

รายงาน

เรื่อง

กลไกการเคลื่อนที่ของขาingg้าบาซิลิสก์

เสนอ

รศ.ดร.รัชทิน จันทรเจริญ

รศ.ดร.นภดน้อย อาชวาคม

จัดทำโดย

นายณัฐกมล	พงศ์เต็มสุข	รหัสนิสิต 5930159321
นางสาวนันท์ชพร	นันทปิยวรรณ	รหัสนิสิต 5930281121
นายสุเจตน์	โพดาพล	รหัสนิสิต 5930537921

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา 2103322 MECH MACHINERY

ภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา2561

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

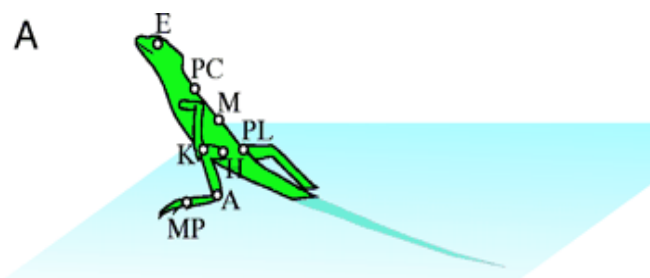
Part 1 : Introduction and Data preparation	2
– Description	2
– Design parameter	3
– Reference data	4
– Calculation part	5
– Data plot	10
Part 2 : 1st Simscape run for reference	11
– Matlab script	11
– Simscape multibody model	14
Part 3 : 2nd Simscape run for optimization	15
– Matlab script	15
– Optimization result	17
Part 4 : Conclusion	18
– Conclusion	18
– Problem and Solution	18

Part 1 : Introduction and Data preparation

Description

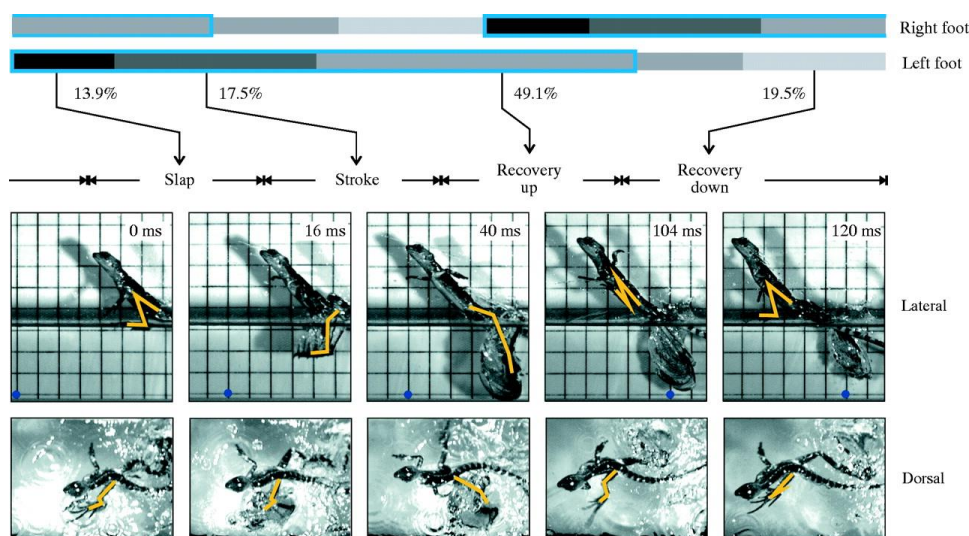
กิ้งก่าบาซิลิสก์(Basilisk Lizard)

รายงานฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของกิ้งก่าบาซิลิสก์ ซึ่งจะนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงกลไกที่จำลองมาจากการเคลื่อนที่ดังกล่าว โดยในการศึกษารังนี้จะสนใจเฉพาะกลไกการเคลื่อนที่ของขาหลังด้านซ้ายของกิ้งก่าบาซิลิสก์ ซึ่งถูกใช้ในการวิ่งเหนือผิวน้ำ ดังรูปที่ 1 จุด 4 จุดได้แก่จุด H, K, A, MP ใช้แทนข้อต่อ(joint)ของกลไก



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่จริงและแผนภาพคิเนแมติกจำลองการเคลื่อนที่ของกิ้งก่าบาซิลิสก์

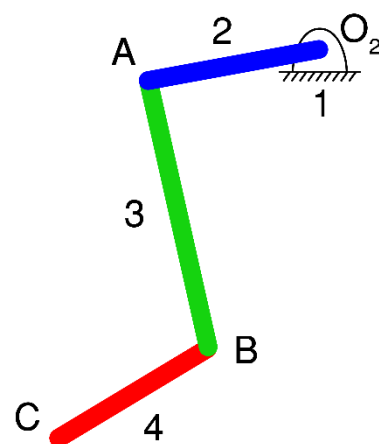
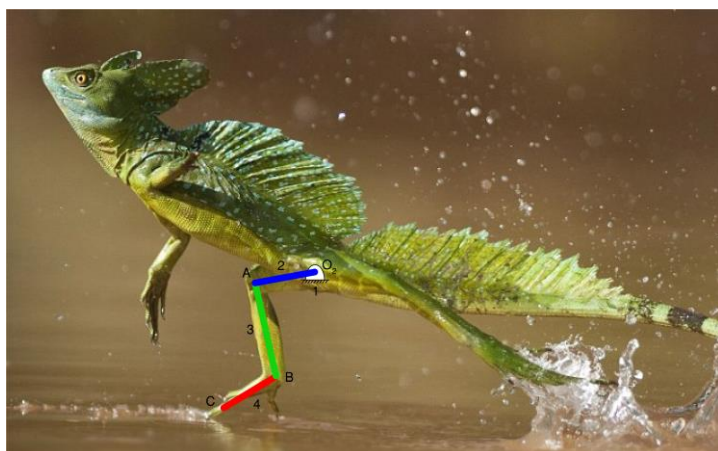
กิ้งก่าบาซิลิสก์นั้นมีการเคลื่อนที่ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว นั่นก็คือการวิ่งเหนือผิวน้ำ ซึ่งในการก้าวแต่ละครั้งจะมีลักษณะเหมือนการตะกุกน้ำไปข้างหน้า เริ่มจากจังหวะที่เท้าสัมผัสกับผิวน้ำ จากนั้นเท้าจะกดลงไปใต้น้ำโดยมีทิศทางเฉียงไปทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของลำตัว โดยใช้เท้าซึ่งทำหน้าที่คล้ายใบพายกวาดลงไปใต้น้ำเพื่อดันให้ตัวเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ก่อนจะยกเท้ากลับขึ้นมาเหนือผิวน้ำและหมุนกลับมาแตะกับผิวน้ำอีกครั้ง นับเป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเคลื่อนที่ของขาหลังของกิ้งก่าบาซิลิสก์ 1 รอบการเคลื่อนที่

