

หุ่นยนต์ช่วยในการผ่าตัดเปลี่ยนกระดูกเชิงกราน

Robotics Assisted Hip Surgery

ชิต เหล่าวัฒนา ชาติชาย มัธยม และ เดชดุสิต แสงสว่าง

ศูนย์ปฏิบัติการพัฒนาหุ่นยนต์ภาคสนาม(ฟีโบ้)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 66(2)470-9339, 66(2)4709129 โทรสาร 66(2)4709339, Email: s900365@cc.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้กับการผ่าตัดเปลี่ยนกระดูกเชิงกราน(Total Hip Replacement) ในทางการแพทย์แล้วจุดประสงค์ของการผ่าตัดชนิดนี้เพื่อรักษาผู้ป่วย"โรคกระดูกเสื่อม" ทั้งนี้ส่วนสำคัญอยู่ที่การนำหุ่นยนต์เข้ามาใช้ในการคว้านกระดูกให้มีขนาดพอดีกับตัวปลุกฝัง (Implant) เพื่อลดการสั่นคลอน มีสองขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งการวางตัวของตัวปลุกฝังบนกระดูกของผู้ป่วยและขั้นตอนที่สองเป็นการกำหนดโคออร์ดิเนตของกระดูก และการทำการคว้าน โดยทำการควบคุมแรงในระหว่างคว้าน เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ป่วย เราได้ทำการทดลองใช้หุ่นยนต์ทำการคว้านแบบจำลองได้ผลของความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวปลุกฝังและรูที่คว้านมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 1 มม.)

Abstract

This research represents a robotic application in orthopedic surgery for a case of total hip replacement. The objective of total hip replacement is to relief arthritis pain. Due to requirement in precision, a robot is used to mill a femur following the dimension of implants. No relative motion between implant and femur is allowed. Robotics assisted hip surgery is divided into two steps. Firstly, we prepare data of patients bone, consisting of bone coordinates, position of pin and path trajectory of cutting tool. This step is called Pre-operative planning.

In the second step so called intra-operative ,bone coordinates is set. Subsequently the robot begins to mill a femur along path planning. During milling, forces are controlled such that the effect of excessive forces to muscle can be avoided. Experimental results regarding tolerance between femur and implant are acceptable ($< 1 \text{ mm}$).

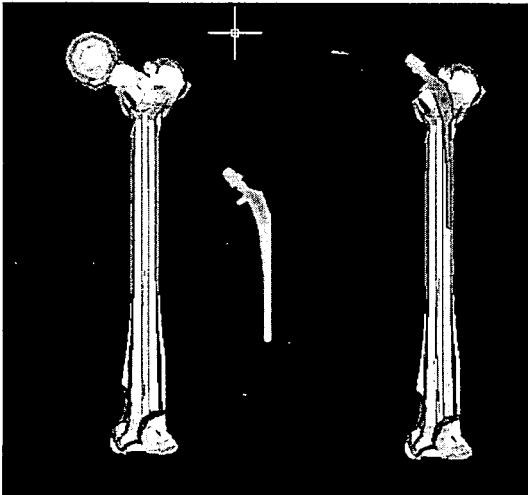
1.บทนำ

กระดูกเชิงกรานเป็นกระดูกที่ต่อเข้ากับกระดูกต้นขาในลักษณะเหมือนกับข้อต่อทรงกลม (Ball Joint) มีกระดูกอ่อนทำหน้าที่เป็นเหมือนกับตัวหล่อลื่นและรองรับระหว่างกระดูกเชิงกรานและหัวกระดูกต้นขา(Ball of Femur) และบริเวณข้อต่อส่วนนี้เป็นส่วนที่ต้องรับแรงอยู่ตลอดเวลา กระดูกอ่อนส่วนนี้เมื่อเกิดการรับแรงหรือถูกร้อนไปจะทำให้เกิดการกระทบกันของปลายเซลล์ประสานกับหัวกระดูกต้นขาโดยตรงไม่มีกระดูกอ่อนรองรับ จะทำให้รู้สึกเจ็บปวดมาก เรียกโรคนี้ว่า โรคกระดูกเสื่อม ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้กับทุกคนและจำเป็นต้องทำการผ่าตัดเพื่อเปลี่ยนกระดูกเชิงกราน (Total Hip Replacement) ซึ่งการผ่าตัดเปลี่ยนกระดูกเชิงกรานในปัจจุบันมี สองวิธี คือ

- 1) การใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึด
- 2) การไม่ใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึด

โดยวิธีที่ใช้ซีเมนต์มีข้อเสียอยู่หลายประการ เช่น อายุการใช้งานของตัวปลุกฝังที่สั้นกว่าวิธีที่ไม่ใช้ซีเมนต์ และความไม่แม่นยำในการวางตัวปลุกฝังทำให้ความรู้สึกของผู้ป่วยในการทำกิจกรรมต่างๆไม่เหมือนเดิม ดังนั้นวิธีไม่ใช้

ซีเมนต์จึงเป็นที่นิยมกันมากขึ้น จึงต้องนำหุ่นยนต์เข้ามาช่วยในการคว้านกระดูกให้มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับตัวปลุกฝังและคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยจำลองการวางตัวของตัวปลุกฝังให้เหมาะสมเพื่อให้การวางตัวของกระดูกเป็นไปอย่างแม่นยำและมีอายุการใช้งานนานขึ้น(ดังรูปที่1)



รูปที่ 1 แสดงการวางตัวของตัวปลุกฝังในกระดูก

สถาบันเทคโนโลยีแห่งมลรัฐแมสซาชูเซตส์[1] ได้มีการเริ่มนำหุ่นยนต์และคอมพิวเตอร์มาใช้ในการผ่าตัดให้กับผู้ป่วยจำนวน 15 รายให้ผลเป็นที่น่าพอใจคือทำให้อายุการใช้งานของตัวปลุกฝังยาวนานขึ้นและการเคลื่อนที่ของผู้ป่วยใกล้เคียงคนปกติมากขึ้น โดยใช้การฝังหมุดจำนวนสามอันลงในกระดูกผู้ป่วยก่อนที่จะทำการสแกนกระดูกผู้ป่วยเพื่อเป็นแกนอ้างอิงของกระดูกเทียบกับกระดูกจริง แต่มีข้อเสียคือในการเตรียมการก่อนทำการผ่าตัดนั้นใช้เวลานาน ดังนั้นทางศูนย์ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับกระดูกและข้อ (Centre for Orthopaedics Research) ของโรงพยาบาล เซดดีไซด์ (Shadyside) ร่วมกับศูนย์หุ่นยนต์และคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในทางการแพทย์แห่งมหาวิทยาลัย คาร์เนกี เมลลอน ในประเทศสหรัฐอเมริกา[2] ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุปกรณ์ให้ช่วยในการหาตำแหน่งของกระดูกโดยที่ไม่ต้องให้หมุดแต่ใช้การกำหนดจุดหลายจุดไปวางบนกระดูกให้เข้ารูปด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า ดิจิไดส์ซิ่งโพรบ (Digitizing Probe) และได้มีการนำหลักการผ่าตัดนี้ ไปใช้ในโรงพยาบาลใหญ่ๆในประเทศสหรัฐอเมริกา

รายงานการวิจัยนี้ศึกษาการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ในการคว้านกระดูกโดยมีการเตรียมข้อมูลของ

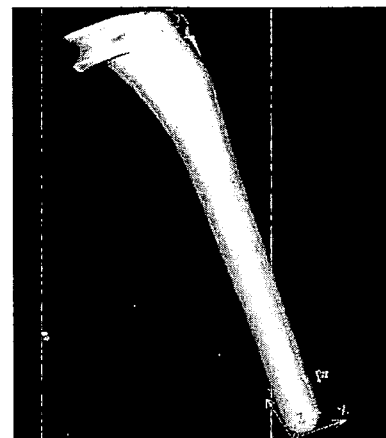
กระดูกโดยใช้ปูนปลาสเตอร์จำลองเป็นกระดูก รวมไปถึงหลักการในการวางตำแหน่งของหมุดที่ใช้ในการระบุแกนโคออร์ดิเนตของกระดูก การแปลงข้อมูลกราฟฟิกไปเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข(NC Code) เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และการควบคุมแรงที่ใช้ในการคว้านเพื่อความปลอดภัยของผู้ป่วย

2.ทฤษฎีพื้นฐาน

หลักการในการนำหุ่นยนต์มาช่วยในการคว้านกระดูกแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ

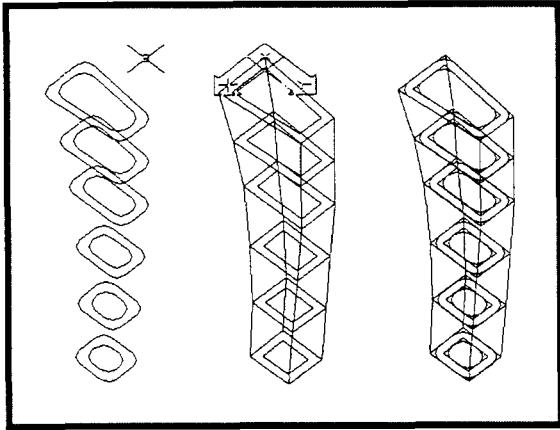
1 กระบวนการเตรียมข้อมูลก่อนการผ่าตัด(Pre-Surgical Planning)

หลักในการทำการผ่าตัดโดยการใช้หุ่นยนต์มาช่วยต้องเริ่มจากการเตรียมข้อมูลของกระดูกของผู้ป่วยและข้อมูลของตัวปลุกฝังที่ใส่เข้าไปโดยการสแกนเพื่อให้กระดูกจริงกับกระดูกที่ได้จากการสแกนมีจุดและแกนโคออร์ดิเนตร่วมกันจึงจำเป็นต้องทำการฝังหมุด สามอันลงในกระดูกก่อนที่จะทำการสแกน แล้วนำข้อมูลของตัวปลุกฝังที่เตรียมไว้ไปวางบนกระดูก



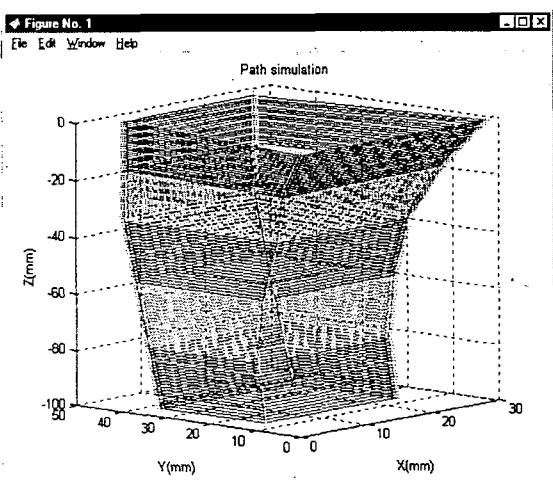
รูปที่ 2 แสดง Solid Model ตัวปลุกฝัง

ขั้นตอนต่อไปเป็นการแปลงข้อมูลกราฟฟิกไปเป็นข้อมูลในรูปของตำแหน่งและเส้นทางการเคลื่อนที่ของโบริดที่ใช้ในการคว้านโดยเทียบกับแกนโคออร์ดิเนตของกระดูกโดยการตัดรูปร่างของตัวปลุกฝังออกเป็นชั้นๆ ขึ้นกับความละเอียดในการคว้านแล้วทำการชดเชยการกีดของโบริดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการตัดกราฟฟิกของตัวปลุกฝั่งออกเป็นชั้นๆ

