

การวิเคราะห์กลไกแบบสี่คันด้วยไมโครคอมพิวเตอร์  
Analyst of Four Links Mechanism by Microcomputer

สุรเชษฐ์ ชุติมา  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

กลไกแบบสี่คันเป็นกลไกพื้นฐานของเครื่องจักรกลต่าง ๆ การศึกษาและการวิเคราะห์คุณลักษณะตลอดจนคุณสมบัติของกลไก จะมีส่วนช่วยในการพัฒนาเครื่องจักรกล ทั้งในด้านรูปลักษณะและคุณสมบัติในการใช้สอย งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์เอาไมโครคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของกลไกแบบสี่คันบนระนาบเดียวกัน เช่น การขจัด ความเร็ว ความเร่ง แรง และ couple curve โดยการแปลงปริมาณเวกเตอร์ให้อยู่ในรูปพีชคณิตเชิงซ้อน และจัดผลการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ เพื่อแก้สมการด้วยคอมพิวเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนากลไกในระบบสามมิติด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป

บทนำ

กลไกต่าง ๆ ในเครื่องจักรกลทั่วไปมีพื้นฐานมาจากกลไกแบบสี่คัน ได้แก่ Four-bar Slider-crank และ Inverted slider-crank การวิเคราะห์การขจัด ความเร็ว ความเร่ง แรงกระทำที่ข้อต่อ ตลอดจน couple curve เดิมใช้วิธีวาดภาพจำลองเขียนเวกเตอร์ และวัดขนาดหาค่า<sup>1,2</sup> วิธีการดังกล่าวเสียเวลามากและมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ง่าย Martin<sup>3</sup> และ Soni<sup>4</sup> ได้ใช้พีชคณิตเชิงซ้อนมาแทนเวกเตอร์ต่าง ๆ ของกลไกแบบสี่คัน ทำให้การวิเคราะห์เป็นไปในเชิงคณิตศาสตร์ และได้ผลลัพธ์เป็นค่าตัวเลขซึ่งแม่นยำกว่าวิธีวาดภาพ แต่ไม่คอยแพร่หลายนักเนื่องจากประสิทธิภาพและความยุ่งยากในการใช้ของเครื่องคำนวณในยุคนั้น วิธีการวิเคราะห์เช่นนี้ได้รับการพัฒนาให้ก้าวหน้าขึ้นตามลำดับโดยประยุกต์เอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการปรับปรุงให้

ดีขึ้นมาใช้ในการแก้ปัญหา ควบคู่ไปกับขีดความสามารถและความสะดวกในการใช้งานของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทันสมัย Suh กับ Radcliffe<sup>5</sup> ได้อาศัยการแกสมการ โดยวิธีเมทริกซ์เข้าช่วย และพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปจนใช้ได้กับเครื่องเมนเฟรมคอมพิวเตอร์ และมีคอมพิวเตอร์ จึงทำให้การวิเคราะห์กลไกสะดวกขึ้นในปัจจุบัน

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์กลไกแบบสี่ขึ้นบนระนาบเดียวกันด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งสำหรับการขจัดความเร็ว และความเร่งจะใช้วิเคราะห์โดยพีชคณิตเชิงซ้อน ส่วนการหาแรงกระทำที่จุดต่อจะอาศัยผลของความเร่งมาสร้างสมการ และแกสมการด้วยเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังใช้หาคุณลักษณะของกลไก เช่น ตำแหน่งการขจัดสูงสุด-ต่ำสุด มุมการส่งกำลังสูงสุด-ต่ำสุด และตำแหน่งของจุดตาย อีกทั้งโปรแกรมจะสามารถบอกทั้งขนาดและทิศทาง ตลอดจนแสดงภาพการเคลื่อนที่ของกลไกบนจอภาพด้วย ซึ่งจากผลของการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับเอกสารอ้างอิง [5] ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก

ทฤษฎี

กลไกแบบสี่ขึ้นจะแบ่งออกเป็น Four-bar Slider-crank และ Invert slider-crank การวิเคราะห์จะแยกวิเคราะห์เป็น

Four-bar mechanism

การขจัดของ Four-bar mechanism  $\vec{A}$   $\vec{B}$   $\vec{C}$  และ  $\vec{D}$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปพีชคณิตเชิงซ้อนได้เป็น

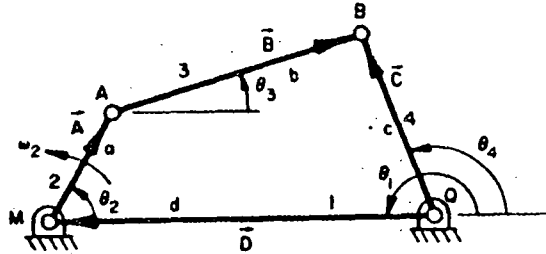
$$\begin{aligned} \vec{A} &= ae^{j\theta_2} & \vec{B} &= be^{j\theta_3} \\ \vec{C} &= ce^{j\theta_4} & \vec{D} &= de^{j\theta_1} \end{aligned}$$

และจาก

$$\vec{A} + \vec{B} - \vec{C} + \vec{D} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

แทน  $e^{j\theta_i}$  ด้วย  $e^{j\theta_i} = \cos\theta_i + j \sin\theta_i$

และแยกส่วนจริงกับส่วนจินตภาพออกเป็น 2 สมการคือ



รูปที่ 1 Four-bar mechanism

$$d \cos\theta_1 + a \cos\theta_2 + b \cos\theta_3 - c \cos\theta_4 = 0 \dots\dots\dots(2)$$

$$d \sin\theta_1 + a \sin\theta_2 + b \sin\theta_3 - c \sin\theta_4 = 0 \dots\dots\dots(3)$$

จากรูปที่ 1 เมื่อให้  $\theta_1 = 180^\circ$  จักรูปสมการใหม่และอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta_2$  กับ  $\theta_4$  ในสมการที่ (3) จะได้

$$A \tan^2 \frac{\theta_4}{2} + B \tan \frac{\theta_4}{2} + C = 0 \dots\dots\dots(4)$$

โดย

$$A = \cos\theta_2 + k_3 - k_1 - k_2 \cos\theta_2$$

$$B = -2 \sin\theta_2$$

$$C = k_1 + k_3 - (1 + k_2) \cos\theta_2$$

$$k_1 = \frac{d}{a}$$

$$k_2 = \frac{d}{c}$$

$$k_3 = \frac{a^2 - b^2 + c^2 + d^2}{2ac}$$

ซึ่งสำหรับแต่ละ input angle  $\theta_2$  จะสามารถหา  $\theta_4$  ได้ 2 ค่าคือ

$$[\theta_4]_{1,2} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right) \dots\dots\dots(5)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับ  $\theta_3$  ก็จะได้ 2 ค่าจาก  $\theta_2$

$$[\theta_3]_{1,2} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2E} \right) \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อ

$$D = k_4 \cos \theta_2 + \cos \theta_2 + k_5 - k_1$$

$$E = -2 \sin \theta_2$$

$$F = k_4 \cos \theta_2 - \cos \theta_2 + k_5 + k_1$$

$$k_4 = \frac{d}{b}$$

$$k_5 = \frac{c^2 - d^2 - a^2 - b^2}{2ab}$$

และถ้า  $\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุมของแขนกลไก จะได้ว่า

$$\omega_4 = \frac{a\omega_2 \sin(\theta_2 - \theta_3)}{c \sin(\theta_4 - \theta_3)} \dots\dots\dots(7)$$