Design parameter

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ขาหลังของกิ้งก่าบาซิลิสก์ จะสามารถเขียนเป็น kinematic diagram ได้โดยสามารถพิจารณาได้เป็น 4 link (รวม ground) และ 3 revolute joint ดังนี้ โดย assume ให้ hip เป็น ground



รูปที่ 3 kinematic diagram ของขาหลังของกิ้งก่าบาซิลิสก์

Parameter ทั้งหมดในการเคลื่อนที่ของกิ้งก่ามีดังนี้

l_1 = ความยาวของ link 2 [cm]

l_2 = ความยาวของ link 3 [cm]

l_3 = ความยาวของ link 4 [cm]

m_1 = มวลของ link 2 [g]

m_2 = มวลของ link 3 [g]

m_3 = มวลของ link 4 [g]

τ_{hip} = แรงบิดที่ใส่ที่ joint O_2 [Ncm]

τ_{knee} = แรงบิดที่ใส่ที่ joint A [Ncm]

τ_{ankle} = แรงบิดที่ใส่ที่ joint B [Ncm]

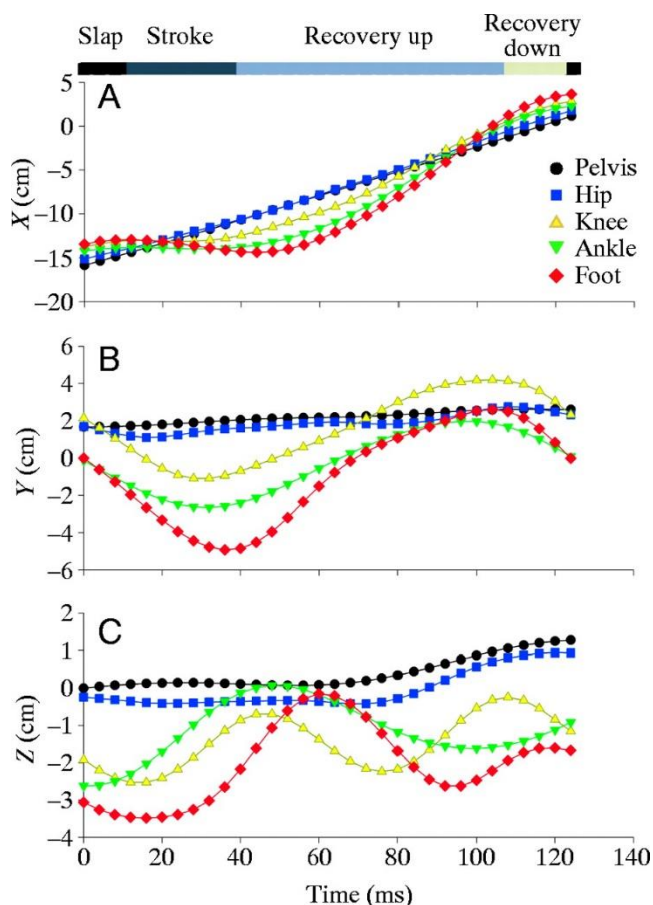
f_{hip} = แรงเสียดทานที่ joint O_2 [N]

f_{knee} = แรงเสียดทานที่ joint A [N]

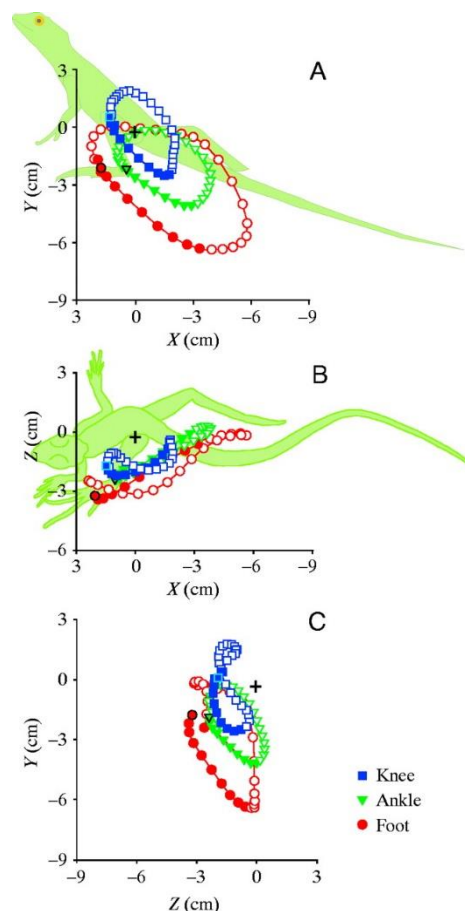
f_{ankle} = แรงเสียดทานที่ joint B [N]

ในการศึกษาครั้งนี้เราสนใจเพียงแต่ kinetics ของระบบ และการเคลื่อนที่ของจุด C ให้เป็นไปตาม trajectory ที่เราต้องการ ดังนั้นจึงเลือก design parameters เพื่อการ optimize คือ l_1, l_2, l_3

Reference data



กราฟที่ 1 แสดงถึงตำแหน่งของจุด pelvis, hip, knee, ankle, foot ตามแนวแกน x, y, z ตามลำดับ ณ เวลาต่างๆ



กราฟที่ 2 แสดงถึงตำแหน่งของจุด knee, ankle, foot เมื่อเทียบกับตำแหน่งของ hip ในระนาบ xy, xz, yz ตามลำดับ ในลักษณะวงปิด

อัตราส่วนความยาวขา

อัตราส่วนความยาวขาที่อ่อนบน (Femur) : ความยาวขาที่อ่อนล่าง (Tibia) : ความยาวเท้า (Foot) : ความยาวขาหลังทั้งหมด (the total hindlimb length) มีค่าเท่ากับ 0.283 : 0.275 : 0.442 : 1 โดยมีความยาวทั้งหมดเป็น 7.984803 cm ดังนั้นจะได้ $l_1 = 2.1958 \text{ cm}$, $l_2 = 2.2597 \text{ cm}$, $l_3 = 3.5293 \text{ cm}$

Source : <http://jeb.biologists.org/content/206/23/4363>

Calculation part

Bottom line xy

```
p=polyfit(x,y,13);

x1=linspace(-2.3,5.65);

y1=polyval(p,x1);

figure

plot(x,y,'o')

hold on

plot(x1,y1)

xlabel('Position x [cm]');

ylabel('Position y [cm]');

title('Trajectory x-y');
```

p =

Columns 1 through 7

0.0000 0.0000 -0.0001 0.0007 -0.0026 -0.0001 0.0264

Columns 8 through 14

-0.0468 -0.0681 0.2119 0.0196 -0.1846 -0.9420 -4.2006

ได้สมการเส้น xy (เส้นล่าง) คือ $y(x) = -0.0001x^{11} + 0.0007x^{10} - 0.0026x^9 - 0.0001x^8 + 0.0264x^7 - 0.0468x^6 - 0.0681x^5 + 0.2119x^4 + 0.0196x^3 - 0.1846x^2 - 0.9420x - 4.2006$

Upper line xy

```
p1=polyfit(x2,y2,11);
```

```
x3=linspace(-2.3,5.65);
```

```
y3=polyval(p1,x3);
```

```
hold on;
```

```
plot(x2,y2,'o')
```

```
hold on;
```

```
plot(x3,y3)
```

```
hold off
```

p1 =

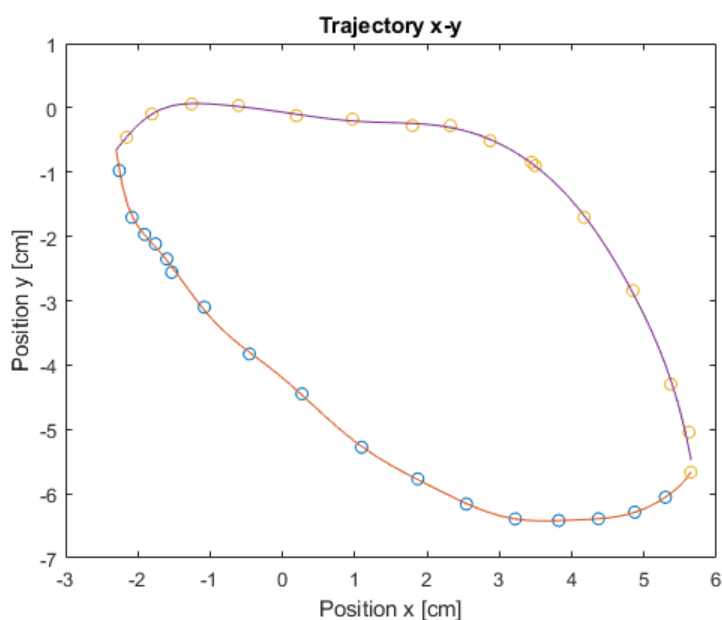
Columns 1 through 7

-0.0000 0.0001 -0.0003 0.0003 0.0036 -0.0093 -0.0068

Columns 8 through 12

0.0208 0.0344 -0.0172 -0.1642 -0.0681

ได้สมการเส้นxy(เส้นบน) คือ $y(x) = 0.0001x^{10} - 0.0003x^9 + 0.0003x^8 + 0.0036x^7 - 0.0093x^6 - 0.0068x^5 + 0.0208x^4 + 0.0344x^3 - 0.0172x^2 - 0.1642x - 0.0681$



กราฟที่3 แสดงถึงตำแหน่งของจุด foot เมื่อเทียบกับตำแหน่งของ hip ในระนาบ xy ในลักษณะวงปิด

$x(t)$

```
p=polyfit(t1,xt,10);
```

```
T1=linspace(0,124.5);
```

```
xt1=polyval(p,T1);
```

```
figure
```

```
plot(t1,xt,'o')
```

```
hold on
```

```
plot(T1,xt1)
```

```
xlabel('Time [ms]');
```

```
ylabel('Position x [cm]');
```

```
title('Velocity in x axis');
```

p =

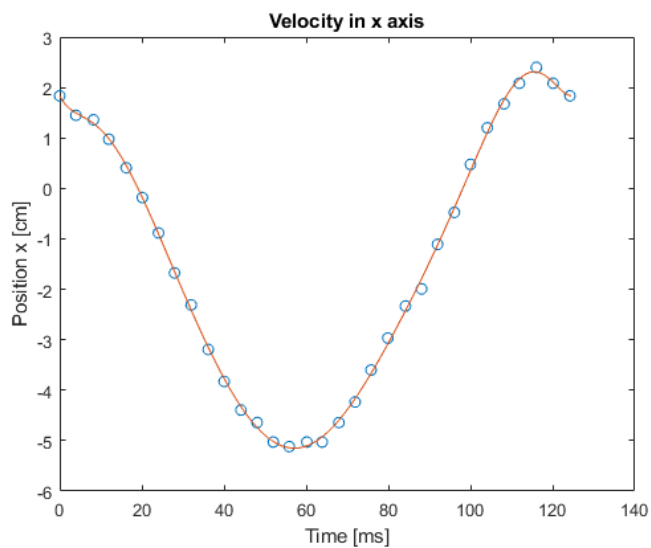
Columns 1 through 7

```
0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0000 0.0001
```

Columns 8 through 11

```
-0.0026 0.0245 -0.1467 1.8241
```

ได้สมการเส้น $x(t)$ คือ $x(t) = 0.0001t^4 - 0.0026t^3 + 0.0245t^2 - 0.1467t + 1.8241$



กราฟที่ 4 แสดงถึงตำแหน่งของจุด foot เทียบกับจุด hip ตามแนวแกน x ณ เวลาต่างๆ

$y(t)$

```
p=polyfit(t2,yt,19);
```

```
T2=linspace(0,124.5);
```

```
yt1=polyval(p,T2);
```

```
figure
```

```
plot(t2,yt,'o')
```

```
hold on
```

```
plot(T2,yt1)
```

```
xlabel('Time [ms]');
```

```
ylabel('Position y [cm]');
```

```
title('Velocity in y axis');
```

p =

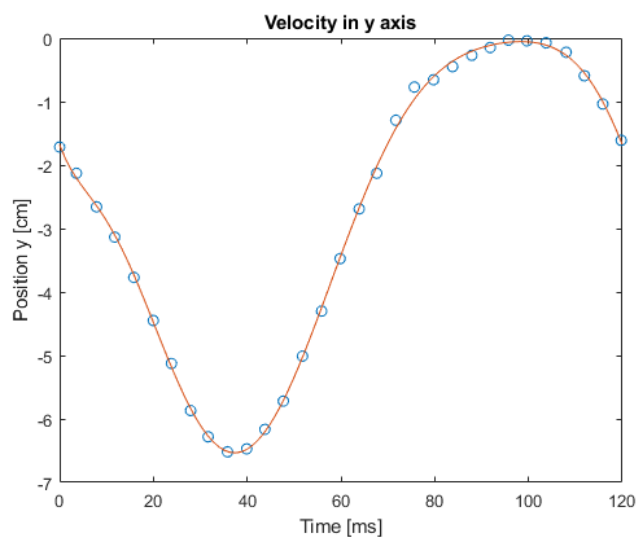
Columns 1 through 7

```
0.0000 -0.0000 0.0000 -0.0000 0.0001 -0.0018 0.0204
```

