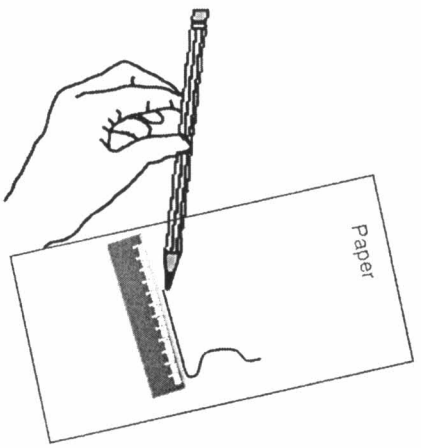
บทที่ 2

หุ่นยนต์โคบอทและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนะนำหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอท (Cobot : Collaborative Robot) คือหุ่นยนต์ชนิดใหม่ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัยโดยเฉพาะ หุ่นยนต์โคบอทมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ทางด้านหุ่นยนต์ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบแพสซีฟโดยกำเนิด (Intrinsically passive) นั่นก็คือหุ่นยนต์โคบอทจะไม่มีตัวขับดัน (Actuator) ที่สามารถสร้างแรงกระทำต่อผู้ใช้ได้โดยตรง แต่ทว่าหุ่นยนต์โคบอทจะใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง หรือซีวีที (CVT: Continuous Variable Transmission)ในการควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อของหุ่นยนต์โคบอท ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์โคบอทนั้นจะไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ด้วยตนเอง การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โคบอทจะต้องอาศัยแรงกระทำจากมนุษย์ โดยที่โคบอทช่วยกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่จากความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท

หุ่นยนต์โคบอททำงานในลักษณะที่ช่วยนำทางให้ผู้ใช้ไปยังเส้นทางที่กำหนด เปรียบเสมือนกับการใช้ไม้บรรทัดขีดเส้นตรงดังรูปที่ 2.1 ไม้บรรทัดนี้จะไม่สามารถบังคับมือเราได้ แต่จะเป็นเพียงอุปกรณ์ช่วยให้เราขีดเส้นตรงได้ ทำให้ได้ผลดีรวดเร็วและมีคุณภาพดีมากกว่าใช้มือเปล่า เมื่อนำหุ่นยนต์โคบอทมาใช้กับงานข้างต้น ก็จะทำให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่างเช่น งานประกอบรถยนต์ หุ่นยนต์โคบอท จะช่วยให้การประกอบแม่นยำขึ้น ใช้เวลาน้อยลง และของเสียลดลง

อุปกรณ์ทางด้านแฮปติกส์ (Haptic Interface) โดยทั่วไปสามารถสร้างสภาวะจำลองต่างๆ ได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม ยกตัวอย่างเช่น การสร้างกำแพงเสมือนให้เหมือนกำแพงจริง กำแพงจำลองต้องมีความแข็งมาก (high stiffness) ทำให้มอเตอร์ที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อที่จะขับแรงต้านได้เพียงพอและต้องใช้อัตราขยายในการควบคุมสูงทำให้เอื้อต่อการเกิดความไม่เสถียรขึ้น [5] ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการทำงานวิจัยด้านการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์จำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ

ในทางตรงกันข้าม ข้อแตกต่างของโคบอทกับอุปกรณ์แฮปติกส์ทั่วไปคือหุ่นยนต์โคบอทไม่ได้ใช้แรงตรง (Direct force) ขับต้านการเคลื่อนที่ของมนุษย์ แต่ใช้การเปลี่ยนทิศทางของแรงที่กระทำโดยมนุษย์ (redirect applied force) ในการทำงานที่เป็นระบบแพสซีฟนี้ทำให้ไม่เป็นอันตรายต่อตัวผู้ใช้ ทำให้มนุษย์สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์โคบอทได้อย่างปลอดภัย เช่น การใช้หุ่นยนต์ในการผ่าตัด หรือการใช้หุ่นยนต์ในการช่วยการประกอบรถยนต์

เหตุผลที่หุ่นยนต์โคบอทมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ทางด้านวิทยาการหุ่นยนต์ ที่มีพฤติกรรมเป็นแพสซีฟโดยกำเนิดเพราะว่าหุ่นยนต์โคบอทใช้อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง เป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ใช้อยู่ในหุ่นยนต์โคบอทจะมีหน้าที่ควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อต่างๆในหุ่นยนต์โคบอท หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เราสามารถควบคุมความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของตำแหน่งด้ามจับของหุ่นยนต์โคบอทและพื้น (Fixed ground) ในลักษณะต่างๆได้ด้วยเครือข่ายของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง

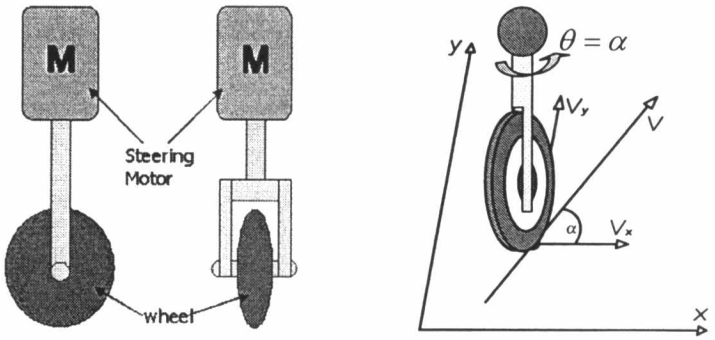
2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ใช้ในหุ่นยนต์โคบอท