กับ

$$\omega_3 = \frac{a\omega_2 \sin(\theta_4 - \theta_2)}{b \sin(\theta_3 - \theta_4)} \dots\dots\dots(8)$$

ส่วนความเร่งเชิงมุม ( $\alpha$ ) จะเป็น

$$\alpha_3 = \frac{CD - AF}{AE - BD} \dots\dots\dots(9)$$

$$\alpha_4 = \frac{CE - BF}{AE - BD} \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ

$$A = c \sin \theta_4$$

$$B = b \sin \theta_3$$

$$C = a\alpha_2 \sin \theta_2 + a\omega_2^2 \cos \theta_2 + b\omega_3^2 \cos \theta_3 - c\omega_4^2 \cos \theta_4$$

$$D = c \cos \theta_4$$

$$E = b \cos \theta_3$$

$$F = a\alpha_2 \cos \theta_2 - a\omega_2^2 \sin \theta_2 - b\omega_3^2 \sin \theta_3 + c\omega_4^2 \sin \theta_4$$

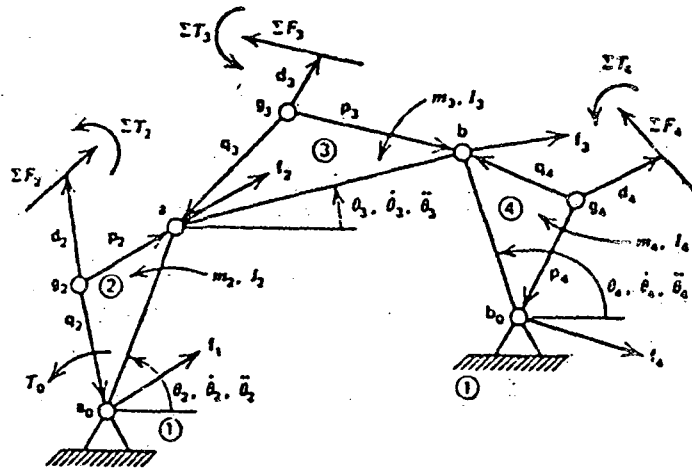
และแรงกระทำที่ข้อต่อสามารถสร้างเมทริกซ์ไดโอมอติสมการสมมูลของแรงและโมเมนต์คือ

$$f_i - f_{i-1} + \Sigma F_i = m_i \ddot{g}_i \dots\dots\dots(11)$$

$$p_i \times f_i - q_i \times f_{i-1} + d_i \times \Sigma F_i + \Sigma T_i = I_i \ddot{\theta}_i \dots\dots\dots(12)$$

โดยที่

- $p_i$  = เวกเตอร์จาก  $q_i$  ไปยังข้อต่อ  $i$
- $q_i$  = เวกเตอร์จาก  $q_i$  ไปยังข้อต่อ  $i - 1$
- $d_i$  = เวกเตอร์จาก  $q_i$  ไปยังตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนแนวของ  $\Sigma F_i$
- $g_i$  = จุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วน  $i$
- $\Sigma F_i$  = ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำกับชิ้นส่วน  $i$  ยกเว้นแรงที่ข้อต่อ  $f_i$  และ  $f_{i-1}$
- $\Sigma T_i$  = ผลรวมของโมเมนต์คู่ควบที่กระทำกับชิ้นส่วน  $i$  ยกเว้นแรงบิดที่ให้กับชิ้นส่วนที่ 2



รูปที่ 2 แสดงทฤษฎีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ Four-bar mechanism

ซึ่งจากสมการสมมูลข้างต้นสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix}
 -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 q_{2y} & -q_{2x} & -p_{2y} & p_{2x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & q_{3y} & -q_{3x} & -p_{3y} & p_{3x} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & q_{4y} & -q_{4x} & -p_{4y} & p_{4x} & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 f_{1x} \\
 f_{1y} \\
 f_{2x} \\
 f_{2y} \\
 f_{3x} \\
 f_{3y} \\
 f_{4x} \\
 f_{4y} \\
 T_2
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 m_2 \ddot{g}_{2x} - \Sigma F_{2x} \\
 m_2 \ddot{g}_{2y} - \Sigma F_{2y} \\
 I_2 \ddot{\theta}_2 - \Sigma T_2 - (d_2 \times \Sigma F_2) \\
 m_3 \ddot{g}_{3x} - \Sigma F_{3x} \\
 m_3 \ddot{g}_{3y} - \Sigma F_{3y} \\
 I_3 \ddot{\theta}_3 - \Sigma T_3 - (d_3 \times \Sigma F_3) \\
 m_4 \ddot{g}_{4x} - \Sigma F_{4x} \\
 m_4 \ddot{g}_{4y} - \Sigma F_{4y} \\
 I_4 \ddot{\theta}_4 - \Sigma T_4 - (d_4 \times \Sigma F_4)
 \end{bmatrix}
 \dots\dots\dots (13)$$

โดย  $p_2 = (a - g_2)$      $p_3 = (b - g_3)$      $p_4 = (b_0 - g_4)$   
 $q_2 = (a_0 - g_2)$      $q_3 = (a - g_3)$      $q_4 = (b - g_4)$

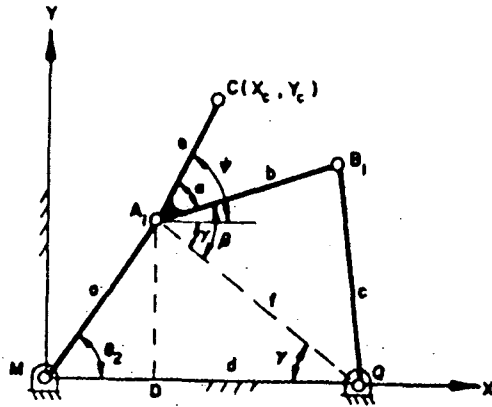
ส่วนคุณลักษณะของ Four-bar และ couple curve จะใช้ Grashoff criteria จำแนกชนิดของ Four-bar จากนั้นก็หาความสัมพันธ์ ระหว่างมุมของชิ้นส่วน ( $\theta_2$ ) กับตำแหน่งของ coupler point (จุด c ในรูปที่ 3) ได้เป็น

$$x_c = a \cos\theta_2 + e \cos(\beta - \gamma + \alpha) \dots\dots\dots (14a)$$

$$y_c = a \sin\theta_2 + e \sin(\beta - \gamma + \alpha) \dots\dots\dots (14b)$$

เมื่อ 
$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{(4b^2 f^2 - (b^2 + f^2 - c^2)^2)^{\frac{1}{2}}}{b^2 + f^2 - c^2} \right]$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{a \sin\theta_2}{d - a \cos\theta_2}$$

