หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ระบบการมองเห็น (Visual System)

2.1 คำนำ

ในกระบวนอวัยวะที่ทำหน้าที่เป็นประสาทรับความรู้สึกทั้งหลาย นับว่าตาเป็นอวัยวะประสาทสัมผัสที่สำคัญที่สุดอวัยวะหนึ่ง เพราะการมองเห็นหรือการรับรู้ทางสายตา จัดอยู่ในระบบการรับความรู้สึกชนิดพิเศษ (Special Sensory System) ซึ่งระบบนี้นอกจากการมองเห็นแล้ว ยังรวมไปถึงการได้ยิน (Audition) การรับรส (Taste) และการได้กลิ่น (Olfaction) แต่การรับรู้อุณหภูมิ (Hot, Cold) ความเจ็บปวด (Pain) การสัมผัส (Touch) ความรู้สึกกด (Pressure) ตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนไหว (Proprioception) จัดอยู่ในระบบรับความรู้สึกโดยทั่วไป(9)

ร่างกายของมนุษย์ประกอบไปด้วยเซลประสาทต่าง ๆ มากมาย แต่เซลประสาทเหล่านี้บางเซลเป็นเซลรับความรู้สึกชนิดพิเศษที่ทำการรวบรวมข่าวสารจากสภาพแวดล้อม แล้วส่งไปยังสมอง ซึ่งเซลประสาทจะรับพลังงานกระตุ้น แล้วจะเปลี่ยนพลังงานกระตุ้นให้กลายเป็นสัญญาณต่าง ๆ ของระบบประสาท (Nerve Signals) ซึ่งสัญญาณของระบบประสาทนี้จะถูกส่งไปสู่สมองโดยเส้นใยประสาท (Nerve fiber) โดยเหตุที่เซลประสาทรับความรู้สึกนี้จะเปลี่ยนพลังงานกระตุ้น (Stimulus Energy) ให้กลายเป็นพลังงานรูปอื่น ๆ คือ เปลี่ยนแรงกระตุ้นทางไฟฟ้า (Electrical Impulse) ให้กลายเป็นพลังงานการกระตุ้นที่สมองสามารถตอบสนองได้ เซลประสาทแต่ละเซลจึงเป็นทั้งนักเคมี และนักฟิสิกส์ และมีความสามารถเฉพาะสูง จึงสามารถที่จะรับรู้หรือกระทำต่อสิ่งเร้าเฉพาะที่แน่นอนได้ ด้วยเหตุนี้เซลที่มีความไวต่อแสงจะไม่สามารถตอบสนองต่อเสียง ต่อการเร่งเร้าทางเคมี และต่อความกดดันได้ และรีเซพเตอร์ที่ทำให้เกิดความรู้สึกสัมผัส (Touch Receptor) ก็ไม่สามารถตอบสนองต่อแสงและเสียงได้ เส้นใยประสาทและกระแสประสาทถ่ายทอดพลังงานกระตุ้นที่เซลประสาทรับความรู้สึกได้รับไปสู่สมองนั้น มีลักษณะคล้ายกันมากต่อการรับรู้ความรู้สึกต่าง ๆ จะแตกต่างกันก็แต่เพียงจุดสิ้นสุดของเซลประสาทเหล่านั้น จะอยู่ที่ต่าง ๆ กันของเปลือกสมอง ดังนั้นเส้นใยประสาทที่นำสัญญาณไปสู่บริเวณที่ทำให้เกิดการเห็นที่ส่วนหลังของสมองนั้นจะทำให้เกิดความรู้สึกต่อแสง และเส้นใยประสาทนี้จะนำสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เข้าไปสู่บริเวณที่เกิดการ

รับเสียง ก็จะทำให้เกิดการได้ยินเสียงขึ้น อย่างไรก็ตามสมองก็สามารถที่จะรับรู้สิ่งต่าง ๆ ได้อย่างมากมายกว่าความรู้สึกที่เป็นปกติเช่นนี้

2.2 ธรรมชาติของแสงและสี

มนุษย์ไม่ว่าจะมีตาและสมองที่ดีเพียงใดก็ตาม แต่ถ้าปราศจากแสงก็ไม่สามารถจะเห็นได้(10) แสงช่วยทำให้เกิดการเห็น สามารถบอกรูปร่าง ขนาด ตลอดจนสีสันของสิ่งต่าง ๆ ได้ ในเวลากลางคืนหรือในสถานที่มืดมาก ๆ สายตาของมนุษย์เราจะเห็นภาพไม่ชัดเจน เป็นแต่เพียงเห็นแสง คือเห็นแสงสลัว ๆ เพียงเล็กน้อย แต่ไม่สามารถเห็นรูปร่างได้ ลักษณะเช่นนี้เป็นความรู้สึกที่ปกติของมนุษย์ที่มีต่อแสง (Light Sensation) เช่นเดียวกับการมองเห็นภาพลักษณะที่เกิดความจ้า (Brightness)

แสงเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เช่นเดียวกับพลังงานชนิดอื่น ๆ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานกล พลังงานไฟฟ้า ฯลฯ แต่แสงเป็นพลังงานที่เคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่ของพลังงานแสงอยู่ในรูปของคลื่น เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์ และคลื่นของรังสีต่าง ๆ พลังงานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในรูปของคลื่นเหล่านี้จะมีความถี่ และความยาวคลื่นเฉพาะตัวแตกต่างกันออกไป กล่าวคือความถี่และความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดพลังงานเหล่านี้นั่นเอง แสงเป็นแถบพลังงานเล็ก ๆ แถบหนึ่ง ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380 - 780 นาโนเมตร (Nanometers) พลังงานแสงในช่วงคลื่นดังกล่าวนี้เท่านั้นที่ทำให้เกิดการมองเห็น พลังงานอื่น ๆ ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 380 นาโนเมตร อันได้แก่ รังสีอุลตราไวโอเลท, รังสีเอ็กซ์ ฯลฯ และพลังงานที่มีช่วงความยาวคลื่นยาวกว่า 780 นาโนเมตร อันได้แก่ คลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์ และพลังงานไฟฟ้า พลังงานเหล่านี้ไม่ได้ช่วยทำให้เกิดการเห็นเลย แสงอาทิตย์ที่มองเห็นก็มีช่วงคลื่นอยู่ในขนาดดังกล่าว และที่มองเห็นเป็นสีขาวนั้น จริง ๆ แล้วประกอบไปด้วยแถบแสงสีที่มองเห็นได้ (Visible Spectrum) คือแสงสีม่วง น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง โดยมีขนาดความยาวคลื่นประมาณ 380, 430, 500, 590, 620, 780 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งดวงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่สำคัญ แหล่งกำเนิดแสงที่สำคัญอีกกลุ่มหนึ่งก็คือ พวกวัตถุสีดำ (Black Bodies) วัตถุเหล่านี้จะมีสีดำขณะเย็น แต่เมื่อให้ความร้อนกับวัตถุนี้มันจะค่อย ๆ เปลี่ยนสีไปเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยไม่ขึ้นกับส่วนประกอบของวัตถุ จนในที่สุดจะกลายเป็นสีเหลืองสว่างจ้า ซึ่งใกล้เคียงกับสีขาวมาก ๆ ดังจะเห็นได้จากการเผาแท่งเหล็กที่ความร้อนสูงมาก ๆ แท่งเหล็กจะเริ่มร้อนแดง และเมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิให้แก่แท่งเหล็กมากขึ้นอีกเรื่อย ๆ มันจะเปลี่ยนสีออกไปทางส้ม และเหลืองจ้าสว่างในที่สุด ในการเผาแท่งเหล็กดังกล่าวนี้ นอกจากจะได้พลังงานแสงแล้วยังมีรังสีอุลตราไวโอเลทและรังสีอินฟราเรดออกมาด้วย แหล่งของพลังงานแสงที่เกิดขึ้นจากการเผาหรือการให้พลังงานความร้อนแก่มันนี้ เรียกว่า "Incandescence" หรือแหล่งกำเนิดแสงร้อน (Hot Source) เช่น ถ่านแดง ไส้ของหลอดไฟฟ้า แสงจากการเชื่อมโลหะ ฯลฯ คุณสมบัติประการหนึ่งของแหล่งกำเนิดแสงชนิดนี้คือ มันจะให้พลังงานของแสงสีแดงมากกว่าพลังงานของแสงสีน้ำเงิน

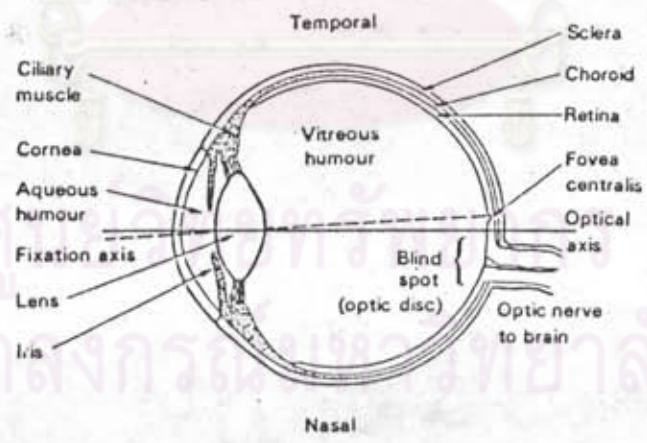
แหล่งกำเนิดแสงอีกประเภทหนึ่ง ที่มิได้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานแสง แหล่งกำเนิดแสงพวกนี้เรียกว่า "Luminescence" หรือ แหล่งกำเนิดแสงเย็น (Cold Source) อันได้แก่ แสงจากตัวแมลง แสงที่เกิดจากปฏิกริยาทางเคมี และแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนวงโคจรของอิเลคตรอน รวมไปจนถึงแสงอันเกิดจากการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Discharge) ของก๊าซ เช่น แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ แสงจากหลอดแสงจันทร์ และแสงจากหลอดโซเดียม เป็นต้น (11) (12)

โดยปกติแล้ว การเห็นสีเกิดจากปฏิกริยาของผิวหน้าที่มีสี หรือแก้วต่าง ๆ ที่มีสี ซึ่งผิวหน้าหรือแก้วต่าง ๆ เหล่านี้จะประกอบด้วยสารสี หรือรงควัตถุ (Dye or Pigment) และสารสีเหล่านี้จะเกิดปฏิกริยาแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าแสงสีขาวฉายลงไปบนผิวหน้าที่มีสีแดง มันก็จะสะท้อนแสงสีแดงออกมาอย่างแรงกล้า และในขณะเดียวกันมันก็จะดูดกลืนแสงสีที่เหลืออยู่ ขบวนการนี้เรียกว่า "Selective Reflection" เช่นเดียวกับฟิลเตอร์สีแดง (Red Filter) จะดูดกลืนสีทุก ๆ สีในแถบแสงสี เว้นแต่แสงสีแดงที่ยอมให้ผ่านไปได้ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า "Selective Assorption" ซึ่งการมองเห็นสีนั้น ก็เริ่มจากเมื่อแสงส่องไปยังผิวหน้าของภาพ ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจาก Selective Reflection แล้วถึงสะท้อนเข้าสู่ตา ซึ่งช่วงนี้ถือเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ และยังไม่เกิดการเห็นสี คือรับรู้สี แต่เมื่อแสงเข้าไปในตา และโคนซึ่งเป็นรีเซพเตอร์ในจอตาดูดกลืนแสงนี้ แล้วเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณของระบบประสาท ส่งเข้าสู่สมอง แล้วสมองแปลความหมายออกมา นั่นแหละถึงจะเรียกว่าเกิดการมองเห็นสี กลไกในการมองเห็นสีจะเกี่ยวข้องกับกลไกที่ซับซ้อนอย่างมาก ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

2.3 ตาและสมอง (Eye and Brain)

ลำดับขั้นแรกในขบวนการที่ทำให้เกิดการมองเห็นนั้นปรากฏขึ้นที่ลูกตา (Eye Ball)

ช่องรับแสงที่สามารถจะเปลี่ยนแปลงได้ (Variable Aparture) เรียกว่า ม่านตา (Iris) ซึ่งเป็นตัวตัดสินใจหรือกำหนดปริมาณของแสงที่เข้าไปในตา ส่วนกระจกตา (Cornea) น้ำหล่อเลี้ยงตาส่วนหน้า (Aqueous Humor) น้ำหล่อเลี้ยงตาส่วนหลัง (Vitreous Body) และแก้วตา (Lens) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการหักเหแสง (Refractive Media) ให้ตกลงบนจอตา (Retina) โดยที่รายละเอียดสีของภาพ, ขนาดของภาพ, การเคลื่อนตัวของภาพ, ลักษณะและคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เป็นอยู่ของภาพทั้งหมดจะถูกดูดซับโดยตัวที่ทำหน้าที่วิเคราะห์ทางเคมีและไฟฟ้า (Chemical and Electrical Analyzers) ที่อยู่ภายในจอตา ด้วยการแปลงสัญญาณแสงให้กลายเป็นสัญญาณของระบบประสาท แล้วส่งผ่านใยประสาทตา (Optic Nerve) ไปถึงสมองตรงบริเวณที่ทำให้เกิดการมองเห็น แล้วแปลงเป็นการรับรู้ว่าภาพนั้น ๆ คืออะไร มีรายละเอียดอะไรบ้าง และมีความเป็นมาอย่างไร ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนอีกขั้นตอนหนึ่งของสมอง นั่นคือด้วยความสามารถของตามนุษย์และพลังทางสมองที่ประกอบเข้าไปด้วย นอกจากที่จะทำให้เกิดการมองเห็นภาพแล้ว ยังสามารถจำภาพ ย้อนภาพในอดีต และสามารถสร้างภาพอนาคตได้อย่างมหัศจรรย์อีกด้วย



รูปที่ 2.1 แสดงภาคตัดในแนวนอนของลูกตา

(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

2.3.1 ลักษณะของลูกตามนุษย์ (A Description of the Human Eyeball)

ในรูปที่ 2.1 แสดงภาคตัดในแนวนอนของลูกตามนุษย์ ด้านหน้าสุดคือ กระจกตา เป็นเยื่อบุโปร่งใส (Transparent Membrane) มีความโค้งสม่ำเสมอ การจัดเรียงเซลและเนื้อเยื่อต่าง ๆ เป็นไปอย่างมีระเบียบเรียบร้อยมาก อีกทั้งไม่มีเส้นเลือดเข้ามาหล่อเลี้ยงเลย จึงทำให้มีลักษณะใส แสงผ่านสะดวก กระจกตาจะปกคลุมด้านหน้าตา และจะแผ่กว้างออกไปประมาณหนึ่งในหกของผิวหน้าลูกตา ที่ขอบหรือริมของกระจกตาจะต่อด้วยส่วนที่บางขาวของตา เรียกว่า ตาขาว (Sclera) ซึ่งจะเป็นผนังหุ้มลูกตาไว้ทั้งหมด ยกเว้นกระจกตา ถัดจากกระจกตาก็คือน้ำหล่อเลี้ยงตาส่วนหน้า ประกอบด้วย 99% ของน้ำกับเกลือและโปรตีน ซึ่งหล่อเลี้ยงช่องว่างระหว่างแก้วตา และกระจกตา สารที่จุอยู่ด้านหลังแก้วตามีลักษณะคล้ายโปรตีนที่มีลักษณะโปร่งใส คือน้ำหล่อเลี้ยงตาส่วนหลัง ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญคือน้ำ จะเห็นได้ว่าไม่มีส่วนใดหรือรูปร่างใดของตาที่แข็งหรือไม่ยืดหยุ่นเลย รูปร่างของตามีลักษณะคล้ายทรงกลม โดยมีรัศมีความโค้งของลูกตาประมาณ 12 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดความโตของลูกตาโดยประมาณนี้ ถูกควบคุมด้วยความดันของ ๆ เหลวภายในลูกตาดังกล่าว

2.3.1.1 ม่านตาและรูม่านตา (The Iris and the Pupil)

ม่านตามีลักษณะเป็นเส้นใยที่มีสี ช่องว่างตรงกลางของม่านตาคือรูม่านตา (Pupil) กล้ามเนื้อที่ควบคุมการหดและขยายของรูม่านตาคือ กล้ามเนื้อหูรูด (Sphincter) และกล้ามเนื้อถ่างหรือกล้ามเนื้อขยาย (Dilater) ตามลำดับ ความกว้างของรูม่านตาสามารถขยายได้จากขนาด 2 มิลลิเมตร ถึง 8 มิลลิเมตร รูม่านตาจะทำหน้าที่ในการควบคุมปริมาณของแสงที่ตกลงบนจอตา แสงที่ผ่านเข้าไปทางริมหรือขอบของรูม่านตาสู่จอตาจะทำให้การมองเห็นไม่ชัดเจนเท่าแสงที่ส่องเข้าสู่รูม่านตาตรง ๆ ถึงแม้ว่าแสงนั้นจะสว่างมากก็ตาม แต่ในระดับการเร่งเร้าที่ต่ำ ๆ คือในที่มืดหรือแสงสว่างน้อย ผลที่ทำให้เกิดการมองเห็นแตกต่างกันนี้จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่เกิดขึ้นเลย โดยที่ปริมาณของแสงที่เข้าสู่รูม่านตาทั้งหมดนั้นจะต้องมีขนาดพอเพียงที่ทำให้เกิดการเห็นได้คล้ายกัน ปรากฏการณ์เช่นนี้ ได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1931 โดย Stiles และ Crawford(3)ซึ่งก็เป็นการยอมรับหรือยืนยันทฤษฎี "Duplicity Theory" ทฤษฎีนี้ชี้ให้เห็นว่า มีรีเซพเตอร์อยู่สองชนิด รีเซพเตอร์ตัวหนึ่งจะตอบสนองต่อแสงที่ส่องเข้าสู่จอตามีปริมาณหรือความสว่างสูง (High Retinal Illuminance) คือการเห็นภาพในเวลากลางวัน (Phototopic Vision) ซึ่งไวต่อแสงที่ตกกระทบโดยตรง

และรีเซพเตอร์อีกตัวหนึ่งจะเป็นตัวตอบสนองต่อแสงที่ส่องเข้าสู่จอตาเมื่อมีความสว่างน้อย (Low Retinal Illuminance) คือการเห็นภาพในเวลากลางคืนหรือในที่มืด (Scotopic Vision) เนื่องจากผลของ Stiles - Crawford ช่วงหรือระดับของแสงที่ส่องเข้าสู่จอตา โดยทำให้เกิดการเห็นภาพในเวลากลางวันนั้น จะอยู่ภายใต้การควบคุมของรูม่านตา การส่องสว่างปกติจะวัดค่าออกมาเป็นหน่วยของลักซ์ (Lux) คือปริมาณของแสงต่อวินาทีที่ตกลงบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งก็คือ ลูเมนต่อตารางเมตร (Lumen per Square Metre) แต่หน่วยที่นำมาใช้ศึกษาเรื่องสายตาคือ โทรแลนด์ (Troland) ซึ่งเป็นหน่วยความสว่างที่กระตุ้นเรตินา โดยได้จากผลคูณของพื้นที่รูม่านตา (มม.^{2}) กับความจ้าของแสง จริง ๆ แล้วแสงที่ส่องเข้าสู่จอตานั้นเป็นสัดส่วนกับผลคูณของพื้นที่รูม่านตา, ความจ้าแสง และการถ่ายทอดแสงโดยสื่อของตา (Ocular Media) แต่เนื่องจากการหาค่าของปัจจัยตัวสุดท้ายนี้ ค่าที่ได้ไม่ค่อยจะเที่ยงตรงนัก จึงตัดปัจจัยตัวสุดท้ายนี้ออกไป

ขนาดของรูม่านตานอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงที่ส่องเข้าสู่จอตาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงจุดรวมแสง และการเบนเข้าหากันของลูกตาทั้งสองข้าง ในกรณีที่ตาข้างหนึ่งได้รับแสงสว่างมากกว่าตาอีกข้างหนึ่ง รูม่านตาทั้งสองก็คงยังมีขนาดเท่ากัน และนอกจากนี้แล้วสภาพทางจิตใจและสภาพทางอารมณ์ก็สามารถมีอิทธิพลต่อขนาดของรูม่านตาด้วย ตัวอย่างเช่น ขณะเกิดการตื่นเต้นหรือสนใจต่อสิ่งเร้า และนอกจากนี้อาการของโรคทางสมองและการกระทบกระเทือนต่อสมองก็มีผลทำให้รูม่านตาผิดปกติไปด้วย เมื่อมีอายุเพิ่มขึ้นขนาดของรูม่านตาก็จะค่อย ๆ ลดลง และจะตอบสนองต่อการกระตุ้นได้น้อยลง

2.3.1.2 แก้วตาและการเพ่งจัดระยะ (Lens and Accommodation)

ภาพต่าง ๆ ที่มองเห็นจะถูกนำมาโฟกัสบนจอตา โดยอาศัยการหักเหของแสงผ่านสื่อของตา หรือตัวกลางที่ทำให้แสงหักเหของนัยน์ตา ซึ่งประกอบไปด้วย กระจกตา น้ำหล่อเลี้ยงตาส่วนหน้า แก้วตา และน้ำหล่อเลี้ยงตาส่วนหลัง และดัชนีการหักเหของตัวกลางทั้งสี่มีค่าโดยประมาณ 1.37, 1.34, 1.42 และ 1.54 ตามลำดับ กระจกตาอยู่ห่างจากแก้วตาประมาณ 2.5 เซนติเมตร และเป็นตัวกลางที่สำคัญในการหักเหแสงของตา ซึ่งกำลังความสามารถในการหักเหแสงของกระจกตามีประมาณ 2 เท่าของแก้วตา การเพ่งจัดระยะที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ หรือความสามารถของตาในการโฟกัสภาพที่ระยะต่าง ๆ กัน เกิดขึ้นได้ก็เนื่อง

มาจากการยืดหยุ่นของแก้วตา โดยแก้วตามีลักษณะเป็นก้อนกลม มีโครงสร้างประกอบไปด้วยเนื้อเส้นใย โดยที่รูปร่างสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกล้ามเนื้อยึดลูกตา (Cilliary Muscle) ดูรูปที่ 2.1 เมื่อกล้ามเนื้อนี้ยืดออก ความโค้งของผิวหน้าแก้วตาจะลดลง และพร้อมกันนั้นกำลังหักเหก็จะลดลงด้วย โดยที่ทำให้ตาปรับระยะต่อวัตถุที่ไกลกว่า และเมื่อกล้ามเนื้อยึดลูกตานี้หดตัว ก็จะทำให้ความโค้งของผิวหน้าแก้วตาเพิ่มขึ้น โดยที่ความดันของน้ำหล่อเลี้ยงตาส่วนหน้าและส่วนหลังจะเป็นตัวยึดให้ส่วนโค้งของแก้วตาอยู่อย่างคงที่ เมื่อกล้ามเนื้อยึดลูกตาอยู่ในระยะพัก ความดันภายในลูกตาจะกดให้แก้วตายืดออก ทำให้ผิวของแก้วตาแบนไป ซึ่งตาจะอยู่ในสภาพเช่นนี้ได้ก็ต่อเมื่อต้องการดูภาพซึ่งอยู่ไกลถึงระยะอนันต์ เช่น ดูดาวในท้องฟ้า และสภาพการหักเหเช่นนี้เรียกว่า "Static Refraction" แต่สภาพการหักเหที่เกิดขึ้นในขบวนการเพ่งจัดระยะจะเรียกว่า "Dynamic Refraction" และระยะใกล้ที่สุดที่ยังเห็นชัด (Near Point) ประมาณ 6 นิ้ว หรือประมาณ 15 เซนติเมตร

แก้วตานี้จะเจริญเติบโตไม่มีวันสิ้นสุด ตั้งแต่อยู่ในท้องจนกระทั่งผู้นั้นตายไป เซลที่สร้างตัวแก้วตาจะอยู่เฉพาะตอนหน้า ๆ และได้อาหารจากสารน้ำภายในลูกตา ดังนั้นเนื้อแก้วตาที่เกิดขึ้นใหม่จะอยู่รอบนอก ผลักของเก่าให้แน่นเข้าไป แก้วตาจึงถูกอัดให้แข็งตัวอยู่เสมอ ด้วยเหตุนี้เองความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างเพื่อที่จะทำการโฟกัสภาพให้ตกลงบนจอตาผิดพลาดไป หรือทำไม่ค่อยได้ ซึ่งเป็นสภาวะที่เรียกว่า "สายตาคนแก่" หรือสายตายาวในวัยชรา

2.3.1.3 การดูดกลืนแสงภายในสื่อของตา (Absorption of Light in Ocular Media)

ก่อนที่แสงจะถูกดูดกลืนเข้าสู่จอตา เพื่อทำให้เกิดการเห็นนั้น ในลำดับแรกแสงจะต้องผ่านสื่อของตาก่อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในการดูดกลืนแสง กับความยาวคลื่นแสงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแถบแสงสี (Spectral Composition) ของสิ่งเร้า ในบางโอกาสการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแถบแสงสีของสิ่งเร้ามีประโยชน์อย่างมากต่อการมองเห็นสี (Color Perception) ซึ่งรายละเอียดการมองเห็นสีจะได้กล่าวต่อไป

012845

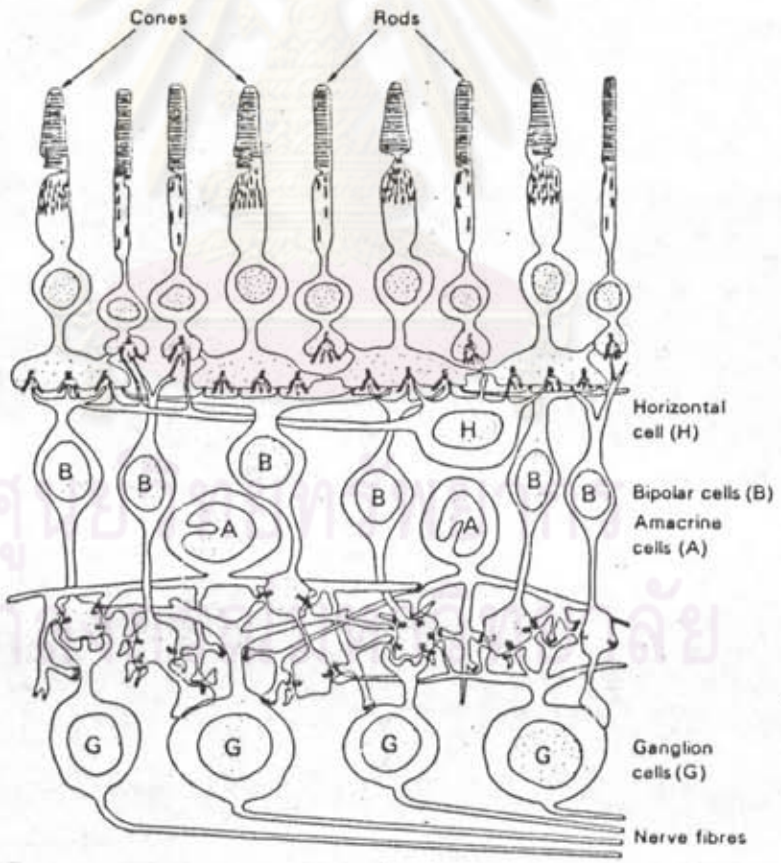
สำหรับความยาวคลื่นที่ยาวกว่า (เกิน 500 นาโนเมตร) นั้น น้ำหล่อเลี้ยงภายในตาจะสามารถดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดี ซึ่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่เกิน 1400 นาโนเมตร นั้นจะถูกดูดกลืนด้วยสื่อของตา แล้วเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน และด้วยเหตุนี้เองพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิน 1400 นาโนเมตร จึงไม่ไปถึงจอตา แหล่งของแสงบางแหล่งจะฉายหรือปล่อยปริมาณพลังงานของมันในสภาพของรังสีที่ต่ำกว่าแสงสีแดง (Infrared Ray) รังสีที่ต่ำกว่าแสงสีแดงทั้งหมดนี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนภายในสื่อของตาบริเวณส่วนหน้า ในบางโอกาสรังสีที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นความร้อนนี้สามารถทำให้เกิดความไม่สะดวกสบายหรือเกิดความเสียหายอยู่เสมอแก่กระจกตาและแก้วตา ดังนั้น แว่นตาป้องกันรังสีจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ซึ่งแว่นตาประเภทนี้ควรใส่ขณะทำงานในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น งานหล่อโลหะ (Foundry Work) ซึ่งงานชนิดนี้ตาจะได้รับรังสีอินฟราเรดสูงมาก สำหรับขนาดความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 500 นาโนเมตร ของเหลวที่อยู่ภายในตาจะยอมให้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวคลื่นระดับนี้ผ่านได้ตลอด แต่การดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบอื่น ๆ ของสื่อของตา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดกลืนแสงของกระจกตาและแก้วตาจะป้องกันขนาดความยาวคลื่นใด ๆ ที่สั้นกว่า 300 นาโนเมตร ที่จะไปถึงจอตา ซึ่งช่วงคลื่นสั้น ๆ นี้จะเป็นคลื่นของรังสีเหนือม่วงหรือรังสีอุลตราไวโอเลท (Ultra - Violet Ray) และถ้ากระจกตาดูดกลืนรังสีชนิดนี้มากเกินไปหรือบ่อยครั้ง ก็จะสามารถทำให้เกิดลักษณะอาการที่เรียกว่า "Snow Blindness" ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสวมใส่แว่นตาป้องกันเสมอขณะทำงานกับแหล่งที่มีรังสีเหนือม่วงนี้ เช่น งานเชื่อมโลหะ ซึ่งในบริเวณที่มีรังสีเหนือม่วงนั้น แสงจะฉายออกมาอย่างรุนแรง และแก้วตาจะเป็นสื่อที่สำคัญในการดูดกลืน ปกติแก้วตาจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 500 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ผลที่ตามมาแก้วตาจะปรากฏเป็นสีเหลือง ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเพิ่มมากขึ้นต่อเมื่ออายุเกิน 20 ปี การลดลงในการเป็นสื่อหรือความสามารถในการถ่ายทอดแสงของแก้วตาจะลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้นเมื่อรับแสงที่มีขนาดความยาวคลื่นสั้น ๆ เนื่องจากแสงที่มีขนาดความยาวคลื่นที่สั้นนั้น ไม่ใช่แต่เพียงต้องเพิ่มการดูดกลืนแสงเท่านั้น แต่ยังต้องเพิ่มการกระจายแสงในแก้วตาด้วย

