การสวมหมุดคู่

DUAL PEGS INSERTION

ธรรมรัตน์ กิตติพงษ์พัฒนา, ชิต เหล่าวัฒนา
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1.บทคัดย่อ (Abstract)

ปัญหาที่มักพบในงานประกอบชิ้นส่วนคือ wedging และ jamming wedging หมายถึง ความผิดพลาดในการประกอบอันเนื่องมาจากเงื่อนไขเริ่มต้นทางเรขาคณิตไม่ถูกต้องส่วน jamming หมายถึงความผิดพลาดในการประกอบเนื่องจากความไม่ได้สัดส่วนของแรงและโมเมนต์ บทความนี้กล่าวถึง wedging ของหมุดคู่ในกรณีเกิดการสัมผัสที่ผิวนอกสุดของหมุดแต่ละอันซึ่งเป็นการสัมผัสสองจุด รวมทั้งเสนอแผนภาพ wedging ของหมุดคู่ ของกรณีนี้การวิเคราะห์ปัญหาของหมุดคู่นี้เป็นพื้นฐานหนึ่งที่จะนำไปสู่ การประกอบชิ้นส่วน ที่มีรูปทรงเรขาคณิตค่อนข้างซับซ้อนได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งในทางปฏิบัติเมื่อใช้ความรู้จากงานวิจัยนี้รวมกับเทคโนโลยีทางหุ่นยนต์ด้านการเคลื่อนย้าย (Manipulation) ก็สามารถทำให้งานประกอบอัตโนมัติเกิดขึ้นได้อย่างแท้จริง (True Assembly Automation)

The problems frequently found in assembly process are wedging and jamming.Wedging refers to improper geometrical initial conditions. Jamming refers to failure of assembly due to improperly aligned forces. This paper presents a wedging diagram of dual-pegs-holes when these pegs contact their mating holes with outer edges (two point - contact). The analysis of dual-pegs in holes is a fundamental example that leads to the assembly of parts having complicated geometry. Combining this knowledge with robotic manipulation, the true assembly automation can be realized.

2. บทนำ

ในขบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ชิ้นหนึ่งๆนั้น โดยเฉลี่ยแล้วต้องผ่านงานประกอบประมาณ 50% เพื่อให้ประสิทธิภาพการประกอบสูงขึ้น จึงมีการหันมาใช้ระบบการประกอบแบบยืดหยุ่น (Flexible Assembly Systems , FAS) ระบบนี้ประกอบด้วย หุ่นยนต์ และ/หรือ เครื่องจักรประกอบอัตโนมัติ ซึ่งจะมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนเมื่อเราต้องการที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบเฉพาะในปริมาณไม่เกิน 100,000 หน่วย ในระบบการผลิตแบบนี้เราสามารถเปลี่ยนรูปแบบและวิธีการผลิตตามความเปลี่ยนแปลงของแบบได้ง่ายและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้เกิดการผลิตลักษณะดังกล่าวอย่างสมบูรณ์จริงๆยังเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เพราะการใช้เครื่องจักรในการประกอบอย่างอัติโนมัติที่มีค่า repeatability สูงนั้นต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ในเรื่องการวิเคราะห์ชิ้นส่วนสัมผัส ตัวอย่างงานประกอบพื้นฐานที่รู้จักกันดี คือการสวมหมุดลงในรู (Peg in hole) งานประกอบนี้มีลักษณะพื้นฐานครอบคลุมงานประกอบชิ้นส่วนจำนวนมาก

การประกอบหมุดให้สำเร็จได้นั้น clearanceของชิ้นส่วนต้องไม่น้อยกว่าความละเอียด และ/หรือ repeatability ของหุ่นยนต์ และ ตัวจับยึด (jigs) ยิ่งไปกว่านั้นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือการสึกหรอของเครื่องจักรและความไม่ได้ศูนย์ของชิ้นงาน ขนาดของชิ้นส่วนแบบเดียวกันที่ใช้ในการประกอบอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากขบวนการผลิตชิ้นส่วนนั้นๆไม่เที่ยงตรงขนาดชิ้นส่วนที่เกินไปหรือขาดไปนี้มีส่วนทำให้เกิดแรงสัมผัสที่ส่งผลให้ชิ้นงานเสียหายระหว่างประกอบ

Whitney และ คณะ [1]ได้เสนอวิธีการสำหรับวิเคราะห์การประกอบหมุดกลมลงในรูกลมที่มีการปาดปากรูโดยสมมติให้ หมุดและรูเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และ หมุดได้รับการยึดติดอยู่กับโครงสร้างที่มีความอ่อนตัว โครงสร้างนี้เรียกว่า Remote Center of Compliance (RCC) เป็นโครงสร้างซึ่งลดแรงจากการสัมผัส และ ขจัดปัญหาด้าน wedging และ jamming ในการวิเคราะห์ jamming หมายถึง ความเสียหายในการประกอบอันเกิดจากความไม่ได้สัดส่วนของแรง ส่วน wedging หมายถึง ความเสียหายในการประกอบอันเกิดจากเงื่อนไขทางเรขาคณิตของการประกอบไม่ถูกต้อง

