บทที่ 2

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง

ในระบบควบคุมทั่วไปนอกจากความจำเป็นที่จะควบคุมระบบให้ได้ผลผลิตตามต้องการแล้ว สิ่งที่จำเป็นต้องคำนึงถึงไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากันก็คือ ความปลอดภัย ในการทำงานปกติของระบบมีโอกาสที่จะเกิดความผิดพร่องขึ้นได้ทุกเมื่อ ความผิดพร่องดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเนื่องจากความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน หรืออาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพตามการใช้งาน อย่างไรก็ตามความผิดพร่องที่เกิดขึ้นอาจนำมาซึ่งความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สิน อีกทั้งความผิดพร่องที่เกิดขึ้นอาจทำให้โรงงานต้องหยุดงานเป็นเวลานาน เพื่อตรวจหาความผิดพร่อง แล้วจึงเริ่มทำงานใหม่ ทำให้ต้องสูญเสียทั้งเวลา และผลผลิตที่ควรได้

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยลดความเสียหายดังกล่าวในการที่จะเตือนผู้ปฏิบัติงานเมื่อเกิดความผิดพร่องขึ้น และช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจหาสาเหตุการเกิดความผิดพร่องได้เร็วขึ้น ซึ่งช่วยบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวครอบคลุมถึง คำจำกัดความและลักษณะของความผิดพร่อง หลักการพิจารณาเลือกระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง รวมถึงหลักการเบื้องต้นและวิธีการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องโดยทั่วไป

2.1 คำจำกัดความและลักษณะของความผิดพร่อง

ความผิดพร่อง (fault) หมายถึง ภาวะของกระบวนการที่ผลตอบของกระบวนการมีการเบี่ยงเบนไปจากจุดทำงานปกติ หรือผลผลิตที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากที่ต้องการ อันเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ทางกายภาพ (physical coefficient) ของกระบวนการ

ความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบสามารถจำแนกตามลักษณะของการเปลี่ยนแปลงได้เป็น 2 แบบคือ

1. **ความผิดพร่องเริ่มก่อ(incipient fault)** เป็นความผิดพร่องที่เกิดจากการที่สัมประสิทธิ์ทางกายภาพของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เช่น กรณีที่ไบแอสของอุปกรณ์วัดค่อยๆ เพิ่มขึ้น

2. **ความผิดพร่องเฉียบพลัน(abrupt fault)** เป็นความผิดพร่องที่เกิดจากการที่สัมประสิทธิ์ทางกายภาพของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหัน เช่น กรณีเกิดการลัดวงจร เป็นต้น

นอกจากจะจำแนกความผิดพร่องตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงแล้ว สามารถจำแนกความผิดพร่องตามผลการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อระบบ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น

1. **ความผิดพร่องแบบทวีคูณ (multiplicative fault)** เป็นความผิดพร่องที่เป็นผลทำให้พารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าปกติ สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการสถานะได้

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A + \Delta A]x(t) + [B + \Delta B]u(t) \\ y(t) &= [C + \Delta C]x(t) \end{aligned} \qquad (2.1)$$

เมื่อ x เป็นเวกเตอร์ตัวแปรสถานะขนาด $n \times 1$

u เป็นเวกเตอร์สัญญาณเข้าขนาด $m \times 1$

y เป็นเวกเตอร์สัญญาณออกขนาด $k \times 1$

A เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times n$

B เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times m$

C เป็นเมตริกซ์ขนาด $k \times n$

$\Delta A, \Delta B, \Delta C$ เป็นส่วนที่เบี่ยงเบนไปของเมตริกซ์ A, B, C ตามลำดับ

