

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การออกแบบและผลิตต้นแบบกลไกขาเทียมแบบเหนือเข่า III Design and Manufacturing Prototype of Knee Mechanism in Transfemoral Prosthesis III

ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ ชัญญุพันธ์ วิรุฬห์ศรี* และ สมพงษ์ เจริญบุญยวิวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

*ผู้ติดต่อ: bio2mech@gmail.com, (662) 2186610, (662) 2186610

บทคัดย่อ

กลไกข้อเข่าที่อยู่ในขาเทียมนั้นเป็นส่วนที่จำเป็นในการเดินด้วยขาเทียมของผู้พิการขาขาดเหนือเข่าเป็นอย่างมากเพราะกลไกข้อเข่าต้องทำงานอย่างสอดคล้องกับลักษณะการเหวี่ยงตอขา เพื่อให้ผู้ใช้มีลักษณะการเดินที่ใกล้เคียงกับการเดินตามธรรมชาติมากที่สุด สำหรับการสร้างกลไกข้อเข่าเพื่อใช้ในขาเทียมที่จะนำไปบริจาค นั้นกลไกข้อเข่าต้องสามารถให้การเดินที่ปลอดภัย คือมีเสถียรภาพของการเดินครบทุกตำแหน่งของวงจรการเดิน (gait cycle) มีเส้นทางการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติด้วยกลไกหลายจุดศูนย์กลางการหมุน (polycentric mechanism) [1] และสุดท้ายต้องมีจำนวนชิ้นส่วนของกลไกไม่มากเกินไปซึ่งรวมถึงความสะดวกในการสร้างชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเพื่อให้ง่ายต่อการผลิตและประกอบ หลังจากพิจารณาต้นแบบกลไกข้อเข่าเดิมของทีมนักวิจัยที่ได้พัฒนาขึ้น [2] พบว่ายังมีปัญหาที่ต้องปรับปรุงอยู่ เช่น ตัวกลไกมีชิ้นส่วนมาก แต่ละชิ้นส่วนยากต่อการขึ้นรูปและประกอบเข้ากัน ทำให้ต้นแบบเดิมไม่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตจำนวนมากเพื่อบริจาค งานวิจัยนี้จึงเน้นที่จะออกแบบกลไกข้อเข่าที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวแต่ยังคงยังทำงานได้ตามกลไกเดิม โดยปรับรูปแบบกลไกจาก Four-bar linkage ให้มาเป็น Double pin-in-slot mechanism เมื่อสร้างกลไกข้อเข่าแล้วนำไปทดลองใช้งานจริงพบว่าผู้ใช้สามารถเดินได้ตามธรรมชาติ มีเสถียรภาพ กลไกมีชิ้นส่วนน้อยลง และ การประกอบกลไกง่ายขึ้น

คำหลัก: กลไกข้อเข่าในขาเทียม, การเดินที่เป็นธรรมชาติ, เสถียรภาพของการเดิน, วงจรการเดิน, กลไกหลายศูนย์กลางการหมุน

Abstract

Significantly, knee mechanism in leg prosthesis is the key that enables transfemoral user to walk. Hence, the knee mechanism must be able to create a natural motion of walking knee and its response must synchronize with user's lump motion while walking. To develop these knee joints for donation, two objectives are needed. First, safety from usage which means the mechanism should provide stability for the whole of gait cycle. Second, polycentric mechanism [1] is adapted in this mechanism to create natural motion of walking knee. Third, each part of the mechanism should be ease of machining and the mechanism need to have as few parts as possible. The previous version of knee mechanism [2] can't be used for donation because it has some disadvantages, such as the mechanism has many parts and some

parts of mechanism are difficult to machine and assemble. Therefore, this research is to design the mechanism that eliminates those disadvantages in the previous one but still function under the objectives above. After redesign some joint in four-bar linkage from revolute joint to prismatic joint, the new knee mechanism can provide natural motion of walking knee, stability, less of parts and simplicity to manufacture and assemble.