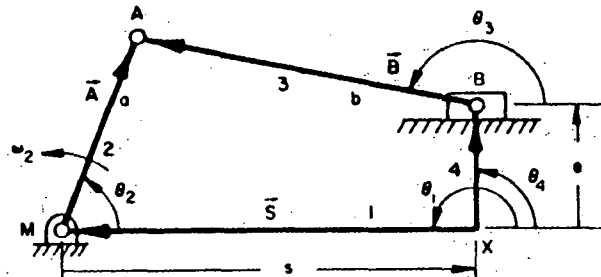


รูปที่ 4 แสดงตำแหน่ง coupler point ของ Four-bar mechanism

Slider-crank mechanism

Slider-crank mechanism จะมีสามข้อต่อเป็นข้อต่อแบบหมุน และข้อต่อตัวสุดท้ายจะเป็นข้อต่อสัมผัสกับโลกหรือลูกสูบ ซึ่งเพลาคrank จะหมุนได้ครบรอบสมบูรณ์ต่อเมื่อ

ความยาวของ connecting rod - รัศมีข้อเหวี่ยง  $\geq$  | offset |



รูปที่ 5 Slider-crank mechanism

จากรูปที่ 5  $\vec{s} + \vec{A} - \vec{B} = \vec{E}$  ..... (15)

จะได้การขจัดคือ  $[s]_{1,2} = \frac{-M \pm \sqrt{M^2 - 4LN}}{2L}$  ..... (16)

เมื่อ

$$L = 1$$

$$M = -2a \cos\theta_2$$

$$N = a^2 + e^2 - b^2 - 2a e \sin\theta_2$$

ส่วนสมการความเร็วจะเป็นดังสมการที่(17) กับ (18) และสมการความเร่งจะเป็นดังสมการที่ (19) กับ (20)

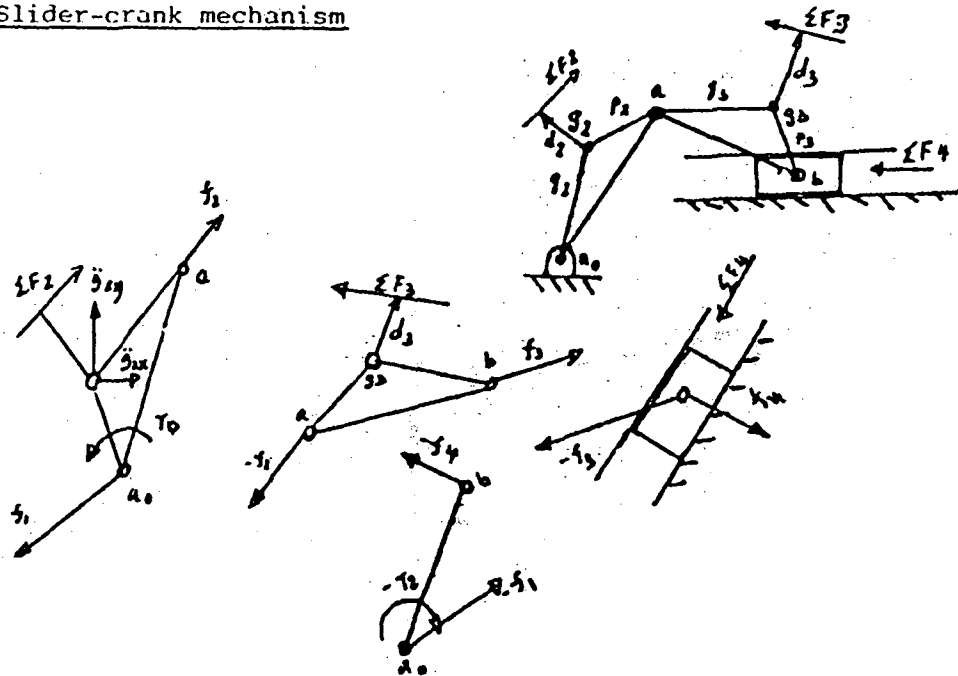
$$\dot{s} = a\omega_2 \frac{\sin(\theta_3 - \theta_2)}{\cos\theta_3} \dots\dots\dots(17)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left( \frac{e - a \sin\theta_2}{b} \right) \dots\dots\dots(18)$$

$$\ddot{s} = \frac{a\alpha_2 \sin\theta_2 + a\omega_2^2 \cos\theta_2 - b\alpha_3 \sin\theta_3 - b\omega_3^2 \cos\theta_3}{\cos\theta_1} \dots\dots(19)$$

$$\alpha_3 = \frac{a\alpha_2 \cos\theta_2 - a\omega_2^2 \sin\theta_2 + b\omega_3^2 \sin\theta_3}{b \cos\theta_3} \dots\dots\dots(20)$$

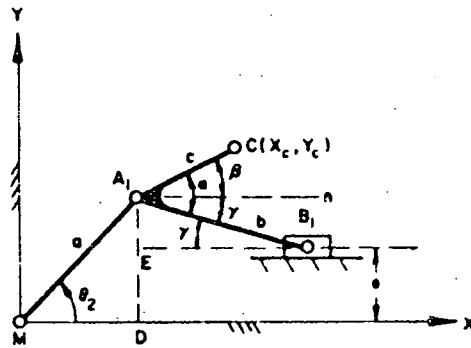
Slider-crank mechanism



รูปที่ 6 แสดง freebody diagrams ที่ใช้วิเคราะห์แรงกระทำที่ข้อต่อของ slider-crank mechanism



สำหรับการวิเคราะห์แรงกระทำที่ข้อต่อของ slider-crank mechanism จะได้เมทริกซ์ตั้งเช่น สมการที่ (13) ค้างกันตรงที่แถวที่ 9 ของเมทริกซ์ซ้ายสุดจะมีค่าเป็นศูนย์หมดทุกเทอม ยกเว้น ในสัณฐานที่ 7 มีค่าเท่ากับ 1 และแถวที่ 9 ของเมทริกซ์ขวาสุดก็มีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน coupler point (จุด c ในรูปที่ 7) หากจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 7 ได้เป็น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ของ slider-crank mechanism กับตำแหน่งของ coupler point