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องคือ อุปกรณ์ส่งถ่ายกำลังชนิดหนึ่งที่สามารถที่จะปรับอัตราทดระหว่างอินพุต (input) และเอาท์พุต (output) ได้อย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่ใช้เป็นส่วนประกอบในโคบอทจะต้องเป็น อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่มีคุณสมบัติพิเศษ ก็คือจะต้องมีอัตราทดอยู่ในช่วง $-\infty$ ถึง ∞ ซึ่งในปัจจุบันจะมีอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง อยู่ 2 ชนิดที่มีลักษณะดังกล่าว และทั้ง 2 ชนิดก็ได้มีการนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักของหุ่นยนต์โคบอท โดยชนิดแรกคือ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้น และชนิดที่สองคือ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุม

2.2.1 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้น

อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นคือ อุปกรณ์ทีใช้ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงเส้นได้อย่างต่อเนื่อง "ล้อ (Wheel)" คือ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นที่มีมานานที่สุด และนอกจากนั้นล้อยังเป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องแบบกลไก

ที่มนุษย์มองข้ามมาช้านาน ล้อเป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องที่กำหนดอัตราทดระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x และในแนวแกน y โดยที่อัตราทดปรับได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞ อัตราทดของ V_y และ V_x เท่ากับ $\tan\alpha$



ก. ข.

รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงเส้นแบบล้อ ก. ลักษณะโครงสร้างของล้อที่เป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง, ข. แสดงหลักการทำงานของซีวีทีเชิงเส้น ซึ่งจะได้อัตราทดคือ $T = \frac{V_y}{V_x} = \tan\alpha$

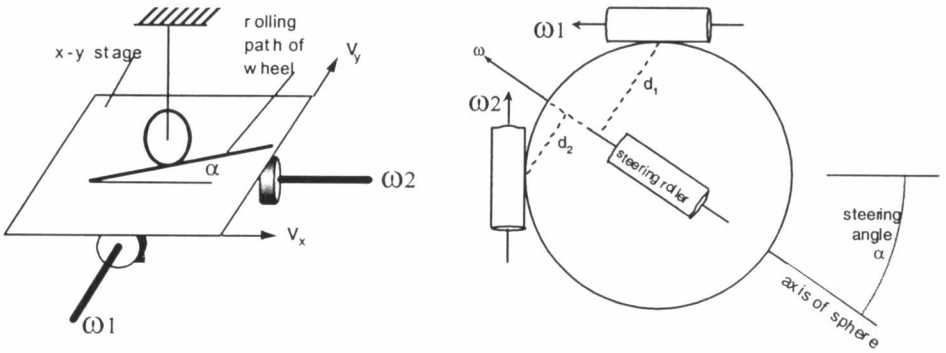
ล้อเป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง สามารถที่จะปรับอัตราทดได้โดยการปรับตำแหน่งทิศทางของล้อ เมื่อเรานำอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องชนิดนี้ไปใช้ในโคบอท จึงจะต้องมีมอเตอร์เพื่อที่จะต้องปรับทิศทางของล้อเสมอ และจะต้องทำให้แกนหมุนของล้อตั้งฉากกับพื้นเสมอ ตัวอย่างของโคบอทที่ใช้ล้อ เช่น Unicycle Cobot [4], Scooter [4] เป็นต้น

ล้อนั้นเป็นกลไกที่ง่ายต่อการใช้งานในปี 1995 Wannasuphoprasit [5] ได้นำเอาล้อไปใช้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์แฮปติกส์ที่ทำให้เป็นระบบแพสซิฟได้เป็นครั้งแรกและต่อมาได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นโคบอท

2.2.2 อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุม

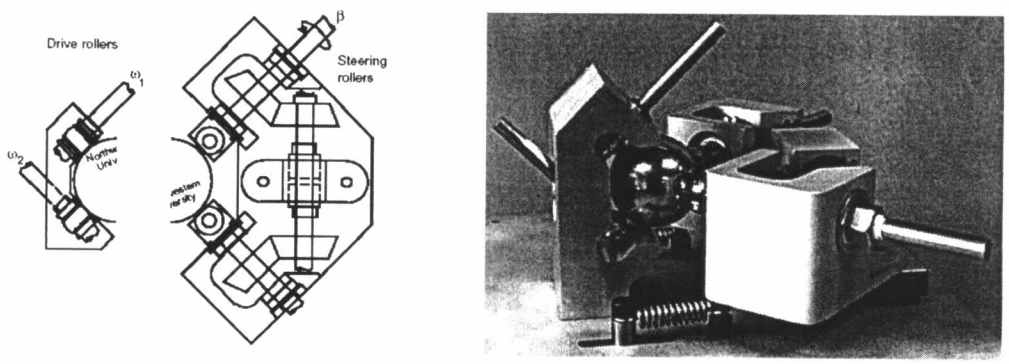
อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุมถูกออกแบบขึ้นโดย Moore [6] เกิดจากการนำอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องแบบล้อมาประยุกต์สร้างขึ้น เพื่อให้ได้ลักษณะอัตราทดที่มีลักษณะเชิงมุม พิจารณารูปที่ 2.3 (ซ้าย) ถ้าเรานำเอาล้อมาใช้เป็นอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ระหว่างแผ่นระนาบ x-y ความเร็วของแผ่นระนาบ V_y และ V_x จะถูกควบคุมเป็นอัตราส่วนด้วยมุม α (steering angle) ของล้อโดยที่ V_y / V_x = tan (α) ในขณะเดียวกันถ้าเราใช้กลไกที่เปลี่ยนความเร็วเชิงเส้น V_x และ V_y ให้เป็นความเร็วเชิงมุม ω_1 และ ω_2 ดังรูปที่ 2.3

(ซ้าย) เราจะได้ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ที่ปรับอัตราทดของความเร็วเชิงมุมได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞



รูปที่ 2.3 หลักการของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุม [7]

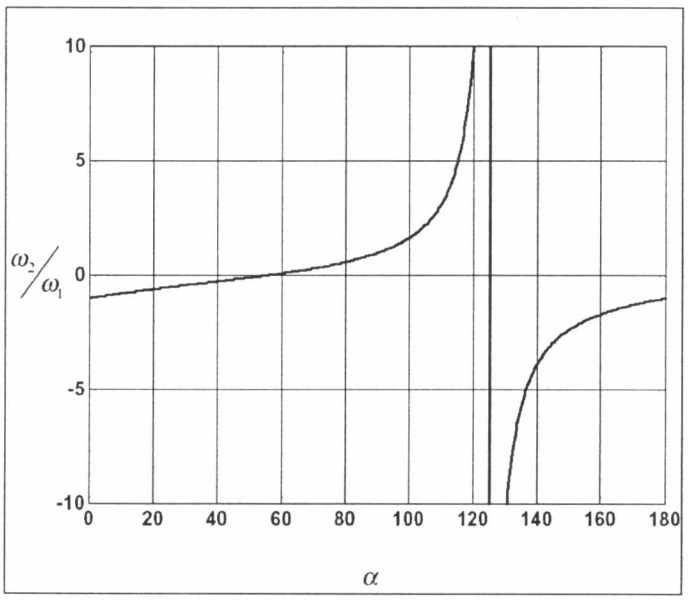
ถ้าเราม้วนแผ่นระนาบ x-y ให้เป็นทรงกลมจะได้ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง เป็นทรงกลม ดังที่แสดงในรูป 2.3 (ขวา) ทรงกลมจะหมุนรอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของตนเองและแกนหมุนของทรงกลมก็จะขนานกับ แกนของลูกกลิ้งชุดเลี้ยว (Steering rollers) ถ้าเราเปลี่ยนมุมเลี้ยว (Steering angle α) แกนของลูกกลิ้งชุดเลี้ยวก็จะเปลี่ยนไปตามมีผลทำให้ระยะ d_1 และ d_2 (ระยะระหว่างแกนหมุนของทรงกลมกับจุดสัมผัสของล้อขับ ω_1 และล้อขับ ω_2) เปลี่ยนไป และดังนั้นทำให้อัตราทดเปลี่ยนไปเช่นกัน โดยที่อัตราทด ω_1/ω_2 เท่ากับ d_1/d_2 เราเรียกอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเชิงมุมประเภทนี้ว่า ซีวีทีลูกทรงกลม (Spherical CVT) สิ่งที่สำคัญในการทำงานของซีวีทีลูกทรงกลมชนิดนี้คือจุดศูนย์กลางของทรงกลมต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง เสมอ. Moore [7] ได้ออกแบบซีวีทีลูกทรงกลมโดยใช้ ทรงกลมโลหะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 1.5 นิ้ว และลูกล้อเหล็ก 4 ตัว ในการควบคุมจุดศูนย์กลางของทรงกลมโลหะ (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ซีวีทีลูกทรงกลม ที่มา: จาก [7]

ซีวีทีลูกทรงกลมสามารถที่จะแสดงสมการของอัตราทดได้ดังในสมการ (2.1) ที่มา: [10] สมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ของอัตราทดที่เป็นฟังก์ชันของมุมเลี้ยวเมื่อนำสมการนี้ไปพล็อตจะได้ดังรูปที่ 2.5 โดยในรูปนี้จะเห็นการเปลี่ยนอัตราทดจากบวกไปเป็นศูนย์ไปเป็นลบ และยังได้เห็นลักษณะของอัตราทดที่เป็น $-\infty$ และ ∞ ซึ่งคุณสมบัติแบบนี้ของ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ทั้งสองแบบข้างต้นนี้ จะไม่สามารถที่จะหาได้ในชุดส่งกำลังแบบกลไกอื่นๆอีก

