บทที่ 3
หลักการออกแบบ

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบหุ่นยนต์กระเป๋าลากเลื่อนในการปฏิสังสรรค์กับมนุษย์เมื่ออยู่ในโหมดอัตโนมัติ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้และเป็นการบริหารพื้นที่ทำงาน (working space) โดยพิจารณาตำแหน่งสิ่งของต่าง ๆ ได้แล้ว พิจารณาความเร็วในการเคลื่อนที่ของมนุษย์ที่อยู่รอบข้างด้วย อีกทั้งให้ระดับความสำคัญของการติดตามและหลบหลีกมนุษย์มากกว่าสิ่งกีดขวางทั่วไป โดยอาศัยแผนภาพ (diagram) เพื่ออธิบายทุกสถานการณ์การเคลื่อนที่ ซึ่งไม่เพียงสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปสู่เป้าหมายได้ โดยคำนึงถึงการใช้พื้นที่เป็นสำคัญและอาศัยการทบทวนวรรณกรรมที่ได้กล่าวในบทที่แล้วเป็นแนวทางในการดำเนินการพิจารณาดังมีรายละเอียดดังนี้

3.1 พื้นที่ทำงาน

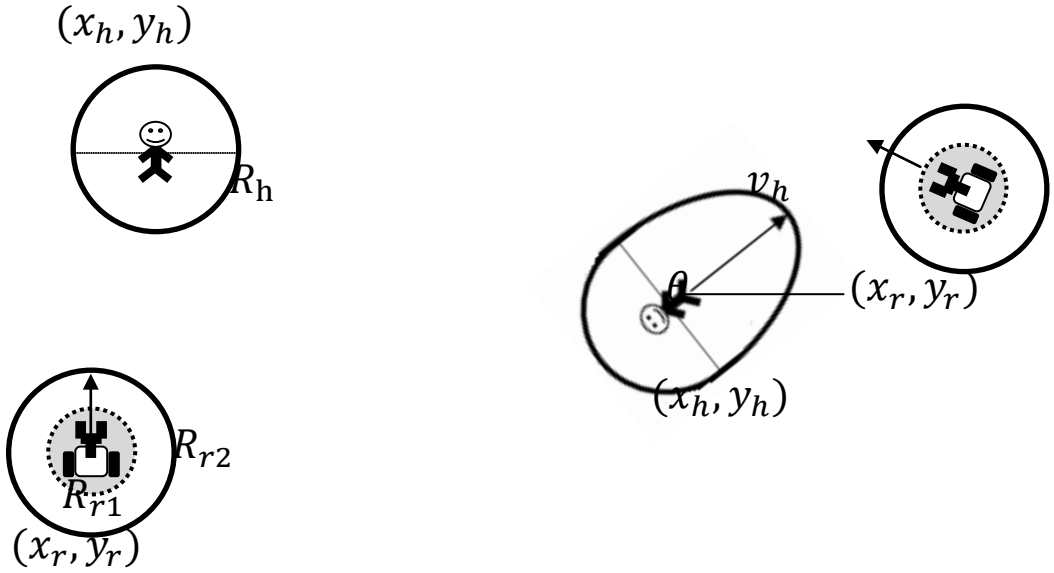
ในการออกแบบการนำทางของหุ่นยนต์ในบริเวณที่มีมนุษย์อยู่ด้วยนั้น การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นอกจากจะสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวาง(ทั้งมนุษย์และสิ่งของ) ได้แล้ว การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ยังต้องสนใจทั้งตำแหน่ง ลักษณะท่าทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ของมนุษย์อีกด้วย เพราะข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้มนุษย์เกิดความรู้สึกปลอดภัย ในการออกแบบหุ่นยนต์กระเป๋าลากเลื่อนจะอาศัยการประยุกต์ [36-44] เพื่อออกแบบพื้นที่อ่อนไหว (sensitive space)ในกรณีที่มนุษย์และหุ่นยนต์ต้องอยู่ร่วมกัน

3.1.1 พื้นที่อ่อนไหวต่อมนุษย์

เมื่อหุ่นยนต์เข้ามาใกล้ มนุษย์จะรู้สึกไม่ปลอดภัยเสมือนมีคนแปลกหน้าอยู่ใกล้ ๆ ดังนั้นจึงกำหนดพื้นที่ส่วนตัวของมนุษย์ ซึ่งหมายความว่ามนุษย์จะยังมีความรู้สึกปลอดภัยตราบที่ยังไม่มีหุ่นยนต์เข้ามาภายในพื้นที่ โดยลักษณะของการกำหนดพื้นที่นี้จะเป็นรูปวงกลมเมื่อมนุษย์ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยมีมนุษย์เป็นจุดศูนย์กลางวงกลมและมีรัศมีของวงกลมขึ้นกับลักษณะท่าทางหรือลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ที่ต้องการความปลอดภัย เช่นท่าทางการนั่งอาจต้องมีค่ารัศมีมากกว่าท่าทางการยืน ผู้สูงอายุหรือเด็กอาจมีค่ารัศมีมากกว่าคนหนุ่มสาว หรือผู้หญิงอาจมีค่ารัศมีมากกว่าผู้ชาย แสดงดังภาพรูปที่ 3.1(ก) นอกจากนี้ สำหรับมนุษย์เมื่อมีการเคลื่อนที่จะมีลักษณะดังรูป 1(ข) นั่นคือบริเวณด้านหลังของการเคลื่อนที่จะเป็นลักษณะครึ่งวงกลมและบริเวณด้านหน้าจะเป็นลักษณะครึ่งวงรี โดยความยาวแกนโทเป็นค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพ ส่วนความยาวแกนเอกเป็นสัดส่วนกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของมนุษย์

3.1.2 พื้นที่อ่อนไหวต่อหุ่นยนต์

เราสามารถออกแบบพื้นที่อ่อนไหวต่อหุ่นยนต์ดังนี้ เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ ดังภาพที่ 3.1 นั่นคือไม่ว่าหุ่นยนต์อยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ก็จะมีลักษณะของพื้นที่คล้ายโดนัทนั่นคือประกอบด้วยวงกลม 2 ชั้น โดยวงกลมชั้นในคือพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ขณะปัจจุบัน และวงกลมชั้นนอกคือพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ในอนาคตที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปในช่วงเวลาสั้น ๆ



(a) เมื่อมนุษย์อยู่กับที่ (b) เมื่อมนุษย์เคลื่อนที่

ภาพที่ 3.1 พื้นที่อ่อนไหวของมนุษย์และหุ่นยนต์

3.1.3 เงื่อนไขสำหรับพื้นที่อ่อนไหว

พิจารณาภาพที่ 3.1(ก) กรณีที่มนุษย์อยู่กับที่ ณ ตำแหน่ง (x_h, y_h) มีค่ารัศมีของวงพื้นที่อ่อนไหวเท่ากับ R_h และหุ่นยนต์เคลื่อนที่อยู่ ณ ตำแหน่ง (x_r, y_r) โดยมีค่ารัศมีของพื้นที่อ่อนไหวของหุ่นยนต์แสดงเป็นวงกลมชั้นในและวงกลมชั้นนอก R_{r1} และ R_{r2} ตามลำดับ ดังนั้นเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ทำให้มนุษย์รู้สึกปลอดภัยคือต้องไม่มีส่วนใดของพื้นที่อ่อนไหวของทั้งมนาย์และหุ่นยนต์ ซ้อนทับกัน แสดงเงื่อนไขดังสมการที่ (1)

$$\sqrt{(x_{r_i} - x_{h_i})^2 + (y_{r_i} - y_{h_i})^2} > R_h + R_{r2} \quad (1)$$

พิจารณาภาพ 3.1(ข) กรณีที่มนุษย์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_h ในทิศทางทำมุม θ กับแกน$+x$ โดยมีลักษณะพื้นที่อ่อนไหวของมนุษย์เป็นรูปครึ่งวงกลมรัศมี R_h ในทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่(ด้านหลังมนุษย์) และเป็นครึ่งวงรีในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่(ด้านหน้าของมนุษย์) โดยในงานวิจัยของ Lam และคณะ [42] ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวแกนเอก a_i และความยาวแกนโท b_i เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งในงานวิจัยชงโคโกอินเตอร์นี้มองว่าความปลอดภัยภายในพื้นที่ใช้งานเป็นสิ่งที่สำคัญและต้องให้ความสำคัญมาก โดยเฉพาะเมื่อมนุษย์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากขึ้นในที่ชุมชน ความปลอดภัยควรที่จะมีมากขึ้นกว่าปกติอย่างมาก กระเป๋าหุ่นยนต์ไม่ควรวิ่งชนมนุษย์ ดังนั้นควรจะเป็นลักษณะของฟังก์ชันเพิ่มในรูปของสมการเอ็กโพเนนเชียล ดังสมการ (2)

$$a_i = b_i + \alpha v_{h_i}^2 \tag{2}$$

เมื่อ α คือค่าคงที่, v_{h_i} คือความเร็วของมนุษย์ ณ คาบการสุ่มที่ i และเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต้องไม่มีส่วนใดของพื้นที่อ่อนไหวของทั้งสองวงซ้อนทับกัน แสดงดังสมการที่ (3)

$$\frac{\left(x_{r_i}.cos\theta_i + y_{r_i}.sin\theta_i - x_{h_i}\right)^2}{a^2} + \frac{\left(-x_{r_i}.sin\theta_i + y_{r_i}.cos\theta_i - y_{h_i}\right)^2}{b^2} > 1$$

$$A\left(x_{r_i} - x_{h_i}\right)^2 + B\left(y_{r_i} - y_{h_i}\right)^2 + C\left(x_{r_i} - x_{h_i}\right)\left(y_{r_i} - y_{h_i}\right) > 1 \tag{3}$$

เมื่อ $A = \frac{cos^2\theta_i}{a^2} + \frac{sin^2\theta_i}{b^2}$, $B = \frac{sin^2\theta_i}{a^2} + \frac{cos^2\theta_i}{b^2}$ และ $C = \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2}\right) sin2\theta_i$ จากสมการที่ (3) เมื่อมนุษย์อยู่กับที่ จะทำให้สมการที่ 3 กลายเป็น $a_i = b_i = R_h$ นั่นคือ พื้นที่อ่อนไหวเป็นลักษณะของวงกลม

3.2 ดัชนีชี้วัดและฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางทั้งที่เป็นสิ่งของและมนุษย์ได้นั้น เงื่อนไขในการเคลื่อนที่ต้องสอดคล้องกับฟังก์ชันจุดประสงค์(Objective Function) ซึ่งฟังก์ชันนี้จะประกอบด้วยหลายปัจจัยที่จะต้องพิจารณาดังต่อไปนี้เพื่อให้ส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไปหาเป้าหมายมีระยะทางที่สั้นที่สุด อีกทั้งยังทำให้มนุษย์รู้สึกปลอดภัยและผ่อนคลายอีกด้วย