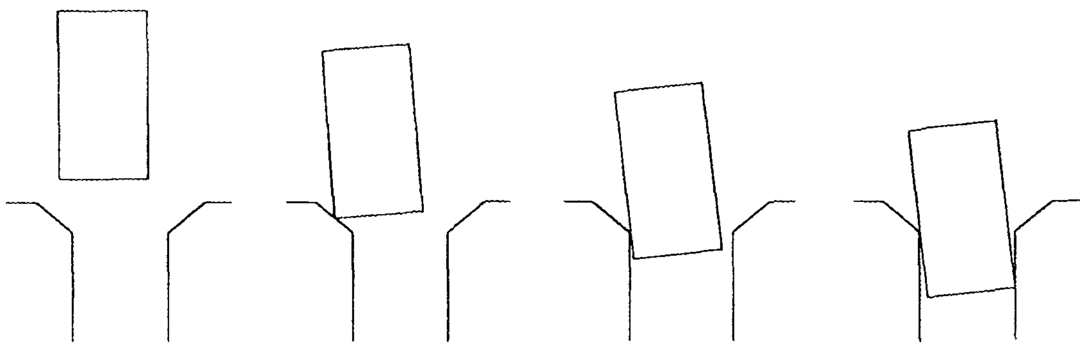
Sturges และ Laowattana[2] ได้พิจารณา wedging ในกรณีสามมิติ และ เสนอแผนภาพ wedging ของหมุดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัส ซึ่งยังเป็นการวิเคราะห์หมุดเดี่ยวอยู่

Asada และ McCarragher [3] ทดลองนำหุ่นยนต์(ระดับความอิสระ 4)ที่ควบคุมโดยอาศัยการป้อนกลับของแรงประกอบหมุดคู่รวมทั้งนำวิธีการควบคุมแบบ Petri Net มาช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในขณะประกอบหมุดคู่ แต่ยังไม่ได้แสดงถึงการวิเคราะห์การสวมหมุดคู่อย่างชัดเจน

การประกอบหมุดให้ได้ผลจำเป็นต้องพิจารณาถึงเงื่อนไขในการเกิด wedging และ jamming ในขบวนการประกอบชิ้นส่วน wedging มักจะเกิดขึ้นบ่อยเมื่อไม่สามารถกำหนดค่า ความคลาดเคลื่อนเริ่มต้นได้ทั้งจากการวัด และ ค่าพิกัดความเผื่อ บทความนี้กล่าวถึงวิธีวิเคราะห์การประกอบหมุดกลมคู่ลงในรูกลมคู่โดยอาศัยแนวทางเดียวกับ Whitney และคณะ พร้อมทั้งเสนอแผนภาพ wedging ของการประกอบหมุดกลมคู่ผลที่ได้จะเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การประกอบหมุดกลมหลายหมุดพร้อมกันในสามมิติ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะพิจารณาหมุดเป็นคู่ๆ เช่นในกรณีของ หมุดสาม ถ้าเราสามารถประกอบหมุดได้สำเร็จหนึ่งคู่หมุดที่เหลือจะประกอบได้สำเร็จเช่นกัน ตามแนวคิดของ Lee และ Hou [4]

3. การสวมหมุดเดี่ยว

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึง การวิเคราะห์การสวมหมุดเดี่ยว ซึ่งเป็นวิธีการของ Whitney [1]



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูป 3.1 ลำดับการเคลื่อนที่ของหมุดก่อนการสัมผัสและขณะเกิดการสัมผัส

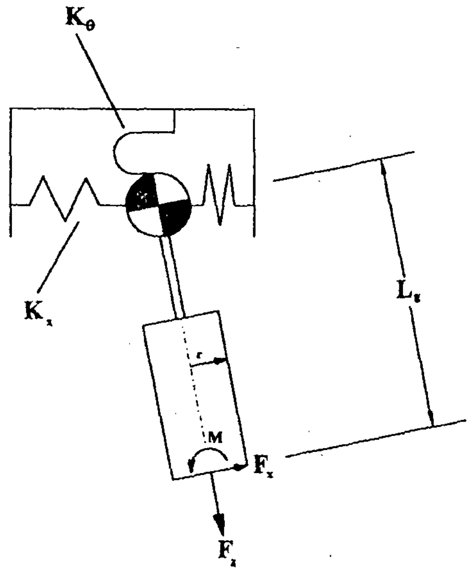
การเคลื่อนที่ของหมุดก่อนการสัมผัสและขณะเกิดการสัมผัสมีเป็นลำดับดังนี้

ก. เข้าใกล้ (Approach)

ข. เคลื่อนผ่านบริเวณปาดปากรู (Chamfer crossing)

ค. การสัมผัสจุดเดียว (One-point contact)