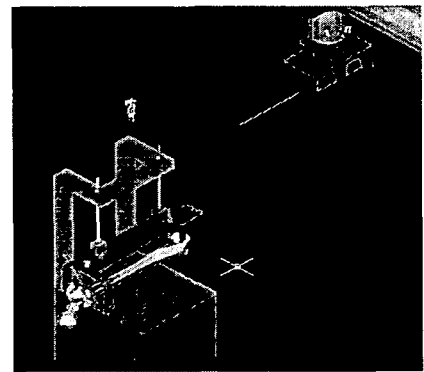
เมื่อได้ข้อมูลตำแหน่งต่างๆของกระดูกแต่ละหน้าตัดที่ซัดเซยไบมิต(CL Data)แล้วนำมาแปลงข้อมูลเป็นข้อมูลของหุ่นยนต์ ABB หรือที่เรียกว่าการทำ Post-Processing เช่น MOVE1 off(3,5,-2) v800 tool1/obj 1 คือการเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นจากจุดเดิมไปตามแกน x 3 มม. แกน y 5 มม. แกน -z 2 มม. ที่อัตราเร็ว 800 มม.ต่อวินาที โดยใช้แกนโคออร์ดิเนตของมิตตัวที่กำหนดไว้ ไปตามแกนโคออร์ดิเนตของวัตถุที่1 เมื่อได้ข้อมูลและคำสั่งที่หุ่นยนต์จะนำไปใช้งาน จะทำการจำลองการเคลื่อนที่อีกครั้งโดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 3 แล้วจึงส่งข้อมูลเข้าสู่ชุดควบคุมของหุ่นยนต์



รูปที่ 4 แสดงการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่โดยใช้ Matlab

2 กระบวนการขณะผ่าตัด (Intra-operative)

ก่อนที่จะเริ่มทำการคว้านจำเป็นที่จะต้องมีการยึดกระดูกไว้กับฐานให้แน่นแล้วทำการกำหนดตำแหน่งของหมุดบนกระดูกให้หุ่นยนต์รู้การวางตัวของกระดูกเทียบกับแกนโคออร์ดิเนตของกระดูกที่ได้ในกราฟฟิก แล้วก่อนแล้วจึงเริ่มทำการคว้านโดยการคว้านจะทำการคว้านที่ละหน้าตัดโดยจะทำการคว้าน 2 ครั้ง แบ่งเป็นการคว้านหยาบ (Rough Cut ประมาณ 5 มม.) และการคว้านละเอียด (Finished Cut น้อยกว่า 1-2 มม.) เพื่อให้การคว้านเป็นไปได้อย่างรวดเร็วจนครบทุกหน้าตัด



รูปที่ 5 รูปแสดงการจับยึดกระดูกก่อนทำการคว้าน

นอกจากนี้เราจำเป็นที่จะต้องมียระบบควบคุมความปลอดภัยที่จะเกิดขึ้นกับผู้ป่วย เช่น การควบคุมแรงที่เกิดขึ้น การควบคุมตำแหน่งของไบมิตไม่ให้เคลื่อนออกนอกเส้นทางที่กำหนดไว้ โดยการควบคุมแรงจะมีหลักการดังนี้ การควบคุมแรงสำหรับการทำศัลยกรรมเป็นองค์ประกอบหนึ่งของ ระบบควบคุมความปลอดภัยขณะทำการผ่าตัดที่มีความสำคัญมากต่อผู้ป่วย นอกเหนือไปจากการควบคุมทางด้านตำแหน่ง โดยการควบคุมแรงมีหลักการดังนี้