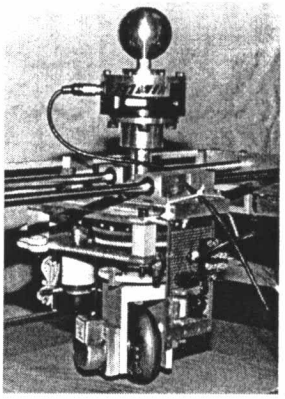
$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\sin\alpha - \sqrt{2}\cos\alpha}{\sin\alpha + \sqrt{2}\cos\alpha} \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราทดกับมุมเลี้ยว

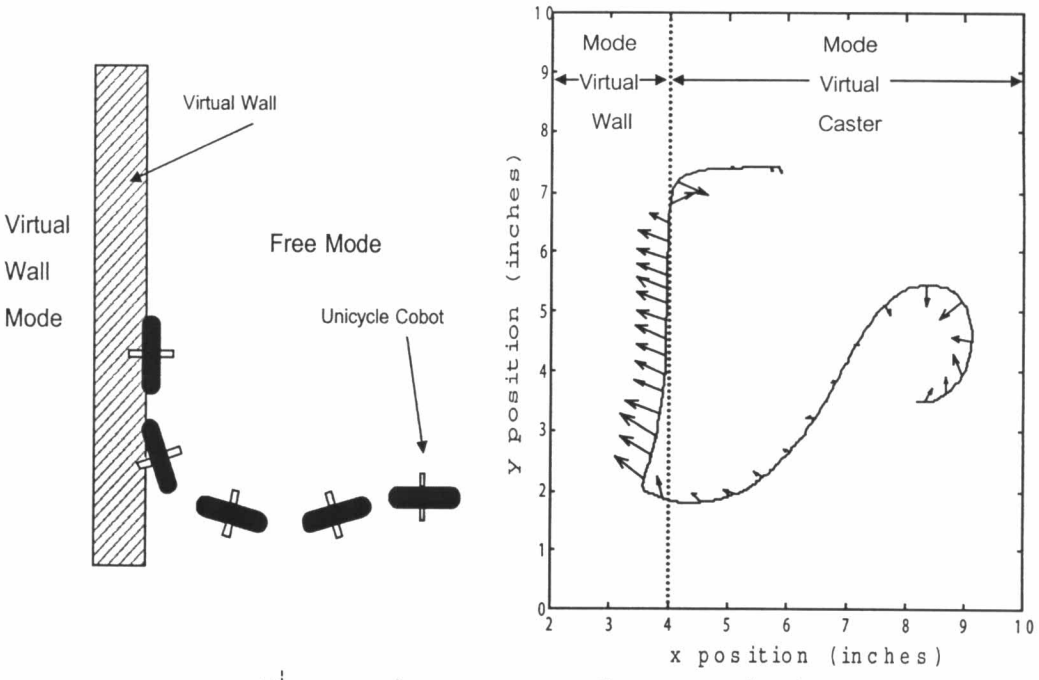
2.3 แบบวิธีการทำงานของหุ่นยนต์โคบอท

เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายเราจะขอยกตัวอย่างหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว (Unicycle Cobot) ซึ่งได้ถูกพัฒนาโดย Wannasuphoprasit และคณะ [5] มีลักษณะเป็นหุ่นยนต์ล้อเดียวเคลื่อนที่ในระนาบ XY แกนของล้อหุ่นยนต์โคบอทจะตั้งตรงอยู่ตลอดเวลามอเตอร์ของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวทำหน้าที่เพียงปรับเปลี่ยนทิศทางของล้อเท่านั้นไม่สามารถขับเคลื่อนได้หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว มีตัวรับรู้แรง (Force Sensor) ติดอยู่เพื่อวัดแรงกระทำของมนุษย์ ลักษณะของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวที่มา: จาก [4]

แบบวิธีการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทโดยทั่วไปจะมีแบบวิธีการทำงานที่คล้ายกัน ดังนั้นเราจะอธิบายแบบวิธีการทำงานด้วยตัวอย่างที่ได้อธิบายมาข้างต้น ซึ่งแบบวิธีการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทจะสามารถที่จะแบ่งได้ 2 ลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.7 การทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว [5]

2.3.1 **การทำงานแบบอิสระ** (Virtual Caster)

การทำงานในลักษณะนี้หุ่นยนต์โคบอทจะประพฤติตัวเหมือนกับล้อรถเข็น (Caster Wheel) ทั่วไป คือจะไม่บังคับเส้นทางการเดินของผู้ใช้ ผู้ใช้จึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ การทำงานในแบบนี้ทำได้โดยตัวหุ่นยนต์โคบอทจะวัดแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของล้อ จากนั้นก็จะพยายามทำให้แรงนั้นเป็นศูนย์ซึ่งทำได้โดยทำการหมุนแกนเพลาขับเพื่อเปลี่ยนทิศ

ของล้อให้เป็นไปตามทิศทางที่ผู้ใช้ออกแรงกระทำ ทำให้แรงที่ส่งกลับไปยังผู้ใช้เป็นศูนย์ ผู้ใช้จึงรู้สึกเหมือนเคลื่อนที่ได้อิสระ

