บทที่ 3

การรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์

เนื่องจากกลไกที่สร้างขึ้นจะนำไปใช้เป็นเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ซึ่งมีหน้าที่จำลองสภาวะที่เกิดขึ้นให้มนุษย์ได้รับรู้เสมือนอยู่ในสภาวะนั้น ดังนั้นจึงต้องศึกษาว่า มนุษย์สามารถรับรู้การเคลื่อนที่ ที่เกิดขึ้นได้อย่างไร เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนากลไกให้สอดคล้องกับระบบการรับรู้ของมนุษย์

ความสามารถในการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์หมายถึง ความสามารถของประสาทสัมผัสต่าง ๆในตัวมนุษย์ที่สามารถรับรู้แล้วบอกได้ว่าขณะนั้น ๆมนุษย์อยู่ในสภาวะใด ๆ สิ่งแวดล้อมแบบไหน ซึ่งระบบที่เกี่ยวข้องหลัก ๆจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนประมวลผลเรียกว่าระบบประสาท และส่วนรายงานผลเรียกว่าระบบการทรงตัว ซึ่งในส่วนนี้หลัก ๆจะมีอวัยวะที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนที่ซึ่งเปรียบเสมือนอุปกรณ์การตรวจรู้ ซึ่งอุปกรณ์การตรวจรู้จะส่งข้อมูลมาที่ระบบประสาทเพื่อให้สมองแปลความหมายของสัญญาณที่ได้รับ รายละเอียดของทั้งสองระบบเป็นดังนี้

3.1 ระบบประสาท [12]

ระบบประสาทเป็นระบบที่ควบคุมการทำหน้าที่ของอวัยวะต่าง ๆ ของทุกระบบในร่างกายให้ทำงานประสานกัน เพื่อให้ร่างกายสามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกร่างกาย และยังเป็นแหล่งสร้างความคิดความจำ ความรู้สึก สติปัญญา ความฉลาด ไหวพริบ ปฏิภาณ การตัดสินใจ การใช้เหตุผล โดยสามารถแบ่งลักษณะการทำงานออกได้เป็น 3 ส่วนคือ

3.1.1 ระบบประสาทส่วนกลาง (Central nervous system)

พิจารณาจากรูป 3.1 แสดงระบบประสาทส่วนกลาง ซึ่งประกอบไปด้วย สมอง (brain) ซึ่งอยู่ภายในโพรงกะโหลกศีรษะ และไขสันหลัง (spinal cord) โดยสมองจะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่ถูกส่งมาจากไขสันหลัง และยังควบคุมการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ โดยสามารถจำแนกลักษณะการทำงานของสมองในส่วนหลัก ๆได้เป็น 7 ส่วนดังนี้

1. Motor area ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อที่ละเอียดอ่อน เช่น การรับประทาน
2. Somesthetic sensory area แบ่งเป็น 2 ส่วน
    - primary area จะรับสัญญาณเกี่ยวกับความรู้สึก เช่น สัมผัส แรงกด อุณหภูมิ และความเจ็บปวด
    - secondary area จะแปลสัญญาณความรู้สึกที่ได้รับ

3. Visual area แบ่งเป็น 2 ส่วน

- primary vision area มีหน้าที่รับแสงหรือภาพที่สายตามองเห็น
- secondary vision area แปลความหมายของภาพที่ได้รับ

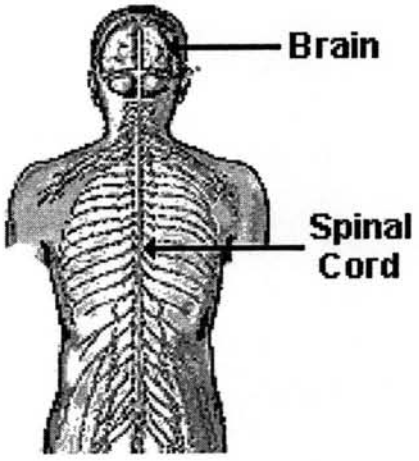
4. Auditory area แบ่งเป็น 2 ส่วน

- primary area รับรู้ความดัง และความถี่และคุณภาพของเสียง
- secondary area แปลความหมายของเสียงที่ได้ยิน

5. Wernicke's area ทำหน้าที่ในการแปลความจากการอ่าน การได้ยิน การรู้สึก ไปเป็นการรับรู้

6. Short-term memory area of the temporal lobe มีความสำคัญในการจำในระยะสั้น เช่น นาที , สัปดาห์

7. Prefrontal area มีความสำคัญต่อการพัฒนาความนึกคิด



รูปที่ 3.1 ระบบประสาทส่วนกลาง ที่มา: จาก [10]

3.1.2 ระบบประสาทส่วนปลาย (Peripheral nervous system)

ประกอบด้วยเส้นประสาทสมอง และเส้นประสาทไขสันหลัง โดยจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากอวัยวะต่างๆของร่างกาย เพื่อส่งต่อไปยังระบบประสาทส่วนกลาง

3.1.3 . ระบบประสาทอัตโนมัติ (Autonomic nervous system)

เป็นระบบประสาทที่ควบคุมการทำงานของอวัยวะภายในต่างๆ ซึ่ งการทำงานของระบบประสาทอัตโนมัติอยู่นอกเหนือการบังคับของสมอง เช่นการเต้นของหัวใจ เป็นต้น

