บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ความนำ

บทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ โดยจะกล่าวถึง ก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับอ่านข้อมูลของก๊าซเซนเซอร์ ชุด TMS320C5x DSP Starter Kit (DSK) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับการรับข้อมูลคำสั่งจากเครื่องคอมพิวเตอร์แม่และส่งข้อมูลที่อ่านได้จากก๊าซเซนเซอร์ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ และเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของก๊าซ

2.1 ก๊าซเซนเซอร์และวงจรที่ใช้ตรวจวัด

ก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้ทำขึ้นจากสารกึ่งตัวนำของดีบุกออกไซด์ (SnO_2) แบบเซรามิก (ceramic) ของบริษัท Figaro Engineering ที่มีลักษณะและโครงสร้างภายในดังรูปที่ 2.1 โดยก๊าซเซนเซอร์แต่ละตัวมีการทำงานเหมือนกันคือ เมื่อมีไอระเหยของสารตัวอย่างเข้าสู่ตัวเซนเซอร์ก็จะทำให้ค่าความต้านทานของตัวเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีออกซิเจนผ่านก๊าซเซนเซอร์ซึ่งเป็นผลึกดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิสูง โมเลกุลของออกซิเจนในก๊าซพาห์จะถูกดูดซับ (adsorbed) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกดีบุกออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.1 (Figaro Gas Sensor, Figaro Engineering Inc., 1993) ทำให้บริเวณผิวหน้าของผลึกดีบุกออกไซด์เปลี่ยนแปลงเป็น O^-_2ad O^-_2ad ที่เกิดขึ้นจะเปรียบเสมือนกำแพงพลังงานศักย์ (potential barrier) ที่จะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ถ้าในขณะนั้นมีก๊าซที่เป็นตัวรีดิวซ์อยู่บริเวณผิวหน้าของผลึกดีบุกออกไซด์ จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากก๊าซสู่ O^-_2ad ทำให้กำแพงพลังงานต่างศักย์ลดลงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์และความเข้มข้นของก๊าซที่เป็นตัวรีดิวซ์แสดงได้ดังสมการ 2.2 (Figaro Gas Sensor, Figaro Engineering Inc., 1993) กล่าวคือ ความเข้มข้นของก๊าซที่เป็นตัวรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ลดลง

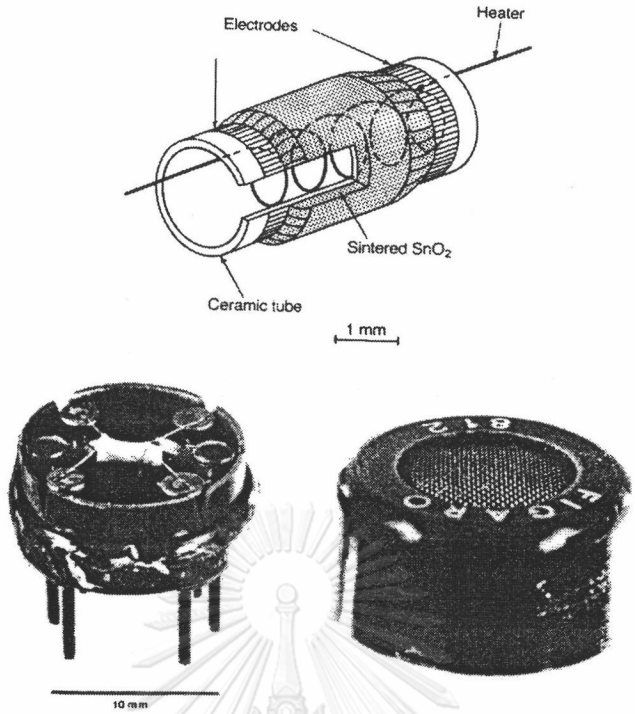
$$O_2 + e \longrightarrow O^-_2ad \qquad (2.1)$$

