

การวิเคราะห์พลศาสตร์เพื่อการออกแบบทางกลของหุ่นยนต์ฝึกเดิน Dynamical Analysis for Mechanical Design of Gait Training Robot

ธราพงษ์ กาญจนปาริชาติ และ ระดม พงษ์วุฒิธรรม*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200
*radomp@gmail.com, (66) 53944146 ต่อ 969, (66) 53944145

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ฝึกเดินสำหรับผู้ป่วยที่ได้รับบาดเจ็บทางระบบประสาท (Neurological injuries) หุ่นยนต์นี้ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรู (Ball screw actuator) โดยการศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ทางพลศาสตร์ระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กับแรงขับของตัวขับเคลื่อนในแต่ละก้านต่อ โดยพิจารณาภายใต้สมมติฐานว่าหุ่นยนต์ยึดติดและเคลื่อนที่ไปพร้อมกับผู้ฝึกเดิน จากนั้นทำการเขียนโปรแกรมเพื่อแสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างจุดยึดของตัวขับเคลื่อนกับแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนโดยใช้แบบจำลองที่ได้ ในการทดสอบแบบจำลองใช้วงจรการเดินที่ได้มาจากการประมาณค่าวงจรการเดินมาตรฐานด้วยอนุกรมฟูเรียร์อันดับสี่ และกำหนดความเร็วการเดินที่ความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที และใช้ค่าตัวแปรทางกายภาพของผู้ฝึกเดินค่าเป็นเฉลี่ยของคนปกติที่น้ำหนัก 80 กิโลกรัม

คำหลัก: หุ่นยนต์ฝึกเดิน, ตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรู, ความยาวของวงจรการเดิน, วงจรการเดิน

Abstract

This research is dynamical analyses of a gait training robot for neurological injuries driven by ball screw actuators. A mathematical model was built to represent the relationship between robot movements and the actuators' forces. Robot and patients are assumed to move together. Under this assumption, computer simulations were carried out to show the relationship between the geometries of actuator attached points and the actuators' forces. The gait cycle used in this research was obtained by approximating the standard gait cycle with the 4th order Fourier series. Gait speed was assumed to be 0.6 m/s. All patient physical parameters are the average of those in normal people with the weight of 80 kilograms.

Keywords: Gait training robot, Ball screw actuator, Stride length, Gait cycle.

1. บทนำ

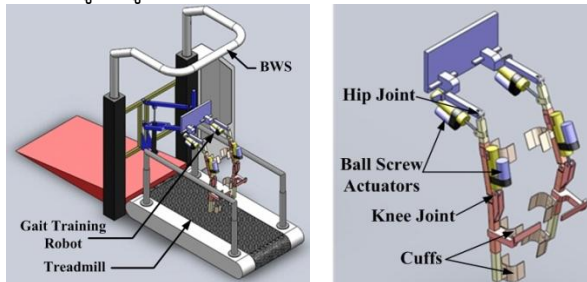
หุ่นยนต์ฝึกเดิน (Gait training robot) เป็นหุ่นยนต์กายภาพบำบัดการเดินสำหรับผู้ป่วยที่ได้รับบาดเจ็บทางระบบประสาท เช่น ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง (Stroke) และผู้ป่วยบาดเจ็บไขสันหลัง (Spinal cord injury) ในปัจจุบัน หุ่นยนต์ฝึกเดินได้รับความนิยมและเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาอย่างกว้างขวาง สำหรับในประเทศไทยเริ่มมีการนำเข้าหุ่นยนต์ฝึกเดิน Lokomat มาเพื่อการศึกษาวิจัยการกายภาพบำบัดการเดินของผู้ป่วย การกายภาพบำบัดด้วยหุ่นยนต์นี้ยังไม่แพร่หลาย

ในประเทศไทย เทคโนโลยีการกายภาพบำบัดนี้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพงมาก อีกทั้งยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบและการพัฒนาหุ่นยนต์ประเภทนี้เกิดขึ้นในประเทศไทย

2. ระบบและโครงสร้างของหุ่นยนต์ฝึกเดินโดยทั่วไป

ระบบของหุ่นยนต์ฝึกเดิน [1] มีส่วนประกอบหลักคือ หุ่นยนต์ฝึกเดิน สายพาน (Treadmill) และอุปกรณ์รองรับน้ำหนัก (Body weight support; BWS) ของผู้ฝึกเดิน ดังรูปที่ 1(ก) หุ่นยนต์ฝึกเดินมีลักษณะเป็นอุปกรณ์