Keywords: knee mechanism in leg prosthetic, natural motion of walking, stability of walking, gait cycle, polycentric mechanism

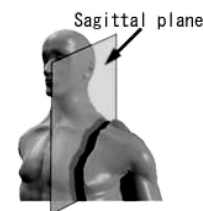
1. บทนำ

ปัจจุบันกลไกข้อเข่าแบบหลายจุดศูนย์กลางการหมุน จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงทำให้มีราคาสูง ผู้พิการในประเทศที่ด้อยโอกาสมากกว่า 27,000 คน ที่ยังต้องใช้กลไกข้อเข่าแบบหลายจุดศูนย์กลางการหมุน [1] มีบทบาทสำคัญที่ทำให้การเดินเป็นธรรมชาติและทำให้ไม่เกิดปัญหาอาการบาดเจ็บตามมา ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบกลไกข้อเข่าแบบหลายจุดศูนย์กลางการหมุนรุ่นใหม่ที่ยังคงความสามารถในใช้งานและข้อดีดั้งเดิม กล่าวคือมีเสถียรภาพของการเดินครบทุกตำแหน่งของวงจรการเดิน (Gait cycle) มีเส้นทางการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติ ใช้ชิ้นส่วนน้อย อีกทั้งมีความเรียบง่ายในการสร้างประกอบ หลังจากที่ออกแบบกลไกเข่าแล้วจึงสร้างต้นแบบกลไกข้อเข่าไปทดลองใช้งาน หากเป็นไปได้จะนำแบบนี้ไปพิจารณาสำหรับการสร้างเพื่อบริจาคให้กับผู้พิการที่ด้อยโอกาสในประเทศต่อไป

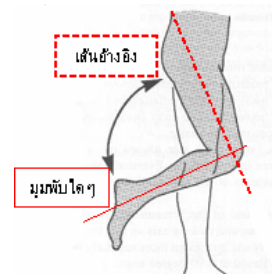
2. แนวความคิดในการออกแบบ

การออกแบบกลไกข้อเข่าจะพิจารณาเฉพาะระบบเชิงกลใน Sagittal plane ดังรูปที่ 1 เท่านั้น โดยที่ช่วงมุมพับไปข้างหลังของเข่า (Knee flexion angle) ที่สนใจมีค่าตั้งแต่ 0-120 [3] องศา และตำแหน่ง 0 องศา คือเส้นอ้างอิงของขาขณะยืนตรง ดังรูปที่ 2 การออกแบบการทำงานของกลไกแบ่งเป็นช่วง Stance phase และ Swing phase สำหรับช่วง Stance phase (ตำแหน่ง 1 ถึง 5 ของขาข้างที่ถูกแรงในรูปที่ 3) ขาเทียมต้องมีเสถียรภาพ และสามารถรับน้ำหนักตัวหรือแรงกระแทกจากการใช้งานได้ และกลไกเข่าต้องไม่ถ

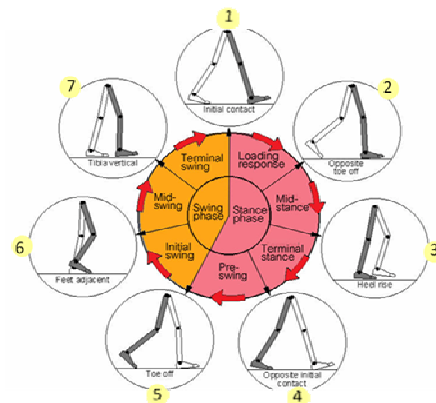
ប់ขณะอยู่ในช่วงนี้ ต่อมาคือช่วง Swing phase (ตำแหน่ง 6 ถึง 7 ของขาข้างที่ถูกแรงในรูปที่ 3) ต้องออกแบบให้กลไกเข่าในขาเทียมสามารถพับองได้ง่ายในช่วงเริ่มแกว่งโดยที่อาศัยแรงจากสะโพกผู้ใช้



