DOI: 10.14457/CU.doc.2021.28

การใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดรักษาโรคเนื้องอกและมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (computer-assisted surgery in musculoskeletal oncology)

ชินดนัย หงสประภาส

บทนำ

Computer-assisted orthopaedic surgery (CAOS) หรือการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดรักษาโรคทางออร์โธปิดิกส์ เริ่มมีการใช้กันมาได้มากกว่า 20 ปี โดยก่อนหน้านั้นมีการผ่าตัดมาก่อนในสาขาประสาทศัลยศาสตร์ตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1980 ในการผ่าตัดรักษา brain tumor[1, 2] ก่อนที่จะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการผ่าตัดทางออร์โธปิดิกส์ในภายหลัง โดยในระยะแรกยังไม่เป็นที่นิยมในกลุ่มแพทย์ออร์โธปิดิกส์อันเนื่องมาจากความไม่คุ้นเคยและขั้นตอนที่ซับซ้อน[3] แต่ในภายหลังพบว่าได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยสังเกตได้จากจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีจำนวนเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าช่วงก่อนปี ค.ศ. 2000 ถึงเกือบ 10 เท่าตัว[4] สาเหตุน่าจะเกิดจากแพทย์ได้เห็นประโยชน์ของการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวมากขึ้น กล่าวคือสามารถประยุกต์ใช้ในการผ่าตัดทางด้านออร์โธปิดิกส์ได้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการใส่ implant ในกระดูกต่าง ๆ ช่วยในการจัดกระดูกที่หักและยึดตรึงให้เข้าที่ การสร้างเส้นเอ็นที่บาดเจ็บในข้อต่าง ๆ การตัดต่อกระดูกเพื่อแก้ไขภาวะผิดรูป รวมถึงการผ่าตัดเนื้องอกกระดูกที่มีความซับซ้อน ทั้งนี้อาศัยหลักการที่ว่าการใช้ระบบคอมพิวเตอร์จะทำให้การผ่าตัดดังกล่าวมีความแม่นยำมากขึ้นส่งผลให้ได้ผลการรักษาที่ดีขึ้น รวมถึงลดโอกาสในการเกิดภาวะแทรกซ้อนที่เกิดจากการผ่าตัดได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย[5]

นิยามของการรักษาโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดโรคทางออร์โธปิกส์หรือ CAOS คือการใช้อุปกรณ์ทางคอมพิวเตอร์ทุกชนิดและเครื่องมือวัสดุต่าง ๆ อันได้แก่ หุ่นยนต์ช่วยผ่าตัด ระบบนำร่องด้วยคอมพิวเตอร์ รวมถึงเครื่องมือผ่าตัดสำหรับผู้ป่วยเฉพาะราย ที่สามารถช่วยเหลือแพทย์ออร์โธปิดิกส์ในการผ่าตัดหมายรวมถึงการวัดค่าและจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการผ่าตัดของผู้ป่วยแต่ละรายอีกด้วย[4] โดยองค์ประกอบพื้นฐานที่มีความสำคัญของระบบ CAOS ชนิดที่ใช้ระบบ navigation หรือระบบนำร่องด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งได้รับความนิยมและการยอมรับเป็นอย่างสูงมีอยู่ด้วยกัน 3 องค์ประกอบโดยอย่างแรกคือ therapeutic object คือตำแหน่งของกระดูกในตัวผู้ป่วยและ implant ที่จะใช้ทำการผ่าตัด อย่างที่สองคือ virtual object คือแผนการผ่าตัดรวมถึงลักษณะของ implant ที่จะใช้ในภาพถ่ายเสมือนจริง และอย่างสุดท้ายคือ navigator link คือระบบนำร่องที่จะเชื่อมสององค์ประกอบข้างต้นเข้าด้วยกัน[6]

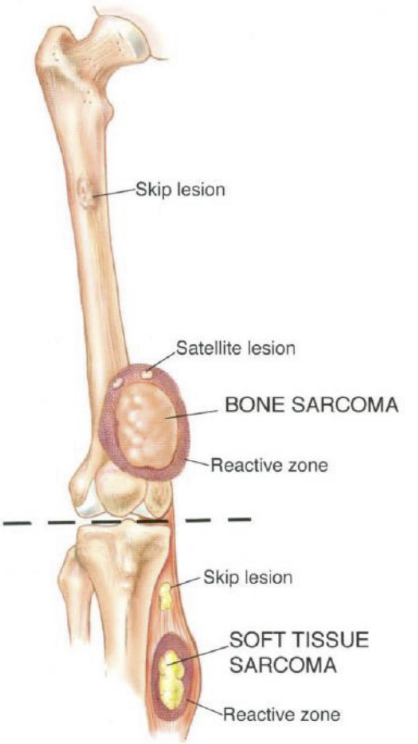
Computer assisted surgery in musculoskeletal oncology หรือชื่อที่มีการเรียกอย่างแพร่หลายอีกชื่อ คือ computer-assisted tumor surgery (CATS) เป็นการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดรักษาโรคเนื้องอกและมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ซึ่งมีหลักการรักษาที่แตกต่างไปจากการรักษาผู้ป่วยทางออร์โธปิดิกส์ในโรคอื่น ๆ โดยขั้นตอนสำคัญที่ระบบคอมพิวเตอร์มีสามารถมีบทบาทเข้ามาช่วยเหลือได้มากคือ ขั้นตอนการผ่าตัดเนื้องอกออกให้ได้ negative margin และแม่นยำเพียงพอที่จะสามารถเก็บรักษากระดูกและเนื้อเยื่อข้างเคียงได้มากที่สุด ซึ่งถือเป็นเป้าหมายแรกที่สำคัญในการรักษาผู้ป่วยในกลุ่มนี้[7] ตามมาด้วยขั้นตอนการผ่าตัดเสริมสร้างทดแทนกระดูกส่วนที่ถูกตัดออกไปโดยใช้วัสดุที่มีขนาดใกล้เคียงกับกระดูกเดิมและอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และยังรวมถึงการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและสร้างวัสดุทดแทนกระดูกขึ้นมาโดยการใช้เทคโนโลยี 3-dimentional printing (3D printing)[3] ถึงแม้ในช่วงแรกของการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดรักษาโรคเนื้องอกและมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันโดยเฉพาะการใช้ navigation จะมีรายงานพบว่ามีภาวะแทรกซ้อนเกิดขึ้นค่อนข้างมากก็ตาม แต่เชื่อว่าส่วนนึงน่าจะเป็นสาเหตุจากการขาดประสบการณ์ของแพทย์ผู้ใช้ในระยะแรก ต่อมาในภายหลังด้วยการเรียนรู้ฝึกฝน และประสบการณ์ที่มากขึ้นของแพทย์ผ่าตัดทำให้ผลของการรักษาดีขึ้น มีความปลอดภัย สามารถ reproducible รวมถึงมีภาวะแทรกซ้อนที่น้อยลงตามลำดับ[3]

ปัจจุบันนี้ข้อบ่งชี้ที่ได้รับการยอมรับในการใช้ CATS ได้แก่การผ่าตัดในตำแหน่งที่มีลักษณะซับซ้อนผ่าตัดยากเช่นบริเวณ spine, sacrum หรือ pelvis รวมถึงการผ่าตัดที่ต้องการความแม่นยำในการตัดกระดูกเช่นการตัดกระดูกบริเวณ long bone ที่ต้องใส่ custom made implant หรือ allograft โดยเฉพาะในกระดูกของผู้ป่วยที่มีขนาดเล็กหรือกระดูกของผู้ป่วยเด็กเป็นต้น[1, 3, 7] ส่วนรายละเอียดของ CATS จะขอบรรยายไปตามหัวข้อต่อไปนี้

1. CATS in bone and soft tissue tumor resection
    1.1. Surgical margin
    1.2. Navigated surgery
    1.3. 3D printing
        1.3.1. Patient specific instrument
        1.3.2. Anatomical model
2. CATS in bone and soft tissue reconstruction
    2.1. 3D implant
    2.2. Massive allograft
    2.3. Implant insertion
3. CATS ในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์
4. CATS ในปัจจุบันและแนวโน้มในอนาคต

1. CATS in bone and soft tissue tumor resection

ขั้นตอนการตัดเนื้องอกหรือมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการรักษา เพราะเป็นการนำเอาก้อนมะเร็งออกให้หมดโดยได้ margin หรือขอบเขตของการตัดที่เหมาะสม เนื่องจาก margin ของการผ่าตัดส่งผลโดยตรงกับ local recurrence หรือการเป็นซ้ำของโรค[8] การผ่าตัดในอดีตจึงเป็นการผ่าตัดโดยการทำ amputation โดยคาดหวังว่าสามารถเอามะเร็งออกได้หมด ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาของการให้ยาเคมีบำบัดรวมถึงเทคโนโลยีในการผ่าตัด จึงทำให้มีการผ่าตัด limb sparing เพื่อที่จะเก็บระยางค์ที่มากขึ้น โดยCATS จะมีบทบาทในการผ่าตัดทำให้ได้ margin ที่เหมาะสมอย่างแม่นยำไม่ทำให้เกิดการบาดเจ็บต่อตำแหน่งของกระดูกที่สำคัญ เส้นเอ็น รวมถึงเส้นประสาทเส้นเลือดใกล้เคียง ทำให้ผลของการผ่าตัดรักษานอกจากจะมี oncological outcome ที่ดีผู้ป่วยจะมี functional outcome รวมถึง quality of life ที่ดีขึ้นด้วย[7] โดยในปัจจุบันการใช้ CATS ในขั้นตอนของการตัดจะมีการใช้อยู่ 2 ระบบคือ image-based navigation หรือ navigated surgery และ patient-specific instrumentation (PSI) จากการใช้เทคโนโลยี 3D printing[1, 2]



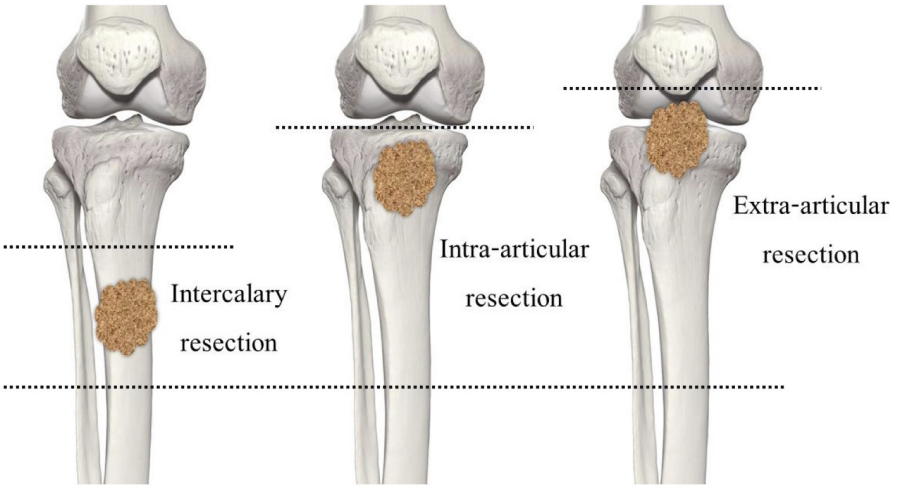
รูปที่ 1. แสดงลักษณะแบบแผนการเติบโตของ sarcoma ที่มีการเจริญเติบโตเข้าหาศูนย์กลาง (centripetal)[9]

1.1 Surgical margin

Surgical margin หรือขอบเขตของการผ่าตัดถือเป็นประเด็นสำคัญลำดับแรกของการผ่าตัดเนื้องอกหรือมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน แต่เหนือสิ่งอื่นใดต้องทราบถึงแบบแผนการเติบโตของทั้ง bone และ soft tissue sarcoma เสียก่อน โดยลักษณะเฉพาะของ sarcoma จะมีการเจริญเติบโตเข้าหาศูนย์กลาง (centripetal) ทำให้บริเวณขอบของตัวก้อนจะมีเซลล์มะเร็งที่กำลังเจริญเติบโตอยู่เป็นจำนวนมาก มี reactive zone เป็นรอยต่อระหว่างก้อนมะเร็งกับเนื้อเยื่อปกติรอบข้าง อาจมีลักษณะเป็น pseudocapsule fibrous หรือ reactive bone ก็ได้ ส่วนบริเวณของ reactive zone อาจมีลักษณะของ satellite nodule ที่เกิดจาก microextension ของตัวก้อน แต่ถ้าพบ nodule เลยออกจาก reactive zone แต่อยู่ใน compartment เดียวกันจะเรียกว่า skip lesion ซึ่งมักพบในกลุ่ม high grade sarcoma มากกว่า low grade sarcoma ดังแสดงในรูปที่ 1[9] ส่วนการพบ tumor นอก compartment จึงจะเรียกว่า metastasis ซึ่งมักจะพบที่ปอดในระยะแรกก่อนจะพบที่กระดูกชิ้นอื่น ๆ ต่อมา[9]

การผ่าตัด sarcoma จึงต้องทำการตัดเพื่อเอาเซลล์มะเร็งออกให้หมดคือให้ได้ free หรือ negative margin ครอบคลุมทั้ง satellite และ skip lesion โดยเมื่อพิจารณาถึงวิธีการผ่าตัดบริเวณ

กระดูก long bone สามารถแบ่งตำแหน่งของการตัดกระดูกตามตำแหน่งการลุกลามของเนื้องอกเทียบกับข้อต่อได้เป็น 3 ระดับดังรูปที่ 2 คือ intercalary resection ใช้กับเนื้องอกที่อยู่ไกลจากข้อต่อ intra-articular resection ใช้กับเนื้องอกที่อยู่ใกล้กับข้อต่อแต่ยังไม่มีการลุกลามทะลุผ่านผิวข้อ extra-articular resection ใช้กับเนื้องอกที่มีการลุกลามทะลุผ่านผิวข้อมาปนเปื้อนในข้อต่อแล้ว[10]



รูปที่ 2. แสดง level of resection ในตำแหน่งต่าง ๆ เทียบกับข้อต่อของการผ่าตัดบริเวณกระดูก long bone

ส่วนการรายงาน surgical margin ของการผ่าตัด bone and soft tissue sarcoma มีการรายงานในหลาย ๆ รูปแบบ ในอดีต Enneking ได้นำเสนอ musculoskeletal tumor society (MSTS) classification[10] ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากโดยแบ่งเป็น radical, wide, marginal และ intralesional margin ซึ่งโดยทั่วไปการผ่าตัดมะเร็งควรต้องได้ wide margin เป็นอย่างน้อยเพื่อให้สามารถตัด satellite lesion ได้โดยยอมรับที่ประมาณ 2-3 ซม. ในบริเวณ soft tissue part ของตัวก้อน ส่วน bone part ควรจะตัดประมาณ 3-5 ซม. อย่างไรก็ตามทาง American Joint Committee on Cancer (AJCC) ได้กำหนด R classification[11] เพื่อเพิ่มความละเอียดในการดู residual tumor มากขึ้นโดยแบ่งเป็น negative (R0), microscopically positive (R1) และ macroscopically positive (R2) ตามด้วยในปี 2002 Union Against Cancer (UICC) ได้เสนอ R + 1 mm classification[12] ให้มี normal tissue อย่างน้อย 1 มม. ระหว่าง tumor และ margin ถึงจะได้เป็น negative margin (R0) ส่งผลทำให้มี R1 มากขึ้นเมื่อใช้ classification ชนิดนี้ ส่วน Toronto margin context classification (TMCC)[13] ได้มีการพูดถึง residual tumor โดยแบ่งตามจุดประสงค์ในการผ่าตัดด้วยโดยแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ negative margin, unplanned positive

margin, planned close but with an ultimately positive microscopic margin along a critical structure และกลุ่มสุดท้าย คือ positive margin after the whoops procedure อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการลดปัญหาการสับสนเรื่องการตีความที่มีหลาย classification จึงแนะนำให้รายงานผลเป็น tumor clearance โดยใช้ระยะห่างของ margin เป็นหน่วยเมตริก[14] แต่เมื่อพูดถึงระยะห่างของ margin ขั้นต่ำที่จะส่งผลให้ลด local recurrence ในมะเร็งแต่ละชนิดก็ยังเป็นที่ถกเถียงกันนอกจากนี้ยังมีคำแนะนำให้พิจารณาถึง quality ของ margin ด้วยว่าเป็นเนื้อเยื่อที่มีคุณภาพประเภทไหนไม่ได้ดูเพียงแค่ระยะห่างแต่เพียงอย่างเดียว[15]

1.2 Navigated surgery

Computer-assisted tumor surgery (CATS) มีบทบาทสำคัญในขั้นตอนของการตัดเนื้องอกและมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันให้ได้ negative surgical margin รวมถึงให้ได้แนวการตัดที่ถูกต้องตามที่วางแผนไว้ เพื่อทำให้การ reconstruction ด้วย prosthesis หรือ allograft ทำได้อย่างแม่นยำส่งผลให้ผู้ป่วยมีการใช้งานที่ดีหลังการผ่าตัดซึ่งการผ่าตัด navigated surgery คือการผ่าตัดโดยใช้ระบบนำร่องด้วยคอมพิวเตอร์ ถือเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถช่วยให้การผ่าตัดมีความแม่นยำมากขึ้น มีจุดเริ่มต้นเมื่อปี ค.ศ. 2004 จากการผ่าตัดบริเวณ pelvic และ sacrum โดยใช้ navigation อ้างอิงจากภาพ computerized tomography scan (CT scan) พบว่ามีความแม่นยำในการตัดมากขึ้น[1] จากนั้นจึงมีการพัฒนาและได้รับความนิยมสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยลักษณะการผ่าตัด navigated surgery แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 3

ถึงแม้ว่าการผ่าตัด CATS จะใช้เป็น CT-based navigation ซึ่งเป็นระบบนำร่องด้วยคอมพิวเตอร์ที่อ้างอิงจากภาพ CT scan แต่เนื่องจากการประเมินขอบเขตของเนื้องอกจะใช้ภาพ magnetic resonance imaging (MRI) เป็นหลัก ระบบ navigation ที่ใช้จึงต้องมี software ที่สามารถรวมภาพทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน ซึ่งถือเป็นข้อแตกต่างของการใช้ระบบ navigation เทียบกับสาขาอื่น ๆ ของออร์โธปิดิกส์ ส่วนการใช้ MRI-based navigation ซึ่งได้รับความนิยมในการผ่าตัด craniomaxillofacial แต่จะมีข้อจำกัดในการผ่าตัดเนื้องอกบริเวณกระดูกเนื่องจากบริเวณกระดูกจะมีขนาดก้อนที่ใหญ่กว่า การเก็บภาพ MRI ให้มีความละเอียดโดยปราศจาก artifact ของการเคลื่อนไหวจะทำได้ยาก ทำให้ไม่ได้รับความนิยมในการผ่าตัด CATS ถึงแม้จะมีรายงานว่าสามารถใช้ fiducial marker หรือจุดระบุพิกัดช่วยได้บ้างก็ตาม[16]

ก

ข

รูปที่ 3. แสดงลักษณะของการผ่าตัดโดยใช้ระบบ navigation ก. แพทย์ผ่าตัดจะใช้ภาพจากจอแสดงผลของระบบ navigation และ ข. ในการช่วยระบุตำแหน่งของเครื่องมือในขณะทำการผ่าตัด

จุดเด่นของการผ่าตัด navigated surgery[1, 3, 17]

1. สามารถตัดก้อนมะเร็งออกโดยได้ surgical margin ที่เหมาะสม

2. ช่วยเพิ่มความมั่นใจให้แพทย์โดยเฉพาะ real-time intraoperative feedback

3. ช่วยในการผ่าตัดบริเวณที่มีความซับซ้อนเช่น pelvic และ sacrum

4. สามารถตัดกระดูกได้อย่างแม่นยำทำให้การ reconstruction ด้วย custom-made prosthesis หรือ allograft สามารถทำได้อย่างถูกต้องตามที่วางแผนไว้

จุดด้อยของการผ่าตัด navigated surgery[1, 3, 17]

1. อุปกรณ์และเครื่องมือของระบบ navigation มีราคาแพง

2. การทำ image to patient registration ใช้เวลานานกว่าการใช้ patient-specific instrumentation และถ้า registration ไม่สำเร็จจะทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงส่งผลต่อความแม่นยำที่ลดลง

3. อาศัยระยะเวลาในการเรียนรู้และฝึกฝนการใช้ระบบ navigation

1.2.1 ข้อบ่งชี้ของการผ่าตัด navigated surgery[3, 16]

1. Pelvic or sacral tumor resection

เนื่องจากการผ่าตัดกระดูก pelvic และ sacrum เป็นกระดูกมีลักษณะที่ซับซ้อนและมีหลอดเลือดและเส้นประสาทอยู่บริเวณใกล้เคียงเป็นจำนวนมาก จึงมีประโยชน์ในการผ่าตัดบริเวณนี้เพื่อช่วยให้ได้ negative margin โดยไม่ทำอันตรายต่อ neurovascular ใกล้เคียง

2. Joint-preserving tumor resection

การผ่าตัดมะเร็งบริเวณใกล้ข้อสามารถช่วยในการทำ joint-sparing tumor resection คือการตัดก้อนมะเร็งออกโดยวิธี intercalary resection โดยจะเก็บส่วนของข้อใกล้เคียงไว้ได้ทั้งหมด

หรือ partial intra-articular resection ซึ่งจะเก็บส่วนของข้อได้บางส่วน อันจะช่วยทำให้การใช้งานภายหลังผ่าตัดดีขึ้น รวมถึงช่วยในการตัดกระดูก multiplanar resection หรือการตัดกระดูกในหลาย ๆ ระนาบซึ่งการกะระยะด้วยสายตาอาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้ นอกจากนี้การผ่าตัดในเด็กก็มีส่วนสำคัญในการผ่าตัด physeal sparing tumor resection ทำให้กระดูกนั้นยังสามารถเติบโตต่อไปได้ตามปกติ[18]

3. Reconstruction with custom CAD prosthesis or allograft

ระบบ navigation สามารถจำลองการตัดและสามารถผลิต computer-aided design (CAD) implant รวมถึง allograft ที่จะนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นการตัดกระดูกอย่างแม่นยำ มีความจำเป็นอย่างมากที่จะทำให้ CAD implant หรือ allograft สามารถใช้ในกระดูกของผู้ป่วยได้ตรงตามที่มีการวางแผนไว้

4. Minimal invasive surgery for benign bone tumor

Navigated surgery สามารถประยุกต์เพื่อใช้ในการผ่าตัด benign bone tumor ได้ทำให้สามารถเปิดแผลเล็กบาดเจ็บต่อเนื้อเยื่อข้างเคียงน้อยได้ (minimal invasive surgery) นอกจากนี้ยังสามารถทำผ่าตัดโดยอาศัยคุณสมบัติของการใช้ navigation ร่วมกับ endoscopy ทำให้ผ่าตัดแผลเล็กแต่มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยโดยเรียกว่า navigation endoscopic assisted tumor (NEAT) surgery

1.2.2 Essential requirement สำหรับการผ่าตัด navigated surgery[16]

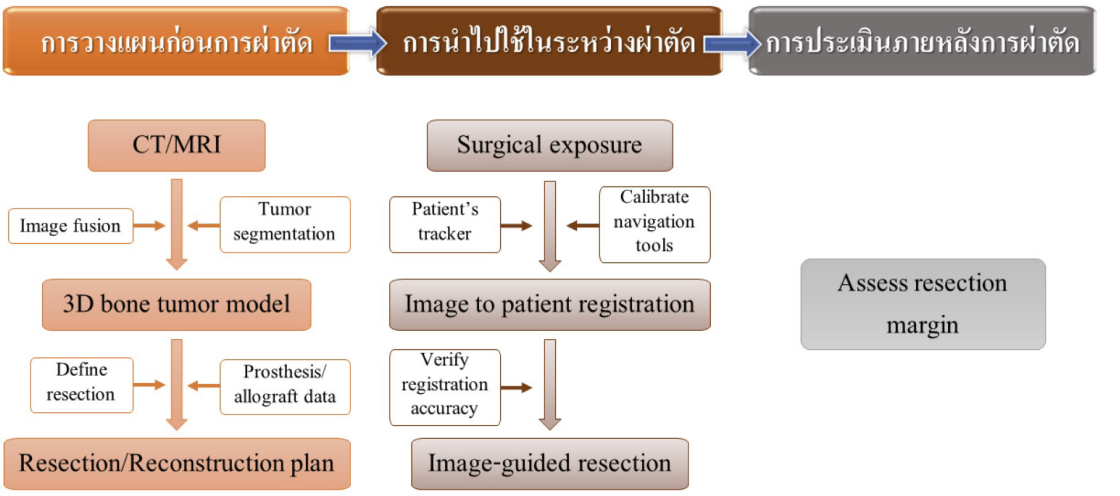
1. มีภาพ CT และ MRI รวมถึง positron emission tomography (PET) scan ก่อนผ่าตัดที่มีคุณภาพ มีความคมชัดให้รายละเอียดของก้อนมะเร็งและกระดูกโดยรอบได้อย่างครบถ้วน โดยมีช่วงเวลาในการ scan ไม่นานจนเกินไปก่อนหน้าการผ่าตัด มีการตัดภาพแบบละเอียดให้มีลักษณะ thin cut ให้มากที่สุดเท่าที่เครื่องจะทำได้เพื่อให้การสร้างเป็นภาพสามมิติมีความแม่นยำ

2. มีโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ใช้สร้างภาพสามมิติที่มีประสิทธิภาพ ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถรวมภาพ CT scan, MRI scan และ PET scan เข้าด้วยกันแล้วสร้างเป็น 3D bone tumor model เพื่อใช้วางแผนการผ่าตัดได้อย่างแม่นยำ

3. มีระบบการทำ image to patient registration ที่ถูกต้องแม่นยำ สามารถกำหนดจุดอ้างอิงระหว่าง 3D bone tumor model กับลักษณะทางกายวิภาคของกระดูกผู้ป่วยได้อย่างครบถ้วน ควรจะเป็นระบบที่ใช้งานง่ายและไม่เป็นอันตรายต่อผู้ป่วย ถือเป็นระบบขั้นตอนที่สำคัญของการทำให้ navigated surgery ประสบความสำเร็จ

1.2.3 Clinical workflow[2, 16]

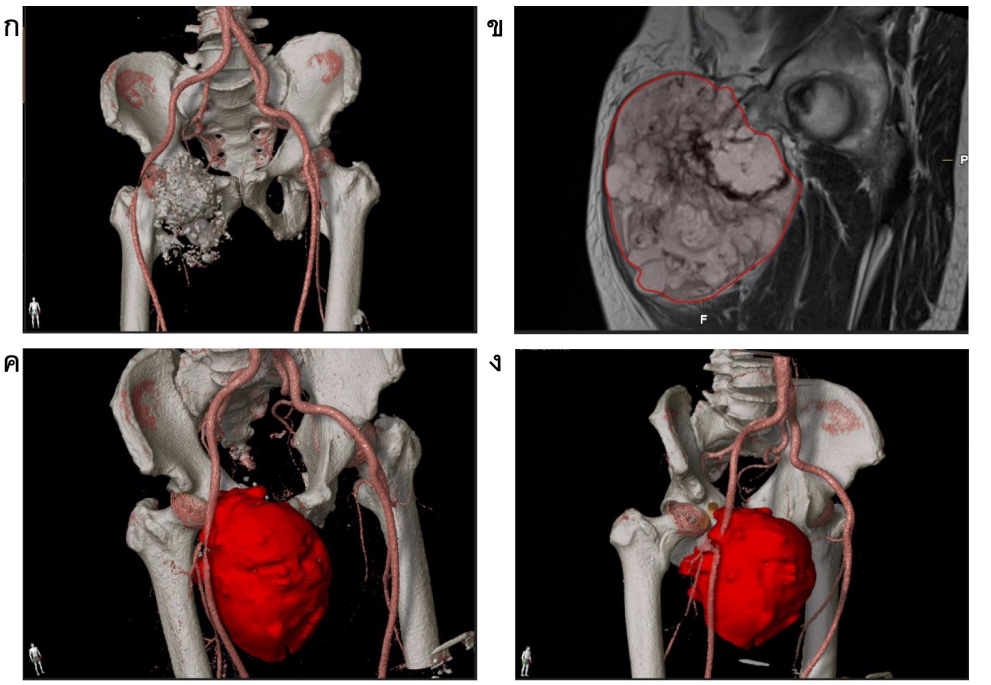
ขั้นตอนการทำงานของระบบ navigated surgery มีขั้นตอนสำคัญทั้งช่วงการวางแผนก่อนผ่าตัดการนำไปใช้ในระหว่างผ่าตัดและการประเมินภายหลังการผ่าตัด ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4. แสดงขั้นตอนการทำงานของ navigated surgery ทั้งช่วงก่อนผ่าตัด ระหว่างผ่าตัดและภายหลังการผ่าตัด

1.2.3.1 Preoperative planning[16]

การวางแผนก่อนการผ่าตัด navigated surgery ในการรักษา musculoskeletal tumor จะมีความแตกต่างไปจากการผ่าตัดทางออร์โธปิดิกส์ชนิดอื่นคือต้องมีการทำ image fusion เพื่อรวมภาพจากทั้ง CT และ MRI รวมถึง PET scan ในการกำหนดตำแหน่งและแนวในการตัด โดยภาพจาก CT scan จะบอกรายละเอียดของกระดูกได้ดีสามารถสร้างภาพเสมือนจริงขึ้นเป็น 3D bone model ส่วนภาพจาก MRI scan มีความสำคัญในการดูขอบเขตของก้อนมะเร็งและลักษณะของหลอดเลือดเส้นประสาทข้างเคียง ส่วนภาพจาก PET scan จะช่วยบอก metabolic activity ของตัวก้อนมะเร็ง การรวมภาพทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยใช้ software ของ navigation system จะเกิดเป็น 3D bone tumor model หลังจากนั้นจะสามารถกำหนด surgical approach รวมถึงตำแหน่งและแนวในการตัดกระดูกได้ใน navigation system นั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ software เพิ่มเติมที่นำ computer-aided design (CAD) implant หรือ allograft รวมถึง virtual resection ซึ่งเป็นภาพแนวการตัดเสมือนจริง มารวมอยู่ navigation system ทำให้ภาพที่ได้มีความสมบูรณ์แบบพร้อมสำหรับการผ่าตัดมากยิ่งขึ้น

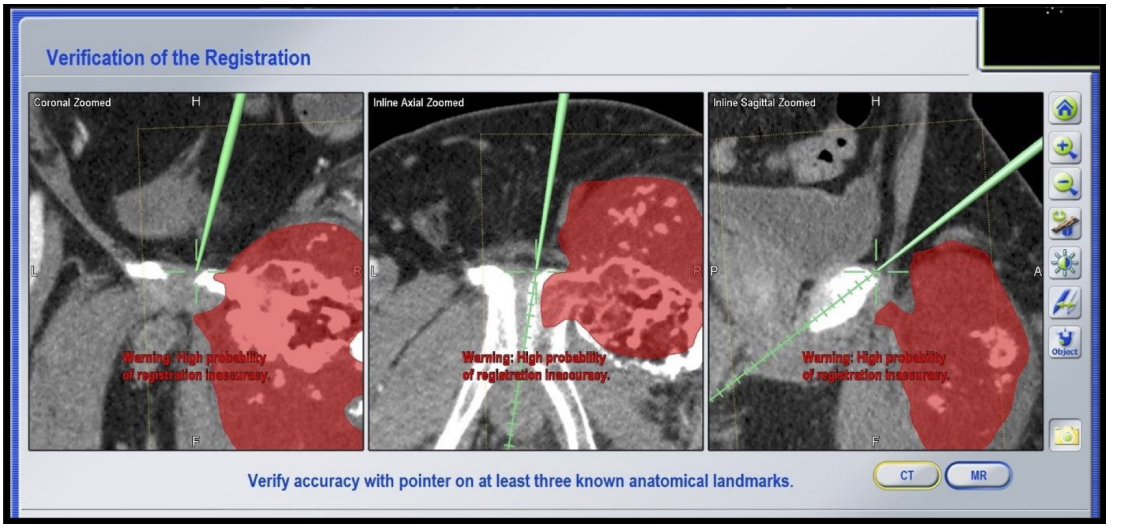


รูปที่ 5. แสดงขั้นตอนการวางแผนก่อนการผ่าตัดก้อนมะเร็ง chondrosarcoma บริเวณกระดูก pelvis ก. ภาพสามมิติที่สร้างขึ้นจาก CT scan ข. การกำหนดขอบเขตของก้อนมะเร็งจาก MRI แล้วไปรวมกับภาพก่อนหน้านี้ ค. จะได้ 3D bone tumor model ที่ผ่านการทำ image fusion แล้ว และ ง. จากนั้นทำการกำหนดแนวในการตัดบริเวณใกล้เคียงกับ acetabulum

1.2.3.2 Intraoperative implementation[16]

ในส่วนของการผ่าตัด แพทย์จะใช้ surgical approach ตามวิธีขั้นตอนปกติโดยพึงระลึกเสมอว่า navigation system ใช้สำหรับช่วยในการตัดเฉพาะส่วนที่เป็นกระดูกเท่านั้น ส่วนของมะเร็งที่เป็น soft tissue จำเป็นต้องเว้นระยะให้ได้ wide surgical margin ตามวิธีการปกติ จากนั้นจะทำการติด patient's tracker เพื่อรับส่งสัญญาณกับ navigation system บนกระดูกชิ้นที่จะทำการผ่าตัด จากนั้นจะทำ image to patient registration เป็นการเชื่อมต่อภาพใน 3D bone tumor model เข้ากับตำแหน่งจริงบนกระดูกของผู้ป่วย ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดที่จะส่งผลต่อความแม่นยำในการผ่าตัด navigated surgery โดยการ registration มีอยู่หลายวิธีดังที่จะได้กล่าวต่อไป แต่วิธีที่ได้รับความนิยมคือการใช้ manual registration ซึ่งประกอบไปด้วยการกำหนดจุด paired point และ surface matching จากนั้นจะทำการตรวจสอบความแม่นยำของการ registration โดยใช้ navigation pointer สัมผัสไปบนกระดูกแล้วสังเกตการเคลื่อนไหวในภาพของจอ navigation ถ้ามีความสัมพันธ์กันก็จะถือว่าการ registration เสร็จสมบูรณ์และระบบมีความแม่นยำที่จะทำการผ่าตัดต่อไปได้ดังแสดงในรูปที่ 6 ส่วนขั้นตอนในการตัดสามารถใช้สิ่วซึ่งเมื่อ

ทำการ calibrate สิ่วเข้าระบบ navigation จะสามารถเห็นในจอ navigation ได้[19] แต่ถ้าต้องการใช้ saw จำเป็นต้องใช้ navigation pointer ในการช่วยกำหนดแนวในการตัดกระดูกแล้วยิง k-wire เป็นแนวไว้ชั่วคราวแทนเนื่องจากระบบในปัจจุบันนี้ยังไม่สามารถ calibrate navigated saw ได้



รูปที่ 6. แสดงขั้นตอนการนำระบบ navigation ไปใช้ระหว่างผ่าตัดโดยเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของการ registration โดยใช้ navigation pointer จะพบว่าส่วนปลายของ pointer สัมผัสไปบนกระดูกตลอดการทดสอบแสดงว่าการ registration มีความแม่นยำเชื่อถือได้

1.2.3.3 Postoperative evaluation[16]

ภายหลังจากทำการตัดกระดูกที่มีมะเร็งออกมาแล้ว ถ้า patient's tracker ยังอยู่ในตำแหน่งเดิม ไม่ว่าจะติดกับกระดูกที่เหลืออยู่ของผู้ป่วย หรือติดอยู่กับส่วนของก้อนมะเร็งที่ตัดออกมาก็ตาม เราจะสามารถประเมิน margin ในการตัดได้ทันทีว่าสามารถทำได้ตามที่วางแผนไว้หรือไม่ นอกจากนี้ยังสามารถบอกรายละเอียดของ marginได้มากกว่าการส่ง frozen section ซึ่งบอกได้เพียง positive หรือ negative margin เท่านั้น รวมถึงยังใช้เวลารอผล frozen section นานมากกว่าเป็นอย่างมากอีกด้วย

1.2.4 Multimodal image fusion for navigated surgery

ดังที่กล่าวไปข้างต้นว่า image fusion มีความจำเป็นในการผ่าตัด CATS ที่ใช้ระบบ CT-based navigation เนื่องจากต้องอาศัยคุณสมบัติของทั้ง CT scan ที่จะเห็นลักษณะของกระดูกที่จะทำการตัด รวมถึงลักษณะของ soft tissue จาก MRI scan มาเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มภาพจาก CT angiogram ซึ่งเห็นรายละเอียดของเส้นเลือดใกล้เคียง รวมถึง PET scan ที่จะเห็นลักษณะของ metabolism บริเวณของตัวมะเร็งทำให้ตัดสินใจในการผ่าตัดได้ดีขึ้น โดยการทำ image fusion จำเป็นต้องใช้ซอฟต์แวร์ navigation ที่จะรวมภาพจากไฟล์ในรูปแบบของ digital

imaging and communications in medicine (DICOM) และสร้างภาพสามมิติขึ้น โดย image แต่ละชนิดควรมีลักษณะพื้นฐานดังนี้

CT scan หรือ CT angiogram

ควรเป็น thin cut CT scan ที่มีความหนา 0.625-1.25 มม.เพื่อให้ภาพมีความละเอียดเพียงพอในการสร้างภาพสามมิติจากทั้ง axial, coronal และ sagittal view

MRI scan

ควรเป็นภาพที่มีความหนา 1-2 มม.ทั้ง axial, coronal และ sagittal view และมีครบทั้ง T1 with contrast, T2 รวมถึง sequence อื่น ๆที่ใช้ในการสร้างภาพสามมิติ

PET scan

ถือเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในการดู metabolic activity ของบริเวณก้อนมะเร็ง มีประโยชน์ในกรณีที่ผู้ป่วยมีการผ่าตัดมาก่อน หรือผ่านการรักษาด้วยรังสีรักษาทำให้แยกลักษณะของตัวมะเร็งออกจาก surgical scar ได้ยากด้วยการประเมินจาก MRI เพียงอย่างเดียว

1.2.5 Registration method[16]

การผ่าตัด CATS โดยใช้ระบบ CT-based navigation จะมีขั้นตอนการทำ image to patient registration ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งที่จะส่งผลต่อความแม่นยำของการผ่าตัด ประกอบด้วยการอ้างอิงลักษณะทางกายวิภาคของกระดูกผู้ป่วยเข้ากับตำแหน่งที่กำหนดบน 3D bone tumor model ในระบบ navigation system ความแม่นยำของระบบจะประเมินจากค่า target registration error (TRE) หรือค่าความแตกต่างของตำแหน่งในภาพจำลองกับตำแหน่งจริงบนกระดูกของผู้ป่วยซึ่งไม่ควรเกิน 1 มม. ซึ่งแพทย์จะทำการทดสอบค่าดังกล่าวภายหลังจากการ registration โดยการใช้ navigation pointer ทดสอบไปบนตำแหน่งกระดูกรอบ ๆ บริเวณที่จะทำการผ่าตัดพร้อมทั้งสังเกตภาพที่ได้บนจอเสมือนจริงควบคู่กันไปด้วย การ registration มีหลายวิธีอันได้แก่ manual registration, semi-automatic registration, automatic registration รวมถึงการ registration ด้วย fiducial marker หรือจุดระบุพิกัด

1.2.5.1 Manual registration

การ registration ด้วยมือของแพทย์ผ่าตัดเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในการผ่าตัด CT-based navigation โดยจะเป็นการหาตำแหน่งในการอ้างอิงบนกระดูกของผู้ป่วยในบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งของกระดูกที่จะทำการตัด แต่จะไม่ไปยุ่งเกี่ยวในบริเวณ soft tissue ที่ปกคลุมบริเวณของก้อนมะเร็งโดยคำนึงถึง margin เป็นสำคัญโดยการจับคู่จุดอ้างอิงที่ใช้จะมีสองแบบ คือ paired point matching และ surface matching

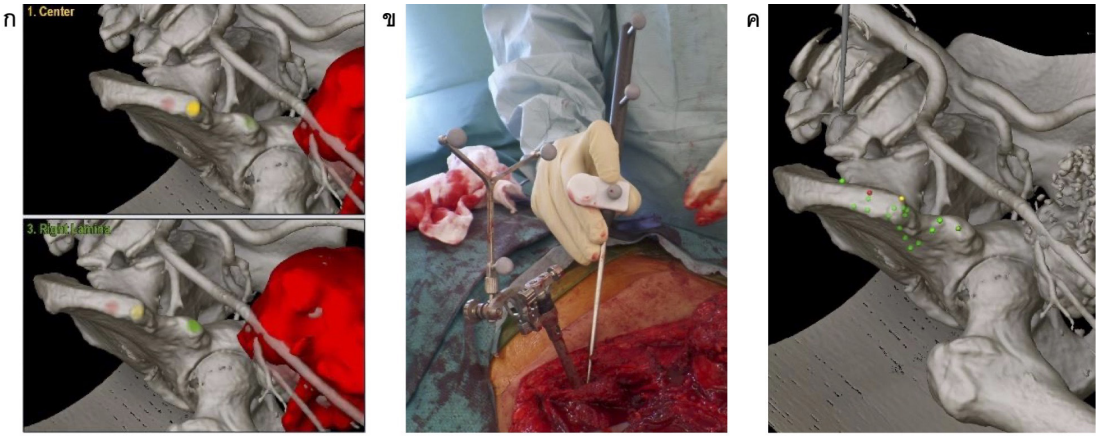
1. Paired point matching

เป็นการจับคู่จุดอ้างอิงจากภาพในระบบ navigation กับตำแหน่งกระดูกของผู้ป่วยโดยมัก

เลือกจุดที่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนโดยนิยมใช้ bony landmark ในตำแหน่งนั้น ๆ เช่น tubercle หรือ crest โดยจะต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถเข้าถึงได้ผ่านทาง approach ปกติ หลีกเลี่ยงตำแหน่งกระดูกที่ถูกทำลายโดยก้อนมะเร็ง และควรกำหนดอย่างน้อย 4 จุดเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ในกรณีที่ไม่สามารถหา bony landmark ได้เช่นการผ่าตัดในบริเวณตำแหน่งของ distal femur หรือตำแหน่งกระดูกที่เคยผ่าตัดมาก่อน อาจเลือกใช้เป็นตำแหน่งจากการวัดระยะจากจุดอ้างอิงเช่น joint line หรือ bony landmark ใกล้เคียงแทน โดยภายหลังจาก paired point matching ควรมีค่า error น้อยกว่า 5 มม.ก่อนที่จะทำการ surface matching ต่อไป

2. Surface matching

เป็นการจับคู่เพื่อเพิ่มจุดอ้างอิงเพิ่มเติมให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยอ้างอิงจาก paired point matching เดิมที่เสร็จสิ้นไปแล้วเชื่อมต่อเข้าหากันโดยจะเป็นการจับคู่พื้นผิวของกระดูกผู้ป่วยเข้ากับภาพ 3D bone tumor model จำนวนของจุดที่กำหนดควรมีจำนวนมากที่สุดเท่าที่ระบบ navigation นั้น ๆ สามารถทำได้ และควรเลือกตำแหน่งที่ใกล้กับแนวที่จะตัด เพื่อให้มีความแม่นยำมากที่สุด พยายามหลีกเลี่ยงตำแหน่งของพื้นผิว cartilage ที่อาจจะไม่ปรากฏในพื้นผิวของระบบ navigation จากนั้นจึงทำการประเมินค่า error ให้น้อยที่สุดโดยที่เมื่อใช้ navigation pointer แล้วปลายสุดอยู่บนตำแหน่งพื้นผิวตลอดแนวของกระดูกโดยเฉพาะบริเวณที่จะทำการตัด ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7. แสดงขั้นตอนการทำ manual registration ก. กำหนดจุด paired points matching เป็นจุด bony landmark ข. จากนั้นใช้ navigation pointer ในการจับคู่จุดต่าง ๆบนจอแสดงผล และ ค. ต่อด้วยการ surface matching โดยสัมผัสจุดบนผิวกระดูกบริเวณใกล้เคียงเป็นการเพิ่มความแม่นยำของระบบ navigation

1.2.5.2 Semi-automatic registration

การ registration แบบกึ่งอัตโนมัติ ใช้หลักการของ CT-fluoroscopy matching คือเป็นการจับคู่ของภาพจาก 3D bone tumor model กับภาพที่ได้จาก intraoperative fluoroscopy โดยภายหลังจากการติดตั้ง navigation tracker กับตัวผู้ป่วยจากนั้น ถ่ายภาพ fluoroscopy 2 view แล้วทำการ registration โดยการจับคู่กับภาพ 3D bone tumor model ที่เตรียมไว้ก่อนแล้ว แพทย์จะเป็นผู้จับคู่ตำแหน่งของภาพคร่าว ๆ ก่อนที่ซอฟต์แวร์ของระบบ navigation จะทำการ automatic registration ต่อ ข้อดีของวิธีนี้คือไม่จำเป็นต้องเปิดแผลใหญ่เพื่อการ registration จึงเหมาะกับการผ่าตัด minimal invasive surgery สำหรับการทำ intralesional curettage ใน benign bone tumor

1.2.5.3 Automatic registration

การ registration แบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบสามารถทำได้ในการผ่าตัด CATS โดยสามารถใช้เครื่อง O-arm ซึ่งเปรียบเหมือนการใช้เครื่อง 3D fluoroscopy ในห้องผ่าตัดหลังจากที่ได้ทำการติดตั้ง navigation tracker กับตัวผู้ป่วยเรียบร้อยแล้ว ภาพสามมิติที่สร้างขึ้นจาก O-arm จะถือว่าได้มีการทำ image to patient โดยอัตโนมัติ ทำให้มีความสะดวกรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 8 แต่มีข้อจำกัดคือ software ของ O-arm navigation ไม่สามารถทำ image fusion กับภาพที่เตรียมก่อนการผ่าตัดได้โดยเฉพาะภาพ MRI จึงเหมาะกับการผ่าตัดในเนื้องอกหรือมะเร็งที่สามารถเห็นได้ชัดเจนจาก CT scan ไม่ค่อยซับซ้อน

รูปที่ 8. แสดงขั้นตอนการทำ automatic registration โดยการใช้เครื่อง O-Arm ในขณะที่ทำการติดตั้ง navigation tracker กับตัวผู้ป่วยเรียบร้อยแล้ว

1.2.5.4 Registration with fiducial marker

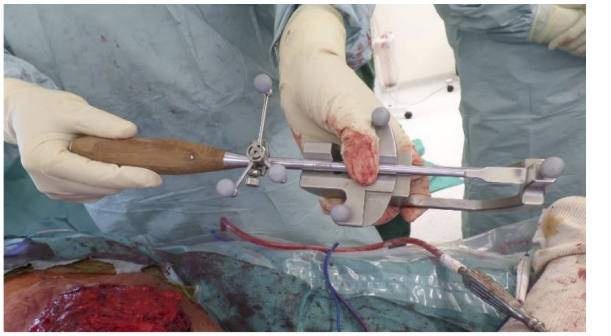
การติดตั้ง fiducial marker หรือจุดระบุพิกัดไปบนตัวผู้ป่วยพบว่าทำให้การใช้ image-based navigation มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นแต่ยังมีข้อเสียคือจำเป็นต้องมีการผ่าตัดเพิ่มเติมเพื่อติดตั้ง fiducial marker รวมถึงกระดูก pelvis และ sacrum ที่อยู่ลึกทำให้การผ่าตัดโดยการฉีดยาชาเปิดแผลเล็กทำได้ยาก ทำให้วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม

1.2.6 Intraoperative navigation setup

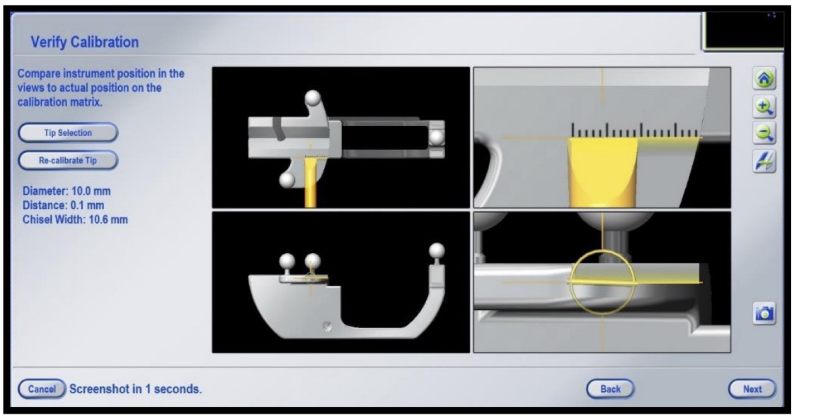
การติดตั้งระบบ navigation ในห้องผ่าตัดถือว่าเป็นเรื่องสำคัญ เนื่องจากถ้าติดตั้งระบบไม่ดีจะเป็นอุปสรรคต่อการผ่าตัดได้ เริ่มจากการจัดวาง โดยทั่วไประบบ navigation จะวางไว้บริเวณปลายเตียงซึ่งประกอบไปด้วยกล้อง navigation camera และจอแสดงผล โดยต้องหาตำแหน่งที่ไม่ถูกบดบังจากโต๊ะผ่าตัดและผู้ช่วยผ่าตัด ส่วนแพทย์ก็สามารถมองเห็นจอแสดงผลโดยไม่ต้องอาศัยการหมุนตัวที่มากเกินไป กล้อง navigation camera ที่จะต้องรับส่งสัญญาณตลอดการผ่าตัดควรมีการปรับระดับความสูงให้เหมาะสม จากนั้นเมื่อเริ่มทำการผ่าตัดจะมีการติดตั้ง dynamic reference frame (DRF) หรือ tracker ของผู้ป่วยในบริเวณของกระดูกที่จะทำการผ่าตัด เพื่อเป็นการรับส่งสัญญาณระหว่างตัวผู้ป่วยกับระบบ navigation ซึ่งหลังจากได้ทำการ image to patient registration แล้วระบบทั้งหมดจะเชื่อมต่อเข้าหากัน โดยสามารถใช้ navigation pointer ในการตรวจสอบความแม่นยำของตำแหน่งกระดูกบนตัวผู้ป่วยได้ นอกจากนั้นยังสามารถนำอุปกรณ์ผ่าตัดหลาย ๆ ชนิดเช่น drill, burr, osteotome รวมถึง diathermy มาติดตั้ง tracker แล้วทำการ calibrate จะสามารถใช้อุปกรณ์ดังกล่าวร่วมกับระบบ navigation ได้ดังแสดงในรูปที่ 9 โดย tracker ที่ใช้ในระบบ navigation จะมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ระบบ active และ passive[16]

ก

ข



ค



รูปที่ 9. แสดงขั้นตอนการการติดตั้งระบบ navigation ก. ในห้องผ่าตัด ข. โดยจัดวางระบบ navigation ให้อยู่ด้านปลายเตียงผ่าตัด และ ค. ตัวอย่างการ calibrate อุปกรณ์ผ่าตัดเพื่อให้สามารถใช้ร่วมกับระบบ navigationได้

Active navigation tracker และ pointer

เป็นระบบ navigation tracker ของบริษัท Stryker (Kalamazoo, MI, USA) ในอุปกรณ์จะมีการใส่ battery จึงสามารถส่งสัญญาณ infrared ไปยังกล้องรับสัญญาณของระบบ navigation ได้

Passive navigation tracker และ pointer

เป็นระบบ navigation tracker ของบริษัท Brainlab (Munich, Germany) โดย tracker ดังกล่าวจะมีส่วนที่เป็นลักษณะทรงกลมหลาย ๆ ลูก ทำหน้าที่รับสัญญาณ infrared ที่ส่งมาจากกล้อง navigation แล้วสะท้อนกลับไปยังกล้องรับสัญญาณอีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 10

ก

ข

รูปที่ 10. แสดงลักษณะของ navigation tracker ก. ชนิด active และ ข. ชนิด passive

1.3 3D printing

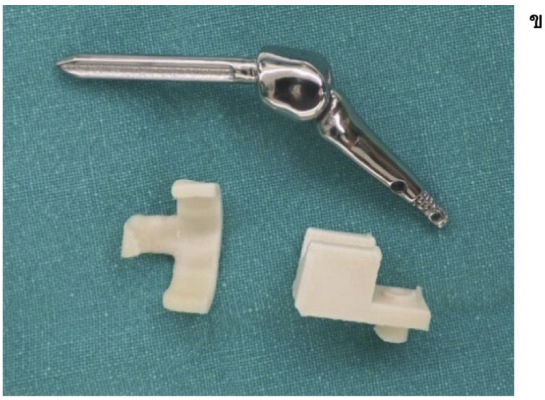
3-dimensional printing (3D printing) หรือการพิมพ์สามมิติ เป็นเทคโนโลยีส่วนนึงใน CATS ที่มีความสำคัญที่จะผลิตวัสดุเพื่อช่วยในการผ่าตัดรวมถึงการผลิต implant ที่จะใช้ใส่ในผู้ป่วยจริง ๆ อีกด้วย โดยการผลิตจะใช้หลักการพื้นฐานของ rapid prototype (RP) ซึ่งเป็นวิธีการสร้างภาพจำลองเสมือนจริงให้เป็นวัตถุที่จับต้องได้ และมีการพัฒนาต่อเนื่องมาเป็น computer-aided design (CAD) และ computer-aided manufacturing (CAM) ที่มีความแม่นยำมากขึ้นในปัจจุบัน[1, 2] โดยการผลิตวัตถุจะใช้วิธี additive layer manufacturing (ALM) หรือการขึ้นรูปจากโลหะหรือพลาสติกทีละชั้นจนกลายเป็นวัตถุทั้งชิ้นโดยใช้ 3D printer แตกต่างจากวิธีการผลิตดั้งเดิมที่จะเริ่มจากการตัดแต่งโลหะจากชิ้นใหญ่ให้เป็นรูปทรงที่ต้องการ ดังนั้น 3D printing จึงสามารถออกแบบเป็นรูปแบบซับซ้อนเพียงใดก็ได้ที่มีขนาดไม่ใหญ่เกินไปนัก[2, 17] ส่วนเทคนิคในการทำ 3D printing ที่นิยมใช้กันจะมี 3 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ powder-based printing, vat polymerization-based printing และ droplet-based printing[17] โดยแต่ละวิธีก็จะมีรายละเอียดปลีกย่อยเกี่ยวกับวิธีการในการขึ้นรูปเช่นการใช้ laser, electron beam, ultraviolet light รวมถึง inkjet ซึ่งจะมีความจำเพาะต่อวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปที่แตกต่างกันไม่ว่าจะเป็น metal alloy, titanium, ceramic และ polymer resin เป็นต้น

1.3.1 Patient specific instrument

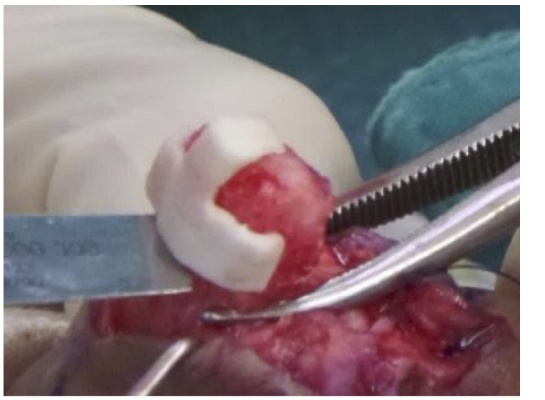
การผ่าตัดโดยใช้ patient specific instrument (PSI) คือการสร้างอุปกรณ์ช่วยผ่าตัดเฉพาะบุคคลของผู้ป่วยซึ่งต้องอาศัยการเตรียมตัวก่อนการผ่าตัด ในอดีตเริ่มมีการใช้มาก่อนทางออร์โธปิดิกส์ในการผ่าตัด joint arthroplasty การใส่ spinal pedicle screw รวมถึงการผ่าตัดแก้ไข deformity จากสาเหตุต่าง ๆ[17] ในภายหลังจึงได้นำมาประยุกต์ใช้กับการผ่าตัดเนื้องอกและมะเร็งกระดูกโดยเฉพาะบริเวณ pelvic ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์ช่วยเหลือในขณะผ่าตัดที่สามารถใช้ทดแทนการใช้

navigated surgery ได้โดยมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน[2, 20, 21] จุดเด่นที่ทำให้หลายคนสนใจวิธีนี้คือมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าใช้ระยะเวลาและขั้นตอนในระหว่างการผ่าตัดที่น้อยกว่าการผ่าตัดnavigated surgery เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการทำ image to patient registration ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยจะใช้เวลาส่วนใหญ่ในการวางแผนก่อนการผ่าตัดล่วงหน้าซึ่งมีข้อดีคือทำให้แพทย์ได้มีเวลาทำการวางแผนผ่าตัดเสมือนจริงล่วงหน้าโดยละเอียดมากขึ้น แต่ก็มีข้อเสียที่ทำให้ผู้ป่วยต้องรอการผ่าตัดนานขึ้นโดยเฉพาะต้องรอการผลิตจากทางวิศวกรด้วยเช่นกัน ส่วนวิธีการใช้ PSI นั้น การหาตำแหน่งในการวาง PSI ให้ได้พอดีก่อนการตัดถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่สุด อาจทำให้ต้องมีการเลาะเนื้อเยื่อที่คลุมบริเวณกระดูกนั้น ๆเป็นจำนวนมากรวมถึงการวางตำแหน่งที่ผิดพลาดแล้วไม่สามารถตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งที่ตัดได้ทันทีเหมือนอย่างที่ระบบ navigation ทำได้ซึ่งถือเป็นข้อด้อยและข้อควรระวังของการผ่าตัดในวิธีนี้[1, 17, 20]

ก



ข



รูปที่ 11. แสดง patient specific instrument ที่เตรียมไว้เพื่อการตัดกระดูก ก. เพื่อใส่ 3D implant และ ข. บริเวณกระดูก proximal phalanx

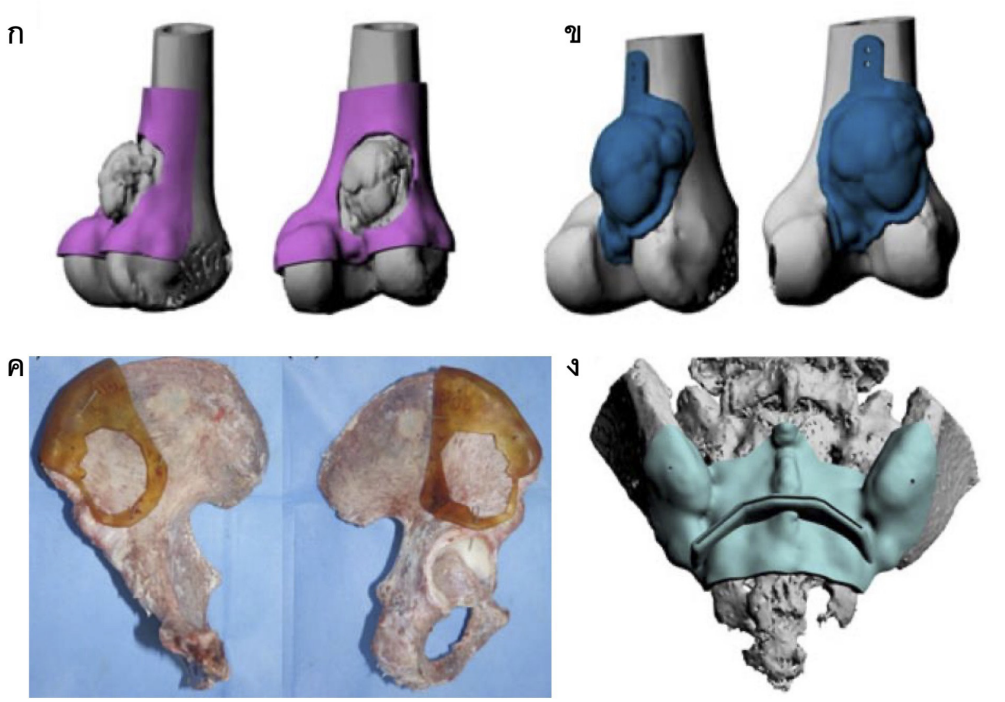
Patient specific cutting guide เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับ saw ช่วยให้การตัดแม่นยำขึ้นและเหมาะกับ multiplanar resection โดย cutting guide ควรออกแบบให้เป็นรูปเหลี่ยมเพื่อให้ saw สามารถตัดตามได้ และควรมีพื้นผิวสัมผัสกับกระดูกที่ใหญ่ ครอบคลุม bony landmark ใกล้เคียงจะทำให้อุปกรณ์มีความมั่นคงส่งผลถึงความแม่นยำในการตัดด้วย ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะของ cutting guide เป็น 4 ชนิด ดังนี้[21]

1. Open-type guide ตัวอุปกรณ์จะครอบคลุมเฉพาะบริเวณขอบด้านนอกของตัวก้อน เหมาะกับก้อนที่ทำลายกระดูกมาก มี soft tissue ขนาดใหญ่

2. Closed-type guide ตัวอุปกรณ์จะครอบคลุมบริเวณทั้งหมดรวมถึงตัวก้อนด้วย โดยทั่วไปจะมีความมั่นคงและเข้ารูปกับกระดูกโดยรอบมากกว่าชนิด open-type

3. Bidirectional guide เป็นการใช้อุปกรณ์สองชิ้นประกบสองด้านของกระดูกที่มีความหนามาก ๆ เช่น pelvis ทั้งด้าน inner และ outer เพื่อควบคุมแนวการตัดไม่ให้ผิดพลาดที่อาจเกิดบริเวณ far cortex จากการใช้ guide ด้านเดียวได้

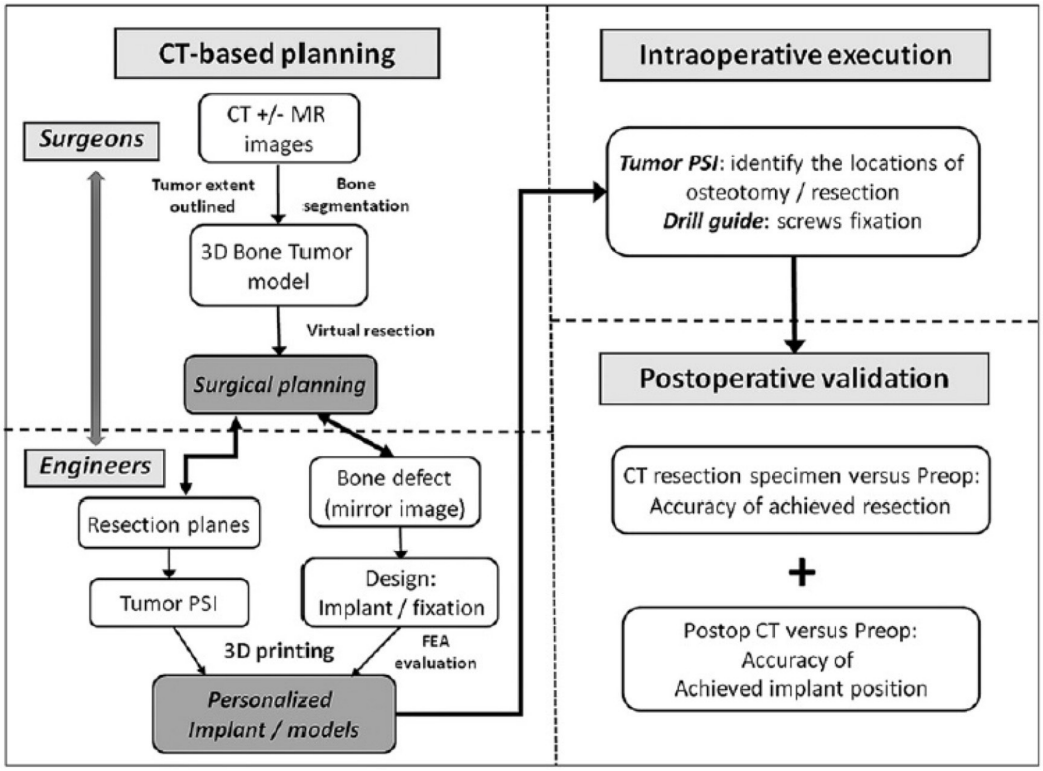
4. Guide with saw capture apparatus เป็นการสร้างอุปกรณ์ให้มีร่องเพื่อให้สามารถเป็นแนวในการตัดให้ saw ในมุมองศาที่ต้องการ เหมาะกับกระดูกที่มีความหนามาก ๆ อีกเช่นกัน โดยเฉพาะ sacrum ซึ่งเข้าถึงด้านในเพื่อใช้ bidirectional guide ได้ลำบาก



รูปที่ 12. แสดงลักษณะของ patient specific instrument ชนิดต่าง ๆ ก. open-type guide ข. closed-type guide ค. bidirectional guide และ ง. guide with saw capture apparatus[21]

Wong และคณะได้เสนอขั้นตอนในการใช้ PSI ในการผ่าตัด CATS[22] ดังรูปที่ 13[22] ซึ่งมีขั้นตอนที่คล้ายคลึงกับการใช้ navigated surgery แต่จะมีการใช้เวลาและขั้นตอนในส่วนของการวางแผนก่อนการผ่าตัดที่นานกว่าและต้องทำงานร่วมกับทางวิศวกรมากขึ้นโดยจะเริ่มจากการสร้าง 3D bone tumor model จากการทำ image fusion และกำหนดส่วนของก้อนมะเร็งและแนวในการตัด จากนั้นจะทำการส่งข้อมูลไปยังวิศวกรเพื่อการผลิต PSI จากนั้นถ้าต้องมีการ reconstruction ก็จะมีการจำลองภาพ bone defect เพื่อออกแบบและผลิต 3D printing implant ต่อไป หลังจากนั้นวัสดุทั้งหมดที่ผลิตขึ้นจะนำมาทำให้ปราศจากเชื้อแล้วนำมาใช้กับผู้ป่วยในการผ่าตัด ไม่ว่าจะเป็น jig หรืออุปกรณ์กำหนดตำแหน่งหรือทิศทางในการตัดหรือเจาะซึ่งขึ้นกับการ

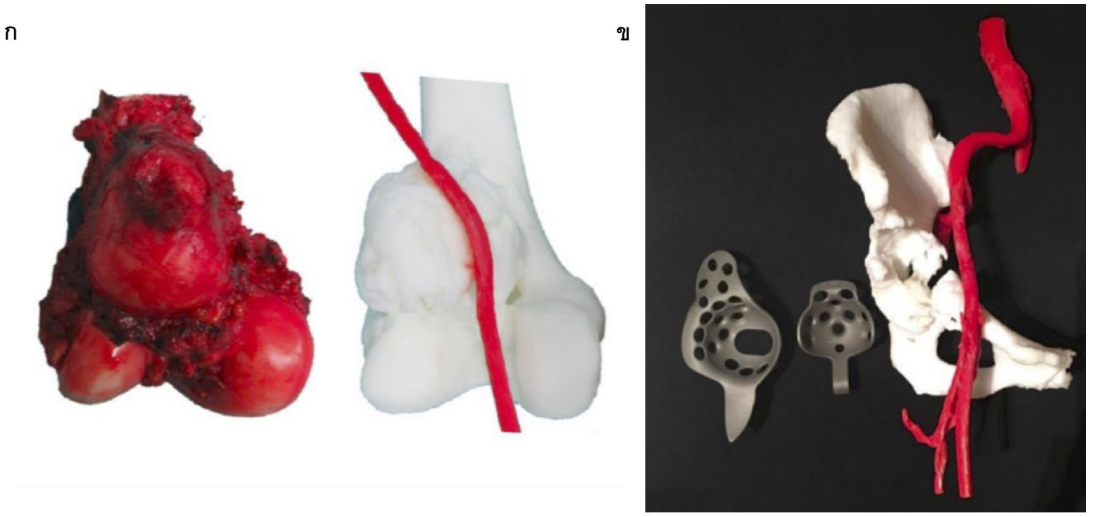
ออกแบบจากวิศวกร จากนั้นเมื่อตัดก้อนมะเร็งออกมาแล้วก็นำ 3D printing implant มาทำการ reconstruction เมื่อเสร็จสิ้นการผ่าตัด ถ้าต้องการประเมินความแม่นยำ สามารถทำได้โดยการทำ CT scan ทั้งส่วนกระดูกของผู้ป่วยที่เหลืออยู่และก้อนมะเร็งที่ตัดออกไปเปรียบเทียบกับภาพก่อนการผ่าตัด โดยพบว่าขั้นตอนวิธีการดังกล่าวทำให้การผ่าตัดทำได้อย่างราบรื่นและเข้าใจง่าย[22]



รูปที่ 13. แสดงขั้นตอนของการใช้ PSI ในการผ่าตัด CATS[22]

1.3.2 Anatomical model

การผลิต 3D anatomical model หรือรูปจำลองลักษณะทางกายวิภาคสามมิติเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยี 3D printing ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันเนื่องจากทำให้เห็นภาพลักษณะของก้อนมะเร็งและอวัยวะสำคัญรอบข้างได้ชัดเจนมากกว่าการดูภาพเป็นสองมิติตามปกติ รวมถึงสามารถจำลองวิธีการผ่าตัดรวมถึงทดสอบอุปกรณ์ผ่าตัดก่อนการใช้งานจริงได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถใช้ anatomical model ดังกล่าวในการอธิบายวิธีการรักษาผ่าตัดให้ผู้ป่วยและญาติได้เข้าใจและรับทราบก่อนการผ่าตัด[2] รวมถึงสามารถนำมาใช้ประกอบในการเรียนการสอนทำให้ผู้เรียนได้เข้าใจและเห็นภาพได้ชัดเจนมากขึ้นอีกด้วย[17] ทิพชาติและคณะได้รายงานผลการใช้ anatomical model ในการช่วยผ่าตัดในผู้ป่วย 4 รายพบว่าสามารถลดอัตราการเสียเลือด ลดระยะเวลาการผ่าตัด และลดขนาดของแผลผ่าตัดให้สั้นลงดังแสดงในรูปที่ 14[23]



รูปที่ 14. แสดงการใช้ anatomical model ในการวางแผนการผ่าตัดบริเวณกระดูก ก. femur และ ข. pelvis แสดงให้เห็นลักษณะของเนื้องอกและเส้นเลือดใหญ่ในบริเวณใกล้เคียง[23]

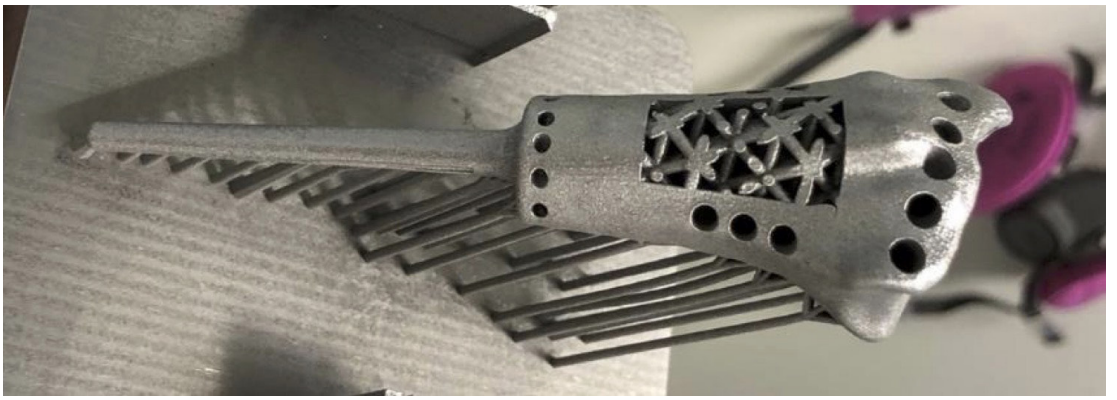
2. CATS in bone and soft tissue reconstruction

ขั้นตอนของการ reconstruction ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญภายหลังจากที่ทำการตัดก้อนมะเร็งออกไปแล้ว การ reconstruction ที่ดีจะส่งผลถึงประสิทธิภาพการใช้งานในส่วนนั้น ๆ ของผู้ป่วย CATS จึงมีบทบาทสำคัญที่จะทำให้การ reconstruction ได้แม่นยำตามที่มีการวางแผนไว้ล่วงหน้าไม่แพ้การ resection ดังนั้นข้อบ่งชี้ของการใช้ CATS ในการ reconstruction จึงเป็นในลักษณะเดียวกับการทำ resection โดยสามารถแบ่งหัวข้อเป็นการใช้ CATS ในการผลิต 3D implant การใช้กับ allograft รวมถึงการหาตำแหน่งของ implant insertion

2.1 3D implant

Custom-made implant ในส่วนของการผลิต 3D implant ถือเป็นส่วนนึงของ CAD เป็นการใช้เทคโนโลยี 3D printingในการผลิต implant เฉพาะบุคคลที่ทำเพื่อผู้ป่วยรายนั้น ๆ มีการผลิตขึ้นมานานแล้วตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1950 ก่อนที่จะนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ CATS ในภายหลัง การผลิต 3D implant จะผลิตขึ้นจาก titanium alloy ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสม[2] โดยมี mechanical resistance สูงใกล้เคียงกับ stainless steel แต่มีความหนาแน่นน้อยกว่าร้อยละ 50 และมีค่า Young's modulus ต่ำ นอกจากนี้บริเวณพื้นผิวของ titanium ยังประกอบด้วย free oxygen ทำให้เพิ่มคุณสมบัติ biocompatibility และ biologic integration ต่อเนื้อเยื่อบริเวณข้างเคียง ประโยชน์ของการผลิตด้วยวิธี 3D printing ซึ่งใช้วิธี ALM จะเหมาะกับการสร้างวัสดุทดแทนกระดูกในตำแหน่งที่มีขนาดแตกต่างจากขนาดปกติที่เคยมีหรือมีลักษณะเฉพาะในผู้ป่วยแต่ละรายเช่น

ตำแหน่งของ clavicle, scapula, pelvis ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการผลิตด้วยวิธีดั้งเดิม[17] นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่ม porous structure ช่วยให้เกิด osteointegration ได้ดีขึ้นหรือทำเป็นลักษณะ mesh หรือรูพรุนเพื่อให้วัสดุมีน้ำหนักเบาขึ้นได้อีกด้วย[24] ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15. แสดง 3D implant ของกระดูก distal radius ที่ออกแบบให้มีรูพรุนเพื่อให้มีน้ำหนักเบา

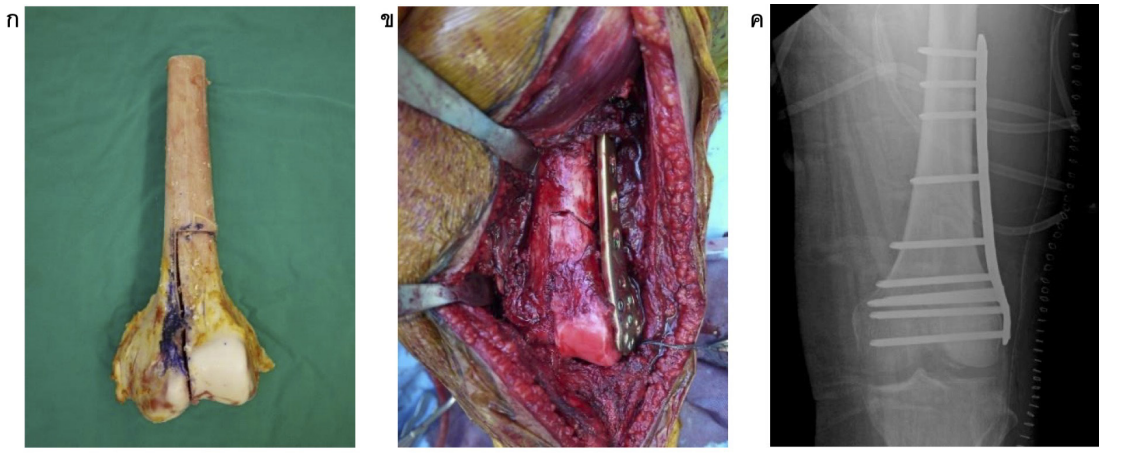
Custom-made 3D implant ยังมีประโยชน์อย่างมากในการรักษาเนื้องอกในเด็ก[18] เนื่องจากกระดูกเด็กมีขนาดเล็กทำให้ implant ขนาดปกติหรือ allograft ที่นำมาจากผู้ใหญ่จะไม่สามารถใส่ได้ โดย 3D implant สามารถผลิตในขนาดที่ต้องการรวมถึงเป็นรูปร่างต่าง ๆ หรือเสริม plate มาพร้อม prosthesis ได้ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการทำผ่าตัด joint sparing หรือ physeal sparing ซึ่งจะลดการเกิดภาวะแทรกซ้อนที่พบบ่อยในเด็กคือ limb length discrepancy โดยไม่จำเป็นต้องใช้ expandable prosthesis ที่มีราคาแพง[18]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก 3D implant เป็นวัสดุที่ทำมาจากการ custom-made จากลักษณะทางกายวิภาคของผู้ป่วย ทำให้เป็นประเด็นว่าคุณสมบัติด้าน biomechanics ได้มาตรฐานหรือไม่ เนื่องจากแต่ละชิ้นจะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน และไม่สามารถทดสอบก่อนนำไปใช้ทุกชิ้นได้ การนำไปใช้กับผู้ป่วยจึงขึ้นกับดุลยพินิจของแพทย์ผู้ทำการรักษาเป็นสำคัญ[2]

2.2 Allograft

การใช้ allograft ถือเป็นวิธีการ reconstruction ที่ได้รับความนิยม แต่เนื่องด้วย allograft ที่ใช้ควรต้องมีขนาดและรูปแบบของแนวบริเวณรอยต่อใกล้เคียงกับกระดูกของผู้ป่วยมากที่สุด CATS จึงมีประโยชน์อย่างมาก โดยเฉพาะ bone defect ที่มีลักษณะเป็น multiplanar resection ดังแสดงในรูปที่ 16 โดย PSI เป็นวิธีการหนึ่งที่ทำให้แนวในการตัดของทั้งผู้ป่วยและ allograft มีรูปแบบใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยสามารถใช้ PSI cutting guide ลักษณะเดียวกันสองชิ้นตัดทั้งตัว bone tumor และ allograft โดยใช้เวลาไม่นาน[21, 24] ส่วนการใช้ระบบ navigation ในการเลือกจับคู่ allograft จากระบบธนาคารกระดูกในระบบสามมิติและเตรียม allograft พบว่าทำให้สามารถ

จับคู่ให้ได้ขนาดใกล้เคียงกันมากที่สุดเช่นกันและส่งผลทำให้อัตราการเกิด non union ลดลงอีกด้วย[3]



รูปที่ 16. แสดงการผ่าตัดเนื้องอกบริเวณ lateral condyle ของ distal femur ก. มีการตัดกระดูก allograft ตามลักษณะที่ต้องการ ข. แล้วนำไปยึดกับกระดูกผู้ป่วย และ ค. ภาพ x-ray ภายหลังการผ่าตัดพบว่ามีขนาดที่เหมาะสม

2.3 Implant insertion

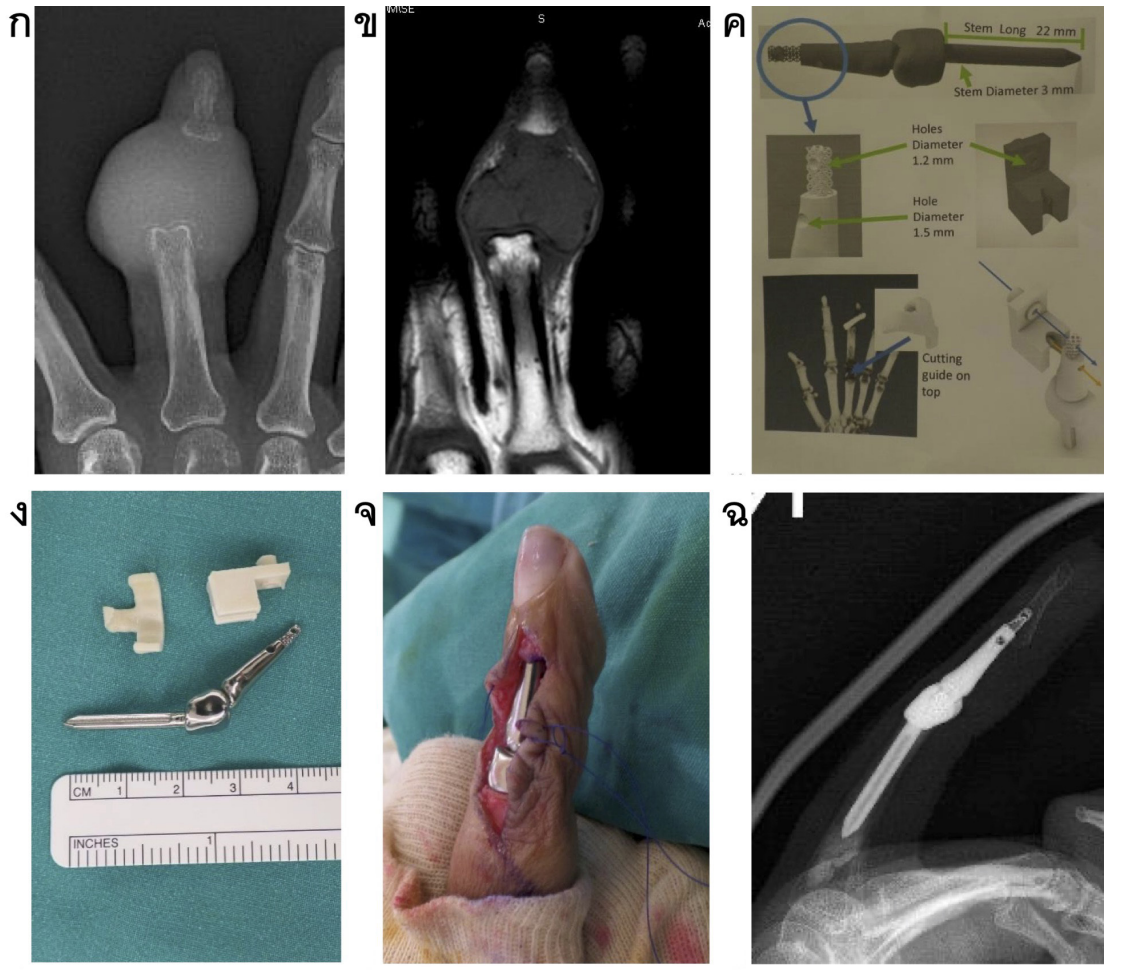
นอกจากบทบาทในการช่วยเหลือในการ resection ของตัวก้อนเนื้องอก CATS สามารถประยุกต์ใช้ในการใส่ implant ให้มีความแม่นยำโดยใช้อุปกรณ์ของ navigated surgery ในการช่วยเหลือโดยเฉพาะในตำแหน่งที่ซับซ้อนเช่นบริเวณ pelvis โดยพบว่าตำแหน่งของ implant ที่เหมาะสมสามารถยืดอายุการใช้งานรวมถึงทำให้การใช้งานภายหลังการผ่าตัดของผู้ป่วยดีขึ้น[2] Fujiwara และคณะได้รายงานผลของการใช้ระบบ navigation ในการช่วยใส่ ice cream cone prosthesis ภายหลังการตัดเนื้องอกบริเวณ acetabulum เปรียบเทียบกับการไม่ใช้ navigation พบว่าช่วยลด complication จากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 9 ไม่พบภาวะ implant failure รวมถึงมี functional score ทั้ง musculoskeletal tumor society (MSTS) score และ Toronto extremity salvage scores (TESS) ที่ดีกว่าด้วย[25]

3. CATS ในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์

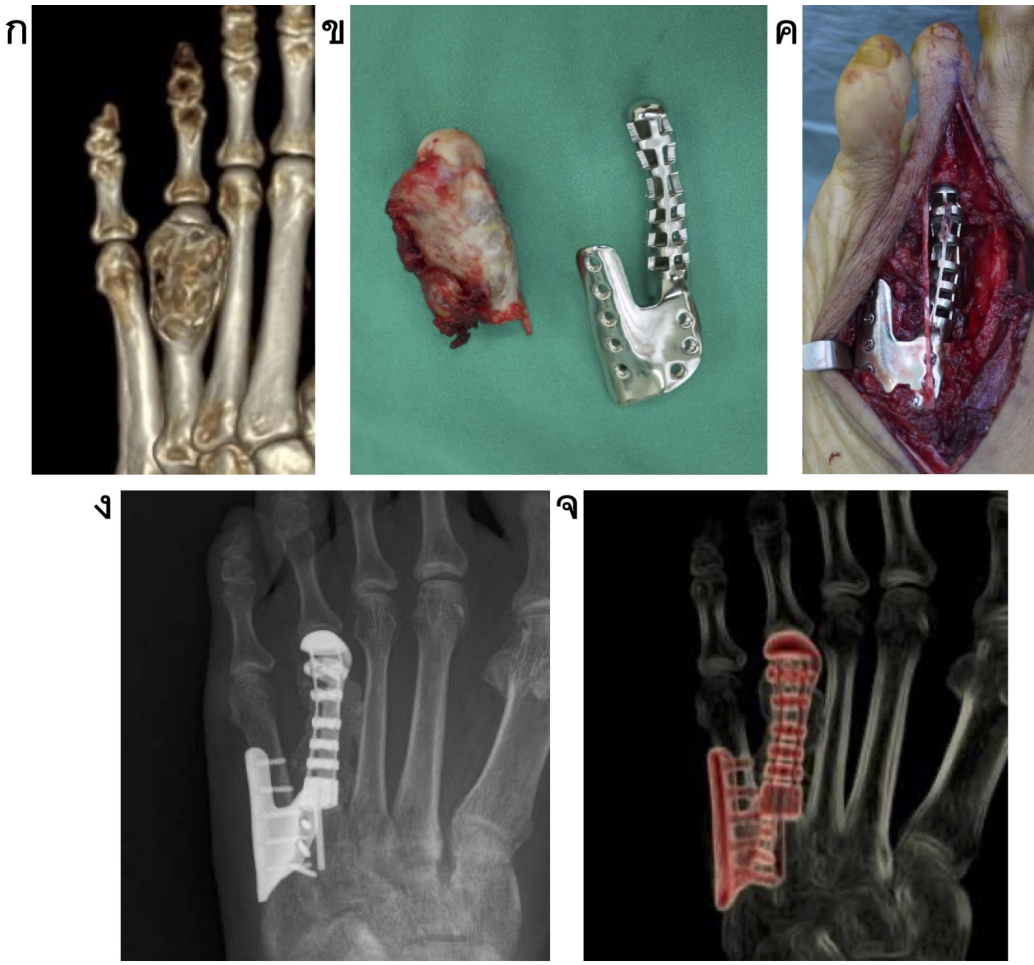
การผ่าตัด CATS ในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์มีการผ่าตัดครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2560 โดยเป็นการผ่าตัดใส่ 3D implant ของกระดูก middle phalanx ของนิ้วกลาง ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยเป็นการร่วมมือกับทางวิศวกรจากบริษัท Meticuly ในการสร้าง implant ในตำแหน่งนี้เป็นครั้งแรก โดยมีลักษณะเป็น mobile ของ proximal interphalangeal joint ส่วน distal interphalangeal joint

ทำเป็น fusion เพื่อให้เกิดความมั่นคง หลังจากนั้นก็มีการออกแบบและผลิต 3D implant ออกมาใช้อีกหลาย ๆ ครั้ง เช่นการผ่าตัดเนื้องอกของกระดูกบริเวณ distal metatarsal bone ซึ่งมีการออกแบบให้ยึดตรึงกับกระดูกส่วนที่เหลือด้วย mini screw รวมถึงมีส่วนต่อเพื่อมายึดกับ metatarsal bone ข้างเคียงทำให้มีความแข็งแรง นอกจากนั้นตัว implant ยังมีลักษณะเป็นโครงกลวง สามารถใส่ chip bone graft ขนาดเล็กเพื่อเสริม biologic healing เพื่อความแข็งแรงของโครงสร้างในระยะยาวอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 18 ส่วนการผ่าตัดมะเร็งที่เกิดซ้ำบริเวณใกล้กับกระดูกสะบัก ดังรูปที่ 19 ทำให้ต้องมีการทำ partial scapulectomy จึงได้ออกแบบให้ implant มีรูที่สามารถเย็บซ่อมเส้นเอ็นโดยรอบได้ นอกจากนี้ยังได้เสริม plate บริเวณกระดูก clavicle เพื่อยึดไม่ให้ clavicle เคลื่อนไปด้านบนมากเกินไปเนื่องจากไม่มี coracoclavicular ligament ส่วนรูปที่ 20 เป็นการผ่าตัดเนื้องอกบริเวณกระดูก distal radius จึงได้ออกแบบให้วัสดุมีรูพรุนเพื่อให้มีน้ำหนักเบา มีรูเพื่อการเย็บซ่อมเส้นเอ็นโดยรอบ ซึ่งการผ่าตัดในตำแหน่งนี้ วรรณศิริและคณะได้ทำการรายงานกรณีศึกษาและได้เสนอวิธีการทำ ligament reconstruction บริเวณโดยรอบข้อมือ ยึดกับ 3D implant ที่เจาะรูไว้และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ[26]

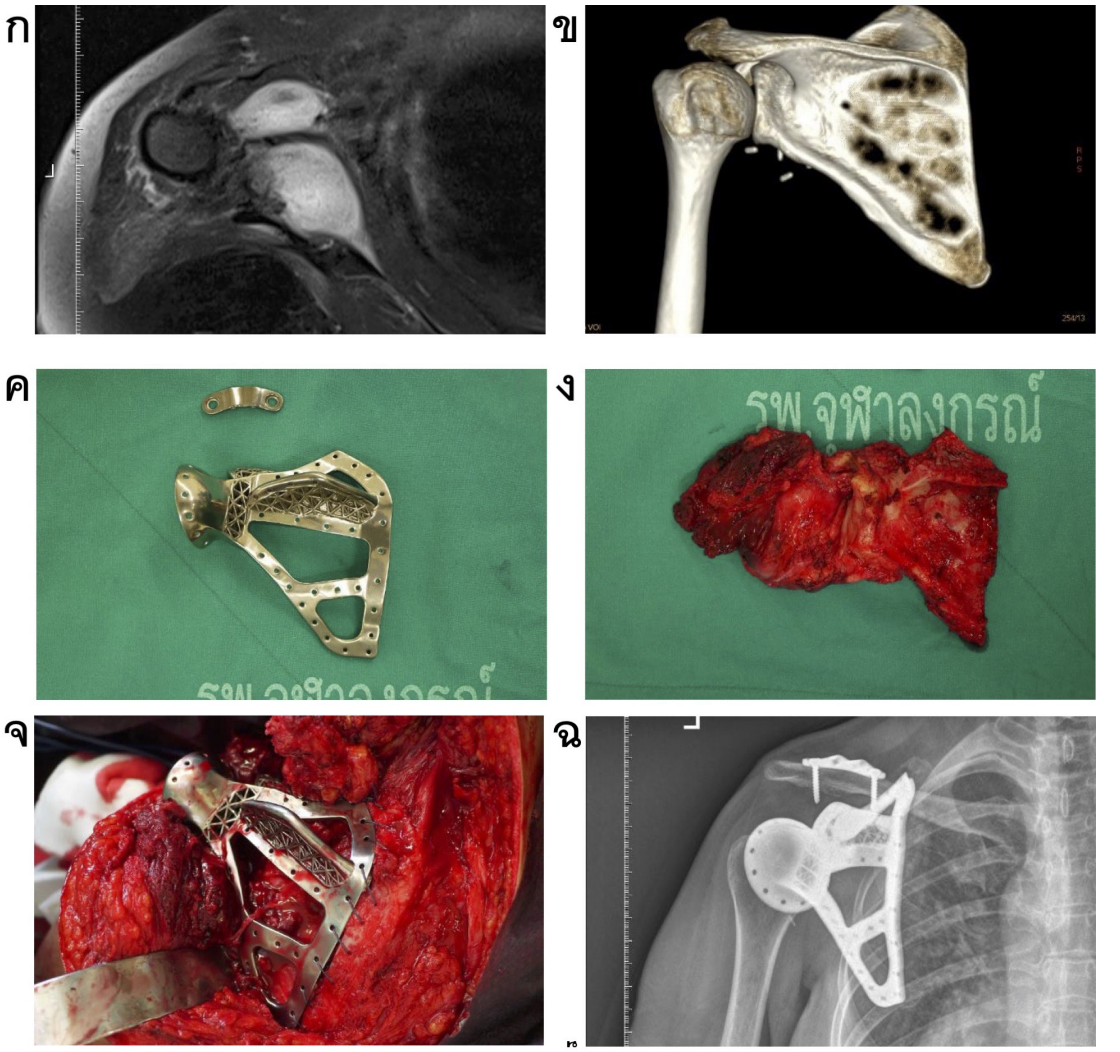
ส่วนการผ่าตัด navigation surgery ในการรักษา musculoskeletal tumor เริ่มมีการผ่าตัดครั้งแรกในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์เมื่อปี พ.ศ. 2561 ในการผ่าตัด chondrosarcoma ขนาดใหญ่บริเวณใกล้กับ acetabulum ดังแสดงในรูปที่ 21 โดยตัวก้อนอยู่ในตำแหน่งรอยต่อของ P2 และ P3 ของ pelvis ซึ่งการผ่าตัด partial P2 resection จะทำให้ข้อสะโพกยังมีความแข็งแรงโดยไม่ต้องทำ reconstruction จึงต้องใช้ navigated surgery ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตัด โดยในรายนี้ได้ใช้ระบบ navigation ของบริษัท Brainlab (Munich, Germany) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้วิธีการ manual registration พบว่ามีความแม่นยำสูง ภายหลังการตัดได้ผล negative margin จากการตรวจทางพยาธิวิทยา ส่วนอีกรายเป็นการผ่าตัด carcinoma of unknown primary ของ iliac bone ดังแสดงในรูปที่ 22 ซึ่งตัวก้อนอยู่บริเวณด้านบนของตัว iliac crest โดยระบบ navigation สามารถช่วยให้ทำ partial P1 resection ได้อย่างแม่นยำทำให้ pelvic ring ที่เหลืออยู่มีความแข็งแรงโดยไม่ต้องมีการ reconstruction ส่วนรูปที่ 23 แสดงการใช้ O-arm ในการทำ automatic registration เพื่อช่วย navigation ในการผ่าตัด chondrosarcoma ของ thoracic spine ทำให้สามารถตัดก้อนออกได้โดยไม่ทำให้บาดเจ็บต่อ neurovascular ข้างเคียง นอกจากนั้นระบบ navigation ยังช่วยในการใส่ pedicular screw บริเวณ cervical และ thoracic spine ซึ่ง pedicle มีขนาดเล็ก ทำให้แพทย์มีความมั่นใจมากขึ้น รวมถึงลด radiation exposure จาก fluoroscopy จากการผ่าตัดวิธีปกติอีกด้วย



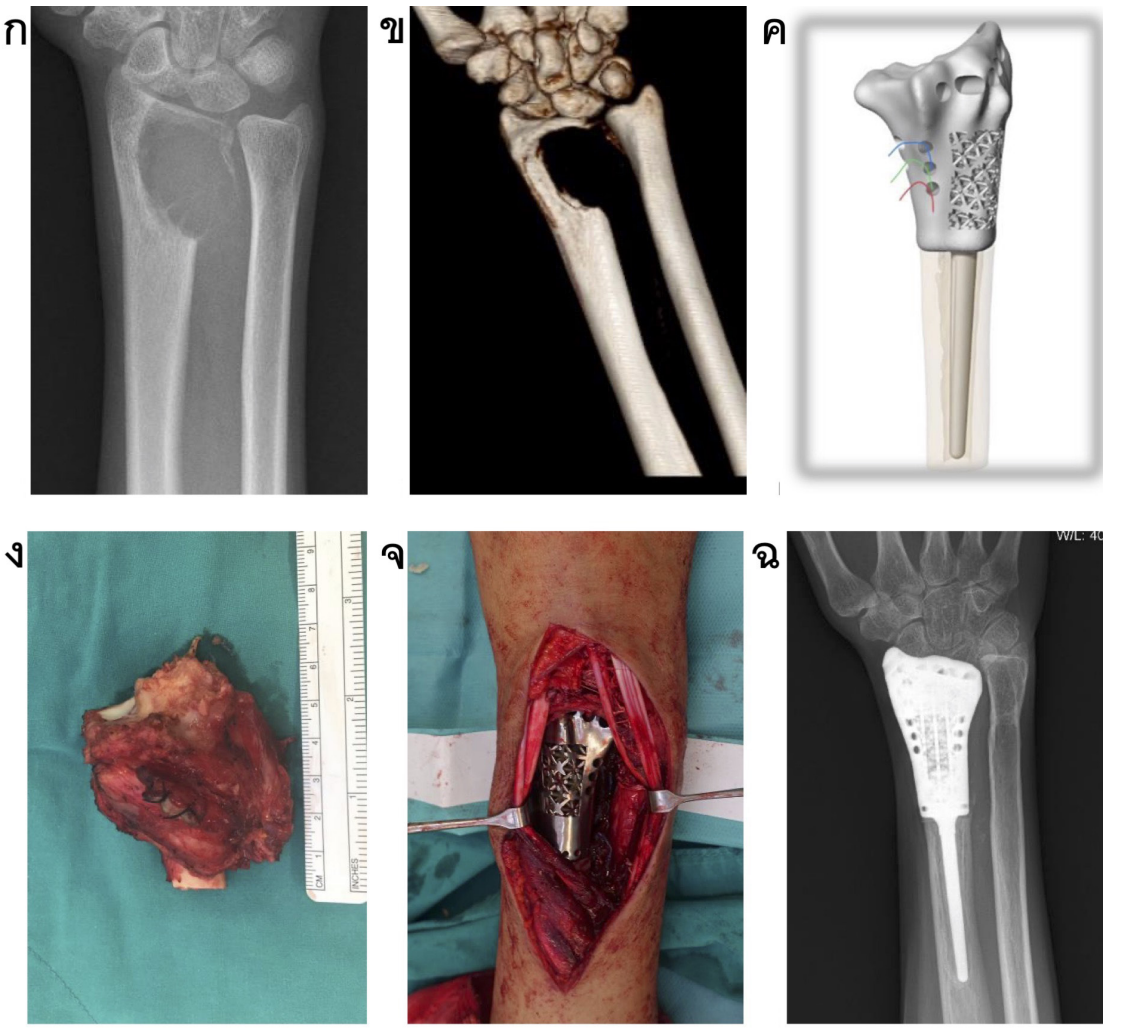
รูปที่ 17. แสดงการผ่าตัดเนื้องอกกระดูกชนิด giant cell tumor ของกระดูก middle phalanx ของ middle finger ก. ภาพ X-ray และ ข. MRI scan แสดงลักษณะของตัวก้อนที่มีการทำลายกระดูกจนหมด ค. การตัดก้อนออกจำเป็นต้องสร้าง 3D implant โดยจำลองจากภาพ CT scan ของกระดูกชิ้นเดียวกันจากมืออีกข้างของผู้ป่วย โดยมีการวางแผนร่วมกันระหว่างแพทย์และวิศวกร โดยมีการออกแบบให้ตัว implant มีการยึดกับ proximal phalanx โดย hinge joint ที่สามารถเคลื่อนไหวในแนว horizontal และ rotation ได้อย่างจำกัด ส่วนด้านปลายยึดกับ distal phalanx โดยการ fusion เพื่อให้มี stability มากที่สุด ง. 3D implant ที่สร้างขึ้นมาพร้อมด้วย patient specific instrument cutting guide ที่จะช่วยในการตัดกระดูกให้แม่นยำ จ. นิ้วของผู้ป่วยภายหลังตัดเนื้องอกออกแล้วทำการใส่ 3D implant เป็นที่เรียบร้อย และ ฉ. ภาพ X-ray ภายหลังการผ่าตัดแสดงแนวของ 3D implant อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม และผู้ป่วยใช้งานได้เป็นอย่างดี



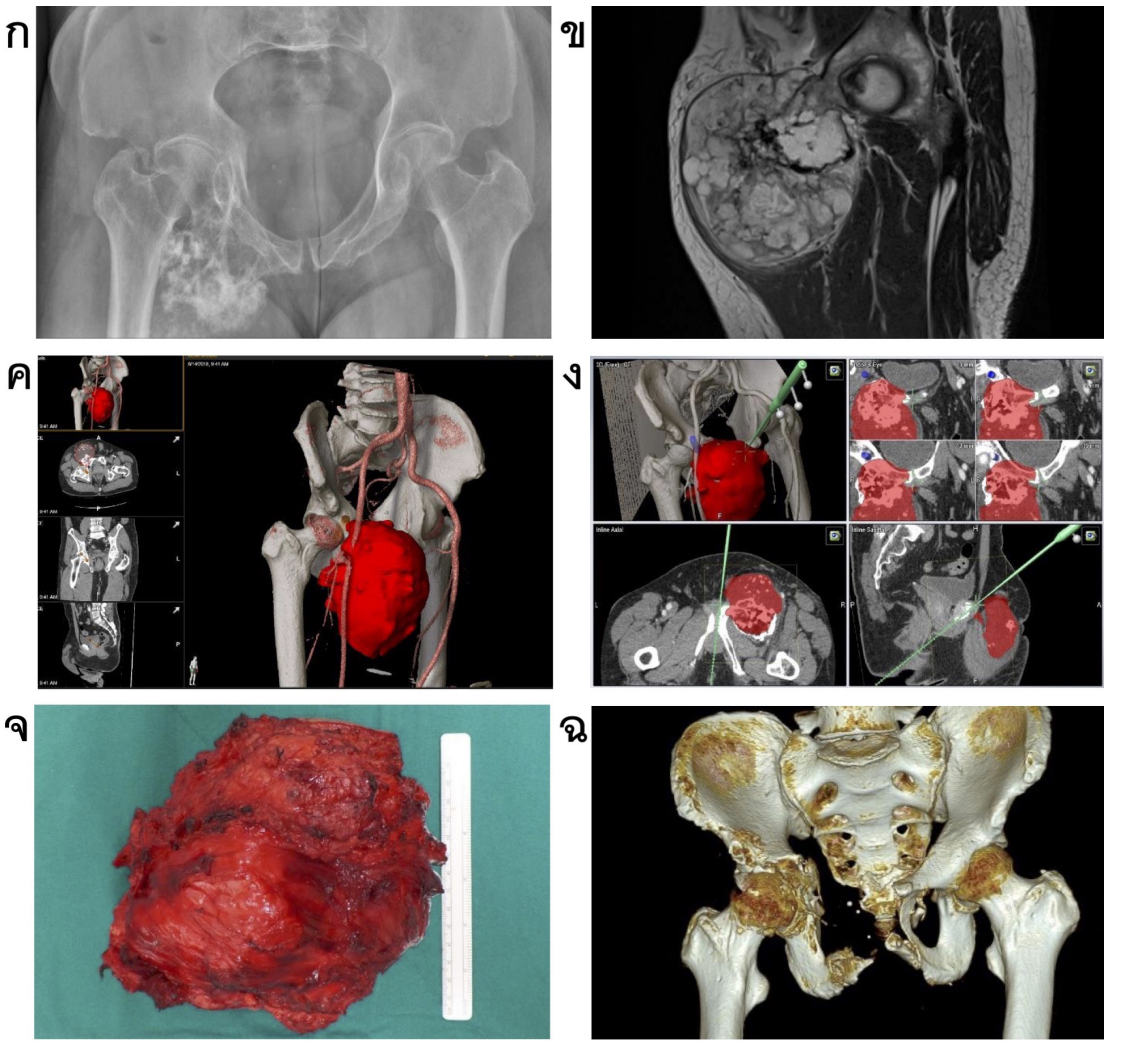
รูปที่ 18. แสดงการผ่าตัดเนื้องอกกระดูกชนิด giant cell tumor with secondary aneurysmal bone cyst ของกระดูก metatarsal bone ของ toe ที่ 4 ก. ภาพ CT scan แสดงลักษณะของเนื้องอก ข. ภายหลังจากได้ตัดก้อนเนื้องอกออกมาเปรียบเทียบกับ 3D implant ซึ่งได้ออกแบบให้มีรูเพื่อใช้ยิง screw หลาย ๆ ตัว รวมทั้งออกแบบให้มีส่วนเชื่อมต่อไปยังนิ้วข้างเคียง เพื่อให้เกิดความแข็งแรงมากที่สุด ค. นิ้วเท้าของผู้ป่วยภายหลังตัดเนื้องอกออกแล้วทำการใส่ 3D implant เป็นที่เรียบร้อย จะเห็นได้ว่ามีขนาดใกล้เคียงกับกระดูกผู้ป่วย นอกจากนี้ใน implant ยังได้ออกแบบให้สามารถใส่ bone graft เพื่อให้เกิด biologic healing เพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างในระยะยาว ง. ภาพ X-ray และ จ. CT scan ภายหลังการผ่าตัด พบว่าตำแหน่งของ Implant สามารถยึดได้แข็งแรงตรงตามที่วางแผนไว้ โดยผู้ป่วยสามารถใช้งานได้ดีภายหลังการผ่าตัด



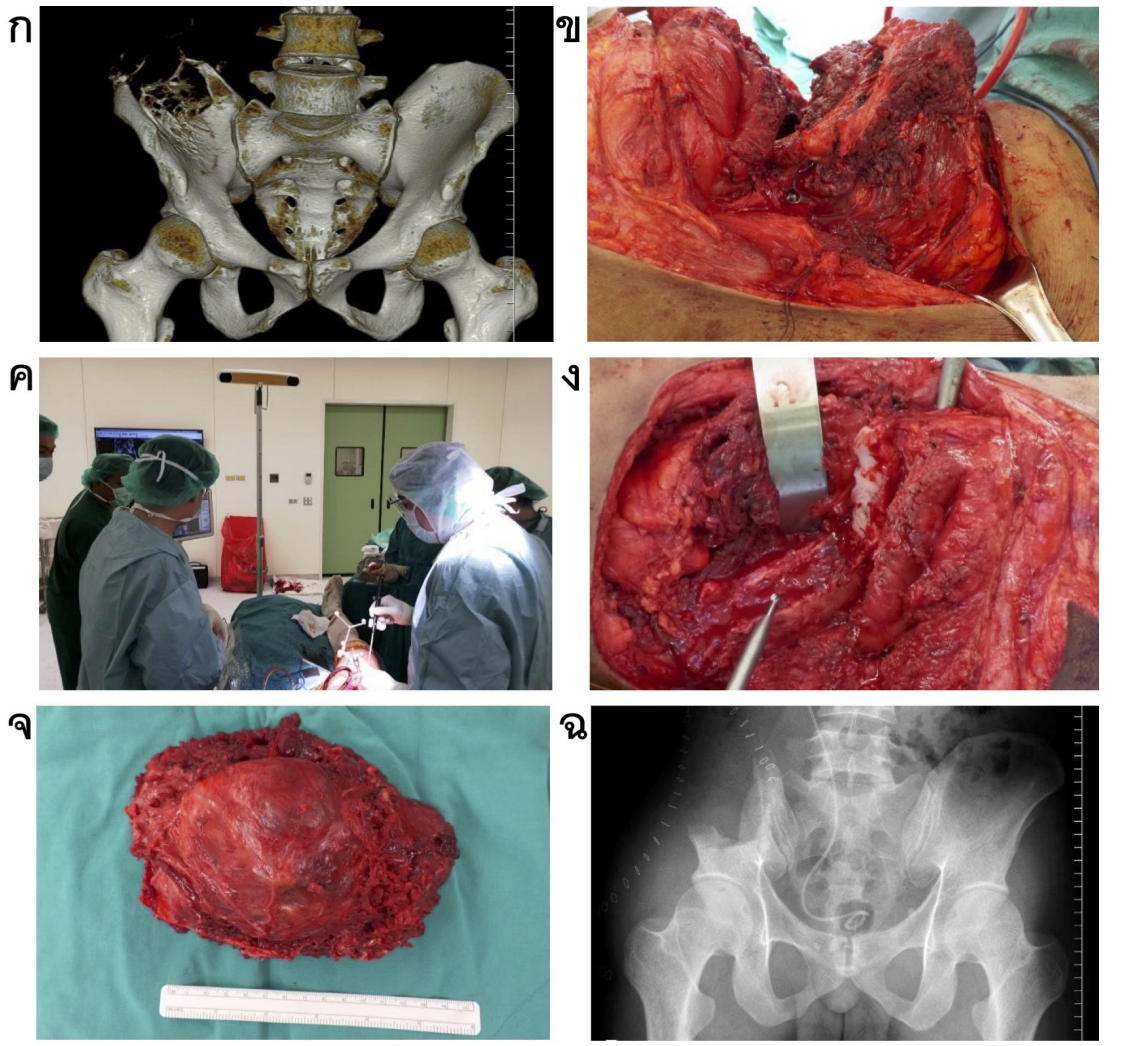
รูปที่ 19. แสดงการผ่าตัดเนื้องอกชนิด myxofibrosarcoma ที่เกิดเป็นซ้ำบริเวณหัวไหล่ ก. ภาพ MRI และ ข. CT scan แสดงลักษณะของเนื้องอกที่มีการลูกลามเข้าไปทำลายกระดูก scapula บริเวณใกล้เคียงทำให้การผ่าตัดจำเป็นต้องมีการตัดกระดูกออกไปพร้อมกับเนื้องอก ค. ลักษณะของ 3D implant ที่ได้มีการร่วมมือกับวิศวกรในการออกแบบโดยอ้างอิงกับภาพ CT scan จากด้านตรงข้าม ออกแบบให้ด้านในมีโครงโลหะเพื่อให้น้ำหนักเบา มีรูโดยรอบเพื่อการเย็บซ่อมเส้นเอ็นและกล้ามเนื้อ ง. ลักษณะของก้อนที่ตัดออกมาพร้อมทั้ง partial scapulectomy ยืนยันผลของชิ้นเนื้อโดยได้ negative margin จ. ภายหลังจากตัดเนื้องอกออกแล้วทำการใส่ 3D implant เป็นที่เรียบร้อย และ ฉ. ภาพ X-ray ภายหลังการผ่าตัดจะเห็นได้ว่า 3D implant อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม กระดูก clavicle มี plate ยึดเพื่อทำ coracoclavicular augmentation โดยผู้ป่วยสามารถใช้งานหลังผ่าตัดได้ดี



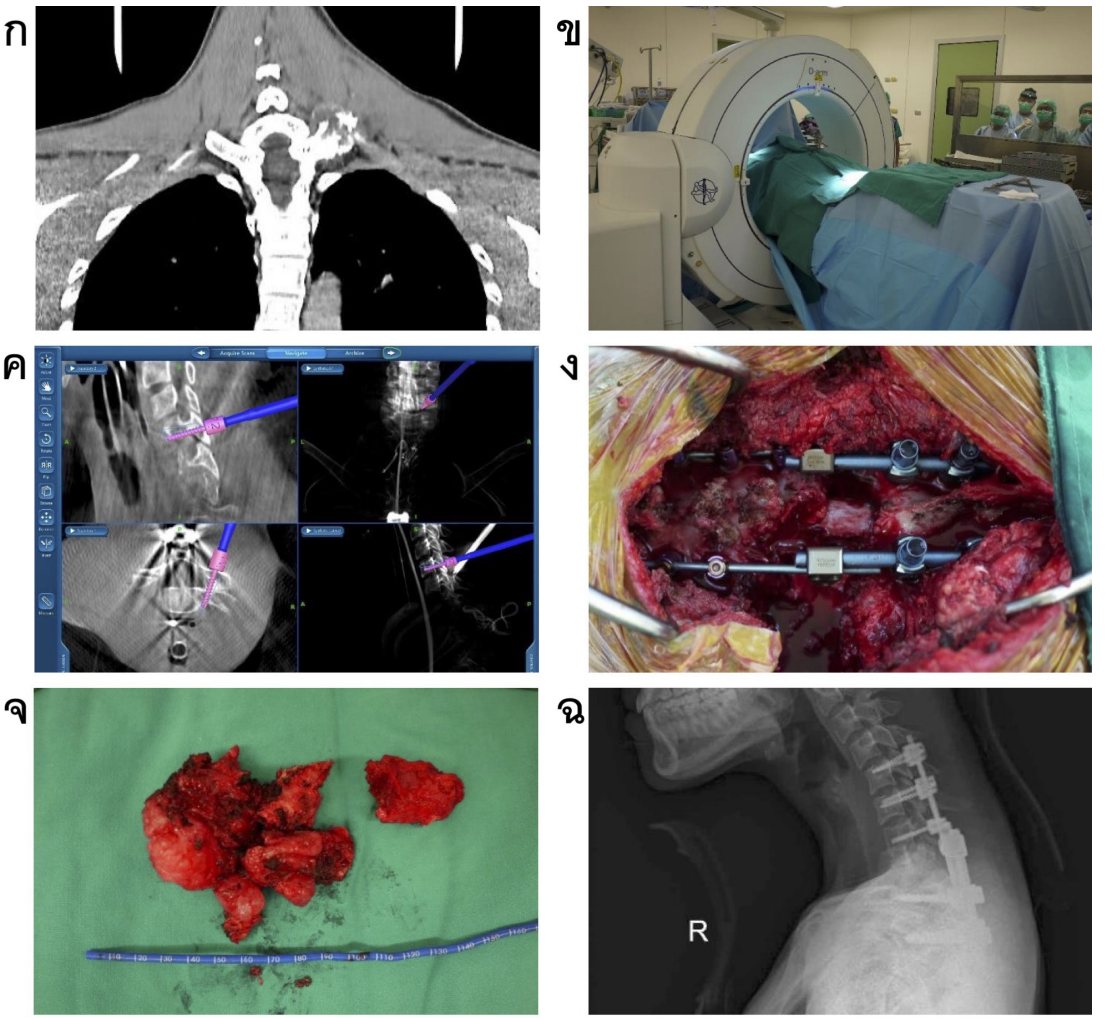
รูปที่ 20. แสดงการผ่าตัดเนื้องอกกระดูกชนิด giant cell tumor ของกระดูก distal radius ก. ภาพ X-ray และ ข. CT scan แสดงลักษณะของเนื้องอกที่มีการทำลายกระดูกไปจนเกือบหมด ค. ลักษณะของ 3D implant ที่ได้มีการร่วมมือกับวิศวกรในการออกแบบโดยอ้างอิงกับภาพ CT scan จากด้านตรงข้าม ออกแบบให้ด้านในมีโครงโลหะเพื่อให้น้ำหนักเบา มีรูโดยรอบเพื่อการเย็บซ่อมเส้นเอ็นของบริเวณข้อมือ ง. ลักษณะของก้อนที่ตัดออกมายืนยันผลของชิ้นเนื้อโดยได้ negative margin จ. แขนของผู้ป่วยภายหลังตัดเนื้องอกออกแล้วทำการใส่ 3D implant เป็นที่เรียบร้อย สังเกตเห็นว่ามีการเย็บซ่อมเส้นเอ็นบริเวณข้อมือเข้ากับรูที่มีการออกแบบไว้บริเวณด้านปลายของ implant และ ฉ. ภาพ X-ray ภายหลังการผ่าตัดจะเห็นได้ว่า 3D implant มีขนาดใกล้เคียงกับกระดูกผู้ป่วย โดยผู้ป่วยสามารถใช้งานได้ดีภายหลังการผ่าตัด



รูปที่ 21. แสดงการผ่าตัดมะเร็งกระดูกชนิด chondrosarcoma ของกระดูก pelvis ก. ภาพ X-ray และ ข. MRI scan แสดงลักษณะของตัวก้อนบริเวณขอบบางส่วนของ anterior wall acetabulum ซึ่งการตัดกระดูกออกที่เหมาะสมจะทำให้ข้อสะโพกมีความมั่นคงโดยไม่จำเป็นต้อง reconstruction ค. 3D bone tumor model ที่เกิดจาก image fusion และกำหนดแนวการตัดบริเวณขอบของ acetabulum ง. หลังจากทำการ manual registration แล้วใช้ navigation pointer ในการทดสอบความแม่นยำจะเห็นได้ว่าปลาย pointer สัมผัสบนกระดูกตลอดเวลา จ. ลักษณะของก้อนขนาดใหญ่ที่ตัดออกมายืนยันผลของชิ้นเนื้อโดยได้ negative margin และ ฉ. ภาพ CT scan ภายหลังการผ่าตัดจะเห็นได้ว่าบริเวณ anterior wall ของ acetabulum หายไปบางส่วนแต่ยังมี stability เพียงพอ โดยผู้ป่วยสามารถใช้งานได้ดีภายหลังการผ่าตัด



รูปที่ 22. แสดงการผ่าตัดมะเร็งกระดูกชนิด carcinoma of unknown primary ของกระดูก pelvis ก. ภาพ CT scan แสดงลักษณะของตัวก้อนออกมาจากบริเวณ iliac crest ซึ่งการผ่าตัด partial P1 resection บริเวณ iliac ที่เหมาะสมจะทำให้ไม่จำเป็นต้องทำการ reconstruction ข. exposure ของการผ่าตัดโดยเตรียมพื้นที่เพื่อการ registration ค. ขณะที่ทำการ manual registration ภายหลังจากติดตั้ง patient's tracker บนกระดูกของผู้ป่วยเรียบร้อยแล้ว ง. กระดูกบริเวณ iliac ที่เหลืออยู่ภายหลังจากทำการตัดเนื้องอกออกไปแล้วโดยมีความหนาที่เหมาะสมไม่จำเป็นต้องทำการ reconstruction จ. ลักษณะของก้อนขนาดใหญ่ที่ตัดออกมายืนยันผลของชิ้นเนื้อโดยได้ negative margin และ ฉ. ภาพ X-ray ภายหลังการผ่าตัดแสดงกระดูก pelvis ที่เหลือโดยผู้ป่วยสามารถใช้งานได้ดีภายหลังการผ่าตัด



รูปที่ 23. แสดงการผ่าตัดมะเร็งกระดูกชนิด secondary peripheral chondrosarcoma ของกระดูกหลังช่วงอก ก. ภาพ CT scan แสดงลักษณะของตัวก้อนออกมาจาก posterior element ของ thoracic spine ซึ่งการผ่าตัดมีโอกาสที่จะบาดเจ็บต่อ nerve root และ spinal cord รวมถึง vertebral artery ทำให้การใช้ CATS จะได้ประโยชน์ในการป้องกันการบาดเจ็บที่อาจเกิดขึ้น ข. การทำ automatic registration โดยใช้ O-arm ค. ภาพเสมือนจริงขณะทำการใส่ pedicular screw โดยใช้ระบบ navigation ง. ภายหลังจากใส่ instrument แล้วจึงทำการตัดตัวก้อนออกโดยใช้ navigation ช่วยเหลือ จ. ลักษณะของก้อนที่ตัดออกมาถึงแม้จะมีหลายชิ้นแต่สามารถตัดออกมาได้หมดโดยไม่มีภาวะแทรกซ้อน และ ฉ. ภาพ X-ray ภายหลังการผ่าตัดแสดงแนวของ instrumentation โดยผู้ป่วยสามารถใช้งานได้ดีภายหลังการผ่าตัด

ในมุมมองของผู้เขียน การผ่าตัด CATS มีประโยชน์ในการผ่าตัดใน musculoskeletal tumor เป็นอย่างมาก แต่ควรมีการเลือกเคสผ่าตัดให้เหมาะสม โดยเฉพาะในกรณีของการผ่าตัดด้วยระบบ navigation เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมดมีราคาที่สูง และต้องใช้เวลาในการวางแผนก่อนการผ่าตัดค่อนข้างมาก นอกจากนี้ประเด็นสำคัญที่ทำให้แพทย์ผ่าตัดประสบปัญหาในการใช้งานในช่วงแรกคือเรื่องของ learning curve หรือความคุ้นเคยที่มีต่อการใช้งานระบบ navigation นั้น ๆ[27] ทั้งนี้ระบบ navigation ที่มี software สามารถทำ image fusion เหมาะกับการทำผ่าตัด CATS จะมีอยู่ 2 บริษัท คือ Stryker (Kalamazoo, MI, USA) และ Brainlab (Munich, Germany) ดังแสดงในรูปที่ 24 ซึ่งผู้เขียนพบว่ามีความแตกต่างในการใช้งานดังนี้

1. Software ของ Stryker (Orthomap) ในการทำ 3D bone tumor model สามารถออกแบบวางแผนแนวการตัดเป็น plane ซึ่งสามารถดูเข้าใจในง่ายกว่าของ Brainlab ซึ่งใช้ model จาก spine ทำให้ได้แนวตัดเป็นจุดเหมือนการใส่ pedicular screw

2. Tracker ชนิด passive ของ Brainlab มีลักษณะเป็นลูกบอลทรงกลมหลาย ๆ ลูก เพื่อรับสัญญาณทำให้มีขนาดโดยรวมใหญ่กว่าชนิด active ของ Stryker ทำให้อาจมีอุปสรรคในการใช้งาน รวมถึงอาจทำให้การตัดกระดูกมีความยากลำบากมากขึ้นถ้าติดตั้ง patient's tracker แล้วไปขัดขวางแนวในการตัดได้

3. Manual registration ของ Brainlab สามารถเลือกจุด paired points ได้เพียง 3 จุดและ surface matching point ได้อีกเพียง 17 จุด ต่างกับของ Stryker ที่สามารถเลือกจุด paired points ได้ 5 จุดและ surface matching point ได้อีกมากกว่า 50 จุด ทำให้การทำ image to patient registration ของ Brainlab ต้องมีความระมัดระวังที่จะผิดพลาดและส่งผลต่อความแม่นยำในการตัด

รูปที่ 24. แสดงระบบ navigation ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายใน CATS ก. Stryker และ ข. Brainlab

ส่วนระบบ navigation ที่สามารถทำ automatic registration โดยใช้ O-arm จะเป็น second-generation 3D fluoroscopy scanners โดยระบบที่มีใช้ในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์จะเป็นระบบ Stealth system ของบริษัท Medtronic (Minneapolis, MN, USA) ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้ในการผ่าตัด spine surgery เป็นหลัก[28] มีข้อดีคือง่ายต่อการใช้เนื่องจากเป็น automatic registration แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญคือไม่สามารถทำ image fusion ในส่วนของ tumor ได้ทำให้มีที่ใช้ใน CATS ในกรณีที่ตัวก้อนมะเร็งไม่มี soft tissue extension มากเกินไปนัก สามารถดูขอบเขตได้ชัดเจนจากภาพของ O-arm ซึ่งอาจไม่ชัดเท่ากับภาพ CT หรือ MRI scan แต่ก็ได้รายละเอียดเพียงพอ หรือใช้ช่วยผ่าตัดในกรณีของ benign tumor ที่ต้องการผ่าตัดแบบ minimal invasive technique เป็นต้น