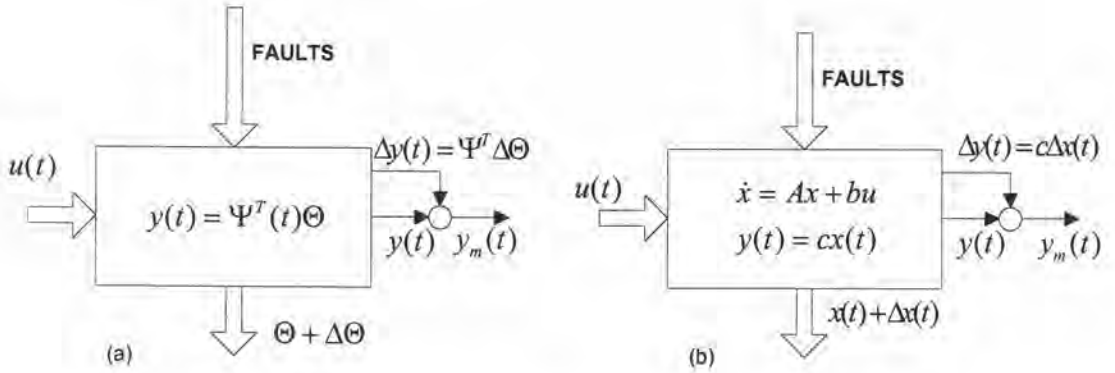
ตัวอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานในวงจรอันเนื่องมาจากการอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง

2. **ความผิดพร่องแบบเพิ่มพูน (additive fault)** เป็นความผิดพร่องที่เป็นผลทำให้ตัวแปรสถานะมีการเปลี่ยนแปลง หรือเบี่ยงเบนไปจากค่าปกติ สามารถเขียนในรูปของสมการสถานะได้

$$\dot{x}(t) = A\left[x(t) + \Delta x(t)\right] + Bu(t)$$
$$y(t) = C\left[x(t) + \Delta x(t)\right] \qquad (2.2)$$

เมื่อ Δx เป็นตัวแปรสถานะที่เบี่ยงเบนไป

ตัวอย่าง เช่น เกิดการรั่วของถังน้ำ



รูปที่ 2.1 รูปแบบความผิดพร่องในกระบวนการ :
(a) ความผิดพร่องแบบทวีคูณ ; (b) ความผิดพร่องแบบเพิ่มพูน

ความผิดพร่องอาจแยกได้ตามตำแหน่งของความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในระบบได้ ดังนี้คือ

- **ความผิดพร่องในกระบวนการ** : เป็นความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการ เช่น ถังรั่ว หรือค่าสัมประสิทธิ์บางตัวของกระบวนการเปลี่ยนแปลง

- **ความผิดพร่องในตัวตรวจรู้ (sensor)** : เป็นความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในตัวตรวจรู้หรือในอุปกรณ์วัด เช่น มีไบแอสในอุปกรณ์วัด

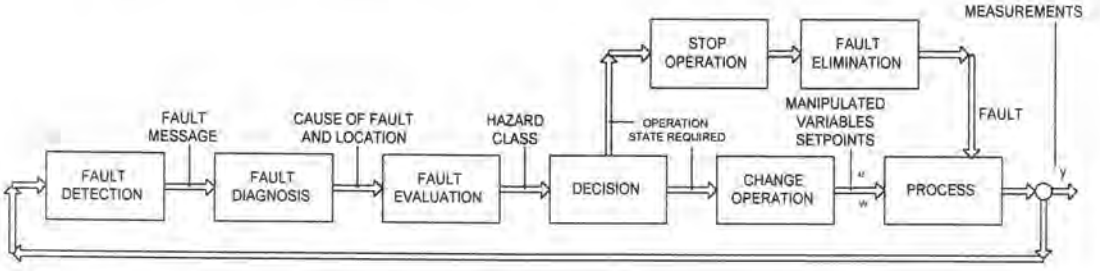
- **ความผิดพร่องในตัวขับเร้า (actuator)** : เป็นความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในตัวขับเร้า ทำให้สัญญานออกของตัวขับเร้าผิดไปจากที่ต้องการ