$$R = A[C]^{-\alpha} \qquad (2.2)$$

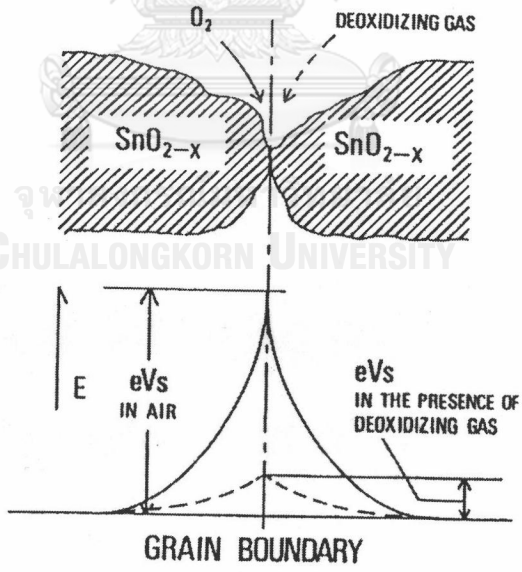
เมื่อ R = ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์

A, α = ค่าคงที่

$[C]$ = ความเข้มข้นของก๊าซ



รูปที่ 2.1 ก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกำแพงพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอน
(Figaro gas sensor, Figaro engineering Inc., 1993)

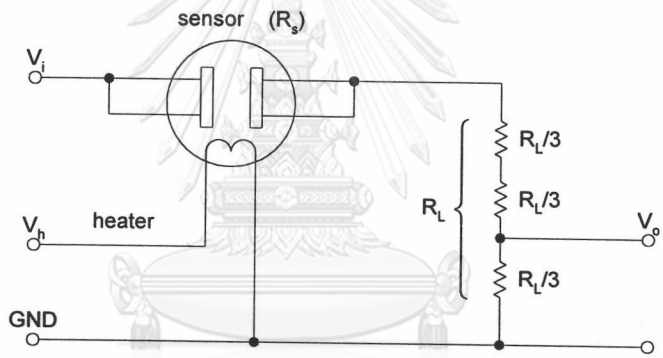
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วงจรวัดสัญญาณของก๊าซเซนเซอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง V_i ค่า 9V เพื่อป้อนให้กับก๊าซเซนเซอร์ และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงค่า 5V (V_h) เพื่อป้อนให้แก่ขดลวดความร้อนของก๊าซเซนเซอร์ ตัวต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ (R_s) และ ตัวต้านทาน (R_L) จะต่ออนุกรมกัน ค่าความต้านทาน (R_L) ที่ใช้จะเลือกค่าให้เหมาะสมกับก๊าซเซนเซอร์

เนื่องจากภาคแปลงแอนะลอกเป็นดิจิตอลของตัว remote module รับแรงดันได้ไม่เกิน $\pm$ 3V ดังนั้นจึงได้มีการดัดแปลงวงจรเล็กน้อยโดยจะแบ่ง R_L ออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน เพื่อจัดเป็นวงจรแบ่งแรงดัน (voltage divider) ลดทอนแรงดันลงเหลือ หนึ่งในสาม ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าจากหัววัด (V_o) และค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ (R_s) สามารถแสดงได้ในสมการที่ 2.3 กล่าวคือ ค่าความต้านทานของก๊าซเซนเซอร์ลดลง จะทำให้ค่าแรงดัน V_o มากขึ้น

$$V_o = V_i\left(\frac{R_L/3}{R_L + R_S}\right) \qquad (2.3)$$



รูปที่ 2.3 วงจรไฟฟ้าที่ใช้กับก๊าซเซนเซอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 ตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลและชุด DSK

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของชุด DSK (Digital Signal Processing Starter Kit) ของบริษัทเทกซัสอินสตรูเมนท์ (Texas Instrument หรือ TI) ที่ใช้ในตัว remote module ของระบบเฝ้าตรวจอากาศระยะไกล

ชุด DSK เป็นอุปกรณ์สำหรับการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลที่สมบูรณ์แบบประกอบทั้งส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ส่วนฮาร์ดแวร์ประกอบด้วยชิป TMS320C50 ที่เป็นตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอลแบบฟิกซ์พอยต์ (fixed-point) 16 บิต ภายในชิปมีเนื้อที่สำหรับหน่วยความจำอยู่จำนวนหนึ่งและมีสมรรถนะในการทำงานที่สูง ส่วนติดต่อกับข้อมูลภายนอกจะมีตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนะลอก (D/A) และแปลงแอนะลอกเป็นดิจิตอล (A/D) ความละเอียด 14 บิต ที่ใช้ชิป TLC32040 ส่วนของซอฟต์แวร์จะมีตัวแปลภาษาแอสเซมบลีและตัวดีบักเกอร์