3.2.1 ดัชนีปัจจัยด้านความไม่ปลอดภัย

ปัจจัยแรกเรียกว่าปัจจัยด้านความไม่ปลอดภัย(unsafety factor) กำหนดโดยพิจารณาในรูปของระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ที่อยู่ใกล้ที่สุด นั่นคือมนุษย์จะรู้สึกไม่ปลอดภัยมากถ้าระยะห่างระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์มีค่าน้อย และในทางตรงกันข้ามมนุษย์ก็จะรู้สึกไม่ปลอดภัยน้อยถ้าระยะห่างระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์มีค่ามาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่สนใจสถานการณ์ที่มนุษย์และหุ่นยนต์ต้องอยู่ใกล้กันเพื่อติดต่อสื่อสารเพราะกระเป๋าหุ่นยนต์อยู่ในพื้นที่ที่สายตาสามารถมองเห็นได้ จึงกำหนดตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแต่ละพิกัดคู่อันดับ (x_{r_i}, y_{r_i}) โดยให้ค่าดัชนีปัจจัยความไม่ปลอดภัย $D_{us}(x_{r_i}, y_{r_i})$ มีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนแบบผกผันกับระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ที่อยู่ใกล้ที่สุดตามสมการ (4)

$$D_{us}(x_{r_i}, y_{r_i}) = \begin{cases} \infty & \text{เมื่อ } D_h(x_{r_i}, y_{r_i}) \leq (R_h + R_r) \\ \left[\frac{R_h + R_r}{D_h(x_{r_i}, y_{r_i})}\right] & \text{เมื่อ } D_h(x_{r_i}, y_{r_i}) > (R_h + R_r) \end{cases} \quad (4)$$

เมื่อ $D_h(x_{r_i}, y_{r_i})$ คือระยะทางจากหุ่นยนต์ ณ ตำแหน่ง (x_{r_i}, y_{r_i}) ไปยังมนุษย์ที่อยู่ใกล้ที่สุด

3.2.2 ดัชนีปัจจัยตระหนกทันด่วน

ปัจจัยนี้เรียกว่าปัจจัยที่เกิดจากตระหนดทันด่วน (surprise factor) นั่นคือมนุษย์จะรู้สึกตระหนกทันด่วนเมื่อเจอหุ่นยนต์ทันทีทันใด สถานการณ์นี้เกิดเมื่อมนุษย์อยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวาง และหุ่นยนต์อยู่ด้านหน้าสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ผ่านมาพบกับมนุษย์ในทันทีทันใด ดังนั้นในสถานการณ์นี้จะกำหนดให้สิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์เป็นสิ่งกีดขวางตระหนกทันด่วน (surprise obstacle) ซึ่งสิ่งกีดขวางนี้จะมีค่า ดัชนีปัจจัยตระหนกทันด่วน (D_{sp}) นั่นคือสิ่งกีดขวางชนิดนี้จะมีค่า D_{sp} เกิดขึ้น แต่ในขณะที่สิ่งกีดขวางอื่นที่ไม่ได้เป็นสิ่งกีดขวางตระหนกทันด่วนก็จะไม่มีค่านี้ โดยค่า D_{sp} จะมีค่ามากเมื่ออยู่ใกล้สิ่งกีดขวางเพราะมีโอกาสที่จะทำให้มนุษย์ตกใจมากเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่พ้นสิ่งกีดขวาง และในทางตรงกันข้าม บริเวณที่ห่างสิ่งกีดขวางออกไปก็จะมีค่า D_{sp} ลดลงเสมือนหนึ่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่อ้อมในบริเวณที่เป็นมุมอับ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า D_{sp} จะเป็นลักษณะเชิงเส้นดังสมการ (5)

$$D_{sp}(x_{r_i}, y_{r_i}) = \beta - \frac{\beta . D_o(x_{r_i}, y_{r_i})}{\gamma} \quad (5)$$

เมื่อ β คือค่าดัชนีตระหนกทันด่วนสูงสุด , γ คือระยะห่างจากสิ่งกีดขวางที่ทำให้ค่าค่าดัชนีตระหนกทันด่วนเป็น 0 และ$D_o(x_{r_i}, y_{r_i})$ คือระยะทางที่ใกล้ที่สุดระหว่างหุ่นยนต์และสิ่งกีดขวางที่ทำให้เกิด ค่าดัชนีตระหนกทันด่วน

3.2.3 ดัชนีปัจจัยตำแหน่งเป้าหมาย

คือปัจจัยซึ่งพิจารณาตำแหน่งของเป้าหมาย(x_g, y_g) โดยกระเป๋าหุ่นยนต์จะพยายามเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ใกล้กับตำแหน่งของเป้าหมาย โดยระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์กับเป้าหมายแสดงดังสมการ ดังสมการ (6)

$$D_{go}(x_{r_i}, y_{r_i}) = \sqrt{(x_{r_i} - x_g)^2 + (y_{r_i} - y_g)^2} \quad (6)$$

3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการออกแบบทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้นต้องเป็นทิศทางที่ทำให้ผลรวมของฟังก์ชันจุดประสงค์(objective function) ในแต่ละตำแหน่งของการเคลื่อนที่มีค่าน้อยที่สุด นั่นคือในแต่ละมุม θ_i (ค่ามุม ณ คาบการสุ่มที่ i) มีตำแหน่งทั้งหมด n ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ต้องมีค่าสอดคล้องกับการดำเนินการปรับปรุงค่าดัชนีน้อยสุด (minimum indices) ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการเคลื่อนที่ที่มีสิ่งกีดขวางตระหนดทันด่วนและไม่มีสิ่งกีดขวางดับกล่าวสามารถ แสดงดังสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

$$f_{obj}(x_{r_i}, y_{r_i}) = \sum_{j=1}^{n}\{k_1 D_{go}(x_j, y_j) + k_2 D_{us}(x_j, y_j) + k_3 D_{sp}(x_j, y_j)\} \quad (7)$$

$$f_{obj}(x_{r_i}, y_{r_i}) = \sum_{j=1}^{n}\{k_1 D_{go}(x_j, y_j) + k_2 D_{us}(x_j, y_j)\} \quad (8)$$