2.3.2 จอตา (The Retina)

ในอดีตมนุษย์มีความคิดว่าแก้วตาเป็นตัวรับแสง แต่ในปี ค.ศ. 1866 Schultze(3) ได้พิสูจน์ให้เห็นว่ามีรีเซพเตอร์อยู่ 2 ชนิด ในตาของสัตว์ชนิดต่าง ๆ กัน รีเซพเตอร์ทั้ง 2 ชนิด

นั้นก็คือ ร็อด (Rod) และโคน (Cone) ซึ่งก็เป็นการยืนยันสมมติฐานของ Kepler และคนอื่น ๆ ที่ตั้งไว้ว่ามีตัวรับแสงหรือรีเซพเตอร์จริง ๆ ร่วมทำงานอยู่ด้วย แทนที่จะเป็นแก้วตาตามความคิดในอดีต

จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า จอตามีโครงร่างที่สลับซับซ้อนอย่างมาก มีเซลต่าง ๆ มากมายมหาศาล จัดเรียงตัวเป็นชั้น ๆ โดยตั้งฉากกับผิวหน้าของจอตา และภายในชั้นเซลต่าง ๆ นี้ มีการเชื่อมต่อกันมากมายระหว่างชั้นเซลด้วยกัน และชั้นเซลเดียวกัน (รูปที่ 22) เมื่อแสงตกกระทบจอตาก็จะถูกดูดกลืนโดยปฏิกริยาทางเคมีแสง คือเป็นปฏิกริยาที่แสงนั้นถูกดูดกลืนแล้วเปลี่ยนไปเป็นปฏิกริยาทางเคมี (Photochemical Action) ที่เซลต่าง ๆ ของรีเซพเตอร์ ซึ่งมันก็จะกระตุ้นเซลที่อยู่ข้างเคียง โดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือไฟฟ้า และด้วยเหตุนี้การตกกระทบของแสงจะส่งสัญญาณจากเซลหนึ่งไปสู่อีกเซลหนึ่ง โดยผ่านชั้นเซลต่าง ๆ ของจอตา

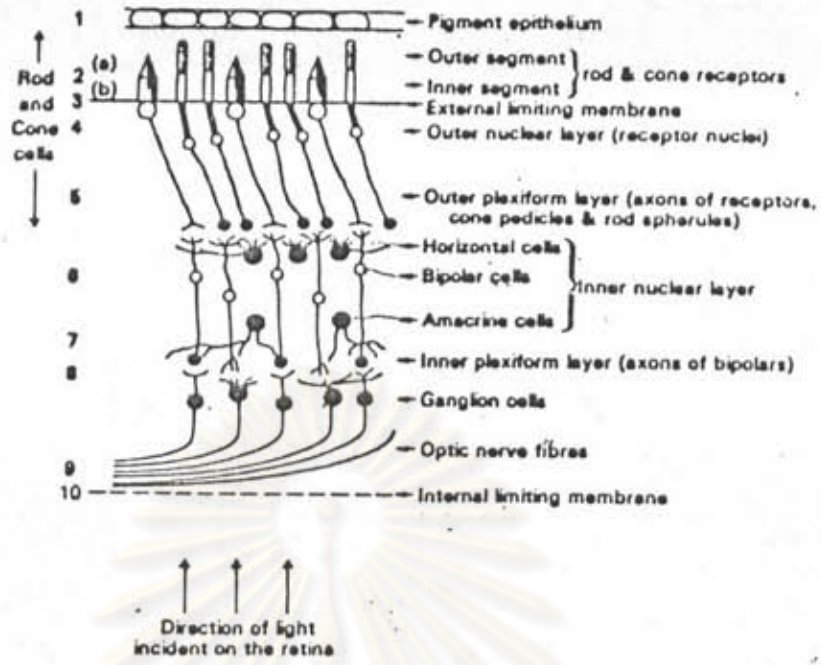


รูปที่ 2.2 แสดงชั้นเซลต่าง ๆ ของจอตา

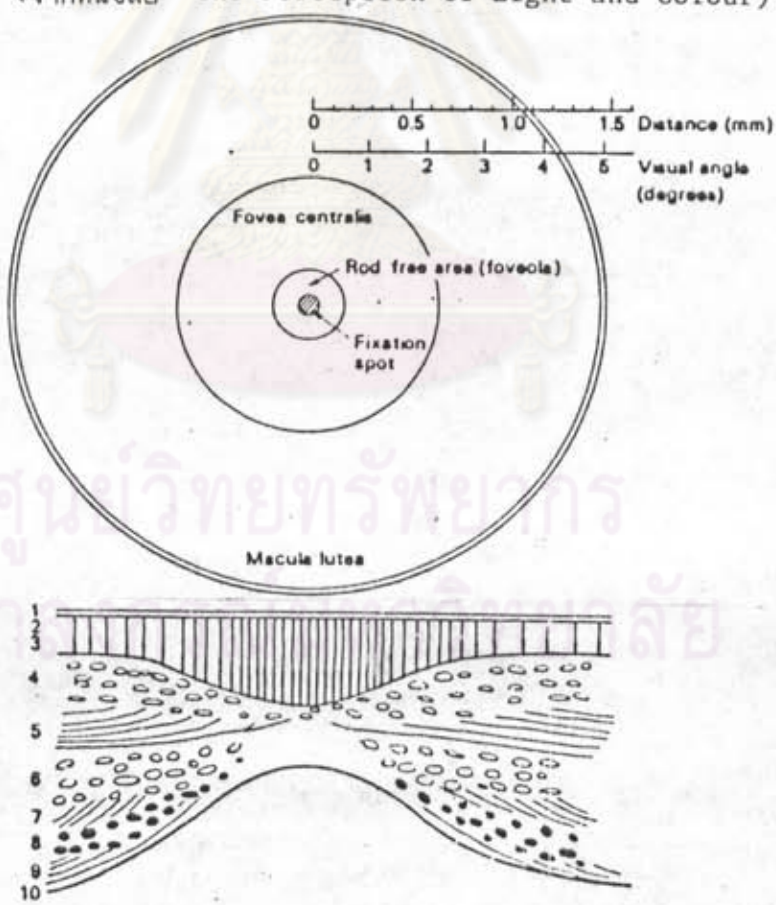
(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

ในปี ค.ศ. 1852 Müler(3)ได้จัดแบ่งชั้นเซลต่าง ๆ ของจอตา โดยเปลี่ยนไปดังรูป 2.3 เซลประสาทที่สำคัญที่สุดนอกจากร็อดเซล และโคนเซลแล้วก็คือ Bipolar Cells และ Ganglion Cells ในบริเวณรอบนอกของจอตา การต่อเชื่อมโยงตามแนวความยาวกันหลาย ๆ ชั้นนั้น รีเซพเตอร์แต่ละตัวจะต่อกับ Bipolar Cell หลายตัว และ Bipolar Cell จะต่อเข้ากับเซลในชั้นของจอตาที่มีกิ่งก้านเดียว (Amacrine Cells) กับ Horizontal Cells ซึ่งมีผลทำให้ Ganglion Cell แต่ละเซลจะถูกกระตุ้นด้วยรีเซพเตอร์มากมาย อาจหลายร้อยตัวก็ได้ สำหรับตัว Bipolar Cell นั้น จะทำหน้าที่เป็นตัวรับกระแสประสาทจากร็อดและโคน ซึ่ง Ganglion Cell จะเป็นตัวรับกระแสประสาทในช่วงสุดท้าย แล้วส่งต่อไปยังสมอง

บริเวณกลางจอตาที่เห็นภาพได้ชัดเรียกว่า "Macula Lutra" หรือเรียกว่า "จุดเหลือง" (Yellow Spot) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร บริเวณศูนย์กลางของจุดเหลืองคือ โฟเวีย (Fovea Centralis) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.3 มิลลิเมตร และส่วนเล็ก ๆ ของมันคือ Foveala หรือบริเวณที่ไม่มีร็อด (Rod Free Area) กับ Fixation Spot ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นรูปภาคตัดขวางตามแนวขนานนอนของบริเวณศูนย์กลางจอตา หลุมหรือบ่อตรงกลางเรียกว่า "Foveal Pit" ที่บริเวณแอ่งของ Foveala มีแต่โคนเซลเท่านั้น และโคนเซลแต่ละตัวในบริเวณนี้จะเชื่อมต่อกันโดยตรงกับ Bipolar Cell และ Ganglion Cell มากกว่าที่จะพบได้ในบริเวณส่วนอื่นของจอตา ซึ่งเป็นบริเวณที่โคนเซลอยู่อัดแน่น และแผ่ขยายไปมากกว่าบริเวณอื่น ๆ นอกจากนี้ Bipolar Cell กับ Ganglion Cell จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขอบของ Foveal Pit ปัจจัยแต่ละปัจจัยเหล่านี้มีส่วนสนับสนุนคุณสมบัติพิเศษของโฟเวีย ซึ่งทำให้ปริมาณของแสงจะผ่านเข้าไปถึงรีเซพเตอร์ได้มากกว่า โดยไม่ได้รับการขัดขวางหรือปิดบังจากชั้นเซลอื่น ๆ ภายในจอตา และ Ganglion Cell ในบริเวณนั้นจะตอบสนองต่อรีเซพเตอร์ที่อยู่ในบริเวณโฟเวียเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้บริเวณนี้เป็นบริเวณของจอตาที่มีความคมชัดของสายตามากที่สุด (Maximum Visual Acuity) ความคมชัดของสายตาที่สูงที่สุดนี้ก็เกิดขึ้นที่ Fixation Spot ด้วย กล่าวคือเป็นบริเวณที่เกิดภาพขึ้น ด้วยการเคลื่อนไหวตาและศีรษะเมื่อต้องการมองรายละเอียดของภาพให้เห็นชัดเจนที่สุด



รูปที่ 2.3 แสดงชั้นต่าง ๆ ของจอตา 10 ชั้น
(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)



รูปที่ 2.4 แสดงภาคตัดขวางตามแนวนอนของบริเวณศูนย์กลางจอตา
(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

การเจริญเติบโตของโฟเวียในตัวอ่อนเริ่มต้นเมื่อปลายเดือนที่ 6 ในระยะนั้น Ganglion Cell จะบางลง และเลื่อนตัวไปทางด้านข้างทำให้บริเวณที่จะเป็นโฟเวียเป็นรอยแอ่งหรือบุ๋มตื้น ๆ ต่อไปชั้นนอก ๆ ของจอตาทุกชั้นจะบางลงทำให้รอยบุ๋มลึกลง ยกเว้นชั้นนิวเคลียสชั้นนอกของจอตาที่ยังคงเดิม คือหนาชั้นเดียวในระยะที่ Fovea Centralis เจริญเติบโตขึ้น บริเวณจุดเหลืองมีการเจริญเติบโตก่อนจอตาส่วนอื่น หลังจากที่โฟเวียเจริญเติบโตแล้ว จุดเหลืองจะเจริญเติบโตทีหลัง จึงเป็นเหตุให้ปรากฏมีโคนเซลข้ากว่าบริเวณอื่นของจอตา เมื่อเด็กเกิดมาใหม่ ๆ โคนเซลที่โฟเวีย ยังมีรูปร่างอ้วนมาก

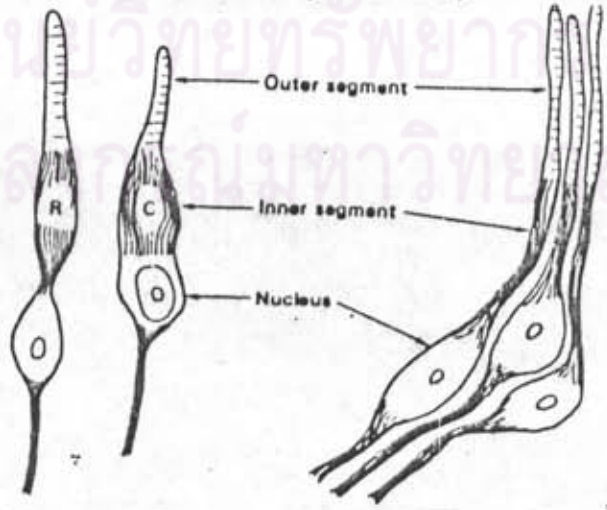
นอกจากตำแหน่งที่มีความคมชัดดังกล่าวข้างต้นแล้ว ภายในจอตายังมีจุดบอด (Blind Spot or Optic Disk) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5 มิลลิเมตร เป็นบริเวณที่ Axon ของ Ganglion Cell ในจอตารวมกับเส้นใยประสาทต่าง ๆ แล้วแทงทะลุผ่านเปลือกตาของลูกตา บริเวณนี้จึงไม่มีรีเซพเตอร์อยู่เลย ดังนั้นถ้าแสงตกลงที่จุดนี้จะมองไม่เห็น ที่อยู่ของจุดบอดอยู่ห่างจากจุดที่เพ่งดู 15° - 12° ทางด้านนอก และ 1.5° ทางด้านล่าง ปกติคนเราจะมองไม่เห็นจุดบอดและไม่รู้สึกรำคาญ เพราะมีตาสองตา เมื่อมองแล้วจุดบอดของตาข้างหนึ่งจะเห็นได้โดยตาอีกข้างหนึ่ง และด้วยเหตุที่ตากรอกไปมาจึงทำให้ไม่รู้สึกว่ามีจุดบอดดังกล่าว จุดบอดมีความสำคัญมากในคนที่มีตาข้างเดียว ขณะที่ทำงานหรือใช้ชีวิตประจำวัน เช่น การขับรถ เพราะถ้ารูปของคนหรือรถมาอยู่ในตำแหน่งของจุดบอด จะทำให้คนขับมองไม่เห็น ซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ (13)