2.3.2 **การทำงานแบบผนังเสมือน** (Virtual Wall)

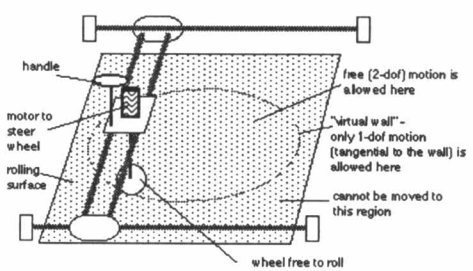
เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปชนกับกำแพงเสมือน หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวจะทำการเปลี่ยนทิศทางของแรงและทิศทางของการเคลื่อนที่ ให้ขนานกับกำแพงเสมือน โดยจะใช้วิธีการเปลี่ยนทิศทางของล้อให้สัมผัสกับกำแพงเสมือน ทำให้ผู้ใช้รู้สึกเหมือนกับไถลไปตามกำแพง เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่เข้าหากำแพงหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวจะต้านการเคลื่อนที่ไว้ แต่ถ้าผู้ใช้ต้องการเคลื่อนที่ออกจากกำแพงเสมือน (วัดได้จากแรงที่ตัวรับรู้แรง) หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวก็จะกลับไปทำงานในแบบอิสระ

ในรูปที่ 2.7 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวที่จำลองกำแพงเสมือนที่ตำแหน่ง x = 4 ในรูปยังได้แสดงทิศทางและขนาดของแรงกระทำของผู้ใช้ที่วัดได้จากตัวรับรู้แรงทั้ง 2 แบบวิธีการทำงาน

2.4 ตัวอย่างงานวิจัยโคบอท

2.4.1 หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียว (Unicycle Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวเป็นหุ่นยนต์โคบอทตัวแรกในโลกที่ถูกสร้างขึ้น ลักษณะและหลักการทำงานต่างๆเราได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น เนื่องจากหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวตัวนี้มีล้อเพียงล้อเดียวแสดงในรูปที่ 2.6 ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีรางเพื่อที่จะให้หุ่นยนต์โคบอทตัวนี้พยุงอยู่ได้ ทำให้หุ่นยนต์โคบอทตัวนี้สร้างขึ้นเพื่อที่จะอยู่ในห้องทดลองเท่านั้น ไม่สามารถที่นำไปใช้งานได้จริง

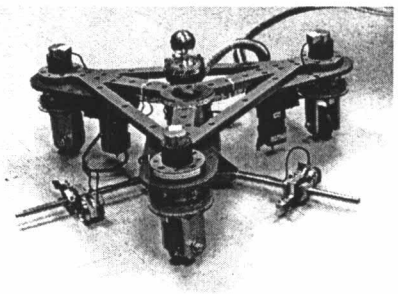


รูปที่ 2.8 การจำลองทำงานของหุ่นยนต์โคบอทแบบล้อเดียวเมื่อสร้างกำแพงเสมือนเป็นวงกลม [5]

2.4.2 หุ่นยนต์โคบอทสกูตเตอร์ (Scooter Cobot)

สกูตเตอร์เป็นหุ่นยนต์โคบอทที่สร้างขึ้นโดย Wannasuphoprasit และคณะ [4] สกูตเตอร์ได้ถูกออกแบบเพื่อที่จะนำไปใช้งานได้จริง จะมีล้อจำนวน 3 ล้อทำให้สกูตเตอร์สามารถที่ตั้งอยู่ได้ด้วยตัวมันเองโดยไม่จำเป็นต้องมีรางช่วยพยุงตัวมันไว้ (แสดงในรูปที่ 2.9) หุ่นยนต์โคบอทตัวนี้จะ

มีพื้นที่การทำงานใน 3 มิติ (x, y, θ) สกูตเตอร์ประกอบไปด้วยมอเตอร์ตัวเล็ก 3 ตัวมีหน้าที่ควบคุมทิศทางของล้อทั้งสามตัวรับรู้แรง 1 ตัวอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของสกูตเตอร์มีหน้าที่วัดแรงที่เกิดจากผู้ใช้



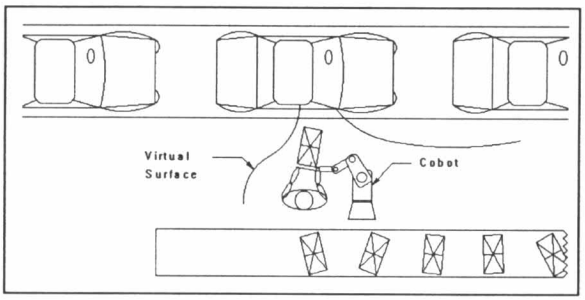
รูปที่ 2.9 สกูตเตอร์ที่มา: จาก [4]

แบบวิธีการทำงานของสกูตเตอร์จะมีสองแบบวิธีการทำงานทั้ง การทำงานแบบอิสระ (Virtual Caster) และการทำงานแบบกำแพงเสมือน (Virtual Wall)

