รายการอ้างอิง

1. J J. E. Slotine and W. Li, *"Applied Nonlinear Control,"* Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.

2. R. M. Inigo, and J. S. Morton, "Simulation of the Dynamics of an Industrial Robot," *IEEE Trans on Education*, vol. 34, no. 1, pp. 89-99, 1991.

3. H. K. Khalil, *"Nonlinear System,"* 2nd ed, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.

4. K. Abdel-Malek, and S. Othman. *Multiple Sweeping using the Denavit-Hartenberg Representation Method. Computer-Aided Design.* 31(1999) :567-583.

5. L. Ljung, *"System Identification: Theory for User, 2 ed."* Prentice-Hall, 1999.

6. M. Norrlof, *"Modeling of Industrial Robots,"* Technical Report, LiTH-ISY-R-2208, Department of Electrical Engineering, Linkoping University, Linkoping, Sweden, 1999.

7. P. K. Willet, "Equations of Motion for Two-Axes Gimbal System," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic System, vol. 37, no.3,* pp. 1083-1091, 2001.

8. Per Skoglar. *Modelling and Control of IR/EO Gimbal for UAV Surveillance Applications.* Master's thesis LiTH-ISY-EX- 3258-2002. Department of Electrical Engineering, Linkoping University Linkoping Sweden, 2002.

9. L. Ljung, *"System Identification Toolbox: For User with MATLAB,"* The Mathworks, 2002.

10. B. Subudhi, and A. S. Morris, "Dynamic Modeling, Simulation and Control of a Manipulator with Flexible Links and Joints," *Robotic and Autonomous Systems,* vol. 41, pp. 257-270, 2002.

11. K Mittal, and I J Nagrath. *Robotics and Control,* Tata McGraw-Hill, 2003.

12. T. Braunl, *"Embedded Robotics,"* Springer-Verlag, Berlin, 2003.

13. R. Isermann, *"Mechatronic Systems,"* Springer-Verlag, London, 2003.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการหาแบบจำลองพลวัต

ในการหาสมการพลวัตของกล่องที่หมุนรอบทิศทางโดยวิธีของลากรองจ์-ออยเลอร์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดเฟรม $0, ..., n$ โดยการใช้สัญนิยม DH

2. หาเมทริกซ์ในการแปลง ${}^{i-1}T_i$ ของแต่ละท่อน

$$ {}^{j}T_k = \prod_{p=j+1}^{k} {}^{p-1}T_p \qquad \text{for} \quad j = 0, 1, 2, ..., n-2; k = j+2, ..., n \tag{ก.1} $$

3. กำหนดเมทริกซ์ Q_i ของแต่ละท่อน

$$ Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} $$

4. หาเทนเซอร์โมเมนต์ความเฉื่อย

$$ I = \begin{bmatrix} \int x^2 dm & \int xydm & \int xzdm & \int xdm \\ \int xydm & \int y^2 dm & \int yzdm & \int ydm \\ \int xzdm & \int yzdm & \int z^2 dm & \int zdm \\ \int xdm & \int ydm & \int zdm & \int dm \end{bmatrix} $$

$$ = \begin{bmatrix} \int (y^2+z^2)dm & -\int xydm & -\int xzdm & m\bar{x} \\ -\int xydm & \int (x^2+z^2)dm & -\int yzdm & m\bar{y} \\ -\int xzdm & -\int yzdm & \int (x^2+y^2)dm & m\bar{z} \\ m\bar{x} & m\bar{y} & m\bar{z} & m \end{bmatrix} $$