ในจอตาของมนุษย์แต่ละข้างมีโคนอยู่ประมาณ 7 ล้านตัว และร็อดประมาณ 120 ล้านตัว หรือกล่าวได้ว่ามีรีเซพเตอร์อยู่ประมาณ 160,000 ตัวต่อตารางมิลลิเมตร โดยที่มีโคนอยู่ในบริเวณ Rod - Free Region หรือบริเวณ Foveala ของโฟเวีย ประมาณ 25,000 ตัว และโคนแต่ละตัวที่อยู่ในโฟเวียจะมีความหนาของปล้องนอกสุด (Outer Segment Thickness) ประมาณ 2 ไมครอน ซึ่งความหนาขนาดนี้ ก็จะเท่ากับความโค้งของระยะสายตาหรือช่วงของการเห็น (Visual Space) ประมาณครึ่งลิปดา ในที่อื่น ๆ ความหนาของโคนจะเพิ่มขึ้นถึงสามเท่าหรือมากกว่า ความหนาของร็อดมีขนาดความหนาตั้งแต่ 1-3 ไมครอน ค่าคาดคะเนของขนาด Rod - Free Region ที่ได้คาดคะเนไว้อยู่ในช่วง 0.5 องศา ถึง 1.7 องศาของความโค้งระยะสายตาที่เพ่งมอง และโดยสันนิษฐานว่าระยะของสายตาที่มีมุม 1 องศาจากจุดกลางของจอตาจะเป็นสภาพของสายตาที่มีแต่โคนเท่านั้นที่ทำให้เกิดการเห็นภาพ ซึ่งเป็นสถานภาพ

ของตาในการเห็นภาพในเวลากลางวันหรือขณะมีแสง (Cone or Photopic Vision) เท่านั้น และจำนวนของร็อดที่ไปแทรกรวมอยู่กับโคนในระยะของสายตา 2 องศา จากจุดศูนย์กลางนั้นมีจำนวนน้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาทางด้านจิตกายภาพทั้งหมด (Psychophysical Studies) ที่เกี่ยวกับการมองเห็นสี (Colour Vision) นั้น โคนจะเป็นสื่อเพื่อตอบสนองต่อการกระตุ้น แล้วถ่ายทอดสัญญาณเข้าสู่บริเวณที่เกิดการเห็นของระบบประสาท โคนทำหน้าที่ได้ดีที่สุดคือ โคน 25,000 ตัวที่อยู่ใน Rod - Free Region ที่มีความหนาประมาณ 2 ไมครอน วงกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 17.5 มิลลิเมตร จะลาดเอียงทำมุม 1 องศากับตา เมื่อวงกลมนี้อยู่ห่างจากตา 1 เมตร Helmholtz ได้แนะนำไว้ว่าเล็บนิ้วมือที่อยู่ปลายนิ้วเมื่อยื่นแขนออกไป เส้นผ่าศูนย์กลางจะลาดเอียงทำมุม 1 องศากับตา

2.3.2.1 รังสีเคมีที่เกี่ยวกับรงควัตถุของการมองเห็น (The Photochemistry of Visual Pigment)

ก่อนที่แสงจะมีผลต่อตาแล้วทำให้เกิดการเห็นได้นั้น มันจะต้องถูกดูดกลืน ซึ่งการดูดกลืนนี้เกิดขึ้นที่รีเซพเตอร์ต่าง ๆ ของจอตา นั่นก็คือ ร็อดและโคน ที่รีเซพเตอร์เหล่านี้จะมีรงควัตถุหรือสารสีที่ไวต่อแสง (Light - Sensitive Pigments) ปฏิกริยาของรังสีเคมี (Photochemistry) จะเกิดขึ้นที่รงควัตถุของร็อดมากกว่าของโคน ลักษณะของร็อดและโคนจะมีแขนงยื่นออกไปด้านนอก และรูปร่างจะแตกต่างกัน (รูปที่ 2.5) ร็อดมีลักษณะรูปทรงกระบอก แต่โคนมีลักษณะคล้ายรูปกรวยและก็สั้นกว่าด้วย ขนาดและรูปร่างจะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่อยู่ในจอตา โดยเฉพาะอย่างยิ่งโคนที่อยู่ภายในบริเวณ Rod - Free Region จะอยู่หนาแน่นกว่า มีรูปร่างยาวกว่าโคนที่อยู่บริเวณอื่น ๆ ของจอตา และก็มีลักษณะคล้ายกับร็อด



รูปที่ 2.5 รูปซ้ายคือร็อดและโคน รูปขวาเป็นโคนในโฟเวีย
(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

สารสีที่อยู่ในร็อดคือ Rhodopsin ซึ่งเป็นสารที่จำเป็นสำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นกระแสประสาท กล่าวคือให้เป็นแรงดลทางไฟฟ้า (Electrical Impulse) และทำหน้าที่ปรับสภาพตาต่อสภาวะที่มีแสงน้อยหรือในที่มืด ในเวลากลางวันหรือในสภาพที่มีความสว่างมาก แสงที่ตกกระทบรีเซพเตอร์นี้จะทำปฏิกริยากับ Rhodopsin คือเกิดการฟอก (Bleaching) ทำให้ Rhodopsin สีจางลงไป ภายใต้สภาพการณ์เช่นนี้ ร็อดจะไม่ทำงาน และจะเห็นได้ก็จากการทำงานของโคน เมื่อใดก็ตามที่แสงน้อยลงไป Rhodopsin ก็จะเกิดขึ้นใหม่อีก ร็อดก็จะเริ่มทำงาน นั่นคือตาได้ปรับให้เข้ากับความมืดแล้ว (Dark Adapted State) เช่นเมื่อเข้าไปในที่มืด ปกติจะมองไม่เห็นอะไรสักครู่หนึ่งถึงจะเห็นได้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะต้องการเวลาสักเล็กน้อยในการสังเคราะห์ Rhodopsin ขึ้นมาใหม่ หลังจากเกิด Rhodopsin แล้ว ร็อดซึ่งปกติมีความไวอย่างมาก มากกว่าโคน ก็จะเพิ่มความไวของตัวมันเองมากยิ่งขึ้นไปอีก ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนทั้งหมดจะมีเพียง 60% เท่านั้นที่ฟอก Rhodopsin ส่วนอีก 40% คาดว่าเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อตา

สาร Rhodopsin ของร็อด ในขณะที่ตาปรับสภาพเข้ากับความมืดแล้วจะปรากฏเป็นสีแดง และจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อถูกฟอก แล้วในที่สุดก็จะไม่มีสีเลย บางครั้งมีการเรียก Rhodopsin ว่า "Visual Purple" ซึ่งคำนี้มาจากภาษาเยอรมันว่า "Seh Purpur"(3)ดังนั้นที่ถูกแล้วควรใช้คำว่า "Visual crimson" ดูจะเหมาะสมและถูกต้องมากกว่า "Visual Purple" ที่ใช้เรียกกันในปัจจุบัน สำหรับสารสีของโคนปกติแล้วจะไม่ปรากฏสี คือไม่สามารถตรวจพบได้ แต่ก็ไม่อาจคาดการณ์ได้ว่าไม่มีสีอย่างน้อยที่สุดในสภาวะที่ไม่มีการฟอก (Unbleached State) ซึ่งพบว่าเป็นการยากและมีอุปสรรคอย่างมากที่จะสกัดหรือดัดทอน (Extract) สารสีของโคนให้เห็นได้

สารสีของโคนจะดูดกลืนแสงเมื่อตาได้รับแสงสว่างในเวลากลางวัน หรือในขณะที่มีแสงสว่าง อย่างไรก็ตามก็ไม่มีคำอธิบายว่าทำไมสีของมันจึงไม่สังเกตเห็นได้ ขณะที่สีของสารสีของร็อดสามารถจะสังเกตเห็นได้ Liebman ได้กล่าวแนะนำไว้เมื่อเร็ว ๆ นี้ว่า พลังงานแสงที่ต้องใช้ในการส่องสว่างโคนที่ปรับตัวให้เข้ากับความมืดแล้วเพียงตัวเดียวแล้วนั้นจะต้องมากกว่าแสงที่ใช้ในการฟอกโคน โดยใช้เวลาที่สั้นมาก คือน้อยกว่าหนึ่งวินาที และด้วยกำลังขยายของกล้องที่เหมาะสมก็สามารถเห็นสีของโคนได้ บริเวณส่วนใหญ่

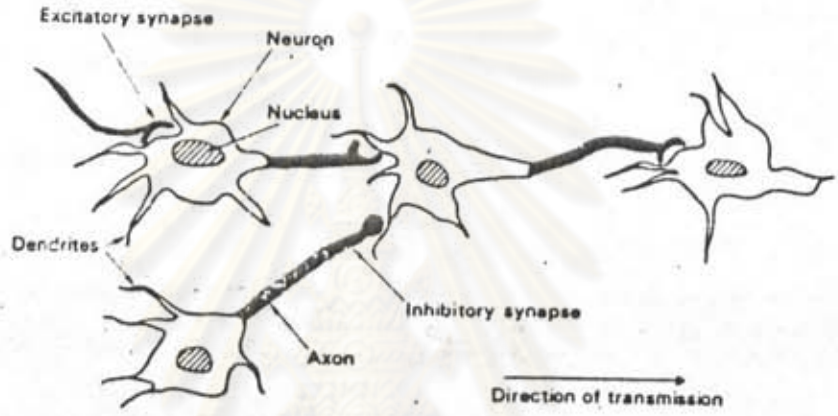
ของจอตาจะประกอบไปด้วยรอด และสามารถเห็นสีของมันได้ โดยใช้แสงเพียงเล็กน้อย และเวลาของการให้แสงนานกว่า แต่ก็ไม่นานจนเกิดการฟอกที่สมบูรณ์ขึ้นจนสีของมันถูกกำจัดออกไป วิธีการเช่นนี้ใช้ไม่ได้กับโคน แต่การที่ไม่สามารถเห็นสีของสารสีของโคน ก็ไม่ได้หมายความว่าโคนจับรายละเอียดของสีด้วยวิธีการอื่น ๆ นอกเหนือไปจากการเปลี่ยนแปลงทางรังสีเคมี

2.3.2.2 การถ่ายทอดสัญญาณของระบบเซลประสาท (Neural Transmission)

รูปที่ 2.6 แสดงกลุ่มสมมติของเซลประสาทต่าง ๆ (Nerve Cells or Neurons) เซลประสาทแต่ละเซลจะเป็นอิสระต่อกัน และมีนิวเคลียสอยู่ด้วย เส้นใยต่าง ๆ (Fibres) ที่ยื่นเข้าไปภายในเรียกว่า "Dendrite" หรือกิ่งก้านของเซลประสาท และเส้นใยที่ยื่นออกไปภายนอกเรียกว่า "Axons" เมื่อเส้นใยประสาทเหล่านี้ได้รับสัญญาณไฟฟ้าตามลำดับแล้ว ก็จะถ่ายทอดหรือส่งผ่านไปยังเซลต่าง ๆ ที่อยู่ติดกัน และเมื่อเซลต่าง ๆ นี้ได้รับสัญญาณก็จะทำให้ศักยภาพทางไฟฟ้าของมันเปลี่ยนไป ซึ่งจะทำให้เกิดการกระตุ้นทางไฟฟ้า ถ่ายทอดไปตลอด Axon ไปสู่จุดรวมของระบบประสาทด้วยเซลข้างเคียง (Neighbouring Cell) แรงกระตุ้นเหล่านี้ก็จะเปลี่ยนศักยภาพให้สูงขึ้นถึงช่วงกว้างของคลื่นที่มากที่สุด (Maximum Amplitude) และก็จะตกลงถึงศูนย์โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งในพันวินาที และช่วงกว้างของคลื่นที่มีขนาดสม่ำเสมอเท่ากันตลอดนั้น กล่าวว่า เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเส้นประสาทระหว่างที่ปฏิบัติงานอยู่หรือถูกกระตุ้น (Action Potentials) หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในระยะแรกของเยื่อบุผิวของเซล ระหว่างที่มีการกระตุ้น (Spike Potentials) การตอบสนองของ Ganglion Cell ไม่ได้เกิดขึ้น เนื่องมาจากช่วงความกว้างของคลื่นที่มีอยู่ แต่เนื่องจากจำนวนของการกระตุ้นและความถี่ที่เกิดขึ้นปกติจำนวนความถี่สูงกว่าที่มีมากนั้น ชี้ให้เห็นว่าเกิดการตอบสนองที่สูงกว่าด้วย

เมื่อ Action Potentials เคลื่อนตัวถึงจุดรวมของเซลประสาทหรือจุดประสานประสาท (Synapse) ของเซลประสาทข้างเคียง สารเคมีที่เป็นตัวถ่ายทอดจะเคลื่อนตัวข้ามช่องว่างที่จุดรวมของเซลประสาท แล้วก็จะกระตุ้นเซลประสาทตัวที่สอง ซึ่งก็จะทำให้เซลประสาทตัวที่สองนี้เกิด Action Potentials ไป

ตลอด Axon ของมัน หรืออีกกรณีหนึ่งก็คือ เซลประสาทตัวที่สองอาจจะยับยั้ง (Inhibited) และ Action Potentials ใด ๆ ที่เกิดขึ้นแล้วจำนวนหรือความถี่จะลดลงหรืออาจจะหยุดลงทั้งหมด เมื่อเซลประสาทใกล้ชิดกันหรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของศักยภาพ Axon จะยอมให้สัญญาณผ่านได้โดยตรงอย่างต่อเนื่อง เส้นใยประสาทตาแต่ละเส้นที่เป็นทางที่สัญญาณถูกถ่ายทอดจากตาที่จุดประสาทตา หรือจุดบอดไปสู่สมองนั้น เป็น Axon ของเส้นใยประสาทท้ายสุด (Final Neuron) ในวิถีประสาทของจอตา (Retinal Pathway)



รูปที่ 2.6 แสดงการเชื่อมโยงต่อของเซลประสาท
(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

ซึ่งก็คือ Ganglion Cell ดังนั้นตาและจอตาจึงเป็นส่วนหนึ่งของสมอง รูปที่ 2.6 แสดงการต่อเชื่อมโยงของเซลต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้แล้วในรูปที่ 2.2 ซึ่งการเชื่อมต่อกันของเซลประสาทภายในจอตานั้นเกิดขึ้นทั้งสามมิติ (Three Dimensions) และบางครั้งก็มีวิถีย้อนกลับ (Return Pathway) ด้วยเหตุนี้เองเซลประสาทชั้นท้ายสุดของวิถีสายตา (Visual Pathway) จะมีอิทธิพลต่อการตอบสนองของเซลชั้นต้น ๆ ในจอตาของสัตว์บางประเภทรวมทั้งของมนุษย์ด้วย การเชื่อมโยงของเซลประสาทในจอตา จะสลับซับซ้อนอย่างมาก ซึ่งการย้อนกลับของเซลประสาทก็ย่อมที่จะมีอยู่

2.3.2.3 การถ่ายทอดสัญญาณของเซลประสาทภายในจอตา (Neural Transmission in the Retina)

ในระหว่างถ่ายทอดรายละเอียดต่าง ๆ ที่ได้รับจากการเห็นภายในจอตา จะถูกถ่ายทอดหรือส่งผ่านจากรีเซพเตอร์ ไปสู่ Bipolar Cells และ Ganglion Cells และต่อจากนั้นสัญญาณของระบบประสาทจะเคลื่อนตัวไปตลอดประสาทตา ไปสู่ Lateral Genigulate Body และแล้วก็จะเข้าสู่บริเวณของการเห็นในสมอง ในอดีตได้มีผู้ศึกษาจอตาและการถ่ายทอดสัญญาณของจอตาของสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก (Amphibia) และปลา ไว้มากมาย ซึ่งสัตว์พวกนี้จัดอยู่ในกลุ่มที่มีสายตาในการมองเห็นสีได้อย่างดีเยี่ยม จากผลของการศึกษาก็ได้มีการคาดคะเนกันไว้ว่า สัตว์ที่มีกายวิภาคหรือโครงสร้างเหมือนกัน จะมีการถ่ายทอดสัญญาณของเซลประสาทและความสามารถในการมองเห็นคล้ายกัน คือไม่เหมือนกันทีเดียว