ช่วยพยุงแนบติดกับขาทั้ง 2 ข้าง ที่ขาแต่ละข้างมี 2 ข้อต่อ ซึ่งในแต่ละข้อต่อขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรู ดังรูปที่ 1(ข)

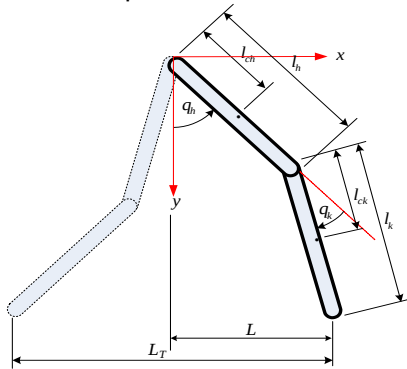


(ก) ระบบของหุ่นยนต์ฝึกเดิน (ข) ส่วนประกอบหุ่นยนต์รูปที่ 1 ระบบและส่วนประกอบของหุ่นยนต์ฝึกเดิน

3. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการติดตั้งตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรูใช้การวิเคราะห์พลศาสตร์ในการพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งหัวและท้ายของตัวขับเคลื่อน สำหรับวงจรการเดินของการเดินปกติ ซึ่งมีหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกันทางกายภาพ คณิตศาสตร์ และกลศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ฝึกเดิน



รูปที่ 2 แบบจำลองของหุ่นยนต์ฝึกเดิน

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของขาหุ่นยนต์กับขาผู้ฝึกเดินทั้งท่อนบนและล่างแนบติดไปด้วยกัน ทิศทางของมุมข้อต่อสะโพกและเข่า (q_h และ q_k) ที่มีค่ามุมเป็นบวก ดังรูปที่ 2 กำหนดให้ $q = [q_h, q_k]^T$ เป็นเวกเตอร์ของมุมข้อต่อ และ $\tau = [\tau_h, \tau_k]^T$ เป็นเวกเตอร์แรงบิด ดังนั้นสมการพลศาสตร์ของขาหุ่นยนต์แต่ละข้างเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + f(q) = \tau \quad (1)$$

$$\text{โดยที่ } M(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}$$

และ $f(q) = [f_1, f_2]^T$ ซึ่งสมาชิกของเมทริกและเวกเตอร์ดังกล่าวมีดังนี้

$$m_{11} = m_h l_{ck}^2 + m_k (l_h^2 + l_{ck}^2 + 2l_h l_{ck} \cos q_k)$$

$$m_{12} = m_{21} = -m_k (l_{ck}^2 + l_h l_{ck} \cos q_k) - I_k$$

$$m_{22} = m_k l_{ck}^2 + I_k$$

$$c_{11} = -m_k l_h l_{ck} \dot{q}_k \sin q_k$$

$$c_{12} = m_k l_h l_{ck} (\dot{q}_k - \dot{q}_h) \sin q_k$$

$$c_{21} = m_k l_h l_{ck} \dot{q}_h \sin q_k$$

$$c_{22} = 0$$

$$f_1 = m_h g l_{ch} \sin q_h + m_k g (l_h \sin q_h - l_{ck} \sin(q_h - q_k))$$

$$f_2 = m_k g l_{ck} \sin(q_h - q_k)$$

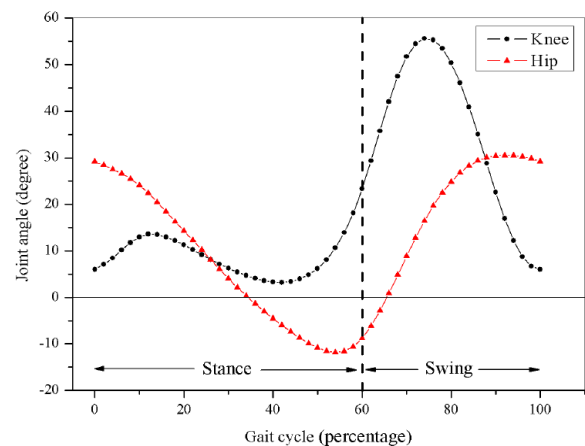
โดยที่ m_h และ m_k เป็นมวลของขาท่อนบนและล่าง l_h และ l_k เป็นความยาวของขาท่อนบนและล่าง l_{ch} เป็นความยาวที่วัดจากข้อต่อสะโพกถึงจุดศูนย์กลางมวลของขาท่อนบน l_{ck} เป็นความยาวที่วัดจากข้อต่อเข่าถึงจุดศูนย์กลางมวลของขาท่อนล่าง I_h และ I_k เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของขาท่อนบนและล่าง และ g เป็นค่าแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 9.81 N/m^2

3.2 ความยาวของวงจรการเดิน (Stride length)

เมื่อพิจารณาดังรูปที่ 2 ความยาวของขาท่อนบนและล่างตามแนวราบมีความสัมพันธ์กับมุมข้อต่อสะโพกและเข่าเป็น

$$L = l_h \sin(q_h) + l_k \sin(q_h - q_k) \quad (2)$$

โดยที่ L เป็นความยาวของขาตามแนวราบ

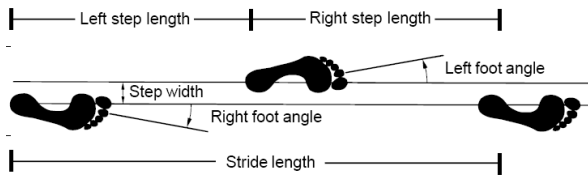


รูปที่ 3 การเคลื่อนที่ของมุมข้อต่อสะโพกและเข่าในการเดินหนึ่งรอบ [2]

จากรูปที่ 3 ช่วงที่เริ่ม Stance phase มุมข้อต่อสะโพก เท่ากับ 30° และมุมข้อต่อเข่า เท่ากับ 5° ส่วนช่วงเริ่ม Swing phase มุมข้อต่อสะโพก เท่ากับ -10° และมุมข้อต่อเข่า เท่ากับ 24° ดังนั้น จากสมการ (2) ความยาวในช่วงเริ่ม Stance phase L_{st} และ Swing phase L_{sw} มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$L_{st} = l_h \sin(30^\circ) + l_k \sin(30^\circ - 5^\circ) \quad (3)$$

$$L_{sw} = l_h \sin(-10^\circ) + l_k \sin(-10^\circ - 24^\circ) \quad (4)$$



รูปที่ 4 ความยาวของวงจรการเดิน [3]

จากรูปที่ 4 วงจรการเดินประกอบด้วย การเคลื่อนที่ 2 ช่วง คือ Swing phase และ Stance phase ทั้งขาซ้ายและขวา ดังนั้น ความยาวของวงจรการเดิน L_T จึงเท่ากับสองเท่าของความยาวช่วงเริ่ม Swing phase รวมกับสองเท่าของความยาวช่วงเริ่ม Stance phase ดังนี้

$$\begin{aligned} L_T &= (L_{st} - L_{sw}) + (L_{st} - L_{sw}) \\ &= 2(l_h \sin(30^\circ) + l_k \sin(30^\circ - 5^\circ)) \\ &\quad - 2(l_h \sin(-10^\circ) + l_k \sin(-10^\circ - 24^\circ)) \end{aligned} \quad (5)$$

3.3 ความเร็วการเดินเฉลี่ย

ความเร็วการเดินเฉลี่ย v_{gait} หาได้จากความยาวของวงจรการเดินหารด้วยคาบเวลา นั่นคือ

$$v_{gait} = \frac{L_T}{T_{gait}} \quad (6)$$

โดยที่คาบการเดิน T_{gait} คือ ช่วงเวลาในหนึ่งวงจรการเดิน

3.4 การเคลื่อนที่ของมุมข้อต่อ

จากรูปที่ 4 เป็นกราฟการเคลื่อนที่ของมุมข้อต่อสะโพกและเข่าในหนึ่งวงจรการเดิน เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ใหม่โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์อันดับสี่ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\begin{aligned} q_i(t) &= \frac{180}{\pi} \{ a_{0i} + a_{1i} \cos(\omega t) + b_{1i} \sin(\omega t) \\ &\quad + a_{2i} \cos(2\omega t) + b_{2i} \sin(2\omega t) \\ &\quad + a_{3i} \cos(3\omega t) + b_{3i} \sin(3\omega t) \\ &\quad + a_{4i} \cos(4\omega t) + b_{4i} \sin(4\omega t) \} \end{aligned} \quad (7)$$