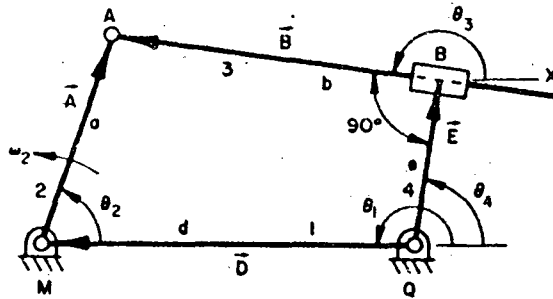
$$x_c = a \cos \theta_2 + e \cos(\alpha - \gamma) \dots\dots\dots(21)$$

$$y_c = a \sin \theta_2 + e \sin(\alpha - \gamma) \dots\dots\dots(22)$$

โดยที่ 
$$\gamma = \sin^{-1} \left[ \frac{a \sin \theta_2 - c}{b} \right]$$

Inverted slider-crank mechanism

Inverted slider-crank mechanism แบ่งออกเป็น 2 ชนิด แต่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะ ชนิดที่ข้อต่อระหว่างชิ้นส่วนที่ 3 และชิ้นส่วนที่ 4 เป็นข้อต่อแบบสไลด์ โดยที่ชิ้นส่วนที่ 3 เป็น bar ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะได้



รูปที่ 8 Inverted slider-crank mechanism

$$\vec{D} + \vec{A} - \vec{B} - \vec{E} = 0 \dots\dots\dots(23)$$

จะได้ว่า

$$[\theta_4]_{1,2} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-k_2 \pm \sqrt{k_2^2 - 4k_1 k_3}}{2k_1} \right) \dots\dots\dots(24)$$

เมื่อ

$$k_1 = d - e - a \cos\theta_2$$

$$k_2 = 2a \sin\theta_2$$

$$k_3 = a \cos\theta_2 - d - e$$

สมการความเร็วคือ

$$\omega_4 = \frac{a\omega_2}{b} \sin(\theta_2 - \theta_4) \dots\dots\dots(25)$$

$$b = \frac{a\omega_2}{b} (b \cos(\theta_4 - \theta_2) - e \sin(\theta_4 - \theta_2)) \dots\dots\dots(26)$$

และสมการความเร่งคือ

$$\alpha_4 = \frac{AF - CD}{aE - BD} = \alpha_3 \dots\dots\dots(27)$$

$$b = \frac{DE - BF}{AE - BD} \dots\dots\dots(28)$$

เมื่อ

$$A = \sin\theta_4$$

$$B = b \cos\theta_4 + e \sin\theta_4$$

$$C = a\omega_2^2 \cos\theta_2 + a\alpha_2 \sin\theta_2 - 2b\omega_4 \cos\theta_4 + b\omega_4^2 \sin\theta_4 - e\omega_4^2 \cos\theta_4$$

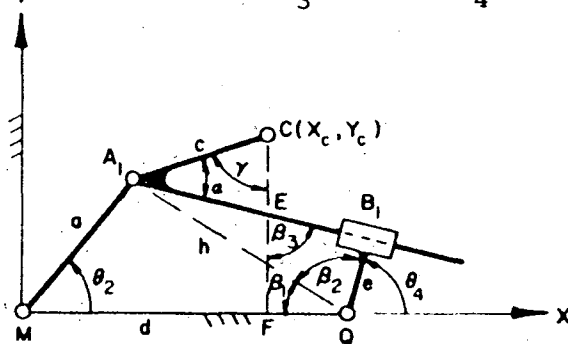
$$D = \cos\theta_4$$

$$E = -b \sin\theta_4 + e \cos\theta_4$$

$$F = -a\omega_2^2 \sin\theta_2 + a\alpha_2 \cos\theta_2 + 2b\omega_4 \sin\theta_4 + b\omega_4^2 \cos\theta_4 + e\omega_4^2 \sin\theta_4$$

แรงกระทำที่ข้อต่อจะมีเมทริกซ์คังสมการที่ (13) ดังกันตรงที่แถวที่ 9 สดมกที่ 5

เป็น  $e_y$  และสดมกที่ 6 เป็น  $e_x$  ส่วนเทอมอื่นในแถวมีค่าเป็นศูนย์ และต้องมีสมการที่แสดงว่าแรงจะตั้งฉากกับชิ้น ส่วนที่ 3 คือ  $e \cdot f_3$  หรือ  $e \cdot f_4$  เท่ากับศูนย์



รูปที่ 9 แสดง coupler point C ของ inverted slider-crank mechanism

ส่วน coupler point นั้นอาศัยความสัมพันธ์กับตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 9 หาได้ว่า

$$x_c = a \cos\theta_2 + c \sin(180 - \alpha - \theta_4) \dots\dots(29)$$

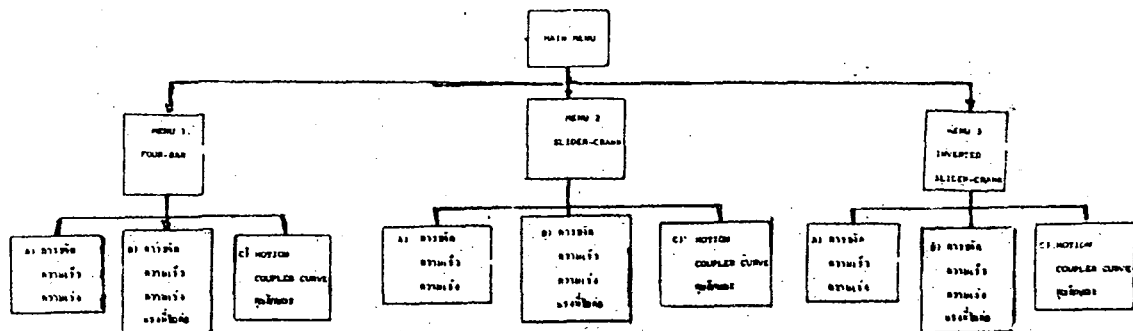
$$y_c = a \sin\theta_2 + c \cos(180 - \alpha - \theta_4) \dots\dots(30)$$

## โปรแกรมคอมพิวเตอร์

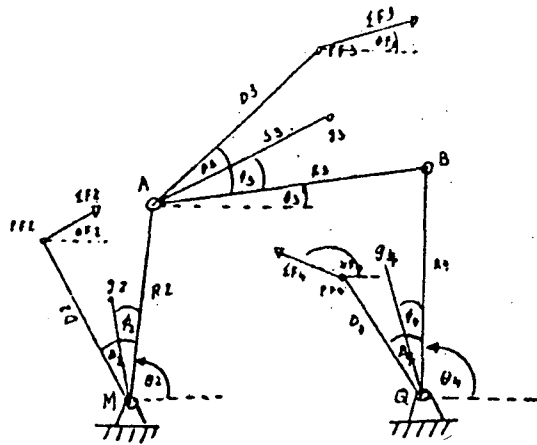
งานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ของ IBM แบบ 16 บิต RAM 64 KB หรือมากกว่า ประกอบด้วย Floppy disk drive อย่างน้อย 1 หน่วย เครื่องพิมพ์เพื่อพิมพ์ผล และจอภาพที่มีความละเอียดอย่างน้อย 640 จุด × 200 จุด ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้จะเลือกใช้ภาษา BASIC เนื่องจากง่ายในการปรับปรุงแก้ไขหรือดัดแปลงต่อไปในอนาคต และใช้ BASIC compiler แปลงให้เป็นภาษาเครื่อง

โปรแกรมหลักจะแบ่งออกเป็น 3 โปรแกรมย่อยตามชนิดของ mechanism คือ Four-bar Slider-crank และ Inverted slider-crank โดยจะสามารถวิเคราะห์

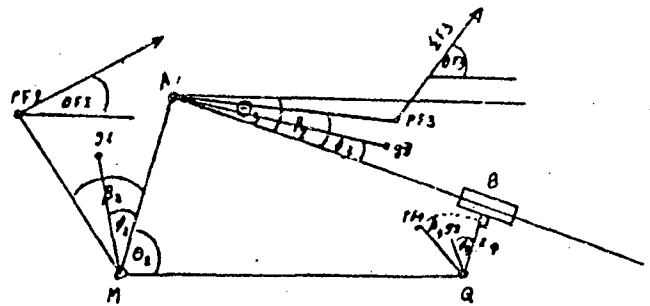
- ก) Kinematics of Mechanism คือ การขจัด ความเร็ว และความเร่งโดยไม่คำนึงถึงแรง
  - ข) Dynamics of Mechanism คือ การขจัด ความเร็ว และความเร่ง โดยคำนึงถึงแรงที่กระทำที่ข้อต่อ
  - ค) Coupler curve และคุณลักษณะของกลไก
- การแสดงผล จะแสดงไทม์จอกภาพ และ/หรือเครื่องพิมพ์



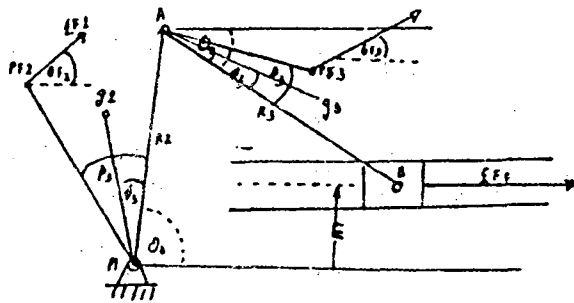
รูปที่ 10 Tree diagram แสดงการแบ่งส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรม



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 11 แสดงสัญลักษณ์ของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

- ก) Four-bar
- ข) Slider-crank
- ค) Inverted slider-crank

THE FOUR - BAR MECHANISM  
VELOCITY, ACCELERATION AND FORCE ANALYSIS

INPUT COORDINATE FORM				INPUT CRANK ANGLE (α2) = 2 (deg.)			
POINT	I	J		ANGLE OF B3 (α3) = 64.0000 (deg.)			
B	0	0		ANGLE OF B4 (α4) = 89.62675 (deg.)			
C62	.5	0					
A	1	0					
C63	2	1					
B	3	2					
C64	3	1					
B	3	0					
GEOMETRY OF THE LINKS				POINT POSITION VELOCITY ACCELERATION			
B1 = 1	(x1) = 0	(y1) = 0	(deg.)	B	0	0	0
B2 = 1	(x2) = .5	(y2) = 0	(deg.)	B2	.999729	1.744973E-02	316
B3 = 2.828427	(x3) = 1.414214	(y3) = 0	(deg.)	B	.999729	.0340992	620
B4 = 2	(x4) = 1	(y4) = 0	(deg.)	B3	2.814401	1.637395	620
				B	1.033711	1.999711	594.0002
				B4	1.014984	.9997538	297.0001
				B	3	0	0
				B2	0	0	0
				B3	-313.4363	rad./s. 3 = 26263.0	rad./s./s. 1
				B4	-297.0001	rad./s. 4 = 315407	rad./s./s. 1
PHYSICAL PROPERTIES				FORCE ANALYSIS			
B2 = .0003 (kg.)	B3 = 7.500000E-05 (kg.s.s.c.u.)	B4 = .0005 (kg.)	B5 = .000416 (kg.s.s.c.u.)	F21 = 658.9286 (N.)	α21 = 32.07613 (deg.)	F32 = 448.675 (N.)	α32 = 25.2994 (deg.)
B6 = .0005 (kg.)	B7 = .000416 (kg.s.s.c.u.)	B8 = .0005 (kg.)	B9 = .0005 (kg.s.s.c.u.)	F43 = 335.4989 (N.)	α43 = 66.90079 (deg.)	F14 = 252.0170 (N.)	α14 = 89.62676 (deg.)
INPUT CRANK MOTION PARAMETERS				DRIVING OR INPUT TORQUE T2 = -334.1711 (N.m.)			
ω2 = 620 (rad/sec)	α2 = 0 (rad/sec/sect)			SHAKING FORCE COMPONENTS SF = 548.9231 (N.) αSF = 10.65892 (deg.)			
THE FIRST ANGLE OF ROTATION = 0 (deg.)	THE LAST ANGLE OF ROTATION = 3 (deg.)	THE THICKNESS DELTA = 1 (deg.)					

INPUT CRANK ANGLE (α2) = 1 (deg.)				INPUT CRANK ANGLE (α2) = 3 (deg.)			
POINT	POSITION	VELOCITY	ACCELERATION	POINT	POSITION	VELOCITY	ACCELERATION
B	0	0	0	B	0	0	0
B2	.999729	0.726294E-03	316	B2	.999729	2.813750E-02	316
A	.999729	1.745291E-02	620.0001	A	.999729	3.22270E-02	620
B3	2.814401	1.637395	620.0001	B3	2.824229	1.625253	620.0001
B	1.033711	1.999711	594.0002	B	1.034229	1.999711	594.0002
B4	1.014984	.9997538	297.0001	B4	1.025115	.9997538	297.0001
B	3	0	0	B	3	0	0
B2 = 620 (rad./s.)	α2 = 0 (rad./s./s.)	B3 = -313.4363 (rad./s.)	α3 = 18218.39 (rad./s./s.)	B2 = 620 (rad./s.)	α2 = 0 (rad./s./s.)	B3 = -312.7349 (rad./s.)	α3 = 29927.19 (rad./s./s.)
B4 = -297.0001 (rad./s.)	α4 = 325800 (rad./s./s.)			B4 = -298.112 (rad./s.)	α4 = 324001.7 (rad./s./s.)		
FORCE ANALYSIS				FORCE ANALYSIS			
F21 = 643.9786 (N.)	α21 = 32.65500 (deg.)	F32 = 554.2339 (N.)	α32 = 33.6499 (deg.)	F21 = 673.0344 (N.)	α21 = 32.27643 (deg.)	F32 = 422.106 (N.)	α32 = 31.94179 (deg.)
F43 = 324.6933 (N.)	α43 = 61.9475 (deg.)	F14 = 239.7156 (N.)	α14 = 89.56661 (deg.)	F43 = 345.5593 (N.)	α43 = 66.36641 (deg.)	F14 = 263.6221 (N.)	α14 = 88.36088 (deg.)
DRIVING OR INPUT TORQUE T2 = -337.859 (N.m.)	DRIVING OR INPUT TORQUE T2 = -329.1270 (N.m.)	SHAKING FORCE COMPONENTS SF = 554.5061 (N.)	αSF = 11.27632 (deg.)	DRIVING OR INPUT TORQUE T2 = -329.1270 (N.m.)	SHAKING FORCE COMPONENTS SF = 570.329 (N.)	αSF = 9.673161 (deg.)	