โดยที่

$$ \bar{r} = \begin{bmatrix} \bar{x} & \bar{y} & \bar{z} & 1 \end{bmatrix}^T $$

สมมติให้

$$ \bar{r} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T $$

จะได้ว่า

$$ = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(I_{xx}+I_{yy}+I_{zz}) & I_{xy} & I_{xz} & m\bar{x} \\ I_{xy} & \frac{1}{2}(I_{xx}-I_{yy}+I_{zz}) & I_{yz} & m\bar{y} \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{1}{2}(I_{xx}+I_{yy}-I_{zz}) & m\bar{z} \\ m\bar{x} & m\bar{y} & m\bar{z} & m \end{bmatrix} $$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(I_{xx}+I_{yy}+I_{zz}) & I_{xy} & I_{xz} & 0 \\ I_{xy} & \frac{1}{2}(I_{xx}-I_{yy}+I_{zz}) & I_{yz} & 0 \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{1}{2}(I_{xx}+I_{yy}-I_{zz}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m \end{bmatrix}$$

5. หา d_{ij}

$$d_{ij} = \begin{cases} {}^{0}T_{j-1}Q_j^{j-1}T_i & \text{for } j \le i \\ 0 & \text{for } j > i \end{cases} \tag{ก.2}$$

6. หา M_{ij}

$$M_{ij} = \sum_{p=max(i,j)}^{n} Tr[d_{pj}I_p d_{pi}^T] \tag{ก.3}$$

$$\begin{aligned}
M_{11} &= Tr(d_{11}I_1d_{11}^T) + Tr(d_{21}I_2d_{21}^T) + Tr(d_{31}I_3d_{31}^T) + Tr(d_{41}I_4d_{41}^T) \\
M_{12} &= M_{21} = Tr(d_{22}I_2d_{21}^T) + Tr(d_{32}I_3d_{31}^T) + Tr(d_{42}I_4d_{41}^T) \\
M_{13} &= M_{31} = Tr(d_{33}I_3d_{31}^T) + Tr(d_{43}I_4d_{41}^T) \\
M_{14} &= M_{41} = Tr(d_{44}I_4d_{41}^T) \\
M_{22} &= Tr(d_{22}I_2d_{22}^T) + Tr(d_{32}I_3d_{32}^T) + Tr(d_{42}I_4d_{42}^T) \\
M_{23} &= M_{32} = Tr(d_{33}I_3d_{32}^T) + Tr(d_{43}I_4d_{42}^T) \\
M_{24} &= M_{42} = Tr(d_{44}I_4d_{42}^T) \\
M_{33} &= Tr(d_{33}I_3d_{33}^T) + Tr(d_{43}I_4d_{43}^T) \\
M_{34} &= M_{43} = Tr(d_{44}I_4d_{43}^T) \\
M_{44} &= Tr(d_{44}I_4d_{44}^T)
\end{aligned}$$

โดยที่ $M_{ij} = M_{ji}$

7. หา h_{ijk}

$$h_{ijk} = \sum_{p=max(i,j,k)}^{n} Tr[\frac{\partial(d_{pk})}{\partial q_p} I_p d_{pi}^T] \tag{ก.4}$$

โดยที่

$$H_i = \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} h_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k \tag{ก.5}$$