2.3 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้น

หลังจากที่ทดลองเก็บค่าตัวอย่างก๊าซที่ทราบชนิดและปริมาณความเข้มข้นแล้ว จะสามารถนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างที่ไม่ทราบค่าได้ การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของก๊าซสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น ใช้นิลรอนเน็ตเวิร์ก,ฟัซซี่ลอจิกในการวิเคราะห์ หรือจะใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression) สำหรับการวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรง

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรงนี้จะจัดข้อมูลที่วัดค่ามาหลายๆ ชุด ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์เพื่อสะดวกต่อการคำนวณ การกำหนดเมตริกซ์จะกำหนดเมตริกซ์สองตัวคือเมตริกซ์อินพุตที่เป็นค่าแรงดันของก๊าซเซนเซอร์ ส่วนเมตริกซ์เอาต์พุตจะเป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง ตามปกติเมื่อวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรงแล้วก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต สำหรับการวิจัยนี้ก็จะจัดเรียงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการอยู่ในรูปเมตริกซ์ที่เรียกว่าเมตริกซ์ปรับเทียบ (calibration matrix) เมื่อนำเมตริกซ์ปรับเทียบไปคูณกับเมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์ก็จะได้ผลลัพธ์เป็นค่าความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง

2.3.1 เมตริกซ์ผกผันเสมือน (pseudo inverse matrix)

สำหรับการเก็บข้อมูลจากก๊าซเซนเซอร์แล้วนำค่าแรงดันจากก๊าซเซนเซอร์มาสร้างเมตริกซ์ข้อมูล ถ้าจำนวนของข้อมูลแรงดันที่วัดได้ในแต่ละครั้งไม่เท่ากับจำนวนชุดข้อมูลที่วัด จะทำให้เมตริกซ์ที่ได้นั้นมีขนาดไม่เป็นจัตุรัส ทำให้ไม่สามารถหาเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์นั้นได้ ในกรณีนี้เรามีวิธีที่สามารถหาเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์ข้อมูลได้ โดยเมตริกซ์ที่ได้นี้เรียกว่าเมตริกซ์ผกผันเสมือน

การหาเมตริกซ์ผกผันเสมือนทำได้โดย เริ่มจากการเปลี่ยนเมตริกซ์ที่ไม่เป็นจัตุรัสนี้ให้เป็นเมตริกซ์จัตุรัสซึ่งทำได้โดยการนำเมตริกซ์ตัวนั้นมาคูณด้วยเมตริกซ์ตัวเดียวกันที่ผ่านการแปลงแถวหลักแล้ว หรือนำเมตริกซ์ตัวนั้นมาแปลงแถวหลักก่อนแล้วจึงคูณด้วยเมตริกซ์ดั้งเดิม แล้วแต่ขนาดของเมตริกซ์ เมื่อเปลี่ยนเป็นเมตริกซ์จัตุรัสแล้วจะสามารถหาเมตริกซ์ผกผันได้

เมื่อ A เป็นเมตริกซ์ใดๆ ที่มีขนาด m x n

กรณีที่ m < n

$$A A^{\dagger} = I_m \tag{2.4}$$

$$A^{\dagger} = A^T (A A^T)^{-1} \tag{2.5}$$

เมื่อ $A^{\dagger}$ แทน ตัวผกผันเสมือนของเมตริกซ์ A

กรณีที่ n < m

$$A^{\dagger} A = I_n \tag{2.6}$$

$$A^{\dagger} = (A^T A)^{-1} A^T \tag{2.7}$$

เมื่อ $A^{\dagger}$ แทนตัวผกผันเสมือนของเมตริกซ์ A

2.3.2 การหาเมตริกซ์ปรับเทียบโดยใช้เมตริกซ์ Q (Q-matrix calibration)

$$Q = C\ (A^T A)^{-1} A^T \qquad (2.8)$$

เมื่อ Q แทนเมตริกซ์ปรับเทียบ (calibration matrix)

C แทนเมตริกซ์ความเข้มข้น (concentration matrix)

A แทนเมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์ (absorbance matrix) ที่จัดเรียงข้อมูลเป็นเมตริกซ์แถวตั้ง โดยจัดเรียงข้อมูลแต่ละชุดในแถวตั้ง

Q-matrix จะใช้ในกรณีที่เมตริกซ์สัญญาณจากก๊าซเซนเซอร์มีค่า m > n คือข้อมูลที่วัดได้จากก๊าซเซนเซอร์ (ในกรณีนี้คือค่าแรงดันที่วัดได้จากก๊าซเซนเซอร์) มากกว่าจำนวนชุดของก๊าซตัวอย่างที่เก็บ (ถ้าเทียบกับสมการเชิงเส้นหลายตัวแปรก็คือ มีจำนวนสมการมากกว่าตัวแปร)

2.3.3 การหาเมตริกซ์ปรับเทียบโดยใช้ Inverse Least Square (P-matrix) Calibrations

$$P = C\,A^T (A\,A^T)^{-1} \qquad (2.9)$$

เมื่อ P แทนเมตริกซ์ปรับเทียบ

C แทนเมตริกซ์ความเข้มข้น

A แทนเมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์ (absorbance matrix) ที่จัดเรียงข้อมูลเป็นเมตริกซ์แถวตั้ง โดยจัดเรียงข้อมูลแต่ละชุดในแถวตั้ง

P-matrix จะใช้ในกรณีที่เมตริกซ์สัญญาณจากก๊าซเซนเซอร์มีค่า m < n คือมีข้อมูลที่วัดจากก๊าซเซนเซอร์น้อยกว่าจำนวนชุดของก๊าซตัวอย่างที่เก็บ (ถ้าเทียบกับสมการเชิงเส้นหลายตัวแปรก็คือ มีจำนวนสมการน้อยกว่าตัวแปร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.4 การหาเมตริกซ์ปรับเทียบโดยใช้ Principal Component Regression

วิธี Principal Component Regression (PCR) บางครั้งก็จะเรียกว่า Principal Component Analysis (PCA) หรือ Factor Analysis ขั้นตอนการหาเมตริกซ์ปรับเทียบของ PCR มี 2 ขั้นตอน

เริ่มต้นด้วยการหาเซ็ตเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกัน (mutually orthonormal vectors) ที่แผ่คลุม (span) เมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นการหาเวกเตอร์เจาะจง (eigen vector) ของเมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์ โดยเวกเตอร์เจาะจงนี้จะเรียงจากตัวที่มีค่ามากไปยังตัวที่มีค่าน้อย ขั้นตอนนี้จะมีชื่อเรียกว่า PCA หรือ Factors Analysis

ขั้นตอนที่สองเป็นการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรง โดยจะลดทอนความซับซ้อนของข้อมูลโดยใช้ข้อมูลบางส่วนขององค์ประกอบที่หาได้เนื่องจากองค์ประกอบในตัวหลังที่มีค่าน้อยๆ นี้จะเป็นองค์ประกอบที่ไม่มีความสำคัญมากนักในบางกรณีก็จะเป็นส่วนที่มาจากสัญญาณรบกวนหรือค่าความผิดพลาดของการวัด หลังจากที่หาเวกเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์แล้ว ก็จะนำเมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์นี้ไป

ฉาย (project) ลงบนเวกเตอร์เจาะจงจำนวนไม่กี่ตัวแรก หลังจากที่ได้สัญญาณใหม่ที่ผ่านการลดข้อมูลในส่วนที่ไม่สำคัญออกแล้วจะนำสัญญาณที่ได้นี้มาวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นตรงต่อไป

$$proj = V^T A \tag{2.10}$$

$$f = C\ proj^T\ (proj\ \ proj^T)^{-1} \tag{2.11}$$

$$fcal = f\,V^T \tag{2.12}$$

เมื่อ V แทนเมตริกซ์ที่มีเวกเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์ A

A แทนเมตริกซ์สัญญาณก๊าซเซนเซอร์

C แทนเมตริกซ์ความเข้มข้น

$fcal$ แทนเมตริกซ์ปรับเทียบ

f แทนเมตริกซ์ปรับเทียบที่อยู่ใน factor space

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY