บทความวิจัย

การเขียนทางเดินของรังสีใด ๆ เพื่อหาตำแหน่งภาพจากเลนส์บางหรือกระจกโค้ง

Arbitrary Ray Tracing to Locate Image Formed by a Thin Lens or Spherical Mirror

เดชา ศุภพิทยาภรณ์[1*]

Decha Suppapittayaporn[1*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการเขียนทางเดินแสงเพื่อหาตำแหน่งภาพสำหรับเลนส์บางและกระจกโค้งอีกวิธีหนึ่ง โดยไม่ใช้ Principle Rays แต่ใช้รังสีใด ๆ (Arbitrary Rays) แทน วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนเรื่อง แสงเชิงเรขาคณิต เพื่อเพิ่มความเข้าใจและช่วยลดความเข้าใจคลาดเคลื่อนบางประการเกี่ยวกับการเกิดภาพในเลนส์บางหรือกระจกโค้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่เลนส์หรือกระจกถูกปิดบางส่วนและใช้ในเขียนทางเดินแสงแสดงการเกิดภาพในระบบเลนส์ประกอบหรือกระจกโค้งในกรณีที่เกิดวัตถุเสมือนได้

คำสำคัญ: การเขียนทางเดินแสง เลนส์บาง กระจกโค้ง

Abstract

This article presents an alternative method for ray tracing to locate image position for thin lenses and spherical mirrors without using the principle rays but arbitrary rays instead. This method can be used to engage in fundamental geometric optics classroom to enhance students' understanding as well as to overcome some misconception about image formation by thin lenses or spherical mirrors particularly in cases of a partial covered lens/mirror and a compound system of lenses or mirrors dealing with virtual object.

Keywords: Ray Tracing, Thin Lens, Spherical Mirror

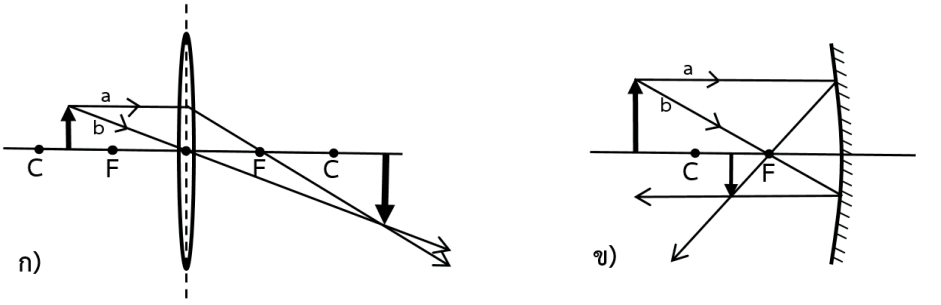
[1] อ.ดร., สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

[1] Lecturer, Dr., Department of Science Education, Faculty of Science, Chiang Mai University, 50200

[*] Corresponding author: E-mail address: dechasp@gmail.com

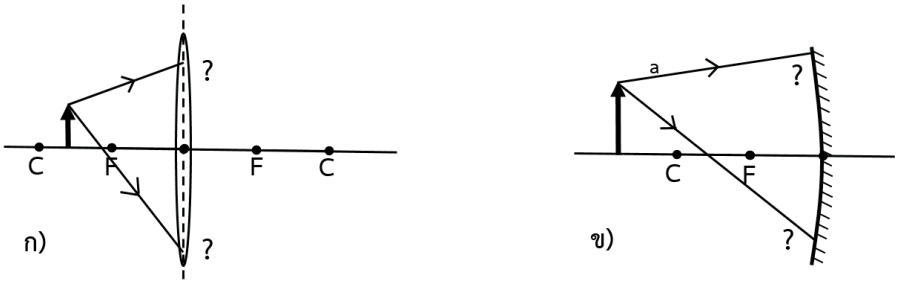
บทนำ

ในการหาตำแหน่งและลักษณะของภาพที่เกิดจากการหักเหผ่านเลนส์หรือการสะท้อนของแสงจากกระจกโค้ง ปกติในตำราฟิสิกส์พื้นฐานทั่วไป (เช่น Young, Freedman and Ford [1]) สามารถหาได้โดยเขียนรังสีตกกระทบที่เรียกว่า Principal Rays อย่างน้อย 2 เส้น ซึ่งอาจจะเป็น 1) รังสีตกกระทบที่ขนานกับแกนมุขสำคัญ รังสีหักเห (เลนส์) หรือรังสีสะท้อน (กระจกโค้ง) จะผ่านจุดโฟกัส 2) รังสีตกกระทบที่ผ่านจุดโฟกัส รังสีหักเห (เลนส์) หรือรังสีสะท้อน (กระจกโค้ง) จะขนานกับแกนมุขสำคัญ 3) รังสีที่ผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง รังสีหักเห (เลนส์) หรือรังสีสะท้อน (กระจกโค้ง) จะผ่านจุดศูนย์กลางความโค้งเช่นกัน และ 4) รังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลาง (เฉพาะเลนส์) รังสีหักเหจะเดินทางเป็นเส้นตรงต่อไป ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเขียนทางเดินแสงเพื่อหาตำแหน่งภาพโดยใช้ Principal Rays จำนวน 2 เส้น สำหรับเลนส์นูน (ก) และกระจกเว้า (ข)

อย่างไรก็ตาม การเขียนทางเดินแสงโดยใช้ Principal Rays อย่างเดียว ในบางกรณีอาจจะทำไม่ได้เพราะแสงหรือรังสีตกกระทบอาจจะเลยขอบเลนส์หรือกระจก บางกรณีก็อาจจะทำให้เกิดความเข้าใจที่ไม่ถูกต้อง [2] จึงเกิดคำถามว่าจะมีวิธีเขียนทางเดินแสงโดยใช้รังสีเส้นอื่นที่เป็นรังสีใดๆ (Arbitrary Rays) ที่ไม่ใช่ Principal Rays ได้หรือไม่ (ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2)

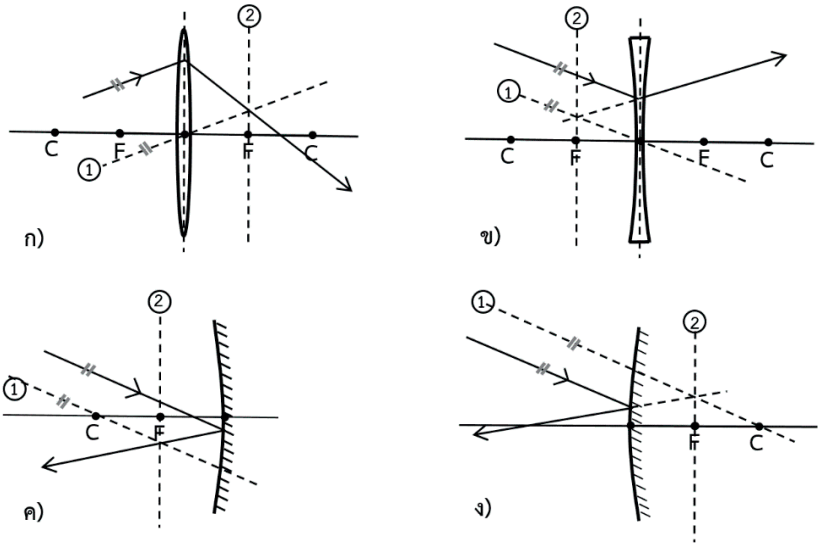


ภาพที่ 2 รังสีตกกระทบใด ๆ ที่ไม่ใช่ Principal Rays กระทบเลนส์หรือกระจก ซึ่งหลายคนอาจจะสงสัยว่าจะเขียนทางเดินของแสงอย่างไร

คำตอบคือ ได้ ผู้เขียนได้เคยเขียนวิธีการไว้ [3] สำหรับเลนส์และนำมาขยายความในที่นี้ให้ครอบคลุมกรณีของกระจกโค้งด้วย ซึ่งวิธีการนี้อาจจะช่วยเพิ่มความเข้าใจของนักเรียนหรือนักศึกษาให้ถูกต้องหลายประการ เช่น ช่วยให้ผู้เรียนตระหนักว่าแสงไม่ได้ออกจากวัตถุเพียงแค่ 2 หรือ 3 เส้นเท่านั้น [4] นอกจากนี้ยังจะช่วยลดความเข้าใจคลาดเคลื่อนจากการเกิดภาพในเลนส์หรือกระจกที่ถูกปิดหรือบังบางส่วน [2] และวิธีการนี้จะเป็นวิธีการเขียนทางเดินแสงสำหรับวัตถุเสมือนเพิ่มเติมอีกวิธีหนึ่ง นอกเหนือจากวิธีของ Leinoff [5]

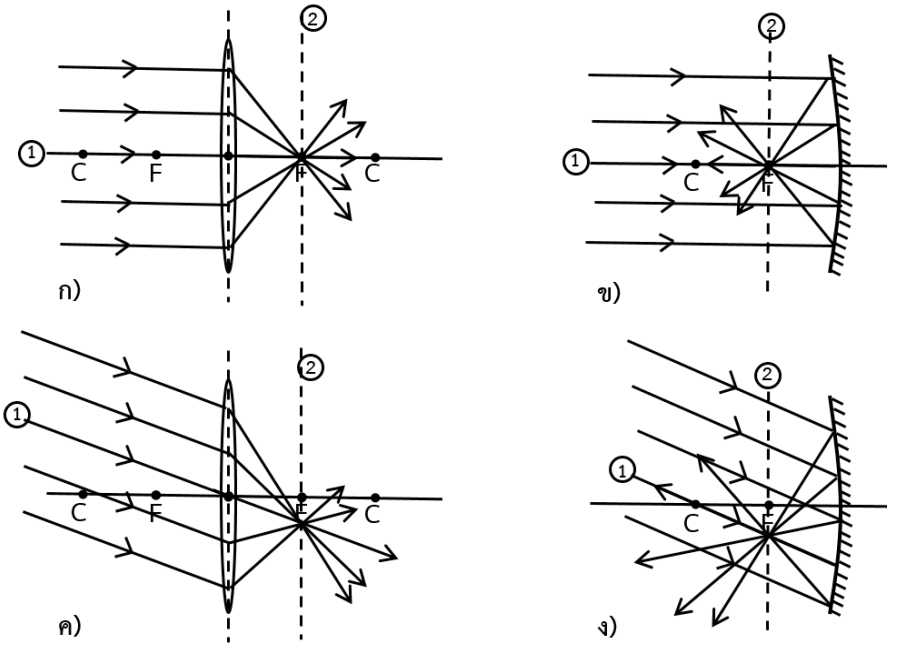
วิธีการ

ในการเขียนรังสีหักเหจากเลนส์หรือรังสีสะท้อนจากกระจกโค้งของรังสีตกกระทบใดๆ ทำได้โดยการเขียนเส้นที่ผู้เขียนขอเรียกว่าเส้นนำทาง (Guiding Lines เป็นเส้น ไม่ใช่รังสีของแสง) จำนวน 2 เส้น ดังภาพที่ 3 โดยที่สำหรับเลนส์ เส้นนำทางเส้นแรกคือเส้นตรงที่ต้องลากให้ขนานกับรังสีตกกระทบและผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ (เส้นประ (1) ในภาพที่ 3-ก และ 3-ข) เส้นที่สองคือเส้นตรงที่ต้องลากให้ผ่านจุดโฟกัสและตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ (เส้นประ (2) ในภาพที่ 3-ก และ 3-ข) แล้วรังสีหักเหหรือแนวของรังสีหักเหจะผ่านจุดตัดของเส้นนำทางสองเส้นนี้เสมอ ส่วนกระจกโค้ง เส้นนำทางเส้นแรกคือเส้นตรงที่ต้องลากให้ขนานกับรังสีตกกระทบและผ่านจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจก (เส้นประ (1) ในภาพที่ 3-ค และ 3-ง) และเส้นนำทางเส้นที่สองคือเส้นตรงที่ต้องลากให้ผ่านจุดโฟกัสและตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ (เส้นประ (2) ในภาพที่ 3-ค และ 3-ง) รังสีสะท้อนหรือแนวของรังสีสะท้อนจะผ่านจุดตัดของสองเส้นนี้เสมอ



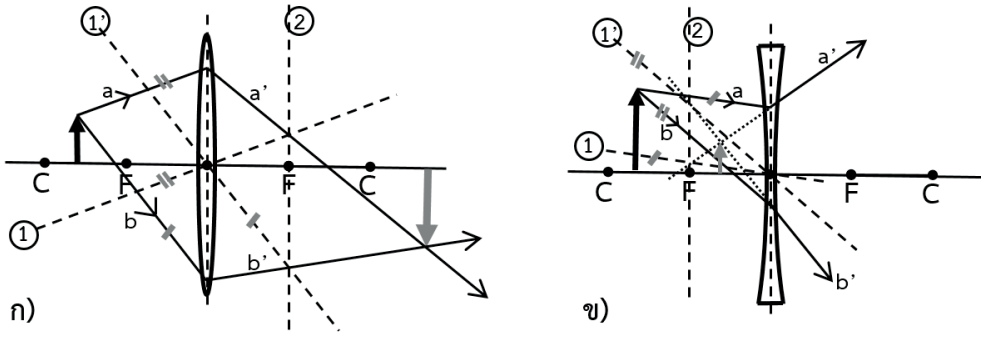
ภาพที่ 3 เส้นนำทาง (1) และ (2) ที่ใช้ในการหาแนวรังสีหักเหและรังสีสะท้อนสำหรับเลนส์บางและกระจกโค้ง โดยรังสีหักเหหรือรังสีสะท้อนจะผ่านจุดตัดของเส้นนำทางทั้งสองเส้นนี้เสมอ

