การประมาณพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติบนพื้นฐานจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปโดยพิจารณาการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์

Estimation of Three-Dimensional Tolerances Based on Simulation of Virtual Machining in Boring Processes Including Kinematic Motion Deviations

ดอน แก้วดก[1]* และ วิโรช ทัศนะ[1]

[1] ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตขั้นสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

1771/1 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง แขวงสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

*ติดต่อ: don@tni.ac.th, +66-2763-2600 ต่อ 2942

บทคัดย่อ

พิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติเป็นหนึ่งที่สำคัญที่มีอิทธิผลต่อการออกแบบและผลิตของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งการตัดเฉือนเสมือนจริงก็เป็นหนึ่งแนวทางที่สามารถช่วยวิเคราะห์ประมาณการของพารามิเตอร์ต่างๆ และเกณฑ์พิกัดความคลาดเคลื่อนที่ซับซ้อนได้ก่อนปฏิบัติการผลิตจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประมาณพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติบนพื้นฐานจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปโดยพิจารณาการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ ระบบพิกัดรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต พารามิเตอร์การตัดเฉือน ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยการส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 ของกลุ่มจุดหลายๆ จุดบนพื้นผิวรูปร่างชิ้นงานของกระบวนการคว้านขึ้นรูปที่ถูกสร้างขึ้น แบบจำลองโมเดลที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการที่นำเสนอนี้ทำให้พวกเรามีระบบวิธีการในการประมาณการของพื้นผิวชิ้นงานจริงและพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติเบื้องต้น

***คำหลัก**:* พิกัดความคลาดเคลื่อน การตัดเฉือนเสมือนจริง การเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ กระบวนการคว้านขึ้นรูป การจำลองกระบวนการตัดเฉือน

Abstract

Three-dimensional tolerance is one of the most important characteristics of the design and manufacturing processes which the virtual machining is also one to estimate the tolerance analysis and the machining parameters of machined parts before real machining. Therefore, the objective of the present research is to propose a simulation model of virtual machining for boring processes and estimation of three-dimensional tolerance of the generated faces based on the shape generation processes and the machining parameters. The simulation model includes the models of the shape generation motions considering kinematic motion deviations, the inserted cutting tool geometries. The shape generation motions with deviations are mathematically described by 4 by 4 transformation matrices. The proposed method provides us with a systematic method to estimate the geometric dimensioning and tolerancing in the boring processes including the kinematic motion deviations.

Keywords: Three-dimensional tolerance, Virtual machining, Kinematic motion deviation, Boring processes, Machining process simulations

1. บทนำ

ในทศวรรษที่ผ่านมาส่วนใหญ่การปฏิวัติในอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลเพื่อการผลิตชิ้นส่วนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การสำรวจระบบและวิธีการในการเพิ่มคุณภาพ ความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ และเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของเครื่องจักร ปัจจุบันต้องอาศัยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีวิศวกรรมดิจิตอล ระบบ CAD CAE CAM ซึ่งถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบการวิเคราะห์กระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ต่างๆ

การจำลองการผลิตเสมือนจริงเป็นเทคโนโลยีหนึ่งด้านวิศวกรรมดิจิตอลที่สามารถพิสูจน์ได้ว่าเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการลดค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและเวลาที่จำเป็นสำหรับการสร้างต้นแบบทางกายภาพเพื่อประเมินความถูกต้องแม่นยำของเครื่องจักร ความเรียบของพื้นผิวสำเร็จ ขนาดทางเรขาคณิต และขนาดพิกัดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง ซึ่งเป็นหนึ่งในลักษณะที่สำคัญที่สุดของการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ในการจำลองการผลิตเสมือนจริง

การสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีความแม่นยำสูงและรูปทรงของชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ต้องอาศัยขนาดและพิกัดความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง (GD & T) แบบ 3 มิติ ซึ่งเป็นวิธีการที่เป็นนวัตกรรมใหม่ในการส่งถ่ายโอนข้อมูลการผลิตแบบ 3 มิติจำเพาะ ซึ่งมันมีข้อดีคือสามารถใช้ทั้งพิกัดความคลาดเคลื่อนทางมิติและเรขาคณิตของรูปร่างมาประกอบการพิจารณาในการผลิตและออกแบบ เมื่อเทียบกับวิธีการกำหนดขนาดแบบ 2 มิติดั้งเดิม [1-3]