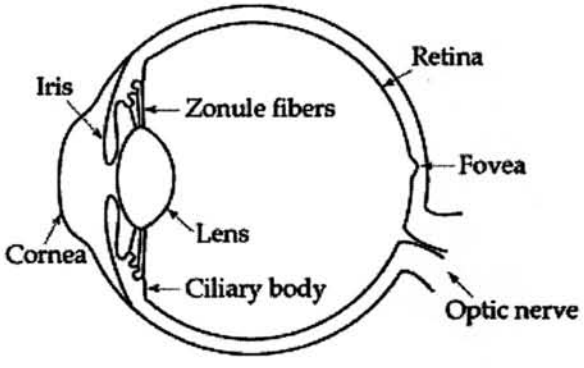
3.2 ระบบการทรงตัว (Equilibrium System) [12]

ระบบการทรงตัว คือระบบที่ทำให้มนุษย์รับรู้เกี่ยวกับความเสถียรภาพ สภาวะแวดล้อม และแรงที่เกิดขึ้นกับร่างกายในท่าทางต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น การจำลองการขับรถยนต์ สภาวะที่ผู้ควบคุมบังคับรถโดยเร่งความเร็วเพิ่มขึ้น ในขณะนั้นผู้ควบคุมสามารถรับรู้ถึงการสัมผัสและการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ (proprioception) โดยผู้ควบคุมรู้สึกถึงการผลักจากทางด้านหน้าทำให้บริเวณแผ่นหลังของผู้ควบคุมสัมผัสกับเบาะที่นั่งมากขึ้น และรับรู้ถึงความเร่งที่เกิดขึ้นได้เนื่องจากระบบของหูชั้นใน (vestibular) รวมถึงไปผู้ควบคุมสามารถมองเห็น (vision) สิ่งแวดล้อมภายนอกเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

ระบบการทรงตัวของร่างกายมนุษย์สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ระบบ ทำงานร่วมกัน คือ ระบบการมองเห็น (vision system) ระบบการรับความรู้สึกจากกล้ามเนื้อและข้อต่อ (proprioception system) และระบบรับรู้ความเร่ง (vestibular system) ทั้ง 3 ระบบจะทำหน้าที่ประสานงานกันเพื่อให้มนุษย์สามารถทรงตัวในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

3.2.1 ระบบการมองเห็น (Vision system) [13]

ระบบการมองเห็น ทำให้มนุษย์และสัตว์สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงรอบๆตัวจากการกระตุ้นผ่านทางระบบตา จึงถือได้ว่าการมองเห็นเป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับการดำรงชีวิต โดยเราสามารถมองเห็นภาพต่างๆ ได้เพราะแสงไปกระทบกับวัตถุแล้วสะท้อนเข้าสู่นัยน์ตาเรา ตาจะทำให้เราทราบถึง รูปร่างของวัตถุ สี และการเคลื่อนที่ของวัตถุ รูปร่างและส่วนประกอบของตาจะเป็นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของตา ที่มา: จาก [11]

ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการมองเห็นนั้นจะเป็นส่วนประกอบสำคัญในการที่สมองใช้อธิบายการเคลื่อนที่ ในกรณีที่สมองได้รับข้อมูลที่ขัดแย้งกันระหว่างระบบการมองเห็น

และระบบรับรู้ความเร่ง จะทำให้มนุษย์เกิดอาการผิดปกติ เช่น อาการเมารถ และทำให้เกิดการอาเจียน ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรระวังในการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ส่วนปรากฏการอื่นๆที่เกิดจากการมองเห็นที่ควรรู้จักจะมีอยู่ 2 ปรากฏการหลักๆคือ after-images และ critical fusion frequency

After-images คือปรากฏการที่เกิดจากการจ้องมองวัตถุที่ทั้งสีดำและสีขาว ส่วนที่สว่างในภาพจะทำให้เกิดการปรับตัวต่อแสงสว่างในจอตา และขณะที่จอตาบริเวณที่รับแสงน้อยกว่าจะมีความไวมากขึ้น ซึ่งถ้าเราเปลี่ยนการมองของสายตานั้นมาจ้องพื้นที่สีขาว เราจะยังคงเห็นภาพของวัตถุเดิมแต่ส่วนที่มีสีขาวจะเห็นเป็นสีดำ และส่วนที่มีสีดำเห็นกลายเป็นสีขาว

Critical fusion frequency เป็นปรากฏการที่เกิดจาก ความถี่ของการฉายแสงเข้ามาอย่างรวดเร็วเข้ามาที่ตาติดต่อกันจนกระทั่งทำให้รู้สึกเสมือนเห็นภาพเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง โดยในสถานที่มืด ค่า Critical fusion จะเกิดได้ในความถี่ต่ำกว่า 10 ครั้งต่อวินาที แต่ในที่มีแสงสว่างอาจต้องใช้ความถี่ถึง 60 ครั้งต่อวินาที [12] จึงเกิด fusion ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการฉายภาพยนตร์ ซึ่งเป็นสถานที่มืดนั้น ภาพจะถูกฉายเข้าสู่จอด้วยความเร็ว 24 ภาพต่อวินาที แต่ถ้าเป็นภาพทางโทรทัศน์จะถูกฉายเข้ามาด้วยความเร็ว 60 ภาพต่อวินาที ซึ่งจะทำให้มนุษย์สามารถเห็นภาพที่เข้ามาเป็นการเคลื่อนไหวที่ต่อเนื่อง

