกน	119
4.15	ก. รูปร่างจริงของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์	121
4.15	ข. รูปร่างของเลนส์ที่ใช้ในการแกะรอยรังสี	121
4.16	ตำแหน่งของระนาบมุขยสำคัญ	126
4.17	ก. รูปร่างจริงของเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทัศน์	133
4.17	ข. รูปร่างของเลนส์ใกล้ตาที่ใช้ในการแกะรอยรังสี	133
4.18	การเกิดภาพของทัศนศาสตร์แบบเกาส์เซียน	138
4.19	กระดาษดำเจาะรูให้แสงผ่าน	142
4.20	การทดสอบของฮาร์ตแมนน์	142
4.21	ความคลาดทรงกลมของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ที่ความสูงต่าง ๆ จากวิธีทดสอบของฮาร์ตแมนน์	145
4.22	แผนภาพของรังสีเมื่อผ่านเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์	147
4.23	ภาพของเงามืด เมื่อคมมีดอยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ในรูปที่ 4.22	147
4.24	ความคลาดทรงกลมของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ที่ความสูงต่าง ๆ จากวิธีทดสอบด้วยคมมีดของโฟคอลท์	148
4.25	ภาพถ่ายจากการทดสอบด้วยดาวของเลนส์สำหรับคอลลิเมเตอร์ ...	150
4.26	ภาพถ่ายของจุด 2 จุด ที่แยกกันพอดี	152

รูปที่ หน้า

5.1 หลักของโนคัลสไลดเบนช 154
5.2 ภาคตัดขวางของแท่นวางเลนส์ทดสอบ 157
5.3 โนคัลสไลดเบนช 158