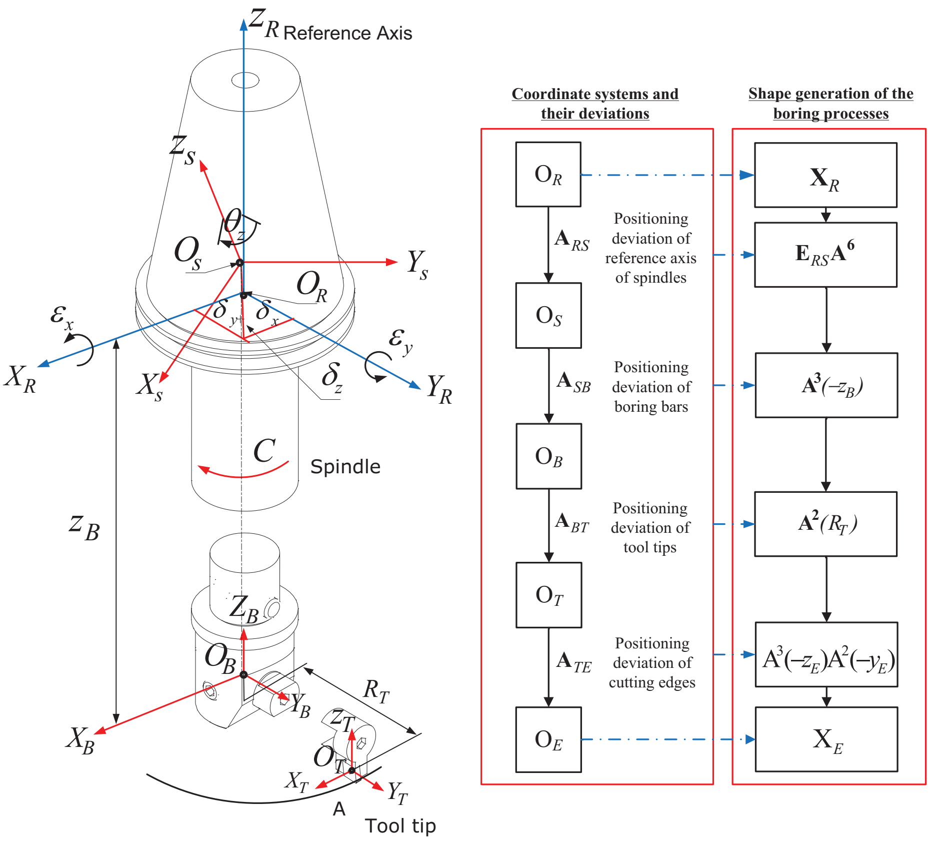
เมื่อเร็วๆ นี้ Chen et al. (2014) ได้มีการนำเสนอผลการศึกษาพิกัดความคลาดเคลื่อนแบบ 3 มิติ ซึ่งได้แสดงวิธีการวิเคราะห์ 4 วิธีการที่สำคัญของพิกัดความคลาดเคลื่อนแบบ 3 มิติคือ Tolerance-Map (T-Map), Matrix model, Unified Jacobain-Torsor Model and Direct Linearization Method (DLM) [2] และ Thasana et al. (2014) ได้มีการนำเสนอการจำลองตัดเฉือนเสมือนจริงโดยพิจารณาการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ (Kinematics) บนเครื่องกัดซี เอ็น ซี เพื่อประมาณค่าความเรียบผิวของชิ้นงานตัดเฉือน [3]

อย่างไรก็ตามการนำเสนอดังที่กล่าวมาข้างต้นแบบจำลองยังไม่ได้มีการจัดการเกี่ยวกับวิธีการในแต่ละโมเดลสำหรับการนำไปใช้ในการประมาณค่าของรูปร่างเรขาคณิตสุดท้ายของชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ หรือการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์สำหรับการประมาณค่าพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติในการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูป

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติบนพื้นฐานจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปโดยพิจารณาการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์บนเครื่องกัดซี เอ็น ซี โดยการสร้างโมเดลจำลองรูปร่างการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ (Kinematics) ของเครื่องมือกล และพิกัดรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต พารามิเตอร์การตัดเฉือนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยการส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 ของกลุ่มจุดหลายๆ จุดบนพื้นผิวรูปร่างชิ้นงานคว้านขึ้นรูป ซึ่งสร้างขึ้นโดยการสร้างแบบจำลองที่มีผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนสถิตในกระบวนการคว้านขึ้นรูป การเบี่ยงเบนของเพลาหมุน รูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต ซึ่งวิธีการที่ได้นำเสนอเป็นระบบนี้นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติสำหรับความเป็นทรงกระบอก (Cylindricity) ของผิวคว้านขึ้นรูปที่จำลองขึ้น

2. โมเดลการจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูป [3]

2.1 การเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ในกระบวนการคว้านขึ้นรูป



รูปที่ 1 ระบบพิกัดสำหรับการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูป าย

กระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซีเอ็นซีโดยส่วนมากจะทำการตัดเฉือนโดยการใช้ตัวจับยึดเครื่องมือตัดในเพลาหมุน (Spindle rotations) และหลังจากนั้นก็ทำการป้อนตัดในแนวเส้นตรงตามแนวแกน Z ดังนั้นการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของเพลาหมุนก็เป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการประเมินค่าการเบี่ยงเบนของเครื่องมือกล

จากรูปที่ 1 แสดงระบบพิกัดของการจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูป ซึ่งกำหนดโดยการเป็นตัวแทนการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่ โดยมี O_R, O_S, O_B, O_T และ O_E เหล่านี้เป็นตัวแทนของระบบพิกัดแกนอ้างอิง เพลาหมุน แกนเพลาคว้าน จุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตตามลำดับ

กระบวนการสร้างรูปร่าง (The shape generation processes) ของการจำลองเบี่ยงเบนเครื่องจักรกลและเครื่องมือกล โดยทั่วไปจะใช้ทฤษฎีการสร้างรูปร่างเคลื่อนที่ (The shape generation motions) [4] และระบบพิกัดแกนอ้างอิง O_R ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ISO 230-1 [5] และระบบ O_S, O_B, O_T และ O_E ถูกกำหนดและนำเสนอไว้โดย Thasana et al. (2014) ซึ่งโมเดลสำหรับการจำลองค่าเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของกระบวนการคว้านขึ้นรูป คำนวณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยการส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 สามารถแสดงดังสมการที่ 1 ดังนี้

$$X_R = E_z^{-1} A^3(z)^{-1} E_{RS} A^6_{RS}(\theta_z) E_\theta A^3_{SB}(-z_B) A^2_{BT}(R_T) A^2_{TE}(-y_E) A^3_{TE}(-z_E) X_E \qquad (1)$$

โดยที่

E_z : ตำแหน่งและความตรงเบี่ยงเบนในแนวแกน Z

E_{RS} : การเบี่ยงเบนในแนวขนานของเพลาหมุนจากระบบพิกัดอ้างอิง

E_θ : ตำแหน่งและการหมุนเบี่ยงเบนของเพลาหมุน

θ_z : มุมของเพลาหมุน

z : ตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

z_B : ความยาวตามแนวแกน Z ของแกนเพลาคว้าน

R_T : ตำแหน่งรัศมีระหว่างจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตกับแกนเพลาคว้าน

y_E : ระยะทางระหว่าง O_T และ O_E ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตและรัศมีปลายมีดแกน Y

z_E : ระยะทางระหว่าง O_T และ O_E ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตและรัศมีปลายมีดแกน Z

งานวิจัยนี้ได้นำระบบพิกัดและพารามิเตอร์การเบี่ยงเบนดังได้แสดงไว้ก่อนหน้านี้ เพื่อมาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติบนพื้นฐานจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปโดยพิจารณาการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์บนเครื่องกัดซี เอ็น ซี ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.2 สูตรการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ในกระบวนการคว้านขึ้นรูป

(ก) การเคลื่อนที่เพลาหมุน

การเคลื่อนที่เพลาหมุนถูกแสดงโดยสมการที่ 2 ดังต่อไปนี้

$$A_{RS_actual} = E_z^{-1} A^3(z)^{-1} A_{RS}^6(\theta_z) E_\theta$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_x(z) - \delta_y(C)\sin\theta_z \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & \delta_y(C)\cos\theta_z - \delta_y(z) + \delta_x(C)\sin\theta_z \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & -\delta_z(z) - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยที่

ε_x : ตำแหน่งมุมการเบี่ยงเบนของแกน X ในเพลาหมุนแกน C

ε_y : ตำแหน่งมุมการเบี่ยงเบนของแกน Y ในเพลาหมุนแกน C

$\delta_x(C)$: ตำแหน่งการเบี่ยงเบนของแกน X ในเพลาหมุนแกน C

$\delta_y(C)$: ตำแหน่งการเบี่ยงเบนของแกน Y ในเพลาหมุนแกน C

(ข) การเคลื่อนที่ของเพลาคว้าน

การเคลื่อนที่ของเพลาคว้านถูกแสดงโดยสมการที่ 3 ดังต่อไปนี้

$$A_{SB_actual} = [Eq.(2)] A_{SB}^3(-z_B)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & f_1 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & f_2 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & -\delta_z(z) - z_B - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่

$$f_1 = \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_x(z) - \delta_y(C)\sin\theta_z - z_B(\varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z)$$

$$f_2 = \delta_y(C)\cos\theta_z - \delta_y(z) + \delta_x(C)\sin\theta_z + z_B(\varepsilon_x\cos\theta_z - \varepsilon_y\sin\theta_z)$$

(ค) การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ต

การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ตถูกแสดงโดยสมการที่ 4 ดังต่อไปนี้

$$A_{BT_actual} = [Eq.(3)] A_{BT}^2(R_T)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & f_3 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & f_4 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \varepsilon_x R_T - z_B - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

โดยที่

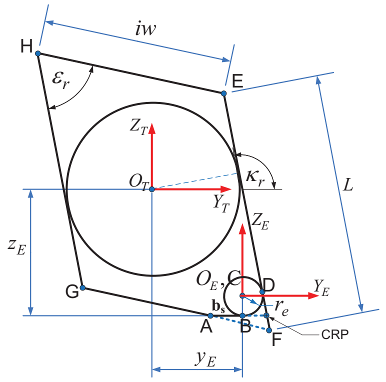
$$f_3 = \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_x(z) - \delta_y(C)\sin\theta_z - R_T\sin\theta_z - z_B(\varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z)$$

$$f_4 = \delta_x(C)\cos\theta_z - \delta_y(z) + \delta_x(C)\sin\theta_z + R_T\cos\theta_z + z_B(\varepsilon_x\cos\theta_z - \varepsilon_y\sin\theta_z)$$

(ง) การเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางรัศมีปลายมีด

เครื่องมือตัดหลายชนิดของเม็ดมีดอินเสิร์ตซึ่งมีอยู่ 17 รูปร่าง ได้ถูกกำหนดในมาตรฐาน ISO 13399 ของ

รูปร่างเรขาคณิตเม็ดมีดอินเสิร์ต [6] ดังรูปที่ 2 แสดงโมเดลรูปร่างเรขาคณิตทั่วไปของเม็ดมีดอินเสิร์ตแบบขนาน ซึ่งเริ่มต้นด้วยการวางตำแหน่งจุดศูนย์กลางเม็ดมีดอินเสิร์ต O_T ของรูปร่างเรขาคณิต



รูปที่ 2 รูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ต

การแยกแยะมุมเอียงของเม็ดมีดจำเป็นต้องใช้โมเดลทางกลศาสตร์และคิเนเมติกส์ของการตัดเฉือนและการควบคุมจุด โดยพิจารณาที่ฟังก์ชันของพารามิเตอร์เม็ดมีดอินเสิร์ต ซึ่งได้นำเสนอโดย Kaymakci et al. (2012) และ Thasana et al. (2014) ระบบพิกัดของการควบคุมจุด กำหนดบนพื้นฐานมาตรฐานรูปร่างเรขาคณิตของเม็ดมีดอินเสิร์ตดังสมการที่ 5 ต่อไปนี้

$$A_{TE_actual} = [Eq.4]A^2_{TE}(-y_E)A^3_{TE}(-z_E)$$

$$A_{TE_actual} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & \varepsilon_y\cos\theta_z + \varepsilon_x\sin\theta_z & f_3 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & \varepsilon_y\sin\theta_z - \varepsilon_x\cos\theta_z & f_4 \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 & \varepsilon_x R_T - z_B - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} *$$

$$* \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -y_E \\ 0 & 0 & 1 & -z_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (5)$$

โดยที่

$$y_E = \frac{b_s - (iw\cos(\varepsilon_r + \kappa_r)}{2} - \frac{L\cos(\kappa_r)}{2} - 2r_e\frac{\cot(\kappa_r) - 1}{\sin(\kappa_r)} + \ldots$$
$$\frac{\cos(\varepsilon_r + \kappa_r)((b_s\sin\kappa_r - r_e(\cos\kappa_r - 1))}{\sin(\varepsilon_r)}$$

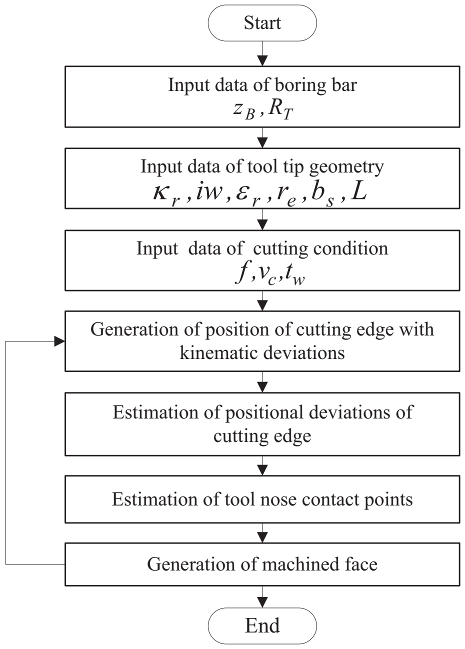
$$z_E = \sin(\varepsilon_r + \kappa_r)\frac{b_s\sin(\kappa_r) - r_e(\cos(\kappa_r) - 1)}{\sin(\varepsilon_r)}\ldots$$
$$-\frac{iw\sin(\varepsilon_r + \kappa_r)}{2} - \frac{L\sin(\kappa_r)}{2} - r_e$$

ε_r : มุมปลายมีด
iw : ความกว้างเม็ดมีดอินเสิร์ต
L : ความยาวเม็ดมีดอินเสิร์ต
κ_r : มุมคมตัดเม็ดมีดอินเสิร์ต
b_s : ความยาวคมตัดกวาดผิว
r_e : รัศมีปลายมีด

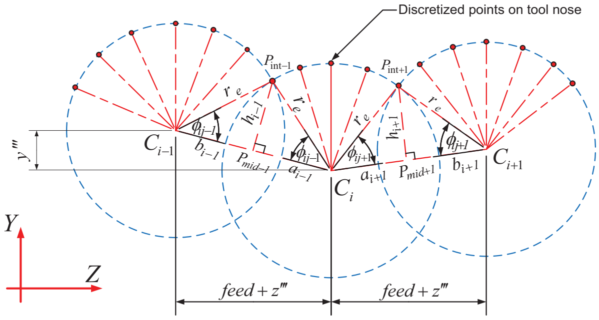
3. การสร้างแบบจำลองของผิวคว้านขึ้นรูป 3 มิติ

การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปบนเครื่องกัดซี เอ็น ซี ถูกดำเนินการและจัดรูปของจุดในการวิเคราะห์การสร้างผิวการคว้านขึ้นรูป โดยการใส่ข้อมูลบนพื้นฐานของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พารามิเตอร์การตัดเฉือน เรขาคณิตของคมตัดเม็ดมีดอินเสิร์ต ดังแสดงในรูปที่ 3 ของขั้นตอนการจำลองเสมือนจริงของกระบวนการคว้านขึ้นรูปที่ได้ถูกนำเสนอจาก Thasana et al. (2014)

เมื่อตำแหน่งของสันคมตัดจากรัศมีปลายมีดถูกได้รับในลำดับต่อไปก็จะสร้างจุดทั้งหมดบนการสร้างผิวคว้านขึ้นรูปของชิ้นงาน ซึ่งจุดของสันคมตัดจากรัศมีปลายมีดคมตัดเดียวบนจุดสัมผัสของสันคมตัด สามารถอธิบายในระนาบภาพตัด ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4 มุมของจุดวิกฤตเครื่องมือตัดจะถูกประมาณสำหรับการเป็นตัวแทนของรัศมีปลายมีด ซึ่งสร้างผิวของการตัดเฉือนด้วยการเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ที่ได้ถูกพิจารณารัศมีปลายมีดก็จะไม่มีความยาวเท่ากันบนเส้นตรงยาว และการยึดของรัศมีปลายมีดก็จะเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องด้วยภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ รัศมีปลายมีดไม่ต่อเนื่องก็สามารถแสดงและประเมินผิวการจำลองการคว้านขึ้นรูป



รูปที่ 3 แผนภูมิการสร้างแบบจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูปแบบ 3 มิติ [3]



รูปที่ 4 รูปร่างเรขาคณิตของรัศมีปลายมีดด้วยการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์และการสึกหรอเครื่องมือตัด

มุมสัมผัสเริ่มต้นและสุดท้ายของรัศมีปลายมีดด้วยการตัดเฉือนบนชิ้นงานสามารถถูกคำนวณโดยสมการที่ 6 – 7 ซึ่งได้อ้างอิงมาจาก Ramaswami (2010) และ Thasana et al. (2014)

$$\phi_{ij-1} = cos^{-1}\left[\frac{\overrightarrow{P_{int-1}C_i} \bullet \overrightarrow{C_{i-1}C_i}}{\left|\overrightarrow{P_{int-1}C_i}\right|\left|\overrightarrow{C_{i-1}C_i}\right|}\right] \quad (6)$$

$$\phi_{ij+1} = cos^{-1}\left[\frac{\overrightarrow{P_{int+1}C_i} \bullet \overrightarrow{C_{i+1}C_i}}{\left|\overrightarrow{P_{int+1}C_i}\right|\left|\overrightarrow{C_{i+1}C_i}\right|}\right] \quad (7)$$

การส่งถ่ายเมตริกซ์แบบ 4 คูณ 4 เพื่อจำลองผิวเสมือนจริงของการตัดเฉือนกระบวนการคว้านขึ้นรูปจากระนาบแกน YZ เพื่อวางแนวทางการหมุนที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมการหมุนของเพลาหมุน โดยการนำเอาสมการที่ 5 มาประยุกต์หาค่าเบี่ยงเบนในแต่ละแกนของผิวคว้านขึ้นรูปทั้งหมด (x''', y''', z''') ดังนั้นการจำลองตัดเฉือนเสมือนจริงสามารถแสดงดังสมการที่ 8 ดังนี้

$$F_t = (f)\cdot(\frac{\theta_z}{2\pi}); \quad R_{inst} = \sqrt{x'''^2 + y'''^2}$$

$$\begin{aligned} X_{surf_boring} &= \left(R_d + R_{inst} + r_e \cdot cos\,\phi_{ij+1}\right)\cdot sin\,\theta_z \\ Y_{surf_boring} &= \left(R_d + R_{inst} + r_e \cdot cos\,\phi_{ij+1}\right)\cdot cos\,\theta_z \\ Z_{surf_boring} &= F_t + z''' + r_e \cdot cos\,\phi_{ij+1} \end{aligned} \quad (8)$$

โดยที่

$X_{surf_boring}, Y_{surf_boring}, Z_{surf_boring}$: ตำแหน่งแกน XYZ ของจุดบนผิวการคว้านขึ้นรูป

R_d : รัศมีของผิวคว้านขึ้นรูป

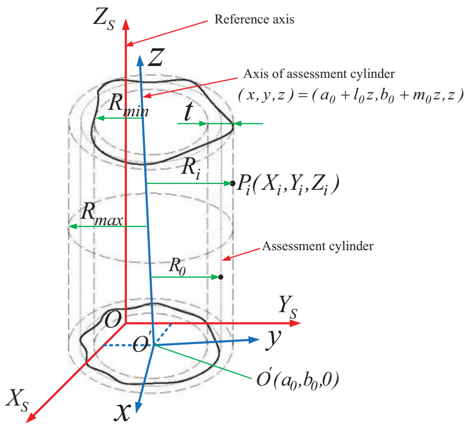
R_{inst} : ระยะเบี่ยงเบนในชั่วขณะของจุดศูนย์กลางรัศมีปลายมีดจากแกนของชิ้นงาน

4. การประมาณพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติ

โมเดลข้อผิดพลาดของรูปร่างที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นส่วนเครื่องมือกลเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการผลิตเพื่อความแม่นยำสูง วิธีการประมาณค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดเป็นวิธีการแบบดั้งเดิมเพื่อประมาณค่าผลรวมของข้อผิดพลาดน้อยที่สุดสำหรับการประเมินรูปร่างของชิ้นส่วนการผลิต แต่เนื่องด้วยวิธีการนี้การประเมินข้อผิดพลาดของรูปร่างอาจถูกประมาณโดยวิธีการประมาณค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งอาจไม่น้อยที่สุด [6], ดังนั้นในปัจจุบันนี้ ASME Y14.5 ได้กำหนดวิธีการประเมินค่าด้วยวิธีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (Minimum zone) ระหว่างการชดเชยสองพื้นที่ผิวที่