โดยที่ตัวห้อย $i = h$ และ k เป็นตัวแปรของข้อต่อสะโพกและเข่า ตามลำดับ และ $\omega = \frac{6.283}{T_{gait}}$ ส่วน

ความเร็วและความเร่งเชิงมุมเป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งและสองของสมการ (7) ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (7) แสดงไว้ในตารางที่ 1

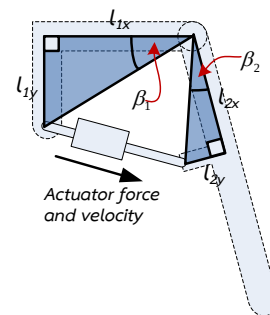
ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของมุมข้อต่อสะโพกและเข่า

ข้อต่อสะโพก	ข้อต่อเข่า
$a_{0h} = 0.1957$	$a_{0k} = 0.3446$
$a_{1h} = 0.3565$	$a_{1k} = 0.0254$
$a_{2h} = -0.04144$	$a_{2k} = -0.2261$
$a_{3h} = -0.006816$	$a_{3k} = -0.0205$
$a_{4h} = 0.002503$	$a_{4k} = -0.008032$
$b_{1h} = -0.05198$	$b_{1k} = -0.3407$
$b_{2h} = -0.04553$	$b_{2k} = 0.05415$
$b_{3h} = 0.01883$	$b_{3k} = 0.06942$
$b_{4h} = -0.003673$	$b_{4k} = -0.0004909$

การเคลื่อนที่ของมุม ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมของข้อต่อสะโพกและเข่า เป็นฟังก์ชันที่กำหนดการเคลื่อนที่ในสมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ฝึกเดิน (1)

3.5 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างความยาวของตัวขับเคลื่อนกับมุมข้อต่อ

ขาหุ่นยนต์แต่ละข้างมีการติดตั้งตัวขับเคลื่อนสำหรับข้อต่อสะโพกและเข่า ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งหัวและท้ายของตัวขับเคลื่อนเกี่ยวข้องกับการส่งกำลังไปยังขาหุ่นยนต์ดังนี้



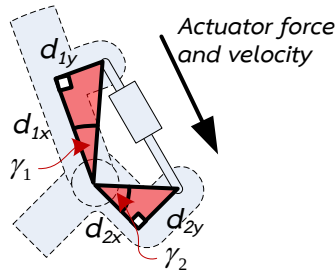
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างการเคลื่อนที่ตัวขับเคลื่อนกับมุมข้อต่อสะโพก

จากรูป 5 ความยาวของตัวขับเคลื่อนที่ข้อต่อสะโพกหาความสัมพันธ์ได้เป็น

$$x_h = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \sin(q_h - \beta_1 - \beta_2)} \quad (8)$$

$$\text{โดยที่ } l_1 = \sqrt{l_{1x}^2 + l_{1y}^2} \quad l_2 = \sqrt{l_{2x}^2 + l_{2y}^2}$$

$$\beta_1 = \tan^{-1}(l_{1y}/l_{1x}) \text{ และ } \beta_2 = \tan^{-1}(l_{2y}/l_{2x})$$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างการเคลื่อนที่
ตัวขับเคลื่อนกับมุมข้อต่อเข้า

จากรูปที่ 6 ความยาวของตัวขับเคลื่อนที่ข้อต่อเข้าหา
ความสัมพันธ์ได้เป็น

$$x_k = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2 \sin(q_k - \gamma_1 - \gamma_2)} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } d_1 = \sqrt{d_{1x}^2 + d_{1y}^2} \quad d_2 = \sqrt{d_{2x}^2 + d_{2y}^2}$$

$$\gamma_1 = \tan^{-1}(d_{1y}/d_{1x}) \quad \text{และ} \quad \gamma_2 = \tan^{-1}(d_{2y}/d_{2x})$$

3.6 แรงขับของตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรู

แรงบิดของข้อต่อสะโพกและเข่าที่คำนวณได้จาก
สมการพลศาสตร์ (1) มีค่าเท่ากับ ผลคูณแบบเวกเตอร์
ของแรงขับของตัวขับเคลื่อนกับระยะจากข้อต่อถึงแนว
แรงจากตัวขับเคลื่อนแต่ละข้อต่อ เมื่อจัดสมการใหม่ให้อยู่
ในรูปความสัมพันธ์ของแรงขับจากตัวขับเคลื่อนแต่ละข้อ
ต่อ ดังนั้น แรงขับของตัวขับเคลื่อนในแต่ละข้อต่อมี
ความสัมพันธ์เป็น

$$F_h = \frac{\tau_h x_h}{l_1 l_2 \cos(q_h - \beta_1 - \beta_2)} \quad (10)$$

$$F_k = \frac{\tau_k x_k}{d_1 d_2 \cos(q_k - \gamma_1 - \gamma_2)} \quad (11)$$

โดย F_h และ F_k เป็นแรงขับของตัวขับเคลื่อนของข้อต่อ
สะโพกและเข่า

4. การวิเคราะห์พลศาสตร์

การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์โดยการจำลองการ
เคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ฝึกเดินที่ความเร็วเฉลี่ย 0.6 m/s
สมมติให้ขาหุ่นยนต์กับขาผู้ฝึกเดินทั้งท่อนบนและล่าง
แนบติดไปด้วยกันตลอดการเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้ขา
หุ่นยนต์ท่อนบนและล่างหนักท่อนละ 5 kg และกำหนด
ค่าตัวแปรทางกายภาพต่างๆของขาท่อนบนและล่างของผู้
ฝึกเดินเป็นของคนปกติที่มีน้ำหนัก 80 kg โดยเทียบ
อัตราส่วนจากข้อมูลของคนปกติ เพศชาย น้ำหนัก 64.9
kg [2]

จากสมการ (5) เมื่อความยาวขาท่อนบน $l_h = 0.46$
m และความยาวขาท่อนล่าง $l_k = 0.43$ m ดังนั้น ความ
ยาวของวงจรรการเดิน $L_T = 1.479$ m และคาบการเดินที่
คำนวณจากสมการ (6) มีค่าเท่ากับ 2.465 วินาที/รอบ
เมื่อได้คาบการเดินแล้ว จะสามารถคำนวณการเคลื่อนที่
ของมุม ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมของข้อต่อ
ตามสมการ (7)

การหาตำแหน่งการติดตั้งหัวและท้ายตัวขับเคลื่อน
ของข้อต่อสะโพกและเข่า โดยพิจารณาความยาวของด้าน
ประกอบมุมฉากของรูปสามเหลี่ยมมุมฉากทั้งสอง นั่นคือ
ความยาว l_{1x} l_{1y} l_{2x} และ l_{2y} สำหรับข้อต่อสะโพก ดัง
รูปที่ 5 และความยาว d_{1x} d_{1y} d_{2x} และ d_{2y} สำหรับ
ข้อต่อเข่า ดังรูป 6 เมื่อ l_{1x} และ d_{1x} เป็นด้านที่ยาวที่สุด

ดังนั้น กำหนดให้อัตราส่วน $r_1 = \frac{l_{1y}}{l_{1x}}$ $r_2 = \frac{l_{2x}}{l_{1x}}$ และ

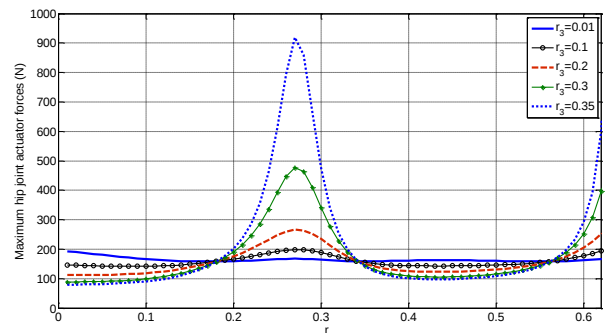
$$r_3 = \frac{l_{2y}}{l_{1x}} \text{ สำหรับข้อต่อสะโพก และอัตราส่วน } r_1 = \frac{d_{1y}}{d_{1x}}$$

$$r_2 = \frac{d_{2x}}{d_{1x}} \text{ และ } r_3 = \frac{d_{2y}}{d_{1x}} \text{ สำหรับข้อต่อเข่า อัตราส่วน}$$