- **ความผิดพร่องในตัวควบคุม** : เป็นความผิดพร่องที่เกิดขึ้นในตัวควบคุม ทำให้สัญญาณควบคุมผิดไปจากที่ต้องการ

2.2 ส่วนประกอบในการสอดส่องระบบ [1]

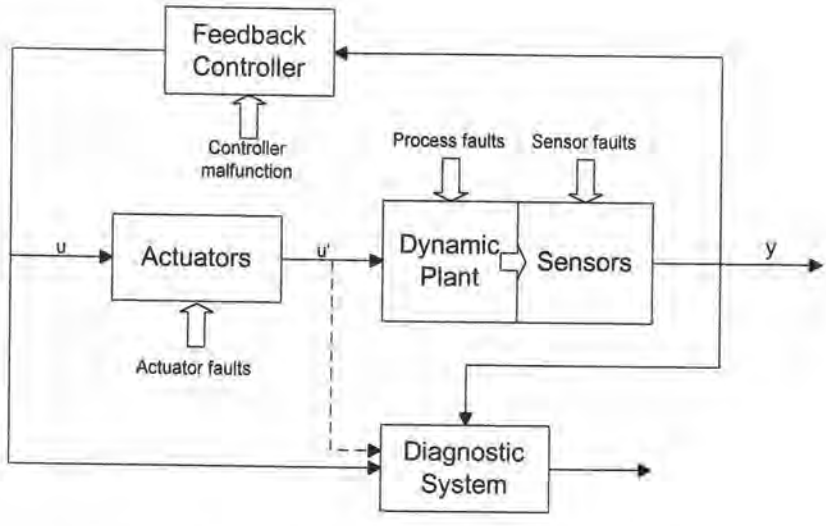
ในระบบควบคุมอัตโนมัติทั่วไป นอกจากจะมีการควบคุมระบบขั้นแรก (first level) ซึ่งได้แก่ การควบคุมแบบต่าง ๆ เช่น การควบคุมแบบป้อนกลับ ยังจำเป็นต้องมีการควบคุมในขั้นที่สอง (second level) ที่คอยสอดส่องระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อให้ได้ระบบที่มีความปลอดภัยและได้ผลผลิตตามต้องการ ส่วนประกอบของการสอดส่องระบบสำหรับความผิดพร่องอาจแบ่งได้เป็น

- การตรวจพบความผิดพร่อง (fault detection) : ทำหน้าที่สอดส่อง ตรวจหาความผิดพร่องที่เกิดขึ้น
- การวินิจฉัยความผิดพร่อง (fault diagnosis) : ทำหน้าที่หาตำแหน่ง และสาเหตุของความผิดพร่อง
- การประเมินความผิดพร่อง (fault evaluation) : ทำหน้าที่ประเมินความร้ายแรงของความผิดพร่อง
- การตัดสินใจ (decision) : ทำหน้าที่ตัดสินใจแก้ไขความผิดพร่องที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.2 วงรอบการสอดส่องระบบสำหรับความผิดพร่อง

สำหรับระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องเป็นส่วนหนึ่งของการสอดส่องระบบ ซึ่งมีโครงสร้างทั่วไปดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทั่วไปของระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง

2.3 หลักในการพิจารณาระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง[18]

ในการพิจารณาเลือกใช้ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง จำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับระบบ ซึ่งปกติมักจะคำนึงถึง

1. ความเร็วในการตรวจพบ

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องที่ดีควรตรวจพบเหตุการณ์ผิดปกติ และหาสาเหตุได้รวดเร็วก่อนที่จะเกิดความเสียหายมากขึ้น

2. ความไวต่อความผิดพร่องเริ่มก่อ

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องจำเป็นต้องคำนึงความไวในการตรวจพบความผิดพร่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความผิดพร่องเริ่มก่อ แต่อย่างไรก็ตามความไวของระบบมักจะมีคุณสมบัติแย้งกันกับความคงทนของระบบต่อความไม่แน่นอนของแบบจำลอง และสัญญาณรบกวน