วิธีการที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายทอดสัญญาณของเซลประสาทภายในจอตา จะกระทำด้วยการติดขั้วไฟฟ้าที่เล็กมาก ๆ (Micro - Electrode) ที่ขั้นตอนต่าง ๆ ของวิถีของการเห็น แล้วบันทึกการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า (Electrical Changes) ที่เกิดขึ้นใกล้ ๆ กับวิถีของการเห็น และภายในเซลประสาท ขั้วไฟฟ้านี้มีลักษณะคล้ายเข็มที่ถูกดบแต่งอย่างละเอียด มีปลายเล็กถึง 0.1 ไมโครเมตร ทำด้วยโลหะที่เป็นฉนวน หรืออาจจะทำเป็นหลอดแก้วเนื้อละเอียดมาก ๆ บรรจุของเหลวข้นที่มีสภาพเป็นตัวนำ (Concentrate Conducting Fluid)

ด้วยเหตุที่รีเซพเตอร์หลาย ๆ ตัวจะต่อเข้ากับ Bipolar Cell เพียงตัวเดียว ดังนั้นพื้นที่บางส่วนของ Bipolar Cell จึงเป็นสถานีถ่ายทอดรายละเอียดจากรีเซพเตอร์ Horizontal Cell (รูปที่ 2.2) สามารถทำงานได้สองลักษณะ กล่าวคือมันสามารถถ่ายทอดรายละเอียดจากรีเซพเตอร์ไปยัง Bipolar Cell ได้ ถึงแม้ว่ามันจะไม่มีการต่อกันโดยตรง กล่าวคือ Bipolar Cell จะต่อเข้ากับ Horizontal Cell ทางด้านข้าง ดังนั้น Bipolar Cell จะเกิดการกระตุ้นขึ้น ก็เนื่องมาจากการเร้ารีเซพเตอร์ที่ต่อกันโดยตรงกับ Bipolar Cell นอกจากนี้แล้ว Horizontal Cell ยังป้อนข้อมูลหรือรายละเอียดย้อนกลับจากรีเซพเตอร์ตัวหนึ่งไปสู่รีเซพเตอร์อีกตัวหนึ่ง ทำให้เกิดการตอบสนองลดลงหรือเกิดการยับยั้ง (Inhibitory) ซึ่งจะถ่ายทอดไปโดยรีเซพเตอร์ตัวที่สอง และสำหรับ Bipolar Cell จะเป็นตัวกระตุ้น Amacrine Cell และ Ganglion Cell โดยที่ Bipolar Cell

หลาย ๆ ตัวจะต่อเข้ากับ Ganglion Cell เพียงตัวเดียว และ Amacrine Cell ต่อกับ Bipolar Cell ทางด้านข้าง ซึ่งทำให้เกิดแหล่งของการตอบสนองรวม จากรีเซพเตอร์หลาย ๆ ตัว และยังทำให้เกิดกลไกต่าง ๆ เพื่ออิทธิพลของการยับยั้งอีกด้วย

การบันทึกด้วยขั้วไฟฟ้าเล็ก ๆ จะกระทำที่ Ganglion Cell การบันทึกส่วนใหญ่ทั้งหมดจะเป็นการบันทึกภายนอกเซล (Extracellular) ซึ่งเป็นการบันทึกผลที่เกิดขึ้นตามเส้นทางเดินของ Action Potentials ตลอดเส้นใยประสาทตา จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแหล่งของการตอบสนองทางไฟฟ้าของรีเซพเตอร์จะตอบสนองต่อ Ganglion Cell เพียงตัวเดียว สิ่งนี้ยืนยันได้จากที่มีการศึกษาโครงสร้างจอตาของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งภายในจอตามีโคน 7 ล้านตัว และร็อด 220 ล้านตัว และมีเส้นใยประสาทน้อยกว่า 1 ล้านเส้น จากผลของการศึกษาคาดการณ์ได้ว่าจะมี Ganglion Cell บางส่วนที่ตอบสนองต่อผลสะท้อนของการกระตุ้นรีเซพเตอร์หลายร้อยตัวหรือมากกว่า ด้วยเหตุนี้จึงไม่น่าแปลกใจเลยที่พบว่า Ganglion Cell จะแสดงอาการตอบสนอง เมื่อส่วนใดส่วนหนึ่งของจอตาถูกกระตุ้น บริเวณนี้ของจอตาเมื่อถูกกระตุ้นจะทำให้เซลตอบสนอง ซึ่งเป็นที่รู้กันว่าเป็นบริเวณของการรับรู้ (Receptive Field) ของเซลนั้น

2.3.3 การมองเห็นได้ด้วยตาทั้งสองข้าง (Binocular Vision)

การที่มองเห็นด้วยตาทั้งสองข้าง นอกจากจะทำให้ความกว้างของการมองเห็นเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้เกิดการมองเห็นส่วนลึก (Depth Perception) อีกด้วย รูปที่ 2.7 แสดงวิถีของการเห็น (Visual Pathway) เริ่มจากจอตาทั้งสองข้างไปยังบริเวณที่ทำให้เกิดการเห็นของเปลือกสมอง ใยประสาทตา จากจอตาซีกใกล้ขมับ (Temporal Side) จะผ่าน Optic Chiasma ไปยัง Optic Tract ข้างเดียวกัน ขณะที่ใยประสาทซีกใกล้จมูก (Nasal Side) ทอดตัด Optic Chaisma ไปเข้า Optic Tract ด้านตรงข้าม ใยของประสาทตานี้จะไปจบกันที่ Lateral Genigulate Body แล้วเซลจากที่นี่จะให้ Axon ไปสู่บริเวณที่ทำให้เกิดการเห็นของสมอง ซึ่งจากที่กล่าวมาแล้วก็คือ ครึ่งซ้ายของแต่ละจอตาจะป้อนสัญญาณภาพไปยังครึ่งซ้ายของสมอง ส่วนครึ่งขวาของจอตาก็จะป้อนสัญญาณภาพไปยังครึ่งขวาของสมอง นั่นก็คือภาพสายตาทั้งสองข้างจะทับกันและจะหลอมรวมกันด้วยสมอง ทำให้เกิดเป็นภาพเพียงภาพเดียวที่เป็นภาพสามมิติ ด้วยคุณสมบัตินี้จึงทำให้สามารถมองเห็นความลึกได้ แต่

อย่างไรก็ตาม การมองเห็นความลึกยังขึ้นอยู่กับ(14)

1. การเบนลูกตาเข้าหากัน (Convergence) คือเมื่อดูของไกลแล้วเพ่งมองดูของใกล้ จะทำให้รู้ว่าสิ่งที่เห็นอยู่ใกล้ตัวหรือไกลตัว

2. การเพ่งจัดระยะ (Accomodation) ช่วยบอกได้ว่าของอยู่ใกล้หรือไกล การเพ่งจัดระยะจะกระทำร่วมกับการเบนลูกตาเข้าหากัน

นอกจากนี้ การมองเห็นความลึกสามารถที่จะเห็นได้ด้วยตาเพียงข้างเดียว ซึ่งนอกจากจะต้องอาศัยความชำนาญอย่างมากแล้ว ยังต้องอาศัย (14)

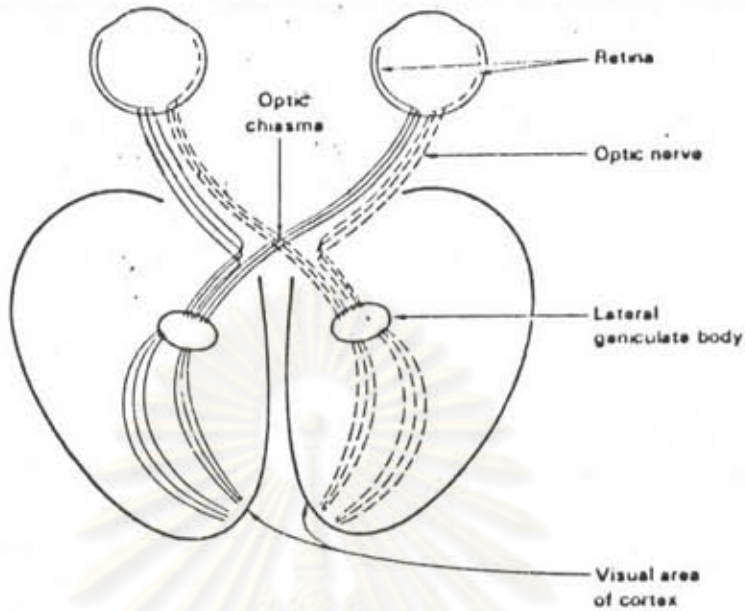
1. วัตถุที่วางเรียงกันจากหน้าไปหลังสามารถบอกได้ว่าอะไรอยู่หน้า อะไรอยู่หลัง ถ้าวัตถุนั้นใสจะบอกความลึกไม่ได้

2. ภาพที่เกิดบนจอตา ถ้าวัตถุอยู่ใกล้ภาพจะใหญ่กว่าภาพของวัตถุที่อยู่ไกล

3. สีของวัตถุและความทึบของวัตถุ นัยน์ตาใช้สีของวัตถุเปรียบเทียบกับสีของสิ่งแวดล้อม

4. การเบนเข้าหาของเส้นคู่ที่จุดไกล เช่น การเขียนรูปถนนยิ่งไกลยิ่งเขียนให้แคบลง สิ่งแวดล้อมไกล ๆ ก็เขียนให้เล็กลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 แสดงวิถีของการเห็น
(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

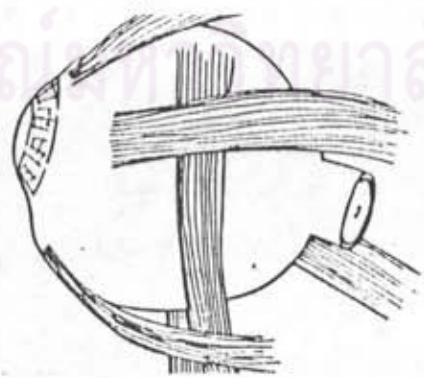
2.3.4 การเคลื่อนไหวตา (Movement of the Eye)

ในรูปที่ 2.8 แสดงกล้ามเนื้อตา ซึ่งในตามีกล้ามเนื้อทั้งหมด 6 มัดที่ควบคุมการเคลื่อนไหวของตา กล้ามเนื้อแต่ละมัดเมื่อเทียบกับกล้ามเนื้อส่วนอื่น ๆ ของร่างกายแล้วจะมีขนาดเล็กมาก แต่คุณสมบัติของเนื้อเยื่อจะดีกว่ากล้ามเนื้ออื่น ๆ ในการมองไปยังทิศทางใดทิศทางหนึ่งของตานั้น กล้ามเนื้อตามัดที่ทำให้เกิดการดึงลูกตาให้ไปในทิศทางนั้น จะทำงานคือการหดตัวของกล้ามเนื้อ แต่ในขณะเดียวกันกล้ามเนื้อตามัดอื่น ๆ อีก 5 มัดจะต้องทำงานไปในขณะเดียวกัน โดยบางมัดจะเกิดการหดตัว เพื่อช่วยในการดึงลูกตาไปในทิศทางให้ได้ดีขึ้น และบางมัดจะทำการคลายตัวลงเพื่อมิให้มีแรงต่อต้านมากเกินไป ในเวลาที่คนเรามองไปในทิศทางใด จะเห็นว่าตาทั้งสองจะมองไปในทิศทางนั้น โดยแกนของสายตา (Visual Axis) ทั้งสองจะขนานกันไปด้วย ในการที่ตาทั้งสองเวลามองไปในทิศทางใด จะขนานกันได้ก็โดยอาศัย กล้ามเนื้อตาที่จะเกิดการหดตัวเพื่อจะดึงลูกตาไปในทิศทางนั้น ๆ ในแต่ละตาจะ

ต้องเกิดการหดตัวและให้เกิดแรงดึงที่เท่า ๆ กัน และกล้ามเนื้อตามัดอื่นที่ช่วยในการดึง และมัดที่คลายตัวเพื่อไม่ให้เกิดแรงด้านมากเกินไป จะต้องทำงานสมดุลย์กันในทั้งสองตา ทั้งนี้เพื่อป้องกันตาข้างใดข้างหนึ่ง ไม่ให้เบี่ยงเบนออกจากแนวตั้งหรือแนวระดับ ทำให้ตาทั้งสองข้างสามารถถ่ายทอดภาพจากระยะต่าง ๆ กันได้ ซึ่งทำให้สมองไม่มีปัญหาในการที่จะรวมภาพที่มองด้วยตาทั้งสองข้าง ให้เป็นภาพที่คมชัดเพียงภาพเดียวได้ แต่ถ้ากล้ามเนื้อตามัดต่าง ๆ ในตาทั้งสองข้างดังกล่าวทำงานไม่สมดุลย์กัน ก็จะทำให้แกนสายตาของตาข้างใดข้างหนึ่งหรือทั้งสองข้างเบนออกไปจากแนวปกติ ทำให้ภาพของวัตถุไม่ตกลงตรงจุดเหลืองพอดี จึงทำให้การมองเห็นภาพร่วมกันของตาทั้งสองข้างเสียไป และอาจทำให้เกิดภาพซ้อนขึ้นได้ ซึ่งลักษณะอาการดังกล่าวนี้เรียกว่าเกิด "Phoria" ขึ้น และนอกจากนี้แล้วยังมีผลทำให้ความสามารถในการมองความลึกเสียไปด้วย