ผู้อ่านอาจจะสงสัยหรือต้องการคำอธิบายว่าทำไมถึงใช้สองเส้นนี้เป็นเส้นนำทางได้ ลองพิจารณากรณีที่แสงขนานมาตกกระทบเลนส์หรือกระจกโค้งดังที่แสดงในภาพที่ 4 โดยที่แนวของแสงขนานกับแกนมุขสำคัญดังภาพที่ 4-ก และ 4-ข แสงหักเหของเลนส์หรือแสงสะท้อนจากกระจกก็ไปรวมกันที่จุดโฟกัสเสมอ และถ้าแนวของแสงขนานที่ตกกระทบเลนส์หรือกระจกโค้งไม่ขนานกับมุขสำคัญดังตัวอย่างในภาพที่ 4-ค และ 4-ง จะพบว่าแสงหักเหของเลนส์และแสงสะท้อนของกระจกเว้าก็ไปรวมกันบนระนาบโฟกัส (Focal Plane) เมื่อสังเกตดูจะพบว่าสำหรับเลนส์นูน แสงหักเหจะผ่านจุดตัดของรังสีเส้นที่ผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ (เส้น (1) ในภาพ 4-ก และ 4-ค) กับเส้นที่เป็นแนวของระนาบของจุดโฟกัส (เส้น (2) ในภาพที่ 4-ก และ 4-ค) เสมอ สำหรับกระจกเว้า แสงสะท้อนทุกเส้นจะไปรวมกันที่จุดตัดของเส้นที่ผ่านจุดศูนย์กลางความโค้งกระจกหรือ C (เส้น (1) ในภาพที่ 4-ข และ 4-ง) กับเส้นที่เป็นแนวของระนาบของจุดโฟกัส (เส้น (2) ในภาพที่ 4-ข และ 4-ง) เสมอ เราจึงสามารถใช้สองเส้นนี้เป็นเส้นนำทางของรังสีที่เหลือได้ ในกรณีของเลนส์เว้าหรือกระจกนูนก็สามารถหาเส้นนำทางได้ด้วยวิธีคล้ายๆ กันนี้



ภาพที่ 4 แสงขนานผ่านเลนส์นูนและกระจกเว้าจะรวมกันที่จุดตัดของเส้น (1) และ (2) เสมอ

ดังนั้นถ้าต้องการหาตำแหน่งภาพโดยวิธีดังกล่าว ก็สามารถใช้รังสีตกกระทบใดๆ ก็ได้ที่ไม่จำเป็นต้องเป็น Principal Rays แต่ใช้เส้นนำทาง 2 เส้น ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 5 ในกรณีของเลนส์บางและภาพที่ 6 ในกรณีของกระจกโค้ง

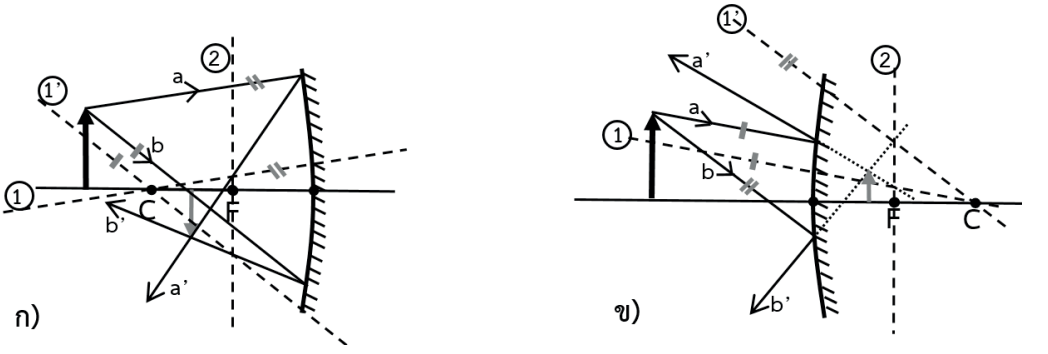


ภาพที่ 5 การเขียนทางเดินแสงเพื่อหาตำแหน่งภาพโดยใช้รังสีใด ๆ โดยใช้เส้นนำทาง 2 เส้นสำหรับเลนส์บาง

ภาพที่ 5-ก แสดงตัวอย่างการเขียนทางเดินของแสงเพื่อหาตำแหน่งภาพเมื่อวางวัตถุไว้หน้าเลนส์นูน (เช่นเดียวกับภาพที่ 1-ก) โดยใช้รังสีตกกระทบใด ๆ สมมติให้เป็นรังสี a และ b ในการหาทิศทางของรังสีหักเหของรังสีทั้งสองนี้ทำได้โดยการลากเส้นนำทาง (1) สำหรับรังสีตกกระทบ a โดยให้ขนานกับรังสี a และผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์และจะต้องลากเส้นนำทาง (1') สำหรับรังสีตกกระทบ b โดยให้ขนานกับรังสี b และผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ และลากเส้นนำทาง (2) ที่ผ่านจุด F และตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ รังสีหักเหของ a จะผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1) กับ (2) เป็นรังสี a' และรังสีหักเหของ b จะผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1') กับ (2) เป็นรังสี b' ภาพจะเกิดที่ตำแหน่ง

ที่รังสีหักเห a' และ b' ไปตัดกัน ดังที่แสดงในภาพที่ 5 ซึ่งถ้าเทียบภาพที่ 5-ก กับภาพที่ 1-ก ที่วางวัตถุไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันจะพบว่าเกิดภาพที่เหมือนกันและสำหรับเลนส์เว้าก็เขียนทางเดินแสงทำนองเดียวกันได้ ดังภาพ ที่ 5-ข โดยการลากเส้นนำทาง (1) ขนานกับรังสีตกกระทบ a แล้วแนวของรังสีหักเห a' (ต่อถอยหลัง) จะผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1) และ (2) ซึ่งเป็นระนาบของจุดโฟกัสและลากเส้นนำทาง (1') ให้ขนานกับรังสีตกกระทบ b แล้วแนวของรังสีหักเห b' (ต่อถอยหลัง) จะผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1') และ (2) ภาพจะเกิดจากจุดที่แนวของรังสี a' และ b' ไปตัดกัน (ต่อถอยหลังเป็นรังสีเสมือน) จะพบว่าได้ผลเหมือนกับการใช้ Principle Rays ทุกประการ

ภาพที่ 6 แสดงการเขียนทางเดินแสงโดยใช้เส้นนำทาง 2 เส้นสำหรับกระจกโค้ง เส้นนำทางเส้นแรกแตกต่างไปจากกรณีเลนส์เล็กน้อยที่ต้องลากให้ขนานกับรังสีตกกระทบและผ่านจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจก (C) แทน



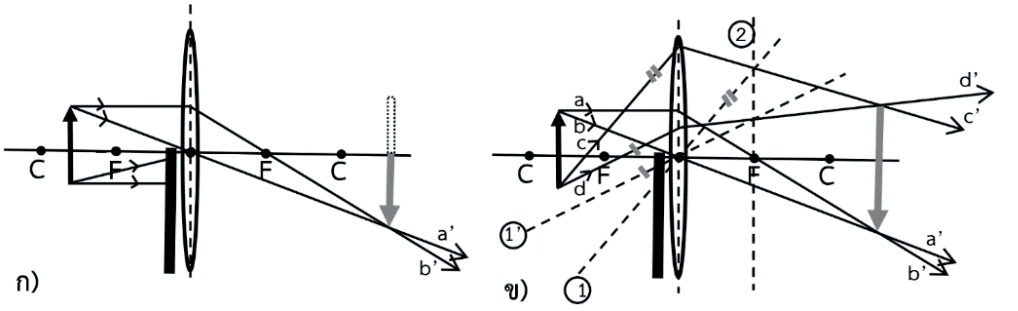
ภาพที่ 6 การเขียนทางเดินแสงเพื่อหาตำแหน่งภาพโดยใช้รังสีใด ๆ ที่โดยใช้เส้นนำทาง 2 เส้นสำหรับกระจกโค้ง

ภาพที่ 6-ก แสดงตัวอย่างการเขียนทางเดินของแสงเพื่อหาตำแหน่งภาพเมื่อวางวัตถุไว้หน้ากระจกเว้า สมมติว่าใช้รังสีตกกระทบจากวัตถุเป็นรังสี ใด ๆ a และ b ในการหาทิศทางของรังสีสะท้อนของ a ทำได้โดยการลากเส้นนำทาง (1) ให้ขนานกับรังสี a และผ่านจุด C และการหารังสีสะท้อนของ b ทำได้โดยการลากเส้นนำทาง (1') ให้ขนานกับรังสี b และผ่านจุด C หลังจากนั้นลากเส้นนำทาง 2 ให้ผ่านจุด F และตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ แล้วรังสีสะท้อนของ a จะผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1) กับ (2) เป็นแนวของรังสีสะท้อน a' และในการหาทิศทางของรังสีสะท้อน b ต้องลากเส้นนำทาง (1') ให้ขนานกับรังสี b แล้วรังสีสะท้อน b' จะผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1') กับ (2) และภาพจะเกิดที่ตำแหน่งที่รังสีสะท้อน a' และ b' ไปตัดกันดังที่แสดงในภาพที่ 6 ซึ่งถ้าเทียบกับภาพที่ 6-ก กับภาพที่ 1-ข จะพบว่าเกิดภาพที่เหมือนกัน และสำหรับกระจกนูนก็เขียนทางเดินแสงทำนองเดียวกันได้ ดังภาพที่ 6-ข เส้นนำทาง (1) ต้องลากให้ขนานกับรังสี a ทำให้ได้รังสีสะท้อน a' ที่มีแนวผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1) และ (2) ส่วนเส้นนำทาง (1') ต้องลากให้ขนานกับรังสี b ทำให้ได้รังสีสะท้อน b' ที่มีแนวผ่านจุดตัดของเส้นนำทาง (1') และ (2) ภาพที่เกิดขึ้นจะผ่านจุดตัดของรังสีสะท้อน a' และ b' (ต้องต่อรังสีสะท้อนถอยหลังไปตัดกัน ได้ภาพเสมือน)

มาถึงจุดนี้หลายคนอาจจะตั้งคำถามว่า ทำไมเราต้องใช้วิธีการที่ยุ่งยากกว่าวิธีการเดิมที่ใช้แค่ Principal Rays อย่างไรก็ตาม มีผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การใช้ Principal Rays อย่างเดียวอาจจะทำให้ผู้เรียนเข้าใจคลาดเคลื่อน หรือเข้าใจเนื้อหาไม่สมบูรณ์ในบางกรณี เช่นกรณีเลนส์หรือกระจกที่ถูกปิดไว้บางส่วนหรือไม่สามารถเขียนทางเดินของแสงในกรณีที่มีวัตถุเสมือน (วัตถุที่อยู่หลังเลนส์หรือกระจก) ได้ ดังรายละเอียดที่จะกล่าวถึงต่อไป

เลนส์หรือกระจกที่ถูกปิดไว้บางส่วน

มีผลการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า หลังจากการสอนให้นักเรียนหรือนักศึกษาเขียนทางเดินแสงโดยใช้ Principle Rays พบว่ามีจำนวนมากที่เข้าใจว่าถ้าปิดเลนส์หรือกระโค้งไว้ครึ่งหนึ่งและเอาวัตถุไว้ด้านหน้า ภาพที่เกิดขึ้นจะหายไปครึ่งหนึ่ง (เช่น Goldberg and McDermott [2]) เพราะว่าไม่สามารถเขียนทางเดินของแสงโดยใช้ Principal Rays ผ่านครึ่งของเลนส์หรือกระจกที่ถูกบังไว้ ผู้เขียนก็เคยมีประสบการณ์ในการสอนระดับมัธยมศึกษารวมทั้งนักศึกษาครูก็พบว่ามีความเข้าใจคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกัน ดังที่แสดงภาพที่ 7 ซึ่งถ้าหากไปทดลองกับเลนส์จริง เราจะพบว่าภาพไม่ได้หายไปครึ่งหนึ่ง เพียงแต่ภาพอาจจะจางลงไปหรือมีความสว่างลดลง ถ้าผู้เรียนสามารถเขียนทางเดินแสงโดยใช้รังสีใด ๆ ที่ไม่ใช่ Principal Rays อย่างเดียวก็อาจจะช่วยให้ผู้เรียนสร้างภาพเองและเข้าใจได้ถูกต้องมากขึ้น

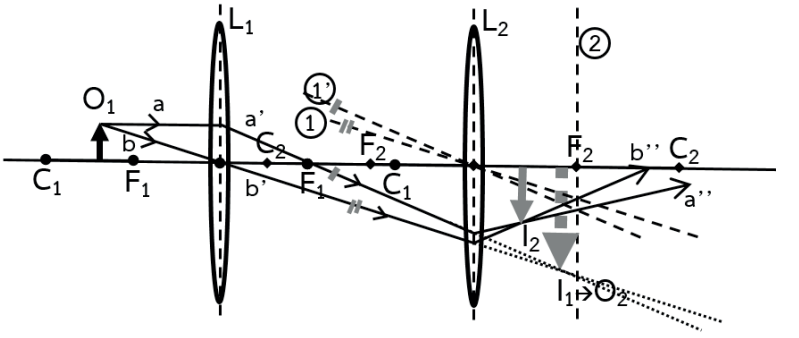


ภาพที่ 7 ผู้เรียนหลายคนเข้าใจผิดว่าภาพจะหายไปครึ่งหนึ่งถ้าเลนส์ที่ถูกปิดไว้ครึ่งหนึ่ง (ก) และวิธีการเขียนทางเดินแสงเพื่อแสดงให้เห็นว่าภาพไม่ได้หายไปครึ่งหนึ่ง (ข)

ภาพที่ 7-ก แสดงการเขียนทางเดินแสงผ่านเลนส์ที่ถูกบังไว้ครึ่งหนึ่ง ผู้เรียนจำนวนมากเข้าใจคลาดเคลื่อนว่าภาพที่เกิดขึ้นจะหายไปครึ่งหนึ่งเพราะไม่สามารถเขียนทางเดินแสงจากท่อนล่างของวัตถุผ่านเลนส์ที่ถูกบังไว้ได้ แต่ถ้าผู้เรียนสามารถเขียนทางเดินแสงโดยใช้รังสีใดๆ ได้ ดังภาพที่ 7-ข ซึ่งได้แสดงการเขียนทางเดินแสงของรังสี c และ d โดยการลากเส้นนำทาง (1) ให้ขนานกับรังสี c และเส้นนำทาง (1') สำหรับรังสี d ให้ผ่านจุดกดกึ่งกลางเลนส์ และลากเส้นนำทาง (2) ให้ผ่านจุด F และตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ เพื่อหาจุดตัดกันของรังสี c' และ d' จะพบว่ารังสีหักเหไปตัดกันทำให้เกิดภาพยังเต็มขนาดและผู้เรียนควรจะทำความเข้าใจได้ว่าภาพที่เกิดขึ้นจะต้องจางลง เนื่องจากปริมาณแสงที่ผ่านทะลุเลนส์ไปจะน้อยลงตามสัดส่วนที่ปิดหรือบังไว้ และแน่นอนว่าวิธีการนี้ใช้ได้กับเลนส์เว้า กระจกเว้าหรือกระจกนูนที่ถูกบังบางส่วนได้เช่นกัน

วัตถุเสมือนในระบบเลนส์ประกอบ

ในระบบเลนส์ประกอบ ในบางกรณีวัตถุของเลนส์ตัวที่สองอาจจะเป็นวัตถุเสมือน (วัตถุอยู่หลังเลนส์) เราไม่สามารถเขียนทางเดินแสงย้อนกลับมาหาเลนส์ใดๆ จากด้านหลังเลนส์ได้ จึงจะต้องใช้รังสีที่ตกกระทบด้านหน้าเลนส์นั้นเขียนทางเดินแสงต่อไป ซึ่งส่วนใหญ่อาจจะไม่ใช่ Principal Rays ด้วย การใช้เส้นนำทางจะช่วยให้เขียนทางเดินแสงต่อไปได้ ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเขียนทางเดินแสงในระบบเลนส์ประกอบที่ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 ตัว และมีวัตถุเสมือนสำหรับเลนส์ตัวที่สอง

ภาพที่ 8 แสดงการวางวัตถุไว้หน้าเลนส์นูน 2 ตัว (L_1 และ L_2) โดยวัตถุ (O_1) อยู่ระหว่างจุด C_1 กับ F_1 และถัดไปเป็นเลนส์นูนอีก 1 ตัว การเขียนทางเดินแสงที่เลนส์ตัวแรก (L_1) สามารถใช้ Principal Rays หาตำแหน่งภาพได้ (รังสี a และ b) และภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริงหัวกลับ (I1) ซึ่งเป็นจุดตัดของรังสี a' และ b' ที่อยู่ด้านหลังเลนส์ L_2 และภาพนี้จะเป็นวัตถุ (O_2) ของเลนส์ L_2 จึงเป็นวัตถุเสมือน แน่นอนว่าจะไม่มีแสงเดินทางจากวัตถุนี้ย้อนกลับไปหาเลนส์ L_2 จะเขียนทางเดินแสงย้อนกลับไม่ได้ ดังนั้นต้องเขียนต่อจากรังสีตกกระทบเลนส์นี้คือรังสี a' และ b' โดยการลากเส้นนำทาง (1) ให้ขนานกับรังสี a' และผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ ลากเส้นนำทาง (1') ให้ขนานกับรังสี b' และผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ และเส้นนำทาง (2) ให้ผ่านจุด F_2 และตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ ทำให้เขียนรังสี a" และ b" ได้ จุดตัดของรังสีทั้งสองจะเป็นจุดที่เกิดภาพสุดท้าย (I_2) จะพบว่าเป็นภาพจริงหัวกลับอยู่ระหว่างเลนส์ L_2 กับจุดโฟกัส F_2 ถ้าตรวจสอบโดยการคำนวณโดยใช้สมการสำหรับเลนส์บางจะพบว่าผลการเขียนทางเดินแสงนี้สอดคล้องกับผลการคำนวนโดยใช้สมการหรืออาจจะทำได้โดยการเขียนทางเดินแสงด้วยวิธีของ Leinoff [5] ก็ได้

อภิปรายและข้อเสนอแนะ

ในการเขียนทางเดินแสงโดยใช้เส้นนำทางที่นำเสนอในที่นี้ไม่ได้เป็นวิธีใหม่ อย่างไรก็ตามในตำราฟิสิกส์ทั่วไประดับมัธยมศึกษาหรือฟิสิกส์มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัย ปี 1 ไม่ได้กล่าวถึง ผู้เขียนได้สืบค้นและพบว่ามีตำราเก่าที่ได้กล่าวถึงวิธีการนี้อยู่เล่มหนึ่งคือ Fundamentals of Optics ของ Jenkins and White [6] ใช้รังสีที่คล้ายกับเส้นนำทางเส้นแรก เรียกว่า Chief Ray ซึ่งพบว่า ไม่มีหนังสือฟิสิกส์พื้นฐานเล่มใดนำมาใช้ สำหรับเส้นนำทางที่สองถ้าสังเกตดูจะพบว่าเป็นเส้นที่อยู่ในแนวของระนาบโฟกัส ที่จริงควรจะเป็นระนาบ แต่การเขียนภาพแบบสองมิติตามระนาบของกระดาษแล้วมองเป็นระนาบอาจจะเป็นเรื่องที่ซับซ้อนสำหรับผู้เรียนโดยเฉพาะผู้เรียนระดับมัธยมศึกษาจึงกำหนดให้เป็นเส้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าสามารถเขียนเป็นภาพสามมิติและการมองเป็นระนาบน่าจะทำให้ผู้เรียนได้ดียิ่งขึ้นในกรณีที่ให้วัตถุมีมิติของความลึกด้วย สำหรับกรณีกระจกโค้ง วิธีการใช้เส้นนำทางสองเส้นนี้ก็สอดคล้องกับกฎการสะท้อนและสมการของกระจกโค้งเช่นกัน

สำหรับการเกิดภาพที่เกิดจากเลนส์หรือกระจกที่ถูกบังไว้ครึ่งหนึ่ง มีผู้เรียนจำนวนมากเข้าใจว่าภาพจะหายไปครึ่งหนึ่ง [2] หากผู้เรียนเข้าใจวิธีการนี้ อาจจะช่วยให้ผู้เรียนมีอิสระในการเลือกรังสีตกกระทบใดๆ ก็ได้ ภาพที่เกิดขึ้นจะไม่หายไปส่วนหนึ่ง เพียงแต่จะจางลงเนื่องจากปริมาณแสงที่ผ่านเลนส์ลดลงไปตามสัดส่วนที่ถูกปิด นอกจากนี้อาจจะมีวิธีอื่นที่จะพิสูจน์ให้เห็นว่าแสงจากทุกส่วนเดินทางจากวัตถุผ่านเลนส์แล้วไปทำให้เกิดภาพเต็มขนาด เช่น การใช้แผ่นกรองแสงสีแดงปิดครึ่งบนของเลนส์และใช้แผ่นกรองแสงสีเขียวปิดครึ่งล่างของเลนส์แล้วนำวัตถุสีขาวไว้หน้าเลนส์จะพบว่าภาพของวัตถุที่เกิดขึ้นมีสีเหลืองทั้งภาพ การเขียนทางเดินแสงโดยใช้รังสีใดๆ น่าจะช่วยให้ผู้เรียนตระหนักได้ว่าแท้จริงแล้วมีรังสีมากมายที่เดินทางจากทุกส่วนของวัตถุไปที่เลนส์หรือกระจก [4]

ในส่วนของการเกิดวัตถุเสมือน (วัตถุที่อยู่หลังเลนส์) เราไม่สามารถเขียนทางเดินแสงย้อนจากวัตถุชนิดนี้ไปหาเลนส์หรือกระจกได้ เพราะไม่ได้มีวัตถุจริง ๆ อยู่ตรงนั้น การใช้เส้นนำทางที่นำเสนอในที่นี้ก็ช่วยแก้ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามก็มีอีกแนวทางหนึ่งที่ Leinoff [5] ได้เสนอไว้ ซึ่งใช้วิธีการที่แตกต่างไปจากที่นำเสนอนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Young, H.D., Freedman, R.A. and Ford, A.L. (2010). **Sears & Zemansky's University Physics: with Modern Physics**. 13th Edition, Addison-Wesley, Sanfancisco, 1124-1135.

[2] Goldberg, F.M. and McDermott, L.C. (1987). "An Investigation of Student Understanding of the Real Image Formed by a Converging Lens or Concave Mirror", **American Journal of Physics**. 55, 108-119.

[3] Suppapittayaporn, D., Phanijpan, B. and Emmarat, N. (2010). "Can We Trace Arbitrary Rays to Locate an Image Formed by a Thin Lens?", **The Physics Teacher**. 48(4), 256-257.

[4] Valadares, E.C. and Cury, L.A. (1996). "An Image is Worth a Thousand Rays", **The Physics Teacher**. 34, 432-433.

[5] Leinoff, S. (1991). "Ray Tracing with Virtual Objects", **The Physics Teacher**. 29, 275-277.

[6] Jenkins, F.A. and White, H.E. (1957). **Fundamentals of Optics**. McGraw-Hill, New York, 44-53.