เมื่อ k_1, k_2 และ k_3 คือถ่วงน้ำหนักปริมาณสเกลาร์ โดยจะกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายนี้ตามสถานการณ์ซึ่งจากเทคนิคแผนภาพการนำร่องอิงศูนย์กลางคนใกล้สุด โดยทิศทางที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปจะเป็นทิศทางที่ทำให้ค่า ฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าน้อยที่สุด ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

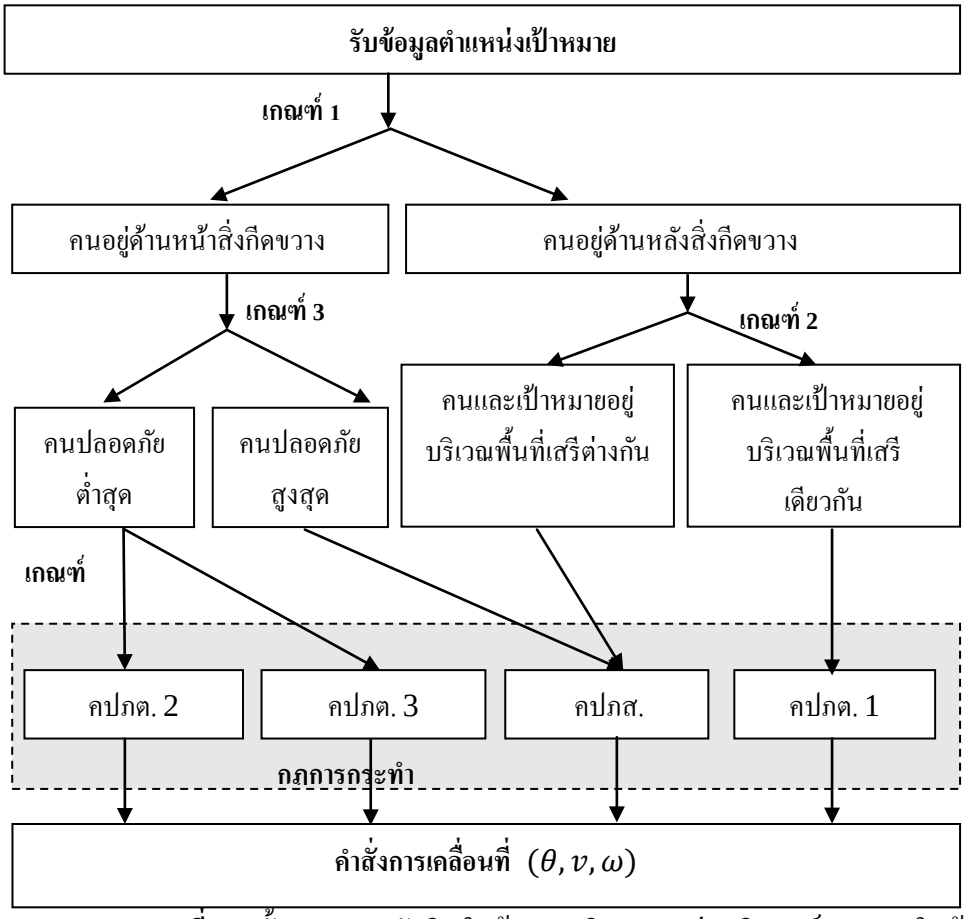
3.3 แผนภาพการนำร่องอิงศูนย์กลางคนใกล้สุด

ในส่วนนี้จะออกแบบการเคลื่อนที่โดยพิจารณาพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์กระเป๋าลากเลื่อน โดยมีสิ่งกีดขวางอยู่รอบตัวหุ่นยนต์ พิกัดตำแหน่งของมนุษย์ และตำแหน่งของมนุษย์หรือคนที่สัมพัทธ์กับสิ่งกีดขวาง

เพื่อหาพื้นที่ว่าง(region) ที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ โดยพื้นที่ว่างเหล่านี้จะนำตำแหน่งของเป้าหมายมาร่วมพิจารณา เพื่อหาเส้นทางเดินอิสระ(free walking area) และจากเส้นทางอิสระก็จะหาค่ามุมที่ให้ค่าฟังก์ชั่นจุดประสงค์มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่ามุมนี้จะเป็นทิศทางที่สามารถหลบสิ่งกีดขวางไปสู่เป้าหมายที่สั้นที่สุดและยังทำให้มนุษย์รู้สึกปลอดภัย ไม่เกิดความตกใจกลัวอันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

3.3.1 สถานการณ์ที่เป็นไปได้

ในส่วนนี้จะกำหนดชุดของสถานการณ์ (set of situations) เพื่ออธิบายสถานการณ์ทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นภายใต้การเคลื่อนที่ซึ่งเทคนิคนี้จะสนใจในกรณีที่มีมนุษย์อยู่ภายในสภาพแวดล้อมแต่หากไม่มีมนุษย์เกี่ยวข้องก็สามารถกลับไปใช้เทคนิคในหัวข้อที่ผ่านโดยการเปรียบเทียบดัชนี เมื่อหุ่นยนต์รับค่าจากระบบเซนเซอร์โดยรู้จุดหมายของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะกำหนดกฎเกณฑ์ 4 เกณฑ์ประเมิน (criteria)ที่สอดคล้องกันเพื่อให้ได้มาซึ่ง 4 สถานการณ์ อธิบายแผนภาพการตัดสินใจ ดังในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการตัดสินใจด้วยเทคนิคการนำร่องอิงศูนย์กลางคนใกล้สุด