3. อัตราการเตือนผิด

หมายถึง โอกาสที่ระบบจะเตือนว่าเกิดความผิดพร่องขึ้นในขณะที่ระบบทำงานปกติ อัตราการเตือนผิดจะมีผลต่อความเชื่อถือของระบบตรวจพบและวินิจฉัย ระบบตรวจพบและวินิจฉัยที่มีอัตราการเตือนผิดสูงจะทำให้กระบวนการต้องหยุดทำงานบ่อยโดยไม่จำเป็น ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดังนั้นระบบตรวจพบและวินิจฉัยที่ดีควรมีอัตราการเตือนผิดต่ำ

4. กรณีไม่สามารถตรวจพบความผิดพร่อง

หมายถึง การที่เกิดความผิดพร่องขึ้นในระบบ แต่ระบบตรวจพบและวินิจฉัยไม่สามารถตรวจพบได้ ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหาย ระบบตรวจพบและวินิจฉัยที่ดีควรตรวจพบได้ทุกครั้งที่เกิดความผิดพร่อง

5. การบอกตำแหน่ง และสาเหตุของความผิดพร่องผิด

หมายถึง กรณีที่ระบบหาจุดที่เกิด และสาเหตุของความผิดพร่องผิดจากที่เกิดขึ้นจริง ระบบตรวจพบและวินิจฉัยควรมีความแม่นยำสูงในการบอกถึงสาเหตุของความผิดพร่อง เพื่อที่จะแก้ไขได้ถูกต้อง

2.4 วิธีการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องแบบดั้งเดิม มักจะใช้ฮาร์ดแวร์ในการตรวจหาความผิดพลาด โดยอาจใช้อุปกรณ์วัดพิเศษสำหรับวัดตัวแปรบางตัวในระบบ วิธีดังกล่าวสิ้นเปลืองและใช้พื้นที่ในการวางอุปกรณ์วัดจำนวนมาก และยากที่จะพิจารณาเลือกจุดที่จะวัด อีกทั้งตัวแปรที่ต้องการวัดบางตัวไม่สามารถหาอุปกรณ์วัดมาวัดได้

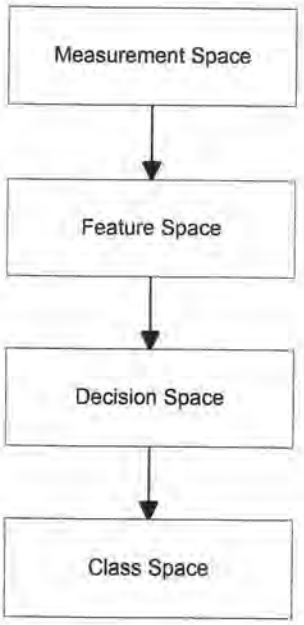
เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความสามารถสูงขึ้น งานวิจัยส่วนมากจึงมักจะใช้วิธีการวิเคราะห์ซึ่งใช้อุปกรณ์วัดน้อยกว่าวิธีทางฮาร์ดแวร์ อาศัยเพียงการประมวลผลข้อมูลที่วัดมาได้ โดยทั่วไปแล้วหลักการพื้นฐานของระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องอาจมองได้ว่าเป็นการตัดสินใจว่าเกิดความผิดพร่องใดขึ้นในระบบจากข้อมูลที่สามารถวัดได้จากระบบ ซึ่งสามารถแยกเป็นขั้นตอนในการแปลงข้อมูลอย่างคร่าว ๆ ได้ดังรูปที่ 2.4 โดยแยกเป็นปริภูมิดังนี้

1. **ปริภูมิการวัด(Measurement space) :** เป็นปริภูมิของค่าที่สามารถวัดได้จากระบบ $x_1, x_2, \ldots, x_n$ ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้เหล่านี้

2. **ปริภูมิลักษณะสำคัญ (Feature space) :** เป็นปริภูมิของจุด $y = [y_1, y_2, \ldots, y_l]$ เมื่อ y_i เป็นลักษณะสำคัญที่ i ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าที่วัดได้โดยอาศัยความรู้ที่ในปัญหาที่มีอยู่ ความรู้ดังกล่าวอาจอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของสัญญาณเข้าและสัญญาณออก เช่น สมดุลของสาร และสมดุลของพลังงานในกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วการแปลงจาก ปริภูมิการวัดไปยังปริภูมิลักษณะสำคัญจะช่วยทำให้แบ่งคลัสเตอร์(cluster)ได้ดี ทำให้มีพื้นผิวในการตัดสินใจ (decision surfaces) ที่ง่ายในการแบ่ง

3. **ปริภูมิการตัดสินใจ (Decision space) :** เป็นปริภูมิของจุด $z=[z_1,z_2,...z_m]$ เมื่อ m คือจำนวนชนิดของความผิดพร่องที่รู้จัก ปริภูมิการตัดสินใจได้จากการแปลงที่เหมาะสมจากปริภูมิลักษณะสำคัญ

4. **ปริภูมิกลุ่ม (Class space) :** เป็นเซตของจำนวนเต็มที่แสดงถึงชนิดของความผิดพร่องที่เกิดขึ้น กล่าวคือเป็นการชี้ว่าจากค่าที่วัดได้เป็นความผิดพร่องชนิดใด



รูปที่ 2.4 การแปลงข้อมูลสำหรับการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง

อย่างไรก็ตามวิธีใช้การวิเคราะห์ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของความคงทนต่อความไม่แน่นอนของแบบจำลอง และสัญญาณรบกวน วิธีใช้การวิเคราะห์สามารถแยกได้เป็น 2 แบบ คือ

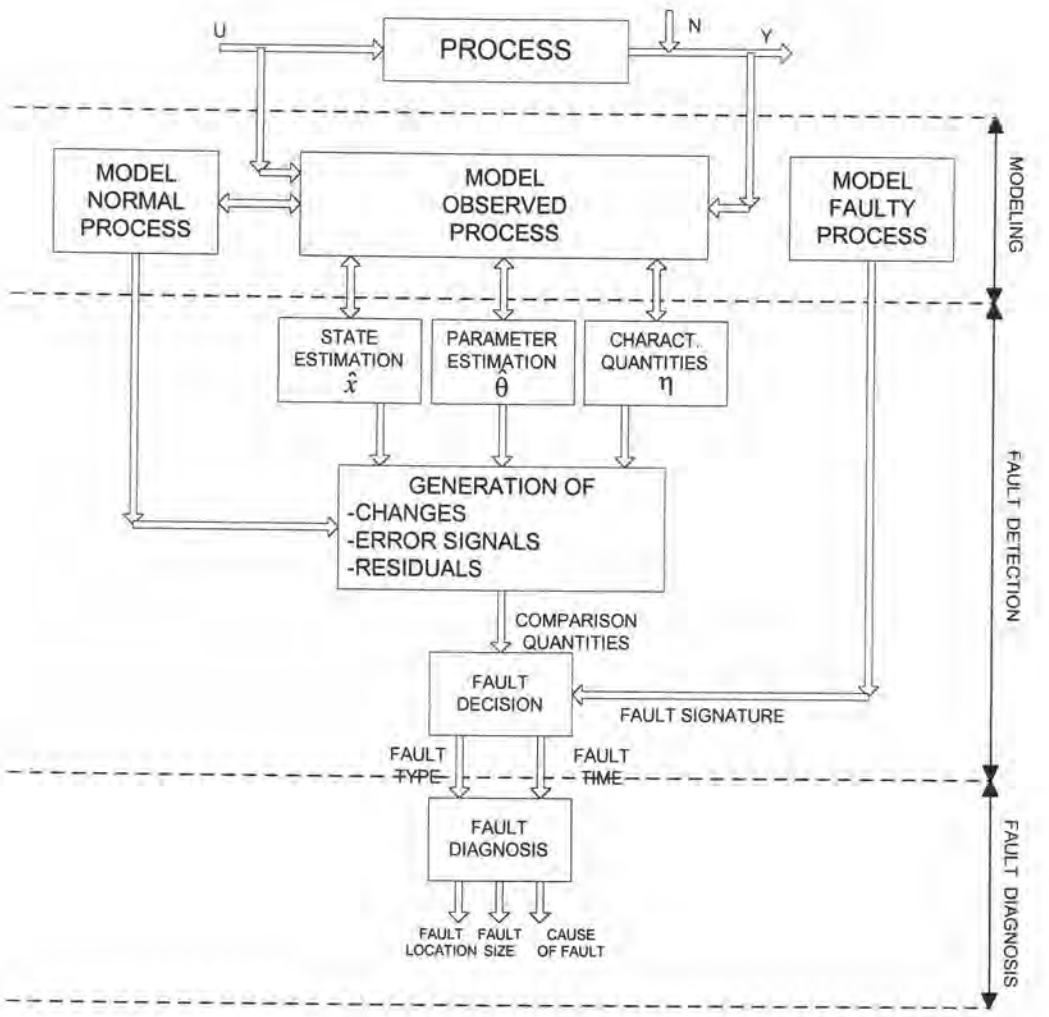
1. ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องโดยใช้แบบจำลอง (model - based fault detection and diagnosis)

2. ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องโดยไม่ใช้แบบจำลอง (model - free fault detection and diagnosis)

2.4.1 ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องโดยใช้แบบจำลอง

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องที่ใช้แบบจำลองมีโครงสร้างทั่วไปดังรูปที่ 2.5 จากโครงสร้างดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

1. **การจำลองระบบ** ในส่วนนี้เปรียบเสมือนความรู้และประสบการณ์ที่มีต่อระบบซึ่งประกอบด้วย
   - แบบจำลองของระบบในสภาวะปกติ
   - แบบจำลองของระบบที่สังเกตได้
   - แบบจำลองของระบบในสภาวะเกิดความผิดพร่อง



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องโดยใช้แบบจำลอง

2. **การตรวจพบความผิดพร่อง** : ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่คอยตรวจการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งประกอบด้วย
   - การประมาณตัวแปรสถานะ (state estimation)
   - การประมาณพารามิเตอร์ (parameter estimation)
   - การประมาณปริมาณของลักษณะสมบัติต่าง ๆ (Characteristic quantities)

   ค่าที่ได้จากการประมาณจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าจากแบบจำลองในสภาวะปกติ เพื่อสร้างส่วนตกค้างขึ้นมา จากส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นก็จะถูกนำไปพิจารณาตัดสินว่าเกิดความผิดพร่องหรือไม่

3. **การวินิจฉัยความผิดพร่อง** : ในส่วนนี้จะทำหน้าที่วิเคราะห์หาสาเหตุ และตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง ซึ่งอาจใช้วิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ได้

แม้วิธีที่ใช้แบบจำลองสามารถใช้วิธีการประมาณตัวแปรสถานะ หรือประมาณพารามิเตอร์แบบต่าง ๆ ได้เช่น วิธีกำลังสองน้อยสุดแบบเวียนเกิด (recursive least square) ตัวกรองเอ็กเทนเดด-คาลมาน (extended Kalman filter) แต่วิธีนี้ยากที่จะทำไปใช้กับระบบที่ซับซ้อน, ระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งทำให้เกิดความไม่แน่นอนในแบบจำลอง