การทำงานแบบอิสระของสกูตเตอร์ผู้ใช้จะสามารถที่เคลื่อนสกูตเตอร์ได้อย่างอิสระในพื้นที่การทำงาน (x, y, θ) มอเตอร์ทั้งสามตัวจะควบคุมทิศทางให้ล้อทั้งสามสัมพันธ์กับแรงของผู้ใช้ที่วัดได้จากด้ามจับของตัวรับรู้แรง

การทำงานแบบกำแพงเสมือนของสกูตเตอร์จะเกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่สกูตเตอร์ไปชนกับกำแพงเสมือนที่ได้โปรแกรมไว้สกูตเตอร์ก็จะเคลื่อนที่ขนานไปกับกำแพง ด้วยการปรับทิศทางของล้อทั้งสามให้สัมพันธ์กับกำแพงเสมือน

สกูตเตอร์ตัวนี้ได้มีการนำไปใช้งานแล้วในโรงงานประกอบรถยนต์ของ 'General Motor' โดยนำไปประกอบประตูเข้ากับตัวถังของรถยนต์ ซึ่งจะทำให้เกิดความสะดวกสบายในการทำงานเป็นอย่างมาก สำหรับความปลอดภัยในการทำงานสกูตเตอร์ก็ยังมีความปลอดภัยสูงเนื่องจากสกูตเตอร์เป็นอุปกรณ์วิทยาการโคบอทแบบแพสซิฟ



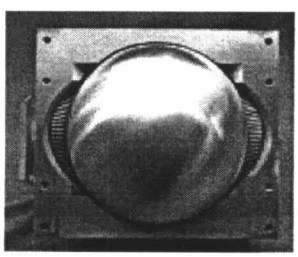
ก. การทำงานร่วมกันของมนุษย์กับ สกูตเตอร์

ข. การประกอบประตูรถยนต์โดยใช้สกูตเตอร์

รูปที่ 2.10 การนำสกูตเตอร์ไปใช้งาน (Courtesy of General Motors Corporation) ที่มา: จาก [6]

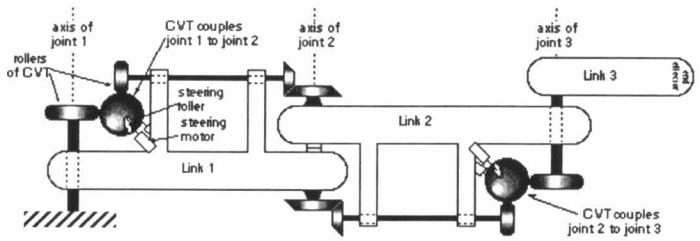
2.4.3 หุ่นยนต์สามอาร์โคบอท (3R Cobot)

หุ่นยนต์สามอาร์โคบอท (3R Cobot) เป็นหุ่นยนต์โคบอทที่ออกแบบโดย Moore และคณะ [9] จะมีลักษณะเป็นแขนแบบขนาน (parallelogram arm) มีพื้นที่ทำงานจำนวน 3 มิติ (x, y, z) และมีก้านต่อจำนวน 4 ก้านต่อกันในลักษณะขนาน เพื่อให้สะดวกต่อการถ่วงดุล (counter-balanced) สำหรับความโน้มถ่วง ซีวีทีที่ใช้จะเป็นซีวีทีเชิงมุม ซึ่งแสดงในรูป 2.11 ในรูปนี้ได้แสดงลักษณะของ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง เพียงบางส่วนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์สามอาร์โคบอท ได้ติดตั้งตัวรับรู้แรงไว้ด้วย



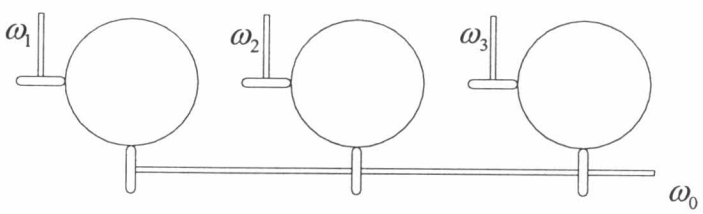
รูปที่ 2.11 ซีวีทีทรงกลมที่ออกแบบไว้สำหรับหุ่นยนต์สามอาร์โคบอท ที่มา: จาก [9]

จากลักษณะการประยุกต์ติดตั้งซีวีทีลูกทรงกลมไว้กับแขนกลเราสามารถที่จะยกตัวอย่างการติดตั้งซีวีทีลูกทรงกลมไว้กับข้อต่อในแขนกลได้ดังในรูปที่ 2.12 โดยลักษณะของการติดตั้งแบบนี้ทำให้เกิดการสร้างความสัมพันธ์ของปลายแขนกลกับที่ฐาน (fixed ground) ซึ่งความสัมพันธ์จะถูกควบคุมด้วยซีวีทีลูกทรงกลมจำนวน 2 ตัว จากลักษณะของกลไกแบบนี้ทำให้โคบอทที่แสดงในรูปที่ 2.12 จะมีลักษณะเป็นแพสซีฟ