***เกณฑ์ 1*:** เกณฑ์ประเมินตำแหน่งคนเทียบอิงกับตำแหน่งเป้าหมาย

กฎเกณฑ์นี้จะตรวจสอบตำแหน่งของมนุษย์ที่อยู่ใกล้ที่สุด สัมพัทธ์กับสิ่งกีดขวาง นั่นคือ ณ ตำแหน่งที่หุ่นยนต์พบมนุษย์หรือคนที่อยู่ใกล้ที่สุดถ้ามีสิ่งกีดขวางอยู่ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ จะเรียก สถานการณ์นั้นว่าคนอยู่ด้านหลังสิ่งกีดขวาง (อธิบายในกฎเกณฑ์ที่ 2) นอกจากนั้นก็จะเป็นคนอยู่ด้านหน้าสิ่งกีดขวาง (อธิบายในกฎเกณฑ์ที่ 3)

***เกณฑ์ 2*:** เกณฑ์ประเมินตำแหน่งคนและเป้าหมายอิงพื้นที่เสรี

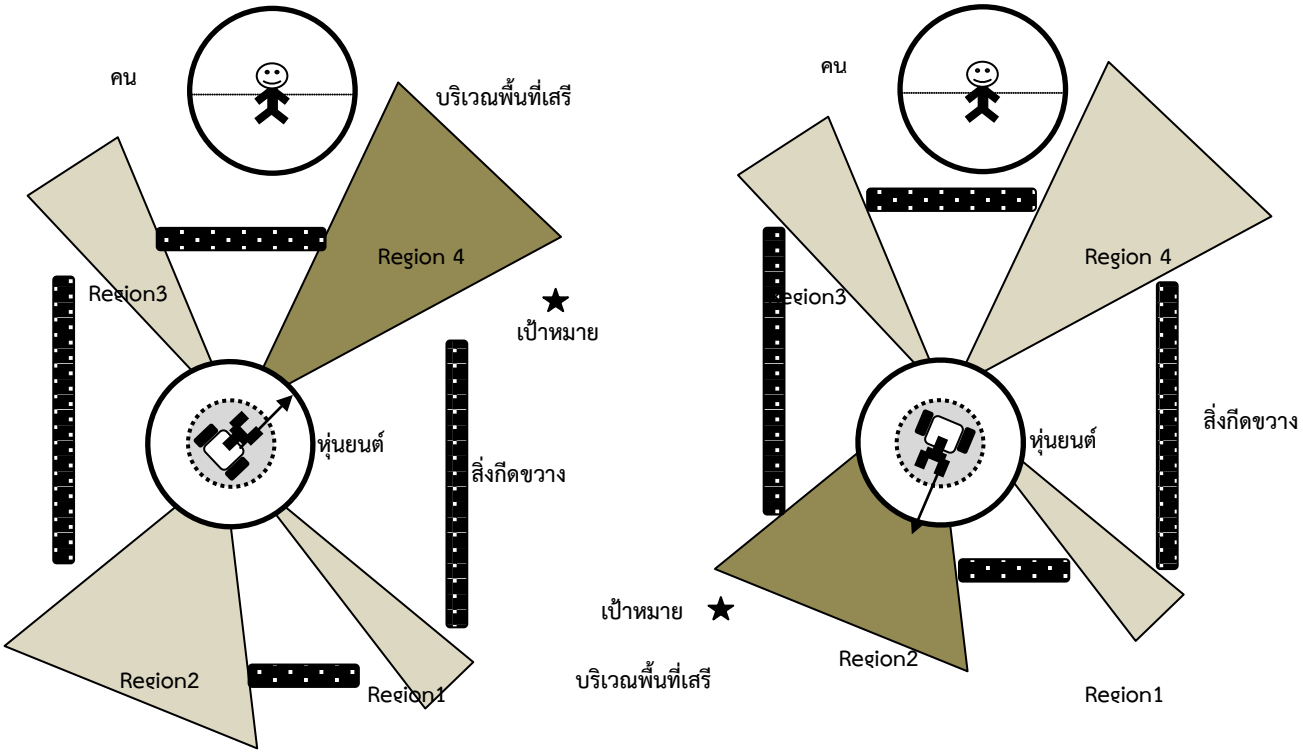
หุ่นยนต์จะทำการสแกนเพื่อหาพื้นที่ว่าง

1. ตำแหน่งของมนุษย์และเป้าหมายอยู่ใกล้(หรืออยู่ใน)พื้นที่เสรีหรือที่ว่างเดียวกัน จากรูปที่ 3(ก) มนุษย์และเป้าหมายต่างก็อยู่ใกล้ Region 4 ดังนั้นจึงเรียก Region 4 ว่าเป็นพื้นที่อิสระ ในสถานการณ์นี้มีมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้องจะเป็นสถานการณ์ที่มีความปลอดภัยต่ำ (คปภต.1)
2. ตำแหน่งของมนุษย์และเป้าหมายอยู่คนละพื้นที่ว่างหรือพื้นที่เสรี จากรูปที่ 3(ข) มนุษย์อยู่ใกล้ Region 4 แต่เป้าหมายอยู่ใกล้ Region 2 ดังนั้นจึงเลือก Region 2 เป็นพื้นที่อิสระ ซึ่งในสถานการณ์นี้ไม่มีมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่จึงเป็นสถานการณ์ที่มีความปลอดภัยสูง (คปภส.)