ได้รับจากการวัดจริง เช่น ความเบี่ยงเบนมากสุดระหว่างเดตัมและพื้นผิวจริง เป็นต้น ซึ่งพิจารณาสำหรับการประเมินรูปร่างของข้อผิดพลาด [7]

การประมาณความเป็นทรงกระบอกที่ได้แสดงในรูปที่ 5 เป็นการพิจารณาที่เดตัมอ้างอิงเพื่อวัดค่าพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติของพื้นผิวการคว้านขึ้นรูป ซึ่งความเป็นทรงกระบอกถูกสร้างบนพื้นฐานทั้งหมดของข้อมูลพิกัด 3 มิติ โดยการจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูป



รูปที่ 5 ระบบพิกัดสำหรับการวัดค่าเบี่ยงเบน

การประมาณพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติ ดังได้แสดงจากรูปที่ 5 พารามิเตอร์สำหรับการหาค่านี้ถูกสรุปในงานวิจัยของ Thasana et al. (2014) โดยความเป็นทรงกระบอกในระบบแกนพิกัดของเพลาหมุน $X_SY_SZ_S$ สามารถแสดงดังสมการที่ 9 - 10 ดังนี้

$$R_i = \sqrt{\left((X_i - l_0 Z_i - a_0)^2 + (Y_i - m_0 Z_i - b_0)^2\right)} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} t &= f(a_0, b_0, l_0, m_0) \\ &= \min(\max(R_i) - \min(R_i)) \\ &= \min(R_{\max} - R_{\min}) \end{aligned} \tag{10}$$

โดยที่

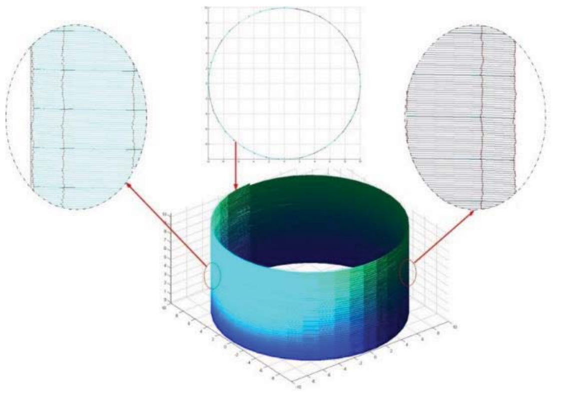
R_{max} : ค่าสูงสุดของรัศมีทรงกระบอก R_i

R_{min} : ค่าต่ำสุดของรัศมีทรงกระบอก R_i

ดังนั้นข้อผิดพลาดของพิกัดความคลาดเคลื่อนต่ำสุด t ของความเป็นทรงกระบอก คำนวณได้โดยใช้สมการที่ 10 บนพื้นฐานค่าพารามิเตอร์ของ a_0, b_0, l_0, m_0 และการสร้างจุด P_i (X_i, Y_i, Z_i) ซึ่งการรวมกันของค่าพารามิเตอร์ที่น้อยที่สุดของ t ถูกเลือกเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแทนของการประเมินความเป็นทรงกระบอก และพารามิเตอร์ a_0, b_0, l_0 และ m_0 ได้รับนี้ ก็จะให้ตำแหน่งและทิศทางของการประเมินความเป็นทรงกระบอก

5. กรณีศึกษา

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงผลของการจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของการคว้านขึ้นรูปกับค่าการเบี่ยงเบนทางคิเนเมติกส์ ซึ่งพื้นผิวของจุดจากการจำลองที่ได้รับคือ 20,000 จุด ตลอดการจำลองการตัดเฉือนของกระบวนการคว้านขึ้นรูป



รูปที่ 6 การจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงของผิวการคว้านขึ้นรูปที่รวมค่าการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์

ตารางที่ 1 สรุปการประมาณการความเป็นทรงกระบอกที่ได้จากการจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูปภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ของระยะการป้อนและรัศมีปลายมีด และรวมทั้งค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ที่ได้แสดงในสมการที่ 2 – 5