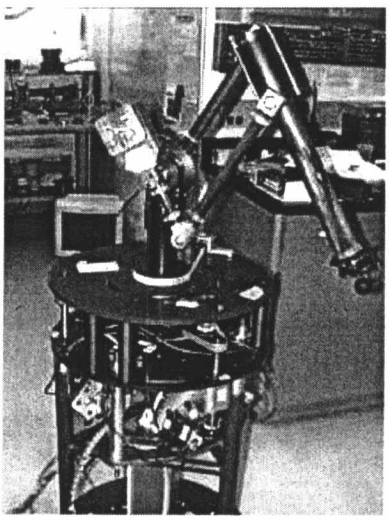
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างลักษณะของการติดตั้งซีวีทีทรงกลมไว้กับข้อต่อต่างๆของแขนกล ที่มา: จาก [6]

หุ่นยนต์โคบอทแบบเพิ่มกำลัง (Powered Cobot) หรือก็คือหุ่นยนต์โคบอทที่มีลักษณะเป็นแบบ แอ็คทีฟ ซึ่งหุ่นยนต์โคบอทกำลังจะมีลักษณะที่ต่างจากหุ่นยนต์ทั่วไปก็คือหุ่นยนต์โคบอทกำลังไม่จำเป็นที่จะต้องมีตัวขับดันทุกข้อต่อเหมือนหุ่นยนต์ทั่วไป โดยโคบอทกำลังสามารถที่จะมีแค่ตัวขับดันเพียงตัวเดียวก็เพียงพอที่จะทำให้แต่ละข้อต่อมีกำลังงานด้วยวิธีการต่อตัวขับดันตัวหนึ่งเข้ากับเครือข่ายของ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง เพื่อให้กำลังงานผ่านไปยังแต่ละข้อต่อ ซึ่งวิธีการในลักษณะนี้สามารถที่จะมีจำนวนข้อต่อเท่าไรก็ได้ตามแต่กำลังงานของตัวขับดันจะมีได้ลักษณะที่แตกต่างอีกอย่างของหุ่นยนต์โคบอทกำลังกับหุ่นยนต์ทั่วไปก็คือวิธีในการควบคุม หุ่นยนต์จะควบคุมไปที่ตัวขับดันของแต่ละข้อต่อโดยตรง แต่โคบอทกำลังจะบังคับแขนกลด้วยการควบคุม อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องเพื่อปรับความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อแทน



รูปที่ 2.13 การต่อเครือข่ายของอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่องแบบขนาน ที่มา: จาก [6]

หุ่นยนต์สามอาร์โคบอทที่เราได้กล่าวถึงในหัวข้อนี้จะมีลักษณะที่เป็นโคบอทกำลัง ที่มีลักษณะของการต่อเครือข่ายของซีวีทีเชิงมุมแบบขนาน ดังแสดงในรูป 2.13 โดยที่สามารถที่จะส่งกำลังงานทาง ω_0 ผ่านไปยัง อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ประจำแต่ละข้อต่อ $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ ลักษณะของหุ่นยนต์สามอาร์โคบอทสามารถที่จะแสดงได้ในรูปที่ 2.14



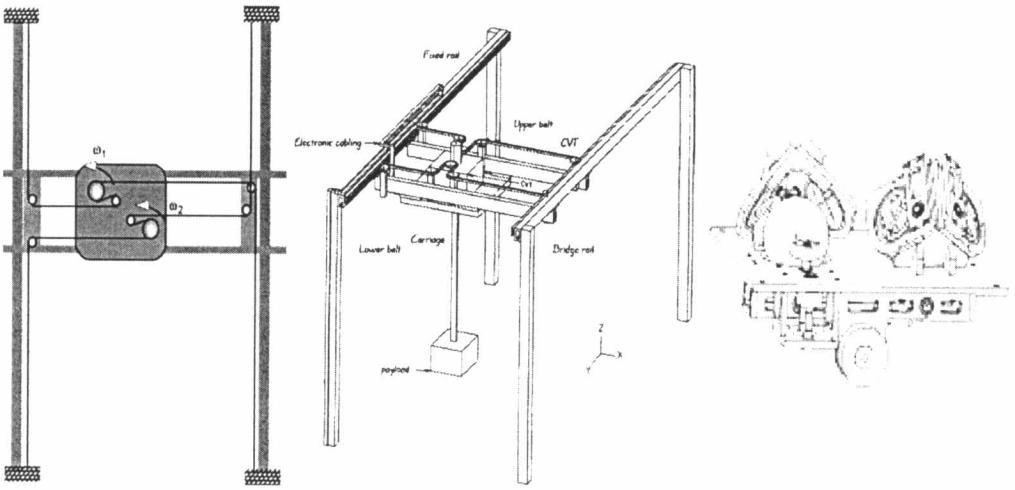
รูปที่ 2.14 หุ่นยนต์สามอาร์โคบอท ที่มา: จาก [9]

2.4.4 หุ่นยนต์โคบอทแบบราง (Rail Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทตัวนี้เป็นหุ่นยนต์โคบอทอีกตัวหนึ่งที่ได้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งหุ่นยนต์โคบอทแบบรางที่แสดงในรูป 2.15 ได้ติดตั้งอยู่ที่ Ford Motor Company's Advanced Manufacturing Technology Division สำหรับพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์โคบอทตัวนี้จะมีลักษณะอยู่ในระนาบและมี 2 มิติ คล้ายกับหุ่นยนต์โคบอทล้อเดียว