จะได้ว่า

$$
\begin{aligned}
H_1 &= h_{111}\dot{q}_1^2 + h_{122}\dot{q}_2^2 + h_{133}\dot{q}_3^2 + h_{144}\dot{q}_4^2 + (h_{112} + h_{121})\dot{q}_1\dot{q}_2 + (h_{113} + h_{131})\dot{q}_1\dot{q}_3 \\
&\quad +(h_{123} + h_{132})\dot{q}_2\dot{q}_3 + (h_{114} + h_{141})\dot{q}_1\dot{q}_4 + (h_{124} + h_{142})\dot{q}_2\dot{q}_4 + (h_{143} + h_{134})\dot{q}_3\dot{q}_4 \\
H_2 &= h_{211}\dot{q}_1^2 + h_{222}\dot{q}_2^2 + h_{233}\dot{q}_3^2 + h_{244}\dot{q}_4^2 + (h_{212} + h_{221})\dot{q}_1\dot{q}_2 + (h_{213} + h_{231})\dot{q}_1\dot{q}_3 \\
&\quad +(h_{223} + h_{232})\dot{q}_2\dot{q}_3 + (h_{214} + h_{241})\dot{q}_1\dot{q}_4 + (h_{224} + h_{242})\dot{q}_2\dot{q}_4 + (h_{243} + h_{234})\dot{q}_3\dot{q}_4 \\
H_3 &= h_{311}\dot{q}_1^2 + h_{322}\dot{q}_2^2 + h_{333}\dot{q}_3^2 + h_{344}\dot{q}_4^2 + (h_{312} + h_{321})\dot{q}_1\dot{q}_2 + (h_{313} + h_{331})\dot{q}_1\dot{q}_3 \\
&\quad +(h_{323} + h_{332})\dot{q}_2\dot{q}_3 + (h_{314} + h_{341})\dot{q}_1\dot{q}_4 + (h_{324} + h_{342})\dot{q}_2\dot{q}_4 + (h_{343} + h_{334})\dot{q}_3\dot{q}_4 \\
H_4 &= h_{411}\dot{q}_1^2 + h_{422}\dot{q}_2^2 + h_{433}\dot{q}_3^2 + h_{444}\dot{q}_4^2 + (h_{412} + h_{421})\dot{q}_1\dot{q}_2 + (h_{413} + h_{431})\dot{q}_1\dot{q}_3 \\
&\quad +(h_{423} + h_{432})\dot{q}_2\dot{q}_3 + (h_{414} + h_{441})\dot{q}_1\dot{q}_4 + (h_{424} + h_{442})\dot{q}_2\dot{q}_4 + (h_{443} + h_{434})\dot{q}_3\dot{q}_4
\end{aligned}
$$

และ

$$
d_{ij} = \begin{cases} {}^0T_{j-1}Q_j^{j-1}T_i & \text{for } j \le i \\ 0 & \text{for } j > i \end{cases}
$$

$$
\frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} = \begin{cases} {}^0T_{j-1}Q_j^{j-1}T_{k-1}Q_k^{k-1}T_i & \text{for } i \ge k \ge j \\ {}^0T_{k-1}Q_k^{k-1}T_{j-1}Q_j^{j-1}T_i & \text{for } i \ge j \ge k \\ 0 & \text{for } i < j \text{ or } i < k \end{cases}
$$

8. หา G_i ของแต่ละท่อน

$$
G_i = -\sum_{p=i}^{n} m_p g d_{pi}{}^p\bar{r}_p \qquad (ก.8)
$$

9. แทนค่าในสมการ

$$
\tau_i = \sum_{i=1}^{n} M_{ij}(q)\ddot{q}_j + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} h_{ijk}\dot{q}_j\dot{q}_k + G_i \qquad (ก.9)
$$

สัญญลักษณ์	ความหมาย
n	จำนวน link/joint
d_i	ระยะที่เลื่อน
θ_i	มุมที่หมุน
q_i	ตัวแปร joint
τ_i	แรงบิดที่ joint
${}^{i}T_j$	เมทริกซ์แปลงจากเฟรม j ไปเฟรม i
$M(\vec{q})$	เมทริกซ์ความเฉื่อย
C_i	$\cos\theta_i$
S_i	$\sin\theta_i$
P	การเลื่อน
R	การหมุน
DH	Denavit-Hartenberg
n-DOF	องศาของความเสรี $= n$

ตารางที่ ก.1: สัญกรณ์ที่ใช้

ภาคผนวก ข

การตั้งค่าโปรแกรม

การตั้งค่า xPCsetup

ก่อนอื่นเราจะต้องมีความเข้าใจเบื้องต้นก่อนว่า การใช้ xPC target นั้นอันดับแรกจะต้องส่งผ่านข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ 2 เครื่องให้ได้ก่อน ดังนั้น จะตั้งค่า IP Address ดังนี้

หัวข้อ	Host Computer	Target Computer
IP Address:	192.168.100.20	192.168.100.2
Subnet Mask:	255.255.255.0	255.255.255.0
Default Gateway:	192.168.100.1	192.168.100.2

ตารางที่ ข.1: การตั้งค่า xPCsetup

- ที่ Matlab prompt ของเครื่อง host computer พิมพ์ xpcsetup
- ที่หน้าต่าง window ของ xPC Target Setup ใส่ค่าต่างๆดังนี้

หัวข้อ	ค่าที่ตั้ง	หัวข้อ	ค่าที่ตั้ง
Version:	2.5	RS232HostPort:	
CComplier:	VisualC	RS232Baudrate:	
ComplierPath:	c:visual.net 2003	TcpIpTargetAddress:	192.168.100.2
TargetRamSizeMB:	Auto	TcpIpTargetPort:	22222
MaxmodelSize:	1MB	TcpIpSubNetMask:	255.255.255.0
SystemFontSize:	Small	TcpIpGateway:	192.168.100.20
CANLibrary:	None	TcpIpTargetDriver:	RTLANCE
HostTargetComm:	TCP/IP	TcpIpTargetBusType:	PCI
TargetScope:	Enabled	TcpIpTargetISAMemPort:	0 × 300
TargetMouse:	None	TcpIpTargetISAIRQ:	5

ตารางที่ ข.2: การตั้งค่า xPCsetup

- คลิกปุ่ม Update
- คลิกปุ่ม BootDisk
- คลิกปุ่ม Close

การทดสอบ xPC setup

- ตั้งค่าของ target computer ให้ boot จากไดรฟ์ a:
- ถ้า boot ผ่านจะปรากฏหน้าต่าง window ของ xPC target
- ที่ Matlab prompt ของ Host computer พิมพ์ xpctest แล้วกด enter
- ถ้ารันโปรแกรมไม่ผ่านจะต้องตั้งค่า xPC setup ใหม่
- ถ้ารันโปรแกรมผ่าน จึงทำการเปิด Simulink block diagram แล้วทำการรันไฟล์ RS232 แล้วรันโปรแกรมบน Simulink block diagram
- ที่ Matlab command พิมพ์ xpcrctool แล้วกดปุ่มรัน ซึ่งสามารถกดปุ่มหยุดเพื่อดูกราฟของผลตอบสนองได้

การตั้งค่า Encoder

- ดับเบิลคลิกที่ PCI-QUAD04 บน Simulink block
- ที่หน้าต่าง window ของ PCI-QUAD04 ใส่ค่าต่างๆดังนี้

หัวข้อ	ค่าที่ตั้ง
Function module:	1
Counting reset by index:	Index input disabled
Positive rotation:	Clockwise
Mode:	Quadruple
Resolution:	1024
Sample time:	0.001
PCI slot(-1: autosearch):	-1

ตารางที่ ข.3: การตั้งค่า PCI-QUAD04

- คลิกปุ่ม ok

การตั้งค่า Analog Output

- ดับเบิลคลิกที่ PCI-6024E บน Simulink block
- ที่หน้าต่าง window ของ PCI-6024E ใส่ค่าต่างๆดังนี้
- คลิกปุ่ม ok

หัวข้อ	ค่าที่ตั้ง
Channel vector:	[1 2]
Reset vector:	[1]
Initial value vector:	[0]
Sample time:	0.01
PCI slot(-1: autosearch):	-1

ตารางที่ ข.4: การตั้งค่า D/A

การตั้งค่า Digital Output

- ดับเบิลคลิกที่ PCI-6024E บน Simulink block
- ที่หน้าต่าง window ของ PCI-6024E ใส่ค่าต่างๆดังนี้

หัวข้อ	ค่าที่ตั้ง
Channel vector:	[1 2 3]
Reset vector:	[1]
Initial value vector:	[0]
Sample time:	0.01
PCI slot(-1: autosearch):	-1

ตารางที่ ข.5: การตั้งค่า Digital Output

- คลิกปุ่ม ok

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เรือเอกมานะชัย คำแย้ม เกิดเมื่อวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2514 ที่อุบลราชธานี เป็นบุตรนายสอน คำแย้ม และ นางบุญศรี คำแย้ม เป็นบุตรคนที่แปดในจำนวนพี่น้องทั้งหมดแปดคน สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี 2542 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม เมื่อ พ.ศ. 2544

สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย