การคำนวณค่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่ง โดยใช้สเปคคูลาร์ไฮไลท์และเงาบนพื้นระนาบ

MULTIPLE LIGHT SOURCE ESTIMATION USING SPECULAR HIGHLIGHTS AND CAST SHADOWS ON A PLANAR SURFACE

อนุสรณ์ บรรเทิง

ANUSORN BUNTEONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-IT-D-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MULTIPLE LIGHT SOURCE ESTIMATION USING SPECULAR HIGHLIGHTS AND CAST SHADOWS ON A PLANAR SURFACE

ANUSORN BUNTEONG

A THESIS SUBMITTED IN PATIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF PHILOSOPHY IN INFORMATION TECHNOLOGY

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

KMITL-2014-IT-D-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2014

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การคำนวณค่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งโดยใช้สเปคคูลาร์ไฮไลท์และเงาบนพื้นระนาบ

Multiple Light Source Position Estimation Using Specular Highlights and Cast Shadows on a Planar Surface

นักศึกษา นายอนุสรณ์ บรรเทิง

รหัสประจำตัว 49066352

ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีสารสนเทศ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพพร โชติกกำธร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์ วรรัตน์ปัญญา ดร.ศุภกร สิทธิไชย รองศาสตราจารย์ ดร.นพพร โชติกกำธร ดร.สุภวรรณ อันนันหนับ ดร.ณฐพล พันธุวงศ์	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพุธที่ 17 ธันวาคม 2557 เวลา 13.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 334 ชั้น 3 คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์บูรณ์ สถิตวิริยวงศ์)

คณบดีคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

วันที่ 30 **เดือน** ธันวาคม **พ.ศ.** 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งโดยใช้สเปคคูลาร์ไฮไลท์และเงาบนพื้นระนาบ
นักศึกษา	นายอนุสรณ์ บรรเทิง
รหัสนักศึกษา	49066352
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศ
แขนงวิชา	เทคโนโลยีสารสนเทศ
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.นพพร โชติกกำธร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอวิธีสำหรับการคำนวณค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่ง วิธีการนี้ใช้ประโยชน์จากจุดมุมซึ่งอยู่บนขอบเงาที่เกิดจากผิววัตถุบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องในการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงประกอบกับทิศทางที่ได้จากสเปคคูลาร์ไฮไลต์ แม้ว่าจะมีวิธีการหลายแบบที่สามารถใช้คำนวณค่าแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่ายภาพได้ ทั้งการใช้เงาของวัตถุหรือการใช้สเปคคูลาร์ไฮไลท์ แต่วิธีการเหล่านั้นมักจะใช้ได้กับแหล่งกำเนิดแสงแบบทิศทางเท่านั้น วิธีการที่นำเสนอนี้สามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งแบบจุดซึ่งอยู่ในระยะใกล้ได้ โดยจุดสเปคคูลาร์พีคบนผิววัตถุมันเงาที่ทราบรูปทรงจะถูกใช้ในขั้นแรกเพื่อหาเส้นตรงที่ลากผ่านจุดดังกล่าวและมีทิศทางชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง จากนั้น โดยอาศัยจุดมุมซึ่งอยู่บนพื้นผิววัตถุบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องประกอบกับเงาของจุดดังกล่าว ทำให้สามารถหาเส้นตรงเส้นที่สองที่ชี้ไปยังทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงและลากผ่านจุดที่เป็นเงาของจุดมุม สำหรับกรณีของแหล่งกำเนิดแสงระยะใกล้เส้นตรงสองเส้นดังกล่าวโดยทั่วไปจะไม่ขนานกัน ทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงได้จากจุดตัดของเส้นทั้งสอง อย่างไรก็ตามเนื่องจากปัจจัยหลายๆ ด้านอาจจะทำให้ข้อมูลตำแหน่งของจุดต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาเส้นตรงทั้งสองเส้นดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อน อันเป็นเหตุทำให้การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงมีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลการสะท้อนแสงแบบดิฟฟิวส์ของพื้นด้านหลังวัตถุมาเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง เพื่อลดผลอันเกิดจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ทำให้สามารถเพิ่มความแม่นยำในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถคำนวณค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงอย่างแม่นยำมากกว่าวิธีการดั้งเดิมที่ใช้จุดสเปคคูลาร์พีคบนผิวทรงกลมสองลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Multiple Light Source Position Estimation Using Specular Highlights and Cast Shadows on a Planar Surface
Student	Mr. Anusorn Bunteong
Student ID.	49066352
Degree	Doctor of Philosophy Program in Information Technology
Program	Information Technology
Major	Information Technology
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Nopporn Chotikakamthorn

ABSTRACT

This thesis presents a method for estimation of multiple light source positions. Along with estimated source directions using specular highlights, the method utilizes corner points in cast shadows that are caused by discontinuity area of an object surface to estimate light source positions. There are several methods that can be used to estimate light sources from scene images, using either cast shadows or specular highlights. However, most of them are limited to directional light sources. The proposed method can estimate the positions of multiple near point light sources. A specular peak point on a shiny object surface of known geometry is first used to obtain a line that passes through this point. The line direction points to a light source position. Then, a corner point on discontinuity area of the object surface and the corresponding cast shadow point form another line that points to the light source position. In general, for the case of a near point light source, these two lines are not parallel so the position of a light source can estimate from the intersection point of these two lines. However, the positions of related points can be inaccurate due to various factors. This is the main cause of the light source position estimation error. Information on diffused light reflected from Lambertian ground-plane surface is subsequently used to improve estimation accuracy. Experiment results show that the proposed method can estimate light source positions more accurately than the original method that uses specular peak points on the surface of two spheres.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยความรู้และคำแนะนำต่างๆ อย่างละเอียดรอบคอบและอดทนจาก รศ.ดร.นพพร โชติกกำธร ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

กราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีสารสนเทศที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้ข้อคิดแนวทาง ความช่วยเหลือ และความรู้ในด้านต่างๆ ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาจนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะเทคโนโลยีสารสนเทศทุกท่านสำหรับการอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ทำให้การติดต่อประสานงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่น้องชาว IME Lab ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นมิตรที่ดีเสมอมาตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยศึกษาอยู่

ขอพระขอบคุณบิดามารดาและพี่สาวอันเป็นที่เคารพรักอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจและแรงผลักดันอันมีค่าต่อการเผชิญหน้ากับปัญหาในด้านต่างๆ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้ผู้มีพระคุณทุกท่านดังที่ได้กล่าวข้างต้น

อนุสรณ์ บรรเทิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย 2

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา 2

1.5 ขอบเขตของการศึกษา 2

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา 3

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.2 การคำนวณค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะไกล 8

2.2.1 การใช้เชดดิ้งในการคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง 8

2.2.2 การใช้เชดดิ้งในการคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้ประโยชน์จากภาพถ่ายหลายมุมมอง 10

2.2.3 การคำนวณทิศทางของพระอาทิตย์สำหรับภาพภายนอกอาคาร 12

2.3 การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้ 13

บทที่ 3 การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้สเปคคูลาร์ไฮไลท์และเงาของจุดที่ไม่ต่อเนื่องบนผิววัตถุ 14

3.1 ภาพรวมของวิธีการที่นำเสนอ 14

3.2 การหาตำแหน่งจุดสเปคคูลาร์พีคโดยใช้จุดศูนย์กลางมวล 15

3.3 การใช้จุดสเปคคูลาร์พีคในการคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง 16

3.4 การแปลงตำแหน่งพิกเซลไปเป็นตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริง 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การหาตำแหน่งจุดสเปคคูลาร์พีคในพิกัด 3 มิติของโลกจริง.....19
3.6 การใช้จุดไม่ต่อเนื่องในการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง.....21
3.7 การใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง.....26
3.8 ข้อกำหนดและขั้นตอนโดยสรุปของวิธีการที่นำเสนอ.....30
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....32
4.1 การทดลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพสังเคราะห์.....32
4.2 การทดลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่ายจริง.....48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....58
เอกสารอ้างอิง.....60
ภาคผนวก.....63
ภาคผนวก ก บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....64
ประวัติผู้เขียน.....72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 ตำแหน่ง ทิศทาง และระยะทางของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง 33

4.2 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์.....36

4.3 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์.....37

4.4 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์.....38

4.5 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์.....38

4.6 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อปรับปรุงตำแหน่งของจุดมุมบนเงาและจุดสเป็คคูลาร์พีค.....39

4.7 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อปรับปรุงตำแหน่งของจุดมุมบนเงาและจุดสเป็คคูลาร์พีค.....40

4.8 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 43

4.9 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 44

4.10 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 45

4.11 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 45

4.12 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 2 ครั้ง.....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.13 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 2 ครั้ง....47

4.14 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองภาพถ่ายจริง....51

4.15 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งจุด โดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์....52

4.16 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งจุด มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์....54

4.17 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งจุด มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง....54

4.18 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองภาพถ่ายจริงโดยมีแหล่งกำเนิดแสงสองจุด 55

4.19 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงสองจุดโดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์....56

4.20 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงสองจุด โดยมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์....56

4.21 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงสองจุด โดยมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง....57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ระนาบที่ตัดไปบนทรงกลม 8

2.2 วิธีในการให้น้ำหนักจุดวิกฤต 11

2.3 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้จากจุดสเปคคูลาร์พีคบนทรงกลมสองลูก 13

3.1 ภาพรวมของวิธีการที่นำเสนอ 15

3.2 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ทั้งสามที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนแสงสเปคคูลาร์ 16

3.3 แกนและจุดอ้างอิง 17

3.4 การหาตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริงโดยใช้กฎสามเหลี่ยมคล้าย 19

3.5 การหาตำแหน่งจุดสเปคคูลาร์พีค *P* บนพื้นผิววัตถุ 20

3.6 จุดมุมที่อยู่ภายในเงาและจุดมุมบนพื้นผิววัตถุที่สัมพันธ์กันสามารถใช้ในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง 22

3.7 เซอร์เฟสนอร์มอลของรูปทรงต่างๆ 23

3.8 เส้นตรงที่ใช้เป็นแนวในการค้นหาจุดมุมบนเงาได้จากระนาบซึ่งประกอบไปด้วยจุดมุมบนพื้นผิวและจุดที่อยู่ในแนวเส้นตรงของทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงตัดกับพื้นผิวราบที่เกิดเงา ..24

3.9 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ประมาณค่าจากจุดมุมในเงาที่ค้นพบ 25

3.10 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงถูกบังที่บางจุดบนพื้นราบ 26

3.11 ระยะห่างที่น้อยส่งผลต่อมุมที่เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าระยะทางที่มาก 29

4.1 รูปภาพที่ใช้ในการทดลองสำหรับแหล่งกำเนิดแสงจุดเดียวที่ก่อให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์ ...34

4.2 รูปภาพที่ใช้ในการทดลองสำหรับแหล่งกำเนิดแสงจุดเดียวที่ก่อให้เกิดเงาแบบซอฟต์แชโดว์ ..35

4.3 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 41

4.4 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 รูปภาพที่ใช้ในการทดลองสำหรับแหล่งกำเนิดแสงหลายจุดที่ก่อให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์ ..43

4.6 กล้อง Kinect ที่มีการติดตั้งกล้อง DSLR ไว้ด้านบน 48

4.7 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองกับภาพถ่ายจริง 50

4.8 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยใช้วิธีการที่ใช้จุดสเปกคูลาร์พีคบนวัตถุทรงกลม 2 ลูก.....53

4.9 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยใช้วิธีการที่ใช้ทรงกลมสองลูกร่วมกับจุดมุมโดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์.....53

4.10 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยใช้วิธีการที่ใช้ทรงกลมสองลูกร่วมกับจุดมุมและมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง.....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การคำนวณค่าตำแหน่งหรือทิศทาง และความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่ายนั้นเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจในวงการคอมพิวเตอร์กราฟฟิกส์และคอมพิวเตอร์วิชั่นมาเป็นระยะเวลานาน เพราะหากสามารถทราบได้ว่าภาพถ่ายหรือภาพวีดีโอที่ได้รับมานั้นมีสภาพแวดล้อมของแหล่งกำเนิดแสงเป็นอย่างไร ก็สามารถใช้ข้อมูลนี้ในการสร้าง แก้ไข หรือตกแต่งภาพที่ต้องการได้หลากหลายและมีความสมจริงมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการจะนำวัตถุสังเคราะห์เพิ่มลงไปในภาพที่ถ่ายจากสภาพแวดล้อมจริง เช่น สำหรับแอพพลิเคชันความจริงเสริม (augmented reality) หรือการสร้างภาพด้วยเทคนิคพิเศษสำหรับงานภาพยนตร์ (visual effect) ถ้าไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสง ก็จะไม่สามารถให้แสงเงากับวัตถุสังเคราะห์นี้ได้อย่างถูกต้อง [1] หรือในกรณีที่ต้องการจะเปลี่ยนทิศทางหรือความเข้มแสงในรูปภาพใหม่ ก็จะ ไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากไม่มีข้อมูลของตำแหน่งหรือทิศทาง ตลอดจนความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงที่มีอยู่ในฉากนั้นๆ ทั้งหมด

วิธีในการคำนวณค่าของแหล่งกำเนิดแสงนี้สามารถใช้ข้อมูลที่มีในภาพ เช่น ลำดับชั้นของสีที่เปลี่ยนไปบนพื้นผิววัตถุ (shading) เงาของวัตถุ (shadow) หรืออาจจะเป็นบริเวณที่มีความสว่างมากที่สุดบนพื้นผิวซึ่งเรียกว่าสเปคคูลาร์ไฮไลท์ (specular highlight) ร่วมกับข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงของวัตถุและตำแหน่งของกล้อง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ก็จะถูกใช้ในการประมาณทิศทาง ตำแหน่ง และความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงที่มีในภาพ หรืออาจจะใช้ในการหาการกระจายตัวของแสงก็ได้

แม้จะมีวิธีการหลายวิธีที่สามารถประมาณค่าของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่ายได้ แต่วิธีการดั้งเดิมที่มีอยู่นั้นยังมีประเด็นปัญหาอยู่ ปัญหาแรกก็คือ วิธีการโดยส่วนใหญ่นั้นจะจำกัดกับการใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดซึ่งอยู่ในระยะทางที่ไกลมากหรือเรียกอีกอย่างว่าแหล่งกำเนิดแสงแบบทิศทาง เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงแบบอื่นจะมีความซับซ้อนในการประมาณค่า และสำหรับวิธีการที่สามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้นั้นก็มักจะมีข้อจำกัดในบางด้าน เช่น ใช้ได้กับแหล่งกำเนิดแสงเพียงจุดเดียว ใช้ได้กับวัตถุในฉากเพียงบางประเภท ต้องมีวัตถุพิเศษอยู่ในฉากเพื่อใช้ในการหาแสงที่สะท้อนจากทุกๆ จุด โดยมากมักจะเป็นลูกบอลกระจก (mirror/chrome ball) โดยถ้าต้องการจะหาตำแหน่งที่แน่นอนของแหล่งกำเนิดแสงก็จำเป็นจะต้องใช้ทรงกลมสะท้อนแสงสองลูก บางวิธีการอาจจะใช้เลนส์กล้องแบบตาปลา (fish-eye

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

lens) [2] แทนการใช้ลูกบอลกระจก ซึ่งไม่ว่าวิธีการใดก็จำเป็นต้องมีอุปกรณ์และการติดตั้งเป็นพิเศษ ซึ่งอาจจะไม่สะดวกและมีราคาแพง วิธีการโดยส่วนใหญ่ จำเป็นจะต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งและรูปทรงของวัตถุที่อยู่ในภาพ ซึ่งทำได้ยากในทางปฏิบัติเนื่องจากอาจจะมีความคลาดเคลื่อนสูง การจะใช้วิธีการเหล่านั้นให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีอาจจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถวัดความลึกของวัตถุได้อย่างแม่นยำ เช่น กล้องสเตอริโอ (stereo camera) ซึ่งมีราคาแพง ทำให้ยากต่อการนำไปใช้ในสถานการณ์ทั่วไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการในการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้หลายแหล่งจากภาพถ่ายเพื่อลดข้อกำหนดต่างๆ อันได้แก่ การลดจำนวนวัตถุทรงกลมที่ต้องใช้จากสองลูกเหลือเพียงลูกเดียวในการหาตำแหน่ง สามารถใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้หลายๆ จุดได้

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับพื้นผิวของวัตถุที่สามารถสะท้อนแสงได้นั้น ตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์พีคสามารถนำมาใช้ในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดได้ ซึ่งในการหาตำแหน่งนั้นจำเป็นจะต้องมีทิศทางอีกอย่างน้อยหนึ่งทิศทางที่ชี้ไปยังแหล่งกำเนิดแสงเดียวกัน เมื่อนำทิศทางทั้งสองมาหาจุดที่ใกล้กันที่สุดก็จะได้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งทิศทางอีกหนึ่งทิศทางที่จะใช้นั้นสามารถหาได้จากจุดมุมบนพื้นผิวของวัตถุและในขณะเดียวกันจุดมุมเดียวกันนี้ก็จะอยู่ในบริเวณขอบเงาของวัตถุด้วย แต่การหาตำแหน่งของจุดมุมนี้อาจจะคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ถูกต้องได้ จึงต้องมีการนำข้อมูลการสะท้อนแสงแบบดิฟฟิวส์บนพื้นผิวระนาบเพื่อช่วยในการค้นหาตำแหน่งจุดมุมในเงาที่ถูกต้อง

1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

การใช้ข้อมูลจากจุดสเปคคูลาร์พีคและจุดมุมทั้งในเงาและพื้นผิววัตถุนั้นสามารถที่จะช่วยในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้ได้ และการใช้ข้อมูลการสะท้อนแสงแบบดิฟฟิวส์บนพื้นผิวระนาบมาช่วยในการหาจุดมุมในเงานั้นจะช่วยให้การหาจุดมุมในเงามีความแม่นยำมากขึ้น

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งจากภาพถ่ายโดยแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบจุดในระยะใกล้ ซึ่งวิธีการนี้จะลดข้อจำกัดในการใช้อุปกรณ์พิเศษและเพิ่มความแม่นยำในการหาจุดมุมบริเวณขอบเงาโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมที่มีการใช้ลูกบอลกระจกสองอัน วิธีการนี้จะมีลูกบอลกระจกเพียงอันเดียวร่วมกับการใช้จุดมุม และทดลองโดยใช้ทั้งภาพถ่ายสังเคราะห์และภาพถ่ายจริง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. กำหนดหัวข้อ เป้าหมาย จุดประสงค์ และขอบเขตของการทำวิทยานิพนธ์
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย
3. ศึกษาเทคนิคต่างๆ ที่มีอยู่ถึงแนวคิด หลักการ ข้อดี และข้อบกพร่องของแต่ละเทคนิค
4. ศึกษาวิธีการในการหาจุดสเปคคูลาร์พีค การหาจุดมุม การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากจุดตัดของทิศทางที่ชี้ไปหาแหล่งกำเนิดแสง การปรับปรุงความแม่นยำในการตำแหน่งของจุดมุม
5. ทำการทดลอง ปรับปรุง และสรุปผล
6. จัดทำเอกสารประกอบวิทยานิพนธ์

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในบทที่ 1 จะกล่าวถึงลักษณะทั่วไปของวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่ความเป็นมา จุดเริ่มต้นของปัญหาและความสำคัญ ซึ่งเป็นที่มาของการศึกษา โดยมีจุดมุ่งหมาย ขอบเขต และขั้นตอนในการศึกษาระบุไว้อย่างชัดเจน

บทที่ 2 จะเป็นการบรรยายถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าทิศทาง ตำแหน่งและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่าย

บทที่ 3 เป็นบทที่อธิบายถึงขั้นตอนของวิธีการที่พัฒนาเพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งแบบจุดจากภาพถ่าย

บทที่ 4 เป็นการให้รายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการทดลองและผลการทดลองที่ได้

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการศึกษาและผลการทดลองที่ได้ว่าวิธีการที่นำเสนอนั้นมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานในด้านใดบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยหลายงานที่ได้นำเสนอวิธีการในการคำนวณค่าตำแหน่งและความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่าย เช่น Zhang และ Yang [3] ได้พัฒนาวิธีการในการคำนวณค่าแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งโดยใช้ลำดับชั้นของสีที่เปลี่ยนที่เรียกว่าเชดดิ้ง บนพื้นผิวทรงกลม ซึ่งทรงกลมที่ใช้นั้นจะมีพื้นผิวแบบแลมเบอร์เทียน (Lambertian) โดยต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งและรูปทรงของวัตถุ ซึ่งวิธีการนี้อาศัยการหาตำแหน่งของพิกเซลในภาพที่เป็นจุดวิกฤต (critical point) เพื่อนำไปสู่การคำนวณทิศทางของแสง โดยจุดวิกฤตนี้ก็คือจุดบนรูปภาพซึ่งเซอร์เฟสนอร์มอล (surface normal) ที่จุดดังกล่าวทำมุมตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดแสงอย่างน้อยหนึ่งแหล่ง จากจุดวิกฤตที่ได้มานี้สามารถนำมาหาทิศทางและความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงได้ต่อไป ซึ่งใน [4] Wang และ Samaras ได้พัฒนาวิธีการนี้เพิ่มเติมให้สามารถใช้กับวัตถุรูปทรงใดๆ ได้ โดยจุดที่ถูกมองเห็นจากกล้องจะถูกให้ตำแหน่ง (mapping) ลงยังทรงกลมเสมือนโดยการจับคู่กับทิศทางของนอร์มอลเวคเตอร์ในแต่ละจุด ซึ่งในขั้นตอนนี้เส้นวิกฤต (critical boundaries) บางส่วนจะสูญหายไป ทำให้ไม่สามารถหาแหล่งกำเนิดแสงได้ครบถ้วน จึงได้มีการเสนอวิธีการในการใช้เงาของวัตถุที่ฉายลงไปบนพื้นราบในการแก้ปัญหานี้ การใช้ข้อมูลจากทั้งสองแหล่งนี้สามารถทำให้การประมาณค่ามีความแม่นยำเพิ่มขึ้นได้

ใน [5] Bouganis และ Brooks ได้พยายามเพิ่มความถูกต้องแม่นยำและลดข้อจำกัดในวิธีของ Zhang และ Yang โดยวิธีการในการหาจุดวิกฤตของพวกเขาจะแตกต่างจากวิธีการดั้งเดิม แต่จะคล้ายกับวิธีของ Wei [6] โดยวิธีการนี้ถูกเรียกว่า Virtual-to-Real (V2R) โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสงเสมือน 2 แหล่ง ที่อยู่ในบริเวณที่ติดกันนำมาลบกัน ซึ่งจะทำให้กำหนดทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงในเบื้องต้นได้ โดยวิธีการนี้จะช่วยแก้ปัญหาที่เป็นข้อจำกัดในการประมาณค่าของแหล่งกำเนิดแสงในกรณีที่แหล่งกำเนิดแสงอยู่ในทิศทางตรงข้ามกัน 2 คู่ได้ และยังช่วยให้การประมาณค่ามีความแม่นยำมากขึ้น Bunteong และ Chotikakamthorn [7] ได้ปรับปรุงวิธีการของ Zhang และ Yang [1] โดยการใช้ภาพถ่ายหลายมุมช่วยในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น เนื่องจากภาพถ่ายในแต่ละมุมนั้นจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องต่อทิศทางของแสงในมุมต่างๆ ไม่เท่ากัน วิธีการแปลงของฮัฟ (Hough Transform) ถูกใช้ในการสร้างเส้นวิกฤติจากจุดวิกฤตที่ค้นหาได้ในภาพ แต่แทนที่จะใช้วิธีการแปลงของฮัฟตามปกติ งานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงขั้นตอนในการโหวตเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละจุดวิกฤติในฮัฟสเปซให้เหมาะสมมากขึ้น โดยค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะถูกคำนวณจากมุมระหว่างเซอร์เฟสนอร์มอลที่จุดวิกฤติกับเวกเตอร์ที่เป็นทิศทางการมองจากกล้อง วิธีการดังกล่าวช่วยปรับปรุงความถูกต้องของการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงได้

วิธีการข้างต้นเป็นวิธีการโดยอาศัยลำดับชั้นของสีที่เปลี่ยนไปบนพื้นผิววัตถุ แต่ก็ยังมีวิธีการอื่นที่อาศัยข้อมูลจากเงาของวัตถุที่ฉายลงไปบนพื้นราบในการหาทิศทางและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงเช่นกัน Sato และคณะ [8][9][10] ได้ใช้ข้อมูลค่าความสว่างภายในบริเวณเงาของวัตถุในการสร้างการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดแสง (light source distribution) นั่นคือแต่ละจุดบนพื้นราบนั้นจะถูกสุ่มตัวอย่างทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ที่จะมาตกกระทบยังจุดนี้แล้วสร้างสมการของแสงจากข้อมูลของแต่ละจุดที่เลือกมา หลังจากนั้นจึงแก้สมการเพื่อหาทิศทางและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงที่สุ่มตัวอย่างมาทั้งหมด ซึ่งด้วยวิธีการนี้จะทำให้ได้ข้อมูลสภาพแวดล้อมของแสงในฉากนั้นๆ มา เมื่อวางวัตถุเสมือนใดๆ ลงไปในฉากก็จะสามารถคำนวณหาแสงเงาที่ใกล้เคียงกับความจริงได้ นอกจากนี้ยังมีวิธีการใน [11] Wang และ Samaras ที่ใช้ประโยชน์จากข้อมูลของเงา

นอกจากการใช้เงาแล้ว ยังมีวิธีการในการใช้บริเวณที่ส่องสว่างมากที่สุดในทิศทางการมองหนึ่งๆ หรือสเปคคูลาร์ไฮไลท์ อันเกิดจากการสะท้อนแสงของผิววัตถุที่มีลักษณะมันวาว เช่น กระจกหรือโลหะ โดยส่วนใหญ่อาศัยการวางวัตถุทรงกลมผิวเรียบมันให้ปรากฏอยู่ในภาพเพื่อใช้ในการวัดแสง โดยตำแหน่งบนผิวที่มีความสว่างสูงสุด สามารถใช้ระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงได้ ตัวอย่างของเทคนิคที่อาศัยวิธีการดังกล่าวได้แก่วิธีของ Nayar [12] ซึ่งได้ใช้ความสัมพันธ์ของเซอร์เฟสนอร์มอลที่จุดสเปคคูลาร์พีคกับทิศทางการมองในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง โดยการใช้ทรงกลม 2 ลูก ทำให้ได้ทิศทางที่ชี้ยังแหล่งกำเนิดแสง 2 เส้น ซึ่งจุดตัดของเส้นทั้งสองเส้นนี้ก็คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั่นเอง Powell และคณะ [13] สามารถคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากสเปคคูลาร์ไฮไลท์ซึ่งปรากฏอยู่บนวัตถุทรงกลม 2 ลูกที่ทราบตำแหน่งและรูปทรงได้เช่นเดียวกับวิธีการของ Nayer Zhou และ Kambhamettu [14][15] นำเสนอวิธีการในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งรวมถึงความเข้มแสงจากภาพถ่ายสเตอริโอของทรงกลมลูกหนึ่งที่มีพื้นผิวที่สะท้อนทั้งแสงสเป็กคูลาร์และดิฟฟิวส์ ซึ่งตำแหน่งที่เกิดสเป็กคูลาร์พีคจะใช้เป็นข้อมูลในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ในขณะที่การสะท้อนแบบดิฟฟิวส์จะให้ข้อมูลความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง

นอกจากนี้ [16] Li, Lin, Lu และ Shum ยังนำเสนอวิธีการในการประมาณค่าแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้เท็กเจอร์ (textures) บนวัตถุซึ่งจะมีข้อมูลการสะท้อนแสงทั้งแบบสเปคคูลาร์และแบบดิฟฟิวส์ โดยใช้ข้อมูลจากทั้งลำดับชั้นของสีที่เปลี่ยนไป, เงา และสเปคคูลาร์บนพื้นผิวในการที่จะช่วยเพิ่มจำนวนของแหล่งกำเนิดแสงที่หาให้ได้มากขึ้น และใช้ข้อมูลจาก 3 แหล่งนี้เป็นตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลให้แก่กัน ทำให้ได้ความถูกต้องในการหาตำแหน่งมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นๆ ที่ใช้ประโยชน์จากเชดดิ้งบนพื้นผิววัตถุ เช่น วิธีการใน [17] แต่ก็ยังมีบางวิธีการที่ใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้จากกล้องที่วัดระยะลึกในการคำนวณหาทิศทางของแสงได้ [18]

แม้ว่าวิธีการที่ผ่านมาจะประสบความสำเร็จในการหาทิศทางและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง แต่วิธีการเหล่านั้นส่วนใหญ่สามารถใช้ได้กับแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดซึ่งอยู่ในระยะที่ไกลมาก (distant light หรือ directional light) เท่านั้น ทั้งนี้ ยกเว้นบางวิธีเช่น [12] ที่สามารถใช้ในการหาตำแหน่งของแสงแบบจุดที่อยู่ในระยะใกล้ (near point light) ได้ ในสภาพแวดล้อมในโลกจริงโดยเฉพาะในอาคารซึ่งแหล่งกำเนิดแสงมีระยะใกล้กับวัตถุ วิธีการเหล่านี้ส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้ได้

นอกเหนือจาก [12] ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น วิธีการที่สามารถหาตำแหน่งและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้ มีค่อนข้างจำกัด ใน [19] Hara ได้นำเสนอวิธีการสองแบบในการหาคุณสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิววัตถุและตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงโดยไม่จำกัดอยู่ที่แสงซึ่งอยู่ในระยะไกลเท่านั้น วิธีการแรกจะอยู่บนพื้นฐานของอัลกอริทึมในการวนรอบเพื่อเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันของความเข้มแสงที่คำนวณได้โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ เทียบกับค่าที่วัดได้จากภาพ (iterative separating-and-fitting algorithm) วิธีการที่สองสามารถคำนวณคุณสมบัติการสะท้อนแสงดิฟฟิวส์และตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงไปพร้อมๆ กันโดยใช้โมเดลของทอแร้นซ์-สแปโรว์ (Torrance-Sparow specular reflection model) และปรับปรุงการสุ่มตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์คอรีเลชั่น (correlation coefficient) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้สามารถใช้กับแหล่งกำเนิดแสงได้เพียงจุดเดียวและใช้กับวัตถุแบบคอนเว็กซ์ (convex)

Takai [20] นำเสนอวิธีการในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่ายภาพเดียวในฉากซึ่งถูกให้แสงหลักๆ โดยแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดหลายจุด และแหล่งกำเนิดแสงแบบทิศทางอีกจำนวนหนึ่งให้เป็นแสงแอมเบี้ยน (ambient light) วิธีการนี้ใช้ทรงกลมคู่ ขั้นตอนสำคัญของวิธีการคือการหาความแตกต่างของค่าความสว่างจากรูปในพื้นที่สองส่วนของทรงกลมที่ใช้ ค่าพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสงจะถูกคำนวณด้วยการวนรอบ รูปที่เป็นอินพุตจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยการกำจัดผลของแหล่งกำเนิดแสงที่คำนวณหามาได้ และพารามิเตอร์ของแหล่งกำเนิดแสงแบบทิศทางและแสงแอมเบี้ยนจะถูกคำนวณด้วยขั้นตอนการวนรอบอีกครั้ง

Schnieders [21] นำเสนอการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นที่คำนวณจากการใช้ภาพถ่ายเพียงภาพเดียวและใช้ทรงกลมเพียงลูกเดียวไม่สามารถใช้หาตำแหน่งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสงได้ พร้อมทั้งเสนอวิธีการในการหาแหล่งกำเนิดแสงซึ่งมีรูปทรงแบบโพลีกอนจากภาพถ่ายภาพเดียวโดยใช้ทรงกลมสองลูกและใช้การวนรอบในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง

มีบางวิธีการที่ไม่ต้องใช้วัตถุพิเศษในฉาก Boom และคณะ [22] นำเสนอวิธีการในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดโดยใช้เฉพาะข้อมูลความสว่างและระยะลึกในแต่ละพิกเซลของภาพซึ่งได้จากกล้อง Kinect วิธีการนี้จะใช้การแบ่งส่วนของพื้นผิวในภาพตามสี จากนั้นทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงดิฟฟิวส์ของพื้นผิวในแต่ละส่วน โดยจะใช้วิธีการสุ่มทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมด แล้วใช้ทิศทางนั้นในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวดิฟฟิวส์ จากนั้นจึงนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการคำนวณค่าแสงสะท้อนดิฟฟิวส์จากจุดนั้นๆ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับค่าความสว่างจากรูปภาพ จะทำให้ทราบว่าเกิดค่าความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด ทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดจะเป็นทิศทางที่ถูกต้อง ถึงแม้วิธีการนี้จะไม่จำเป็นต้องใช้วัตถุพิเศษใดๆ ในฉาก แต่มีข้อจำกัดที่ต้องใช้การคำนวณมาก และความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นกับลักษณะของวัตถุในภาพ

วิธีการที่ใช้ในการคำนวณค่าของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้เหล่านี้ต่างก็มีข้อจำกัดทั้งการที่ใช้ได้กับแหล่งกำเนิดแสงเพียงจุดเดียว หรือใช้ได้กับสภาพแวดล้อมที่ต้องการมีการจัดเตรียมที่ซับซ้อน สำหรับวิธีการที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นวิธีการในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้หลายแหล่งโดยใช้รูปถ่ายเพียงมุมเดียว ซึ่งไม่เหมือนกับวิธีการของ Schnieders [21] และ Takai [20] ซึ่งต่างก็ใช้ทรงกลมสองลูกในฉาก หรือภาพถ่ายสองมุมสำหรับทรงกลมลูกเดียว วิธีการที่นำเสนอนี้ใช้ทรงกลมที่รู้ตำแหน่งและรูปทรงเพียงลูกเดียว ประกอบกับจุดมุมในเงาและค่าความสว่างของการสะท้อนแสงดิฟฟิวส์บนพื้นราบที่เงาของวัตถุถูกฉายไป เพื่อการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงได้ การใช้จุดมุมในเงาช่วยเพิ่มความเร็วในการคำนวณได้มาก ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการที่มีการใช้จุดมุมในเงาเพื่อการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงอยู่บ้าง เช่น วิธีการของ Cao [23] แต่ก็เป็นการใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงแบบทิศทางเท่านั้น และจำเป็นต้องใช้ภาพสองมุมด้วย แม้ว่าวิธีการในการใช้ลูกบอลกระจกสองลูกหรือการใช้กล้องที่มีเลนส์แบบตาปลา (fish-eye lens) จะเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ แต่การจัดเตรียมสภาพแวดล้อมเพื่อใช้วิธีการดังกล่าวนั้นมีความยุ่งยากกว่า นอกจากนี้ ดังที่จะได้แสดงให้เห็นในลำดับต่อไป การใช้จุดสเปกคูลาพีค เป็นหลักในการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงดังเช่นวิธีการใน [12] มีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่คำนวณได้สูงเมื่อเทียบกับวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งอาศัยข้อมูลในลักษณะเดียวกันเป็นเพียงองค์ประกอบส่วนหนึ่งในการคำนวณเท่านั้น

ในหัวข้อต่อจากนี้ จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการในการคำนวณทิศทางหรือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาในรายละเอียดและปรับปรุงบางส่วน อันเป็นงานที่ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก่อนงานวิจัยหลักที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงจะได้กล่าวถึงงานวิจัยที่จะใช้เปรียบเทียบกับวิธีการที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.2. การคำนวณค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะไกล

2.2.1 การใช้เชดดิ้งในการคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง

แนวความคิดหลักของการคำนวณค่าแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้เชดดิ้ง [3] อยู่ที่การหาจุดวิกฤตจากภาพถ่าย ซึ่งจุดเหล่านี้จะถูกใช้ในการหาเส้นวิกฤต เชดดิ้งจากแหล่งกำเนิดแสงทำให้เกิดเส้นวิกฤต ดังนั้นถ้าสามารถค้นหาเส้นวิกฤตเหล่านี้ได้ ก็จะสามารถคำนวณหาทิศทางและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงที่ทำให้เกิดเส้นวิกฤตนี้ได้ โดยจุดวิกฤตจะเป็นจุดบนรูปภาพซึ่งเซอร์เฟสนอร์มอล (surface normal) ที่จุดนี้จะตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดแสงอย่างน้อยหนึ่งแหล่งในฉาก

ข้อกำหนดของวิธีการนี้ก็คือทรงกลมที่มีพื้นผิวแบบแลมเบอร์เทียนจะเป็นวัตถุที่ถูกวางเอาไว้ในฉากและแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบทิศทาง (directional light source) ดังนั้นทิศทางและความเข้มแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงนั้นจะมีทิศทางและขนาดเท่าๆ กันหมดทั้งฉาก พื้นผิวแบบแลมเบอร์เทียนของวัตถุทรงกลมจะสะท้อนแสงออกไปด้วยความเข้มแสงเท่าๆ กันในทุกทิศทาง ซึ่งทำให้การวัดปริมาณแสงสะท้อนในแต่ละจุดบนพื้นผิวนั้นไม่ขึ้นกับทิศทางในการมองแต่จะขึ้นอยู่กับนอร์มอลเซอร์เฟสที่จุดนั้นๆ เป็นสำคัญ

รูปที่ 2.1 ระนาบที่ตัดไปบนทรงกลม [3]

ในการหาจุดวิกฤตที่อยู่ในภาพนั้น จะเริ่มด้วยการกำหนดระนาบ (plane) หลายๆ ระนาบที่จะตัดผ่านไปยังทรงกลมที่เป็นวัตถุในฉาก โดยในการกำหนดระนาบที่จะตัดนี้สามารถทำได้หลายวิธี อาจจะกำหนดโดยการให้ระนาบนี้ตัดผ่านจุดศูนย์กลางของทรงกลมกับจุดศูนย์กลางในการโปรเจ็คชันของกล้องก็ได้ หลังจากที่ระนาบถูกสร้างขึ้นมาแล้ว ก็จะสามารถแบ่งส่วนของเส้นโค้งที่อยู่บนระนาบออกเป็นช่วงๆ $\theta_0, \theta_1, \theta_2, ..., \theta_n$ ซึ่งจะทำให้ได้สมการต่อไปนี้

$$E(\theta_i) = b_i \sin\theta + c_i \cos\theta \tag{2.1}$$

โดย $i = 0,1,...,n$ b_i และ c_i คือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งจะเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับทิศทางและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงทั้งหมดที่ตกกระทบไปบนพื้นผิวของวัตถุในช่วงของมุม θ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$E(\theta_i)$ เป็นฟังก์ชันความเข้มแสงในช่วงมุมตกกระทบ θ

ค่า b_i และ c_i สามารถคำนวณหาได้ด้วยวิธีการแก้สมการแบบลีสต์สแควร์ (least-squares solution)

ค่าความสว่างของพิกเซลในภาพที่สัมพันธ์กับส่วนของเส้นโค้ง θ_i จะถูกเลือกขึ้นมาเป็นจำนวนหนึ่ง และค่า b_i และ c_i สามารถคำนวณหาได้ด้วยวิธีการแก้สมการแบบลีสต์สแควร์ โดยจะกระทำเช่นนี้ไปกับทุกช่วง θ_i ที่แบ่งเอาไว้ ทำให้สุดท้ายแล้ว ในแต่ละช่วง θ_i ก็จะได้ค่า b_i และ c_i ของแต่ละช่วง

หลังจากนั้นในการหาว่ามีจุดวิกฤตอยู่ในช่วงใดบ้างนั้น จะต้องหาความแตกต่างของค่า b_i และ c_i ที่อยู่ติดกันว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ถ้าแตกต่างกันมากก็เป็นไปได้ว่ามีจุดวิกฤตอยู่ในช่วงนี้เนื่องจากค่า b_i และ c_i นั้นเปรียบเสมือนเป็นขนาดและทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงเสมือนที่กระทำกับบริเวณนั้น โดยแหล่งกำเนิดแสงเสมือนนั่นก็คือผลรวมของแหล่งกำเนิดแสงที่แท้จริง ซึ่งยังไม่ทราบค่านั่นเอง โดยการหาความแตกต่างนี้จะใช้วิธีการหาระยะทางดังต่อไปนี้

$$d = \sqrt{(b_i - b_{i-1})^2 + (c_i - c_{i-1})^2} \tag{2.2}$$

โดยที่ b_i, c_i, b_{i-1}, และ c_{i-1} คือพารามิเตอร์ของช่วงที่อยู่ติดกัน ซึ่งเมื่อคำนวณค่า d ในสมการ (2) ออกมาได้แล้ว ถ้ามีค่ามากกว่าค่า threshold T ซึ่งถูกกำหนดเอาไว้ก่อนแล้ว หมายความว่าในช่วง θ_i หรือ θ_{i-1} นี้จะต้องมีจุดวิกฤตย่างน้อยหนึ่งจุด จากนั้นช่วง θ_i หรือ θ_{i-1} จะถูกเลือกแล้วแบ่งส่วนของเส้นโค้งภายในช่วงนี้ด้วยมุมที่เล็กลง $\theta_0, \theta_1, \theta_2, ..., \theta_n$ อีกครั้ง จากนั้นก็กลับไปแก้สมการ 2.1 เพื่อหาค่า b_i และ c_i ใหม่ ขั้นตอนเหล่านี้จะถูกทำซ้ำไปจนกว่าจะสามารถหาตำแหน่งของจุดวิกฤตที่ไม่สามารถจะแบ่งเป็นช่วงย่อยได้อีกแล้ว

หลังจากที่หาจุดวิกฤตบนรูปภาพได้ทั้งหมดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือหาว่าจุดวิกฤตแต่ละจุดนั้นอยู่บนเส้นวิกฤตใดบ้าง ซึ่งในการจัดกลุ่มจุดวิกฤตเหล่านี้เข้าด้วยกันนั้นจะใช้วิธีการแปลงของฮัฟ ซึ่งนั่นหมายความว่าจุดวิกฤตที่อยู่บนเส้นวิกฤตเดียวกันนั้นเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเดียวกัน ดังนั้นเมื่อได้เส้นวิกฤตมาแล้ว ก็จะได้ระนาบของเส้นวิกฤตบนทรงกลม ซึ่งนอร์มอลเวคเตอร์ของระนาบนี้ก็คือทิศทางตั้งต้นของแหล่งกำเนิดแสงที่ทำให้เกิดเส้นวิกฤตนี้ การที่ทิศทางนี้ถูกเรียกว่าเป็นทิศทางตั้งต้นก็เนื่องมาจากทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงจริงนั้นอาจจะเป็นทิศทางนี้หรือเป็นทิศทางตรงกันข้ามก็ได้

ในการหาทิศทางและความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงจริงนั้นจะใช้การเลือกจุดบนพื้นผิวที่อยู่ในเส้นวิกฤตเดียวกันมาจำนวนหนึ่ง $(P_1, P_2, ..., P_k)$ ซึ่งจุดเหล่านี้ถูกให้แสงด้วยแหล่งกำเนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงเดียวกัน และเนื่องจากการที่ทราบว่าแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบทิศทาง และพื้นผิวของทรงกลมเป็นแบบแลมเบอร์เทียนทำให้สามารถตั้งสมการได้ว่า

$$E(P_j) = \sum_{i \in \Lambda} \max(e_i \mathbf{L}_i \cdot \mathbf{N}_j, 0) + \mathbf{L}_v \cdot \mathbf{N}_j \qquad (2.3)$$

$\mathbf{L}_i$ เป็นทิศทางของแสงตั้งต้นที่หาได้ลำดับที่ i

$\mathbf{N}_j$ เป็นนอร์มอลเวคเตอร์ที่จุด j

$\mathbf{L}_v$ เป็นผลรวมของแหล่งกำเนิดแสงทั้งหมดที่ไม่สามารถหาได้

e_i เป็นค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง $\mathbf{L}_i$

Λ เป็นเซ็ตของแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถคำนวณหาทิศทางได้

ในการแก้สมการข้างต้นเพื่อหาค่า e_i นั้นสามารถใช้วิธีการแก้สมการแบบลีสต์สแควร์ได้เช่นเดิม ซึ่งถ้าค่า e_i เป็นค่าลบหมายความว่าทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงจริงนั้นจะตรงกันข้ามกับทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงตั้งต้น แต่ถ้าค่าเป็นบวกหมายถึงเป็นทิศทางเดียวกัน และค่าสมบูรณ์ของ e_i นั่นก็คือค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง i นั่นเอง

2.2.2 การใช้เชดดิ้งในการคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้ประโยชน์จากภาพถ่ายหลายมุมมอง [7]

ในบางกรณีแหล่งกำเนิดแสงไม่สามารถถูกมองเห็นและคำนวณค่าได้โดยใช้ภาพเพียงภาพเดียวเนื่องจากบางแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีทิศทางกับเวคเตอร์ v (เวคเตอร์จากจุกศูนย์กลางทรงกลมไปยังจุดศูนย์กลางการโปรเจ็คชัน) น้อยกว่ามุมระหว่าง u (เวคเตอร์จากมุมแทนเจ้นท์จากทรงกลมไปยังจุดศูนย์กลางการโปรเจ็คชัน) กับเวคเตอร์ v ซึ่งจะทำให้ทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงนี้ถูกบังทั้งหมดโดยทรงกลมหรืออาจจะไม่ถูกบัง แต่ไม่สามารถสร้างจุดวิกฤตบนพื้นผิวของทรงกลมได้ ซึ่งถ้าเป็นในกรณีหลังนี้ แหล่งกำเนิดแสงนี้จะไม่สามารถประมาณค่าที่แท้จริงได้ (หากมีมากกว่าหนึ่งแหล่งกำเนิดแสง) และจะถูกรวมค่าอยู่กับแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่เป็นในลักษณะนี้เช่นเดียวกัน และจะถูกเรียกว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงเสมือน

ภาพจากมุมมองหมายมุมจะมีประโยชน์ในกรณีนี้ เพราะเมื่อมีข้อมูลภาพจากมุมมองอื่นก็เป็นไปได้ที่จะสามารถหาแหล่งกำเนิดแสงเพิ่มเติมที่ไม่สามารถหาได้จากภาพในมุมมองเดียว ซึ่งถือว่าเป็นการใช้ประโยชน์โดยตรง นอกจากนี้สำหรับภาพที่เกิดจากกระบวนการเปอร์สเป็คทีฟโปรเจ็คชัน (perspective projection) จะมีผลทำให้ขนาดและสัดส่วนของสิ่งต่างๆ ในฉากนั้นเปลี่ยนไปจากความจริง ถ้าเส้นโค้งหนึ่งๆ อยู่ไกลกับระนาบในการโปรเจ็คชัน ก็จะทำให้เส้นโค้งนี้มีขนาดเล็กกว่าเส้นโค้งที่อยู่ใกล้ระนาบในการโปรเจ็คชัน และถ้าเส้นโค้งเหล่านั้นคือเส้นวิกฤตบนพื้นผิว จุดวิกฤตแต่ละจุดก็จะถูกโปรเจ็คลงบนระนาบในการโปรเจ็คชันในพื้นที่เล็กๆ ซึ่งนั่นอาจจะทำให้เกิด

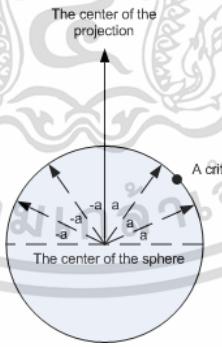
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

aliasing artifacts ขึ้นในภาพ ซึ่งจะนำไปสู่ข้อผิดพลาดในการประมาณค่าต่อไปได้ ภาพในหลายมุมสามารถช่วยแก้ปัญหาในลักษณะนี้ได้ นั่นคือเราสามารถเลือกจุดวิกฤตที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละแหล่งกำเนิดแสงได้ ถ้ามีจุดวิกฤตที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเดียวกันในภาพ 2 ภาพ เราสามารถที่จะเลือกใช้ข้อมูลจากจุดวิกฤตในภาพที่จุดวิกฤตอยู่ใกล้กับระนาบในการโปรเจ็คชันมากกว่า เนื่องจากตำแหน่งของจุดวิกฤตในภาพที่เราเลือกนั้นมีความแม่นยำมากกว่าอีกภาพหนึ่ง

การเลือกจุดวิกฤตที่ดีที่สุด ในกรณีที่ใช้ภาพหลายมุมทำได้โดยการให้น้ำหนักกับจุดวิกฤตแต่ละจุดไม่เท่ากันโดยในทุกภาพที่จะใช้นั้นจะถูกนำไปหาจุดวิกฤตเสียก่อน จากนั้นในขั้นตอนการหาเส้นวิกฤตโดยการใช้การแปลงของฮัฟนั้นก็จะใช้จุดวิกฤตทั้งหมดที่หามาได้ในแต่ละภาพ โดยแต่ละจุดนั้นแทนที่จะมีค่าเป็น 1 เท่าๆ กันในการลงคะแนนเสียงในฮัฟสเปซ ก็จะมีค่าที่ไม่เท่ากัน

ในการกำหนดค่าน้ำหนักในแต่ละจุดวิกฤตนั้นจะใช้มุมระหว่างเวคเตอร์ที่ลากจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมไปยังจุดศูนย์กลางในการโปรเจ็คชันกับเวคเตอร์ที่ลากจากจุดศูนย์กลางทรงกลมไปยังจุดวิกฤตแต่ละจุด

รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นแนวคิดของวิธีการนี้ เมื่อระนาบที่ตัดผ่านศูน์กลางทรงกลมและศูนย์กลางของการโปรเจ็คชันถูกสร้างขึ้น ช่วงของมุม (a) จะถูกกำหนด ช่วงนี้จะแบ่งวงกลมนี้ออกเป็นส่วนๆ เท่าๆ กันส่วนแรกจะเป็นมุม a หรือ $-a$ และส่วนสุดท้ายเป็นมุม 90 หรือ -90 (ส่วนที่มุมมากกว่านี้จะถูกมองไม่เห็นในกล้อง)



รูปที่ 2.2 วิธีในการให้น้ำหนักจุดวิกฤต

จุดวิกฤตบนระนาบนี้จะถูกค้นพบและกำหนดค่าด้วยมุมที่อยู่ในช่วงต่างๆ ที่จุดวิกฤตนี้อยู่ จุดวิกฤตที่อยู่ในช่วงเดียวกันจะมีค่าน้ำหนักเท่ากัน และช่วงที่ทำมุมน้อยจะให้ค่าน้ำหนักที่มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงที่ทำมุมมากเนื่องจากเส้นที่อยู่ในช่วงมุมที่มากนั้น เมื่อถูกโปรเจ็คลงไปยังระนาบโปรเจ็คชันจะมีความละเอียดที่ต่ำกว่าดังนั้นจึงสรุปเป็นสมการในการกำหนดค่าน้ำหนักได้ดังนี้

$$w_i = \cos(r_i) \tag{2.4}$$

w_i = ค่าน้ำหนักของจุดวิกฤต i

r = มุมของช่วงที่จุดวิกฤต i อยู่

ค่าน้ำหนักของแต่ละจุดวิกฤตจะมีค่าตั้งแต่ 0-1. ค่าน้ำหนักนี้จะช่วยปรับปรุงผลลัพธ์จากการใช้การแปลงของฮัฟเนื่องจากจุดวิกฤตที่มีความถูกต้องมากกว่านั้นจะมีน้ำหนักในฮัฟสเปซที่มากกว่านั่นเอง

2.2.3 การคำนวณทิศทางของพระอาทิตย์สำหรับภาพภายนอกอาคาร

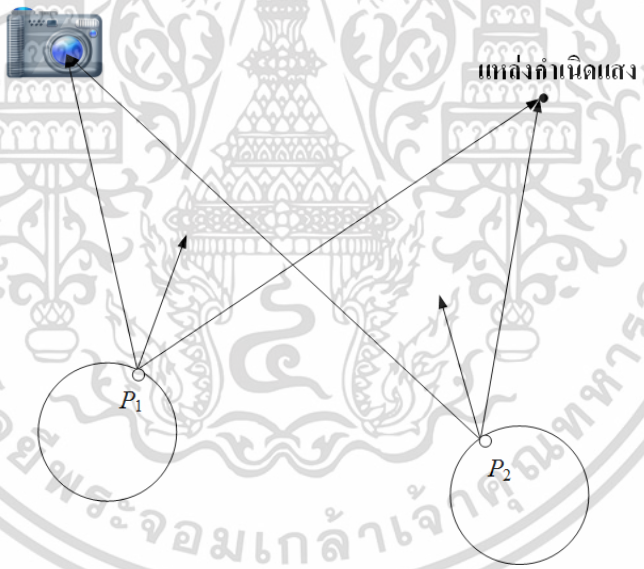
Madsen และ Lal [24] นำเสนอวิธีการหาทิศทางและความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงจากฉากภายนอกอาคาร วิธีการดังกล่าวใช้กล้องสเตอริโอในการบันทึกภาพและสร้างโมเดล 3 มิติของฉากที่กำลังถ่ายไปพร้อมๆ กัน โดยขั้นตอนหลักๆ มี 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการรวมเอาความสว่างในแต่ละพิกเซลกับข้อมูลระยะลึกเข้าด้วยกัน และค้นหาเงาจากวัตถุใดๆ ที่ปรากฏในฉาก ขั้นตอนที่สองข้อมูลความสว่างจากเงาที่ค้นหาได้เมื่อรวมกับข้อมูลระยะลึกที่ได้จากฉากจะทำให้สามารถประมาณสภาพแวดล้อมของแสงในฉากได้ ซึ่งก็คือสีและความเข้มแสงของท้องฟ้าและพระอาทิตย์ ในขั้นตอนสุดท้ายสภาพแวดล้อมของแสงเมื่อรวมกับสีในแต่ละพิกเซลของภาพและข้อมูลระยะลึกจะทำให้สามารถเรนเดอร์วัตถุสังเคราะห์ใดๆ ลงไปในฉากได้โดยมีแสงและเงาที่สัมพันธ์กัน ถึงแม้วิธีการดังกล่าวจะมีข้อได้เปรียบที่การไม่ต้องใช้วัตถุพิเศษใดๆ ลงไปในฉาก และสามารถใช้กับแอพลิเคชันที่ตอบสนองในเวลาจริง (real-time) ได้ แต่วิธีการดังกล่าวก็จำกัดการใช้งานกับแหล่งกำเนิดแสงพระอาทิตย์เท่านั้น ไม่สามารถใช้กับแหล่งกำเนิดแสงแบบอื่นๆ ได้ อีกทั้งการหาทิศทางของพระอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลพิเศษได้แก่ ตำแหน่งละติจูด ลองติจูด วันที่และเวลาในขณะที่ถ่าย ทิศทางจากเข็มทิศ และมุมก้มเอียงของกล้อง

Koc และ Balcisoy [25] นำเสนอวิธีการในการหาทิศทางของพระอาทิตย์สำหรับแอพพลิเคชันความจริงเสริมบนอุปกรณ์พกพา วิธีการนี้ใช้การตรวจจับบริเวณใบหน้าของผู้ใช้จากภาพที่ได้กล้องหน้าของอุปกรณ์พกพา จากนั้นแปลงตำแหน่งในแต่ละพิกเซลในภาพบริเวณใบหน้าให้อยู่ในตำแหน่งแบบทรงกลม (spherical coordinates) จากนั้นคำนวณหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงจากค่าความสว่างในแต่ละพิกเซลและตำแหน่งของเซอร์เฟสนอร์มอลในแต่ละจุด ซึ่งวิธีการดังกล่าวก็ยังคงจำกัดอยู่ที่การใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบทิศทาง ซึ่งก็คือพระอาทิตย์เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้

วิธีการดั้งเดิมในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้นั้นจะมีพื้นฐานมาจากวิธีการของ Nayar [12] นั่นคือการใช้จุดสเปคคูลาร์พีคบนพื้นผิวของวัตถุทรงกลมสองลูกซึ่งมีลักษณะพื้นผิวแบบกระจกหรือที่เป็นมันวาว พิกเซลที่เป็นจุดสเปคคูลาร์พีคจะเป็นจุดที่สว่างมากที่สุดในรูปภาพ จากนั้นหาตำแหน่ง 3 มิติของจุดดังกล่าว และตำแหน่งจุดศูนย์กลางทรงกลม จะทำให้ได้เซอร์เฟสนอร์มอลที่จุดสเปคคูลาร์พีค อาศัยกฎของการสะท้อนแสงแบบสเปคคูลาร์นั่นคือมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน มุมระหว่างเซอร์เฟสนอร์มอลกับทิศทางของแสงจะเท่ากับมุมระหว่างเซอร์เฟสนอร์มอลกับทิศทางการมองที่ชี้ไปหาจุดศูนย์กลางของกล้อง [26] จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงได้ ซึ่งหากมีทรงกลมสองลูกจะทำให้ได้ทิศทางที่ชี้ไปหาแหล่งกำเนิดแสงสองทิศทาง จุดตัดของทิศทางทั้งสองนี้คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จุด P_1 และ P_2 เป็นจุดสเปคคูลาร์พีคที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเดียวกันบนทรงกลมคนละลูก



รูปที่ 2.3 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้จากจุดสเปคคูลาร์พีคบนทรงกลมสองลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงโดยใช้สเปคคูลาร์ไฮไลท์และเงาของจุดที่ไม่ต่อเนื่องบนผิววัตถุ

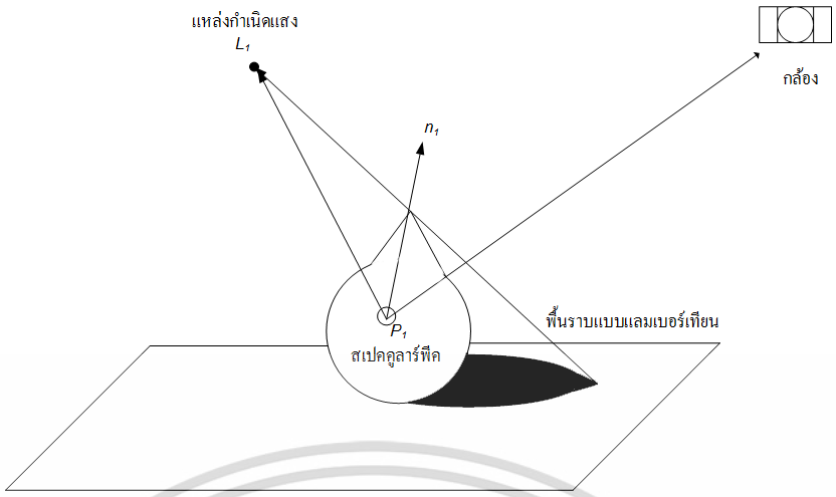
3.1 ภาพรวมของวิธีการที่นำเสนอ

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงภาพรวมของวิธีการที่นำเสนอและสภาพแวดล้อมที่ใช้กับวิธีการดังกล่าว โดยวิธีการนี้จะใช้ประโยชน์จากสเปคคูลาร์ไฮไลท์ที่ปรากฏบนพื้นผิววัตถุ ซึ่งทราบตำแหน่งและรูปทรง ในที่นี้จะใช้วัตถุที่เป็นทรงกลมซึ่งมีพื้นผิวที่สะท้อนแสงได้เหมือนกระจกเงาด้านบนของทรงกลมมีกรวยปลายแหลมยื่นออกมา เพื่อใช้เป็นจุดไม่ต่อเนื่อง (discontinuity point) ของพื้นผิว โดยวัตถุจะถูกวางบนหรือหน้าฉากหลังที่เป็นพื้นราบซึ่งมีพื้นผิวแบบแลมเบอร์เทียน นั่นคือเป็นพื้นผิวด้านซึ่งสามารถสะท้อนแสงแบบดิฟฟิวส์ มีแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดที่อยู่ในระยะใกล้ (near point light source) จำนวนตั้งแต่ 1 จุดขึ้นไป และมีกล้อง 1 ตัวที่ใช้บันทึกภาพ และกล้องถ่ายภาพระยะลึก (depth camera) อีก 1 ตัว ในกรณีที่ไม่ทราบตำแหน่งของวัตถุล่วงหน้า

จากรูปที่ 3.1 แสดงสภาพแวดล้อมตัวอย่างของวิธีการที่นำเสนอ โดยมีแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดอยู่ 1 จุดนั่นคือ L_1 ซึ่งทำให้เกิดบริเวณจุดสว่างบนผิวที่เกิดจากการสะท้อนแสงแบบสเปคคูลาร์ หรือที่เรียกว่าสเปคูลาร์ไฮไลท์ จุดที่อยู่ในบริเวณสเปคูลาร์ไฮไลท์และมีความสว่างสูงสุดเรียกว่า จุดสเปคคูลาร์พีค (specular peak point) ที่จุดดังกล่าว มุมระหว่างเซอร์เฟสนอร์มอล (surface normal) กับเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังแหล่งกำเนิดแสงทำมุมเท่ากับมุมระหว่างเซอร์เฟสนอร์มอลกับเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังจุดศูนย์กลางของกล้อง จากรูปที่ 3.1 จุดสเปคคูลาร์พีคคือจุด P_1 ลำแสงจากจุดสเปคคูลาร์พีคจะสะท้อนเข้าสู่จุดศูนย์กลางโปรเจ็คชันของกล้อง ซึ่งปรากฏเป็นจุดสว่างบนภาพที่ถ่ายได้

จากภาพ จุดไม่ต่อเนื่องบนผิววัตถุ ซึ่งในที่นี้เป็นจุดมุมบริเวณปลายของกรวย ทำให้เกิดจุดมุมบนเงาของวัตถุที่ทอดไปบนพื้นระนาบ หากทราบตำแหน่งของ จุดมุมบนผิววัตถุและจุดมุมของเงาอันเกิดจากบริเวณดังกล่าว เส้นตรงที่ลากผ่านจุดทั้งสองจะเป็นทิศทางที่ชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของวิธีการที่นำเสนอ

3.2 การหาตำแหน่งจุดสเปคคูลาร์พีคโดยใช้จุดศูนย์กลางมวล

จุดสเปคคูลาร์พีคที่ปรากฏบนภาพถ่ายคือจุดศูนย์กลางของสเปคคูลาร์ไฮไลท์ซึ่งเป็นพิกเซลที่มีความสว่างมากที่สุด อย่างไรก็ตามในบางกรณีจุดที่มีความสว่างมากที่สุดอาจจะมีด้วยกันหลายจุด อันเกิดจากการอิ่มตัวของเซ็นเซอร์รับแสงของกล้องถ่ายภาพ ในกรณีเช่นนี้จะใช้วิธีการหาจุดศูนย์กลางมวล (center of mass) เพื่อหาจุดสเปคคูลาร์พีค

วิธีการหาจุดศูนย์กลางมวลเป็นวิธีในการหาค่าเฉลี่ยของมวลโดยการใช้ระยะทางจากจุดอ้างอิงเป็นตัวถ่วงน้ำหนัก ดังนี้

$$x_{\text{cm}} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2} \tag{3.1}$$

โดยที่ m_1, m_2 เป็นมวลของจุดที่หนึ่งและสองตามลำดับ x_1, x_2 เป็นระยะทางจากจุดที่ 1 และ 2 ไปยังจุดอ้างอิงตามลำดับ

จากสมการ 3.1 สามารถนำมาใช้ในการหาจุดสเปคคูลาร์พีคได้ โดยขั้นตอนแรกจะต้องหาค่าความสว่างสูงสุดในรูปภาพวัตถุทรงกลมเสียก่อน จากนั้นกำหนดค่าเทรชโฮลด์ค่าหนึ่งเพื่อจะใช้กำหนดขอบเขตของบริเวณที่เป็นสเปคคูลาร์ไฮไลท์ นั่นคือพิกเซลที่เป็นสเปคคูลาร์ไฮไลท์จะต้องมีค่าความสว่างน้อยกว่าค่าความสว่างสุงสุดไม่เกินค่าเทรชโฮลด์ที่กำหนด

จากขั้นตอนดังกล่าวจะทำให้ได้ขอบเขตของบริเวณที่เป็นสเปคคูลาร์ไฮไลท์ซึ่งสามารถใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในแนวนอนและแนวตั้งเพื่อหาจุดศูนย์กลางได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SPK = \sum_{k=1}^{K} \frac{I_k (P_k - C)}{I_k} \tag{3.2}$$

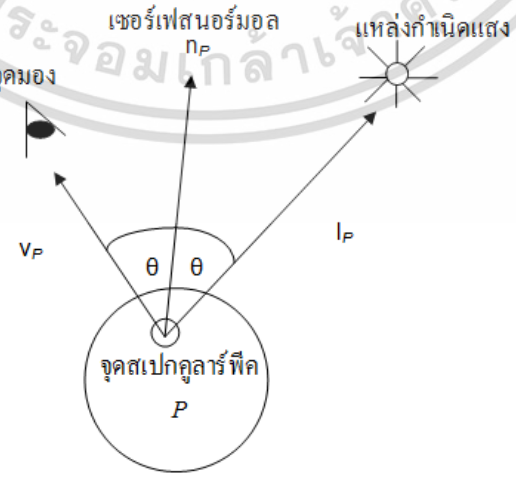
I_k เป็นค่าความสว่างของพิกเซล k โดยที่ $k = 1, 2, ..., K$ ซึ่ง K เป็นจำนวนพิกเซลที่อยู่ในบริเวณที่เป็นสเปคคูลาร์ไฮไลท์ P_k เป็นตำแหน่งของพิกเซล k (ตำแหน่ง x, y) และ C เป็นตำแหน่งกึ่งกลางของสเปคคูลาร์ไฮไลท์ ผลลัพธ์ที่ได้คือจุด SPK ซึ่งเป็นตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์พีคที่ต้องการ

3.3 การใช้จุดสเปคคูลาร์พีคในการคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง

การสะท้อนแสงแบบสเปคคูลาร์เหมือนกับการสะท้อนแสงของกระจก ซึ่งลำแสงจากแต่ละทิศทางที่ตกกระทบบนพื้นผิวจะถูกสะท้อนออกไปยังทิศทางหนึ่งๆ มุมของลำแสงที่ตกกระทบจะเท่ากับมุมของลำแสงสะท้อนเมื่อเทียบกับเซอร์เฟสนอร์มอล ที่จุดนั้นๆ วิธีการที่นำเสนอจะใช้ประโยชน์จากสเปคคูลาร์ไฮไลท์ในการคำนวณทิศทางของแสง โดยจะต้องหาจุดสเปคคูลาร์พีคซึ่งจะอยู่ในบริเวณพิกเซลที่เกิดสเปคคูลาร์ไฮไลท์ โดยแหล่งกำเนิดแสงแต่ละจุดจะทำให้เกิดจุดสเปคคูลาร์พีค 1 จุด กำหนดให้ P เป็นตำแหน่งบนผิววัตถุที่ทำให้เกิดจุดสเปคคูลาร์พีค จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงเมื่อเทียบกับจุด P ได้ดังนี้

$$\mathbf{l}_P = 2(\mathbf{n}_P^{\mathrm{T}} \mathbf{v}_P)\mathbf{n}_P - \mathbf{v}_P \tag{3.3}$$

โดยที่ $\mathbf{l}_P$ เป็นเวกเตอร์ทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงเมื่อวัดที่จุด P, $\mathbf{n}_P$ เป็นเซอร์เฟสนอร์มอลที่จุด P และ $\mathbf{v}_P$ เป็นยูนิตเวกเตอร์ของทิศทางการมองเมื่อมองจากจุด P ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ทั้งสามที่เกี่ยวข้องกับการสะท้อนแสงสเปคคูลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

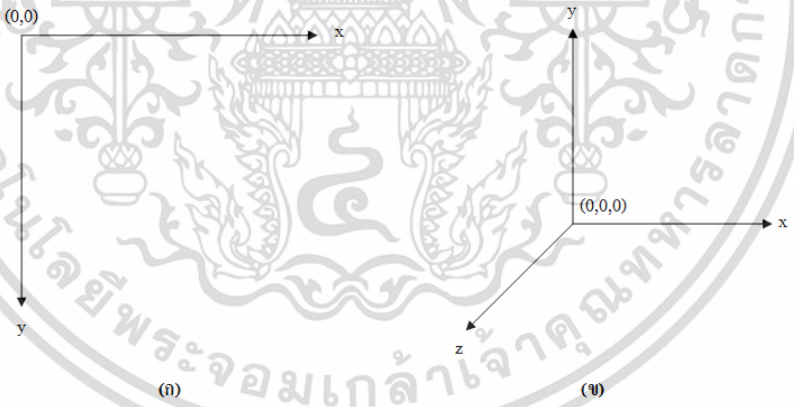
การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงจากหลักการข้างต้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งและแกน 3 มิติในโลกจริง (real-world coordinate) ของจุดศูนย์กลางทรงกลม และจุดสเปคคูลาร์พีค ซึ่ง 2 จุดแรกนั้นเป็นข้อกำหนดของวิธีการที่จำเป็นต้องทราบอยู่แล้ว แต่สำหรับจุดสเปคคูลาร์พีคนั้นจะต้องมีวิธีการคำนวณตามที่จะได้อธิบายต่อไป

3.4 การแปลงตำแหน่งพิกเซลไปเป็นตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริง

ตำแหน่งต่างๆ ที่ได้จากรูปภาพนั้นเป็นเพียงตำแหน่งพิกเซลที่อ้างอิงกับแกนของพิกเซลและมีจุดอ้างอิงที่จุดมุมบนซ้ายของรูป

แต่ในการคำนวณตำแหน่งของจุดต่างๆ เพื่อนำไปสู่การคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั้นจะใช้ตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริง ซึ่งจะมีแกนและจุดอ้างอิงที่ต่างกันดังนั้นจึงต้องมีวิธีการในการแปลงตำแหน่งเหล่านี้

จากรูปที่ 3.3(ก) เป็นแกนและจุดอ้างอิงของพิกเซลในรูปถ่าย รูปที่ 3.3(ข) จะเป็นแกนและจุดอ้างอิงของตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยจุดอ้างอิงนี้จะใช้เป็นตำแหน่งของกล้องด้วย



รูปที่ 3.3 (ก) แกนและจุดอ้างอิงของพิกเซลในรูป (ข) แกนและจุดอ้างอิงในพิกัด 3 มิติของโลกจริง

ขั้นตอนแรกแปลงตำแหน่งพิกเซลด้วยการย้ายจุดอ้างอิงจากมุมบนซ้ายมาเป็นจุดกึ่งกลางภาพดังสมการ

$$x' = x - c_x$$
$$y' = -(y - c_y) \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x, y เป็นตำแหน่งพิกเซลในแนวแกน x และ y ตามลำดับ c_x, c_y เป็นตำแหน่งพิกเซลกึ่งกลางรูปในแนวแกน x และ y ตามลำดับ สำหรับแนวแกน y เนื่องจากมีการกลับทิศทางจึงต้องใส่ค่าลบนำหน้าด้วย

ขั้นตอนต่อไปต้องคำนวณหาว่าแต่ละพิกเซลจะอยู่ในตำแหน่งไหนบนเซ็นเซอร์ของกล้อง ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบขนาดของเซ็นเซอร์ในแนวนอนและแนวตั้ง แล้วคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างพิกเซลกับหน่วยวัดในโลกจริง นำอัตราส่วนนี้มาคูณเข้ากับตำแหน่งที่ได้จากสมการ 3.4 ดังนี้

$$\begin{aligned} x'' &= x'(h_s / X) \\ y'' &= y'(v_s / Y) \end{aligned} \tag{3.5}$$

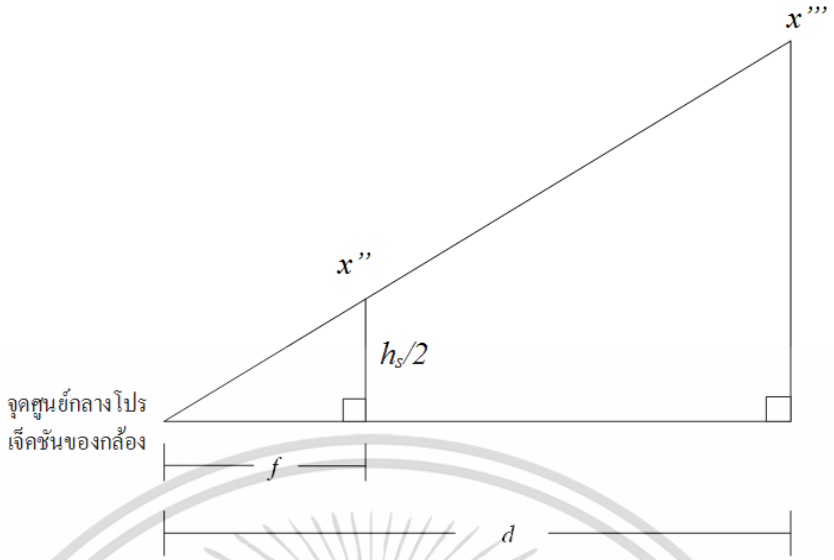
h_s เป็นขนาดของเซ็นเซอร์กล้องในแนวนอน v_s เป็นขนาดของเซ็นเซอร์กล้องในแนวตั้ง X และ Y เป็นจำนวนพิกเซลทั้งหมดในแกน x และ y ตามลำดับ

ตำแหน่งใหม่ที่ได้นี้จะเป็นตำแหน่งของแต่ละพิกเซลบนเซ็นเซอร์ของกล้อง เมื่อตำแหน่งดังกล่าวอ้างอิงกับตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริง ก็จะต้องเพิ่มตำแหน่งสำหรับแนวแกน z ซึ่งก็คือค่าความยาวโฟกัสของกล้องนั่นเอง สุดท้ายแล้วจะได้ตำแหน่งของแต่ละพิกเซลในพิกัด 3 มิติของโลกจริงเป็น

$$\mathbf{s} = [x'' \; y'' \; f]^T \tag{3.6}$$

โดยที่ f เป็นความยาวโฟกัสของกล้อง เวกเตอร์ $\mathbf{s}$ ที่ได้เป็นเพียงตำแหน่งบนเซ็นเซอร์ของกล้องเท่านั้น ถ้าต้องการทราบว่าตำแหน่งนี้ในระยะความลึกที่แตกต่างออกไป เช่น ในกรณีนี้ต้องการทราบว่าแต่ละตำแหน่งของพิกเซลเกิดจากแสงที่สะท้อนจากตำแหน่งใดบนพื้นระนาบซึ่งอยู่ห่างจากกล้องออกไปเป็นระยะทาง d การคำนวณนี้สามารถใช้กฎสามเหลี่ยมคล้ายมาช่วยแก้ปัญหาได้ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การหาตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริงโดยใช้กฎสามเหลี่ยมคล้าย

จากกฎของสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ตำแหน่งในแนวแกน x และ y ของจุด **s** เมื่ออยู่บนระนาบที่มีระยะห่าง d จากจุดศูนย์กลางโปรเจ็คชันของกล้อง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x''' &= x''(d/f) \\ y''' &= y''(d/f) \end{aligned} \tag{3.7}$$

สุดท้ายแล้วจะได้ตำแหน่งของแต่ละพิกเซลในพิกัด 3 มิติของโลกจริงบนระนาบที่อยู่ห่างจากกล้องเป็นระยะทาง d คือ

$$\mathbf{s}' = [x''' \; y''' \; d]^T \tag{3.8}$$

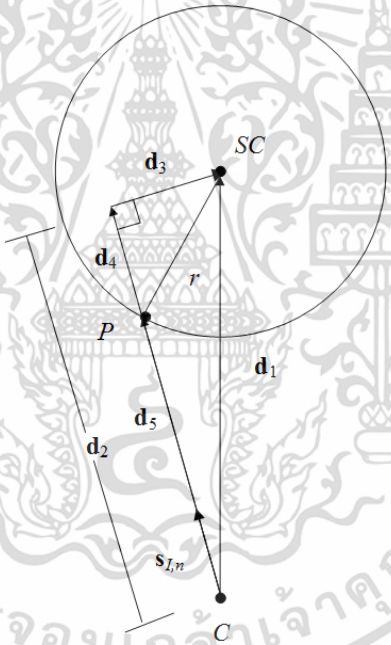
3.5 การหาตำแหน่งจุดสเปคคูลาร์พีคในพิกัด 3 มิติของโลกจริง

จากหัวข้อ 3.3 ตำแหน่งสเปคคูลาร์พีคในพิกัด 3 มิติของโลกจริง (จุด P ในหัวข้อ 3.3) เป็นตำแหน่งที่จำเป็นต่อการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง โดยเมื่อได้ตำแหน่งของพิกเซลของจุดสเปคคูลาร์พีคจากหัวข้อ 3.2 แล้ว ขั้นแรกเป็นการนำจุดดังกล่าวมาหาตำแหน่งในพิกัด 3 มิติของโลกจริงบนเซนเซอร์ของกล้อง โดยกำหนดให้แทนด้วยเวกเตอร์ s_I นำมาทำการนอร์มอลไลซ์ (normalize) เพื่อให้มีขนาดเป็น 1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{s}_{I,n} = \frac{\mathbf{s}_I}{\|\mathbf{s}_I\|} \tag{3.9}$$

จากรูปที่ 3.5 เป็นมุมมองด้านบนของระนาบที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางทรงกลม จุด *SC* คือจุดศูนย์กลางทรงกลม *r* คือรัศมีของทรงกลม *C* คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางโปรเจ็คชันของกล้อง ซึ่งตำแหน่งเหล่านี้เป็นตำแหน่งที่ต้องทราบตามข้อกำหนดของวิธีการอยู่แล้ว $\mathbf{d}_1$ เป็นเวกเตอร์ของเส้นที่ลากจากจุด *C* ไปยังจุด *SC* เส้น $\mathbf{d}_2$ เป็นเวกเตอร์ที่ลากจากจุด *C* ไปตั้งฉากกับเวกเตอร์ $\mathbf{d}_3$ เส้น $\mathbf{d}_3$ เป็นเวกเตอร์ที่ลากจากจุดที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์ $\mathbf{d}_2$ ไปยังจุด *SC* จุด *P* เป็นจุดสเปคคูลาร์พีคบนพื้นผิวของทรงกลมซึ่งเป็นจุดที่ต้องการหา เวกเตอร์ $\mathbf{d}_4$ เป็นเวกเตอร์ที่ลากจากจุด *P* มายังจุดที่เวกเตอร์ $\mathbf{d}_2$ ตั้งฉากกับเวกเตอร์ $\mathbf{d}_3$ เส้น $\mathbf{d}_5$ คือเวกเตอร์ที่ลากจากจุด *C* มายังจุด *P* และ *r* คือรัศมีของทรงกลม