FOUR - BAR MECHANISM

INPUT CRANK ANGLE (α2) FROM 0 TO 3 (deg.)

STEP INCREASE = 1 (deg.)

F1MAX = 673.0344 (N.)	αF1MAX = 32.27643 (DEG.)	AT α2 = 3 (DEG.)
F2MAX = 422.106 (N.)	αF2MAX = 31.94179 (DEG.)	AT α2 = 3 (DEG.)
F3MAX = 345.5593 (N.)	αF3MAX = 66.36641 (DEG.)	AT α2 = 3 (DEG.)
F4MAX = 263.6221 (N.)	αF4MAX = 88.36088 (DEG.)	AT α2 = 3 (DEG.)
SFMAX = 570.329 (N.)	αSFMAX = 9.673161 (DEG.)	AT α2 = 3 (DEG.)
T2MAX = -340.1561 (N.m.)		AT α2 = 0 (deg.)

รูปที่ 12 แสดงผลการวิเคราะห์ทาง Dynamics ของ Four-bar mechanism

THE SLIDER - CRANK MECHANISM  
VELOCITY, ACCELERATION AND FORCE ANALYSIS

INPUT CRANK ANGLE (α2) = 110 deg.  
ANGLE OF R3 (α3) = 23.98253 deg.  
ANGLE OF R1 (α1) = 0 deg.

GEOMETRY OF THE LINKS

R2 = .1 (in.) S2 = .0 (in.) α1 = 0 (deg.)  
R3 = .18 (in.) S3 = .26 (in.) α2 = 110 (deg.)  
E = -.06 (in.) α3 = 23.98253 (deg.)

PHYSICAL PROPERTIES

W2 = 0 (lb.) I2 = 0 (lb.in.<sup>2</sup>)  
W3 = 7.0 (lb.) I3 = .0156 (lb.in.<sup>2</sup>)  
W4 = 3.2 (lb.)

INPUT CRANK MOTION PARAMETERS

α2 = -10 rad/sec  
ω2 = 0 rad/sec/sec

THE FIRST ANGLE OF ROTATION = 120 deg.  
THE LAST ANGLE OF ROTATION = 100 deg.  
THE INCREMENT DELTA = -10 deg.

POINT	POSITION		VELOCITY		ACCELERATION	
	X	Y	(in/s)	(in/s <sup>2</sup> )	(in/s <sup>2</sup> )	(in/s <sup>2</sup> )
R	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0
A	-3.429205E-02	9.376926E-02	1.0	26.89002	32.4	290
B3	.2726596	8.333736E-02	1.683316	5.286443	12.61587	323.9718
B	.3132976	-.06	1.816401	0	23.26966	0

α2 = -10 (rad/s) ω2 = 0 (rad/s/s)  
α3 = -1.772077 (rad/s) ω3 = 86.24954 (rad/s/s)  
α1 = 1.816401 (in./s.) ω1 = 23.26966 (in./s./s.)

FORCE ANALYSIS

F21 = 164.8052 (lb.) α21 = 161.1177 deg.  
F32 = 164.8052 (lb.) α32 = 161.1177 deg.  
F43 = 74.67825 (lb.) α43 = 184.1731 deg.  
F14 = 5.919576 (lb.) α14 = 270 deg.

DRIVING OR INPUT TORQUE T2 = -12.82594 (lb.in.)

INPUT CRANK ANGLE (α2) = 120 deg.  
ANGLE OF R3 (α3) = -22.69317 deg.  
ANGLE OF R1 (α1) = 0 deg.

INPUT CRANK ANGLE (α2) = 100 deg.  
ANGLE OF R3 (α3) = -24.64077 deg.  
ANGLE OF R1 (α1) = 0 deg.

POINT	POSITION		VELOCITY		ACCELERATION	
	X	Y	(in/s)	(in/s <sup>2</sup> )	(in/s <sup>2</sup> )	(in/s <sup>2</sup> )
R	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0
A	-5.400003E-02	8.669252E-02	1.0	34.89002	32.4	300
B3	.2699594	8.345712E-02	1.568116	8.529752	15.73683	331.6519
B	.3082819	-5.999998E-02	1.182496	0	25.21983	0

α2 = -10 (rad/s) ω2 = 0 (rad/s/s)  
α3 = -2.567131 (rad/s) ω3 = 77.28024 (rad/s/s)  
α1 = 1.182496 (in./s.) ω1 = 25.21983 (in./s./s.)

FORCE ANALYSIS

F21 = 176.9442 (lb.) α21 = 164.4126 deg.  
F32 = 176.9442 (lb.) α32 = 164.4126 deg.  
F43 = 84.91542 (lb.) α43 = 184.1731 deg.  
F14 = 5.962151 (lb.) α14 = 270 deg.

DRIVING OR INPUT TORQUE T2 = -13.78256 (lb.in.)

POINT	POSITION		VELOCITY		ACCELERATION	
	X	Y	(in/s)	(in/s <sup>2</sup> )	(in/s <sup>2</sup> )	(in/s <sup>2</sup> )
R	0	0	0	0	0	0
R2	0	0	0	0	0	0
A	-1.736405E-02	9.848070E-02	1.0	18.89002	32.4	260
B3	.2673576	8.448331E-02	1.763480	2.51933	18.32846	249.1128
B	.3280101	-5.999999E-02	1.679228	0	19.92513	0

α2 = -10 (rad/s) ω2 = 0 (rad/s/s)  
α3 = -.9050088 (rad/s) ω3 = 92.01066 (rad/s/s)  
α1 = 1.679228 (in./s.) ω1 = 19.92513 (in./s./s.)

FORCE ANALYSIS

F21 = 122.3462 (lb.) α21 = 156.267 deg.  
F32 = 122.3462 (lb.) α32 = 156.267 deg.  
F43 = 84.5244 (lb.) α43 = 188.8823 deg.  
F14 = 9.944483 (lb.) α14 = 270 deg.

DRIVING OR INPUT TORQUE T2 = -18.1749 (lb.in.)

SLIDER - CRANK MECHANISM

INPUT CRANK ANGLE (α2) FROM 120 TO 100 deg.  
STEP INCREASE = -10 deg.

F1MAX = 196.9442 (N.) αF1MAX = 164.4126 deg. AT α2 = 120 deg.  
F2MAX = 196.9442 (N.) αF2MAX = 164.4126 deg. AT α2 = 120 deg.  
F3MAX = 84.91542 (N.) αF3MAX = 184.1731 deg. AT α2 = 120 deg.  
F4MAX = 9.964483 (N.) αF4MAX = 270 deg. AT α2 = 100 deg.  
T2MAX = -13.78256 (N.m.) AT α2 = 120 deg.

รูปที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ทาง Dynamics ของ Slider-crank mechanism

INVERTED SLIDER - CRANK MECHANISM  
VELOCITY, ACCELERATION AND FORCE ANALYSIS

R1 = 3 (m.)    ϕ1 = 0 DEGREE (deg.)    2 = 0 (deg.)  
 R2 = 1 (m.)    ϕ2 = -5 (deg.)    3 = 30 (deg.)  
 R4 = 0 (m.)    ϕ4 = 0 (deg.)    4 = 0 (deg.)

**GEOMETRY OF THE LINKS**  
 R1 = 3 (m.)    ϕ1 = 0 DEGREE (deg.)    2 = 0 (deg.)  
 R2 = 1 (m.)    ϕ2 = -5 (deg.)    3 = 30 (deg.)  
 R4 = 0 (m.)    ϕ4 = 0 (deg.)    4 = 0 (deg.)

**PHYSICAL PROPERTIES**  
 M2 = .003 (kg.)    I2 = 7.500001E-05 (kg.s.s.m.)  
 M3 = .009 (kg.)    I3 = .000576 (kg.s.s.m.)  
 M4 = 0 (kg.)    I4 = 0 (kg.s.s.m.)

**INPUT CRANK MOTION PARAMETERS**  
 W2 = 628.32 rad/sec    2 = 0 (rad./s.)  
 2 = 0 rad/sec    3 = 295288.4 (rad./s./s.)  
 3 = 0 rad/sec/sec    4 = 295288.4 (rad./s./s.)  
 4 = 0 (m.)    5 = 2.191769 (m.)

**THE SUR OF ALL FORCES ACTING**  
 F1 = 493.5547 (N.)    ϕ1 = 0 (deg.)  
 F2 = 436.1959 (N.)    ϕ2 = 14.71925 (deg.)  
 F3 = 191.2556 (N.)    ϕ3 = 76.81321 (deg.)  
 F4 = 191.2556 (N.)    ϕ4 = 76.81321 (deg.)

**DRIVING OR INPUT TORQUE** T2 = 113.8224 (N.m.)  
**SHAKING FORCE COMPONENTS** SF = 452.006 (N.)    eSF = 5.392875 (deg.)  
**ECCENTRICITY** = 0 (m.)

**THE FIRST ANGLE OF ROTATION** = 30 (deg.)  
**THE LAST ANGLE OF ROTATION** = 0 (deg.)  
**THE INCREMENT DELTA** = 0 (deg.)

**FORCE ANALYSIS**  
 F21 = 493.5547 (N.)    ϕ21 = 16.32336 (deg.)  
 F22 = 436.1959 (N.)    ϕ22 = 14.71925 (deg.)  
 F43 = 191.2556 (N.)    ϕ43 = 76.81321 (deg.)  
 F14 = 191.2556 (N.)    ϕ14 = 76.81321 (deg.)

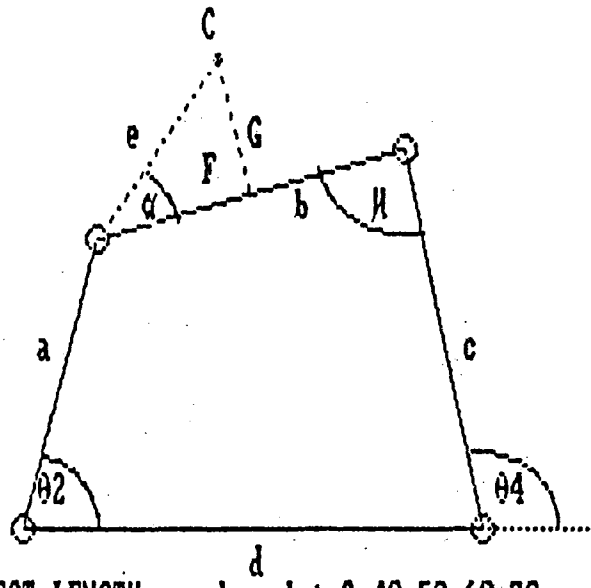
**POINT-FORCE**    **EXTERNAL FORCE**    **TORQUE**  
 P (m.)    F (N.)    ϕ (deg.)  
 2    0    0    0  
 3    0    0    0  
 4    0    0    0

**POSITION**    **VELOCITY**    **ACCELERATION**  
 POINT    X    Y    (m./s.)    (m./s./s.)  
 H    0    0    0    0  
 G2    .4336127    .25    314.16    197393    210  
 A    .864254    .5000001    628.32    394706    210  
 B    1.893278    .787253    427.4787    126.4044    443393.2  
 S4    3.000001    8.846627E-47    436.0488    166.8132    422637    141.765  
 0    3    0    0    0    0

**FIX GROUND**  
 M2 = 628.32 (rad./s.)    2 = 0 (rad./s./s.)  
 M3 = -289.9206 (rad./s.)    3 = 295288.4 (rad./s./s.)  
 M4 = -899.0206 (rad./s.)    4 = 295288.4 (rad./s./s.)  
 R3 = 2.191769 (m.)

รูปที่ 14 แสดงผลการวิเคราะห์พลวัตของเครื่องกลไก Inverted slider-crank





SELECT LENGTH... a, b, c, d : ? 40, 50, 60, 70

MECHANISM IS A CRANK-ROCKER MECHANISM.

SELECT SHAPE (V=1, -1)? 1

SELECT COUPLER POINT:(F,G): 50, 30

= FOUR-BAR MECHANISM =

( CRANK-ROCKER MECHANISM )

a = 40

b = 50

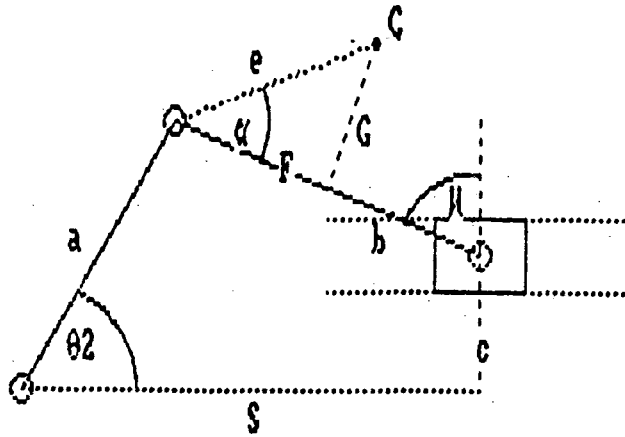
c = 60

d = 70

V = 1

pmin = 29.92643	degrees	pmax = 180	degrees
Q2L1 = 41.75221	degrees	Q4L1 = 92.7294	degrees
Q2L2 = 180	degrees	Q4L2 = 180	degrees