รูปที่ 1 ระนาบ Sagittal plane ที่เป็นข้อกำหนดการเคลื่อนที่ในการออกแบบกลไกข้อเข่า



รูปที่ 2 การกำหนดเส้นอ้างอิงและมุมของกลไกเข่า

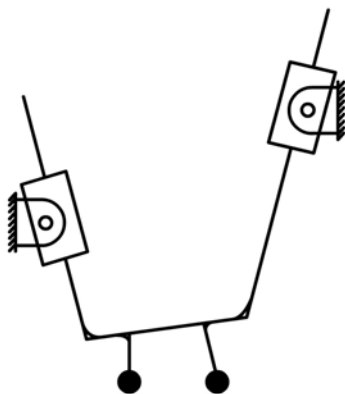


รูปที่ 3 วงจรการเดินของขาใน Stance phase และ Swing phase

ขาเทียมรุ่นเดิมได้ใช้แนวคิดกลไก Four-bar linkage (Inverse offset slider-rocker mechanism) เป็นหลักในการสังเคราะห์กลไกแต่ด้วยแนวคิดนี้ทำให้กลไกมีส่วนประกอบมาก และแต่ละชิ้นยากต่อการขึ้นรูป ดังรูปที่ 4 ดังนั้นจึงปรับปรุงแบบของกลไกโดยเปลี่ยน Revolute joint บางตำแหน่งให้กลายเป็น Prismatic joint แทน [4] ซึ่งจะได้กลไกแบบใหม่ที่มี Kinematic diagram ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 กลไกเขารุ่นเดิมของทีมีวิจัย [2]



รูปที่ 5 Kinematic diagram ของกลไกรุ่นใหม่

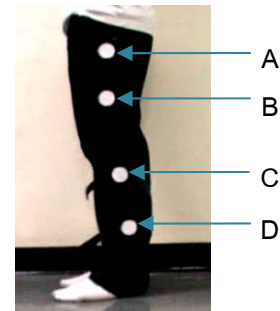
3. ขั้นตอนในการออกแบบกลไกเข่า

ในการออกแบบกลไกเข่าเริ่มต้นจากการหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดบนขาที่อ่อนล่างสัมผัสกับจุดบนขาที่อ่อนบน เพื่อใช้อ้างอิงเป็นการเคลื่อนไหวที่เลียนแบบธรรมชาติ หลังจากนั้นจึงออกแบบกลไกที่มีเส้นทางการเคลื่อนที่เหมือนกับเส้นทางที่ได้ดังกล่าวแล้วนำแบบกลไกที่เป็นแบบโครงร่าง (Kinematic diagram) มาออกแบบเพื่อใช้งาน (Detail design) เมื่อได้กลไกที่สมบูรณ์แล้วในส่วนของการทดสอบจึงนำกลไกนี้ไปตรวจสอบเสถียรภาพของกลไกในการใช้งานจริง คือให้อาสาสมัครทดลองใช้เดิน ว่ากลไกมี

เสถียรภาพตาม Gait cycle หรือไม่ โดยแต่ละขั้นตอนจะมีรายละเอียดดังนี้

3.1. การหาข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของขา

การหาข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ที่สามารถหามาได้โดย นำจุดอ้างอิงทั้ง 4 จุดไปติดที่ตำแหน่งของขาจริงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตำแหน่งจุดอ้างอิงที่ใช้หาเส้นทางการเคลื่อนที่ให้อาสาสมัครเดินตามธรรมชาติและยืดข้อเข่าในขณะยืนตรงดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



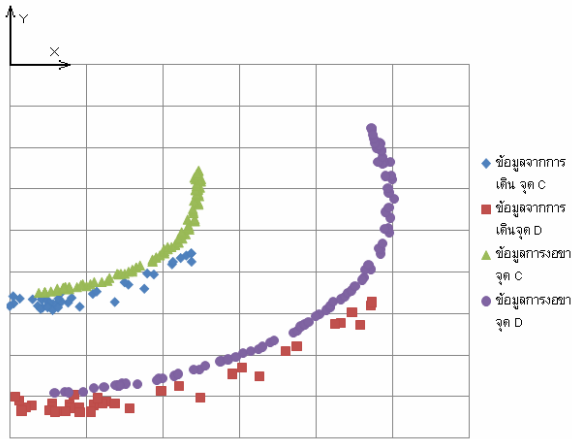
รูปที่ 7 เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่โดยให้อาสาสมัครเดินตามธรรมชาติ



รูปที่ 8 เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่โดยให้อาสาสมัครยืนตรงแล้วงอเข่าจนสุด