ตารางที่ 1 การประมาณความเป็นทรงกระบอกในการจำลองกระบวนการคว้านขึ้นรูปด้วยค่าเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์

ลำดับ	เงื่อนไขการตัดเฉือน			การประมาณพิกัดความคลาดเคลื่อน
	Dia. [mm]	f [mm/rev]	r_e [mm]	ความเป็นทรงกระบอก [μm]
1	72.0	0.05	0.4	15.48
2	**72.0**	**0.10**	**0.4**	**15.34**
3	72.0	0.15	0.4	17.96
4	72.0	0.20	0.4	23.65
5	72.0	0.25	0.4	27.26

จากตารางที่ 1 ค่าพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติ ที่น้อยที่สุดและเหมาะสมของความเป็นทรงกระบอก เมื่อพิจารณาสำหรับการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนเครื่องมือกลของ Dia. 72 มม. คือพารามิเตอร์การตัดเฉือนของระยะป้อนเท่ากับ 0.10 มม.ต่อรอบ และรัศมีปลายมีดเท่ากับ 0.4 มม. ที่ค่าความเป็นทรงกระบอกเท่ากับ 15.34 ไมครอน

6. สรุป

การประมาณพิกัดความคลาดเคลื่อน 3 มิติบนพื้นฐานจำลองการตัดเฉือนเสมือนจริงในกระบวนการคว้านขึ้นรูปโดยพิจารณาการเบี่ยงเบนเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ ซึ่งได้นำเสนอ สามารถสรุปดังต่อไปนี้

(1) โมเดลจำลองที่ได้นำเสนอเป็นตัวแทนของการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์และเครื่องมือตัดกับระบบพิกัดการอ้างอิงของหัวเพลาหมุน ซึ่งกระทำเข้าไปในการพิจารณาของระบบการเคลื่อนที่คิเนเมติกส์ของระบบเครื่องมือตัดสำหรับการคว้านขึ้นรูป

(2) โมเดลจำลองที่นำเสนอและวิธีการที่ได้ถูกประยุกต์เพื่อจำลองของการตัดเฉือนเสมือนจริงสำหรับกระบวนการคว้านขึ้นรูปของผิวการตัดเฉือน ได้ถูกประมาณบนพื้นฐานการใส่ข้อมูลของการเบี่ยงเบนคิเนเมติกส์ พารามิเตอร์การตัดเฉือน เรขาคณิตคมตัดเม็ดมีดอินเสิร์ต ทำให้ผู้วิจัยสามารถประมาณการของผิวชิ้นงานเสมือนจริงและประมาณความคลาดเคลื่อน 3 มิติของความเป็นทรงกระบอกได้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Abdul Kadir, A., Xu, X. and Hammerle, E. (2011). Virtual Machine tools and virtual machining – A technological review, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, October 2010, pp.494-508.

[2] Chen, H., Jin, S., Li, Z. and Lai, X. (2014). A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods, *Computer-Aided Design*, vol. 53, February 2014, pp. 1-13.

[3] Thasana, W., Sugimura, N., Iwamura K. and Tanimizu, Y. (2014). A study on estimation of 3-dimensional surface roughness of boring processes including kinematic motion deviations, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 8, No.4, February 2014, Paper No. 14-00096

[4] Sugimura, N. and Murabe, A. (1997). A study an analysis of alignment errors of 5-axis machine tools, paper presented in *the International Conference on Manufacturing Milestones toward the 27 Century*, JSME, Japan.

[5] ISO 230-1: 2012 (2012). *Test code for machine tools -Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions*, ISO, pp. 107-109.

[6] Kaymakci, M., Kilic, Z. M. and Altintas, Y. (2012). Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations, *International Journal of Machine Tools &* Manufacture, Vol. 54-55, December 2011, pp. 34-45.

[7] Lai, H-Y., Jywe, W-Y., Chen, C-K. and Liu, C-H. (2000). Precision modeling of form errors for cylindricity evaluation using genetic algorithms, *Precision Engineering*, Vol.24, March 2000, pp. 310 - 319.

[8] Endrias, D. H. and Feng, H-Y. (2003). Minimum-zone form tolerance evaluation using rigid-body coordinate transformation, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol.3, March 2003, pp. 31 - 38.