3.2.2 ระบบการรับความรู้สึกจากกล้ามเนื้อและข้อต่อ (Proprioception system)

การรับรู้ของระบบนี้ [12] ทำหน้าที่เหมือน ตัวตรวจจับอุณหภูมิ ตรวจจับความดัน และตัวตรวจจับขนาดแรง ในระบบควบคุมอัตโนมัติทางวิศวกรรม แบ่งเป็นสามส่วนตามส่วนรับรู้ของสมองคือ ส่วนรับรู้ความดันและการสั่น(discriminative touch), ส่วนรับรู้ความเจ็บปวดและอุณหภูมิ (pain and temperature) และส่วนรับรู้เกี่ยวกับกล้ามเนื้อ (proprioception)

3.2.2.1 ส่วนรับรู้ความรู้สึกประเภทการสัมผัส ความดัน และการสั่น เรียกว่า (discriminative touch) เป็นส่วนรับรู้ของมูลที่มีความถี่สูง

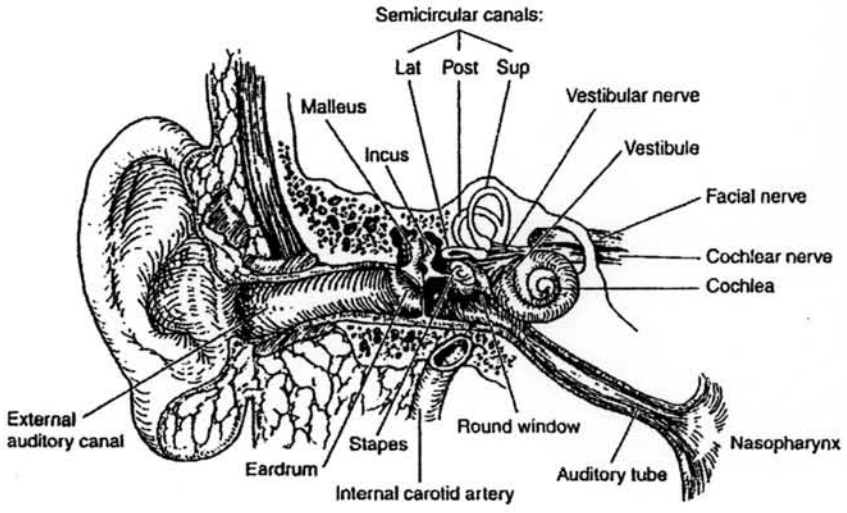
3.2.2.2 ส่วนรับรู้เกี่ยวกับความเจ็บปวด กับอุณหภูมิ (pain and temperature)

3.2.2.3 ส่วนรับรู้เกี่ยวกับกล้ามเนื้อ (proprioception) เช่น ตำแหน่งของข้อต่อทำหน้าที่เสมือนอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่ง และอุปกรณ์วัดแรงที่ร่างกายโดนกระทำ

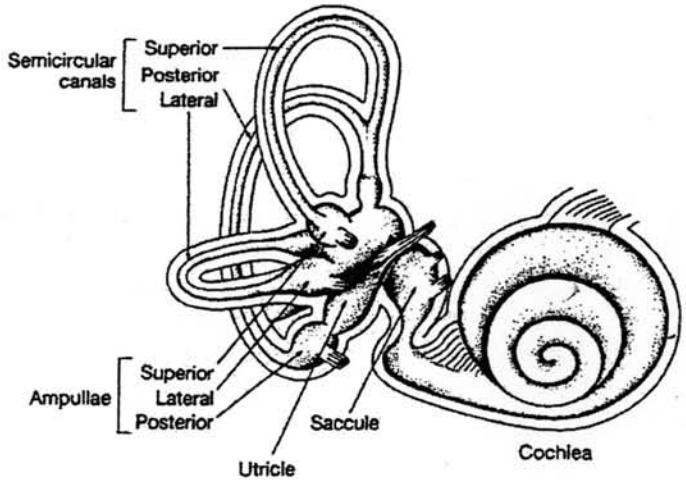
โดยหลักการแล้วเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ต้องสามารถจำลองแรงที่เกิดขึ้นให้เกิดความรู้สึกของแรงสลอดคล้องกับการสภาวะจริงของแรงที่จำลอง และต้องคำนึงถึงผลของแรงที่ไม่กระทำให้ร่างกายเกิดอันตราย

3.2.3 ระบบการรับรู้ความเร่ง (Vestibular system) [12]

การรับรู้ของระบบนี้คือ การรับรู้ความเร่ง ส่วนรับรู้ความเร่งของมนุษย์นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนรับรู้ความเร่งเชิงมุม (semicircular canal) และส่วนรับรู้ความเร่งเชิงเส้น (otolith organ) อวัยวะส่วนนี้จะอยู่ในบริเวณหูชั้นในทั้งสองข้าง โดย semicircular canal ประกอบไปด้วย superior canal, posterior canal และ lateral canal ทำหน้าที่วัดความเร่งเชิงมุมทั้ง 3 แนวแกน ส่วน otolith organ จะประกอบไปด้วย utricle และ saccule ทำหน้าที่วัดความเร่งเชิงเส้นทั้ง 3 แนวแกน พิจารณาโครงสร้างจากรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 สรีระกายวิภาคของหู ที่มา: จาก [12]