ในการควบคุมแรงนั้นเราจะกำหนดค่าแรงไว้ 2 ค่า คือค่าแรงมากที่สุดที่จะทำให้กล้ามเนื้อของผู้ป่วยเสียหาย ในระยะสั้น ($F_{upper design}$) และค่าแรงมากที่สุดที่จะทำให้กล้ามเนื้อของผู้ป่วยเสียหายในระยะยาว ($F_{lower design}$) (ดังรูปที่ 6) โดยตรงส่วนที่เป็น หลักการของการควบคุมแรง (Force Control Algorithm) จะแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

3.1.1) ในกรณีที่แรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่า $F_{lower design}$

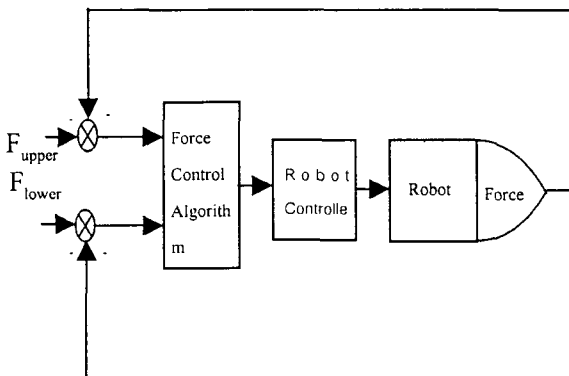
การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะเป็นไปตามเส้นทางเดิมที่กำหนดไว้

3.1.2) ในกรณีที่แรงที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง $F_{lower\ design} < F < F_{upper\ design}$

จะส่งสัญญาณไปหยุดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไว้แล้วเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วที่ลดลงจากนั้นเมื่อแรงมีค่าต่ำกว่า $F_{lower\ design}$ จะทำการส่งสัญญาณให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าเดิม

3.1.3) ในกรณีที่แรงที่เกิดขึ้นมากกว่า $F_{upper\ design}$

จะทำการส่งสัญญาณให้หุ่นยนต์ทราบถึงทิศทางของแรงที่เกินว่าเกินในทิศทางใดแล้วให้หุ่นยนต์เก็บค่าตำแหน่งของหุ่นยนต์ในขณะนั้นไว้แล้วให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางของแรงเพื่อลดแรงที่เกิดขึ้นจนกระทั่งแรงที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่า $F_{lower\ design}$ โปรแกรมจะถามว่าต้องการเคลื่อนที่ไปที่จุดเดิมและทำงานต่อหรือไม่ ซึ่งระหว่างนี้เราสามารถตรวจสอบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น อาจเกิดจากมอเตอร์ลมไม่ทำงาน เป็นต้น เมื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มให้หุ่นยนต์เริ่มทำงานต่อไปจนเสร็จ



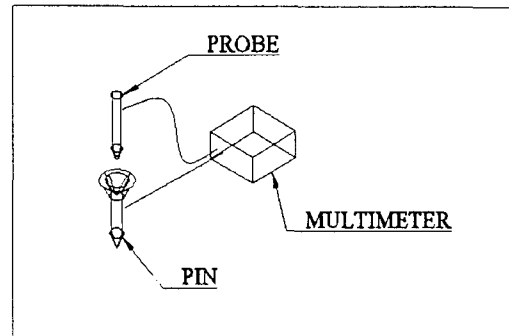
รูปที่ 6 แสดงองค์ประกอบของการควบคุมแรง

หลักในหาตำแหน่งของหมุด

ในการค้นหาตำแหน่งของหมุดหรือสกรูนั้นก็เพื่อให้เราทราบถึงตำแหน่งและแกนโคออร์ดิเนตของกระดูก (Object Coordinate) เทียบกับแกนโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการคำสั่งที่เตรียมไว้ นอกจากตำแหน่งหมุดบน Solid Modeling กับหมุดบนกระดูกจริงต้องเป็นจุดเดียวกันแล้วการหาตำแหน่งที่ถูกต้องของหมุดบนกระดูกก็เป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำของการคว้านกระดูก

โดยมีหลักการดังนี้ คือ เคลื่อนที่หัวโพรบ (Probe) ที่ติดที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งของหมุดแล้วค่อยๆ เคลื่อนลงมาตามแกนของหมุดจนกระทั่งปลายของหัวโพรบ (Probe) สัมผัสกับบนสุดของหมุดโดยสังเกตจากการนำ

ไฟฟ้าระหว่าง Probe และ หมุดโดยมัลติมิเตอร์ (จะมีเสียงเตือน) จากนั้นนำค่าตำแหน่งของแต่ละหมุดไปคำนวณหาตำแหน่งและการวางตัว (Orientation) แกนโคออร์ดิเนตของกระดูกเทียบกับแกนโคออร์ดิเนตของหุ่นยนต์



รูปที่ 7 แสดงการหาตำแหน่งหมุดบนกระดูก

3.การทดลองและผลการวิเคราะห์

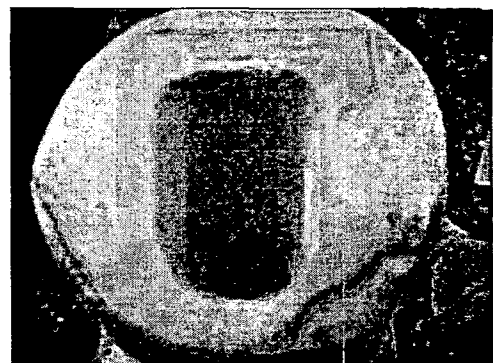
อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย

1. หุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB 4400 ชุดควบคุม รุ่น S4

2. อุปกรณ์วัดแรงหองศาอิสระ

3. มอเตอร์ลมและหัวกัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มม.

ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้และผิวสำเร็จที่ได้จากการคว้าน

ระบบการคว้านโดยใช้หุ่นยนต์ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ทั้งทางด้านตำแหน่งและแรง ซึ่งจุดนี้เกิดมาจากสาเหตุหลายประการคือ

ความคลาดเคลื่อนทางด้านตำแหน่ง

โดยผลความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองมีค่าเป็นอยู่ในช่วง 0.1-1.2 mm หรือ 0.5-4% ซึ่งอาจเกินค่า error ที่ควบคุมไว้สำหรับการทำ Total Hip Replacement (0.5-1 mm) ไม่มาก จึงสามารถที่จะนำไปใช้จริงได้แต่ควรมีระบบตรวจสอบการเคลื่อนที่ของโบบิตตลอดเวลาเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นกับผู้ป่วยโดยสาเหตุของความคลาดเคลื่อนเกิดจาก

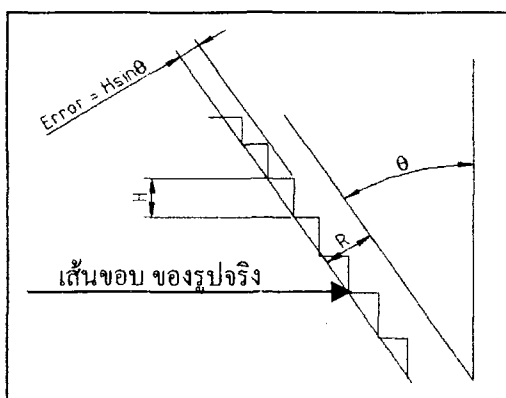
1. ความคลาดเคลื่อนที่มาจากกำหนดจุดกำเนิดและแกนโคออร์ดิเนตต่าง ๆ บนแบบหล่อปูนปลาสเตอร์ไม่ตรงกับบน Solid model ของปูนปลาสเตอร์

2. ความคลาดเคลื่อนที่มาจากคว้านโดยไม่มีการเปลี่ยนมุมการวางตัว(Orientation) ของโบบิตทำให้เกิดชั้นบันไดขึ้นสามารถได้โดย เนื่องจากการคว้านที่เกิดขึ้นไม่คำนึงถึงผลของ Orientation ของโบบิตทำให้เกิดผิวในลักษณะชั้นบันได(Staircase)ขึ้น ซึ่งความคลาดเคลื่อนสูงสุดจะขึ้นกับความลึกในการกัดกับมุมของผิวเอียง ดังรูปที่ 8

$$\text{Error} = H \cdot \sin \theta$$

โดยที่ H เป็นความลึกของการกัดแต่ละครั้ง(มิลลิเมตร)