***เกณฑ์* 3**: เกณฑ์ประเมินความปลอดภัยมนุษย์

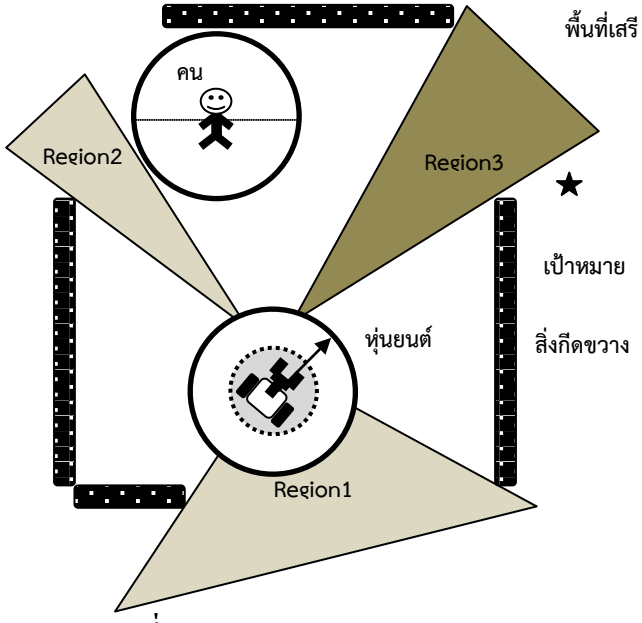
กฎเกณฑ์นี้จะตรวจสอบระดับความปลอดภัยในกรณีที่มนุษย์อยู่ระหว่างหุ่นยนต์กับสิ่งกีดขวาง(กรณีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านหน้า) โดยจะมองมนุษย์ที่มีความปลอดภัยสูงสอดคล้องกับกรณีต่อไปนี้

1. คปภส. : นั่นคือไม่มีสิ่งกีดขวางเข้ามาในบริเวณอ่อนไหวสำหรับหุ่นยนต์และไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของบริเวณอ่อนไหวของหุ่นยนต์และของคนซ้อนทับกัน แสดงดังภาพที่ 3.4 จากรูปหุ่นยนต์จะเลือกพื้นที่ว่างที่อยู่ใกล้เป้าหมายนั่นคือ Region 3 ให้เป็นพื้นที่อิสระ
2. คปภต. : คือสถานการณ์ที่มีมีพื้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของบริเวณอ่อนไหวของคนหรือสิ่งกีดขวางเข้ามาในพื้นที่ที่เป็นบริเวณอ่อนไหวของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นกฎเกณฑ์ข้อที่ 4



(ก) คนละเป้าหมายอยู่ในบริเวณพื้นที่เสรีเดียวกัน (ข) คนและเป้าหมายอยู่ต่างพื้นที่เสรีกัน

ภาพที่ 3.3 เกณฑ์ประเมินตำแหน่งคนและเป้าหมาย



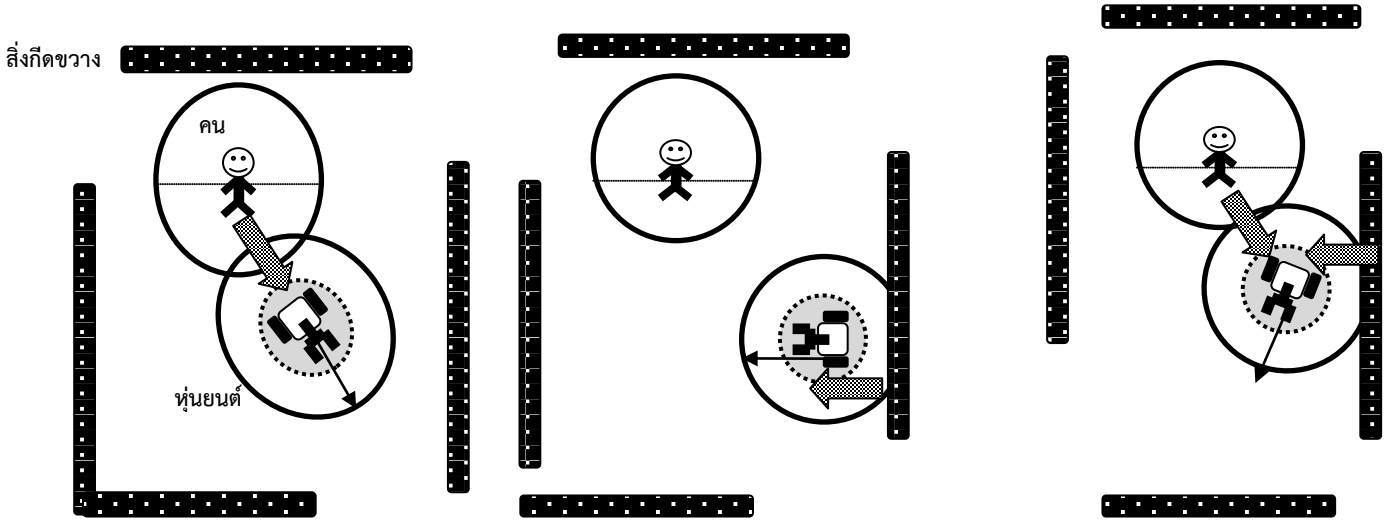
ภาพที่ 3.4 คนมีความปลอดภัยสูง

***เกณฑ์* 4**: เกณฑ์ประเมินพื้นที่อันตราย

คือเกณฑ์ประเมินเมื่อมีสิ่งกีดขวางหรือมนุษย์เข้ามาในพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ โดยแบ่งระดับอันตรายดังนี้

1). คนมีความปลอดภัยต่ำ 2 (คปภต.2) : ถ้ามีสิ่งกีดขวางหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของบริเวณอ่อนไหวของคนเข้ามาในบริเวณอ่อนไหวของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม แสดงดังภาพที่ 3.5 (ก)