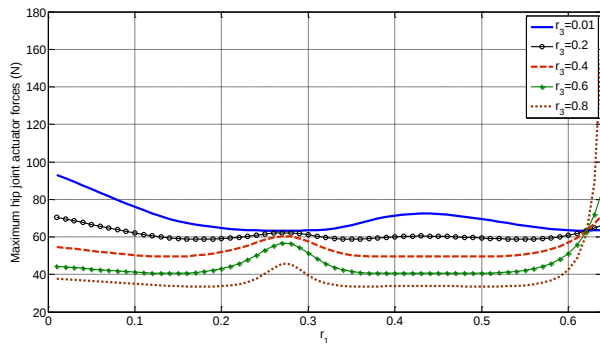
ข้างต้นใช้ในการพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งของตัว
ขับเคลื่อน เพื่อศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแรงขับ
สูงสุดทั้งข้อต่อสะโพกและเข่าตามสมการ (14) และ (15)
ตามลำดับ

4.1 การวิเคราะห์แรงขับสูงสุดที่ข้อต่อสะโพก

รูป 7 และ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับ
สูงสุดที่ข้อต่อสะโพกตามสมการ (14) กับค่า r_1 ในการ
เดินหนึ่งรอบที่ความเร็ว 0.6 m/s ที่ r_3 เป็นค่าต่างๆกัน
โดยกำหนดให้ r_2 เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.2 และ 0.5



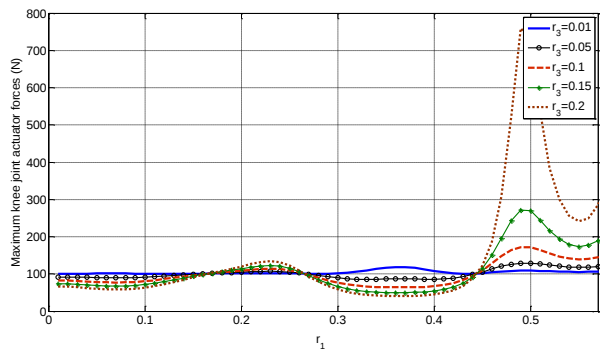
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของแรงขับสูงสุดที่ข้อต่อสะโพกกับ
 r_1 โดยที่ $r_2 = 0.2$



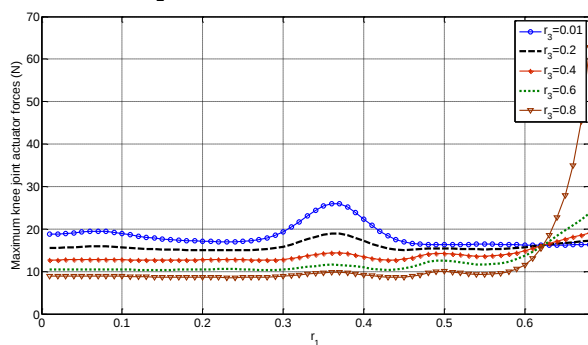
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของแรงขับสูงสุดที่ข้อต่อสะโพกกับ r_1 โดยที่ $r_2 = 0.5$

4.2 การวิเคราะห์แรงขับสูงสุดที่ข้อต่อเข่า

รูป 9 และ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับสูงสุดที่ข้อต่อเข่าตามสมการ (15) กับค่า r_1 ในการเดินหนึ่งรอบที่ความเร็ว 0.6 m/s ที่ r_3 เป็นค่าต่างๆกัน โดยกำหนดให้ r_2 เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.08 และ 0.5



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของแรงขับสูงสุดที่ข้อต่อเข่ากับ r_1 โดยที่ $r_2 = 0.08$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของแรงขับสูงสุดที่ข้อต่อเข่ากับ r_1 โดยที่ $r_2 = 0.5$

จากรูป 7 และ 8 ของข้อต่อสะโพก มีการกำหนดให้ r_2 เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.2 และ 0.5 และจากรูป 9 และ 10 ของข้อต่อเข่า มีการกำหนดให้ r_2 เป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.08 และ 0.5 เมื่อพิจารณาที่แนวเส้นกราฟ r_3 ที่มีค่าเท่ากัน ระดับเส้นกราฟมีระดับลดลงเมื่อ r_2 มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาแรงขับของตัวขับเคลื่อนของข้อต่อสะโพกและเข่า ดังสมการ (10) และ (11) ตามลำดับ ซึ่งมีตัวส่วนเป็นฟังก์ชันโคไซน์ ถ้ามุมภายในฟังก์ชันโคไซน์เข้าใกล้ $\pm 90^\circ$ ฟังก์ชันโคไซน์มีค่าเข้าใกล้ 0 จะทำให้แรงขับมีค่าสูงมาก เนื่องจากการเพิ่ม r_1 และ r_3 เป็นการเพิ่มค่ามุม β_1 และ β_2 สำหรับข้อต่อสะโพก และ γ_1 และ γ_2 สำหรับข้อต่อเข่า ซึ่งทำให้ค่ามุมในฟังก์ชันโคไซน์เข้าใกล้ $\pm 90^\circ$ นั่นเอง

เมื่อ r_2 มีค่าน้อยๆ ความสัมพันธ์ของแรงขับสูงสุดกับ r_1 ดังรูปที่ 7 และ 9 เกิดจุดเปลี่ยนแนวโน้มของความสัมพันธ์เป็นช่วงๆ นั่นคือ จากแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่ลดลงเป็นเพิ่มขึ้น และจากเพิ่มขึ้นเป็นลดลงเป็นช่วงสลับกันไป เมื่อ r_3 มีค่าเพิ่มขึ้น จุดเปลี่ยนแนวโน้มเกิดขึ้นเนื่องจากค่ามุมภายในของฟังก์ชันโคไซน์เข้าใกล้ $\pm 90^\circ$

แต่เมื่อ r_2 มีค่าเพิ่มขึ้นมากพอ ดังรูปที่ 8 และ 10 จุดเปลี่ยนแนวโน้มตรงกลางจะหายไป เนื่องจาก r_2 เพิ่มขึ้นทำให้มุม β_2 และ γ_2 มีค่าลดลง ค่ามุมภายในของฟังก์ชันโคไซน์ไกลจาก $\pm 90^\circ$ มากพอที่ทำให้จุดเปลี่ยนหายไป ซึ่งความสัมพันธ์แรงขับสูงสุดกับ r_1 มีแนวโน้มลดลงเมื่อ r_3 มีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงจุดเปลี่ยนแนวโน้มด้านขวาสุด ดังรูปที่ 8 และ 10

5. สรุปผล

จากการวิเคราะห์ข้างต้นค่า r_2 ควรมีค่ามาก แต่ในการออกแบบจริง การติดตั้งของตัวขับเคลื่อนที่ข้อต่อสะโพก ดังรูปที่ 5 ขาตอนบนต้องการออกแบบให้ปรับความยาวขาได้ และการติดตั้งของตัวขับเคลื่อนที่ข้อต่อเข่า ดังรูปที่ 6 ข้อต่อที่ยึดส่วนหัวของตัวขับเคลื่อนเป็นส่วนยื่นออกมาจากข้อต่อเข่าและติดอยู่กับขาตอนล่าง ดังนั้น ค่า r_2 จึงเพิ่มค่าได้ไม่มาก เนื่องจากเพิ่มความยาว l_{2x} และ d_{2x} ได้จำกัด

เมื่อพิจารณาแรงขับของตัวขับเคลื่อนของข้อต่อสะโพกและเข่าตามสมการ (10) และ (11) มีตัวส่วนเป็นฟังก์ชันโคไซน์ การออกแบบจึงควรเลี่ยงไม่ให้มุมภายในของฟังก์ชันโคไซน์เข้าใกล้ $\pm 90^\circ$ เพราะค่าเมื่อค่าเข้าใกล้ $\pm 90^\circ$ จะทำให้แรงขับสูงสุดมีค่าสูงมาก

การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแรงขับสูงสุดของตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรูที่ตำแหน่งการติดตั้งใดๆ เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาในการออกแบบหุ่นยนต์ฝึก

เดิน ซึ่งจะใช้พิจารณาร่วมกับความเร็วสูงสุด และช่วงการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อน (Actuator stroke) แรงขับสูงสุดและความเร็วสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบการส่งกำลังของตัวขับเคลื่อน (เช่น อัตราทดของ Timing belt และขนาดของมอเตอร์กระแสตรง) ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Colombo, G., Joerg, M., Schreier, R. and Dietz, V. (2000). Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 37(6), November/December 2000, pp. 693–700.
- [2] Wang, Q., Qian, J., Zhang, Y., Shen, L., Zhang, Z., Feng, Z., and Tao, Z. (2008). Preliminary Experiments on Physiological Gait Movement of the Powered Gait Orthosis, *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Shanghai, China.
- [3] Vaughan, C., Davis, B. and O'Connor, J. (1999). *Dynamics of human gait*, 2nd edition, Kiboho Publishers, South Africa.