ซีวีทีที่ใช้ในหุ่นยนต์โคบอทแบบรางนั้นจะเป็นแบบซีวีทีเชิงมุม 2 ตัวต่อในลักษณะขนานกัน และมีการเพิ่มกำลังเข้าไปในระบบด้วย ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทแบบรางตัวนี้จึงเป็นหุ่นยนต์โคบอทกำลัง การควบคุมหุ่นยนต์โคบอทแบบรางตัวนี้ก็เช่นเดียวกับหุ่นยนต์โคบอทตัวอื่นที่ใช้วิธีการควบคุมอัตราทดของ อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนอัตราทดแบบต่อเนื่อง ด้วยการควบคุมของคอมพิวเตอร์และแรงของผู้ใช้ที่วัดได้จากตัวรับรู้แรงที่ติดตั้งเอาไว้ ดังนั้นหุ่นยนต์โคบอทตัวนี้ จึงมีลักษณะที่ช่วยผ่อนแรงแก่ผู้ใช้ และยังสามารถที่จะสร้างกำแพงเสมือน เพื่อเป็นสิ่งนำทางให้แก่ผู้ใช้ได้อีกด้วย

มอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวขับดันในหุ่นยนต์โคบอทแบบรางนั้นเราใช้เพียงเพื่อที่จะเอาชนะแรงเสียดทานตามธรรมชาติที่เกิดในสายพานและระบบราวเท่านั้น ดังนั้นมอเตอร์ที่ใช้จึงใช้เพียงแค่ 200 วัตต์ ก็สามารถที่จะยกของมวลน้ำหนัก 150 กก. เริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งจนมีความเร็ว 2 m/s โดยไม่จำเป็นที่มนุษย์ต้องออกแรงมาก การเปลี่ยนทิศทางมวลแบบ 90 องศา รัศมี 30 ซม. ด้วยความเร็ว 2 m/s ก็สามารถที่จะทำได้โดยง่าย ด้วยวิธีการสร้างกำแพงเสมือนของหุ่นยนต์โคบอท เมื่อเรานำไปเปรียบเทียบกับวิธีการเดิมที่ใช้กำลังงาน จากมอเตอร์ทั้งหมด ซึ่งจะต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังงานประมาณ 4,000 วัตต์ จะเห็นความได้ว่าหุ่นยนต์โคบอทแบบรางนั้นสามารถที่จะทำให้เกิดการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมากเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับราวแบบเก่า



ก. ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์โคบอทแบบราง

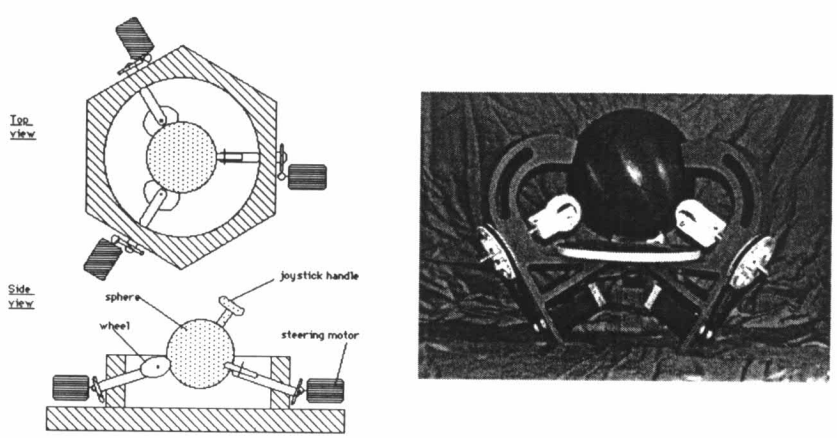
ข. ภาพด้านบนของหุ่นยนต์โคบอทแบบราง

ค. ชุดซีวีทีที่ใช้ในหุ่นยนต์โคบอทแบบราง

รูปที่ 2.15 หุ่นยนต์โคบอทแบบราง ที่มา: จาก [9]

2.4.5 **หุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุม** (Joystick Cobot)

หุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุมเป็นการนำหลักการของหุ่นยนต์โคบอทไปประยุกต์ใช้งานอีกลักษณะหนึ่ง ซึ่งหุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุมนี้จะใช้ซีวีทีล้อมาใช้ เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกทรงกลมที่กำหนดให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกทรงกลมอยู่กับที่ ทำให้เราสามารถที่จะควบคุมการหมุนรอบแกนทั้งสามของลูกทรงกลมได้ด้วยการควบคุมทิศทางของล้อเท่านั้นหุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุมชุดนี้จะมีพื้นที่ทำงานจำนวน 3 มิติ มีแบบวิธีการทำงาน 2 แบบคือการทำงานแบบการทำงานแบบอิสระและการทำงานแบบกำแพงเสมือนเช่นเดียวกับหุ่นยนต์โคบอทอื่นๆ ลักษณะของหุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุมสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 หุ่นยนต์โคบอทก้านควบคุม ที่มา: จาก [9]