รูปที่ 3.5 การหาตำแหน่งจุดสเปคคูลาร์พีค *P* บนพื้นผิววัตถุ

หาความยาวของเวกเตอร์ $\mathbf{d}_2$ ได้ดังสมการ 3.10

$$\|\mathbf{d}_2\| = \mathbf{s}_{I,n} \cdot \mathbf{d}_1 \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีสามเหลี่ยมมุมฉากของพิทาโกรัสสามารถคำนวณหาความยาวของเส้น $\mathbf{d}_3$ ได้ดังนี้

$$\|\mathbf{d}_3\| = \sqrt{\|\mathbf{d}_1\|^2 - \|\mathbf{d}_2\|^2} \tag{3.11}$$

เช่นเดียวกับสมการ 3.11 สามารถคำนวณหาความยาวของเส้น $\mathbf{d}_4$ โดยใช้ทฤษฎีสามเหลี่ยมมุมฉาก

$$\|\mathbf{d}_4\| = \sqrt{r^2 - \|\mathbf{d}_3\|^2} \tag{3.12}$$

เมื่อทราบความยาวของเส้น $\mathbf{d}_4$ แล้วก็จะสามารถหาความยาวของเส้น $\mathbf{d}_5$ ได้จาก

$$\|\mathbf{d}_5\| = \|\mathbf{d}_2\| - \|\mathbf{d}_4\| \tag{3.13}$$

ความยาวของเส้น $\mathbf{d}_5$ คือความยาวจากจุด C ไปยังจุด P ซึ่งก็คือจุดสเปคคูลาร์พีคบนพื้นผิวทรงกลมซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการหา ดังนั้นจุด P จึงคำนวณหาได้ดังนี้

$$P = C + \mathbf{s}_{I,n}(\|\mathbf{d}_5\|) \tag{3.14}$$

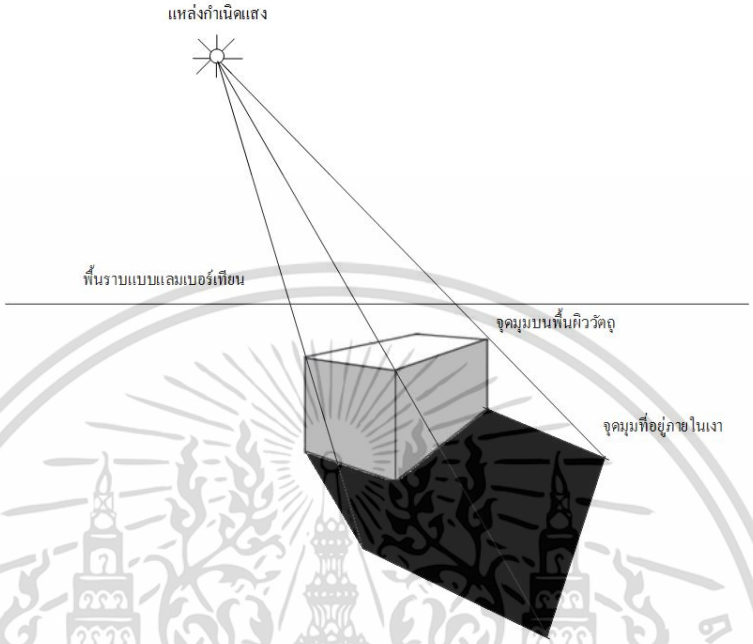
อนึ่ง ในงานวิจัยนี้ อาศัยการวัดตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้จุดศูนย์กลางโปรเจ็คชันของกล้องเป็นจุดกำเนิด ดังนั้น ในกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของ C

3.6 การใช้จุดไม่ต่อเนื่องในการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง

ฟีเจอร์ (features) คือคุณลักษณะบางอย่างที่เด่นชัดของรูปภาพ ฟีเจอร์อาจเป็นส่วนของขอบ มุม บล็อบ (blobs) ของวัตถุในภาพหรือส่วนที่เป็นสันหรือนูนขึ้นมา ซึ่งลักษณะเหล่านี้เป็นลักษณะที่เด่นชัดในภาพและสามารถที่จะตรวจหาได้ง่ายกว่าส่วนอื่นที่ไม่มีคุณลักษณะเด่นชัดใดๆ การค้นหาฟีเจอร์ในภาพเป็นวิธีการประมวลผลภาพเพื่อใช้ในการค้นหาตำแหน่งของจุดพิกเซลในภาพที่เราสนใจซึ่งจุดนั้นจะมีคุณลักษณะที่เด่นชัดบางอย่าง [27] ในงานวิจัยนี้ต้องการค้นหาจุดมุมของวัตถุในบริเวณที่เกิดเงาบนพื้น ซึ่งหากสามารถหาจุดมุมที่อยู่ในเงาซึ่งสัมพันธ์กับจุดเดียวกันบนพื้นผิววัตถุที่ทำให้เกิดจุดนี้ในเงาแล้ว เมื่อลากเส้นจากจุดมุมในเงาไปยังจุดที่สัมพันธ์กันบนพื้นผิววัตถุ ทิศทางที่ได้จะเป็นทิศทางที่ชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ทำให้เกิดเงาของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังกล่าวนี้ ดังรูปที่ 3.6 หากวัตถุเป็นกล่องสี่เหลี่ยม เมื่อลากเส้นจากจุดมุมในเงาแต่ละจุดไปยังจุดมุมที่สัมพันธ์กันบนพื้นผิววัตถุ ทิศทางที่ได้ล้วนชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง

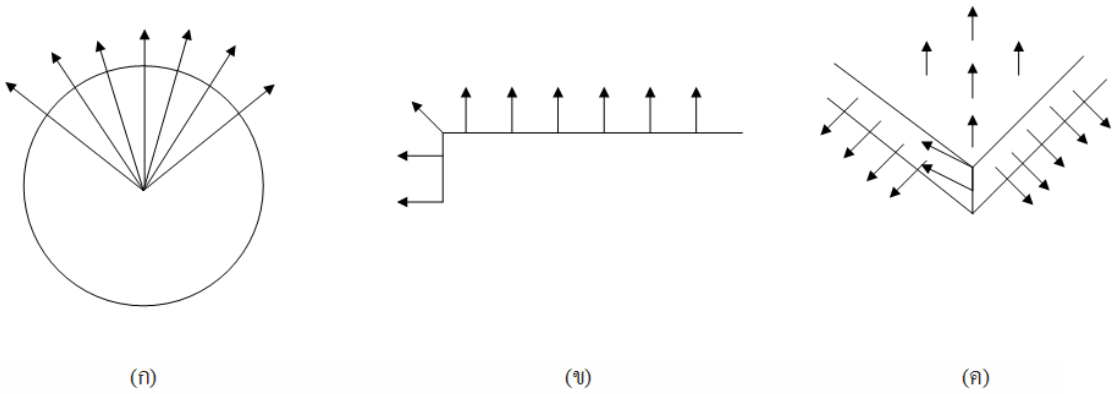


รูปที่ 3.6 จุดมุมที่อยู่ภายในเงาและจุดมุมบนพื้นผิววัตถุที่สัมพันธ์กันสามารถใช้ในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง

จุดมุมเป็นรูปแบบหนึ่งของจุดไม่ต่อเนื่อง ซึ่งจุดไม่ต่อเนื่องคือจุดที่เซอร์เฟสนอร์มอลมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปอย่างกะทันหัน

พิจารณาจากรูปที่ 3.7 รูป (ก) แสดงเซอร์เฟสนอร์มอลของวัตถุทรงกลม ซึ่งจะพบว่าเซอร์เฟสนอร์มอลในแต่ละจุดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอจึงถือว่าจุดเหล่านี้มีความต่อเนื่อง ส่วนรูป (ข) แสดงเซอร์เฟสนอร์มอลของกล่องสี่เหลี่ยมบริเวณขอบกล่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซอร์เฟสนอร์มอลที่จุดขอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปมากจากจุดข้างเคียง เป็นรูปแบบของจุดที่ไม่ต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามจุดขอบของกล่องนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของทิศทางของมุมในแนวนอนหรือแนวตั้งมุมใดมุมหนึ่งเท่านั้น มุมอีกแนวหนึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และรูป (ค) แสดงเซอร์เฟสนอร์มอลของกล่องสี่เหลี่ยมบริเวณมุมกล่อง ซึ่งจะพบว่าจุดที่มุมกล่องนั้นเป็นจุดไม่ต่อเนื่องเช่นกัน เพราะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเซอร์เฟสนอร์มอลไปจากจุดข้างเคียงอย่างมาก โดยจุดมุมนี้จะแตกต่างจากจุดขอบตรงที่การเปลี่ยนแปลงของทิศทางนั้นเป็นไปทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



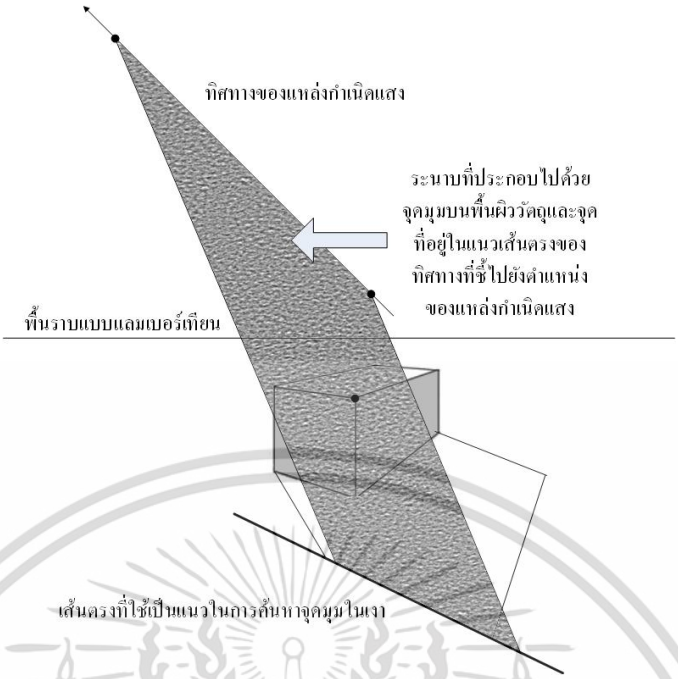
รูปที่ 3.7 เซอร์เฟสนอร์มอลของรูปทรงต่างๆ (ก) ทรงกลม (ข) ขอบของกล่องสี่เหลี่ยม (ค) มุมของกล่องสี่เหลี่ยม

สำหรับวิธีการที่นำเสนอนี้เลือกใช้จุดไม่ต่อเนื่องที่เป็นจุดมุม เนื่องจากเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงของเซอร์เฟสนอร์มอลอย่างเด่นชัดและสามารถค้นหาจากรูปภาพได้ง่ายกว่าจุดไม่ต่อเนื่องในแบบอื่น ในที่นี้จะใช้คำว่าจุดมุมบนเงา (shadow corner point) สำหรับจุดมุมที่อยู่บริเวณขอบเงาและใช้คำว่าจุดมุมบนพื้นผิว (surface corner point) สำหรับจุดมุมที่อยู่บนพื้นผิวของวัตถุ

ในการค้นหาจุดมุมในเงาจากรูปภาพ หากใช้การค้นหาทั้งภาพจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีนัก เนื่องจากในภาพนั้นมีจุดมากมายที่มีลักษณะเป็นจุดไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจำกัดขอบเขตในการค้นหาเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากหัวข้อ 3.3 อธิบายถึงการใช้จุดสเปคคูลาร์พีคในการหาทิศทางของแสงเมื่อเทียบกับจุดดังกล่าว ทิศทางที่ได้นี้สามารถนำมาใช้ในการจำกัดขอบเขตการค้นหาจุดมุมในเงาได้ นั่นคือเมื่อทำการสร้างระนาบซึ่งประกอบไปด้วยจุดมุมบนพื้นผิวและอีกสองจุดที่อยู่ในแนวเส้นที่เป็นทิศทางของแสงซึ่งได้จากจุดสเปคคูลาร์พีค ระนาบที่ได้จะตัดเป็นแนวเส้นตรงซึ่งลากผ่านจุดมุมในเงาซึ่งเป็นจุดที่สัมพันธ์กับจุดมุมบนพื้นผิว เส้นตรงที่ได้นี้สามารถนำมาใช้ในการค้นหาจุดมุมในเงาเฉพาะที่อยู่ตามแนวเส้นนี้ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากขึ้น ดังรูปที่ 3.8 อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนซึ่งอาจจะเกิดได้จากหลายปัจจัย อาจจะทำให้จุดมุมในเงาที่ต้องการค้นหานี้ อาจไม่ได้อยู่ในแนวของเส้นตรงดังกล่าว จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าเทรชโฮลด์ เพื่อขยายขอบเขตการค้นหารอบๆ แนวเส้นนี้ออกไปอีกเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เส้นตรงที่ใช้เป็นแนวในการค้นหาจุดมุมบนเงาได้จากระนาบซึ่งประกอบไปด้วยจุดมุมบนพื้นผิวและจุดที่อยู่ในแนวเส้นตรงของทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงตัดกับพื้นผิวราบที่เกิดเงา

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการค้นหาจุดมุมด้วยวิธีการของ Harris [28] ซึ่งจะเป็นวิธีการในการหาความแปรปรวนของค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเรียกว่าค่าเกรเดี้ยนท์ (gradient) วิธีการนี้จะทำการแบ่งพิกเซลในรูปภาพออกเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่เรียกว่าวินโดว์ (window) แล้วทำการหาค่าความแปรปรวนของเกรเดี้ยนท์ในแต่ละวิน โดว์ ซึ่งวินโดว์ใดที่มีค่าความแปรปรวนของเกรเดี้ยนท์สูงกว่าเทรชโฮลด์ที่ตั้งไว้ก็จะถือว่ามีจุดมุมอยู่ในวินโดว์นั้น

ผลลัพธ์ที่ได้จากการค้นหาจุดมุมบนเงานี้มักจะมีด้วยกันหลายจุด ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขอบเขตในการค้นหา วิธีการในการค้นหา ค่าเทรชโฮลด์ที่ใช้ในวิธีการค้นหา ความคมชัดของเงา ซึ่งโดยวิธีการปกติแล้วอาจจะเลือกใช้จุดฟีเจอร์จุดแรกที่ค้นหาได้ เนื่องจากเป็นจุดที่มีความน่าจะเป็นสูงที่จะเป็นจุดฟีเจอร์ที่ต้องการ ซึ่งหากจุดที่เลือกนี้เป็นจุดที่ถูกต้อง เมื่อลากเส้นจากจุดดังกล่าวมายังจุดไม่ต่อเนื่องบนพื้นผิววัตถุแล้วจะทำให้ได้เวกเตอร์ที่ชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงอีกทิศทางหนึ่ง เมื่อนำเวกเตอร์นี้ไปหาจุดตัดกับเวกเตอร์ที่ได้จากจุดสเปคคูลาร์พีคในหัวข้อ 3.2 จุดตัดที่ได้ก็คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่สัมพันธ์กับจุดสเปคคูลาร์พีคและเงาที่เกิดขึ้นนั่นเอง

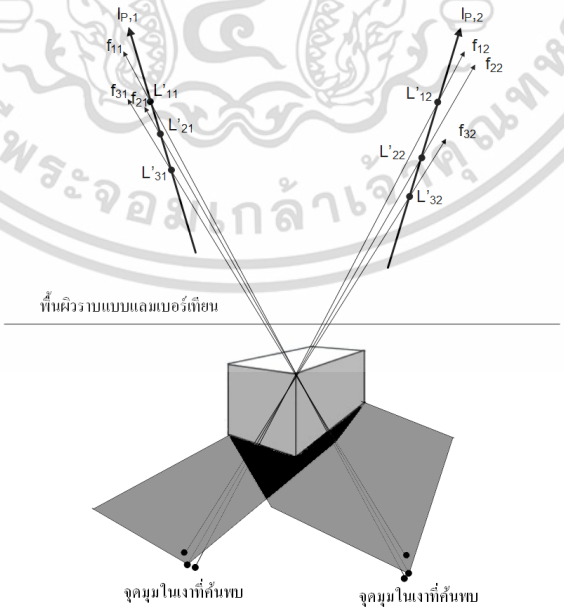
อย่างไรก็ตามการเลือกจุดมุมในเงาจุดแรกนั้นมีโอกาสที่จะมีความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะหากเงาที่เกิดขึ้นในภาพนั้นเป็นซอฟต์แชโดว์ (soft shadow) แทนที่จะเป็นฮาร์ดแชโดว์ (hard shadow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์ดแชโดว์นั้นขอบของเงาจะมีความคมชัด ซึ่งลักษณะของเงาแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบจุดที่มีขนาดเล็กมาก รวมถึงวัตถุอยู่ใกล้กับพื้นผิวที่จะฉายเงาลงไป การค้นหาจุดมุมในเงาจากเงาที่มีลักษณะแบบนี้จึงมีแนวโน้มที่จะมีความถูกต้องมากกว่า เพราะการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่างในจุดมุมในเงานั้นจะมีสูง ทำให้วิธีการในการเลือกจุดมุมในเงาจุดแรกที่ค้นหาได้นั้นอาจจะให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

แต่เงาในสภาพแวดล้อมจริงนั้นส่วนใหญ่จะมีความไม่คมชัดในบริเวณขอบของเงามากน้อยต่างกัน อันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น แหล่งกำเนิดแสงนั้นมีขนาด ไม่ได้เป็นเพียงจุดเล็กๆ จุดเดียว ทำให้ขอบของเงาเกิดความไม่คมชัด หรือการที่มีแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งที่อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ห่างกันมากนักก็จะทำให้ขอบของเงาไม่คมชัดได้ในลักษณะเดียวกัน การค้นหาจุดมุมในเงานั้นก็จะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น การเลือกจุดแรกที่ค้นหาได้อาจจะทำให้การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงผิดพลาดไปได้มาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการในการค้นหาตำแหน่งจุดมุมในเงาที่ดีที่สุด ซึ่งจะทำให้การคำนวณค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั้นถูกต้องมากยิ่งขึ้นแม้ว่าเงาที่เกิดขึ้นในภาพจะเป็นแบบซอฟต์แชโดว์ก็ตาม

เมื่อค้นหาจุดมุมในเงาเสร็จแล้ว จะได้ตำแหน่งของจุดมุมในเงาที่เป็นไปได้มาจำนวนหนึ่ง ทำการสร้างเส้นที่ลากจากจุดมุมในเงาที่เป็นไปได้แต่ละจุดไปยังจุดมุมบนพื้นผิววัตถุที่สัมพันธ์กันจะทำให้ได้เวกเตอร์ที่เป็นทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้มาจำนวนหนึ่ง จากรูปที่ 3.9 เวกเตอร์เหล่านี้จะแทนด้วย $\mathbf{f}_{mn}$ ซึ่ง $m = 1, \ldots, M$ และ $n = 1, \ldots, N$ โดยที่ M คือจำนวนจุดมุมในเงา ที่ค้นหาได้ทั้งหมด และ N คือจำนวนของแหล่งกำเนิดแสง

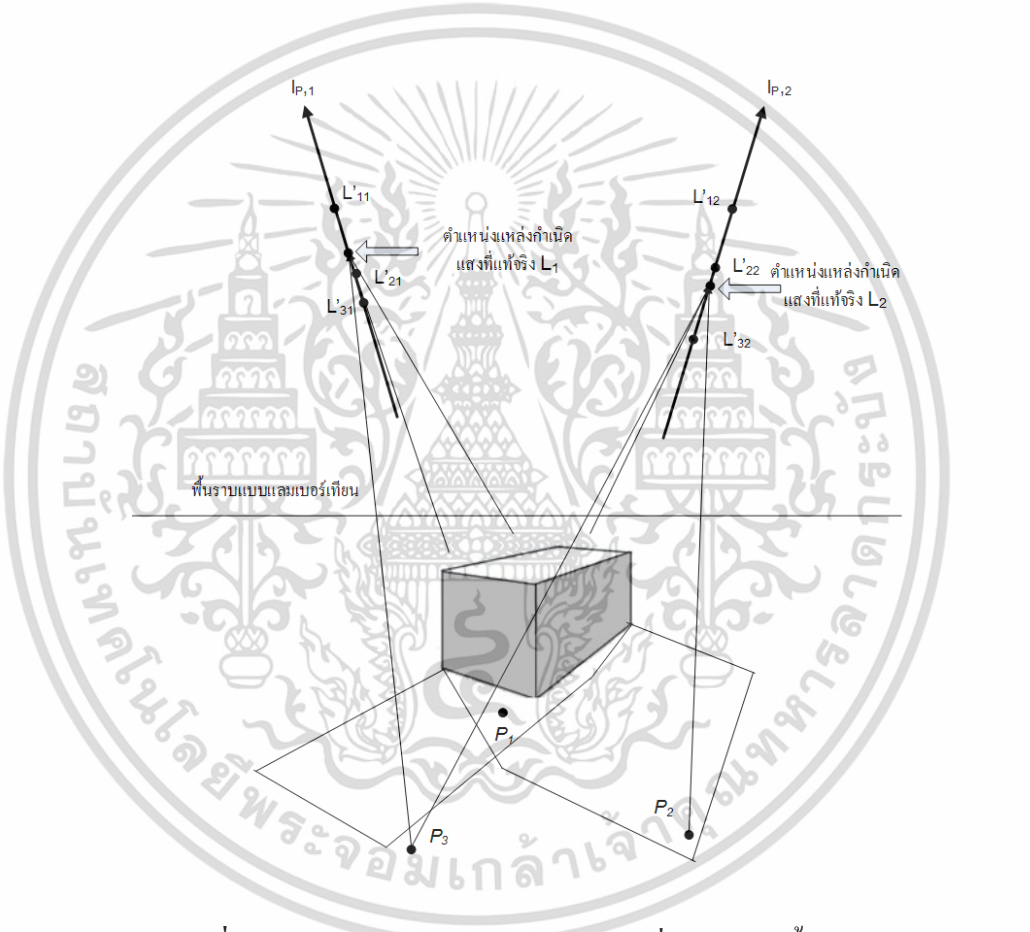


รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ประมาณค่าจากจุดมุมในเงาที่ค้นพบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ทิศทางที่ได้จากจุดสเปคคูลาร์พีคนั้นจะแทนด้วย $\mathbf{l}_{Pn}$ โดยให้ P_n คือจุดสเปคคูลาร์พีคบนผิววัตถุที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสง n เมื่อได้รับปริมาณสเกลาร์ค่าหนึ่งที่เหมาะสม แทนด้วย β_m จุดตัดระหว่างเวกเตอร์ $\mathbf{f}_{mn}$ และจุด $P_n + \beta_m . \mathbf{l}_{Pn}$ คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวน M จุดสำหรับแหล่งกำเนิดแสงที่ n โดยตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้เหล่านี้แทนด้วย $L'_{1,n}, \ldots, L'_{M,n}$

3.7 การใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง



รูปที่ 3.10 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงถูกบังที่บางจุดบนพื้นราบ

เช่นเดียวกับวิธีการของ Sato [6][7][8] งานวิจัยนี้ใช้ประโยชน์จากข้อมูลของปริมาณแสงสะท้อนและเงาบนพื้นราบแบบแลมเบอร์เทียน ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุซึ่งรู้ตำแหน่งและรูปทรง และตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ข้อมูลปริมาณแสงสะท้อนทั้งในบริเวณที่ได้รับแสดงบริเวณที่อยู่ในเงา นี้มีสามารถนำมาใช้ในการเลือกตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากหลายตำแหน่งที่คำนวณได้ในข้อ 3.6 จากรูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง วัตถุ และจุดต่างๆ ภายในเงา จุด P_1 เป็นจุดที่อยู่ภายในเงาที่ซ้อนทับกันระหว่างเงา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 และเงาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 ซึ่งจะพบว่าเมื่อ L'_{21} และ L'_{22} คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกต้องของแหล่งกำเนิดแสงหมายเลข 1 และ 2 ตามลำดับ ลำแสงที่ส่องมาจากทั้งแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองจะถูกบังด้วยวัตถุ ทำให้จุด P_1 ไม่ได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงใดๆ ซึ่งจะเป็นบริเวณเงาที่มืดที่สุด ส่วนจุด P_2 จะเป็นจุดภายในเงาเช่นกัน แต่จะเป็นเงาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 เพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อดูทิศทางของแสงทั้งสองแล้วจะพบว่าจุด P_2 นั้นจะไม่ได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 เพราะถูกบังด้วยวัตถุ แต่ยังคงได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 และจุด P_3 เป็นจุดที่อยู่นอกบริเวณที่เกิดเงา ซึ่งจะพบว่าจุดนี้ได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทั้งสองโดยลำแสงไม่ได้ถูกบังด้วยวัตถุเลย

จากตัวอย่างข้างต้น หากทราบความสัมพันธ์ในลักษณะนี้แล้วจะทำให้ทราบได้ว่าแต่ละจุดจะได้รับแสงจากแหล่งกำเนิดแสงใดบ้าง และเนื่องจากพื้นราบที่ใช้มีพื้นผิวแบบแลมเบอร์เทียนจึงสามารถคำนวณหาปริมาณแสงที่สะท้อนจากแต่ละจุดบนพื้นราบโดยใช้สมการดิฟฟิวส์ได้ ซึ่งเมื่อนำข้อมูลนี้มารวมกับข้อมูลที่ได้จากเงาจะทำให้สามารถหาปริมาณแสงแบบดิฟฟิวส์ที่สะท้อนออกมาจากแต่ละจุดได้ดังนี้

$$I_k = \sum_{n=1}^{N} \frac{K_d E_n \cos(\theta_{k,n}) S_{k,n}}{\|L_n - P_k\|^2} \tag{3.15}$$