2).คนมีความปลอดภัยต่ำ 3 (คปภต. 3) : มีสิ่งกีดขวางเข้ามาในบริเวณพื้นที่อ่อนไหวของหุ่นยนต์และมีส่วนใดส่วนหนึ่งของอ่อนไหวของหุ่นยนต์และของคนซ้อนทับกัน แสดงดังภาพที่ 3.5 (ข)



(ก) คปภต. 2 (ข) คปภต. 3

ภาพที่ 3.5 คนมีความปลอดภัยต่ำ

จากรูปเมื่อหุ่นยนต์อยู่ในสถานการณ์ คปภต. 2 หรือ คปภต. 3 หุ่นยนต์จะยังไม่มองหาพื้นที่เสรีแต่หุ่นยนต์จะหาทิศทางในการเคลื่อนที่เพื่อให้พ้นไปสถานการณ์ที่มีมนุษย์หรือสิ่งกีดขวางเข้ามาในบริเวณอ่อนไหวของหุ่นยนต์ โดยใน 3.5(ก) จะมีเพียงมนุษย์หรือสิ่งกีดขวางอย่างใดอย่างหนึ่งเข้ามาในวงกลมอ่อนไหวของหุ่นยนต์ดังนั้นในการเคลื่อนที่จะสร้างเวกเตอร์ของทิศทางการเคลื่อนที่เพื่อหนีสิ่งกีดขวางที่อยู่ใกล้ที่สุดตามสมการ (9-10)

$$\theta_{h_i} = tan^{-1}\left(\frac{(y_{r_i} - y_{h_i})}{(x_{r_i} - x_{h_i})}\right) \quad (9)$$

$$\theta_{o_i} = tan^{-1}\left(\frac{(y_{r_i} - y_{o_i})}{(x_{r_i} - x_{o_i})}\right) \quad (10)$$

เมื่อ θ_{h_i} คือทิศทางเคลื่อนออกจากมนุษย์, θ_{o_i} คือทิศทางเลื่อนออกจากสิ่งกีดขวาง และ (x_{o_i}, y_{o_i}) คือตำแหน่งของสิ่งกีดขวางที่อยู่ใกล้ที่สุดที่เข้ามาในบริเวณอ่อนไหวของหุ่นยนต์ โดยตัวห้อย i หมายถึงค่า ณ คาบการสุ่มที่ i และในกรณีของ 3.5(ข) จะมีทั้งมนุษย์และสิ่งกีดขวางเข้ามาในบริเวณอ่อนไหวของหุ่นยนต์ ดังนั้นเวกเตอร์ของทิศทางการเคลื่อนที่จะเป็นเวกเตอร์ลัพธ์ของเวกเตอร์ที่เกิดจากมนุษย์และสิ่งกีดขวางดังสมการที่ (11)

$$\theta_{ho_i} = \frac{k_4\theta_{h_i} + k_5\theta_{o_i}}{k_4 + k_5} \quad (11)$$

เมื่อ θ_{ho_i} คือทิศทางของเวกเตอร์ลัพธ์, k_4 คือค่าน้ำหนักของทิศทางของการเคลื่อนที่หนีมนุษย์ และ k_5 คือค่าน้ำหนักของการเคลื่อนที่หนีสิ่งกีดขวาง นั่นคือในงานวิจัยนี้จะให้วามสำคัญของมนุษย์มากกว่าสิ่งกีดขวาง ดังนี้ จึงสามารถกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้มีทิศทางเบนออกจากมนุษย์มากกว่าสิ่งกีดขวาง เมื่อ $k_4 > k_5$

3.3.2 กฎการกระทำที่สอดคล้องกับสถานการณ์

จากกฎเกณฑ์ทั้ง 4 จะได้ 4 สถานการณ์ ซึ่งในแต่ล่ะสถานการณ์ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปสู่เป้าหมายด้วยการควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่(θ_g) ความเร็วเชิงเส้น (v_r)และความเร็วเชิงมุม ω_r

3.3.2.1 ทิศทางการเคลื่อนที่(θ_g)

เทคนิคในงานวิจัยในอดีต [37-44] นั้นเมื่อได้พื้นที่อิสระก็จะกำหนดทิศทางที่ใกล้กับตำแหน่งเป้าหมายด้วยมุมที่คงที่ค่าหนึ่งเพราะหุ่นยนต์ไม่ได้สนใจปัจจัยอื่นนอกจากการหลบสิ่งกีดขวางและเป้าหมายเท่านั้น แต่ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปยังเป้าหมายโดยมีมนุษย์อยู่ร่วมในสภาพแวดล้อมด้วยความรู้สึกที่ปลอดภัย ซึ่งพิจารณาจากตารางที่ 3.1

ในสถานการณ์ คปภส. เมื่อได้พื้นที่เสรี หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ในพื้นที่เสรีอย่างอิสระโดยให้มีทิศทางที่ใกล้เป้าหมายที่สุดและมนุษย์รู้สึกปลอดภัยที่สุด และในสถานการณ์ คปภต.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ในพื้นที่เสรีของหุ่นยนต์นอกจากให้ใกล้เป้าหมายและมนุษย์รู้สึกปลอดภัยแล้วยังต้องไม่ทำให้มนุษย์เกิดอันเนื่องมาความ

ตระหนกทันด่วนจากสถานการณ์ที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางไปเจอกับมนุษย์ นั่นคือทั้งสถานการณ์ คปภส. และ คปภต.1 หุ่นยนต์ต้องมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าต่ำที่สุด เพื่อให้หุ่นยนต์เดินอ้อมหลบหลีกมนุษย์และมุมอับที่อาจจะทำให้มนุษย์ตกใจ