รูปที่ 3.4 Semicircular canal, utricle, saccule ที่มา: จาก [12]

3.2.3.1 หน้าที่ของ vestibular [12]

ระบบ vestibular มีความสำคัญในการทำให้เกิดการทรงตัวของร่างกายและการเคลื่อนไหวของตา ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาโต้ตอบที่ไม่เจตนาต่อสิ่งกระตุ้น (reflex) ออกได้เป็น 2 ชนิดคือ vestibule-ocular reflex และ vestibulospinal reflex

Vestibulo-ocular reflex เป็นการควบคุมการเคลื่อนไหวของตา โดยข้อมูลจาก semicircular canal แต่ละคู่จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมกล้ามเนื้อตาที่มีความสัมพันธ์กัน การเสียสมดุลนี้จะทำให้ลูกตามีการเคลื่อนไหวที่ผิดปกติ ซึ่งอาจเกิดร่วมกับอาการเห็นสิ่งแวดล้อมหมุน

Vestibulospinal reflex เป็น reflex ที่เกิดจากระบบ vestibular ส่งไปควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อบริเวณศีรษะ ลำตัว แขนขา เพื่อให้เกิดการทรงตัวและสมดุลของร่างกาย

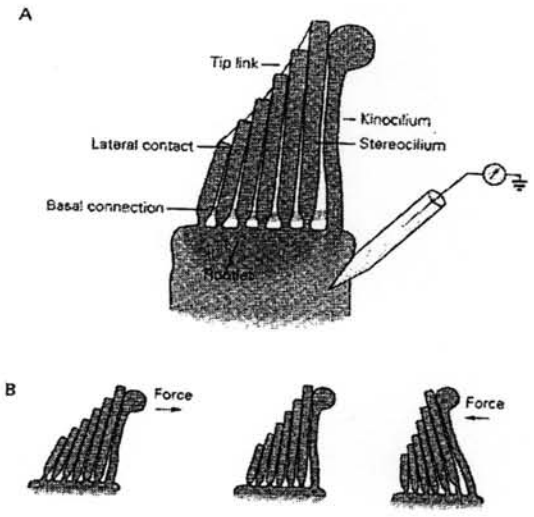
3.2.3.2 การทำงานของ vestibular [12]

การทำงานของ vestibular เป็นตัวตรวจรู้ทางธรรมชาติที่มีหลักการทำงานที่น่าสนใจ โดยเกิดจากการที่ เซลล์ขน (Hair cell) ซึ่งอยู่ที่ semicircular canals และ otolith organ เมื่อเซลล์ขนโดนกระตุ้น ตัวเซลล์ขนจะหลั่งสารสื่อสารประสาท เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการนำกระแสประสาท จากนั้นการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งต่อไปยังสมองเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของ เซลล์ขน แต่ละเซลล์ประกอบไปด้วย stereocilia โดยจะอยู่เรียงทับ kinocilium การทำงานจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ตัว stereocilia และ kinocilium เกิดการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่แต่ละครั้งจะทำให้เกิดการหลั่งสารสื่อสารประสาทที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับทิศทางและขนาดของแรงที่มากระทำ ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นออกได้เป็น 2 ประเภท

- ดีโพลาไรเซชั่น เกิดขึ้นเมื่อแรงที่กระทำทำให้ stereocilia เอียงไปทางด้าน kinocilium ในกรณีจะทำให้เกิดการเพิ่มอัตราการนำกระแสประสาท
- ไฮเปอร์โพลาไรเซชั่น เกิดขึ้นเมื่อมีแรงที่กระทำ ซึ่งส่งผลให้ stereocilia เอียงออกจาก kinocilium ทำให้อัตราการนำกระแสประสาทลดลง

การทำงานของเซลล์ขนที่อยู่ใน semicircular canal และ ใน otolith organ นั้นจะทำงานเหมือนกัน แต่การกระตุ้นเซลล์ขนที่อยู่ในทั้งสองส่วนนั้นจะเกิดจากหลักการที่ต่างกัน การกระตุ้นเซลล์ขนที่อยู่ใน semicircular จะเกิดจาก

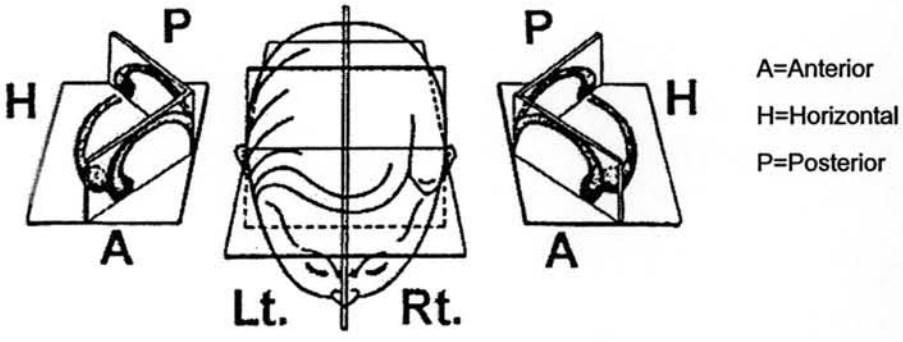
การเคลื่อนที่ของๆเหลวที่อยู่ในท่อของ semicircular canal แต่การกระตุ้นเซลล์ขนที่อยู่ใน otolith organ นั้นจะเกิดจากการเคลื่อนที่ของผลึกหินปูน ที่อยู่ใน otolith organ ซึ่งการทำงานของทั้งสองส่วนเป็นดังนี้