Columns 8 through 9

```
-0.1991 -1.6819
```

ได้สมการเส้น $y(t)$ คือ $y(t) = 0.0001t^4 - 0.0018t^3 + 0.0204t^2 - 0.1991t - 1.6819$

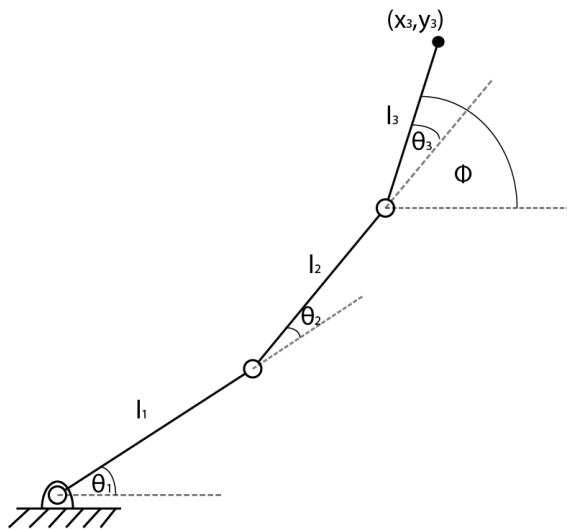


กราฟที่5 แสดงถึงตำแหน่งของจุด foot เทียบกับจุด hip ตามแนวแกน y ณ เวลาต่างๆ

Inverse kinematics

เราทราบค่า x_3, y_3 และ ϕ และ สมมติค่า l_1, l_2 และ l_3 โดยเทียบจากอัตราส่วนความยาวขาที่ได้จาก Reference data แล้วจึงนำมาคำนวณเพื่อหาค่า θ_1, θ_2 และ θ_3 ได้ดังนี้

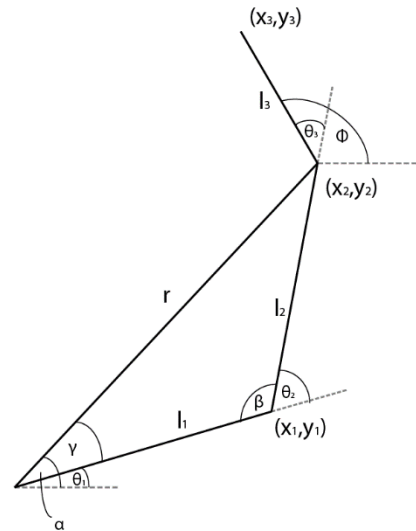
การเคลื่อนที่แบบ Forward



รูปที่4 แสดงตำแหน่งของlinkทั้ง 3

สำหรับการเคลื่อนที่แบบforward

การเคลื่อนที่แบบ Inverse



รูปที่5 แสดงตำแหน่งของlinkทั้ง 3

สำหรับการเคลื่อนที่แบบinverse

โดยจากรูปที่4 และ 5 สามารถเขียนสมการออกมาได้ดังนี้

$$x_2 = x_3 - l_3 \cos(\phi)$$

$$y_2 = y_3 - l_3 \sin(\phi)$$

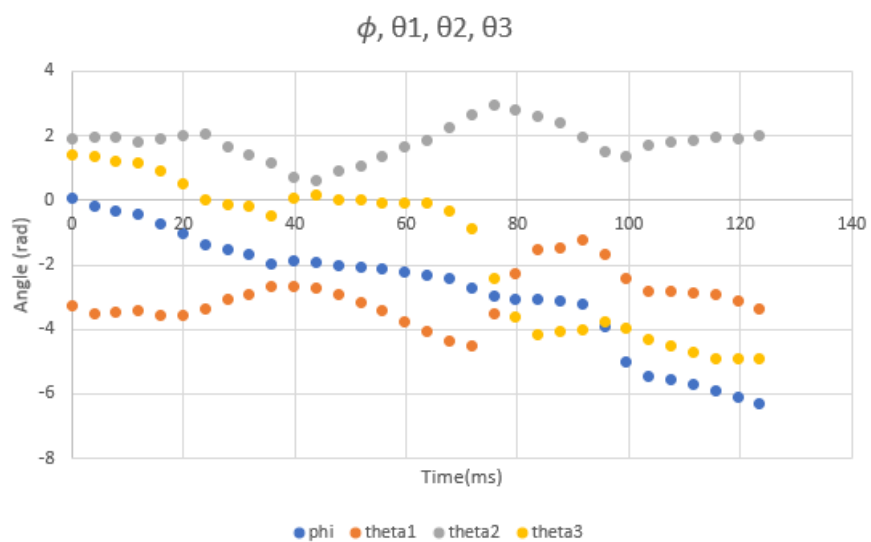
$$r = \sqrt{(x_2)^2 + (y_2)^2}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{y_2}{x_2}\right) - \arccos\left(\frac{(l_1)^2 + r^2 - (l_2)^2}{2l_1 r}\right)$$

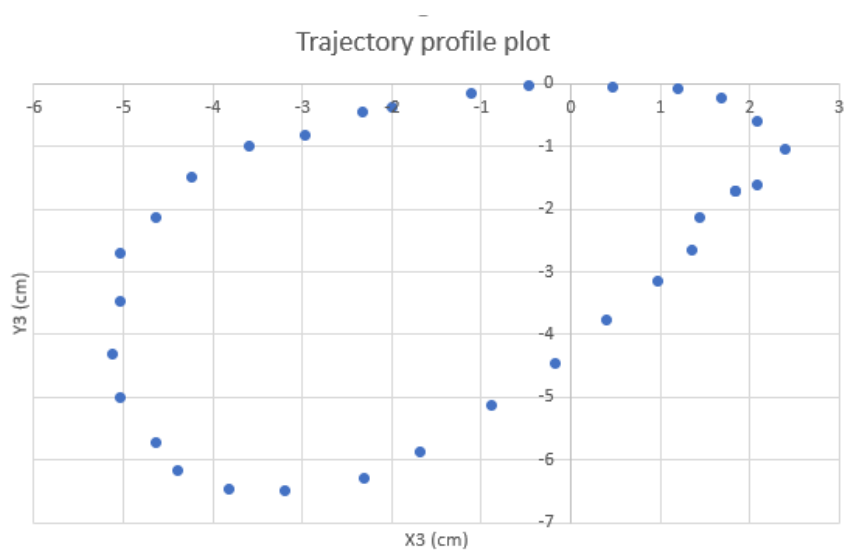
$$\theta_2 = \pi - \arccos\left(\frac{(l_1)^2 + (l_2)^2 - r^2}{2l_1 l_2}\right)$$

$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2$$

Data Plot



กราฟที่ 6 แสดงตำแหน่งของ ϕ, θ_1, θ_2 และ θ_3 ณ เวลาต่างๆใน 1 รอบการเคลื่อนที่



กราฟที่ 7 แสดงถึงตำแหน่งของจุด foot เมื่อเทียบกับตำแหน่งของ hip ในระนาบ xy ในลักษณะวงปิด

Part 2 : 1st Simscape run for reference

Matlab Script

```
clc;
close all;
clear all;
```

Initial parameter

```
L = 7.984803; %leg length[cm]
R = L/200; %cylinder radius[cm]
L1 = 0.275*L; %femur length[cm]
L2 = 0.283*L; %tibia length[cm]
L3 = 0.442*L; %foot length[cm]
clc;
```

Load data

```
load('x3y3phical.mat');
```

Inverse kinematics

```
x2 = 0;
y2 = 0;
theta1 = 0;
theta2 = 0;
theta3 = 0;
for i = 1:32
    x2(i) = x3(i) - L3*cos(phi(i));
    y2(i) = y3(i) - L3*sin(phi(i));
    r = sqrt(x2(i)^2 + y2(i)^2);
    theta1(i) = atan2(y2(i),x2(i)) - acos((L1^2 + r^2 -
    L2^2)/(2*L1*r));
```

```
    theta2(i) = pi - acos((L1^2 + L2^2 -
    r^2)/(2*L1*L2));
    theta1 = unwrap(theta1);
    theta2 = unwrap(theta2);
    theta3(i) = phi(i) - theta1(i) - theta2(i);
    theta3 = unwrap(theta3);
end
theta1 = theta1';
theta2 = theta2';
theta3 = theta3';
```

Input

```
time = linspace(0,10,32);  
th1 = theta1; %pelvis angle[rad]  
th2 = theta2; %knee angle[rad]  
th3 = theta3; %ankle angle[rad]  
th1x=interp1(time,th1,[0:0.00001:10],'spline');  
th2x=interp1(time,th2,[0:0.00001:10],'spline');  
th3x=interp1(time,th3,[0:0.00001:10],'spline');  
timex=linspace(0,10,1000001);
```

Simulation

```
sim('kinematic_test.slx');
```

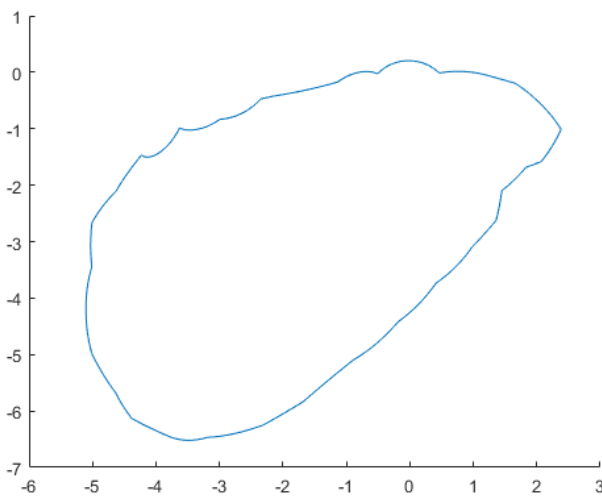
Coupler curve

```
figure('Name','Coupler Curve','NumberTitle','off');  
posx = coupler_curve.Data(:,1);  
posz = coupler_curve.Data(:,2);  
time_coupler = coupler_curve.Time;  
hold on;  
plot(posx,posz);
```

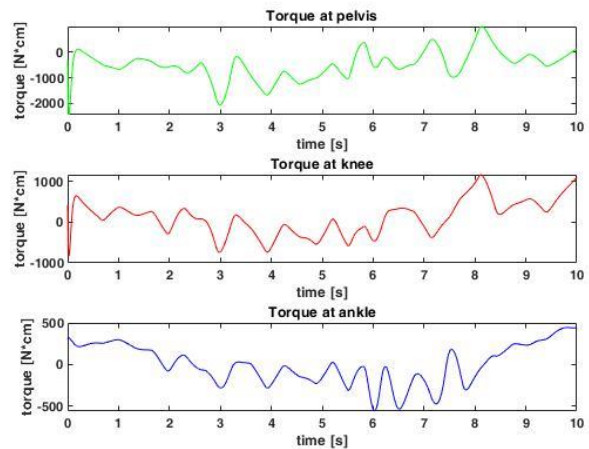
Torque profile

```
torque_pelvis = torqueout.Data(:,1);
torque_knee = torqueout.Data(:,2);
torque_ankle = torqueout.Data(:,3);
time_torque = torqueout.Time;
N = length(time_torque);
torque_pelvis(N) = torque_pelvis(N-1);
torque_knee(N) = torque_knee(N-1);
torque_ankle(N) = torque_ankle(N-1);
figure;
subplot(3,1,1);
plot(time_torque,torque_pelvis);
xlabel('time [s]');
ylabel('torque [N*cm]');
```

```
title(sprintf('Torque at pelvis'));
subplot(3,1,2);
plot(time_torque,torque_knee,'r');
xlabel('time [s]');
ylabel('torque [N*cm]');
title(sprintf('Torque at knee'));
subplot(3,1,3);
plot(time_torque,torque_ankle,'g');
xlabel('time [s]');
ylabel('torque [N*cm]');
title(sprintf('Torque at ankle'));
time2 = time_torque;
```

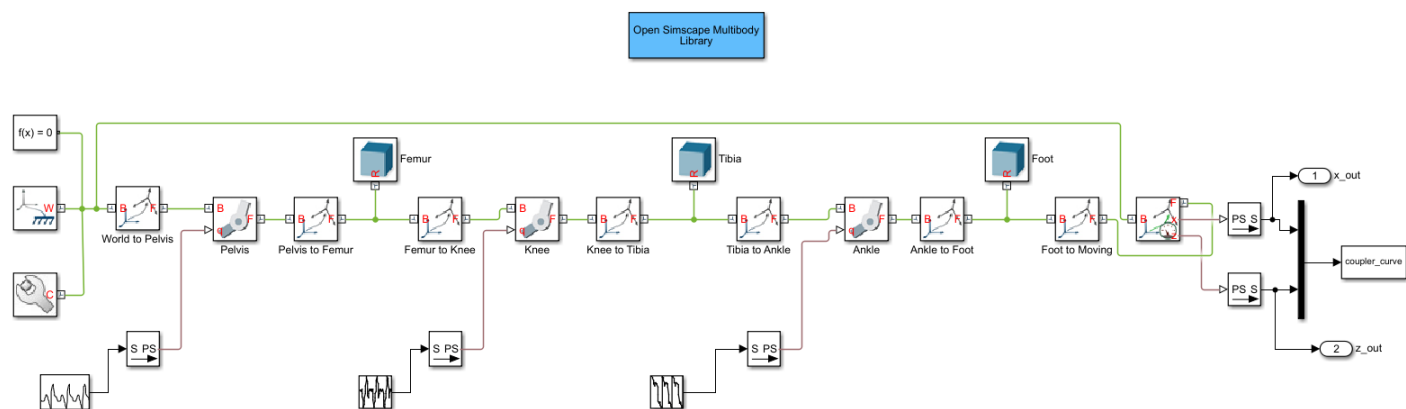


กราฟที่8 แสดงถึงตำแหน่งของจุด foot เมื่อเทียบกับตำแหน่งของ hip
ในระนาบ xy ในลักษณะวงปิด จากการsimulateในsimulink

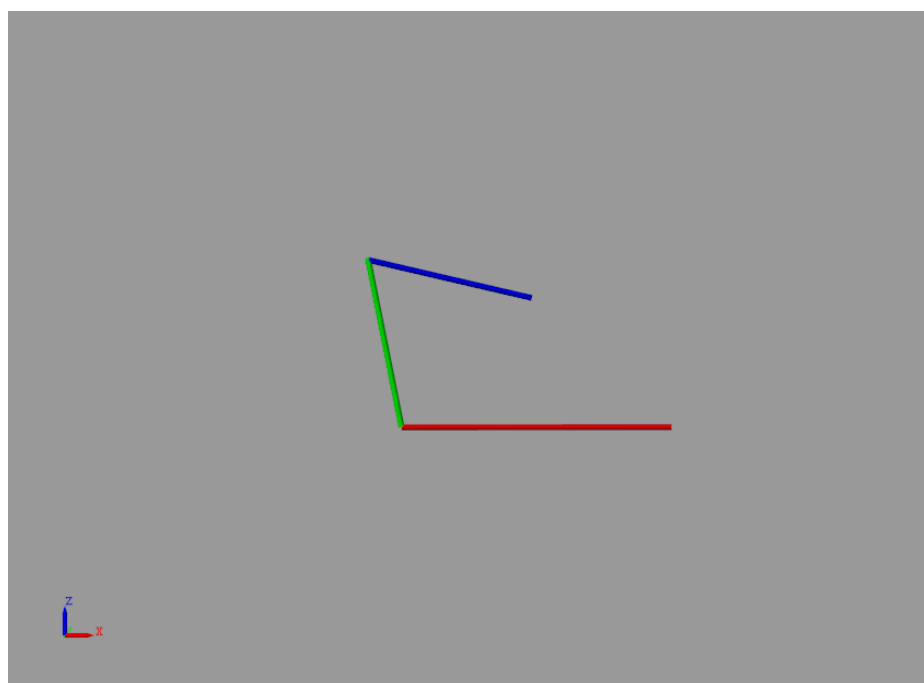


กราฟที่9 แสดงถึงค่า Torque ที่เวลา
ต่างๆที่ pelvis, knee และ ankle

Simscape Multibody Model



รูปที่ 6 แสดง Simscape Multibody Model



รูปที่ 7 แสดงการ simulate Simscape Multibody Model

Part 3 : 2nd Simscape run for optimization

Optimization part

Optimization

```

clc;

close all;

X0 = [2.3 1.85 3]; %initial guess

lower_bound = [1.8, 1.8, 2];

upper_bound = [2.5, 2.5, 4];

objective = @(X)cost(X, [x_ref z_ref]);

options = optimset('Display','iter','TolX',1e-8,

'MaxIter', 50, 'PlotFcns', {'optimplotx',

'optimplotfval' }); % optimplotfval

mdl = 'kinematic.slx';

open(mdl);

figure(101);

set(gcf, 'Position', [1000 200 2560 1280]/2);

plot(x_ref, z_ref, 'LineWidth', 4, 'Color', 'k');

hold on;

xlabel('X [m]');
```

```

ylabel('Z [m]');

title('Parametric Design Optimization for Trajectory

Following Application');

grid on;

set(gca, 'FontSize', 16);

% Solve Optimization Problem

[X_opt, fval] = fmincon(objective, X0, [], [], [], [],

lower_bound, upper_bound,[], options)

L1_opt = X_opt(1);

L2_opt = X_opt(2);

L3_opt = X_opt(3);

% Display Result

disp(sprintf('Optimal Design Parameters\nL1 = %.4f

[cm]\nL2 = %.4f [cm]\nL3 = %.4f [cm]', L1_opt,

L2_opt,L3_opt));
```


Cost function

```
function J = cost(X, XZ_ref)
```

```
    % Given L123;
```

```
    load('profileforopt.mat');
```

```
    Ts = 10/3250;
```

```
    L1 = X(1);
```

```
    L2 = X(2);
```

```
    L3 = X(3);
```

```
    simopt = simset('SrcWorkspace','Current');
```

```
    set_param(gcs,'SimulationCommand','Update');
```

```
    % Update Model
```

```
    [~, ~, Yout] = sim('kinematic.slx', [0:1:3249]*Ts,
```

```
    simopt);
```

```
    x = Yout(:,1);
```

```
    z = Yout(:,2);
```

```
    x_ref = XZ_ref(:,1);
```

```
    z_ref = XZ_ref(:,2);
```

```
    J = sum( (x - x_ref).^2 + (z - z_ref).^2 );
```

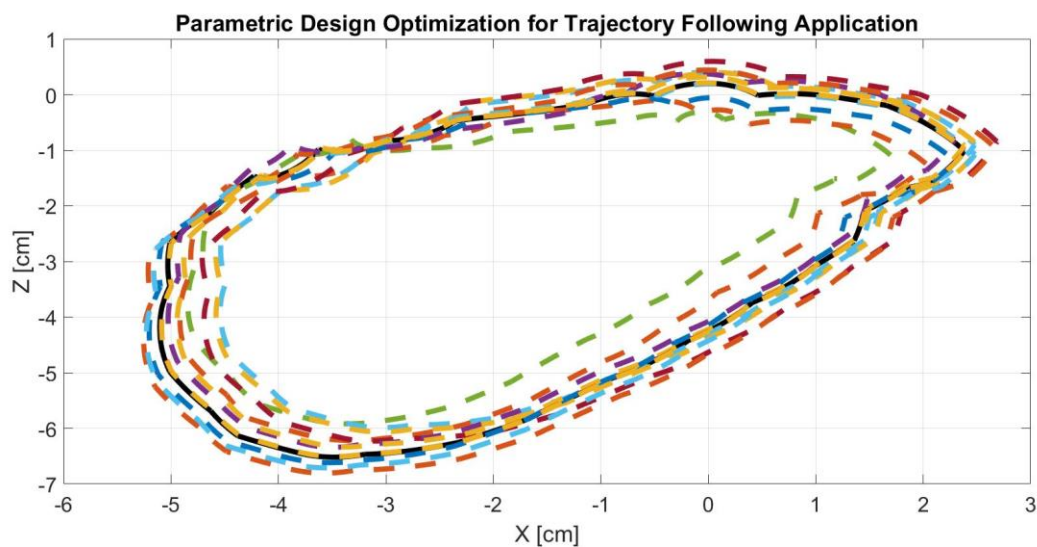
```
    % Plot
```

```
    figure(101);
```

```
    plot(x, z, 'LineWidth', 4, 'LineStyle', '--');
```

```
end
```

Optimization result

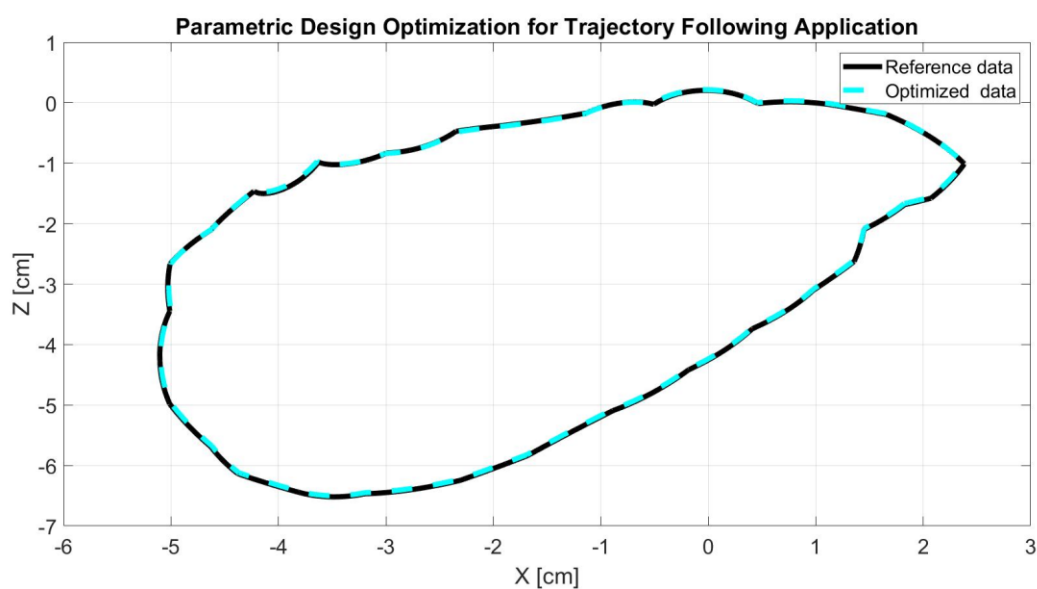


กราฟที่10 แสดงการ optimize ตำแหน่งของจุด foot ซึ่ง simulate ผ่าน simscape multibody

ซึ่งจะได้ว่า

Reference Design Parameters : $L1 = 2.1958$ cm , $L2 = 2.2597$ cm , $L3 = 3.5293$ cm

Optimal Design Parameters : $L1 = 2.1803$ cm , $L2 = 2.2802$ cm , $L3 = 3.5226$ cm



กราฟที่11 แสดงตำแหน่งของจุด foot ของกลไกซึ่งผ่านการ optimized แล้วเทียบกับ ข้อมูลอ้างอิง

Part 4 : Conclusion

Conclusion

จากการทำ Optimization ใน Simscape พบว่าค่าความยาว L1, L2 และ L3 มีค่าเป็น 2.1803 cm, 2.2802 cm และ 3.5226 cm ตามลำดับ โดยเมื่อเทียบกับค่าความยาว L1, L2 และ L3 จริงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.1958 cm, 2.2597 cm และ 3.5293 cm ค่าความยาว L1, L2 และ L3 ที่ได้จากการ Optimization มีค่าคลาดเคลื่อนจากของจริงไปเพียงเล็กน้อยซึ่งก็คือ 0.706%, 3.514% และ 0.190% ตามลำดับ

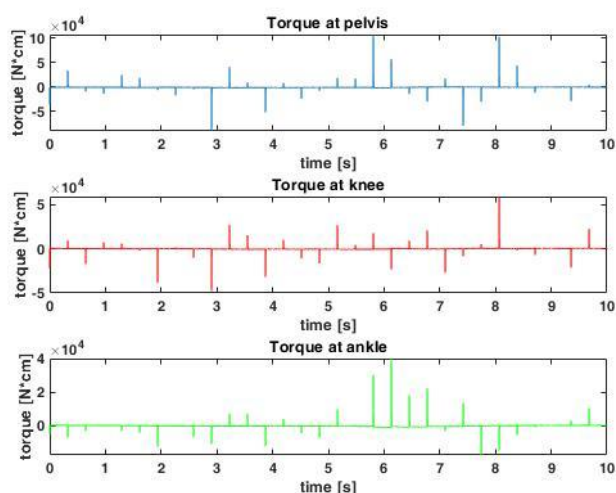
Problem and Solution

1. การเคลื่อนที่ของขาข้างซ้ายเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ไม่อยู่บนระนาบ ทำให้เมื่อ project การเคลื่อนที่ของขาข้างซ้ายลงบนระนาบเพื่อหาความยาวขาของข้างซ้ายจะได้ไม่ตรงกับค่าความยาวขาข้างซ้ายจริง
วิธีการแก้ปัญหา : เลือกการเคลื่อนที่ในระนาบ xy ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่อยู่บนระนาบมากที่สุด
2. ค่า x, y ของ Foot ในกราฟ x-t, y-t (Reference data) เป็นค่า x, y เทียบกับพื้นโลก แต่ค่า x, y ที่เราต้องการคือค่า x, y เทียบกับตัวข้างซ้าย
วิธีการแก้ปัญหา : หาค่า x, y ของ Hip จากกราฟ x-t, y-t แล้วนำมาใส่สมการ $x = x_{\text{Foot}} - x_{\text{Hip}}$, $y = y_{\text{Foot}} - y_{\text{Hip}}$ เพื่อหาค่า x, y ตามลำดับ
3. ในการคิดค่า θ เพื่อนำมาเป็น Input ใน Simulink โดยคิดค่า $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ จาก x_3, y_3, ϕ ตาม Reference data จะได้ค่า θ ออกมาเป็น complex number
สาเหตุของปัญหา : เพราะค่า θ_3 และ ϕ ควรจะมีการเท่ากันที่จุดที่ x_3, y_3 ห่างจากจุด origin มากที่สุด แต่ค่า θ_3 และ ϕ ที่จุดนั้นไม่เท่ากันเพราะ ϕ ได้มาจาก Reference data แต่ θ_3 ได้มาจากการคำนวณ
วิธีการแก้ปัญหา : ปรับให้ค่า θ_3 ที่จุด x_3, y_3 ห่างจากจุด origin มากที่สุด มีค่าเท่ากับค่า ϕ ที่จุดนั้น
4. วิธีการตั้งแกนของกราฟใน Reference data ไม่ตรงกับแกนของการคำนวณใน Hand Calculation
วิธีการแก้ปัญหา : ปรับแกนให้ตรงกัน
5. ภายในโปรแกรม MATLAB เมื่อแทนค่า x_3, y_3, ϕ ลงใน Inverse Kinematics แล้ว ค่า $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ที่ได้ มีค่าไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของกลไกมีลักษณะกลับปม
วิธีการแก้ปัญหา : ใช้ฟังก์ชัน unwrap

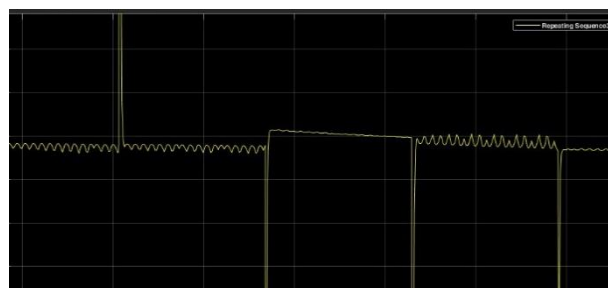
6. เมื่อใส่ Input ใน Simulink เป็น Torque แล้ว จะได้การเคลื่อนที่ของขาที่งอไม่ตรงกับ Reference Data

สาเหตุของปัญหา : Torqueที่ได้จากการวัดในการ Simulate การเคลื่อนที่ของขาที่งอโดยใส่ Input เป็น θ_1 , θ_2 , θ_3 มีลักษณะเป็น Abrupt change และมี Noise ดังที่แสดงในกราฟที่ 12 และ รูปที่ 8 ตามลำดับ

วิธีการแก้ปัญหา : กลับไปใช้ θ_1 , θ_2 , θ_3 เป็น Input เหมือนเดิม และ ใช้คำสั่ง interp1 ใน MATLAB เพื่อให้ค่า theta ที่ใส่เข้าไปเป็น input มีจำนวนเยอะขึ้น เพื่อใน Torque ที่ได้ออกมามีลักษณะ Smooth ไม่เป็น Abrupt change ดังที่แสดงในกราฟที่ 9



กราฟที่ 12 แสดง Torque ณ เวลาต่างๆ ที่ Pelvis, Knee, Ankle

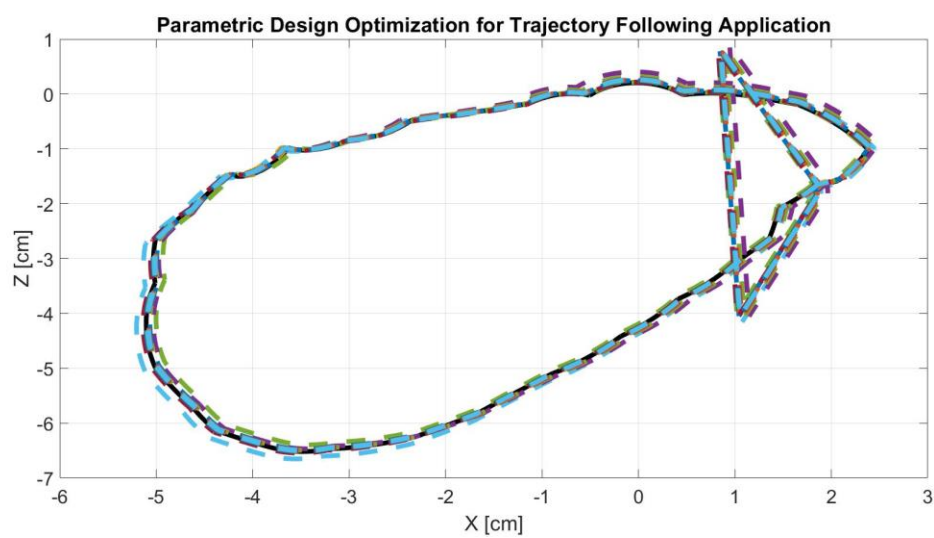


รูปที่ 8 แสดง Noise ที่เกิดขึ้นในกราฟ Torque

7. ในการทำ Optimization กราฟที่ได้เกิดรูปสามเหลี่ยมขึ้น ในการ Iteration แต่ละครั้ง

สาเหตุของปัญหา : ค่า Ts ที่ใส่ในมีความความละเอียดไม่เพียงพอ (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

วิธีการแก้ปัญหา : ใส่ค่า Ts เป็นเศษส่วน เพื่อให้ค่า Ts มีความละเอียดมากพอ



กราฟที่ 13 แสดงถึงตำแหน่งของจุด foot เมื่อเทียบกับตำแหน่งของ hip ในระนาบ xy ในลักษณะวงปิด

จากการ Optimization เทียบกับ กราฟที่ได้ Simulink