รูปที่ 15 ผลลัพธ์ของ Four-bar mechanism



SELECT LENGTH... a,b,c : ? 200,300,50  
 SELECT SHAPE (V=1,-1)? -1  
 SELECT COUPLER POINT: e, alpha = ? 200,50

: SLIDER-CRANK MECHANISM :

---

a =	200		
b =	300		
c =	50		
V =	-1		
Smin =	-497.4936	Smax =	-86.60251
ymmin =	60.00001 degrees	ymax =	146.4427 degrees
cs =	410.8911	wp =	86.44269 degrees
thetaL1 =	5.739171 degrees	thetaL2 =	210 degrees

---

รูปที่ 18 คุณลักษณะของ Slider-crank



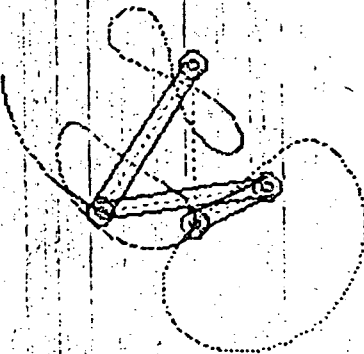
FOUR-BAR MECHANISM :

( CRANK-KOOLER MECHANISM )

a = 100  
b = 202  
c = 228  
d = 214

V = 1

$\theta_{min} = 29.97427$  degrees  $\theta_{max} = 93.6151$  degrees  
 $\theta_{L1} = 48.67276$  degrees  $\theta_{L2} = 93.66378$  degrees  
 $\theta_{R2} = 264.4581$  degrees  $\theta_{R1} = 153.5289$  degrees

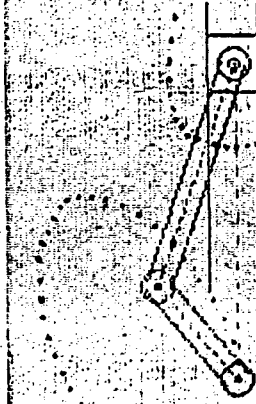


(A)

SLIDER-CRANK MECHANISM :

a = 50  
b = 100  
c = 0  
V = 1

$\theta_{min} = 50$   $\theta_{max} = 150$   
 $\theta_{L1} = 60.00001$  degrees  $\theta_{L2} = 120$  degrees  
 $\theta_{R1} = 100$  degrees  $\theta_{R2} = 60$  degrees  
 $\theta_{R3} = 0$  degrees  $\theta_{R4} = 180$  degrees



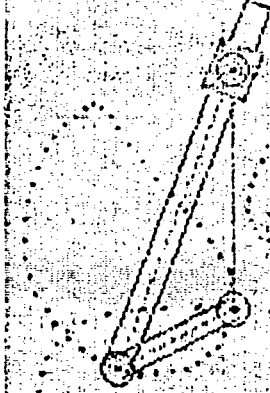
(B)

INVERTED SLIDER-CRANK MECHANISM :

( CRANK-KOOLER MECHANISM )

a = 50  
b = 0  
c = 100  
V = 1

$\theta_{min} = 50$   $\theta_{max} = 150$   
 $\theta_{L1} = 60.00001$  degrees  $\theta_{L2} = 120$  degrees  
 $\theta_{R1} = 100$  degrees  $\theta_{R2} = 60$  degrees



(C)

រូប 18 Coupler curve (A) Four-bar (B) Slider-crank

(C) Inverted slider-crank

### สรุปการวิจัยและขอเสนอแนะ

ผลการศึกษาวเคราะห์กลไกแบบ 4 ชั้น ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ สามารถสรุปและให้ข้อเสนอแนะได้ โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

ก. ผลการวิเคราะห์ทางพลวัตของกลไก โดยอาศัยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น มีค่าใกล้เคียงเพื่อเทียบกับผลจากคำตอบของเอกสารอ้างอิง (5) และ (6) ความคลาดเคลื่อนเกิดจากการปัดเศษของตำแหน่งจุดทศนิยมของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ต่างกัน การหาแรงกระทำสูงสุดที่ข้อต่อทำให้ทราบการเพิ่มของมุม  $\theta_2$  มีค่าน้อยก็จะได้อาแรงกระทำสูงสุดที่ข้อต่อใกล้เคียงความเป็นจริงขึ้น แต่ต้องใช้เวลาในการคำนวณสูง

ข. การแสดงการเคลื่อนที่และคุณลักษณะของกลไก ให้ผลเป็นไปตามความจริงตรงกับผลที่ได้จากแบบจำลองทดสอบ แต่ควรปรับปรุงทางด้านเทคนิคการแกสมการเมทริกซ์ เพื่อให้การทำงานมีของโปรแกรมมีประสิทธิภาพรวดเร็วขึ้น

ส่วนขอเสนอแนะสำหรับงานวิจัยขั้นต่อไปก็คือ ควรจะใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณสูงกว่านี้ และทางด้านผลการแสดงผลของแรงยังไม่สามารถให้ขนาดและมาตราส่วนของแรงที่ถูกต้องได้สำหรับจอภาพ เพียงแต่แสดงทิศทางของแรงเท่านั้น งานวิจัยขั้นต่อไปจึงควรให้โปรแกรมคำนวณขนาดของความเร็ว ความเร่ง หรือแรงกระทำที่สูงที่สุดก่อนแล้วจึงใช้ผลนั้นมากำหนดมาตราส่วนในภาคแสดงผลทางจอภาพ ซึ่งจะทำได้ผลที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผศ. สมยศ จันเกษม ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแนวคิดในการวิจัย และขอขอบคุณ ประวิทย์ กิตติเรืองชาญ และ สิวี่ไสย์ บัณฑิตวงศ์ นักศึกษาชั้นปีที่ 5 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ช่วยร่วมพัฒนาโปรแกรมจนสามารถใช้งานได้

๖  
เอกสารอ้างอิง

1. Hrones & Nelson; "Analysis of the Four Bar Linkage"; MIT and John Wiley & Sons. INC., NEW YORK, 1951.
2. C.W.HAM, E.J.CRANE and W.L.ROGERS, "Mechanics of Machinery", 4<sup>th</sup> Ed., McGRAW-HILL Book Company, NEW YORK, 1958.
3. G.H.MARTIN, "Kinematics and Dynamics of Machines", McGRAW-HILL Book Company, 1969.
4. A.H.SONI, "Mechanism Synthesis and Analysis", McGRAW-HILL Book Company, 1974.
5. C.H.SUH and C.W.RADCLIFFE, "Kinematics and Mechanism Design", John Willy & Sons, NEW YORK, 1980.
6. J.E.SHIGLEY and J.J.UICKER, "Theory of Machine and Mechanism", McGRAW-HILL Book Company, NEW YORK, 1980.