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของเซลล์ขน และการทำงาน ที่มา: จาก [12]

3.2.3.2.1 การทำงานของ Semicircular canal [13]

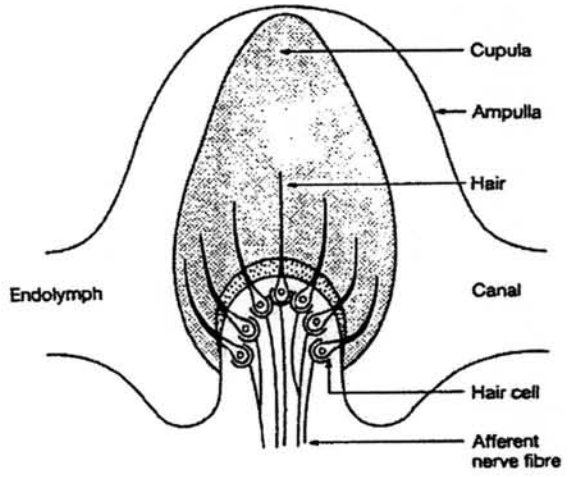
Semicircular canal มี 3 คู่ ได้แก่ lateral หรือ horizontal , anterior หรือ superior และ posterior หรือ inferior โดยทั้งสามจะทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยถ้ามนุษย์ก้มหน้าลง 30 องศา จะทำให้ Horizontal semicircular canal จะอยู่ขนานกับพื้นโลก และ anterior semicircular canal อยู่ในตำแหน่งทำมุม 45 องศา กับระนาบด้านหลังและด้านหน้า [13] ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระนาบของ Semicircular canal ที่มา: จาก [13]

การทำงานของ semicircular canal จะทำงานเป็นคู่ โดย lateral ข้างซ้ายทำงานคู่กับ lateral ทางด้านขวา , anterior ของหูข้างหนึ่งทำงานคู่กับ posterior ของหูอีกข้างหนึ่ง เนื่องจากมนุษย์เคลื่อนไหวในสามมิติ สมองจึงรับรู้การเคลื่อนไหวของศีรษะโดยการแปลผลรวมกระแสประสาทจาก semicircular canal ทั้งสามคู่พร้อมกัน

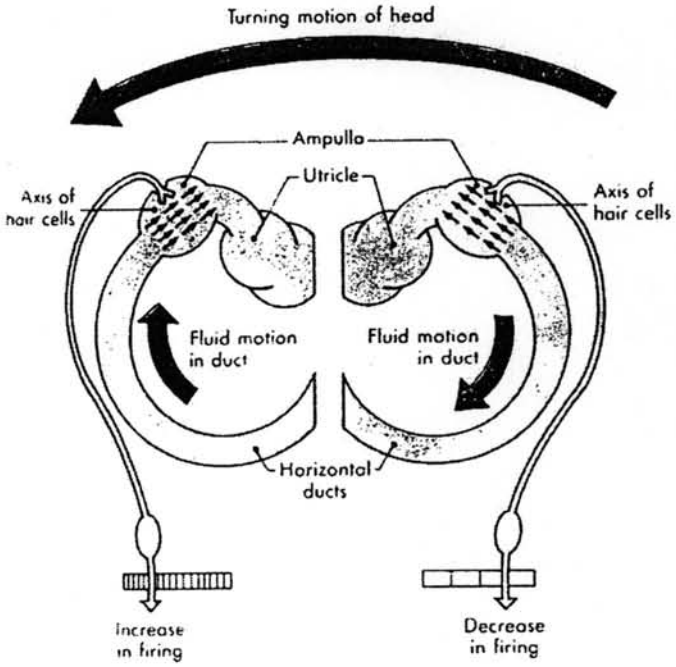
ภายในหูชั้นในจะบรรจุเต็มไปด้วยของเหลว (endolymph) และที่ด้านปลายสุดของแต่ละ semicircular canal จะมีตัวรับการกระตุ้น เรียกว่า crista ampullaris ดังรูปที่ 3.7 โดยภายในตัวรับนี้ประกอบด้วย cupula (หรือ cupola) ซึ่งลักษณะเป็น diaphragm ยื่นออกไปตามขวาง และตอบสนองต่อการไหลของ endolymph



รูปที่ 3.7 Crista ampullaris ที่มา: จาก [12]