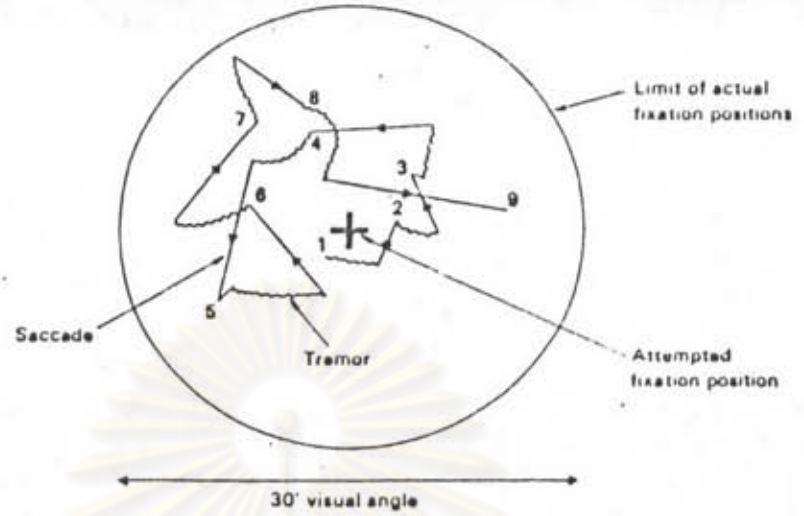
ขณะที่เพ่งมองดูภาพ ตาจะเกิดการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นไปโดยไม่ได้ตั้งใจ ดังรูปที่ 2.9 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนไหวตาขณะที่ใช้ความพยายามเพ่งมองภาพอย่างเต็มที่ ลักษณะของการเคลื่อนไหวตามีอยู่ 3 ลักษณะคือ ลักษณะแรกเกิดการสั่นรัว (Tremor) เพียงเล็กน้อยด้วยความถี่ต่ำ ลักษณะที่สองคือ การกระตุกหรือสะบัด (Flicks or Saccades) อย่างรวดเร็วของตาทั้งสองข้างพร้อมกัน ซึ่งอาจเกิดเพียงครั้งเดียวหรือสองครั้งในหนึ่งวินาที ด้วยความเร็วเชิงมุม (Angular Velocities) หลายร้ององศาต่อวินาที และลักษณะสุดท้ายคือ จะเคลื่อนลอยไปอย่างช้า ๆ (Slow 'Drift') ขณะเกิดอาการกระตุกหรือสะบัด

ในขณะที่ตาเคลื่อนไหว จะมีผลทำให้ความคมชัดของสายตาลดน้อยลง ดังนั้นปริมาณของแสงที่น้อยที่สุดของสิ่งเร้าที่ส่องเข้าสู่จอตา เพื่อทำให้เกิดการมองเห็น จะต้องเพิ่มขึ้นในช่วงสั้น ๆ



รูปที่ 2.8 แสดงกล้ามเนื้อตา

(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)



รูปที่ 2.9 แสดงการเคลื่อนไหวตาขณะเพ่งมองวัตถุ

(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

การสั่นรัวและการกระดุกหรือสะบัด มีประโยชน์ต่อการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของภาพที่มองและยังทำไม่ให้เกิดความล้าของตามากเกินไปด้วย ในบางครั้งภาพที่ปรากฏบนจอตา ตามความรู้สึกของผู้มองจะเป็นภาพเลือน ๆ ไม่สมบูรณ์ หรือมีความรู้สึกว่ายังเห็นภาพอยู่ตรงตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่วัตถุนั้นเคยอยู่ ทั้งที่ความเป็นจริงภาพนั้นได้เคลื่อนออกจากที่นั้นหรือหายไปแล้วก็ตาม ลักษณะอาการเช่นนี้ก็คือ การเห็นภาพติดตาหรือเกิดภาพค้าง (After - Image) เช่น ถ้าเพ่งมองที่จุดศูนย์กลางของกากบาทสีดำภาพในวงกลมของรูปที่ 2.10 ประมาณหนึ่งนาที แล้วกลับไปเพ่งมองที่จุดสีดำเล็ก ๆ ในทันทีหลังจากที่ละสายตาจากจุดตัดดังกล่าวแล้ว ก็จะเห็นเป็นภาพเลือน ๆ ของจุดตัด หรือวงกลมอยู่อีกนานประมาณ 2-3 วินาที ระยะเวลาของการเห็นภาพติดตาสำหรับคนหนึ่ง ๆ จะไม่เท่ากันทุกคนเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับระบบประสาทแต่ละคนจะไวมากน้อยเพียงใด

รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดภาพค้าง

(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

2.4 การมองเห็นสี (Color Vision)

การมองเห็นสีเป็นความรู้สึกที่เกิดขึ้นขณะมอง ซึ่งเกิดจากการตอบสนองร่วมกันของตาและสมอง ทุกคนได้ถูกสอนให้เรียกชื่อสีต่าง ๆ ที่พบเห็น และก็ใช้ชื่อของสีต่าง ๆ ดังกล่าวเรียกสีที่เกิดความรู้สึกเหมือนกับที่ถูกสอนมา ปกติแล้วมนุษย์จะมีความรู้สึกต่อสีไม่แตกต่างกัน เว้นแต่ผู้ที่มีความบกพร่องในการมองเห็นสี (Color Deficient) ซึ่งจะเห็นสีผิดไปจากความเป็นจริง

จากที่กล่าวมาแล้ว ภายในจอตามีรีเซพเตอร์ที่ทำหน้าที่รับแสงอยู่ 2 ชนิดคือ โคนและร็อด ซึ่งร็อดมีหน้าที่เกี่ยวกับการเห็นบริเวณรอบ ๆ (Peripheral Vision) และการเห็นภาพเมื่อมีความเข้มของแสงต่ำ ส่วนโคนจะมีหน้าที่ในการเห็นรายละเอียดของภาพและสีต่าง ๆ ในจอตานั้นมีโคนอยู่ 3 ชนิดที่ไวต่อสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเข้ม หรือคราม (Blue) การมองเห็นวัตถุมีสีต่าง ๆ ได้เนื่องจากวัตถุดูดความยาวของคลื่นแสงสีขาวกลุ่มหนึ่งไว้ แล้วสะท้อนความยาวคลื่นของแสงสีขาวอีกกลุ่มหนึ่งออกมา ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "กระบวนการกัดทอนแสงสี" (Subtractive Process) อย่างไรก็ตามสีบางอย่างไม่ได้เกิดเพราะการดูดกลืนแสง แต่เกิดจากการสอดแทรก (Interference) หรือเกิดจากการกระจายแสงแบบ Rayleigh (Rayleigh Scattering) นอกจากนี้การเห็นสียังขึ้นอยู่กับสีของแสงที่ส่องสู่ผิวหน้าของภาพหรือวัตถุนั้น ๆ ด้วย ตัวอย่างเช่น กระดาษที่ดูดกลืนแสงสีเขียว จะเห็นเป็นสีมาเกนต้า หรือสีบานเย็น เมื่อส่องสว่างด้วยแสงสีขาว เพราะว่ากระดาษนี้สะท้อนแสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินออกมาอย่างแรงกล้านั่นเอง อย่างไรก็ตามถ้าแสงที่ตกกระทบเป็นแสงที่ประกอบด้วยแสงสีน้ำเงินเป็นส่วนใหญ่ โดยมีแสงสีแดงน้อยมากแล้วละก็ กระดาษที่มองเห็นก็จะเกิดเป็นสีน้ำเงิน แต่ถ้าแสงที่ตกกระทบมีส่วนประกอบของแสงสีแดงเป็นส่วนใหญ่ และมีแสงสีน้ำเงินอยู่ด้วยเพียงเล็กน้อย กระดาษที่เห็นก็จะมีสีแดง การเปลี่ยนแปลงสีเช่นนี้จะพบเห็นได้บ่อยมาก เมื่อมองวัตถุในเวลากลางวันที่มีแสงสว่างตามธรรมชาติ และมองในเวลากลางคืนด้วยความสว่างของหลอดไส้ธรรมดา (Filament Lamp) ซึ่งแสงจากหลอดไส้นี้จะมีแสงสีน้ำเงินอยู่น้อยมาก แต่จะมีแสงสีแดงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแสงสว่างปกติในเวลากลางวัน ตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีก็คือ รถประจำทางสีแดง เมื่อมองในเวลากลางคืนที่อยู่ภายใต้ความสว่างของแสงหลอดแสงจันทร์ (Sodium Lighting) ซึ่งให้ความสว่างด้วยแสงสีเหลืองเพียงสีเดียว ก็จะเห็นรถคันนี้มีสีออกทางน้ำตาลเข้ม ซึ่งก็เนื่องมาจากแสงที่สะท้อนจากรถไม่มีแสงสีแดงเลย เพียงแต่มีแสงสีเหลือง

เพียงเล็กน้อยนั่นเอง และแสงอาทิตย์ในเวลากลางวันที่มองเห็นเป็นสีขาวไม่ใช่แสงอาทิตย์ที่ส่องตรงมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมีสีเหลือง แต่เป็นแสงที่สะท้อนกลับมาจากท้องฟ้า

2.4.1 ทฤษฎีการมองเห็นสีของโทมัส ยัง (Thomas Young's Theory)

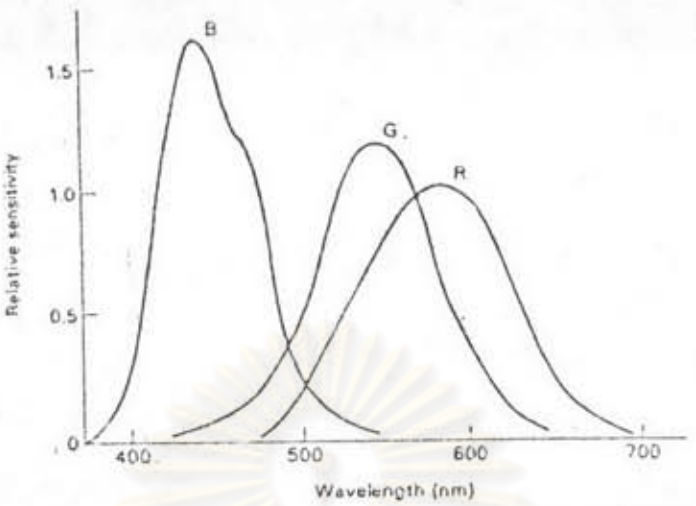
ในปี ค.ศ. 1801 โทมัส ยัง ได้ค้นพบว่า คนที่มองเห็นได้อย่างปกตินั้น ตาจะมีความไวต่อสี 3 สี คือ แดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงินเข้ม (Blue) ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองผสมแสงสีของโทมัส ยัง ด้วยการใช้เครื่องฉายสไลด์ที่มีฟิลเตอร์ 3 สี คือ ฟิลเตอร์แดง (Red Filter) ฟิลเตอร์น้ำเงิน (Blue Filter) และฟิลเตอร์เขียว (Green Filter) ซ้อนทับกันบนฉากรับ เมื่อแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดงซ้อนทับกัน ก็จะมองเห็นออกมาเป็นสีบานเย็น หรือสีแดงแกมน้ำเงิน (Margenta or Reddish Blue) ในทำนองเดียวกัน เมื่อแสงสีน้ำเงินฉายทับกับแสงสีเขียว ก็จะเกิดเป็นสีไซแอนหรือสีน้ำเงินแกมเขียว (Cyan or Bluish Green) อย่างไรก็ตามเมื่อแสงสีเขียวและแสงสีแดงฉายซ้อนทับกัน ก็จะมองเห็นเป็นสีเหลือง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสีเหลืองนี้ไม่ได้แสดงคุณสมบัติของสีเขียวและสีแดงเลย จากที่กล่าวมาแล้วตาของมนุษย์มีความไวต่อคลื่นขนาดความยาวประมาณ 380-780 นาโนเมตรก็จริง แต่ก็ไม่มีความสามารถในการแยกหรือปรับหาคลื่นหนึ่งคลื่นใดได้เหมือนวิทยุ ตาจะรับแถบคลื่นทั้งหมด และจะตอบสนองทั้งหมดต่อความยาวคลื่นแสงเฉพาะที่เห็นโดยไม่สามารถแยกสีออกจากกันได้ นอกจากสีนั้น ๆ ปรากฏอยู่โดยแยกออกจากกัน เช่นตาไม่สามารถแยกแสงสีแดงหรือแสงสีเขียวออกจากแสงสีเหลืองได้ หรือแยกสีต่าง ๆ ออกจากแสงสีขาวได้ แม่สีทั้งสามสีดังกล่าวข้างต้นนี้เรียกว่า "แม่สีเชิงบวก" (Additive Primary Colors)

โทมัส ยัง ได้พบว่าสีทั้งสามสีที่ตาไวต่อนี้ ไม่ได้มาจากพื้นฐานของทฤษฎีแสง (Theory of Light) แต่มันเป็นคุณสมบัติของตา เขาได้ยืนยันข้อเท็จจริงนี้ในปี ค.ศ. 1802 ว่า ตาสามารถจำแนกสีแต่ละสี และถ่ายทอดสีแต่ละสีไปสู่สมอง ตลอดประสาทตาที่แตกต่างกันสามชนิด ซึ่งประสาทตาทั้งสามชนิด จะทำให้เกิดสัญญาณเมื่อมองเห็นสีที่แตกต่างกันสามสี คือ แดง, เขียว และน้ำเงิน การมองเห็นสีบานเย็นหรือสีแดงแกมน้ำเงิน (Reddish Blue) เกิดจากการเร้าประสาทตาที่เป็นตัวรับสีแดงและสีน้ำเงินพร้อม ๆ กัน และการมองเห็นสีเหลืองก็เกิดจากการเร้าประสาทตาที่เป็นตัวรับสีแดงและสีเขียวพร้อม ๆ กัน ดังนี้เป็นต้น และเมื่อใดก็ตามที่ประสาทตาที่รับรู้สีทั้งสามชนิดนี้ถูกกระตุ้นด้วยสีทั้งสามพร้อม ๆ กันแล้ว ก็จะมองเห็นเป็นสีขาว

2.4.2 ทฤษฎีการเห็นสีของเฮอร์แมน วอน เฮล์มโฮลท์ (Helmholtz's Theory)

เฮล์มโฮลท์ เป็นนักฟิสิกส์และนักสรีรวิทยาชาวเยอรมัน (1821-1894) ได้ทำการทดลองผสมสีบางสีเข้าด้วยกัน แล้วสรุปผลว่า การที่จะอธิบายนัยน์ตาที่มีความสามารถในการมองเห็นสีได้อย่างถูกต้องนั้นจำเป็นต้องอ้างถึงวิธีการที่นอกเหนือไปจากวิธีการที่นำแม่สีทั้งสามมาผสมกันด้วย แม้ว่ามันจะเป็นการยากที่สีต่าง ๆ ทั้งหมดสามารถจะเทียบกันได้ ด้วยการผสมเชิงบวก (Additive Mixture) ของแม่สีทั้งสามสีในอัตราส่วนที่เหมาะสม แต่ก็ยังมีบางสีที่ไม่สามารถเทียบกันได้ด้วยวิธีนี้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าจะเทียบสีน้ำเงินอ่อน ซึ่งมีขนาดความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร กับสีผสมของแม่สีน้ำเงินเข้มกับสีเขียว ผลที่ได้จากการเทียบสีก็คือ สีที่ได้จากการผสมจะมีสีอ่อนกว่าสีในแถบแสงสีเสมอ นั่นก็คือ มีความอิ่มตัวน้อยกว่า (Less Saturated) ความอิ่มสีหรือจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าความเด่นของสี (Colorfullness) ใช้แสดงความรู้สึกว่าสีต่าง ๆ ในแถบแสงสี เป็นสีที่มีความอิ่มตัวมากที่สุด ซึ่งตามหลักฟิสิกส์ถือว่ามีความบริสุทธิ์สูงที่สุด ถ้าเอาสีขาวผสมเข้าไปแล้ว ก็จะได้สีอ่อนลง (Pastel Color) คือความอิ่มตัวน้อยลง หรือมีความบริสุทธิ์น้อย (Low Purity) สีเทากลาง (Neutral Gray) หรือสีขาว เป็นสีที่ไม่มีความอิ่มตัวเลย (Zero Saturation) เฮล์มโฮลท์ได้ทราบจากการทดลองว่า จะมีแม่สี 4 สี หรือมากกว่าที่จะนำไปเทียบกับสีบางสี และเขาคิดว่าทฤษฎีที่กล่าวถึงเส้นประสาทสามประเภทที่รับรู้สีของโทมัส ยัง ไม่มีเหตุผลสนับสนุนอย่างเพียงพอ