จากสมการ 3.15 L_n คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง n และ P_k คือตำแหน่งของจุดบนพื้นราบ E_n และ $\theta_{k,n}$ คือ ความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสง n และมุมที่ทำกับเซอร์เฟสนอร์มอลของจุด k ตามลำดับ พารามิเตอร์ K_d คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงดิฟฟิวส์ของพื้นผิว และ $S_{k,n}$ แทนสัมประสิทธิ์การถูกบังด้วยวัตถุ โดย $S_{k,n}$ จะมีค่าเป็น 0 ถ้าลำแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง n ถูกบังที่จุด k และมีค่าเป็น 1 ถ้าลำแสงไม่ถูกบัง

เนื่องจากมีจุดมุมในเงาหลายจุดที่เป็นไปได้ ทำให้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง L_n เป็นไปได้หลายตำแหน่ง ยกตัวอย่างกรณีมีแหล่งกำเนิดแสงเพียงแหล่งเดียว แต่มีตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้สามจุด $L'_{1,n}$, $L_{,2,n}$ และ $L'_{3,n}$ ดังนั้นค่าของ L_n ในสมการ 3.15 จะถูกแทนค่าด้วยตำแหน่งของสามจุดดังกล่าวไปทีละจุดเพื่อหาว่าจุดใดที่ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับภาพที่ถ่ายมากที่สุด นั่นคือตำแหน่งนั้นให้ผลลัพธ์ที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อนำไปใช้กับสมการ 3.15 นั่นเอง

จากสมการข้างต้น การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ดีที่สุด สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของการหาผลเฉลยของเซ็ตสมการเชิงเส้นดังนี้

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \tag{3.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \alpha_{1,3} & \cdots & \alpha_{1,N} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \alpha_{2,3} & \cdots & \alpha_{2,N} \\ \alpha_{3,1} & \alpha_{3,2} & \alpha_{3,3} & \cdots & \alpha_{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{K,1} & \alpha_{K,2} & \alpha_{K,3} & \cdots & \alpha_{K,N} \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$\mathbf{b}=\begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & \cdots & I_K \end{bmatrix}^T \tag{3.18}$$

$$\mathbf{x}=\begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 & \cdots & E_K \end{bmatrix}^T \tag{3.19}$$

$$\alpha_{k,n}=\frac{K_d E_n \cos(\theta_{k,n}) S_{k,n}}{\|L_n - P_k\|^2} \tag{3.20}$$

สมการที่ 3.15 สามารถแก้สมการได้ด้วยวิธีการนอนเนกาทีฟลีสต์สแควร์ (non-negative least squares solution) [29] เนื่องจากหากใช้วิธีการแก้สมการแบบลีสต์สแควร์แบบปกติอาจทำให้ผลเฉลยเป็นลบได้ ในขณะที่ค่าความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงนั้นไม่มีค่าลบ การใช้วิธีนอนเนกาทีฟลีสต์สแควร์จึงเหมาะสมกับกรณีนี้มากกว่า เมื่อได้ผลเฉลยซึ่งก็คือเวกเตอร์ $\mathbf{x}$ แล้ว จึงนำผลที่ได้มาหาค่าความผิดพลาดรูทมีนสแควร์ (RMSE) เมื่อเทียบกับค่าความสว่างที่ได้จากแต่ละพิกเซลในรูปที่ถ่ายมา ดังสมการ 3.21

$$e_{rmse}=\sqrt{\|\mathbf{A}\mathbf{x}_{nnls}-\mathbf{b}\|} \tag{3.21}$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดนั่นคือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกต้องมากที่สุดนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดแสงเพียงแหล่งเดียว มีตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง $L'_{1,1}$, $L'_{2,1}$, $L'_{3,1}$ เมื่อนำแต่ละค่ามาทดสอบโดยให้ $L_1 = L'_m$, $m = 1, 2, 3$ จะได้ค่าความผิดพลาดตามสมการ 3.21 ออกมา 3 ค่า จากนั้นเลือก $L'_{m,1}$ ให้เป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกต้องมากที่สุดเมื่อ $e_{rmse,m}$ มีค่าน้อยที่สุด สำหรับกรณีที่มีหลายแหล่งกำเนิดแสงก็สามารถใช้หลักการเดียวกันได้โดยตรง

ขั้นตอนการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์นี้นอกจากจะใช้สำหรับการเลือกจุดมุมบนเงาที่ดีที่สุดแล้ว ยังสามารถใช้ในการปรับปรุงตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์พีคได้อีกด้วยเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของจุดสเปคคูลาร์พีคนั้นส่งผลต่อความถูกต้องของการตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสงเช่นเดียวกัน และอาจจะมีผลมากกว่าความคลาดเคลื่อนของจุดมุมบนเงาอีกด้วย การใช้ทรงกลมเพียงลูกเดียวร่วมกับจุดมุม ช่วยลดความผิดพลาดของการคำนวณตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงได้ มากกว่าการวิธีการดั้งเดิมที่ใช้ที่ใช้จุดตัดของทิศทางสองทิศทางที่ได้จากจุดสเปคคูลาร์พีคบนทรงกลมสองลูกหรือจากภาพถ่ายสองมุม เนื่องจากระยะห่างระหว่างจุดมุมบริเวณขอบของเงาและจุดมุมบนพื้นผิววัตถุมักจะมากกว่ารัศมีของทรงกลม ทั้งยังสามารถเพิ่มระยะห่างดังกล่าวได้ง่ายด้วยการเคลื่อนย้ายตำแหน่งของทรงกลม ระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดความแตกต่างของมุมระหว่างเวกเตอร์ที่ลากไปยังตำแหน่งที่ถูกและตำแหน่งที่ผิดได้ ดังนั้นถึงแม้ตำแหน่งของจุดมุมจะมีความคลาดเคลื่อนบ้างก็ยังมีผลต่อความถูกต้องน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนของจุดสเปคคูลาร์พีค ดังรูปที่ 3.11 ระยะทางจากจุด S_1 ไปยังจุด P_1 มากกว่าระยะทางจากจุด S_2 ไปยังจุด P_1 หากตำแหน่ง P_1 เกิดความคลาดเคลื่อนไปเป็นตำแหน่ง P_2 จะพบว่าระยะทางระหว่างจุดที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อมุมระหว่างเวกเตอร์ที่ต่างกัน

รูปที่ 3.11 ระยะห่างที่น้อยส่งผลต่อมุมที่เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าระยะทางที่มาก

การปรับตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์พีคทำได้เช่นเดียวกันกับการปรับตำแหน่งของจุดมุมบนเงา ในที่นี้ใช้การปรับจุดสเปคคูลาร์พีคไปทีละหนึ่งพิกเซลตามทิศทางต่างๆ รอบจุดเดิมเพื่อนำไปคำนวณหาจุดตัดสำหรับแต่ละจุดสเปคคูลาร์ที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำจุดตัดที่ได้ไปแก้สมการเพื่อหาว่าจุดใดที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 ข้อกำหนดและขั้นตอนโดยสรุปของวิธีการที่นำเสนอ

วิธีการที่นำเสนอมีข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้

- ต้องทราบพารามิเตอร์ของกล้อง ตำแหน่ง และรูปทรงของวัตถุในฉาก
- มีแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดระยะใกล้ตั้งแต่หนึ่งจุดไปจนถึงหลายจุด
- จุดสเปคคูลาร์พีกที่สัมพันธ์กับแต่ละแหล่งกำเนิดแสงจะต้องถูกมองเห็นในรูปภาพได้เพื่อใช้จุดดังกล่าวเป็นข้อมูลในการประมาณค่าต่อไป
- ส่วนที่เป็นเงาซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดแสงแต่ละจุดจะต้องมองเห็นได้ในรูปภาพที่ถ่ายมา
- จะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของวัตถุและพื้นราบ
- พื้นราบเป็นพื้นผิวแบบแลมเบอร์เทียน
- วัตถุในฉากจะต้องมีจุดไม่ต่อเนื่องตั้งแต่หนึ่งจุดขึ้นไป ซึ่งจุดดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงของเซอร์เฟสนอร์มอลอย่างกระทันหันต่างจากจุดอื่น

กล่าวโดยสรุปวิธีในการประมาณค่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงหลายแหล่งแบบจุดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนดังนี้

1) ถ่ายภาพซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุทรงกลมซึ่งมองเห็นสเปคคูลาร์ไฮไลท์บนพื้นผิวและพื้นราบซึ่งมีเงาของวัตถุทรงกลมฉายลงไป

2) อ่านไฟล์รูปภาพ และกำหนดค่าที่จำเป็นต้องใช้ประกอบไปด้วย ตำแหน่งของทรงกลม, รัศมีของทรงกลม, ตำแหน่งของจุดไม่ต่อเนื่องบนวัตถุ, นอร์มอลเวกเตอร์ของพื้นราบที่มีเงา และระยะทางจากตำแหน่งกึ่งกลางของจุดโปรเจ็คชันของกล้องไปยังจุดกึ่งกลางพื้นราบ

3) หาตำแหน่งพิกเซลที่เป็นจุดสเปคคูลาร์พีคจากรูปภาพ แปลงตำแหน่งพิกเซลให้เป็นตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริง แล้วคำนวณหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงจากจุดสเปคคูลาร์พีคแต่ละจุด โดยใช้วิธีการในหัวข้อ 3.2-3.5

4) คำนวณหาเส้นที่ใช้เป็นแนวในการคำนวณหาจุดมุมในเงา โดยเส้นดังกล่าวเกิดจากการตัดกันของระนาบสองระนาบ ระนาบแรกคือพื้นราบที่มีเงา อีกระนาบคือระนาบที่ประกอบไปด้วยจุดมุมบนพื้นผิวและจุดซึ่งอยู่บนเส้นของทิศทางแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากข้อ 3)

5) ค้นหาตำแหน่งของจุดมุมในเงาตามแนวเส้นที่ได้จากข้อ 4) เก็บตำแหน่งของจุดมุมในเงาเหล่านี้เอาไว้ และแปลงตำแหน่งจากจุดพิกเซลไปเป็นตำแหน่ง 3 มิติในโลกจริงโดยใช้วิธีการในหัวข้อ 3.4

6) ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดแสงมากกว่าหนึ่ง จะต้องนำจุดมุมในเงาที่เกิดจากแต่ละแหล่งกำเนิดแสงมาจับคู่กันทั้งหมด แต่ละชุดของการจับคู่จะถูกนำไปทดสอบในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ใช้จุดมุมในเงาที่ได้มาหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมดทีละจุด ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดแสงมากกว่าหนึ่ง ก็จะต้องนำชุดของการจับคู่จุดมุมในเงาแต่ละชุดมาหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยใช้การหาตำแหน่งดังกล่าวจะใช้จุดตัดระหว่างเวกเตอร์ 2 เวกเตอร์นั่นคือ

- เวกเตอร์แรก เป็นเวกเตอร์ที่มีจุดเริ่มต้นจากตำแหน่งของจุดมุมในเงาไปยังจุดมุมบนพื้นผิววัตถุทรงกลม

- เวกเตอร์ที่สอง เป็นเวกเตอร์ที่มีจุดตั้งต้นจากตำแหน่งจุดสเปคคูลาร์พีค โดยมีทิศทางชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแต่ละแหล่ง ซึ่งคำนวณได้จากข้อ 3)

8) นำตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้ทั้งหมดมาทดสอบทีละจุดหรือทีละชุดในกรณีที่มีมากกว่าหนึ่งแหล่งกำเนิดแสง เพื่อดูว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง ที่ถูกต้องมากที่สุด โดยใช้สมการ 3.15

9) แก้สมการในข้อที่ 8) โดยการจัดให้อยู่ในรูปเซ็ตของสมการเชิงเส้น $\mathbf{Ax = b}$ แล้วใช้วิธีการแก้สมการแบบนอนเนกาทีฟลีสต์สแควร์ในการหาผลเฉลย

10) เมื่อนำเวกเตอร์ $\mathbf{x}$ ซึ่งเป็นผลเฉลยที่หาได้คูณเข้ากับเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ แล้วนำไปลบกับเวกเตอร์ $\mathbf{b}$ ขนาดของเวกเตอร์ที่ได้จะเป็นค่าความผิดพลาด ที่ใช้ในการวัดว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้จุดใดที่มีความถูกต้องมากที่สุด โดยจุดหรือชุดของจุดที่ได้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดนั่นคือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่แท้จริงมากที่สุด

11) เมื่อได้ตำแหน่งจุดมุมบนเงาที่ดีที่สุดแล้ว ทำการปรับตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์พีคได้โดยใช้วิธีการในข้อ 7) – 10) โดยเปลี่ยนตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์ไปทีละหนึ่งพิกเซลในทิศทางต่างๆ รอบจุดเดิม คำนวณหาจุดตัดสำหรับแต่ละจุดสเปคคูลาร์พีคที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วนำจุดตัดที่ได้ไปแก้สมการเพื่อหาว่าจุดใดที่ให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพสังเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำวิธีการในบทที่ 3 มาทำการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าวิธีการที่นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด โดยการทดลองในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองโดยใช้ภาพสังเคราะห์ที่สร้างจากโปรแกรมเบลนเดอร์ (Blender) ซึ่งทำให้สามารถทราบตำแหน่งของจุดต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับวิธีการนี้ได้อย่างแม่นยำ

รูปภาพที่ใช้มีขนาด 1000x1000 พิกเซล และมีแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดในระยะใกล้ มีตำแหน่งที่จะใช้ในการทดลองทั้งหมด 10 ตำแหน่ง โดยจุดกำเนิด (0,0,0) อยู่ที่กึ่งกลางพื้นระนาบซึ่งมีวัตถุวางอยู่ ตำแหน่งกล้องอยู่เหนือวัตถุ และมีทิศทางการมองลงมายังวัตถุ จากตำแหน่งนี้จะทำให้กล้องสามารถมองเห็นสเปคคูลาร์ไฮไลท์ที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของวัตถุได้อย่างทั่วถึง รวมไปถึงเงาที่ทอดลงไปบนพื้นด้วย วัตถุที่ใช้คือทรงกลมที่สามารถสะท้อนแสงสเปคคูลาร์ได้ดีและมีกรวยปลายแหลมยื่นออกมาอยู่ด้านบน ทรงกลมมีรัศมี 1.01 ในหน่วยเบลนเดอร์ (Blender unit) ซึ่งหลังจากนี้จะใช้ตัวย่อ bu แทนหน่วยเบลนเดอร์ และเมื่อเทียบกับหน่วยเมตรแล้ว 1 bu = 0.1 เมตร ส่วนกรวยนั้นมีความสูง 1 bu และมีรัศมีของฐานที่ 0.2 bu การทดลองแรกนี้จะนำภาพที่ถ่ายได้เมื่อกำหนดแหล่งกำเนิดแสงเป็นตำแหน่งต่างๆ เพียงจุดเดียว แล้วนำภาพที่ได้ไปคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใกล้เคียงที่สุดจากนั้นวัดความถูกต้องของตำแหน่งที่ได้เทียบกับตำแหน่งที่แท้จริงว่ามีระยะทางคลาดเคลื่อนไปเท่าใดในหน่วย bu และทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงที่คำนวณได้แตกต่างจากทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงที่แท้จริงเท่าใดในหน่วยองศา

โดยแต่ละจุดจะใช้ในการตรวจสอบผลกระทบที่เกิดจากมุมที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งมุมในแนวนอน (azimuth angle) และมุมในแนวตั้ง (elevation angle) รวมถึงระยะทางระหว่างวัตถุและแหล่งกำเนิดแสงว่าปัจจัยใดที่จะส่งผลต่อความถูกต้องของการคำนวณหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสง โดยแต่ละจุดจะทำมุมในแนวนอนกับเวกเตอร์ [1,0,0] และทำมุมในแนวตั้งกับเวกเตอร์ของตัวมันเองที่โปรเจ็คลงบนพื้นราบ ตำแหน่ง ทิศทาง และระยะทางทั้งหมดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

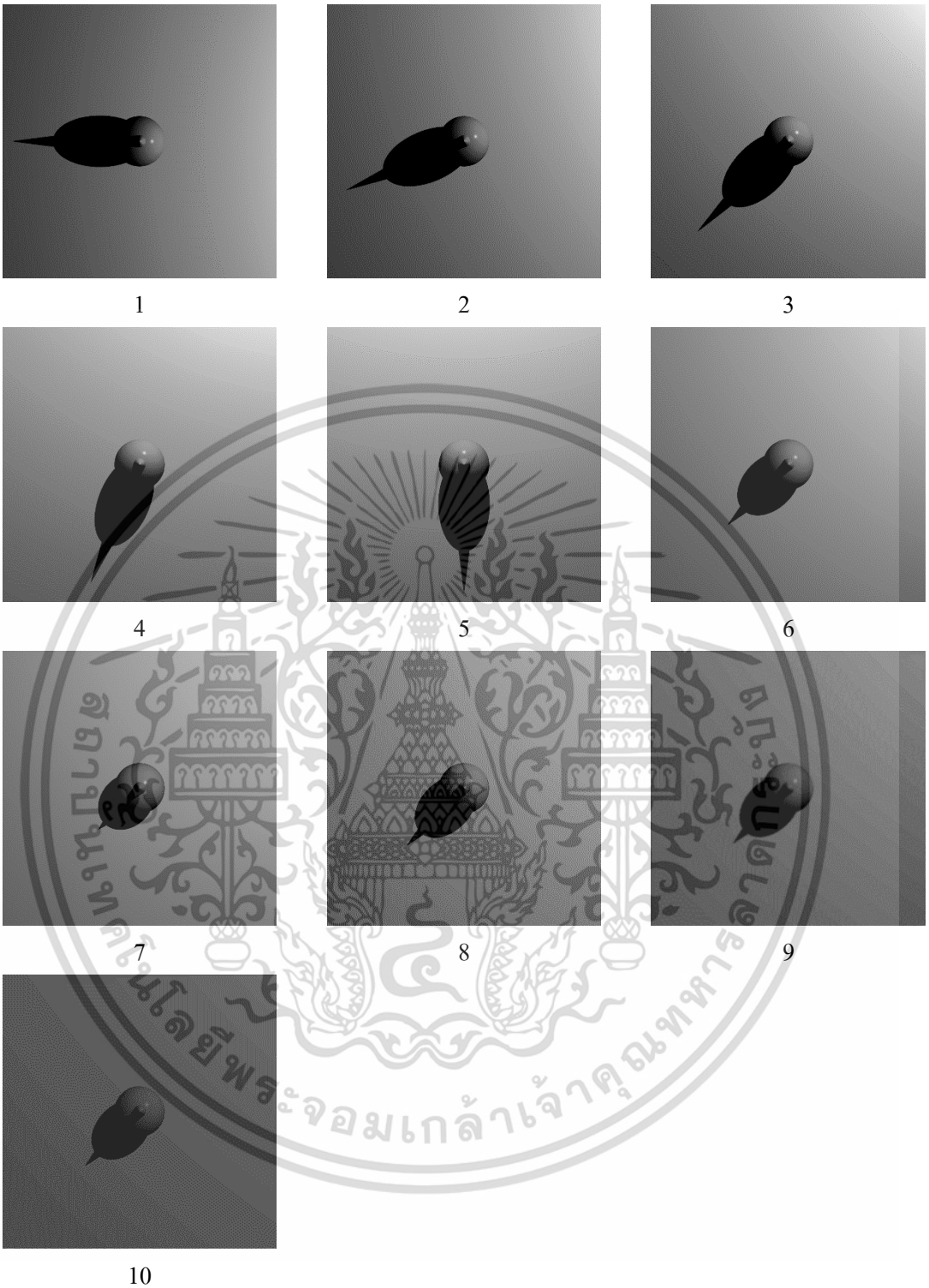
แหล่งกำเนิดแสง	ตำแหน่ง (bu) [*x*, *y*, *z*]	ทิศทางในแนวนอน (องศา)	ทิศทางในแนวตั้ง (องศา)	ระยะทาง (bu)
1	[20.48, 0.00, 14.34]	0	35	25
2	[18.92, 7.84, 14.34]	22.5	35	25
3	[14.48, 14.48, 14.34]	45	35	25
4	[7.84, 18.92, 14.34]	67.5	35	25
5	[0.00, 20.48, 14.34]	90	35	25
6	[12.5, 12.5, 17.68]	45	45	25
7	[10.14, 10.14, 20.48]	45	55	25
8	[17.5, 17.5, 24.75]	45	45	35
9	[22.5, 22.5, 31.82]	45	45	45
10	[27.5, 27.5, 38.9]	45	45	55

ตารางที่ 4.1 ตำแหน่ง ทิศทาง และระยะทางของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั้นแทนด้วยตัวเลข 3 ตัว ตัวเลขแรกเป็นตำแหน่งในแนวแกน x ตัวเลขตัวที่สองเป็นตำแหน่งในแนวแกน y และตัวเลขตัวที่สามเป็นตำแหน่งในแนวแกน z โดยแกนที่ใช้นั้นเป็นแกนมาตรฐานของเบลนเดอร์ซึ่งจะเป็นไปตามกฎมือขวา ซึ่งมีแกน z บวกชี้ออกมาจากจอภาพ

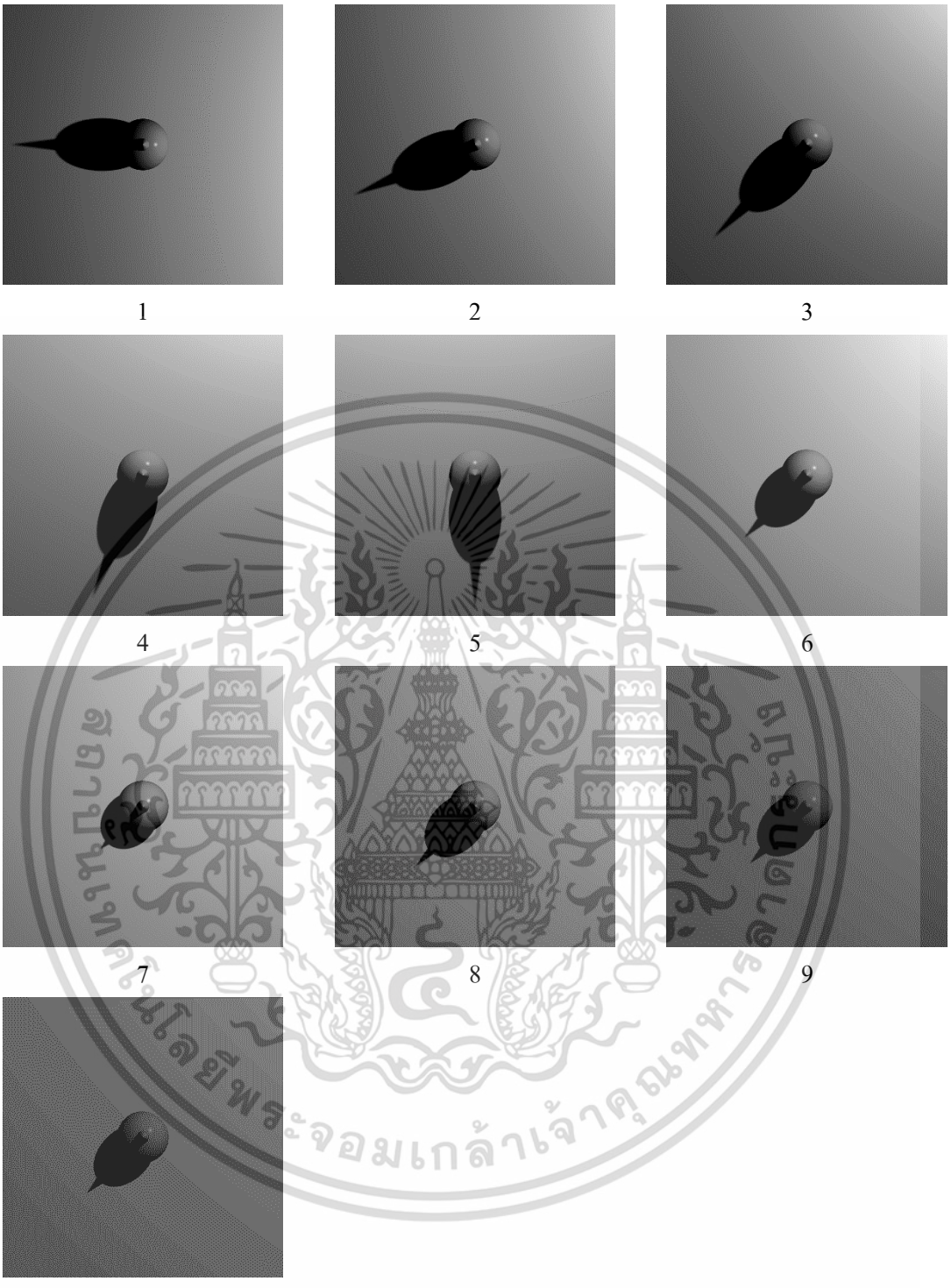
ในการทดลอง สำหรับแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดที่ใช้ ได้ทำการทดสอบกับขนาดของแหล่งกำเนิดแสงเป็น 0.1 bu และ 0.5 bu เพื่อทดสอบผลของเงาที่เป็นลักษณะของ ฮาร์ดแชโดว์และซอฟต์แชโดว์ ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบว่าประเภทของเงาที่เกิดขึ้นมีผลต่อการคำนวณตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงมากน้อยเพียงใด รูปที่ 4.1 แสดงภาพในแต่ละตำแหน่งของแหล่งกำนิดแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจุดเดียวขนาด 0.1 bu ซึ่งทำให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์ ส่วนรูปที่ 4.2 เป็นกรณีของแหล่งกำเนิดแสงขนาด 0.5 bu ซึ่งส่งผลทำให้เกิดเงาแบบซอฟต์แชโดว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปภาพที่ใช้ในการทดลองสำหรับแหล่งกำเนิดแสงจุดเดียวที่ก่อให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์ (ภาพมีการปรับความสว่างเพิ่มจากปกติเพื่อประโยชน์ในการนำเสนอ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปภาพที่ใช้ในการทดลองสำหรับแหล่งกำเนิดแสงจุดเดียวที่ก่อให้เกิดเงาแบบซอฟต์แชโดว์ (ภาพมีการปรับความสว่างเพิ่มจากปกติเพื่อประโยชน์ในการนำเสนอ)

การทดลองแรกในหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบวิธีการที่เสนอในหัวข้อ 3.6 โดยไม่ได้อาศัยสมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ในหัวข้อ 3.7 ประกอบในการปรับเพิ่มความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการคำนวณตำแหน่งแสง โดยจุดมุมบนเงาจะเลือกจากพิกเซลที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่างในทุกทิศทางสูงสุด และจุดสเปคคูลาร์พีคจะเลือกจากจุดที่สว่างที่สุดของบริเวณที่เป็นสเป็คคูลาร์ไฮไลท์ ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดลองในกรณีแสงที่ก่อให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์ แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่แท้จริง โดยวัดในแง่ของระยะห่างระหว่างจุดที่คำนวณได้กับจุดที่แท้จริง และวัดในแง่มุมระหว่างทิศทางจากจุดศูนย์กลางของพื้นระนาบไปยังตำแหน่งที่แท้จริง กับทิศทางจากจุดศูนย์กลางของพื้นระนาบไปยังตำแหน่งที่คำนวณได้ ตารางที่ 4.3 สรุปผลที่ได้จากการทดลองในลักษณะเดียวกัน เมื่อใช้แสงที่ก่อให้เกิดเงาแบบซอฟต์แชโดว์

แหล่งกำเนิดแสง	มุมในแนวนอน (องศา)	มุมในแนวตั้ง (องศา)	ระยะทาง (bu)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริง (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0	35	25	1.54	0.81
2	22.5	35	25	1.66	0.39
3	45	35	25	0.76	0.59
4	67.5	35	25	2.95	1.15
5	90	35	25	7.12	2.76
6	45	45	25	6.41	1.89
7	45	55	25	1.01	0.34
8	45	45	35	6.56	1.17
9	45	45	45	9.93	0.94
10	45	35	55	29.08	2.13
เฉลี่ย				6.70	1.22

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสง	มุมในแนวนอน (องศา)	มุมในแนวตั้ง (องศา)	ระยะทาง (bu)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริง (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0	35	25	5.49	0.50
2	22.5	35	25	9.29	0.66
3	45	35	25	7.96	0.48
4	67.5	35	25	2.95	0.50
5	90	35	25	2.19	1.33
6	45	45	25	4.36	1.67
7	45	55	25	6.89	0.46
8	45	45	35	6.26	1.22
9	45	45	45	14.01	1.48
10	45	35	55	36.73	3.72
เฉลี่ย				9.61	1.20

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

ในลำดับถัดมา การทดลองที่สองในหัวข้อนี้ เป็นการทดสอบวิธีการที่นำเสนอ โดยอาศัยสมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ในหัวข้อ 3.7 ประกอบในการปรับเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณตำแหน่งแสง โดยจุดมุมบนเงาจะเลือกจากจุดมุมที่ค้นหาได้ด้วยวิธีการของ Harris [20] จำนวนไม่เกิน 25 จุดแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่างในทุกทิศทางสูงสุด ซึ่งแต่ละจุดมุมจะทำให้ได้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นไปได้มาหนึ่งตำแหน่ง จากนั้นจึงนำตำแหน่งดังกล่าวไปใช้ในสมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อค้นหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ส่วน จุดสเปคคูลาร์พีค จะเลือกจากจุดกึ่งกลางของบริเวณที่เป็นสเปคคูลาร์ไฮไลท์เช่นเดิม ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดลองในกรณีแสงที่ก่อให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์ แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่แท้จริง โดยวัดในแง่ของระยะห่างระหว่างจุดที่คำนวณได้กับจุดที่แท้จริง และวัดในแง่มุมระหว่างทิศทางจากจุดศูนย์กลางของพื้นระนาบไปยังตำแหน่งที่แท้จริง กับทิศทางจากจุดศูนย์กลางฯ ไปยังตำแหน่งที่คำนวณได้ ตารางที่ 4.5 สรุปผลที่ได้จากการทดลองในลักษณะเดียวกันเมื่อใช้แสงก่อให้เกิดเงาแบบซอฟต์แชโดว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสง	มุมในแนวนอน (องศา)	มุมในแนวตั้ง (องศา)	ระยะทาง (bu)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริง (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0	35	25	1.54	0.81
2	22.5	35	25	1.66	0.39
3	45	35	25	0.76	0.59
4	67.5	35	25	2.95	1.15
5	90	35	25	7.12	2.76
6	45	45	25	5.29	1.89
7	45	55	25	1.01	0.34
8	45	45	35	0.77	0.92
9	45	45	45	9.93	0.94
10	45	35	55	29.08	2.13
เฉลี่ย				6.01	1.19

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

แหล่งกำเนิดแสง	มุมในแนวนอน (องศา)	มุมในแนวตั้ง (องศา)	ระยะทาง (bu)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริง (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0	35	25	0.61	0.72
2	22.5	35	25	0.76	0.34
3	45	35	25	0.25	0.55
4	67.5	35	25	0.77	0.9
5	90	35	25	1.79	1.78
6	45	45	25	3.01	1.34
7	45	55	25	6.89	0.46
8	45	45	35	6.26	1.22
9	45	45	45	14.01	1.48
10	45	35	55	36.73	3.72
เฉลี่ย				7.11	1.25

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถัดมา ในการทดลองที่สาม เป็นการทดลองในลักษณะเดียวกับการทดลองที่สองทุกประการ หากแต่เมื่อได้ผลตำแหน่งของจุดมุมบนเงาที่ดีที่สุดโดยอาศัยสมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ในหัวข้อ 3.7 แล้ว ทำการทดสอบความเหมาะสมตำแหน่งของแสงที่คำนวณได้โดยใช้แต่ละจุดที่อยู่รอบ ๆ จุดสเป็คคูลาร์พีคที่เลือกในตอนแรก จำนวน 8 จุด (8-connected connectivity type) เป็นจุดสเปคคูลาร์พีคใหม่ นำมาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแสงสะท้อนที่คำนวณกับแสงสะท้อนที่ถ่ายหรือวัดได้ ตามสมการ 3.13 เพื่อเลือกจุดที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดลองในกรณีแสงที่ก่อให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์ แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่แท้จริง โดยวัดในแง่ของระยะห่างระหว่างจุดที่คำนวณได้กับจุดที่แท้จริง และวัดในแง่มุมระหว่างทิศทางจากจุดศูนย์กลางของพื้นระนาบไปยังตำแหน่งที่แท้จริง กับทิศทางจากจุดศูนย์กลางฯ ไปยังตำแหน่งที่คำนวณได้ ตารางที่ 4.7 สรุปผลที่ได้จากการทดลองในลักษณะเดียวกัน เมื่อใช้แสงก่อให้เกิดเงาแบบซอฟต์แชโดว์

แหล่งกำเนิดแสง	มุมในแนวนอน (องศา)	มุมในแนวตั้ง (องศา)	ระยะทาง (bu)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริง (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0	35	25	1.88	0.03
2	22.5	35	25	1.66	0.39
3	45	35	25	0.76	0.59
4	67.5	35	25	2.43	0.48
5	90	35	25	1.35	0.10
6	45	45	25	3.48	1.81
7	45	55	25	1.01	0.34
8	45	45	35	0.77	0.92
9	45	45	45	2.03	0.57
10	45	35	55	8.80	0.96
เฉลี่ย				2.42	0.62

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อปรับปรุงตำแหน่งของจุดมุมบนเงาและจุดสเป็คคูลาร์พีค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดแสง	มุมในแนวนอน (องศา)	มุมในแนวตั้ง (องศา)	ระยะทาง (bu)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริง (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0	35	25	0.61	0.72
2	22.5	35	25	0.76	0.34
3	45	35	25	0.25	0.55
4	67.5	35	25	0.77	0.90
5	90	35	25	1.79	1.78
6	45	45	25	2.28	0.76
7	45	55	25	2.29	0.60
8	45	45	35	0.48	0.77
9	45	45	45	1.01	0.68
10	45	35	55	3.45	0.81
เฉลี่ย				1.37	0.79

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเมื่อเงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อปรับปรุงตำแหน่งของจุดมุมบนเงาและจุดสเป็คคูลาร์พีค

ตัวอย่างภาพเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่แท้จริงกับภาพที่ใช้ตำแหน่งที่คำนวณได้โดยใช้จุดสเปคคูลาร์ร่วมกับจุดมุม แต่ไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์แสดงในรูปที่ 4.3 และแบบที่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง (เพื่อปรับปรุงตำแหน่งทั้งจุดมุมบนเงาและจุดสเป็คคูลาร์พีค) ในรูปที่ 4.4 โดยตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่เลือกมาแสดงคือตำแหน่งที่ 4 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย และตำแหน่งที่ 10 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมาก รูปภาพที่แสดงมีการปรับความสว่างไปจากภาพเดิมและขยายเฉพาะส่วนของเงาเพื่อประโยชน์ในการนำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ (ก) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 4 (ข) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 10

(ก) (ข)

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง (ก) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 4 (ข) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 10

จากผลการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงในตำแหน่งต่างๆ โดยมีระยะห่างที่คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 2.42 bu สำหรับเงาแบบฮาร์ดแชโดว์และ 1.37 bu สำหรับเงาแบบซอฟต์แชโดว์ ซึ่งตำแหน่งที่อยู่ในระยะที่ห่างจากวัตถุมากมีแนวโน้มที่จะทำให้การคำนวณตำแหน่งคลาดเคลื่อนมากกว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่อยู่ในระยะใกล้ ส่วนมุมที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นยังไม่ส่งผลชัดเจนนัก ดังจะเห็นได้จากการทดลองที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 10 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ไกลกว่าตำแหน่งอื่นจะมีความคลาดเคลื่อนของระยะห่างเมื่อเทียบกับตำแหน่งจริงมากกว่าตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงอื่นๆ จากผลการทดลองใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 และ 4.7 พบว่าการทดลองของแหล่งกำเนิดแสงที่ 8 มีระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริง 8.8 bu และ 3.45 bu ตามลำดับซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของทุกตำแหน่งซึ่งอยู่ที่ 2.42 bu และ 1.37 bu

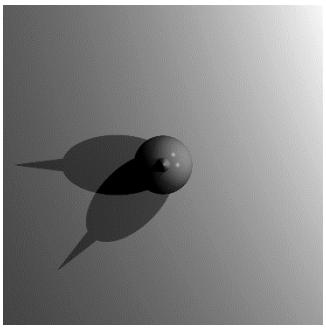
การใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดมุมและจุดสเปคคูลาร์ที่ดีที่สุดนั้นสามารถปรับปรุงความแม่นยำในการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงได้ โดยเฉพาะในกรณีที่เงาในภาพเป็นแบบซอฟต์แชโดว์ เพราะการที่ขอบของเงาไม่ชัดเจน ทำให้การค้นหาจุดมุมบริเวณขอบเงานั้นมีความคลาดเคลื่อนสูง จุดมุมที่พบเป็นจุดแรกจึงอาจไม่ใช่จุดมุมที่ดีที่สุด ต่างกับกรณีของฮาร์ดแชโดว์ที่ขอบของเงามีความชัดเจน การค้นหาจุดมุมจึงมีความถูกต้องมากกว่า ในกรณีส่วนใหญ่การใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดมุมบริเวณขอบเงาจึงไม่ช่วยปรับปรุงความแม่นยำ ดังผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างอยู่ที่ 6.7 bu และในตารางที่ 4.4 เมื่อมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดมุม ค่าเฉลี่ยของระยะห่างอยู่ที่ 6.01 bu ซึ่งไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก แต่การใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดสเปคคูลาร์ก็ยังคงช่วยเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงได้ จากตารางที่ 4.6 เมื่อมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดสเปคคูลาร์ ค่าเฉลี่ยของระยะห่างลดลงเหลือ 2.42 bu

การทดลองที่สี่ ในหัวข้อนี้ เป็นการทดลองกับแหล่งกำเนิดแสงที่มีด้วยกันหลายจุด โดยจะเลือกจากตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ผ่านมา โดยแบ่งเป็นการทดลองทั้งหมด 6 การทดลองดังนี้

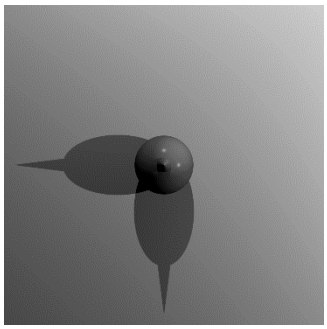
การทดลองที่ 4.1 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 และ 3
การทดลองที่ 4.2 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 และ 5
การทดลองที่ 4.3 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 1, 3 และ 5
การทดลองที่ 4.4 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 4, 5 และ 6

ภาพที่ใช้ในการทดลองแหล่งกำเนิดแสงหลายจุดมีดังนี้

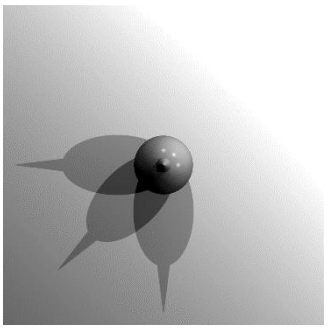
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



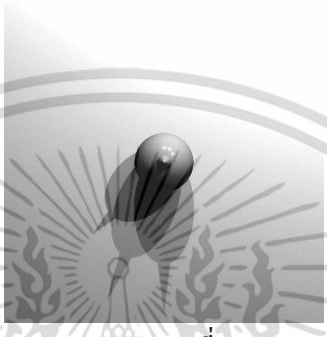
การทดลองที่ 4.1



การทดลองที่ 4.2



การทดลองที่ 4.3



การทดลองที่ 4.4

รูปที่ 4.5 รูปภาพที่ใช้ในการทดลองสำหรับแหล่งกำเนิดแสงหลายจุดที่ก่อให้เกิดเงาแบบฮาร์ดแชโดว์

ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ได้ผลดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
1	8.53	1.58	8.1	3.05	-	-
2	8.53	1.58	8.33	3.24	-	-

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
3	8.53	1.58	8.1	3.05	8.33	3.24
4	2.95	1.15	8.33	3.24	1.33	0.22
เฉลี่ย	7.14	1.47	8.22	3.15	4.83	1.73

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ได้ผลดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง ของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
1	7.36	2.01	4.66	2.4	-	-
2	7.36	2.01	2.28	2.14	-	-
3	7.36	2.01	4.95	2.44	5.53	2.61
4	6.71	0.25	2.28	2.14	23.58	0.93
เฉลี่ย	7.2	1.57	3.54	2.28	14.56	1.77

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดมุมบนเงาที่ดีที่สุดได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
1	8.53	1.58	5.50	2.56	-	-
2	8.53	1.58	8.33	3.24	-	-
3	8.53	1.58	5.50	2.56	8.33	3.24
4	2.95	1.15	8.33	3.24	1.33	0.22
เฉลี่ย	7.14	1.47	6.92	2.9	4.83	1.73

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดมุมบนเงาที่ดีที่สุดได้ผลดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
1	0.17	0.4	2.7	1.98	-	-

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
2	0.17	0.4	0.81	1.85	-	-
3	0.78	0.51	2.74	2.29	0.81	1.85
4	0.44	0.81	0.81	1.85	0.76	0.27
เฉลี่ย	0.39	0.53	1.77	1.99	0.79	1.06

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองถึงสามจุด เงาเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 2 ครั้ง เพื่อเลือกจุดมุมบนเงาและจุดสเปคคูลาร์พีคที่ดีที่สุดได้ผลดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
1	1.54	0.81	0.54	1.23	-	-
2	1.54	0.81	1.35	0.10	-	-
เฉลี่ย	1.76	0.73	0.95	0.67	1.34	0.16

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
3	1.54	0.81	0.54	1.23	1.35	0.10
4	2.43	0.48	1.35	0.10	1.33	0.22
เฉลี่ย	1.76	0.73	0.95	0.67	1.34	0.16

ตารางที่ 4.12 (ต่อ) ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 2 ครั้ง

ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบฮาร์ดแชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 2 ครั้ง เพื่อเลือกจุดมุมบนเงาและจุดสเปคคูลาร์พีคที่ดีที่สุดได้ผลดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (bu)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 (องศา)
1	0.17	0.40	1.33	1.70		
2	0.17	0.40	0.81	1.85		
3	0.78	0.51	2.22	2.55	0.81	1.85
4	0.44	0.81	0.81	1.85	0.76	0.27
เฉลี่ย	0.39	0.53	1.27	1.99	0.79	1.06

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวนสองสามจุด โดยเงาในภาพเป็นแบบซอฟต์แชโดว์และมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอยังคงสามารถใช้คำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงได้ แม้ว่าจะมีแหล่งกำเนิดแสงในภาพสองถึงสามจุด และการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ยังคงช่วยปรับปรุงความแม่นยำในการคำนวณตำแหน่งได้

4.2 การทดลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากภาพถ่ายจริง

การทดลองวิธีการที่นำเสนอกับภาพถ่ายจริงนั้นจะมีประเด็นปัญหาเพิ่มขึ้น นั่นคือจะวัดตำแหน่งของจุดต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ได้อย่างไร

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้กล้อง Microsoft Kinect เป็นอุปกรณ์ช่วยในการวัดตำแหน่ง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ราคาถูกและหาได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามกล้อง Kinect ยังมีข้อจำกัดทั้งในเรื่องความละเอียดของภาพสีและความถูกต้องของค่าระยะลึกที่วัดได้ เนื่องจากภาพสีของกล้อง Kinect นั้นมีความละเอียดต่ำและมีสัญญาณรบกวน (noise) มาก ข้อจำกัดในเรื่องความละเอียดของภาพสีที่ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ แก้ไขโดยการติดตั้งกล้อง DSLR ไว้ด้านบนของกล้อง Kinect โดยมีที่ยึดให้แน่นหนา จากนั้นใช้การปรับเทียบ (calibration) กล้อง DSLR กับกล้อง Kinect เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกล้อง DSLR ด้วยวิธีการของ Herrera C. [30] ในการถ่ายภาพทดลองจะถ่ายด้วยกล้อง DSLR และกล้อง Kinect พร้อมๆ กัน จากนั้นใช้ภาพระยะลึก (depth image) ที่ได้จากกล้อง Kinect ไปหาตำแหน่งเมื่อเทียบกับพิกเซลของภาพจากกล้อง DSLR ซึ่งสุดท้ายแล้วภาพที่ใช้ในการทดลองจะเป็นภาพจากกล้อง DSLR ที่ทราบตำแหน่ง 3 มิติของแต่ละพิกเซล

รูปที่ 4.6 กล้อง Kinect ที่มีการติดตั้งกล้อง DSLR ไว้ด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

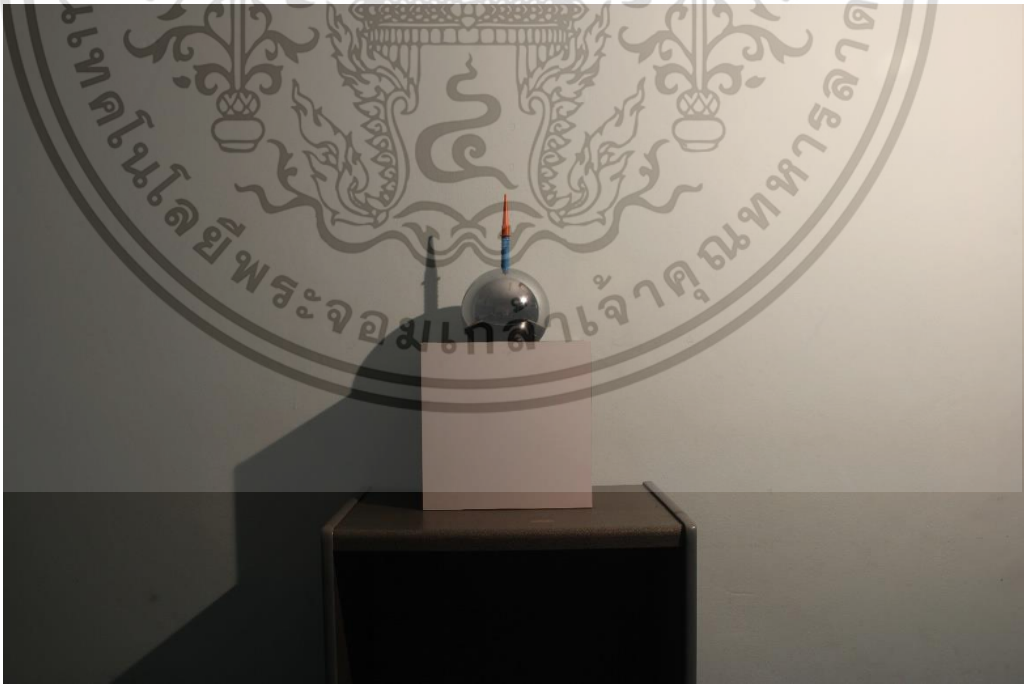
เนื่องจากตำแหน่งของจุดต่างๆ ในรูปภาพที่อ่านได้จากภาพระยะลึกของกล้อง Kinect นั้น อาจจะยังไม่แม่นยำเพียงพอ อีกทั้งในบางจุดก็ไม่สามารถหาตำแหน่งได้เนื่องจากเป็นจุดที่กล้อง Kinect ไม่สามารถมองเห็นได้หรือเป็นผิววัสดุที่สะท้อนแสงแบบกระจกซึ่งลำแสงอินฟราเรดของกล้อง Kinect จะทะลุผ่านไปไม่สะท้อนแสงกลับมาที่เซนเซอร์ จากรูปที่ 4.7 เป็นสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลอง วัตถุทรงกลมถูกวางอยู่บนกล่องสี่เหลี่ยมซึ่งวางติดกับผนัง ทรงกลมมีจุดยอดอยู่ด้านบน และแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดไฟที่วางไว้กับขาตั้งในตำแหน่งต่างๆ จุดบนพื้นผิวทรงกลมซึ่งสะท้อนแสงเป็นจุดที่กล้อง Kinect ไม่สามารถวัดตำแหน่งได้ และจุดบางจุดเช่นจุดศูนย์กลางทรงกลมก็เป็นจุดที่วัดตำแหน่งในความเป็นจริงได้ยาก ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาก็คือการวัดตำแหน่งของจุดที่ต้องการทราบเทียบกับจุดใดจุดหนึ่งที่สามารถวัดได้ด้วยกล้อง Kinect ในที่นี้จะใช้จุดศูนย์กลางของผนังเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งในการหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางนี้อาจใช้ค่าที่อ่านได้จากภาพระยะลึกของกล้อง Kinect หรือใช้จุดตัดของแกนของผนังซึ่งจะมีความแม่นยำมากกว่า ซึ่งขั้นตอนในการสร้างระนาบของผนังและขั้นตอนในการหาตำแหน่งอ้างอิงเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของกล้อง Kinect มีดังต่อไปนี้

1) กำหนดจุดใดจุดหนึ่งบนผนังเป็นจุดอ้างอิง จากนั้นให้ทำจุดสังเกตเพิ่มในแนวตั้งหรือแนวนอนอย่างน้อยสองจุด ซึ่งจุดสังเกตดังกล่าวเมื่อลากจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจะต้องได้เส้นที่ผ่านจุดอ้างอิง และเส้นที่เกิดจากการลากจุดนี้จะต้องตั้งฉากกับเส้นในอีกแนวหนึ่ง
2) อ่านตำแหน่ง 3 มิติของจุดบนผนังที่ไม่มีวัตถุใดๆ วางอยู่ด้านหน้าในแต่ละจุดจากภาพระยะลึกที่ได้จากกล้อง Kinect นำตำแหน่งที่ได้ไปหาระนาบที่ผ่านจุดเหล่านี้ได้มากที่สุด จะทำให้ได้นอร์มอลเวกเตอร์ของระนาบบนผนัง และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกล้องมายังผนัง
3) อ่านตำแหน่ง 3 มิติของจุดสังเกตบนผนังที่จะใช้เป็นแกน จากนั้นนำจุดสังเกตมาลบกันจะทำให้ได้เวกเตอร์ที่ใช้เป็นแกนของระนาบผนังในแนวตั้งหรือแนวนอน
4) นำนอร์มอลเวกเตอร์ของระนาบมาครอสโปรดัก (cross product) กับเวกเตอร์ที่ได้จากข้อ 3) จะทำให้ได้เวกเตอร์ของระนาบในอีกแนวหนึ่งที่เหลือ
5) จุดตัดของเวกเตอร์ทั้งสามคือจุดศูนย์กลางระนาบซึ่งใช้เป็นจุดอ้างอิงซึ่งเป็นตำแหน่งที่เทียบกับจุดศูนย์กลางของกล้อง Kinect และเวกเตอร์ทั้งสามที่หาได้คือแกนของระนาบผนัง
6) วัดตำแหน่งในความเป็นจริงของจุดกึ่งกลางทรงกลมเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิง นำค่าดังกล่าวมาย้ายตำแหน่ง (translate) จากจุดอ้างอิงโดยการบวกกับตำแหน่งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดอ้างอิงเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของกล้อง Kinect และนำไปคูณกับแกนทั้งสามของระนาบผนังเพื่อหมุน (rotate) ตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้ได้ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางทรงกลมเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของกล้อง Kinect

7) วัดตำแหน่งจุดมุมบนพื้นผิววัตถุในความเป็นจริงเมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางทรงกลม แล้วนำไปหาตำแหน่งของจุดมุมบนพื้นผิววัตถุเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของกล้อง Kinect โดยการใช้ค่าที่วัดได้มาย้ายตำแหน่งของจุดกึ่งกลางทรงกลมที่หาได้จากข้อ 7) และหมุนด้วยแกนของระนาบผนัง
8) การหาตำแหน่ง 3 มิติของจุดสเปคคูลาร์พีคและจุดมุมบนเงาสามารถทำได้ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ โดยค่าความยาวโฟกัสของกล้อง และขนาดของเซนเซอร์นั้นจะได้มาจากการปรับเทียบกล้อง
9) ทิศทางและตำแหน่งของจุดต่างๆ นั้นเป็นค่าที่เทียบกับจุดศูนย์กลางของกล้อง Kinect แต่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั้นจะถูกวัดในความเป็นจริงโดยเทียบกับจุดกึ่งกลางของผนัง ดังนั้นในขั้นตอนการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั้นจะต้องแปลงตำแหน่งให้เทียบกับจุดกึ่งกลางของผนังโดยการนำมาลบกับตำแหน่งของจุดอ้างอิงเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของกล้อง Kinect และคูณด้วยแกนทั้งสามของระนาบผนัง