ในสถานการณ์ คปภต.2 และ คปภต.3 นั้นถือว่าเป็นสถานการณ์วิกฤตเพราะมีมนุษย์หรือ (และ) สิ่งกีดขวางล่วงล้ำเข้ามาในพื้นที่ปลอดภัยของหุ่นยนต์ ซึ่งการล่วงล้ำนี้สมมติให้เสมือนมีแรงที่มองไม่เห็นพยายามผลักหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นหุ่นยนต์ต้องรักษาสถานะของตัวเองด้วยการเคลื่อนที่ในทิศทางของเวกเตอร์ลัพธ์ของแรงผลักที่มองไม่เห็นนี้ โดยให้ความสำคัญของการหลบหลีกมนุษย์มากกว่าสิ่งกีดขวางอื่นด้วยการกำหนดทิศของการหลบหนีให้ห่างมนุษย์มากกว่าสิ่งกีดขวางจากการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก และหลังจากที่เคลื่อนที่จนไม่มีการล้วงล้ำเข้ามาในพื้นที่ปลอดภัยของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์จึงเริ่มทำการหาพื้นที่อิสระในการเคลื่อนที่ใหม่อีกครั้งหนึ่ง

3.3.2.2 ความเร็วเชิงเส้นของการเคลื่อนที่ของ*หุ่นยนต์* (v_r)

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สัมพันธ์เป็นสัดส่วนแบบผกผันกับการเคลื่อนที่ของมนุษย์ นั่นคือถ้ามนุษย์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเกินกว่าค่าหนึ่งซึ่งหมายถึงการที่มนุษย์กำลังวิ่ง ($v_{h_{max}}$) หุ่นยนต์จะหยุดการเคลื่อนที่ และถ้ามนุษย์เคลื่อนที่ช้าลง หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากขึ้น จนกระทั่งมนุษย์หยุดการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์ก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดนั่นคือ $v_{r_{max}}$ แสดงเงื่อนไขดังสมการที่ (12) เมื่อ v_{h_i} คือความเร็วของมนุษย์ ณ คาบการสุ่ม i

$$v_r = v_{r_{max}} . \left(\frac{v_{h_{max}} - v_{h_i}}{v_{h_{max}}} \right) \tag{12}$$

3.3.2.3 ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (ω_r)

การเคลื่อนที่เชิงมุมเกิดขึ้นเมื่อหุ่นยนต์ต้องเปลี่ยนทิศทางในการเคลื่อนที่ กำหนด $\omega_{r_{max}}$ คือความเร็วเชิงมุมที่มีค่ามากที่สุดของหุ่นยนต์ เมื่อได้มุมที่หุ่นยนต์ต้องหมุนเพื่อไปหาเป้าหมายหรือเพื่อหลบสิ่งกีดขวางในสถานการณ์ต่าง ๆ หุ่นยนต์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมที่มากและจะมีค่าลดลงเมื่อยิ่งเข้าใกล้ค่ามุมเป้าหมาย ดังตารางที่ 1 เมื่อค่า k_w คือค่าถ่วงน้ำหนักที่ทำให้ความเร็วเชิงมุมรวมไม่เกินค่า $\omega_{r_{max}}$ และ θ_i คือค่ามุมของหุ่นยนต์ที่ทำกับแกน $+x$ ณ คาบการสุ่ม i

ตารางที่ 3.1 กฎการกระทำตามเงื่อนไขการเคลื่อนที่ในแต่ละสถานการณ์

กฎควบคุม	*ทิศทาง* $(\boldsymbol{\theta_g})$	*ความเร็วเชิงเส้น* $(\boldsymbol{v_r})$	*ความเร็วเชิงมุม* $(\boldsymbol{\omega_r})$
คปภส.	$min\{ f_{obj}(x_{r_i}, y_{r_i})\} = min\left\{\sum_{j=1}^{n}\{w_1 D_{go}(x_j, y_j) + w_2 D_{us}(x_j, y_j)\}\right\}$		$\omega_r = k_w . \omega_{r_{max}} . \lvert\theta_g - \theta_i\rvert$
คปภต1	$min\{f_{obj}(x_{r_i}, y_{r_i})\} = min\left\{\sum_{j=1}^{n}\{w_1 D_{go}(x_j, y_j) + w_2 D_{us}(x_j, y_j) + w_3 D_{sp}(x_j, y_j)\}\right\}$	$v_r = v_{r_{max}} . \left(\frac{v_{h_{max}} - v_{h_i}}{v_{h_{max}}}\right)$	
คปภต2	$\theta_{h_i} = tan^{-1}\left(\frac{(y_{r_i} - y_{h_i})}{(x_{r_i} - x_{h_i})}\right)$, $\theta_{o_i} = tan^{-1}\left(\frac{(y_{r_i} - y_{o_i})}{(x_{r_i} - x_{o_i})}\right)$		$\omega_r = k_w . \omega_{r_{max}} . \lvert\theta_{h_i} - \theta_i\rvert$ หรือ $\omega_r = k_w . \omega_{r_{max}} . \lvert\theta_{o_i} - \theta_i\rvert$
คปภต3	$\theta_{ho_i} = \frac{k_4\theta_{h_i} + k_5\theta_{o_i}}{k_4 + k_5}$		$\omega_r = k_w . \omega_{r_{max}} . \lvert\theta_{ho_i} - \theta_i\rvert$

สำหรับผลการทดลองโดยอาศัยหลักการออกแบบการควบคุมการกระทำในบทนี้ผสามกับแนวคิดการออกแบบเลือกกลไกพลศาสตร์และการสื่อสารในบทที่ 2 ที่ผ่านมาจะแสดงผลการประยุกต์กรณีต่าง ๆ และผลกระทบเชิงการประชาสัมพันธ์ตามจุดประสงค์ที่วางไว้ในบทที่ 4 ต่อไป