เฮล์มโฮลท์เชื่อตามความคิดนี้ประมาณ 10 ปี จนกระทั่งเขาได้แสดงให้เห็นว่าการทดสอบในการรับรู้สีจะแสดงหรือรับรู้ด้วยกลไกของประสาทตาที่มีความไวต่อสีทั้งสาม โดยสมมติว่ากลไกทั้งสามจะมีความไวต่อแถบแสงสี (Spectral Sensitivity) หลาย ๆ สี และสีที่ซ้อนทับกัน หรือระหว่างสีได้ดี ซึ่งกลไกดังกล่าวทำให้ตาไวต่อสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเข้ม ดังแสดงด้วยเส้นโค้งดอบสนอง (Response Curves) ในรูปที่ 2.11 ดังนั้นแสงสีเหลืองบริสุทธิ์ ที่มีขนาดความยาวคลื่น 585 นาโนเมตร ไม่เพียงแต่จะกระตุ้นรีเซพเตอร์ที่ไวต่อสีแดงเท่านั้น แต่ยังเกิดการกระตุ้นรีเซพเตอร์ที่ไวต่อสีเขียวอย่างมากด้วย ด้วยเหตุนี้แม้ว่าสิ่งเร้าจะมีสีที่บริสุทธิ์ แต่การตอบสนองของนัยน์ตาก็ไม่ได้เกิดจากกลไกที่มีต่อสีนั้น ๆ โดยเฉพาะ



รูปที่ 2.11 เส้นโค้งตอบสนองต่อแถบแสงสี

(จากหนังสือ The Perception of Light and Colour)

2.4.3 การเปรียบเทียบของไรธ์ (Wright's Analogy)

ไรธ์ สอนหนังสืออยู่ที่ Imperial College, London ได้ใช้การ ปรียบเทียบทางด้านโลหะวิทยา (Metallurgical Analogy) ซึ่งอธิบายได้ว่า ถ้าเรามีโลหะผสมจำนวนมากและในแต่ละจำนวนผสมด้วย สังกะสี ดีบุก และทองแดง ในสัดส่วนที่แตกต่างกันแล้วละก็ จะสามารถเทียบตัวอย่างที่กำหนดด้วยโลหะที่ผสมใหม่ โดยผสมสังกะสี ดีบุก และทองแดง ซึ่งโลหะทั้งสามไม่มีสารอื่นเจือปนอยู่ จนกระทั่งส่วนผสมเข้ากันหรือเหมือนกันกับโลหะผสมตัวอย่าง อย่างไรก็ตามถ้าต้องการเปรียบเทียบทองเหลือง (ทองแดงผสมกับสังกะสี) ที่กำหนด (ไม่มีดีบุกผสม). กับทองแดงและสังกะสีที่มีส่วนผสมของดีบุกเพียงเล็กน้อยแล้วละก็ คุณสมบัติของทองเหลืองและส่วนผสมใหม่ (ทองแดง, สังกะสี ผสมกับดีบุกเพียงเล็กน้อย) จะไม่มีโอกาสเหมือนกันได้เลย เว้นแต่ว่าเราจะผสมดีบุกเข้าไปในทองเหลืองที่เป็นตัวอย่างเทียบ ดังนั้นมันจะเหมือนกันก็โดยการผสมทองแดงกับสังกะสีที่ไม่บริสุทธิ์ (ผสมดีบุก) เข้าไปในตัวอย่างเทียบทั้งสองตัวอย่าง เนื่องจากเส้นโค้งตอบสนองต่อแถบแสงสีของรีเซพเตอร์เกยทับกัน (รูป 2.11) สีในแถบแสงสีเพียงสีเดียว จึงกระตุ้นรีเซพเตอร์อย่างน้อยสองชนิด ด้วยเหตุนี้จึงให้การตอบสนองต่อสีของรีเซพเตอร์ จึงกระทำร่วมกัน

2.4.4 ทฤษฎีของยังและเฮล์มโฮลท์ (Young – Helmholtz Theory)

เมื่อเฮล์มโฮลท์ได้พบว่ารีเซพเตอร์ที่รับรู้สีในจอตามีเส้นโค้งการตอบสนองต่อแถบแสงสีเหลื่อมกันหรือเกยทับกัน เขาก็ยอมรับสมมติฐานของโทมัส ยัง ตั้งแต่นั้นมา จึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป โดยเรียกทฤษฎีนี้ว่า Young – Helmholtz Theory ซึ่งถือว่าเป็นหลักแนวทางที่สำคัญในการนำไปสู่การวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับสายตา แต่ในอดีตทฤษฎีนี้ก็มีการคัดค้านกันอยู่ กล่าวคือ รีเซพเตอร์โคนในจอตามีความแตกต่างกัน ซึ่งก็มีส่วนมาจากโทมัส ยัง ไม่ได้มีการแสดงหรือพิสูจน์ทางกายวิภาคศาสตร์ของจอตานั่นเอง

2.4.5 ความบกพร่องในการมองเห็นสี (Color Vision Deficiency)

ความบกพร่องในการมองเห็นสี คือความผิดปกติในการมองเห็นสีต่าง ๆ อันเนื่องมาจากความผิดปกติของโคน ซึ่งคนปกติสามารถเห็นส่วนผสมที่พอเหมาะของแสงสีแดง เขียว และน้ำเงินเข้ม ที่ฉายไปบนฉากอันเดียวกันให้เห็นเป็นแสงสีขาวได้ แต่ถ้าโคนของสีใดไม่ทำงานหรืออ่อนกำลังลงก็ต้องเพิ่มสีนั้นในส่วนผสมเพื่อจะให้เห็นเป็นสีขาว ความบกพร่องในการมองเห็นสี แบ่งตามลักษณะการเกิดเป็น 2 ชนิดคือ

1. เป็นมาแต่กำเนิด (Congenital Color Deficient)

2. เกิดเนื่องจากโรคของประสาทตาหรือจอตา เช่น จอตาลอก (Retina Detachment) หรือโรคประสาทตาฝ่อ (Optic Atrophy) ซึ่งโรคพวกนี้ก็ทำให้สภาวะการมองเห็นไม่ค่อยดีนัก (15)

ความบกพร่องในการมองเห็นสีแบ่งตามอาการมีดังนี้ คือ (16)

1. Protanomalous คืออาการที่เห็นสีแดงได้น้อยลง
2. Deuteranomalous คืออาการที่เห็นสีเขียวได้น้อยลง
3. Tritanomalous คืออาการที่เห็นสีน้ำเงินเข้มได้น้อยลง
4. Tetartanomalous คืออาการที่เห็นสีเหลืองได้น้อยลง

ความบกพร่องในการมองเห็นสีที่เป็นมาแต่กำเนิด จะเกี่ยวพันกับเพศ (Sex – Linked) กล่าวคือในชนชาติฝรั่งผิวขาวมีประมาณ 8% สำหรับผู้ชาย และ 0.42% สำหรับผู้หญิง

I10293078

ซึ่งต่างจากชาวเอเชียที่จะเป็นผู้ชายเสีย 2% และผู้หญิง 0.5% และชายมีความบกพร่องในการมองเห็นสีแดงประมาณ 3-5% ของคนทั่วไป และความบกพร่องในการมองเห็นสีแดงต่อสีเขียวประมาณ 2 : 7 เพศหญิงพบได้น้อยมาก สำหรับความบกพร่องในการมองเห็นสีน้ำเงินพบได้น้อยมาก และยิ่งสีเหลืองพบได้น้อยที่สุด การที่ตามีความสามารถในการมองเห็นสีใดสีหนึ่งได้น้อยลงหรือไม่เห็นเลย (Monochromatic Color Vision) คือบอกไม่ถูกว่าสีที่เห็นเป็นสีอะไร จะทำให้การมองเห็นผิดไปจากความเป็นจริง เช่น ในทางแสง ส่วนผสมของสีแดงและสีเขียวจะเห็นเป็นสีเหลือง ถ้าคนนั้นมีความผิดปกติในการมองเห็นสีแดง ก็จะเห็นแสงสีเหลืองเป็นสีเขียว หรือแค่เห็นสีแดงอ่อนกำลังลง ก็จะเห็นสีเหลืองออกเป็นสีเขียวเหลือง แต่อย่างไรก็ตาม การที่คนเราจะรู้อะไรขึ้นอยู่กับการศึกษาและประสพการณ์ บางคนจะไม่ทราบเลยว่า ตัวเองมีความบกพร่องในการมองเห็นสี เพราะถูกสอนให้เรียนสีต่าง ๆ มาตั้งแต่เล็ก จึงสามารถเรียกสีต่าง ๆ ได้เหมือนคนปกติ แต่จะเรียกสีผิดเมื่อเทียบสีที่ใกล้เคียงกัน เช่น ขณะเล่นบิลเลียด เป็นต้น ความบกพร่องในการมองเห็นสีมาแต่กำเนิดนั้น ปัจจุบันยังไม่มียาอะไรที่จะรักษาหรือป้องกันได้

2.4.6 การมองเห็นสีในสัตว์ (Animal Color Vision)

ในการทดลองเพื่อที่ต้องการทราบความสามารถในการมองเห็นสีของสัตว์ จะต้องใช้เวลานานและความอดทนมาก(3) วิธีการทดสอบนั้นขึ้นอยู่กับการฝึกฝนทางด้านพฤติกรรมของมัน และการทดลองมักให้สัตว์ทดลองอยู่ภายในกล่อง โดยที่ด้านหนึ่งจะมีกระดาษสีแปะติดอยู่ 2 แผ่น และเป็นสีคนละสี หรืออาจใช้หลอดไฟสีกรุไว้ก็ได้ (แต่ละด้านอาจมีหลอดไฟข้างละ 2 หลอด) โดยสีของหลอดไฟไม่เหมือนกัน ซึ่งภายในกล่องจะมีอาหารที่โปรดปรานมากที่สุดของมันอยู่หน้าหลอดไฟทั้งสองด้าน อยู่เท่า ๆ กัน ด้วยวิธีนี้เองจะทำให้ระบบประสาทสัมผัสรับกลิ่นของสัตว์ที่ทดลองเกิดการสมดุลย์ ถ้าภายในกล่องมีแสงสีอยู่ 2 สีคือ แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงิน และมีอาหารอยู่หน้าแสงสีดังกล่าว เมื่อสัตว์ที่ทดลองเคลื่อนตัวไปสู่แสงสีแดงเพื่อกินอาหาร ก็จะถูกช็อคด้วยกระแสไฟอ่อน ๆ ทำให้สัตว์ไม่ยอมไปกินอาหารที่วางอยู่หน้าแสงสีแดง ส่วนอาหารที่อยู่ตรงหน้าแสงสีน้ำเงินจะไม่มีกระแสไฟฟ้า ดังนั้นมันจึงเดินไปกินอาหารที่วางอยู่หน้าแสงสีน้ำเงินได้ การทดลองเช่นนี้ตำแหน่งของแสงสีน้ำเงินและแสงสีแดงกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ช็อคและอาหารจะต้องสับเปลี่ยนตำแหน่งกันได้ โดยเกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Random) ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการเรียนรู้ทิศทางที่แน่นอนของสัตว์ทดลอง วิธีเช่นนี้เงื่อนไขที่สำคัญคือ จะต้องช็อคที่สีคงที่เท่านั้น และอาจ

แสดงให้เห็นได้ว่าสัตว์ทดลองนั้น สามารถที่จะฝึกให้เข้ากับแสงที่จ้ากว่าได้ โดยที่มันไม่สามารถที่จะรู้ความแตกต่างของสีได้เลย กล่าวคือถ้าข็อตที่สีไม่คงที่ อาจข็อตที่แสงสีน้ำเงินหรือแดงก็ได้ แต่จะข็อตที่แสงที่มีความจ้าน้อยกว่า โดยเงื่อนไขยังคงเกิดขึ้นอย่างสุ่ม และการเปล่งแสงของแสงสีทั้งสองในแต่ละครั้งเปลี่ยนแปลงไปเรื่อย ๆ ซึ่งการทดลองต้องใช้เวลาอย่างมาก ถ้าเมื่อใดสัตว์ทดลองเกิดการงุนงง คือไม่สามารถตัดสินใจได้ว่า จะเคลื่อนตัวไปกินอาหาร ที่ตำแหน่งของแสงสีใด แสดงว่าจุดนั้นคือจุดที่เกิดการเปล่งแสงเท่ากันของสัตว์ทดลองนั้น ๆ คือ Luminosity เท่ากัน โดยจุดนี้จะไม่เหมือนกันในสัตว์แต่ละประเภท และไม่เหมือนกับคนด้วย จากจุดนี้เองก็กล่าวได้ว่าสัตว์ทดลองไม่มีความสามารถในการแบ่งแยกความแตกต่างของสีได้ เมื่อเป็นเช่นนี้ การทดลองจะต้องกระทำซ้ำ ๆ โดยการใช้แสงสีที่เกิดจากการผสมต่าง ๆ กัน การทดลองที่กล่าวมานี้ ต้องใช้เวลามาก และทำซ้ำ ๆ กันหลายครั้ง ซึ่งต้องใช้ความอดทนสูง และเป็นงานที่น่าเบื่อหน่าย