รูปที่ 4.7 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองกับภาพถ่ายจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองกับภาพถ่ายจริงนี้ นอกเหนือจากการคำนวณตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงด้วยวิธีการที่นำเสนอแล้ว ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดโดยอาศัยจุดสเปกคูลาร์พีคบนผิวทรงกลมสะท้อนแสง จำนวน 2 ลูก [9] ซึ่งต่อจากนี้ จะเรียกวิธีการนี้ว่า วิธีที่อาศัยจุดสเปกคูลาร์พีคบนวัตถุทรงกลม 2 ลูก ส่วนหนึ่งคือเพื่อสนับสนุนสมมุติฐานในหัวข้อ 3.2 ที่ว่าการใช้จุดสเปกคูลาร์พีคบนวัตถุทรงกลมลูกเดียวร่วมกับจุดมุม มีความแม่นยำมากกว่าการใช้จุดสเปกคูลาร์พีคบนวัตถุทรงกลม 2 ลูก ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดตำแหน่งและความคลาดเคลื่อนของจุดสเปกคูลาร์พีค อันส่งผลต่อตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่คำนวณได้

ทรงกลมที่ใช้มีรัศมี 0.1025 เมตร ความยาวของกรวยปลายแหลม 0.17 เมตร ตำแหน่งของทรงกลมเมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางระนาบผนังเป็น [0.00 -0.06 -0.15] เมตร และระยะห่างของทรงกลมสำหรับวิธีการที่ใช้ทรงกลม 2 ลูกอยู่ที่ 0.3 เมตร

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองและระยะห่างจากจุดกำเนิด แสดงในตารางที่ 4.14 ดังนี้

หมายเลขตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง	ตำแหน่ง [x,y,z] (เมตร)	ระยะห่างจากจุดกำเนิด (เมตร)
1	[1.14 -0.81 -1.03]	1.73
2	[1.75 -0.81 -1.03]	2.18
3	[1.14 -0.81 -1.64]	2.15
4	[1.75 -0.81 -1.64]	2.53
5	[-1.00 -0.81 -1.03]	1.65
6	[-1.61 -0.81 -1.03]	2.07
7	[-1.00 -0.81 -1.64]	2.08
8	[-1.61 -0.81 -1.64]	2.44

ตารางที่ 4.14 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองภาพถ่ายจริง

โดยแกนที่ใช้อ้างอิงนั้นแกน x ชี้ไปทางทิศตะวันออกจะเป็นค่าบวก แกน y ชี้ไปทางทิศใต้จะเป็นค่าบวก และแกน z ที่ชี้ออกจากผนังมายังกล้องนั้นจะเป็นค่าลบ

การทดลองแรกเป็นการใช้แหล่งกำเนิดแสง 1 จุด วางในตำแหน่งที่แตกต่างกัน 8 ตำแหน่ง โดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

ผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.15

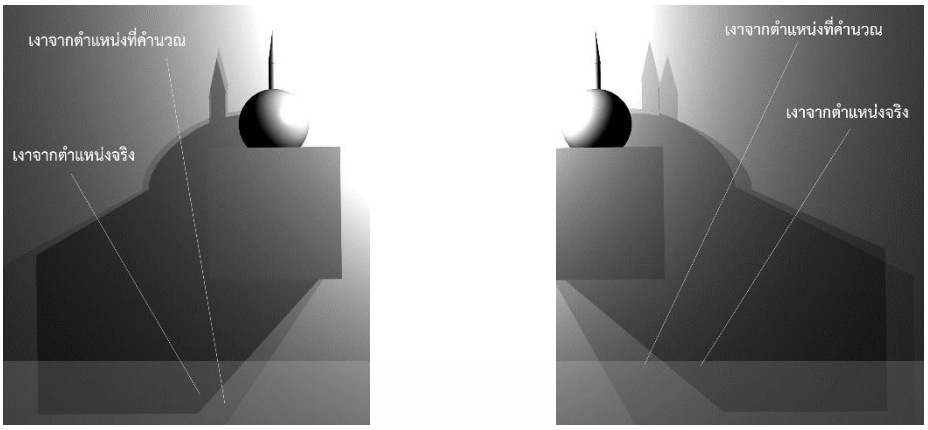
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง	ระยะห่างกับตำแหน่งที่แท้จริงด้วยวิธีการใช้ทรงกลมหนึ่งลูกร่วมกับจุดมุม (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงด้วยวิธีการใช้ทรงกลมหนึ่งลูกร่วมกับจุดมุม (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงด้วยวิธีการใช้ทรงกลมสองลูก (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงด้วยวิธีการดั้งเดิมด้วยวิธีการใช้ทรงกลมสองลูก (องศา)
1	0.20	2.33	0.66	4.05
2	0.36	2.67	0.97	6.09
3	0.35	1.35	0.96	2.76
4	0.49	2.38	1.25	4.13
5	0.19	3.2	0.51	4.88
6	0.42	3.69	1.10	7.87
7	0.26	2.07	0.85	4.29
8	0.50	2.77	1.15	5.89
เฉลี่ย	0.35	2.56	0.93	5.00

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งจุด โดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

ตัวอย่างภาพเปรียบเทียบระหว่างภาพถ่ายจริงกับภาพที่ได้จากตำแหน่งที่คำนวณได้ แสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 โดยรูปที่ 4.8 เป็นรูปที่ใช้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากวิธีการที่อาศัยจุดสเปกคูลาร์พีคบนวัตถุทรงกลม 2 ลูก รูปที่ 4.9 ใช้ตำแหน่งที่ได้จากวิธีการที่ใช้ทรงกลมหนึ่งลูกร่วมกับจุดมุม จากรูปเงาที่สีเข้มกว่าจะเป็นเงาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงในตำแหน่งที่แท้จริง ส่วนเงาที่สีอ่อนกว่าจะเป็นเงาที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยใช้วิธีการที่ใช้จุดสเปกคูลาร์พีคบนวัตถุทรงกลม 2 ลูก (ก) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (ข) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 6

(ก) (ข)

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยใช้วิธีการที่ใช้ทรงกลมสองลูกร่วมกับจุดมุมโดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ (ก) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (ข) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 6

และเมื่อมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อหาจุดมุมบริเวณขอบเงาที่ถูกต้อง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขแหล่งกำเนิดแสง	ระยะห่างกับตำแหน่งที่แท้จริง (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0.2	2.33
2	0.15	1.09
3	0.32	1.05
4	0.4	1.73
5	0.19	3.20
6	0.29	3.15
7	0.26	2.07
8	0.50	2.77
เฉลี่ย	0.29	2.17

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งจุด มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

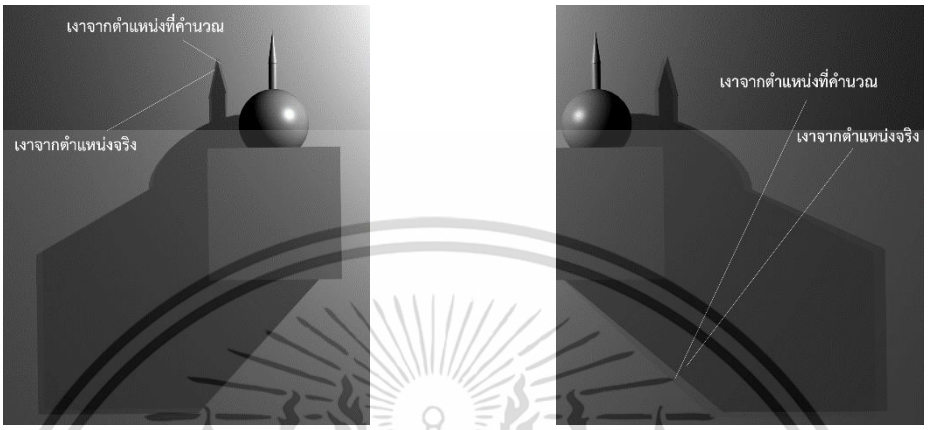
จากนั้นเมื่อมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์อีกครั้งเพื่อหาจุดสเปคคูลาร์ที่ถูกต้อง ผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.17

หมายเลขแหล่งกำเนิดแสง	ระยะห่างกับตำแหน่งที่แท้จริง (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริง (องศา)
1	0.09	2.12
2	0.15	1.09
3	0.15	0.24
4	0.18	0.42
5	0.11	2.85
6	0.12	2.13
7	0.1	2.45
8	0.31	2.12
เฉลี่ย	0.15	1.68

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงหนึ่งจุด มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างภาพเปรียบเทียบระหว่างภาพถ่ายจริงกับภาพที่ได้จากตำแหน่งที่คำนวณได้จากวิธีการที่ใช้ทรงกลมหนึ่งลูกร่วมกับจุดมุมและมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้งแสดงในรูปที่ 4.10



(ก) (ข)

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบรูปที่ได้จากตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยใช้วิธีการที่ใช้ทรงกลมสองลูกร่วมกับจุดมุมและมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง (ก) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (ข) ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 6

การทดลองถัดไปเป็นการทดลองเมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงจำนวน 2 จุดพร้อมกันในฉาก โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสงตำแหน่งที่ 1-4 จากการทดลองที่ผ่านมา ร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงที่ 5-8 ที่มีการกำหนดตำแหน่งใหม่ดังนี้

หมายเลขตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง	ตำแหน่ง [x,y,z] (เมตร)	ระยะห่างจากจุดกำเนิด (เมตร)
5	[-1.00 -0.77 -0.96]	1.59
6	[-1.61 -0.77 -0.96]	2.03
7	[-1.00 -0.77 -1.57]	2.01
8	[-1.61 -0.77 -1.57]	2.38

ตารางที่ 4.18 ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองภาพถ่ายจริงโดยมีแหล่งกำเนิดแสงสองจุด

การทดลองด้วยแหล่งกำเนิดแสง 2 จุดแบ่งเป็นการทดลองทั้งหมด 4 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 และ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 และ 6
การทดลองที่ 3 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 3 และ 7
การทดลองที่ 4 – ใช้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ 4 และ 8

ผลที่ได้เป็นเมื่อไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เป็นดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)
1	0.22	1.93	0.34	4.80
2	0.06	1.47	0.45	4.02
3	0.31	1.47	0.26	2.69
4	0.60	2.45	0.58	3.75
เฉลี่ย	0.30	1.83	0.41	3.82

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงสองจุดโดยไม่มีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

และเมื่อมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อเลือกจุดมุมบนเงา ผลที่ได้เป็นดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)
1	0.22	1.93	0.12	4.14
2	0.06	1.47	0.12	3.24
3	0.31	1.47	0.26	2.69
4	0.22	1.63	0.28	3.21
เฉลี่ย	0.20	1.63	0.20	3.32

ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงสองจุด โดยมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์อีกครั้งเพื่อเลือกจุดสเปคคูลาร์พีค ผลที่ได้เป็นดังนี้

หมายเลขการทดลอง	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 1 (องศา)	ระยะห่างจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (เมตร)	มุมที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดแสงที่ 2 (องศา)
1	0.11	1.55	0.12	4.14
2	0.06	1.47	0.12	3.24
3	0.17	0.71	0.14	2.66
4	0.14	0.38	0.13	2.70
เฉลี่ย	0.12	1.03	0.13	3.19

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองภาพถ่ายจริง แหล่งกำเนิดแสงสองจุด โดยมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์สองครั้ง

จากผลการทดลองดังที่ปรากฏในตารางที่ 4.15 – 4.21 พบว่าวิธีการที่นำเสนอโดยใช้ทรงกลมหนึ่งลูกร่วมกับจุดมุมนั้นมีความแม่นยำมากกว่าวิธีการดั้งเดิมที่ใช้ทรงกลมสองลูก และการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อหาจุดมุมบริเวณขอบเงาและจุดสเปคคูลาร์พีคที่ถูกต้องนั้นช่วยปรับปรุงให้การคำนวณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแม่นยำมากขึ้น โดยมีความถูกต้องของตำแหน่งเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 57.14% ในกรณีของแหล่งกำเนิดแสงเดี่ยว และ เพิ่มขึ้น 65.71% ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดแสงสองแหล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดหลายแหล่งจากภาพถ่ายวัตถุทรงกลมสะท้อนแสงบนพื้นระนาบ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้ใช้จุดสเปคคูลาร์พีคบนวัตถุทรงกลมที่มีผิววัตถุมันเงาเพื่อหาเส้นตรงที่ลากผ่านจุดนี้และมีทิศทางชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสง จากนั้นจุดมุมบนพื้นผิววัตถุบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องและจุดมุมบนเงาที่สัมพันธ์กับจุดดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อหาเส้นตรงที่ผ่านจุดทั้งสองและมีทิศทางชี้ไปยังตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงในอีกทิศทางหนึ่ง จุดตัดของเส้นทั้งสองนี้คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงนั่นเอง ซึ่งในทางทฤษฎีวิธีการดังกล่าวสามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงได้อย่างถูกต้องหากว่าสามารถหาทิศทางทั้งสองได้อย่างแม่นยำ แต่ในสภาพแวดล้อมจริงนั้นมีปัจจัยหลายประการที่อาจจะทำให้ทิศทางที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป เช่น ความผิดพลาดในการวัด เงาที่ไม่คมชัดพอ มีสัญญาณรบกวนในภาพ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความลึกไม่ละเอียดพอ ฯลฯ ซึ่งมีผลทำให้จุดมุมบริเวณขอบเงาและจุดสเปคคูลาร์พีคที่ใช้ในการคำนวณหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงนั้นมีความคลาดเคลื่อนไป ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้ได้ปรับปรุงความแม่นยำในการหาจุดมุมบริเวณขอบเงาโดยใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์พีคได้อีกด้วย นั่นคือเมื่อมีการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อหาจุดมุมบริเวณขอบเงาที่ถูกต้องแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการทำขั้นตอนเดิมในรอบที่สองเพื่อหาจุดสเป็คคูลาร์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากที่สุด

จากผลการทดลองพบว่าตำแหน่งและทิศทางของแหล่งกำเนิดแสงที่จุดต่างๆ ซึ่งคำนวณค่าได้ด้วยวิธีการที่นำเสนอนั้นสามารถให้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ให้เงาที่สอดคล้องกับตำแหน่งที่แท้จริงดังที่แสดงในรูปที่ 4.8-4.10 และการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์ช่วยให้การหาตำแหน่งมีความแม่นยำมากขึ้น โดยเฉพาะกับกรณีของเงาแบบซอฟต์แชโดว์นั้นจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอย่างชัดเจนเนื่องจากความผิดพลาดในการค้นหาจุดมุมบริเวณขอบของเงานั้นจะมีมากกว่ากรณีของฮาร์ดแชโดว์นั่นเอง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิมที่มีการใช้ทรงกลมสองลูกแล้ว วิธีการที่นำเสนอจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากกว่าอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของจุดสเปคคูลาร์นั้นส่งผลต่อความถูกต้องของตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงมากกว่าความคลาดเคลื่อนของจุดมุมบนเงา ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าวการใช้ทรงกลมสองลูกซึ่งต้องอาศัยตำแหน่งของจุดสเปคคูลาร์สองจุดจึงให้ผลที่คลาดเคลื่อนมากกว่าวิธีการที่นำเสนอซึ่งใช้จุดสเปคคูลาร์จุดเดียวบนทรงกลมหนึ่งลูกร่วมกับจุดมุมบนเงา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการใช้ภาพถ่ายจริงนั้นจะต้องคำนึงถึงวิธีในการวัดตำแหน่งของจุดต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ว่าจะสามารถวัดได้อย่างไร ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กล้อง Kinect เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการวัดตำแหน่ง แต่เนื่องจากข้อจำกัดของ Kinect ทำให้ต้องมีการใช้ร่วมกับกล้อง DSLR เพื่อแก้ปัญหาความละเอียดของภาพจากกล้อง RGB ของ Kinect อีกทั้งการที่ Kinect นั้นไม่สามารถวัดตำแหน่งได้อย่างแม่นยำในทุกจุด จึงต้องอาศัยการวัดตำแหน่งในความเป็นจริงเพื่อคำนวณหาตำแหน่งของจุดต่างๆ ที่กล้อง Kinect ไม่สามารถวัดได้หรือวัดได้ไม่แม่นยำมากพอ

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีสิ่งที่ต้องพัฒนาอีกหลายจุด เช่น การปรับปรุงระยะเวลาการคำนวณให้น้อยลงเพื่อให้สามารถนำไปใช้กับแอพพลิเคชันที่ต้องมีการตอบสนองในเวลาจริง (real-time applications) ได้ โดยขั้นตอนที่ใช้เวลาในการคำนวณมากคือขั้นตอนการใช้สมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์เพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกต้องมากที่สุด ขั้นตอนนี้จะต้องวนรอบเพื่อแก้สมการ ซึ่งจำนวนรอบจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดมุมที่นำมาทดสอบ รวมไปถึงจำนวนพิกเซลบนพื้นระนาบ ซึ่งหากจำกัดจำนวนจุดเหล่านี้ให้น้อยลง จะทำให้ลดการคำนวณไปได้มาก โดยแนวทางหนึ่งในการลดจำนวนจุดมุม คือการสุ่มเลือกจุดมุมบนเงาในบริเวณที่แตกต่างกันแล้วดูว่าจุดมุมในบริเวณใดที่เมื่อนำมาใช้กับสมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์แล้วให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จุดมุมต่อไปที่จะถูกเลือกมาใช้ก็จะเป็นจุดมุมเฉพาะในบริเวณนี้เท่านั้น เป็นการลดจุดมุมที่จะนำมาทดสอบให้น้อยลงไปได้ ส่วนจำนวนพิกเซลบนพื้นระนาบที่ใช้ในการสร้างสมการแสงสะท้อนจากพื้นหลังแบบดิฟฟิวส์นั้นหากสามารถกำหนดได้ว่าจำนวนพิกเซลเท่าใดที่เหมาะสมในการหาค่าความผิดพลาดเพื่อเลือกตำแหน่งแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกต้อง หรืออาจจะใช้ข้อมูลทางด้านรูปทรงของวัตถุในการเลือกบริเวณของพิกเซลที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องจากการแก้สมการโดยไม่ต้องใช้จุดทั้งหมดก็จะสามารถลดจำนวนการวนรอบเพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกต้องลงไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Fournier, A., S., Gunawan S., and Romanzin C. 1993. “Common Illumination between Real and Computer Generated Scenes,” **Proceedings Graphics.** 254-262.

[2] Yoo, J. D., and Lee, H K., 2008. “Real Time Light Source Estimation Using a Fish-Eye Lens with ND Filter,” **International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality.** 41-42.

[3] Zhang, Y. and Yang, Y.H. 2001. “Multiple illumination direction detection with application to image synthesis,” **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.** 23(8):915-920.

[4] Wang, Y. and Samaras, D. 2002. “Estimation of Multiple Directional Light Sources for Synthesis of Mixed Reality Images,” **Proc. The tenth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications.** 38-47.

[5] Bouganis, C.S. and Brookes, M. 2004. “Multiple light source detection**,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.** 26(4):509-514.

[6] Wei, J. 2003. “Robust recovery of multiple light source based on local light source constant constraint,” **Pattern Recognition Letters.** 24(1-3):159-172.

[7] Bunteong, A. and Chotikakamthorn, N. 2012. “Weighted Hough Transform for Directional Light Sources Estimation from Multi-View Images,” **International Conference on Mechatronics Technology.** Tianjin:China. 13-14.

shadow regions,” **In Proc. Intl. Conf. on Computer Vision.** 875–883.

[8] Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K. 1999. “Illumination distribution from brightness in shadows: Adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions,” **In Proc. Intl. Conf. on Computer Vision.** 875–883.

[9] Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K. 1999. “Illumination distribution from shadows,” **In Proc. IEEE Conf. on Computer Visionand Pattern Recognition.** 306–312.

[10] Sato, I., Sato, Y. and Ikeuchi, K. 2001. “Stability issues in recovering illumination distribution from brightness in shadows”. **In Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition.** 400–407.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Panagopoulos, C., Wang, D., and Paragios N. 2003. “Simultaneous cast shadows, illumination and geometry inference using hypergraphs”. I**EEE transactions on pattern analysis and machine intelligence.** 35(2):437-449.

[12] Nayar, K., K. 1988. “Sphereo: Determining Depth using Two Specular Spheres and a Single Camera”. **In Proc. SPIE Volume 1005 Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision III.** 245-254.

[13] Powell, M. W., Sarkar, S. and Goldgof, D. 2001. “A simple Strategy for calibrating the geometry of light sources,” **IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine Intelligence.** 23(9):1022-1027.

[14] Zhou, W. and Kambhamettu, C. 2002. “Estimation of illuminant direction and intensity of multiple light sources,” **Proc. European Conference on Computer Vision.** Copenhagen: Denmark. 4(LNCS 2353):206-220.

[15] Zhou, W. and Kambhamettu, C. 2004. “A Unified Framework for Scene Illumination Estimation,” **Proc. The British Machine Vision Conference.** 95.1-95.10.

[16] Li, Y., Lin, S., Lu, H. and Shum, H. 2003. “Multiple-cue illumination estimation in textured scenes,” **Proc. The Ninth International Conference on Computer Vision.** 1366-1373

[17] Hara, K., Nishino, K., and Ikeuchi, K. 2005. “Multiple light sources and reflectance property estimation based on a mixture of spherical distributions,” **Tenth IEEE International Conference on Computer Vision,.** 2:1627-1634.

[18] Ikeda, T., Oyamada, Y., Sugimoto, M., and Saito, H. 2012. “Illumination estimation from shadow and incomplete object shape captured by an RGB-D camera,” **21st International Conference on Pattern Recognition.** 165-169.

[19] Hara, K., Nishino, K., and Ikeuchi, K. 2005. “Light source position and reflectance estimation from a single view without the distant illumination assumption,” **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.** 27(8):493-505.

[20] Takai, T., Maki, A., Niinumaand K. and Matsuyama, T. 2009. “Difference sphere: An approach to near light source estimation,” **Computer Vision and Image Understanding.** 113(9):966-978.

[21] Schnieders, D., Wong, Kwan-Yee, K., and Dai, Z., 2010. “Polygon Light Source Estimation,” **Computer Vision – ACCV 2009. Lecture Notes in Computer Science.** 5996:966-107.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[22] Boom, J., B., Orts-Escolano, S., Ning, X., X., McDonagh, S., Sandilands, P., and Fisher, B., R. 2013. “Point Light Source Estimation based on Scenes Recorded by a RGB-D camer,” **British Machine Vision Conference 2013.** Bristol:England. 105.

[23] Cao, X., and Shah, M., 2005. “Camera Calibration and Light Source Estimation from Images with Shadows,” **IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. 2:918-923.

[24] Madsen, B., C., and Lal, B., B., 2010. “Probless Illumination Estimation for Outdoor Augmented Reality,” **INTECH: Augmented Reality.** 15-30.

[25] Koc, E., and Balcisoy, S., 2013. “Estimation of Environmental Lighting from Known Geometries for Mobile Augmented Reality,” **International Conference on Cyberworlds.** Yokohama:Japan. 132-139.

[26] Angel, E., 2009. **Interactive Computer Graphics.** 5th ed. Pearson Education Inc. 292.

[27] Burger, W., and Burge J., M., 2008. **Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction using Java.** Springer. 139-140.

[28] Harris, C., and Stephens, M., 1988. “A Combined Corner and Edge Detector,” **Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference.** Manchester:England. 147-151.

[29] Gentle, E., J., 1998. **Numerical Linear Algebra for Applications in Statistics.** Springer. 163-166.

[30] Herrera, C., D., Kannala, J., and Heikkila, J. 2012. “Joint Depth and Color Camera Calibration with Distortion Correction,” **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. 34(10):2058-2064.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

บทความและผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Bunteong, A. and Chotikakamthorn, N. 2015. “Light Source Estimation Using Feature Points from Specular Highlights and Cast Shadows,” **International Journal of Physical Sciences**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Light Source Estimation Using Feature Points from Specular Highlights and Cast Shadows

ANUSORN BUNTEONG[1] and NOPPORN CHOTIKAKAMTHORN[2]

[1,2] *Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand.*

anusorn.b@gmail.com

Abstract: A method for light sources estimation is proposed in this paper. The method utilizes feature points in cast shadows to estimate near light source positions from estimated source directions using specular highlights. There are several methods that can be used to estimate light sources from scene images, using either cast shadows or specular highlights. However, most of them are limited to directional light sources. The proposed method can estimate the positions and intensities of multiple near-field point light sources. Specular highlights on an object of known geometry are first used for light source direction estimation. Then, a discontinuity point in the object shape and the corresponding cast shadow on a ground plane are used for light source position estimation. Feature points obtained from an image of the cast shadow, however, can be inaccurate due to various factors. Information on diffused light reflected from Lambertian ground-plane surface is subsequently used to improve estimation accuracy. Experimental results were used to evaluate the performance of the proposed method.

Keywords: Light source estimation, Light source recovery, Augmented reality.

1. Introduction

Light source estimation is a problem of interest in the fields of computer graphics and computer vision. In augmented reality applications, where generation of a mixed environment containing virtual objects in real scenes is needed, illumination information and surface reflectance properties of real objects are needed for consistent and realistic shading of virtual objects. Another application which requires lighting information is a retrieval of shape information from shading. The main goal of light source estimation is to recover location, direction and intensity of light source(s) given one or more images of a real scene.

Many methods have been developed to estimate properties of single and multiple light sources. These methods use information from either one or a combination of shading, cast shadows, and specular reflections. Majority of these methods are based on shading information.