ความถี่ของกระแสประสาทนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงได้โดยการงอขนของเซลล์ขน โดย semicircular canal จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของศีรษะเมื่อหมุนรอบตัว เรียกว่า ampulla acceleration โดย cupula ที่อยู่ในระนาบเดียวกันกับที่ศีรษะหมุนจะโบกตัวมากที่สุด และจะโบกไปมาเฉพาะเริ่มมีการหมุนและหยุดหมุนเท่านั้น เนื่องจากขณะเริ่มเคลื่อนที่ความหนืดของ endolymph จะทำให้ endolymph เคลื่อนที่ได้ช้ากว่า semicircular canal จึงทำให้ cupula เกิดการงอไปในทิศทางตรงกันข้ามกับที่ศีรษะเคลื่อนที่ไป และเมื่อหยุดหมุนแรง momentum จะผลัก endolymph ไปข้างหน้า และส่งผลให้ cupula งอไปในทิศทางที่ศีรษะหมุน แต่ถ้าศีรษะหมุน

ด้วยความเร็วคงที่ endolymph จะเคลื่อนไปด้วยความเร็วที่เท่ากัน semicircular canal ทำให้ cupula กลับคืนสู่ตำแหน่งเดิม ไม่เกิดการกระตุ้น



รูปที่ 3.8 ทิศทางการเคลื่อนที่ของ endolymph ที่มา: จาก [12]

พิจารณาจากรูปที่ 3.8 ขณะพัก hair cell ใน crista ampullaris ของหูชั้นในส่งกระแสประสาทด้วยความถี่ประมาณ 10-20 Hz [12] ทั้งสองข้าง เมื่อเริ่มต้นหมุนศีรษะไปทางซ้าย (ทวนเข็มนาฬิกา) กะโหลกศีรษะและ hair cell จะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน แต่ Endolymph จะเคลื่อนที่สวนทางกับศีรษะ เนื่องจากความเฉื่อยของตัวมันเอง ส่งผลให้ที่หูซ้ายนั้น endolymph ไหลจาก lateral semicircular canal เข้าสู่ utricle ทำให้ stereocilia เอนเข้าหา kinocilium เกิดกระบวนการ depolarization ขึ้น ความถี่ของกระแสประสาทในหูข้างซ้ายสูงขึ้น ในขณะที่ endolymph ในหูขวาไหลจาก utricle เข้าสู่ lateral semicircular canal ทำให้ stereocilia เบนออกจาก kinocilium เกิดกระบวนการ hyperpolarization ขึ้น และความถี่ของกระแสประสาทของหูข้างขวาลดลง ทำให้มนุษย์รับรู้ว่าศีรษะกำลังหมุนไปทางด้านซ้าย และถ้าหมุนศีรษะไปทางซ้ายต่อเนื่องจนมีความเร็วคงที่ endolymph ภายใน semicircular canal จะเริ่ม

เคลื่อนที่ไหลในทิศทางเดียวกันกับการหมุนของกะโหลกศีรษะ สมองจะแปลว่า หมุนไปทางซ้ายช้าลง จนกระทั่ง endolymph และกระโหลกศีรษะหมุนไปในทิศเดียวกัน และมีความเร็วที่เท่ากัน สมองจะแปลว่าหยุดหมุนทั้งๆที่ศีรษะกำลังหมุนอยู่ด้วยความเร็วคงที่ แต่เนื่องจากในขณะนั้นกระแสประสาทจากหูทั้งสองข้างเท่ากัน และเท่ากับขณะที่ยังไม่มีการหมุนศีรษะ

เมื่อหยุดหมุนเก้าอี้ กะโหลกศีรษะจะหยุดหมุนทันที แต่ endolymph ยังคงหมุนไปทางซ้ายด้วยแรงเฉื่อย ทำให้เกิดการกระตุ้นของหูทางด้านขวา และยับยั้งการทำงานของหูข้างซ้าย สมองจะแปลว่ากำลังหมุนไปทางขวา ซึ่งในความเป็นจริงศีรษะไม่ได้เคลื่อนที่

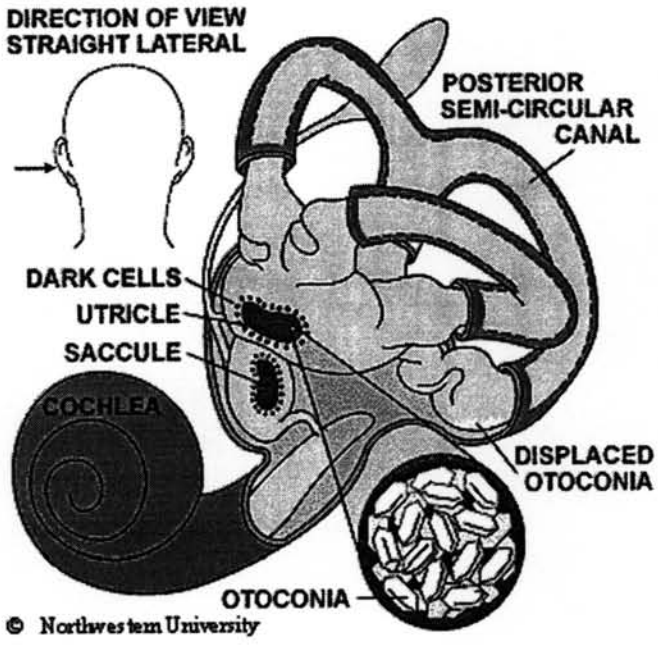
โดยค่าเฉลี่ยของการกระตุ้นน้อยที่สุดที่ทำให้มนุษย์สามารถรู้สึกถึงการกระตุ้นนั้นได้ (threshold) ของความเร็วเชิงมุมเท่ากับ 2 องศาต่อวินาที [14] และค่าเฉลี่ย threshold ของความเร่งเชิงมุมเท่ากับ 2 องศาต่อวินาทีกำลังสอง [15]

3.2.3.2.2 การทำงานของ otolith organ [12]

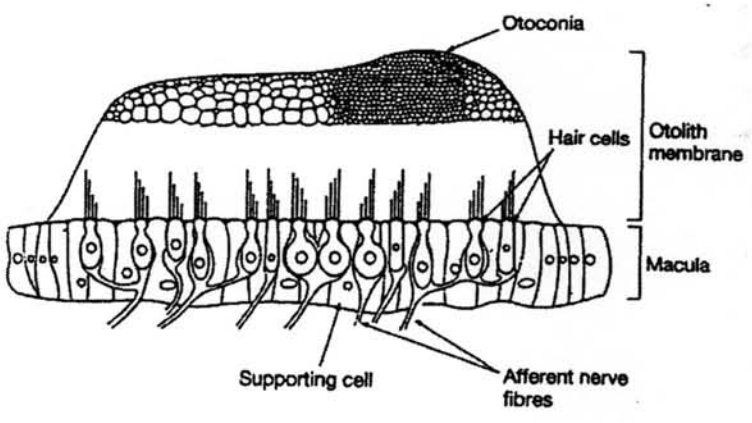
Otolith organ จะประกอบไปด้วย Utricle และ scacule โดยตำแหน่งการวางตัวของทั้งสองส่วนจะแตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.9 แต่ทั้งสองส่วนมีโครงสร้างที่เหมือนกันเรียกว่า macula ดังรูปที่ 3.10 โครงสร้างของ macula จะมีลักษณะเป็นก้อนหนา ประกอบด้วย hair cell ซึ่ง macula นี้ จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วของร่างกายในระนาบ (linear acceleration) อาจจะเคลื่อนไปข้างหน้า หรือหลัง เคลื่อนที่ขึ้นหรือลง เราสามารถจำลองการขับรถขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร่งได้ โดยการเอียงเบาะนั่งไปด้านหลังซึ่งจะทำให้เราสามารถรับรู้ความเร่งจาก utricle และจากแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นระหว่างแผ่นหลังกับเบาะนั่ง [16]

Hair cell จะถูกจัดเรียงตัวใน macula อย่างไม่มีระเบียบ macula ของ saccule นั้น kinocilia จะหันออกจากกันและกันในแต่ละด้าน ซึ่งต่างกับ macula ของ saccule จะหันเข้าหาไปสู่แนวโค้งตรงกลาง macula ที่เรียก steriola จากการเรียงตัวแบบนี้ การเคลื่อนที่ของ otolith ไปในทิศทางที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดกระแสประสาทแตกต่างกันไปในประสาทนำเข้า จากกระแสประสาทนี้จะส่งไปสมองหลายบริเวณ ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของตาให้สัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวของศีรษะ โดยค่าเฉลี่ย threshold (ค่าการกระตุ้นน้อย

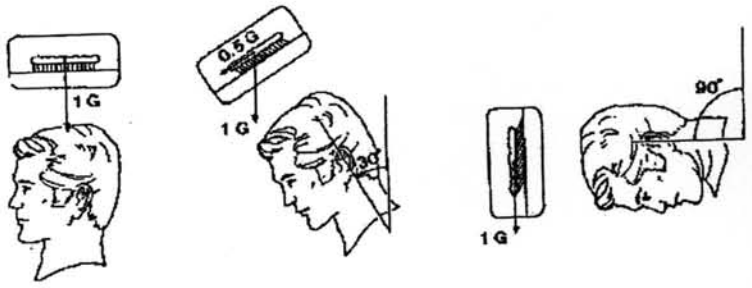
ที่สุดที่ทำให้มนุษย์สามารถรู้สึกถึงการกระตุ้นนั้นได้) ของความเร่งเชิงเส้นในแนวการเคลื่อนที่หน้า-หลัง เท่ากับ 8.5 เซนติเมตรต่อวินาทีกำลังสอง ในแนวการเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ 6.5 เซนติเมตรต่อวินาทีกำลังสอง [16] และค่าเฉลี่ย threshold ของความเร็วเชิงเส้นในแนวการเคลื่อนที่หน้า-หลัง เท่ากับ 13.5 เซนติเมตรต่อวินาที ในแนวการเคลื่อนที่ด้านข้างเท่ากับ 10.4 เซนติเมตรต่อวินาที [17]



รูปที่ 3.9 การวางตัวของ utricle และ saccule ที่มา: จาก [11]



รูปที่ 3.10 Macula ที่มา: จาก [12]



รูปที่ 3.11 การวัดความเร่งของ utricle otolith ที่มา: จาก [18]

พิจารณารูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลง utricle otolith เมื่อเอียงศรีษะ ไปประมาณ 30 องศาจากแนวระดับ และ 90 องศาจากแนวระดับ

3.2.3.3 การทดสอบขีดจำกัดของ vestibular (Motion threshold)