ง. การสัมผัสสองจุด (Two-point contact)



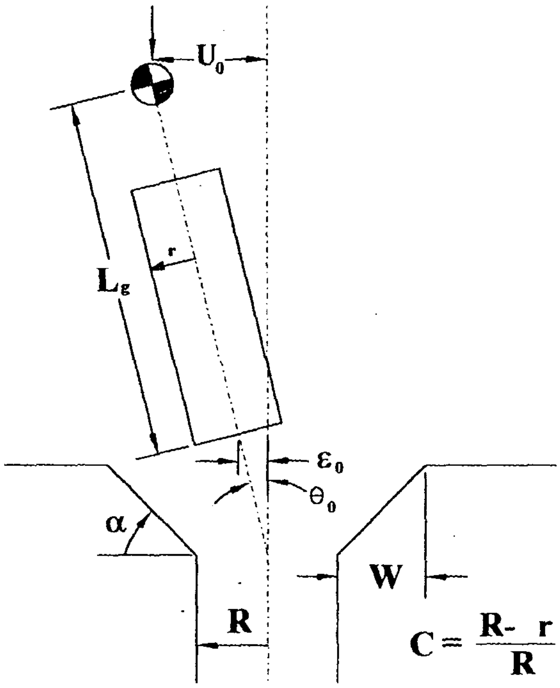
รูป 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการรองรับหมุด[Whitney 1982]

โดยทั่วไปหมุดจะมีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวเชิงเส้นและเชิงมุมระหว่างเกิดการสัมผัสดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายระหว่างเกิดการสัมผัส การยึดจับต้องมีความอ่อนตัวทั้งในแนวเชิงเส้น และเชิงมุม ให้กับหมุดหรือรู อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยอาศัยความสมมาตร ในทางคณิตศาสตร์เราสามารถแทนความอ่อนตัวของการรองรับด้วย จุดศูนย์กลางความอ่อนตัว(วงกลมสีดำสลับขาว ดังรูป 3.2.) ค่าคงที่สปริงเชิงเส้น (K_X) และ ค่าคงที่สปริงเชิงมุม (K_θ) เมทริกซ์ความอ่อนตัวของการรองรับจะอยู่ในรูปแนวทแยงมุม ในกรณีที่แกนอ้างอิงของส่วนรองรับมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดศูนย์กลางความอ่อนตัวพอดี

$$\text{เมทริกซ์ความอ่อนตัวของการรองรับ} = \begin{pmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_\theta \end{pmatrix}$$

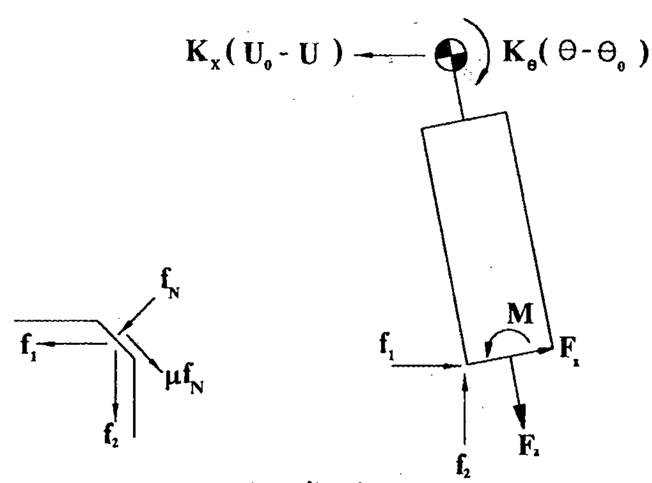
Simunovic ได้กำหนดให้แรง และ โมเมนต์ซึ่งเกิดจากส่วนรองรับอยู่ในรูปของตัวแปร F_X, F_Z และ M โดยอ้างอิงกับพิกัดปลายหมุดวิธีการของ Simunovic เป็นวิธีการที่ใช้ได้ผลอย่างมากในการวิเคราะห์การสัมผัสกันของชิ้นงาน

<u>เรขาคณิตของชิ้นส่วนสัมผัส (GEOMETRY OF PART MATING)</u>



รูป 3.3 พารามิเตอร์สำหรับหมุดและรู

ε_0	=	ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นเริ่มต้น
θ_0	=	ความคลาดเคลื่อนเชิงมุมเริ่มต้น
W	=	ความกว้างของบริเวณปาดปากรู (chamfer width)
α	=	มุมของบริเวณปาดปากรู (chamfer angle)
U_0	=	การขจัดเริ่มต้นของจุดศูนย์กลางความอ่อนตัว
L_g	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางความอ่อนตัวถึงปลายหมุด
r	=	รัศมีของหมุด
R	=	รัศมีของรู
c	=	อัตราส่วนความหลวม (clerance ratio)



รูป 3.5 แรงที่เกิดขึ้นเมื่อหมุดสัมผัส chamfer

$c = (R-r)/R$ (3.4)

$f_1 = f_N B$ (3.5)

$f_2 = f_N A$ (3.6)

$A = \cos\alpha + \mu\sin\alpha$ (3.7)

$B = \sin\alpha - \mu\cos\alpha$ (3.8)

สมการของแรงที่จุดสัมผัส

$F_z = - f_1$ (3.9)

$F_x = f_2$ (3.10)

$M = f_2 r$ (3.11)

สมการของแรงที่จุดรองรับ

$F_x = -K_x(U_0 - U)$ (3.12)

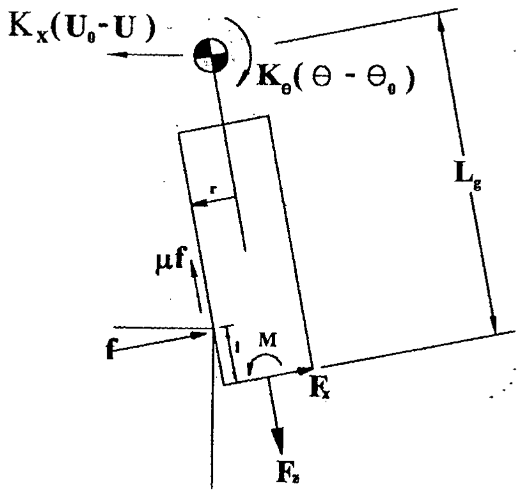
$M = K_x L_g(U_0 - U) - K_\theta(\theta - \theta_0)$ (3.13)

รวมสมการ (3.1)-(3.13) เข้าด้วยกันได้สมการของมุมเอียง และ การขจัดของจุดศูนย์กลางความอ่อนตัวสำหรับหมุดขณะเคลื่อนที่ผ่าน chamfer

$$\theta = \theta_0 + \frac{K_x(z/\tan\alpha)(L_g B - rA)}{(K_x L_g^2 + K_\theta)B - K_x L_g r A} \quad (3.14)$$

$$U = U_0 + \frac{K_\theta(z/\tan\alpha)B}{(K_x L_g^2 + K_\theta)B - K_x L_g r A} \quad (3.15)$$

การสัมผัสหนึ่งจุด [1]



รูป 3.6 แรงที่เกิดขึ้นเมื่อหมุดเกิดการสัมผัส หนึ่งจุด

สมการสำหรับการขจัดของจุดศูนย์กลางความอ่อนตัวเมื่อหมุดสัมผัสหนึ่งจุดคือ

$$U = cR + L_g\theta - l\theta \qquad (3.16)$$

โดยอาศัยวิธีการเดียวกันกับขณะหมุดผ่าน chamfer

$$\theta = \frac{C(\varepsilon_0' + L_g\theta_0) + K_\theta\theta_0}{C(L_g - l) + K_\theta} \qquad (3.17)$$

$$C = K_x(L_g - l - \mu r) \qquad (3.18)$$

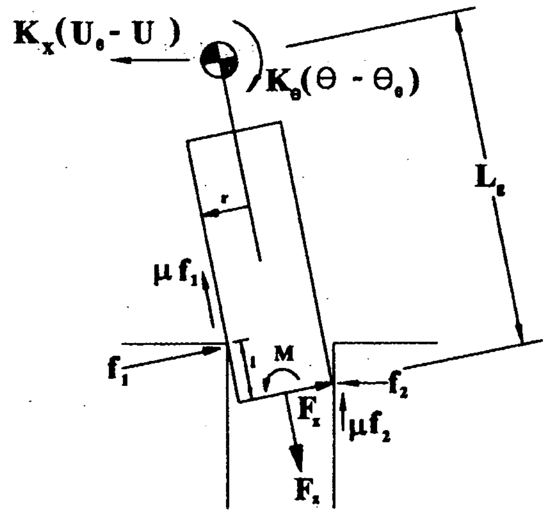
และ

$$U = U_0 - \frac{K_\theta(\varepsilon_0' + l\theta_0)}{C(L_g - l) + K_\theta} \qquad (3.19)$$

สมการมุมเอียงของหมุดขณะเกิดการสัมผัสหนึ่งจุด

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{K_x(L_g - \mu r)\varepsilon_0'}{K_x L_g(L_g - \mu r) + K_\theta} \qquad (3.20)$$

<u>การสัมผัสสองจุด [1]</u>



รูป 3.6 แรงที่เกิดขึ้นเมื่อหมุดเกิดการสัมผัส สองจุด

สมการทางเรขาคณิตขณะหมุดเกิดการสัมผัสสองจุด

$R = (l/2)\tan\theta + r\cos\theta$ (3.21)

คิดว่า θ มีค่าน้อย

$l\theta = 2cR = cD$, constant (3.22)

เมื่อมีการสัมผัสหนึ่งจุดสมการของการขจัดคือ

$U_0 - U = \varepsilon_0' + L_g(\theta_0 - \theta) + l\theta$ (3.23)

แทนสมการ (3.22) ลงในสมการ (3.23) ได้

$U_0 - U_2 = \varepsilon_0'' + L_g(\theta_0 - \theta)$ (3.24)

$\varepsilon_0'' = \varepsilon_0 + cR$

โดยใช้สมการ (3.24) ร่วมกับการวิเคราะห์แรงเหมือนในลักษณะก่อนหน้านี้ สมการสำหรับมุมเอียงคือ

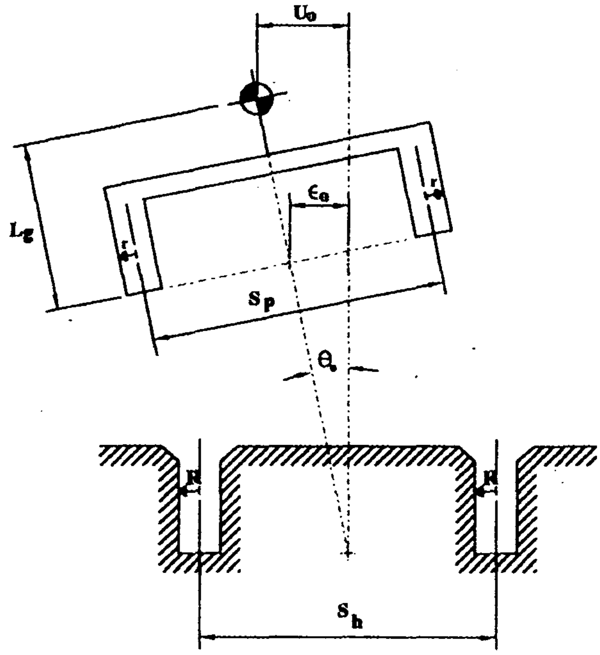
$$\theta_2 = \theta_0 + \frac{K_x\varepsilon_0''(L_g - l_2 - \mu r)}{K_x L_g^2 + K_\theta - K_x L_g(l_2 + \mu r)} \quad (3.25)$$

สมการในรูปการขจัดคือ

$$U_2 = U_0 + \frac{K_x\varepsilon_0''}{K_x L_g^2 + K_\theta - K_x L_g(l_2 + \mu r)} \quad (3.26)$$

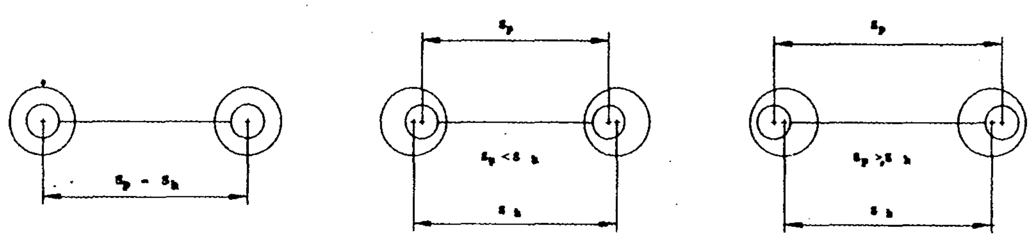
4. ฟิสิกส์ของการสวมหมุดคู่

การวิเคราะห์หมุดคู่อาศัยหลักการเบื้องต้นในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับหมุดเดี่ยว โดยสมมติให้แกนอ้างอิงอยู่ระหว่างปลายหมุดทั้งสอง และ มีพารามิเตอร์ เพิ่มขึ้นมาคือ ระยะระหว่างศูนย์กลางของหมุดทั้งสอง แทนด้วยตัวแปร S_p และ ระยะระหว่างศูนย์กลางของรูทั้งสองแทนด้วยตัวแปร S_h



รูป 4.1 พารามเตอร์สำหรับหมุดคู่

การเกิด clearance ของหมุดคู่เกิดได้ 3 กรณี คือ $S_p = S_h$, $S_p < S_h$ และ $S_p > S_h$ โดยทั่วไป S_p มีค่าไม่เกิน S_h + 2cR และ ไม่ต่ำกว่า S_h - 2cR สำหรับบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะกรณี $S_p > S_h$ ส่วนกรณีอื่นจะพิจารณาในโอกาสต่อไป (ดูในหัวข้อที่ 7)



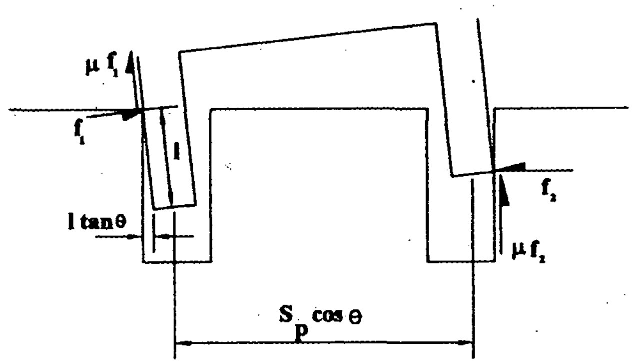
รูป 4.2 กรณีที่เป็นไปได้ของ S_p และ S_h

ในกรณี $S_p > S_h$ การสัมผัสสองจุดเกิดขึ้นบริเวณขอบนอกสุดของหมุดทำให้การวิเคราะห์คล้ายกับกรณีของหมุดเดี่ยวกำหนดให้ D_p มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของผลต่างระหว่าง S_p กับ S_h นั่นคือ

$$D_p = \left(\frac{S_p - S_h}{2}\right)$$

เมื่อหมุดคู่เกิดการสัมผัสหนึ่งจุดเราสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการขจัดของจุดศูนย์กลางความอ่อนตัว U_0-U , ค่าความผิดพลาดเริ่มต้น (ε_0, θ_0), ระยะทางระหว่างปลายหมุดถึงจุดศูนย์กลางความอ่อนตัว L_g , ระยะทางระหว่างปลายหมุดถึงจุดสัมผัส l , มุมเอียงของหมุด θ, , clearance ratio cR และ D_p ได้คือ

$$U_0 - U = \varepsilon_0 + L_g\theta_0 - (cR + L_g\theta - l\theta + D_p) \qquad (4.1)$$



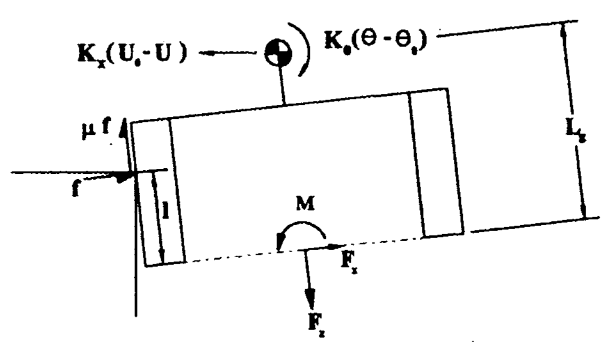
รูป 4.3 แสดงการหาสมการเรขาคณิตในกรณีเกิดการสัมผัส สองจุด

$$S_h + D = l\tan\theta + 2r\cos\theta + S_p\cos\theta \qquad (4.2)$$

$$l\theta = S_h - S_p + D - d \qquad (4.3)$$

$$l\theta = S_h - S_p + 2cR \qquad (4.4)$$

<u>การสัมผัสหนึ่งจุด</u>



รูป 4.4 การวิเคราะห์แรงในกรณีสัมผัสหนึ่งจุดของหมุดคู่

สมดุลของแรงและโมเมนต์ เมื่อหมุดมีการสัมผัสเพียงจุดเดียว ตามวิธีการของ Simunovic เป็นไปตามสมการ (ดูรูป 4.4)

$$F_z = \mu f \tag{4.5}$$

$$F_x = -f \tag{4.6}$$

$$M = -F_X(l+\mu(\frac{S_p}{2}+r)) \tag{4.7}$$

โมเมนต์ของแรงรองรับ = โมเมนต์ของแรงสัมผัส

ให้ $N_p = \frac{S_p}{2}+r$ (4.8)

$$K_x L_g(U_0 - U) - K_\theta(\theta - \theta_0) = K_x(U_0 - U)[l + \mu(N_p)] \tag{4.9}$$

$$K_x(U_0 - U)[L_g - l - \mu N_p] = K_\theta(\theta - \theta_0) \tag{4.10}$$

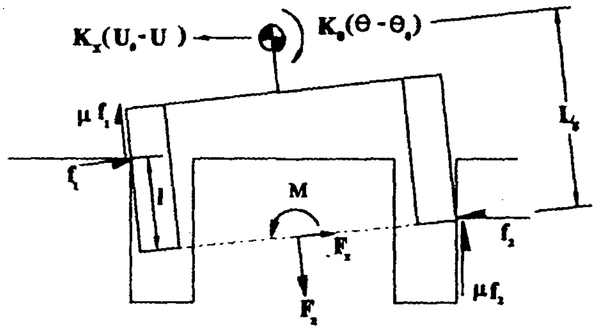
แทนสมการ 4.4 ลงในสมการ 4.1(การสัมผัสสองจุด)

$$U_0 - U = \varepsilon_0' + L_g(\theta_0 - \theta) - D_p \tag{4.11}$$

แทนสมการ 4.11 ลงในสมการ 4.3

$$K_x(\varepsilon_0' + L_g(\theta_0 - \theta) - D_p)[L_g - (l + \mu N_p)] = K_\theta(\theta - \theta_0) \tag{4.12}$$

จัดรูปสมการจะได้สมการที่อยู่ในรูป θ , θ_0 และ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องเมื่อเกิดการสัมผัสสองจุด



รูป 4.5 การวิเคราะห์แรงในกรณีสัมผัสสองจุดของหมุดคู่

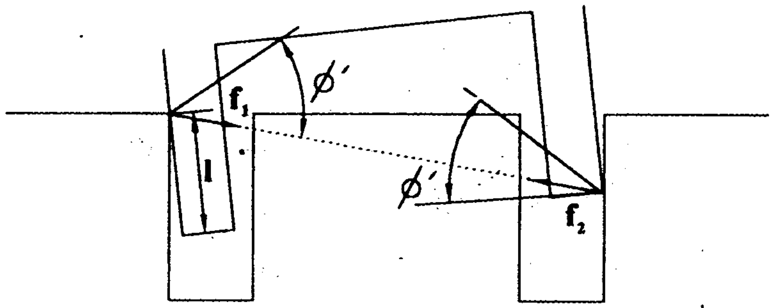
$$\theta = \theta_0 + \frac{K_x(\varepsilon_0 - D_p)(L_g - (l + \mu N_p) + cR}{K_\theta + K_x L_g^2 - K_x L_g(l + \mu N_p)} \tag{4.13}$$

แต่ $cR = \frac{l\theta}{2} - \frac{S_p - S_h}{2}$ เมื่อคิดว่า l , r มีค่าน้อย และ $S_p = S_h$

$$\theta = \theta_0 + \frac{K_x \varepsilon_0 (L_g - \mu\frac{S_p}{2})}{K_\theta + K_x L_g^2 - K_x L_g(\mu\frac{S_p}{2})} \tag{4.14}$$

$$\theta = \theta_0 + S\varepsilon_0 \qquad (4.15)$$

$$S = \frac{K_x(L_g - \mu\frac{S_p}{2})}{K_\theta + K_x L_g^2 - K_x L_g(\mu\frac{S_p}{2})}$$



รูป 4.5 รูปเรขาคณิตแสดงทิศทางของแรงในกรวยความเสียดทานสถิตเมื่อเกิด wedging

พิจารณารูปเรขาคณิตของรูป 4.5

ϕ' มุมของกรวยความเสียดทานสถิต

l_w ความลึกในการสวมที่พอดีเกิด wedging

$$\tan\phi' = \mu = \frac{w}{{}_p + d} \qquad (4.16)$$

$$l_w = \mu(S_p + d) \qquad (4.17)$$

จากสมการ 4.3

$$l\theta = S_h - S_p + D - d \qquad (4.3)$$

หรือ $$l = \frac{S_h - S_p + D - d}{\theta} \qquad (4.18)$$

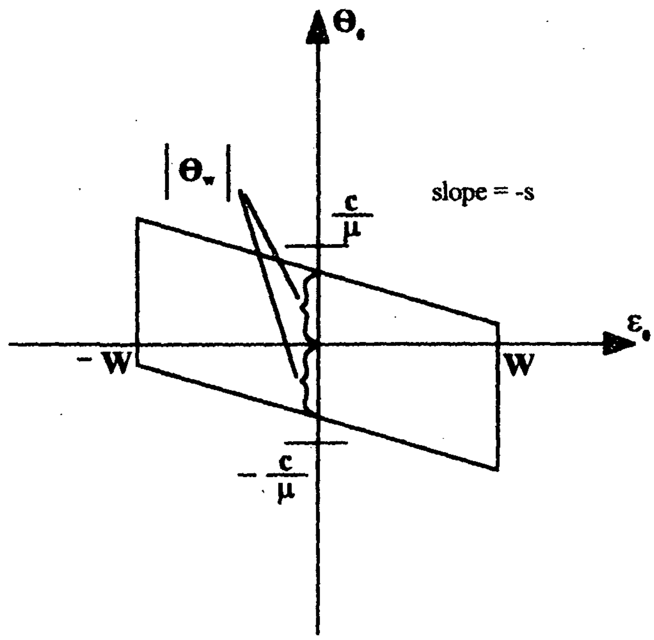
แทนสมการ 4.21 ลงในสมการ 4.20

$$l_w = \frac{S_h - S_p + D - d}{\theta_w} = \mu(S_p + d) \qquad (4.19)$$

มุมที่เริ่มเกิด wedging สำหรับ dual pegs (θ_w)

$$\theta_w = \frac{S_h - S_p + D - d}{\mu(S_p + d)} \qquad (4.20)$$

เราสามารถสร้างแผนภาพ wedging จากสมการ (4.15) ได้ เนื่องจากเป็นสมการเส้นตรง โดยให้ตัวแปร θ_0เป็นพิกัดตั้ง ตัวแปร ε_0 เป็นพิกัดนอน และตัดแกนตั้งที่ระยะ θ_w ความยาวของเส้นตรงถูกจำกัดอยู่ที่ระยะความกว้างของ chamfer W



รูป 4.6 แผนภาพ wedging ในกรณีของหมุดคู่

5. การพิสูจน์

การพิสูจน์แผนภาพ wedging สามารถทดลอง โดยนำหมุดคู่ไปยึดติดกับปลายแขนหุ่นยนต์ ซึ่งมี อุปกรณ์วัดแรง (force sensor) ติดอยู่ (อุปกรณ์วัดแรงจะช่วยทำให้หุ่นยนต์ไม่เสียหาย เมื่อเกิด wedging)แล้วทดลองสวมหมุดคู่ ขณะที่หมุดเริ่มสัมผัสกับรูใช้ dial gage วัดค่าความผิดพลาดเริ่มต้นเชิงเส้น ε_0 ความผิดพลาดเริ่มต้นมุม θ_0 จากนั้นนำไปเทียบกับค่าในแผนภาพ wedging ในขณะนี้อยู่ในระหว่างจัดหาหุ่นยนต์ และ วางแผนการทดลอง

6. อภิปราย

ในกรณีที่เราจะทำการเปรียบเทียบพื้นที่ของแผนภาพ wedging ระหว่าง หมุดคู่และหมุดเดี่ยว เรากำหนดให้ S_p มีค่าเท่ากับ S_h ทำให้ประมาณค่า θ_w ได้ง่ายขึ้น นั่นคือ

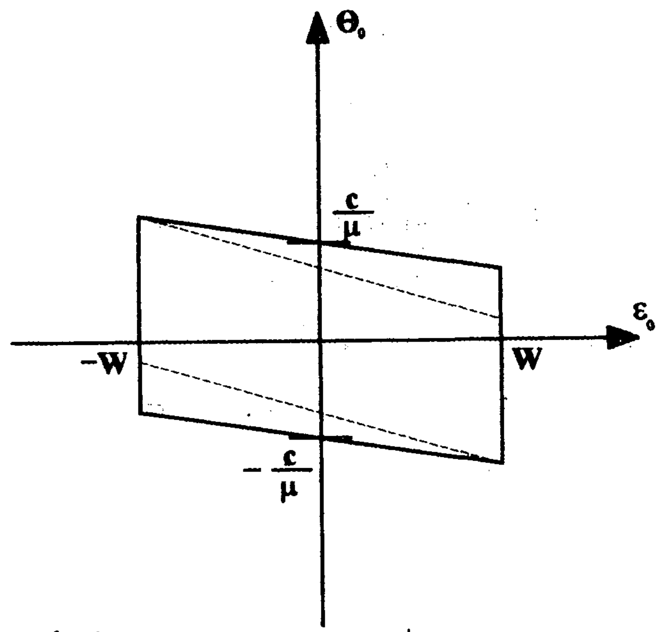
$$\theta_w = \frac{D - d}{\mu(S_p + d)} \qquad (6.1)$$

แต่ D - d = 2cR ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการ 6.2 ใหม่ได้เป็น

$$\theta_w = \frac{2R}{S_p + d}\left(\frac{c}{\mu}\right)$$ หรือ

$$\theta_w = \frac{D}{S_p + d}\left(\frac{c}{\mu}\right) \tag{6.2}$$

S_p มีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้น อัตราส่วน $\frac{D}{S_p + d}$ ในกรณีที่ clearance มีค่าน้อย จะมีค่ามากกว่าศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่ง



รูป 4.7 แสดงถึงพื้นที่ของแผนภาพ wedging ที่แคบกว่าในกรณีของหมุดคู่(เส้นประ)

7. สรุป

เราสามารถสร้างแผนภาพ wedging ของ หมุดกลมคู่ ได้โดยอาศัยทฤษฎีที่มีอยู่เดิมของหมุดกลมเดี่ยว(whitney [1]) แผนภาพ wedging ของ หมุดกลมคู่ มีพื้นที่น้อยกว่าของหมุดกลมเดี่ยว นั่นหมายถึงสวมได้ยากกว่า แต่การวิเคราะห์หมุดคู่ในบทความนี้ยังไม่ได้วิเคราะห์ครอบคลุมถึงกรณี ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของหมุดและรูเท่ากัน ($S_p = S_h$) และ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของหมุดน้อยกว่าของรู ($S_p < S_h$) ในกรณี $S_p = S_h$ อาจเกิดการสัมผัส 3 จุด หรือ 4 จุด ส่วนในกรณี $S_p < S_h$ จะเกิดการสัมผัส 2 จุด ที่ขอบในสุดของหมุดแต่ละอัน นอกจากนี้การวิเคราะห์หมุดคู่ ยังเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การสวมหมุดที่มากกว่าหนึ่งคู่ต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

1. Whitney, D. E., " Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts ", *IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 1993, pp 65-77*

2. Sturges, R. H. and Loawattana, S., 1992, " Virtual Wedging in Three-Dimensional Peg Insertion Tasks ", *Proceedings of The JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation, Vol. 2, pp 1551-1555*

3. McCarragher ,B. J. and Asada H.,1993, " A Discrete Event Approach to The Control Robotic Assembly Tasks ", *IEEE International Conference on Robotics and Automation,Vol. 1, pp 331-336*

4. Lee ,C. S. G. and Hou ,E. S. H., 1988, "Automatic Generation and Synthesis of C-Frames for Mechanical Parts in an Insertion Task ", *IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 4, pp 287-293*