สำหรับ 3D printing ในมุมมองของผู้เขียนคิดว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์มาก ในปัจจุบันสามารถหาเครื่อง 3D printer มาเพื่อใช้ทำ anatomical model ได้ไม่ยากและราคาไม่แพงจนเกินไป แต่ถ้าจะผลิตขึ้นเพื่อใช้ทำเป็น PSI จะต้องใช้เครื่องที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงซึ่งต้องร่วมมือกับวิศวกรเพื่อวางแผนให้ได้อุปกรณ์ที่ใช้กับผู้ป่วยได้อย่างดี การใช้ PSI ในการผ่าตัด musculoskeletal tumor ถ้าทำได้อย่างถูกต้องจะมีความแม่นยำในการตัดไม่แตกต่างกับระบบ navigation โดยใช้ระยะเวลาในการผ่าตัดที่สั้นกว่า แต่ผู้เขียนยังมีข้อกังวลในเรื่องของการวางตำแหน่งของ PSI ที่ต้องให้ได้ fit และตำแหน่งถูกต้องตามที่วางแผนไว้ ซึ่งในหลาย ๆ ครั้งจะมีความยากลำบากเนื่องจากต้องเลาะ soft tissue ออกไปเป็นจำนวนมาก ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้

ส่วนในกรณีของ 3D implant ผู้เขียนมองว่าเป็น implant ที่เหมาะสมกับการใช้ในการผ่าตัดรักษา musculoskeletal tumor ในประเทศไทยเป็นอย่างยิ่ง ประเด็นแรกเนื่องด้วยขนาดของกระดูกคนไทยที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนักทำให้การใช้ modular implant จากต่างประเทศอาจมีปัญหา ซึ่งการใช้ customized 3D implant จะแก้ปัญหาได้ ประเด็นที่สองคือการที่สามารถผลิต 3D implant ขึ้นได้เองในประเทศไทยจะทำให้ได้ implant ที่มีราคาที่ต่ำกว่าการสั่งซื้อจากต่างประเทศ ประเด็นที่สามคือเทคโนโลยี 3D printing ทำให้มีอิสระในการออกแบบ implant ให้เหมาะสมกับผู้ป่วยรายนั้นมากที่สุด สามารถเพิ่มเติมหรือแก้ไขส่วนต่าง ๆ ของ implant ได้โดยวิศวกรจะร่วมตัดสินใจด้วยว่าการออกแบบนั้นสามารถใช้ได้จริงหรือไม่ ในกรณีที่มีข้อสงสัยสามารถนำอุปกรณ์ที่ออกแบบไปทดสอบด้วย finite element analysis (FEA) หรือการวิเคราะห์ชิ้นงานโดยการคำนวณหาความแข็งแรงได้อีกด้วย ประเด็นสุดท้ายคือ 3D implant เป็นโอกาสที่จะพัฒนางานวิจัยเนื่องจากเป็นการสร้างนวัตกรรมที่สามารถเทียบเคียงประสิทธิภาพกับต่างประเทศได้ อย่างไรก็ตาม 3D implant ในประเทศไทยก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ในหลายด้าน เนื่องด้วยขนาดของ 3D printer ทำให้ยังไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มาก ๆเช่น femur หรือ tibia ได้ นอกจากนี้การสร้าง 3D implant ที่มีส่วนประกอบของข้อต่อที่จำเป็นต้องมี ultra-high molecular weight polyethylene

(UHMWPE) หรือพลาสติกคุณภาพสูงเพื่อลดการสึกหรอเป็นส่วนประกอบอาจจะยังไม่สามารถทำได้ในปัจจุบัน จึงยังเป็นจุดที่ต้องพัฒนาต่อไปในอนาคต

4. CATS ในปัจจุบันและแนวโน้มในอนาคต

การใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดรักษาโรคเนื้องอกและมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพันมีความแตกต่างกับ CAOS ในสาขาอื่น ๆ เนื่องจากจะคำนึง oncological outcome ก่อนเป็นอันดับแรกแล้วจึงพิจารณาเรื่อง functional outcome ตามมา CATS จึงเป็นวิธีการหาจุดสมดุลย์เพื่อให้ได้ผลการรักษาที่ดีทั้งสองด้าน โดยในส่วนของ oncological outcome แพทย์ผ่าตัดต้องผ่าตัดให้ได้ negative margin โดยปัจจุบันใช้การวัดระยะห่างจากขอบก้อนเข้าไปหาตัวมะเร็ง ซึ่งตอนนี้ยังไม่มีข้อสรุปว่าระยะห่างเท่าไหร่จึงจะเหมาะสม เนื่องจากต้องคำนึงถึงตัวโรคและคุณภาพของ margin ด้วย แต่การตัดที่ได้ surgical margin ที่มากเกินไปก็จะสูญเสีย function ไปด้วยซึ่ง CATS จะมีบทบาทในส่วนนี้โดยสามารถเลือกใช้ navigated surgery หรือ patient-specific instrument ก็ได้เพื่อให้ได้การตัดที่แม่นยำในกรณีที่มีข้อบ่งชี้ที่เหมาะสม ซึ่งตารางที่ 1[2] ได้แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเด่นของทั้งสองวิธี โดยถ้าทำถูกขั้นตอนทั้งสองระบบจะมีความแม่นยำไม่ต่างกัน[29] แต่จะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกัน ส่วนเทคโนโลยีการทำ 3D printing อื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการทำ anatomical model รวมถึง 3D implant ซึ่งกำลังได้รับความนิยมมากขึ้นโดยเฉพาะการผ่าตัดบริเวณ pelvis acetabulum และกระดูกขนาดเล็ก ซึ่งมีข้อจำกัดของ modular implant ที่ไม่สามารถเข้าได้กับผู้ป่วยทุกราย

ตารางที่ 1. แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของ CATS ชนิด navigated surgery และ patient-specific instrument[2]

	Navigated surgery	Patient-specific instrument
ขั้นตอนการทำงาน	Image fusion จากนั้นสร้าง 3D bone tumor model พร้อมกำหนดตำแหน่งในการตัด	Image fusion จากนั้นทำงานร่วมกับวิศวกร เพื่อสร้าง 3D printing model และ PSI
ระยะเวลาวางแผนก่อนการผ่าตัด	ใช้เวลาเพิ่มขึ้นไม่นาน	ใช้เวลานานในการรอการผลิต
การติดตั้งในห้องผ่าตัด	ต้องติดตั้งระบบ navigation ที่มีการ registration และมีอุปกรณ์ที่ต้องใช้ร่วมกันเป็นจำนวนมาก	มีเพียงแค่ PSI ชิ้นเดียวโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติม
ระยะเวลาในการผ่าตัด	ใช้ระยะเวลานาน	ช่วยลดระยะเวลาการผ่าตัด
ความแม่นยำของการผ่าตัด	ขึ้นกับการ registration ของระบบ navigation	ขึ้นกับตำแหน่งในการวาง cutting guide ให้ได้ตามที่วางแผนไว้
Learning curve	ใช้ระยะเวลานานในการทำความคุ้นเคย แต่ได้ประโยชน์จาก real time feedback ของระบบ	ใช้เวลาในการเรียนรู้ไม่นาน

สำหรับแนวโน้มในอนาคตของการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดทางออร์โธปิดิกส์ Picard และคณะได้นำเสนอว่าสามารถมีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาช่วยพัฒนาได้อีกมากโดยสามารถแบ่งเป็น 4 ด้านประกอบด้วย ก. การพัฒนา image-based surgery ให้ การทำ image fusion มีความแม่นยำใช้งานง่าย รวมภาพ CT และ MRI scan เข้าด้วยกันและอาจรวมถึงภาพจาก EOS™ (EOS Imaging, Paris, France) ซึ่งทำให้ผู้ป่วยรับปริมาณรังสีน้อยกว่าการทำ CT scan ได้อีกด้วย ข. การพัฒนาระบบ navigation ใหม่ ๆไม่ว่าจะเป็นการใช้ sensor ชนิด accelerometer ของ eLIBRA® (Zimmer Biomet Warsaw Indiana, US) การใช้ tracking ระบบอินฟราเรดของ PhysioPilot® (Surgiconcept Ltd, UK) รวมถึง ultrasound tracking system ค. การผ่าตัดด้วยหุ่นยนต์ซึ่งมีการใช้มากขึ้นแล้วในการผ่าตัด joint arthroplasty และ ง. artificial intelligence, algorithms and simulation เป็นการจัดเก็บข้อมูลด้าน big data ในด้าน measurement ต่าง ๆ เช่น implant alignment หรือ position ซึ่งไม่ได้วัดจาก postoperative imaging ปกติแต่อาจมีประโยชน์ที่อาจส่งผลถึง surgical outcome ในอนาคต[4] แต่สำหรับ CATS แล้วการพัฒนา

ในด้าน robotic surgery น่าจะยังเป็นข้อจำกัดเนื่องด้วยการผ่าตัดด้านมะเร็งจะมีความแตกต่างกับการผ่าตัดของออร์โธปิดิกส์อื่น ๆ แต่อาจจะมีการพัฒนาในแง่ของการผลิตอุปกรณ์ของระบบ navigation system ให้มีขนาดเล็กลง มีราคาถูกลงเพื่อให้แพทย์สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น[1] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาทดลองใช้ augmented reality (AR) หรือเทคโนโลยีผสมผสานระหว่างผู้ป่วยและภาพ model เสมือนจริงเข้าด้วยกันมาใช้ในระบบ navigation system เพื่อผ่าตัด bone tumor surgery ผ่านอุปกรณ์แทปเล็ตหรือมือถือ ซึ่งมีความสะดวกมากขึ้นโดยไม่ต้องเสียเวลาในการ registration อีกด้วย[30]

สรุป

การใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการผ่าตัดรักษาโรคเนื้องอกและมะเร็งของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ถือว่ามีการพัฒนาขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ขั้นตอนของการตัดก้อนเนื้องอกหรือมะเร็งออกไม่ว่าจะเป็นการใช้ navigated surgery หรือ patient specific instrument ก็ตามเป็นที่ยอมรับว่าสามารถช่วยให้ทำได้อย่างแม่นยำมากขึ้นโดยได้ surgical margin ตามที่ต้องการโดยเฉพาะในตำแหน่งกระดูกที่มีความซับซ้อน ส่งผลให้มี oncological outcome ที่ดีขึ้น ส่วนขั้นตอนของการ reconstruction การใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยในการสร้าง anatomical model และ 3D implant ช่วยให้การ reconstruction มีความเหมาะสมกับผู้ป่วยมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ป่วยมี functional outcome และคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นตามไปด้วย ส่วนการตัดสินใจเลือกใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยผ่าตัดชนิดใด ขึ้นกับหลายปัจจัยทั้งเรื่องประสบการณ์ของแพทย์ สถานที่ รวมถึงงบประมาณที่ได้รับและทุนทรัพย์ของผู้ป่วย ทั้งนี้แพทย์ผ่าตัดจะต้องคำนึงถึงปัจจัยทุกด้านเพื่อผลการรักษาที่ดีที่สุดของผู้ป่วยต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Morris GV, Stevenson JD, Evans S, Parry MC, Jeys L. Navigation in Musculoskeletal Oncology: An Overview. Indian J Orthop. 2018;52(1):22-30.
2. McCulloch RA, Frisoni T, Kurunskal V, Maria Donati D, Jeys L. Computer Navigation and 3D Printing in the Surgical Management of Bone Sarcoma. Cells. 2021;10(2).
3. Albergo JI, Farfalli GL, Ayerza MA, Ritacco LE, Aponte-Tinao LA. Computer-assisted surgery (CAS) in orthopedic oncology. Which were the indications, problems and results in our first consecutive 203 patients? European journal of surgical oncology : the journal of the European Society of Surgical Oncology and the British Association of Surgical

Oncology. 2021;47(2):424-8.

4. Picard F, Deakin AH, Riches PE, Deep K, Baines J. Computer assisted orthopaedic surgery: Past, present and future. Med Eng Phys. 2019;72:55-65.
5. Zheng G, Nolte LP. Computer-Aided Orthopaedic Surgery: State-of-the-Art and Future Perspectives. Adv Exp Med Biol. 2018;1093:1-20.
6. Zheng G, Nolte LP. Computer-Assisted Orthopedic Surgery: Current State and Future Perspective. Front Surg. 2015;2:66.
7. Wong KC, Kumta SM. Computer-assisted tumor surgery in malignant bone tumors. Clinical orthopaedics and related research. 2013;471(3):750-61.
8. Sambri A, Caldari E, Fiore M, Zucchini R, Giannini C, Pirini MG, et al. Margin Assessment in Soft Tissue Sarcomas: Review of the Literature. Cancers (Basel). 2021;13(7).
9. Bickels J, Jelinek JS, Shmookler BM, Neff RS, Malawer MM. Biopsy of musculoskeletal tumors. Current concepts. Clinical orthopaedics and related research. 1999(368):212-9.
10. Enneking WF, Spanier SS, Goodman MA. A system for the surgical staging of musculoskeletal sarcoma. Clinical orthopaedics and related research. 1980(153):106-20.
11. Hermanek P, Wittekind C. The pathologist and the residual tumor (R) classification. Pathol Res Pract. 1994;190(2):115-23.
12. Gronchi A, Miceli R, Fiore M, Collini P, Lozza L, Grosso F, et al. Extremity soft tissue sarcoma: adding to the prognostic meaning of local failure. Annals of surgical oncology. 2007;14(5):1583-90.
13. Gerrand CH, Wunder JS, Kandel RA, O'Sullivan B, Catton CN, Bell RS, et al. Classification of positive margins after resection of soft-tissue sarcoma of the limb predicts the risk of local recurrence. The Journal of bone and joint surgery British volume. 2001;83(8):1149-55.
14. Casali PG, Jost L, Sleijfer S, Verweij J, Blay JY, Group EGW. Soft tissue sarcomas: ESMO clinical recommendations for diagnosis, treatment and follow-up. Annals of oncology : official journal of the European Society for Medical Oncology / ESMO. 2009;20 Suppl 4:132-6.
15. Kawaguchi N, Ahmed AR, Matsumoto S, Manabe J, Matsushita Y. The concept of curative margin in surgery for bone and soft tissue sarcoma. Clinical orthopaedics and

related research. 2004(419):165-72.

16. Wong KC, Kumta SM, Tse LF, Ng EWK, Lee KS. A Practical Guide to Computer Assisted Tumor Surgery (CATS): Red Corporation Ltd.; 2010. 196 p.
17. Thadani VN, Riaz MJ, Singh G. The evolution of three-dimensional technology in musculoskeletal oncology. J Clin Orthop Trauma. 2018;9(3):269-74.
18. Beltrami G, Ristori G, Nucci AM, Galeotti A, Tamburini A, Scoccianti G, et al. Custom-Made 3D-Printed Implants as Novel Approach to Reconstructive Surgery after Oncologic Resection in Pediatric Patients. J Clin Med. 2021;10(5).
19. So TY, Lam YL, Mak KL. Computer-assisted navigation in bone tumor surgery: seamless workflow model and evolution of technique. Clinical orthopaedics and related research. 2010;468(11):2985-91.
20. Gouin F, Paul L, Odri GA, Cartiaux O. Computer-Assisted Planning and Patient-Specific Instruments for Bone Tumor Resection within the Pelvis: A Series of 11 Patients. Sarcoma. 2014;2014:842709.
21. Park JW, Kang HG, Lim KM, Park DW, Kim JH, Kim HS. Bone tumor resection guide using three-dimensional printing for limb salvage surgery. Journal of surgical oncology. 2018;118(6):898-905.
22. Wong KC, Kumta SM, Geel NV, Demol J. One-step reconstruction with a 3D-printed, biomechanically evaluated custom implant after complex pelvic tumor resection. Comput Aided Surg. 2015;20(1):14-23.
23. Punyaratabandhu T, Liacouras PC, Pairojboriboon S. Using 3D models in orthopedic oncology: presenting personalized advantages in surgical planning and intraoperative outcomes. 3D Print Med. 2018;4(1):12.
24. Park JW, Kang HG, Kim JH, Kim HS. The application of 3D-printing technology in pelvic bone tumor surgery. Journal of orthopaedic science : official journal of the Japanese Orthopaedic Association. 2021;26(2):276-83.
25. Fujiwara T, Sree DV, Stevenson J, Kaneuchi Y, Parry M, Tsuda Y, et al. Acetabular reconstruction with an ice-cream cone prosthesis following resection of pelvic tumors: Does computer navigation improve surgical outcome? Journal of surgical oncology. 2020;121(7):1104-14.
26. Kuptniratsaikul V, Luangjarmekorn P, Charoenlap C, Hongsaprabhas C, Kitidumrongsook

P. Anatomic 3D-Printed Endoprosthetic With Multiligament Reconstruction After En Bloc Resection in Giant Cell Tumor of Distal Radius. J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev. 2021;5(2).

27. Farfalli GL, Albergo JI, Ritacco LE, Ayerza MA, Milano FE, Aponte-Tinao LA. What Is the Expected Learning Curve in Computer-assisted Navigation for Bone Tumor Resection? Clinical orthopaedics and related research. 2017;475(3):668-75.
28. Malham GM, Wells-Quinn T. What should my hospital buy next?-Guidelines for the acquisition and application of imaging, navigation, and robotics for spine surgery. J Spine Surg. 2019;5(1):155-65.
29. Bosma SE, Wong KC, Paul L, Gerbers JG, Jutte PC. A Cadaveric Comparative Study on the Surgical Accuracy of Freehand, Computer Navigation, and Patient-Specific Instruments in Joint-Preserving Bone Tumor Resections. Sarcoma. 2018;2018:4065846.
30. Cho HS, Park YK, Gupta S, Yoon C, Han I, Kim HS, et al. Augmented reality in bone tumour resection: An experimental study. Bone Joint Res. 2017;6(3):137-43.