θ เป็นค่ามุมเอียงของรูปร่างที่ทำการคว้านในแนวแกน Z



รูปที่ 9 แสดง error ที่เกิดขึ้นบนไดที่ เกิดจากการคว้าน

ดังนั้นเราจึงควรเลือกค่าความลึกในการกัดมีค่าในช่วง 1-2 mm เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูงเกิน

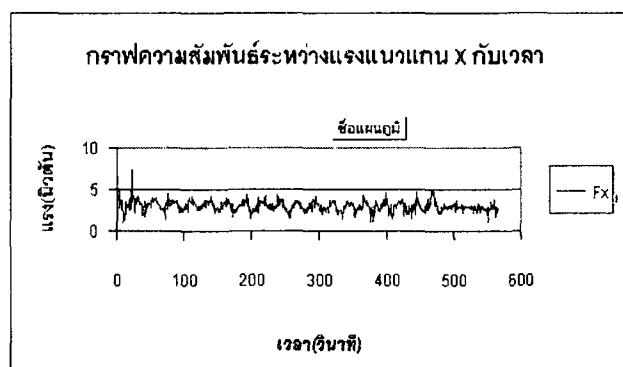
1 mm เนื่องจากการคว้านตัวปลูกฝังรูปแบบนี้มีมุมเอียงในช่วง 0-30 องศา

นอกจากนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ อีกเช่น ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณเชิงเส้น (Linear Approximation) โดยการตัดรูปกราฟฟิคสามมิติ (3D Solid Model) ออกเป็นหลายๆส่วนยังตัดละเอียดเท่าไรความคลาดเคลื่อนก็ยิ่งน้อยลง และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากหมุดที่วางบนกราฟฟิคสามมิติ (3D Solid Modeling) ของแบบหล่อปูนปลาสเตอร์กับแบบหล่อปูนปลาสเตอร์จริงไม่ตรงกัน

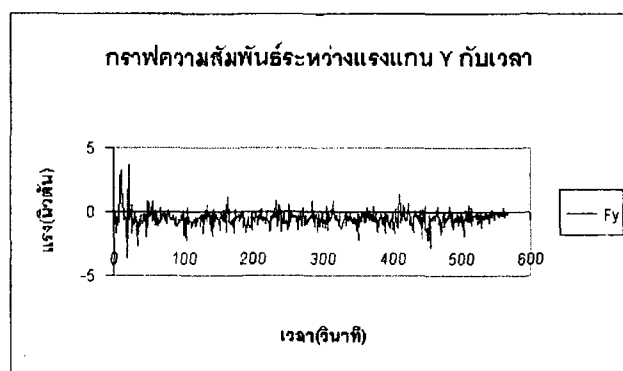
จากการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถเลือกอัตรา ความลึกของการกัดเป็น 1-2 mm ในการกัดละเอียด เพื่อให้ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยที่เรายังไม่คำนึงถึงเวลาในการคว้าน

ความคลาดเคลื่อนทางด้านแรง

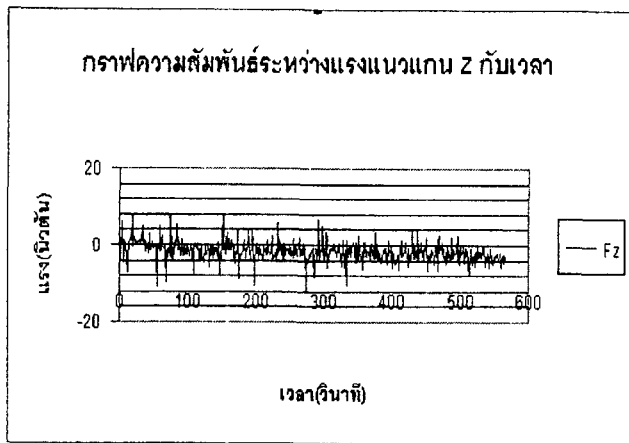
โดยจากการทดลองเราสามารถเก็บค่าแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนได้ดังรูป



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน X กับเวลาขณะทำการคว้าน



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน Y กับเวลาขณะทำการคว้าน



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน Z กับเวลาขณะทำการคว้าน

จะเห็นว่าเมื่อแรงที่เกิดขึ้นมากกว่า 5 นิวตันแรงจะลดลง ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากตัว อุปกรณ์วัดแรง (Force Sensor) วัดค่าในช่วงแรงต่ำๆ ไม่ค่อยแม่นยำ และความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากความล่าช้าของสัญญาณในการประมวลผลจากการขัดจังหวะ (Interrupt) โดยจะมีเวลาหน่วง (Delay Time) ประมาณ 3 วินาที

4.สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีความแม่นยำสูงมาประยุกต์ใช้ทางด้านการแพทย์ที่มีการควบคุมทั้งตำแหน่งและแรง แต่ยังคงเป็นเพียงการเริ่มต้นระบบต่างๆ ยังคงมีข้อผิดพลาดเนื่องจากอุปกรณ์ที่มีอยู่และการติดเชื่อที่อาจเกิดขึ้นดังนั้นเรายังไม่สามารถนำไปใช้ในทางจริงได้ แต่เราสามารถนำหลักการต่างๆ เหล่านี้ไปพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้ทำงานได้ถูกต้องยิ่งขึ้นและสะอาดปลอดภัยตามมาตรฐานของ National Institute of Health (NIH), USA ได้

5.กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ นายแพทย์ สมศักดิ์ เหล่าวัฒนา อาจารย์ วุฒิชัย วิไลรัตน์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการผ่าตัดเปลี่ยนกระดูกเชิงกรานและให้ยืมวัสดุปลูกฝัง (Implant) โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ ที่ให้เข้าชมการผ่าตัด สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอุตสาหกรรม ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับเครื่อง Computer Numerical Control (CNC) คุณ กฤษไกรพ์ สิทธิเสรีประทีป จากสถาบัน

เทคโนโลยีอาเซียน ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างกราฟฟิกสามมิติ (3D Solid Modeling) จากข้อมูลที่ได้จาก CT Scan และบุคคลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

6.เอกสารอ้างอิง

- 1) R.H.Taylor, B.D.Mittelstadt, H.A.Paul, W.Hanson, P.K. azanzides, J.F.Zuhars, B.williamson, B.I.Musits, E.Glassman, and W.L.Bargar. An image-direct robotics system for precise orthopaedics surgery. IEEE Transactions on Robotics on Robotics and Automation, 10(3):261
- 2) F.L. LEWIS, C.T. ABDALLAH, D.M., Control of Robot Manipulators, Macmillan Publishing Company, 1993
- 3) Su-Chen Jonathan Lin Albany, Computer numerical control : from programming to networking, NY : Delmar Publisher, c1994
- 4) B.F Morrey, Editor. Reconstructive Surgery of Joints chapter Joint Replacement Arthroplasty, page 605-996
- 5) STEVE KRAR, ARTHUR GILL, CNC Technology and Programming, McGRAWHILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1990
- 6) JOHN J. CRAIG, INTRODUCTION TO ROBOTICS, Addition-Wesley Publishing Company, 1995
- 7) Hans B. Kief, T. Frederick Waters Lake Forest, Computer numerical control, IL : Glencoe, c1992
- 8) ผศ. ชาลี ตระการภูว, "เทคโนโลยีซีเอ็นซี," สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น 2541