ทำการถ่ายภาพวิดีโอแล้วนำไปประมวลผลภาพ (Image processing) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการนำพิกัดจุดของแต่ละจุดอ้างอิงออกมาเป็นข้อมูลในการเคลื่อนที่แล้วนำมาสร้างเป็นกราฟในระนาบ X-Y โดยมีจุดกำเนิด (Origin) อยู่ที่จุด A ในรูป

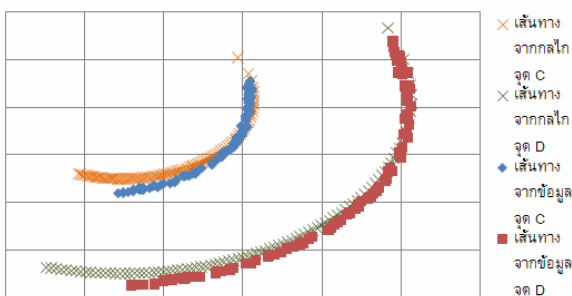
ที่ 6 จะได้กราฟซึ่งเป็นข้อมูลของอาสาสมัคร 1 คน
ดังที่ใช้ในขั้นตอนการออกแบบต่อไปดังรูปที่ 9 แล้ว
เก็บข้อมูลเพิ่มจนได้ข้อมูลครบ 20 ข้อมูลเพื่อนำไปหา
ค่าเฉลี่ยสำหรับใช้ในการออกแบบต่อไป



รูปที่ 9 ตัวอย่างข้อมูลการเคลื่อนที่ได้จากการทำ
Image processing ทั้งการเดินและการยืนนิ่งขา

3.2. การหาแบบโครงสร้าง (Kinematic diagram)

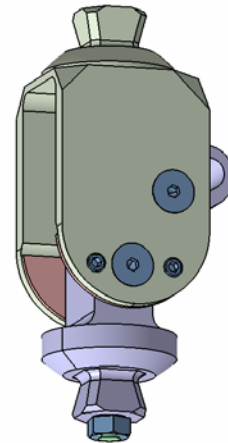
จากข้อมูลการเคลื่อนที่ได้มาจากหัวข้อที่แล้วจึง
สร้างแบบโครงสร้างของกลไกโดยกำหนดตัวแปรที่
สำคัญ เช่น ความยาวของก้านกลไก (Link length)
ตำแหน่งของจุดอ้างอิง (Ground link position) และ
มุมการวางตัวของช่องเคลื่อนที่ (Slot orientation
angle) เป็นต้น ในการทำ Optimization ให้กลไกมี
เส้นทางการเคลื่อนที่คล้ายกับข้อมูลมากที่สุด โดยที่
องศาการงอเข้าเดียวกันใช้หลักการเปรียบเทียบความ
ใกล้เคียงกันของข้อมูลตำแหน่งจุด C และจุด D ด้วย
หลักของ Sum of least-square error ของทุกองศา
การงอเข้า โดยเมื่อทำการ Optimize [5,6] แล้วจะได้
ลักษณะของเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของกลไก
เปรียบเทียบกับข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของเข้า

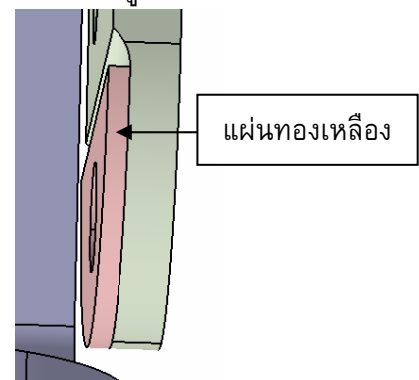
3.3. การออกแบบแบบใช้งาน (Detail design)

เมื่อได้ Kinematic diagram ของกลไกมาแล้วจึง
ออกแบบ Detail design เพื่อใช้งานต่อไป โดยยึดหลัก
ให้แต่ละชิ้นส่วนที่ผลิตสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความ
แข็งแรง ขนาดกะทัดรัด ประกอบและซ่อมแซมได้ง่าย
ซึ่งเมื่อออกแบบแล้วจะได้ลักษณะของ Detail design
ออกมาเป็นดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 Detail design ที่สอดคล้องกับหลักการที่ได้
กำหนดไว้