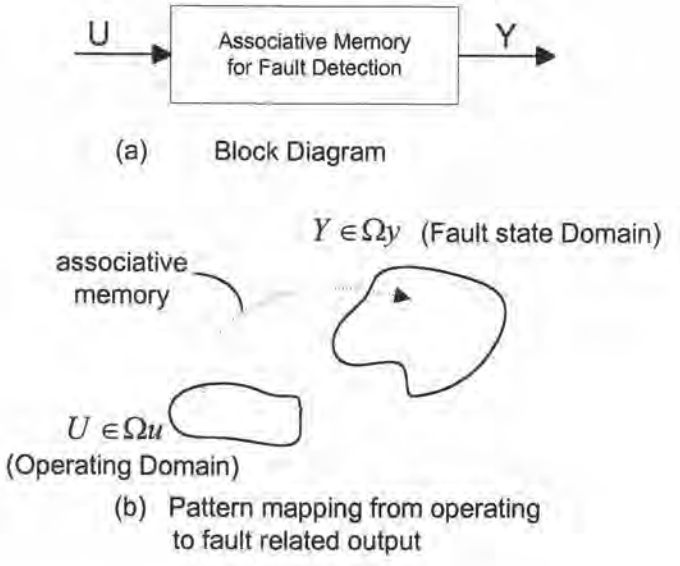
2.4.2 ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องโดยไม่ใช้แบบจำลอง

ระบบตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องที่ไม่ใช้แบบจำลอง จะอาศัยความรู้ที่มีเกี่ยวกับระบบ หรือชุดข้อมูลที่เป็นตัวเลขของตัวแปรที่วัดได้ในระบบกับสถานะของระบบมาสร้างความสัมพันธ์ และทำการวิเคราะห์ วิธีนี้สามารถแยกได้เป็น 2 พวก คือ

1. **ระบบฐานกฎผู้เชี่ยวชาญ (Rule-based expert system)** : วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่อง โดยอาศัยความรู้ และประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติการเกี่ยวกับกระบวนการ สร้างฐานความรู้ขึ้นมาในรูปประโยค "if - then" ดังนั้นจึงอาจนำตรรกศาสตร์ฟัซซี่ มาใช้ได้โดยทำให้อยู่ในรูปของแบบจำลองฟัซซี่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากวิธีนี้ต้องอาศัยความเข้าใจระบบอย่างมาก ทำให้ยากในการที่จะนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อน

2. **การส่งรูปแบบ (pattern mapping)** : วิธีนี้จะใช้วิธีการรู้จำแบบหรือใช้ข่ายงานประสาทในการส่ง (map) ค่าที่ได้จากการวัดในปริภูมิเวกเตอร์สัญญาณเข้า, $U = [u_1, ..., u_r]^T$ ไปยัง ปริภูมิเวกเตอร์สัญญาณออกซึ่งเป็นความผิดพร่องที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยผ่านการเรียนรู้จากชุดข้อมูลของเวกเตอร์สัญญาณเข้า-ออกของระบบ แต่เนื่องจากวิธีนี้เป็น ฐานความรู้แบบไม่เป็นโครงสร้าง ทำให้ยากที่จะทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัว กับความผิดพร่องที่เกิดขึ้น

จากจุดเด่นของวิธีใช้ฐานกฎที่เป็นฐานความรู้แบบเป็นโครงสร้าง และจุดเด่นของวิธีการส่งรูปแบบที่สามารถเรียนรู้ได้จากชุดข้อมูล จึงได้มีความพยายามเอาจุดเด่นของทั้งสองวิธีมารวมกัน เช่น อยู่ในรูปของระบบนิวรอล-ฟัซซี่(neural - fuzzy system) [20]



รูปที่ 2.6 ภาพทางเรขาคณิตของการตรวจพบที่ใช้การส่งผ่านรูปแบบ

สำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาวิธีการตรวจพบและวินิจฉัยความผิดพร่องตามแนวทางของ M.M. Polycapou และ A.J. Helmicki ซึ่งเป็นวิธีที่จัดอยู่ในวิธีที่ใช้แบบจำลอง โดยมีการปรับปรุงในส่วนของการวินิจฉัยความผิดพร่อง ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 3 ต่อไป