For example, Zhang et al. [15] developed a method for parallel light direction estimation using shading on surface of a spherical object in the scene. The sphere used in this method is assumed to have a Lambertian surface. With known sphere geometric and positional information in the scene, it is possible to estimate locations of pixels known as 'critical points' from a shaded image of the sphere. From the obtained critical points, light source directions can be estimated. Wang et al. [13] extends the use of this method to an object of arbitrary shape. The visible points on the object are mapped to a virtual sphere by matching the normal direction at each point.

Some critical boundaries may be lost during this process. They provide a method exploiting shadow information to solve the problem. Such hybrid method was reported to offer improved accuracy.

In Bouganis et al. [1] method, an attempt was made to increase accuracy and reduce limitations of Zhang et al.[15] method. The method for critical point detection in Bouganis et al. [1] method is different from the original one, but similar to that of Wei [14].

Virtual-to-Real (V2R) is their proposed algorithm that uses virtual light sources of adjacent regions. By subtracting the two virtual light sources, the pre-direction of the light source is determined. Their method can deal with the limitation of opposite lights in the original method and improved accuracy was reported.

Shadow and reflected light information has also been used for light source directions and intensities estimation. For example, Sato et al. [8][9][10] provide a method for estimating an illumination distribution of a real scene using information of reflected light distribution over a Lambertian planar surface. By using the occlusion information of an incoming light caused by an object of known geometry and location, the method can provide sampled directional light source directions from estimated illumination distribution.

Specular highlights on a shiny surface in the scene can also provide information for light source estimation. For example, Powell et al. [6] can estimate the positions of light sources from specular highlights on a pair of calibration spheres in the scene. This method estimates the positions and surface normals at the highlights in order to triangulate illuminants. Zhou et al. [16] present a method for locating multiple light sources and estimating their intensities from a pair of stereo images of a sphere. The sphere surface has both Lambertian and specular properties. The specular image is used to find the directions of the light sources, and the Lambertian image is used to find the intensities of the light sources. Another hybrid method is presented in [5] by Li et al.. The method integrates cues from shading, shadow and specular reflections for estimating directional illumination in a textured scene.

Even though these previous methods are successful in estimating light source directions and intensities, they assume that the light sources in the scene are far-field so that each light

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

source illuminates all objects at any point from the same direction. However, in a real scene (e.g., under indoor environment), it is quite common to have one or more near-field point light sources, which illuminate the objects from finite distance. In this case, a common parallel/directional light assumption of those methods is invalid.

Methods have been developed to estimate positions and intensities of near-field point light sources. Hara et al. [4] proposed two methods for recovering the surface reflectance properties of an object and the light source position from a single view without the distant illumination assumption. The first method is based on the use of the iterative separating-and-fitting relaxation algorithm. The second method estimates the specular reflection parameters and the light source position simultaneously by linearizing the Torrance-Sparrow specular reflection model and by optimizing the sample correlation coefficient. However, the methods were applied to a single light source case, and are applicable only to convex objects. Extension of the methods to the multiple light source case, if possible, can dramatically increase computational complexity.

Takai et al. [12] present an approach for estimating light sources from a single image of a scene that is illuminated by major near-field point light sources, and some directional light sources as well as ambient light. They use a pair of reference spheres as light probes. Major step in the method involves differencing the intensities of two image regions of the reference spheres. From an image of a difference sphere, parameters of point light sources are estimated by an iterative operation. The input image is updated by eliminating the lighting effects that is due to the estimated point light sources and the parameters of directional light sources and ambient light are estimated by an iterative operation again. Schniders et al. [11] propose an empirical analysis, which shows that line estimation from a single view of a single sphere is not possible in practice and present a closed form solution for recovering a polygon light source from a single view of two spheres and an iterative approach for rectangular light source estimation based on two views of a single sphere.

These methods for near-field point light source estimation are either limited to a single light source, or applicable under specific and often complex shooting setup. In this paper, we present a method to estimate the position and intensity of multiple near-field point light sources from a single view image. Unlike the methods of Schniders et al. [11] and Takai et al. [12] that use either the two reference spheres in the scene or two views of a single sphere, our method use only a single object of known geometry with specular reflection. Feature points in a cast shadow of that object on a ground plane with diffused reflection are exploited for effective and efficient source position estimation. Use of cast-shadow feature points can also help speeding up the computation. Note that, although there exists a method that use feature points in cast shadows for light source estimation (Cao et al. [2]), such method assumes that a light source is directional and two perspective view images of a scene are required. Note that, although using a pair of mirror spheres or cameras with fish-eye lens is an efficient method, it is inconvenient to setup specially when applied to near light source location estimation. The proposed method has the main benefit of simpler equipment setup.

An overview of the proposed method and the corresponding scene setup is first described. The method utilizes a specular highlight from an object of known geometry and location (a sphere in this case), and a ground plane with diffusive reflection (see Fig. 1 for the scene setup). The spherical object is required to contain some discontinuity on its surface (a sphere with a cone-shaped tip or a box corner in our case). Fig. 1 illustrates a case where there are two point light sources at L_1 and L_2, and the corresponding specular peaks S_1 and S_2, as seen by a camera on the right.

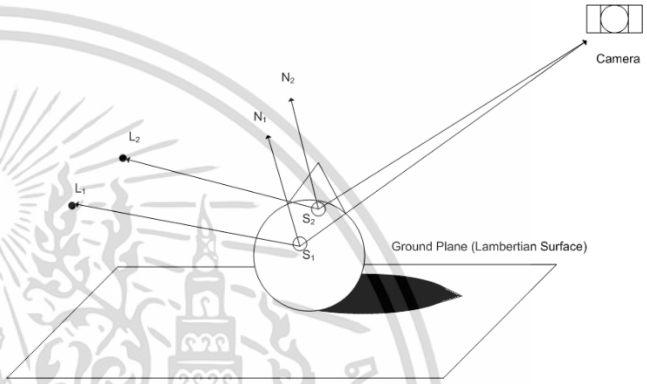


Fig. 1 The system setup containing a spherical object of known geometric parameters, and a ground plane with Lambertian-type reflection.

2. Using Specular Highlight for Light Source Direction Estimation

Specular reflection is the mirror-like reflection of light from a surface, in which light from each incoming direction is reflected into a single outgoing direction. The directions of incoming and outgoing light rays have the same angle with respect to the surface normal (see Fig. 2). Like those of Hara et al. [4], in this paper a specular highlight is utilized to estimation a point source direction. In doing so, a specular peak pixel on a taken image of a real scene is first identified. The direction of the corresponding light source, which produces a highlight on the surface point P, can be calculated as

$$\mathbf{l}_P = 2(\mathbf{n}_P^T \mathbf{v}_P)\, \mathbf{n}_p - \mathbf{v}_P \qquad (1)$$

where $\mathbf{l}_P$ is a vector of the light source direction measured at the point P, $\mathbf{n}_P$ is a surface normal vector at P, and $\mathbf{v}_P$ is a unit vector of a viewing direction, looked from P.

The light source position that causes specular peak at P is located along the direction of $\mathbf{l}_P$. In the next section, given the so obtained light source direction, a method for light source position estimation from feature points will be explained.

ลิขสิทธิ์นี้เป็นของ ... ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

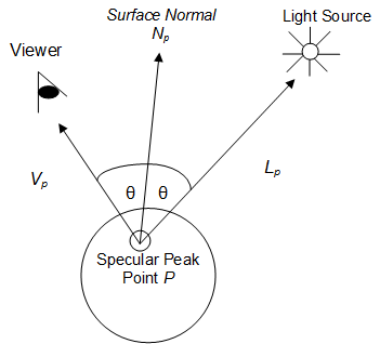


Fig. 2 Relationship of three vectors involved in specular reflection

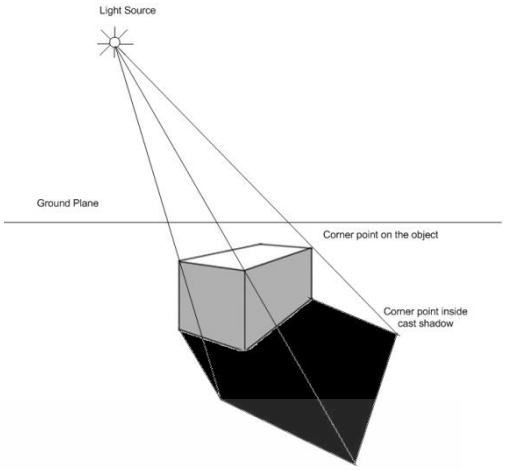


Fig. 3 Corner points on the object surface and the corresponding points in the object's shadow, used for light source position estimation.

3. Use of Feature Points for Source Position Estimation

Features are parts or aspects of the image which captures its salient characteristics. Features may be edges, corners, blobs or ridges. Feature detection is an image processing algorithm for identifying the presence and location of certain salient characteristics in an inspected image. In this paper, a corner detector is used to find a corner point(s) on a shadow edge of a spherical object cast on a ground plane. With known object geometry and location, the line connecting a detected corner point on the ground plane to the corresponding point on the object surface will pass through the light source position. When used in combination with the source direction estimated using a specular highlight as explained before, a source position can be obtained as illustrated in Fig. 3.

In addition, with a priori estimate of a source direction obtained using a specular highlight, feature points can be efficiently located by searching for such features only along a certain contour on a shadow-casted surface. In this case where a shadow is casted on a ground plane, such contour can be easily estimated by first constructing a plane consisting of an object corner point and any two arbitrary points along a light source path. The contour is then obtained as a line resulting from the intersection of that plane with the ground plane as illustrated in Fig. 4. With this, a corner detector is applied along the contour's projected line on an image plane.

With all possible candidates of an actual feature point, a line is formed from each feature point candidate and the discontinuity point on the object surface. With respect to the discontinuity point, these lines are denoted by $\mathbf{f}_{m.n}$, $m = 1, \ldots, M$, $n = 1, \ldots, N$, where M is the number of detected feature point candidates and N is the number of light sources.

With respect to the specular peak position, the estimated n^{th} light source directions are denoted by $\mathbf{l}_{P,n}$. Let P_n be the position of the n^{th} specular peak with respect to the discontinuity point. Given a suitable scalar value β_m, the intersection points between $\mathbf{f}_{m.n}$ and $P_n + \beta_m.\mathbf{l}_{P,n}$ are M possible position of the n^{th} light source. These intersection points are denoted by $L'_{1,n}, \ldots, L'_{M,n}$ (see Fig. 5).

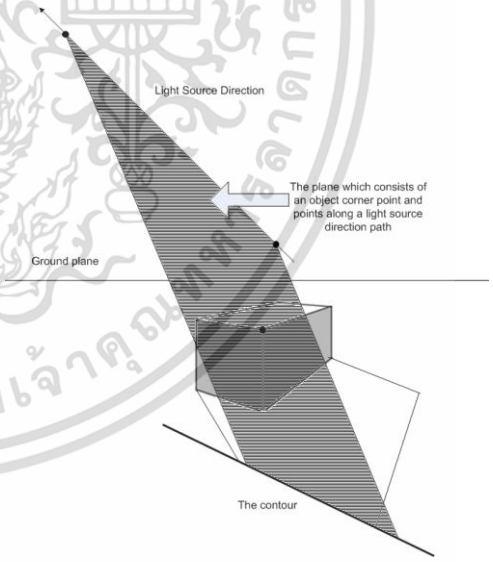


Fig. 4 The contour formed by the intersection of the plane containing a surface discontinuity point and points along a light source direction path, with the ground plane

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

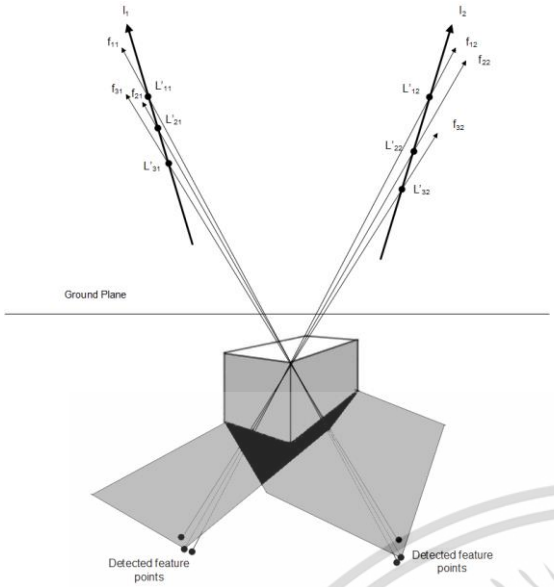


Fig. 5 Possible positions of light sources estimated from feature point candidates

In practice, soft shadow may appear instead of a hard one. Feature point detection can be less accurate under this scenario. Furthermore, in real scene, the depth value from depth camera may be inaccurate. This is the reason why some feature point candidates must be kept in the previous discussion. To identify an actual feature point from those candidates, information collected from ground-plane diffuse reflection is used for this purpose as explained next.

4. Light Source Position Estimation from Ground-Plane Diffuse Reflection

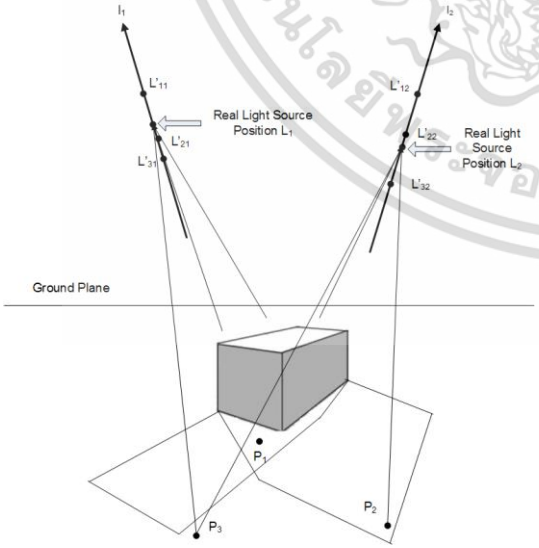


Fig. 6. Light sources are occluded at some points on the ground plane.

Similar to Sato et al. [8][9][10] method, the proposed method utilizes shadow of a known-geometry object, casted on a ground plane. Different ground-plane illumination scenarios are illustrated in Fig. 6. From the figure, at the point P_1, lights coming from the point light sources at L_1 and L_2 are blocked. On the other hand, the point P_2 is illuminated by the light coming from L_2 alone. At P_3, no occlusion occurs for both light sources.

Here, the ground plane is assumed to have a Lambertian surface. An amount of ground-plane reflected light as observed by the k^{th} pixel is obtained as.

$$I_k = \sum_{n=1}^{N} \frac{K_d E_n \cos(\theta_{k,n})\, S_{k,n}}{\|L_n - P_k\|^2} \tag{2}$$

From the above equation, L_n and P_k are real-world positions of the nth light source and the k^{th} pixel. In addition, E_n and $\theta_{k,n}$ are respectively, the light source intensity and the angle with respect to the ground-plane surface normal. The parameter K_d is the surface diffuse reflection coefficient. The occlusion coefficient $S_{k,n}$ is zero if the n^{th} light source is occluded at the k^{th} pixel, and one otherwise.

There is more than one possible value for L_n. For example, in a single light source case and three light source position candidates $L'_{1,n}$, $L'_{2,n}$, $L'_{3,n}$, L_n can take on any one of them. To find which one best represents an actual light source position, Eq. (2) is evaluated for each possible value of L_n. The one best fitting Eq. 2 in a least square sense is chosen as a light source position estimate. Similar method can be applied for the case of two or more light sources.

To compute which value is the best estimate of the light source position, solving Eq. (2) is equivalent to finding the solution to the following set of linear equations [8]

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \tag{3}$$

where

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \alpha_{1,3} & \dots & \alpha_{1,N} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \alpha_{2,3} & \dots & \alpha_{2,N} \\ \alpha_{3,1} & \alpha_{3,2} & \alpha_{3,3} & \dots & \alpha_{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{K,1} & \alpha_{K,2} & \alpha_{K,3} & \dots & \alpha_{K,N} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathbf{b} = [I_1 \quad I_2 \quad I_3 \quad \cdots \quad I_K]^T \tag{5}$$

$$\mathbf{x} = [E_1 \quad E_2 \quad E_3 \quad \cdots \quad E_N]^T \tag{6}$$

$$\alpha_{k,n} = \frac{K_d \cos(\theta_{k,n})\, S_{k,n}}{\|L_n - P_k\|^2} \tag{7}$$

Eq. (3) can be solved for a non-negative least squares solution. Let $\mathbf{x}_{nnls}$ be such as solution. How good the solution fits the model is measured by the following RMSE.

$$e_{rmse} = \|\mathbf{Ax}_{\text{nnls}} - \mathbf{b}\| \tag{8}$$

When there are more than one candidate for a light source

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

position, Eq. (8) is computed for each candidate so that the one with the minimum error is chosen. As an example, first consider the single light source case. Let $L'_{1,1}$, $L'_{2,1}$, $L'_{3,1}$ be three possible light source positions. By using $L_1 = L'_{m,1}$, m = 1, 2, 3, three RMSE values $e_{rmse,m}$ are obtained. Then, select $L'_{m,1}$ whose $e_{rmse,m}$ is minimum. Extension of this procedure to the case of multiple light sources is straightforward.

5. Steps for Multiple Light Source Position Estimation

In this method, the following requirements are assumed.

- The camera parameter and the geometry of objects in the scene are known.
- The scene is illuminated by one or more point light sources.
- All specular peaks corresponding to light sources are visible in the image used for the estimation.
- All cast shadows on the floor due all light sources are visible on the taken image.
- The reflectance properties of the spherical and plane objects are known.
- The floor plane has a Lambertian surface.
- Objects in the scene contain one or more surface discontinuity point, where there is an abrupt change in the surface normal vector.

In the proposed method, steps for light source position estimation can be summarized below.

1. Acquire an image containing specular highlights and a floor plane with shadow casted by a spherical object on it.
2. Find the specular peak pixels and calculate the directions of light sources (This step is explained in Section 2).
3. Compute a contour on a ground plane, where a cast shadow of a feature point must lie upon (This step is described in Section 3)
4. Detect possible corner points on the shadow along the contour obtained from Step 3.
5. Pair each candidate corner point from Step 5 with the corresponding discontinuity point on the object to form a direction that possibly point to an actual source position.
6. Find the intersection point of each line from step 5 and the line from step 2 to determine a set of possible location points of the light source. In practice, a pair of lines may not intersect in 3D space. In this case, a middle point on a shortest line connecting the two lines is chosen instead.
7. Choose light source position candidates as obtained from Step 6 that best fit the ground-plane diffused light equation Eq. (2) in a non-negative least square sense by comparing the corresponding error in Eq. (8).
8. With a known ground-plane reflection coefficient, light source intensities can be estimated from a chosen solution to Eq. (2). Otherwise, the intensities are known up to a scaling factor.

6. Experiment

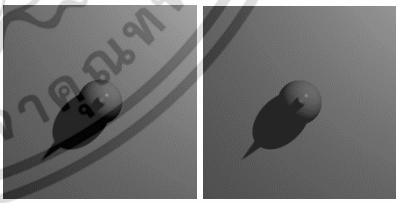
The images used in this experiment are synthetic images at a resolution of 800x800. There are 1-10 point light source(s) and one camera in the scene which was placed above of the object and looked down toward it. From this position of the camera, all specular highlights and cast shadows can be seen by the camera. The object is a sphere with a small conic shape on top. All light sources in the scene are point light sources which create soft shadow on the ground plane because the number of light ray samples defined is more than one sample. The experiments were performed to evaluate the accuracy of the proposed method. Improvement obtained by using the reflected light fitting step (Step 7) was also investigated.

6.1 One Light Source Case

There was only one light source in this experiment. The distance mean square error between the position of the real light source and the estimated position was calculated and used as accuracy measure. The results using the methods with and without reflected light fitting step are shown in Table 1. Figure 7(a) shows the source image, Figure 7(b) shows the reconstructed image obtained using estimated light source information.

Method	RMSE
Without the reflected light fitting step	9.61
With the reflected light fitting step	7.11

Table 1 Averaged light position estimation errors for the one light source case.



(a) (b)

Fig. 7 Images for the one light source case
(a) source image (b) reconstructed image

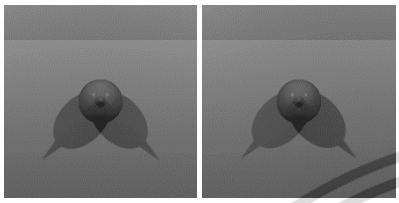
6.2 Two Light Source Case

There were two light sources in this experiment and the distance between two light sources is far enough to separate the specular peak point and cast shadow from each light source. The results are shown in Table 2. Figure 8(a) shows the source image, while Figure 8(b) shows the reconstructed image obtained using the estimated light source.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Method	RMSE (light no. 1)	RMSE (light no. 2)
Without the reflected light fitting step	7.36	2.27
With the reflected light fitting step	0.17	1.91

Table 2 Averaged light position estimation errors for the two light sources case.



(a) (b)

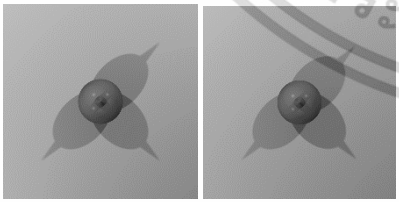
Fig. 8 Images for the two light sources case
(a) source image (b) reconstructed image

6.3 Three Light Source Case

There were three light sources in this experiment and the distance between three light sources is far enough to separate the specular peak point and cast shadow from each light source. The results are shown in Table 3. Figure 9 shows the source and reconstructed images, the latter of which was rendered using the estimated light source positions.

Method	RMSE (light no. 1)	RMSE (light no. 2)	RMSE (light no. 3)
Without the reflected light fitting step	7.04	3.62	14.56
With the reflected light fitting step	0.61	1.78	1.06

Table 3 Averaged light position estimation errors for the three light sources case.



(a) (b)

Fig. 9 Images for the three light sources case
(a) source image (b) reconstructed image

From the results of the experiments, it is seen that the estimated light source positions from the first method are less accurate than the second method because of soft shadows with blurry edges. Feature point detection was less accurate in this case. Using the additional reflected light fitting step noticeably improved the estimation accuracy.

7. Conclusions

In this paper, a method for multiple near-field point light sources estimation has been described. Our method uses information from specular highlights, feature points in cast shadows and diffuse component on the Lambertian ground plane. Specular highlight is used to estimate a light source direction. Feature points, along with an estimated light source direction, give an estimate of a light source position. For a case where feature points cannot be accurately detected, each possible solution is applied to fit a ground-plane light reflection solution in a least square sense. A solution candidate with a minimum least square error is chosen as an estimate of light source positions. Experimental results have been reported on the method's effectiveness.

References

[1] Bouganis, C.,-S., and Brookes M.,: Multiple light source detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol.26, No.4, pp.509-514 (2004).

[2] Cao, X., and Shah, M.,: Camera Calibration and Light Source Estimation from Images with Shadows, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,* Vol.2, pp.918-923 (2005).

[3] Daniel, H,. C., Juho, K., and Janne, H.,: Joint depth and color camera calibration with distortion correction, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol.34. No.10, pp.2058-2064 (2012).

[4] Hara K., Nishino K., and Ikeuchi, K.,: Light source position and reflectance estimation from a single view without the distant illumination assumption, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, V*ol.27, No.8, pp. 493-505 (2005).

[5] Li, Y., Lin, S., Lu, H., and Shum, H.,: Multiple-cue illumination estimation in textured scenes, *Proc. The Ninth International Conference on Computer Vision,* Vol.2, pp. 1366-1373 (2003).

[6] Powell, M., W., Sarkar, S., and Goldgof, D.,: A simple Strategy for calibrating the geometry of light sources, *IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol.23, No.9, pp.1022-1027 (2001).

[7] Sato, I., Sato, Y., and Ikeuchi, K.,: Acquiring a Radiance Distribution to Superimpose Virtual Objects onto a Real Scene, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,* Vol.5, No.1, pp.1-12 (1999).

[8] Sato, I., Sato, Y., and Ikeuchi, K.,: Illumination distribution from brightness in shadows: Adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions, *Intl. Conference on Computer Vision,* Vol.2, pp.875-883 (1999).

[9] Sato, I., Sato, Y., and Ikeuchi, K.,: Illumination distribution from shadows, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,* Vol.1, pp.306-312 (1999).

[10] Sato, I., Sato, Y,. and Ikeuchi, K.,: Stability issues in recovering illumination distribution from brightness in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shadows. *IEEE. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,* Vol.2, pp.400-407 (2001).

[11] Schnieders, D., Wong, Kwan-Yee, K., and Dai, Z.,: Polygonal Light Source Estimation, *Computer Vision – ACCV 2009. Lecture Notes in Computer Science,* Vol.5996, pp.966-107 (2010).

[12] Takai, T., Maki, A., Niinuma, K., and Matsuyama, T.,: Difference sphere: An approach to near light source estimation, *Computer Vision and Image Understanding,* Vol.113, No.9, pp. 966-978 (2009).

[13] Wang, Y., and Samaras, D.,: Estimation of Multiple Directional Light Sources for Synthesis of Mixed Reality Images, *The tenth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications,* pp.38-47 (2002).

[14] Wei, J.,: Robust recovery of multiple light source based on local light source constant constraint, *Pattern Recognition Letters,* Vol.24, No.1-3, pp. 159-172 (2003).

[15] Zhang, Y., and Yang, Y.-H.,: Multiple illumination direction detection with application to image synthesis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* vol.23, no.8, pp. 915-920 (2001).

[16] Zhou, W., and Kambhamettu, C.,: Estimation of illuminant direction and intensity of multiple light sources. *European Conference on Computer Vision,* Vol.4, LNCS 2353, pp.206-22 (2002).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อนามสกุล	นายอนุสรณ์ บรรเทิง
วัน เดือน ปีเกิด	11 สิงหาคม 2521
ที่อยู่	444/76 หมู่ 1 ถนนวาริน-ศรีสะเกษ ตำบลคำน้ำแซบ อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190
ประวัติการศึกษา	2543 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 2548 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	2545-2546 สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 7 อุบลราชธานี ตำแหน่ง วิทยากร 2546-2547 สำนักคอมพิวเตอร์และเครือข่าย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ตำแหน่ง นักวิชาการคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้