สำหรับวัสดุที่ใช้ในส่วนประกอบโครงสร้างหลักของ
กลไกได้ใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)
เนื่องจากสามารถหาได้โดยทั่วไป ราคาไม่สูง มีค่า
Tensile yield strength สูง และสามารถทนทานต่อ
ความเสียหายเนื่องจากความล้าได้ สำหรับการป้องกัน
การเสียดสีกันของ Stainless steel ที่บริเวณผิว
ด้านข้างของ Slot joint ดังรูปที่ 12 ได้เลือกใช้แผ่น
ทองเหลืองในการช่วยรองรับการสึกหรอและปรับ
ความหน่วงของกลไกตามที่ใช้แต่ละคนต้องการ

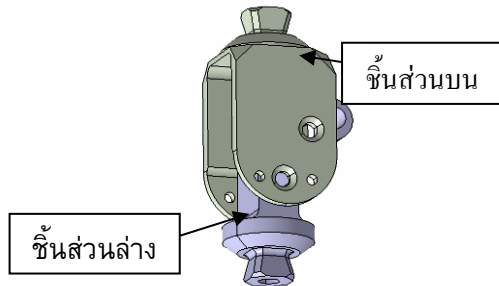


รูปที่ 12 ตำแหน่งของแผ่นทองเหลืองในกลไก

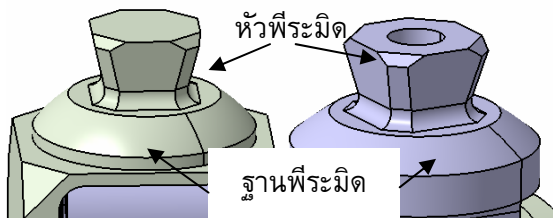
4. ส่วนประกอบต่างๆของกลไก

4.1. ส่วนประกอบโครงสร้างของกลไก

ส่วนประกอบของโครงสร้างประกอบด้วย 2 ชั้นส่วนด้วยกันคือ ชั้นส่วนบน ชั้นส่วนล่าง โดยแต่ละชั้นส่วนเมื่อประกอบกันมีตำแหน่งดังรูปที่ 13

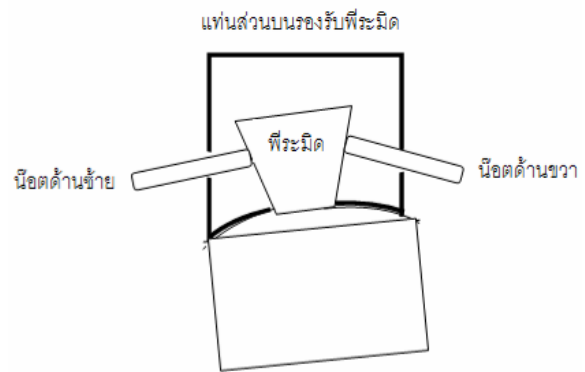


รูปที่ 13 ชั้นส่วนโครงสร้างหลักของกลไก
ชั้นส่วนบนจะติดอยู่กับเบ้าขาเทียมซึ่งหากพิจารณาเปรียบเทียบกับ Kinematic diagram ที่ได้ ออกแบบไว้ก่อนหน้านี้ ชั้นส่วนนี้จะทำหน้าที่เสมือนเป็น Ground linkage ให้กับกลไกและจะมีชั้นส่วนล่างที่คอยเคลื่อนที่ในขณะที่กลไกทำงานโดยชั้นส่วนล่างนี้จะติดอยู่กับส่วนหน้าแข้งของขาเทียม



รูปที่ 14 ฟิระมิดที่ติดอยู่กับชั้นส่วนบนและชั้นส่วนล่างของกลไก

สำหรับฟิระมิดบนและฟิระมิดล่างซึ่งเป็นชั้นส่วนที่ต้องนำไปประกอบกับเบ้าขาเทียมและส่วนหน้าแข้งตามลำดับ มีความจำเป็นที่จะต้องสามารถปรับแนว Alignment ของขาเทียมในผู้ในแต่ละคนได้ง่าย และหากปรับแนว Alignment ไม่เหมาะสม จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของขาเทียมทั้งขณะยืนและขณะเดิน รูปร่างที่ได้ออกแบบไว้เป็นรูปร่างมาตรฐานที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือมีลักษณะรูปร่างคล้ายฟิระมิด ดังรูปที่ 14 และจะประกอบและปรับ Alignment เข้ากับฐานที่เบ้าขาเทียมซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นฐานของฟิระมิดและขันยึดด้วย Set screw ดังรูปที่ 15



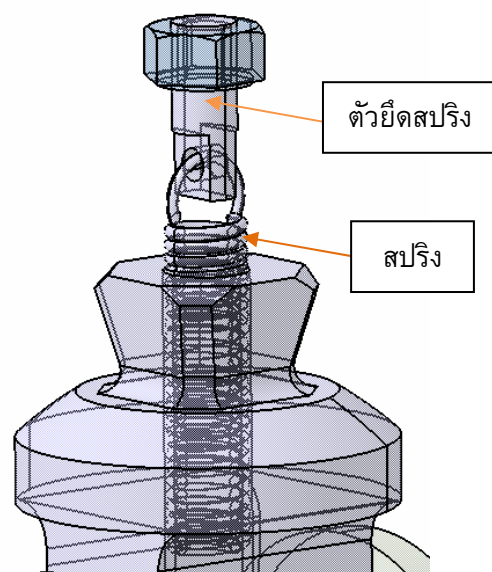
รูปที่ 15 ชั้นส่วนฟิระมิดเมื่อนำไปใช้งาน

4.2. ส่วนประกอบอื่นๆที่สำคัญในกลไก

สำหรับชั้นส่วนที่จำเป็นนอกเหนือจากชั้นส่วนโครงสร้างที่จะช่วยให้กลไกเข้านี้ทำงานได้ได้แก่

- สปริง ทำหน้าที่ให้กลไกติดกลับในจังหวะกลับจาก Swing phase ไปยัง Stance phase โดยสปริงที่ใช้จะเป็น Extension สปริงคือจะหดในจังหวะ Full extension knee angle และยืดตัวในจังหวะ Full flexion knee angle
- ตัวยึดสปริง เป็นตัวยึดให้สปริงติดอยู่กับชั้นล่างของกลไกโดยจะมีนอตคอยกันเอาไว้ และนอตนี้ยังทำหน้าที่ปรับค่าหดตัวเริ่มต้นของสปริงทำให้ผู้ใช้สามารถปรับแรงต้านในจังหวะเริ่มของกลไกเข้าได้

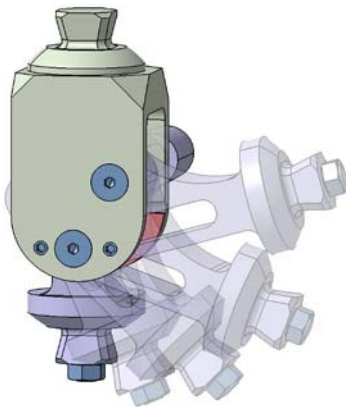
โดยเมื่อประกอบแล้วจะอยู่ในกลไกดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ชั้นส่วนที่ทำงานเป็นส่วนติดกลับของกลไก

5. การทำงานของกลไก

หลังจากที่ประกอบชิ้นส่วนทุกชิ้นแล้วจะได้กลไกเข้าที่สามารถทำงานได้โดยมีมุมของเข่ามากที่สุด (Maximum flexion angle) เท่ากับ 120 องศาหากเทียบกับตอนขายืดตรงเป็นตำแหน่งเริ่มต้น และที่ตำแหน่งต่างๆ กลไกจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 17 เมื่อนำแบบที่ได้ออกแบบไว้ไปสร้างเป็นชิ้นงานก็จะได้กลไกเป็นดังรูปที่ 18



รูปที่ 17 แสดงการเคลื่อนที่ของกลไกเมื่อพับงอ



รูปที่ 18 ชิ้นส่วนกลไกที่ประกอบเข้ากันแล้ว

6. ผลการทดสอบกลไก

กลไกรุ่นใหม่ที่มีข้อต่อแบบมีชิ้นส่วนน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลไกเก่าเมื่อพิจารณาจำนวน Linkage ของกลไกพบว่ากลไกเดิมต้องใช้ Linkage 3 ชิ้นแต่ในกลไกใหม่ใช้ลดลงเหลือ 2 ชิ้น และเมื่อนำกลไกนี้ไปประกอบในขาเทียม แล้วให้อาสาสมัครจากโรงพยาบาลทหารผ่านศึกใช้ทดสอบเดิน ดังรูปที่ 19 ซึ่งพบว่ากลไกเข้าเทียมนี้มีเสถียรภาพดีในทุกจังหวะของการเดิน กล่าวคือกลไกเข้าไม่งอพับในช่วง Stance phase เพราะแรงปฏิกิริยาจากพื้นมีทิศทางผ่านทางด้านหน้าของจุด ICZV [3] และกลไกสามารถดีดกลับไปยังตำแหน่งเดิมเพื่อเริ่มต้นการเดิน

ในจังหวะการก้าวในช่วง Swing phase เนื่องจากมีสปริงคอยช่วยดีดช่วยในจังหวะแกว่งขา

อาสาสมัครมีการฝึกการใส่ขาเทียมที่ออกแบบโดยใช้ราวเกาะในช่วงแรกอยู่เพียงระยะเวลานั้น จากนั้นสามารถเดินได้อย่างเป็นธรรมชาติโดยไม่ต้องใช้ราวเกาะ และไม่มีการยกสะโพกเพื่อที่จะพาขาเทียมให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้า เพราะกลไกเข้าที่ออกแบบมีเส้นทางการเคลื่อนที่เลียนแบบธรรมชาติ



รูปที่ 19 กลไกรุ่นใหม่ขณะนำไปทดสอบใช้งานจริง

กลไกนี้ยังต้องนำไปวิเคราะห์ด้านความแข็งแรงของชิ้นงานที่ออกแบบเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ทนทานตลอดอายุการใช้งาน

7. สรุปผล

กลไกข้อต่อรุ่นใหม่ที่มีข้อต่อแบบและสร้างขึ้นมานั้นใช้ชิ้นส่วนน้อยกว่าเดิม แต่ละชิ้นส่วนผลิตง่ายกว่า และกลไกยังสามารถเลียนแบบการเคลื่อนที่ของธรรมชาติ กลไกที่ได้ออกแบบนี้เมื่อได้นำไปทดสอบเดินจริงกับอาสาสมัคร พบว่าสามารถเดินได้อย่างเป็นธรรมชาติ และมีเสถียรภาพที่ดีในระหว่างการเดิน

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โรงพยาบาลทหารผ่านศึก และ คุณศุภสิน นางรอง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบการเดิน และให้คำปรึกษาแนะนำ และทุนจากมูลนิธิส่งเสริมนวัตกรรมวิศวกรรม สมาคมนิสิตเก่าวิศวกรรมศาสตร์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. เอกสารอ้างอิง

[1] มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี (2552). การค้นคว้าประดิษฐ์ชิ้นส่วนขาเทียม, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา

<http://www.prosthesesfoundation.or.th>

[2] ชัญญาพันธ์ วิรุพหส์ศรี, ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ และ สมพงษ์ เจริญบุญยวิวัฒน์ (2552). *การออกแบบและผลิตต้นแบบขาเทียมสำหรับผู้พิการขาขาดเหนือเข่า II*, การประชุมสัมมนาเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่

[3] Rose, J. and Gamble, G.J. (1994). *Human Walking*, 2nd edition, ISBN: 0-683-07360-5 Williams & Wilkins, Maryland.

[4] อิทธิพล ปานงาม, และ ประเสริฐ เสริมศรีสุวรรณ, *กลศาสตร์เครื่องจักรกล*.

[5] Erdman, Arthur G. (2001). *Mechanism design : analysis and synthesis*, 4th edition, ISBN: 0-130-40872-7, Prentice Hall, New Jersey.

[6] Soni, A.H. (1974). *Mechanism Synthesis and Analysis*, Scripta Book, Washington.