Motion threshold คือ ลักษณะการเคลื่อนไหวของร่างกายที่มนุษย์สามารถเริ่มรู้สึกได้ว่าตนเองกำลังเคลื่อนไหวเช่น ค่า threshold ของ Acceleration เท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง หมายความว่าเมื่อมนุษย์เคลื่อนที่ด้วยความเร่งเท่ากับ 0.1 เมตรต่อวินาทีกำลังสองนั้นมนุษย์จะเริ่มรู้สึกแล้วว่าตนเองกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่งอยู่ ในทางกลับกันถ้ามนุษย์ถูกกระตุ้นด้วยความเร่งที่น้อยกว่า 0.1 เมตรต่อวนาทีกำลังสองแล้วมนุษย์จะไม่รู้สึกว่าตนเองกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

จากงานวิจัยของ Zachrias [19] ได้มีศึกษาเกี่ยวกับ motion threshold สำหรับความเร่งเชิงมุม โดยใช้อุปกรณ์ในการทดสอบที่มีย่านการใช้งานที่มาก เช่น การกระตุ้นในลักษณะแบบคลื่น (stimuli waveform) วิธีทางกายภาพ (psychophysical) โดยมีผู้ทดสอบจำนวน 25 คน และวัดค่า threshold ของการหมุนรอบแกน z (yaw axis)

ต่อมา Clark และ Stewart [20] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความเร่งเชิงมุมโดยกระตุ้นเป็นแบบขั้น (step input stimuli) จากการใช้ผู้ทดสอบจำนวน 35 คน พบว่าค่าเฉลี่ยของ threshold ในแนว yaw เท่ากับ 0.41 องศาต่อวินาทีกำลังสอง จากนั้น Clark และ Stewart [21] ได้ศึกษาค่า threshold ของทั้งสามแนวแกนจากจำนวนผู้ทดสอบ 18 คน ได้ค่าเฉลี่ย threshold ในแนวแกน yaw (รอบแกน z) และแนวแกน roll (รอบแกน x) เท่ากับ 0.41 องศาต่อ

วินาทีกำลังสอง และ ในแนวแกน pitch (รอบแกน y) เท่ากับ 0.67 องศาต่อวินาทีกำลังสอง

โดย Zacharias [19] ได้รายงานว่า Mulder เป็นคนแรกในการพิสูจน์ "product of acceleration magnitude with detection or latency time" (Mulder product) ซึ่งสามารถประมาณเป็นค่าคงที่ได้ ดังนั้นจากค่า angular velocity threshold นั้น Zacharias [19] ได้อธิบายไว้ว่า Van Egmond สามารถพิสูจน์ได้ว่าค่า Mulder product นั้นได้มาจาก torsion-pendulum model ซึ่งได้ผลเท่ากับ 2 องศาต่อวินาที จากนั้น Meiry [22] ได้ทำการทดสอบแบบ step-response โดยวัดค่า latency time ของผู้ทดสอบในการเคลื่อนที่บน simulator ได้ค่า threshold ในแนว yaw เท่ากับ 2.6 องศาต่อวินาที และในแนว roll เท่ากับ 3 องศาต่อวินาที

Benson, et al.[23] ศึกษาการวัดค่า threshold ของการเคลื่อนที่เชิงมุมโดยใช้การทดสอบโดยการขับด้วยมอเตอร์ที่สามารถควบคุมแรงบิดได้ โดยให้ผู้ทดสอบนั่งตัวตรงกับเบาะนั่ง และหมุนรอบแนวแกนทั้งสาม แนว roll เท่ากับ 2 องศาต่อวินาที , pitch เท่ากับ 2 องศาต่อวินาที และ yaw เท่ากับ 1.6 องศาต่อวินาที

Benson, et al.[24] ได้ทำการทดสอบโดยการกระตุ้นในลักษณะ sine wave ด้วยความเร่ง ซึ่งการกระตุ้นนี้มีลักษณะคล้ายกับการทดสอบของ Benson, et al. [22] ซึ่งเป็นการหาค่า threshold ของการหมุน ได้ผลการทดสอบในแนวแกน x เท่ากับ 0.0625 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ในแนวแกน y เท่ากับ 0.0569 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ในแนวแกน z เท่ากับ 0.154 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

นอกจากนี้ปัญหาที่พบในการทดสอบ vestibular มีอยู่สองอย่างที่น่าสนใจคือ otolith organ ไม่สามารถที่จะแยกแยะระหว่างความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง หรือความเร่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปจะเรียกปัญหานี้ว่า Gravito-inertial force (GIF) และอีกอย่างคือ สรีระวิทยาในการรับรู้ของมนุษย์นั้นไม่สมบูรณ์ ยกตัวอย่างเช่น การรับรู้ในขณะที่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งในขณะนั้นมนุษย์จะไม่สามารถรู้ได้ว่าเกิดการเคลื่อนที่ เนื่องจาก semicircular canal จะไม่สามารถวัด ณ ขณะนั้นออกมาได้

จากข้อมูลที่กล่าวในข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทำไมเราจึงจำเป็นต้องศึกษา ความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์ ในปัจจุบันมีงานวิจัยหลายงานศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการตอบสนองของมนุษย์ทำให้ทราบว่า จะทำอย่างไรให้มนุษย์รู้สึกอย่างที่ต้องการให้รู้สึก ซึ่งข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากบทนี้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่