เกี่ยวกับการมองเห็นสีของสัตว์ต่าง ๆ พอที่จะสรุปได้ดังนี้คือ สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ (Amphibia) จะมีความสามารถในการมองเห็นสีได้เลวหรือไม่มีเลย โดยเหตุที่มันขอบซ่อนเร้น และเป็นสัตว์ที่หากินในเวลากลางคืน (Nocturnal) ดังนั้นการมองเห็นสีได้ถูกนำมาใช้น้อยมาก จึงทำให้มีคุณสมบัติดังกล่าว พวกสัตว์เลื้อยคลาน (Reptiles) เช่น งู เป็นไปได้ที่มีความสามารถในการมองเห็นสี ส่วนพวกสัตว์เลื้อยคลานในกลุ่มจิ้งจก, ตุ๊กแก, กิ้งก่า, เหี้ย สัตว์กลุ่มนี้มีความสามารถในการมองเห็นสีอยู่บ้างแต่ไม่มากนัก และพวกเต่าและกระ (Turtles) พวกนี้มีนัยน์ตาที่มองเห็นสีได้ แต่แมวก็เป็นไปได้ที่ไม่มีความสามารถในการมองเห็นสีเลย ส่วนหมามีความรู้สึกต่อสีเพียงเล็กน้อย ปลาทุกชนิดมีความรู้สึกต่อสีได้ดีมาก เช่นเดียวกับนกที่อยู่ในกลุ่มหากินในเวลากลางวัน ส่วนสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีความสามารถในการมองเห็นสีเหมือนกันมากกับคนก็คือลิงชนิดต่าง ๆ ดังนี้คือ Chimpanzee, Guinea Baboon, Pigtalied Macaque Monkey, Rhesus Monkey, Sooty Mangabey, Squirrel Monkey หรือ Marmoset และ Spider Monkey สัตว์ที่กล่าวมานี้มีสายตาในการมองเห็นสีได้อย่างดีด้วยนัยน์ตาที่มีประสิทธิภาพและได้รับการวิวัฒนาการมาอย่างดี ซึ่งมีกลไกต่าง ๆ ในการเพ่งจัดระยะเพื่อปรับสภาพนัยน์ตาทำให้การมองเห็นถูกต้อง สัตว์เหล่านี้ไม่เพียงแต่รู้ว่าสีแตกต่างกันในสภาพที่ความจ้าแตกต่างกันเท่านั้น แต่มันยังมีความสามารถที่จะรู้ความแตกต่างในสีของวัตถุที่มีความจ้าเท่ากันด้วย ตัวอย่างง่าย ๆ ที่เห็นได้ชัดก็คือ สัตว์พวกนี้จะรู้ว่าผลไม้ที่เป็นอาหารนั้นสุกหรือยังไม่สุก เช่น มะเขือเทศ

ที่มีสีแดงและสีเขียว ส่วนสัตว์ที่ไม่มีสายตาในการรับรู้สีจะไม่สามารถรู้ได้เลย ดังนั้นสัตว์ที่มีสายตาในการมองเห็นสีจะรับรู้รายละเอียดต่าง ๆ ได้มากกว่า ตัวอย่างเช่น นก เพราะว่านกขณะบินไปจะมีความเร็วมาก และพร้อมกันนั้นก็ต้องมองหาอาหารหรือเหยื่อไปด้วย ดังนั้นจึงต้องการรับรายละเอียดต่าง ๆ ให้ได้มากกว่า

2.5 ความคมชัดของสายตา (Visual Acuity)

ความคมชัดของสายตาเป็นคำเฉพาะของนักจักษุวิทยา (Ophthalmologist) และมักใช้คำย่อว่า VA ซึ่งหมายถึงความสามารถของสายตาในการที่จะแยกแยะรายละเอียดต่าง ๆ ของวัตถุที่เพ่งมอง หรือระหว่างวัตถุต่าง ๆ ที่วางใกล้ชิดกันมาก ๆ นอกจากนี้ความคมชัดของสายตายังสามารถบอกได้ด้วยมุมของสายตา (Visual Angle) กล่าวคือความคมชัดของสายตาขึ้นอยู่กับเรตินาเกรน (Retina Grain) หรือความหนาแน่นของรีเซพเตอร์ที่แสงไปตก ความสว่างของจุดแสงและการหักเหของแสง เป็นต้น ระยะใกล้ที่สุดระหว่างจุดสองจุดที่ตาสามารถแยกออกจากกันได้ ใช้วัดออกมาเป็นมุมของสายตา ซึ่งหมายถึงมุมที่เกิดจากระยะระหว่างภาพ หรือขนาดความโตภาพที่อยู่ในลานสายตา (Visual Field) มุมของสายตาที่เล็กที่สุดประมาณ 1 ลิบดา โดยที่อย่างน้อยที่สุดแสงจะต้องตกลงบนจุดเหลือง ซึ่งเป็นบริเวณของจอตาที่มีแต่โคนเป็นส่วนใหญ่ ถ้าแสงตกบริเวณอื่นของจอตา มุมของสายตาต้องใหญ่ขึ้น เพราะปริมาณของโคนน้อยลง มุมของสายตานี้ จะแปรเปลี่ยนไปตามระยะห่างระหว่างภาพและตาคือ ภาพยิ่งห่างไกลออกไป มุมของสายตาก็จะเล็กลง ซึ่งก็ทำให้ภาพเสมือนมีขนาดเล็กลงเป็นสัดส่วนกันด้วย ในการวัดมุมของสายตานอกจากลิบดาแล้ว ยังวัดออกมาเป็นเศษส่วนทศนิยมอีกด้วย กล่าวคือในการทดสอบทางคลินิคด้วยการใช้ Snellen Chart จะมีเศษส่วนกำกับแถวตัวอักษรไว้ทุกแถว เช่น 20/20 หมายความว่า ผู้ถูกทดสอบสามารถอ่านตัวอักษรต่าง ๆ ที่พิมพ์ด้วยหมึกสีดำบนกระดาษขาวได้ ซึ่งความกว้างของเส้นสีดำต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นตัวอักษรนั้นจะทำมุมกับตา 1 ลิบดาพอดี นั่นคือมุมสายตาเท่ากับ 1 ลิบดา ในทำนองเดียวกันเศษส่วน 20/40 และ 20/10 ที่กำกับไว้ข้างแถวตัวอักษรนั้นจะแทนมุมของสายตา 2 ลิบดา และ 0.5 ลิบดาตามลำดับ ดังนั้นมุมของสายตาที่เกิดจากการแปลงเลขเศษส่วนของ Snellen คือ

$$\text{มุมของสายตา} = \frac{1}{\text{เศษส่วน Snellen}}$$

และบางครั้งเลขเศษส่วน Snellen นี้จะแสดงด้วยเลขทศนิยม เช่น 20/20 = 1.0 และ 20/40 = 0.5 เป็นต้น

ปัจจัยที่มีผลต่อความคมชัดของสายตา

จากที่กล่าวมาแล้วว่า การจะเห็นภาพได้ชัดเจนภาพจะต้องไปรวมอยู่บนจอตาที่บริเวณจุดเหลืองเท่านั้น และจะชัดเจนที่สุดถ้าภาพเสมือนที่ปรากฏบนจอตาตกลงที่โฟเวีย ซึ่งเป็นบริเวณของจอตาที่ไวที่สุด แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายอย่างที่มีผลต่อความคมชัดของสายตา กล่าวคือ

1. ความเข้มแสงของฉากด้านหลังหรือบริเวณรอบข้าง

ความคมชัดของสายตาจะเปลี่ยนไปตามสภาวะการปรับสภาพของจอตาและจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อฉากด้านหลังหรือบริเวณรอบข้างของภาพที่ถูกเพ่งมองมีความเข้มของแสงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแสงนั้นมีความจ้ามาก ๆ มองแล้วรู้สึกบาดตา ความคมชัดของสายตาก็จะเริ่มลดลง ในบุคคลปกติทั่วไป ความคมชัดของสายตาในเวลากลางคืนจะสูงสุดที่ 20/200 ในสถานที่ที่มีความสว่างน้อย โคนจะมีปฏิกริยาตอบสนองไม่ต่อเนื่อง หรืออาจไม่ตอบสนองเลยก็ได้ คือมีแต่รอดเท่านั้นที่ตอบสนอง ซึ่งทำให้ความสามารถในการจำแนกรายละเอียดต่าง ๆ ลดลง โดยเหตุที่รอดมีปริมาณมากในส่วนใหญ่ของจอตา และอยู่บริเวณรอบนอก จึงทำให้บริเวณของการมองเห็นกว้างกว่าของโคนซึ่งอยู่ในโฟเวียเป็นส่วนใหญ่ และในสภาพที่มีความสว่างน้อยมาก ๆ รูม่านตาจะขยายกว้าง 7.5 ถึง 8 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบสายตาในเวลากลางคืนหรือมองภาพในเวลากลางคืน Contrast ระหว่างเป้าหมายและฉากด้านหลังเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง

ในการมองภาพขณะตะวันยอแสง (Mesopic) การเปลี่ยนแปลงขนาดความจ้าของฉากด้านหลังหรือบริเวณรอบข้าง และ Contrast เพียงเล็กน้อยจะมีผลกระทบอย่างมากต่อความคมชัดของสายตา ส่วนในกรณีที่แสงมีความจ้าไม่มากนัก ความคมชัดของสายตาจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อฉากด้านหลังมีความเข้มของแสงเพิ่มขึ้น และในสภาพเช่นนี้รูม่านตาจะมีความกว้าง 2.25 ถึง 3.00 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดความกว้างที่ทำให้การหักเหของแสง (Diffraction) และการเกิดตาพร่าอันเนื่องมาจากระบบการหักเหแสงของนัยน์ตา (Dioptric System) น้อยที่สุด

2. ขนาดของวัตถุ และเวลาในการมอง

ธรรมชาติตาของคนเราสามารถเห็นวัตถุที่ใหญ่ได้ง่ายกว่าวัตถุที่เล็ก และมีแนวโน้มที่จะเห็นวัตถุชิ้นเดียวกันมีขนาดเล็กลงในเวลากลางคืนเมื่อเทียบกับเวลากลางวัน ดังนั้น เมื่อวัตถุที่มองมีขนาดเล็ก รายละเอียดมาก ก็ต้องการปริมาณแสงมากขึ้น และเวลาในการมองเพิ่มขึ้น เนื่องจากตามิได้เห็นวัตถุนั้นทันทีที่วัตถุปรากฏอยู่ตรงหน้า ตาของคนเราต้องการเวลาช่วงหนึ่งในการปรับโฟกัส เพื่อให้ภาพตกลงบนจุดชัดของจอตา ปริมาณแสงยิ่งน้อยการเห็นก็ยิ่งต้องใช้เวลามากขึ้น

3. การเคลื่อนไหวของวัตถุ

เมื่อเพ่งมองวัตถุที่เคลื่อนที่จะทำให้ความคมชัดของสายตาเลวลง และจะเลวลงอย่างมากถ้าความเร็วเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใดก็ตามถ้าการเคลื่อนไหวของตาเกิดขึ้นพร้อมกับการเคลื่อนไหวของวัตถุ ก็จะทำให้ความคมชัดของสายตาใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามวัตถุที่เคลื่อนที่ก็ต้องการปริมาณแสงที่มากกว่าวัตถุที่อยู่นิ่ง และเวลาในการมองก็มากกว่าด้วย

4. อายุ

คนเราจะมีระบบการมองเห็นที่สมบูรณ์ คือสามารถแยกแยะสิ่งต่าง ๆ ได้ก็ต่อเมื่อมีอายุ 10 ปี เด็กแรกเกิด 2-3 ชั่วโมง มีความสามารถในการเพ่งมองและติดตามภาพเคลื่อนไหวได้ สำหรับเด็กทารกอายุประมาณ 1-5 วัน จะมีความคมชัดของสายตาอย่างน้อย 20/670 ตารางข้างล่างแสดงความคมชัดของสายตาของเด็กอายุ 0.5 เดือน ถึง 3 ปี(17)

อายุ	ความคมชัดของสายตา
0.5 เดือน	20/400
1.5 เดือน	20/400
2.5 เดือน	20/400
3.5 เดือน	20/200
4.5 เดือน	20/200
5.5 เดือน	20/200
6.0 เดือน	20/200

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อายุ	ความคมชัดของสายตา
1 ปี	20/200
2 ปี	20/100
3 ปี	20/50

และสำหรับเด็กที่อายุเกิน 3 ปี สามารถใช้วิธี Subjective Test ได้ ซึ่งอายุขนาดนี้ความคมชัดของสายตาจะถูกปรับให้ดีขึ้นอย่างมากจนถึงอายุ 10 ปี โดยปกติความคมชัดของสายตาจะเลวลงเมื่ออายุ 45 ปีไปแล้ว ทั้งนี้เพราะว่าความสามารถในการหักเหของแก้วตาเสื่อมลง และเกิดการกระจายของแสงภายในแก้วตา เหตุการณ์เช่นนี้ปกติแล้วจะไม่เกิดแก่คนที่อายุน้อยกว่า 40 ปี

5. การเคลื่อนไหวตา (Eye Movement)

การเคลื่อนไหวตาที่เกิดขึ้น โดยไม่ได้ตั้งใจขณะเพ่งมองเป้าหมายมี 3 ลักษณะคือ ลักษณะแรกเกิดการสั่นรัว (Tremor) ด้วยความถี่ต่ำ ลักษณะที่สองเกิดการกระตุกหรือสะบัด (Flicks or Saccades) และลักษณะสุดท้ายคือ เกิดการเคลื่อนลอยไปช้า ๆ (Slow 'Drift') ซึ่งรายละเอียดของการเคลื่อนไหวตาเหล่านี้ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.3.4

การเคลื่อนไหวตาดังกล่าวนี้จะทำให้ความคมชัดของสายตาลดลง กล่าวคือ เมื่อตาเคลื่อนไปช้า ๆ ก็จะทำให้ภาพเสมือนเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางของโฟเวียไป และต่อไปตาก็จะเกิดการสั่นรัว คือความถี่อาจถึง 150 รอบต่อวินาที และหลังจากนั้นก็เกิดการกระตุกหรือสะบัดซึ่งก็จะทำให้ภาพเสมือนเคลื่อนเข้าสู่ศูนย์กลางของโฟเวียอีกครั้ง ความคมชัดของสายตาจะดีขึ้น ถ้าการเคลื่อนตัวอย่างช้า ๆ นั้นลดน้อยลง และเมื่อเป้าหมายหรือวัตถุที่เพ่งมองสว่างวาบในช่วงสั้น ๆ ขณะตาเกิดการกระตุกหรือสะบัด จะมีผลทำให้สายตามีความคมชัดมากที่สุด

6. ความคลาดเคลื่อนจากการหักเหแสงของนัยน์ตา (Refractive Error)

การหักเหแสงของนัยน์ตาหมายถึง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อลำแสงมีการ

หักเหไปขณะที่ผ่านเข้าสู่สื่อของตา (Ocular Media) ก่อนที่จะไปโฟกัสที่จอตา ในขณะที่นัยน์ตาอยู่ในระยะพัก ซึ่งคำว่า นัยน์ตาอยู่ในระยะพัก หมายความว่าในขณะที่มองวัตถุอย่างหนึ่งที่อยู่ไกล (ปกติถือ 20 ฟุต หรือ 6 เมตร เป็นมาตรฐาน) ลำแสงขนานจากวัตถุนั้นผ่านเข้าสู่สื่อของตา และเกิดการรวมแสงเข้าสู่จอตาไปโฟกัสที่จุดเหลืองพอดี ทำให้เกิดภาพที่ชัดเจน ซึ่งในกรณีเช่นนี้เรียกว่า นัยน์ตานั้นมีการหักเหแสงปกติ หรือสายตาปกติ (Emmetropia) ถ้าเมื่อใดที่ลำแสงผ่าน Ocular Media และไม่โฟกัสที่จุดเหลืองพอดี ทำให้นัยน์ตาทำภาพไม่ชัดเจน เรียกว่ามี Refractive Error หรือสายตาผิดปกติ (Ametropia) ซึ่งจะมีผลทำให้ความคมชัดของสายตาลดลง และจะลดลงตาม Refractive Error ที่เพิ่มขึ้น นั่นก็คือมุมของสายตาจะเพิ่มขึ้นตาม Refractive Error นั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย