

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2540. Hybrid Force-Position Control Of A Robot Manipulator Arm. บทความทางวิชาการการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 11 กรุงเทพฯ.

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2538. การควบคุมระบบพลศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ รัชทิน จันทร์เจริญ. 2541. Hybrid Visual Servo/Force Control Of A Manipulator Arm. บทความทางวิชาการการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ.

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ บวร ปัญญารวจน์. 2543. การทดสอบการควบคุมแบบไฮบริดด้วยแรงแบบอิมพลิชิตสำหรับแขนกล. บทความทางวิชาการการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 14. เชียงใหม่: 454-472.

ภาษาอังกฤษ

Anderson, R., Spong, M. W. 1987. Hybrid impedance control of robotic manipulators. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation: 1073-1080.

Angeles, J., Yang, G. et al. 2001. Singularity analysis of three-legged parallel robots based on passive-joint velocities. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul Korea: 2407-2412.

Angeles, J., Yang, G. et al. 2001. Singularity analysis of three-legged. six-DOF platform manipulators with RRRS legs. Proc. IEEE International Conference on Advances Intelligent Mechatronics. Como Italy: 32-36.

Arai, T. et al. 2000. Parallel mechanisms with adjustable link parameters. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: 671-676.

Chiaverini, S., Siciliano, B., Villani, L. February 1998. Force and position tracking: parallel control with stiffness adaptation. Control Systems Magazine. 18, 1: 27-33.

Chiu, Y. J., Perng, M. H. 2001. Forward Kinematics of a General Fully Parallel Manipulator with Auxiliary Sensors. International Journal of Robotics Research. 20, 5: 401-414.

- Clavel, R. 1991. Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté. Doctoral Dissertation. EPFL Lausanne Switzerland.
- Craig, J. 1986. Introduction to Robotics, Mechanics and Control. 2nd edition.(n.p.): Addison-Wesley.
- Friedberg, S. H. et.al. 2003. Linear Algebra. 4th edition.(n.p.): Prentice Hall.
- Gosselin, C. 1990. Stiffness Mapping for Parallel Manipulators, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6, 3: 377-382.
- Gosselin, C., Angeles, J. 1990. Singularity analysis of closed-loop kinematics chains. IEEE Transactions on Robotics & Automation. 6, 3: 959-968.
- Gragorio, R., Parenti-Castelli, V. 1999. Mobility analysis of the 3-UPU parallel mechanism assembled for a pure translational motion. Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta USA: 520-525.
- Honegger, M. et al. 1997. Adaptive control of the Hexaglide, a 6 dof parallel manipulator. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque New Mexico: 543-548.
- Jung, S., Hsia, T. C. 1995. On neural network application to robust impedance control of robots manipulators. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1: 869-874.
- Jung, S., Hsia, T. C. 1998. Neural network impedance force control of robot manipulator, IEEE Transaction on. Ind. Electron. 45, 3: 451-461.
- Jung, S., Hsia T. C. 2000. Robust neural force control scheme under uncertainties in robot dynamics and unknown environment. IEEE Transaction on Ind. Electron. 47, 2: 403-412.
- Jung, S., Yim, S. B., Hsia, T. C. 2001. Experimental studies of neural network impedance force control for robot manipulators. Proc. IEEE Conference on Robotics & Automation: 3453-3458.
- Jung, S., Hsia, T. C. and Bonitz, R. G. 2004. Force Tracking Impedance Control of Robot Manipulators Under Unknown Environment. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 12, 3: 474-483.

- Kim, J. 2001. Eclipse-II: a new parallel mechanism enabling continuous 360-degree spinning plus three-axis translational motions. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul Korea: 3274-3279.
- Kiguchi K., Fukuda, T. 2000. Position/force control of robot manipulators for geometrically unknown objects using fuzzy neural networks. IEEE Transaction on Ind. Electron. 47: 641-649.
- Lazard, D., Merlet, J.P. 1994. The (true) Stewart platform has 12 configurations. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation: 2160-2165.
- Lee, M. K., Park, K. W. 2000. Workspace and singularity analysis of a double parallel manipulator. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 5, 4: pp. 367-375.
- Leguay-Durand, S. 1997. Design of a 3-DOF parallel translating manipulator with U-P-U joints kinematics chain. Proc. IEEE IROS: 1637-1642.
- Liu, X. J. et al. 2001. On the analysis of a new spatial three-degrees-of-freedom parallel manipulator. IEEE Transactions on Robotics & Automation. 17, 6: 959-968.
- Liu, X. J., Kim, J. 2002. A new three-degree-of-freedom parallel manipulator. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Washington DC: 1155-1160.
- Merlet, J. P. 1993. Closed-form resolution of the direct kinematics of parallel manipulators using extra sensors data. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1: 200 -204.
- Monsarrat, B., Gosselin, C. 2001. Singularity Analysis of a Three-Leg 6Dof parallel Grassmann Line Geometry. International Journal of Robotics Research. 20, 4: 312-326.
- Morris, D. M., Hebbar, R., Newman, W. S. 2001. Force Guided Assemblies Using a Novel Parallel Manipulator. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation: 325-330.
- Octaviano, E., Gosselin, C., Ceccarelli, M. 2001. Singularity analysis of CaPaMan: A three-degree of freedom spatial parallel manipulator. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul Korea: 1295-1300.
- Pierrot, F. 1999. H4: a new family of 4-DOF parallel robots. Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta USA: 508-513.

- Pierrot, F. 2000. Towards non-hexapod mechanisms for high performance parallel machines. Proc. IEEE: 229-234.
- Pierrot, F., Marquet, F. 2001. H4 parallel robot modeling design and preliminary experiments. International Conference on IEEE Robotics and Automation. Seoul Korea: 3256-3261.
- Raibert, M., Craig, J.J. 1981. Hybrid position/force control of manipulators. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control. 102: 126-133.
- Sang, L.H., Han, M.C. 1999. The estimation for forward kinematics solution of Stewart platform Using the Neural Network. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System: 1501-1506.
- Sangveraphunsiri, V., Chanchaoren, R. 2000. A Hybrid Force/Visual Servo Control for Industrial Robots. Proc. JSAE Annual Congress. Yokohama, Japan.
- Sangveraphunsiri, V., Ngamvilaikorn, T. 2002. Design and Development of a Six DOF Master-Slave Human-Assisted Manipulator Arm. Proc. JSAE Annual Congress. Yokohama Japan.
- Sangveraphunsiri, V., Tantawiroon, N. 2003. Novel Design of a 4-DOF Parallel Robot. Proc. JSAE Annual Congress. Yokohama Japan.
- Sangveraphunsiri, V., Ngaojaruwong, T. 2004. Design and Analysis of A 6-DOF Haptic Device Using the Singular-Free Parallel Mechanism. Proc. The Third AUN/SEED-NET FIELDWISE SEMINAR in Manufacturing and Material Processing. Kuala Lumpur Malaysia.
- Stewart, D. 1965. A platform with 6 degrees of freedom. Proc. Institution of mechanical engineers: 371-386.
- Stoughton, R. Arai, Y. 1991. Optimal sensor placement for forward kinematics evaluation of a 6-dof parallel link manipulator. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Osaka Japan: 785-790.
- Thompson, W.T. 1997. Theory of Vibration with Application. 5th edition.(n.p.): Prentice Hall.
- Tsai, L.W., Walsh, G.C., Stamper, R.E. 1996 Kinematics of a novel three DOF translational platform. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Minneapolis Minnesota: 3447-3451.

- Tsai, L.W. 1999 Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators.
(n.p.): John Wiley & Sons.
- Tsai, L.W., Joshi, S. 2001. Comparison study of architectures of four 3 degree-of-freedom translational parallel manipulators. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul Korea: 1283-1288.
- Tsai, L.W., Joshi, S. 2002. A comparison study of two 3-DOF parallel manipulators: One with three and the other with four supporting legs. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Washington DC: 3690-3697.
- Zlatanov, D., Fenton, R. G., Benhabib, B. 1994. Singularity Analysis of Mechanism and Robots via a Motion-Space Model of the Instantaneous Kinematics. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation: 980-985.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณควบคุมแขนกล

ก.1 พอร์ตอินพุตและเอาต์พุตสัญญาณแอนาล็อก

สัญญาณแอนาล็อกที่ใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณแอนาล็อกสำหรับควบคุมแขนกลในงานวิจัยนี้ดังแสดงในตาราง ก.1 ประกอบด้วยสองส่วนคือ

1. สัญญาณแอนาล็อกที่ส่งไปควบคุมตัวขยายเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์
2. สัญญาณจากตัวตรวจรู้แรง

รายละเอียดของพอร์ตโปรคคูใน DS1103 PPC Controller Board Installation and Configuration Guide May 2002 รายละเอียดของตัวขยายสัญญาณ Kollmorgen คู่มือใน SERVOSTAR S และ SERVOSTAR CD Installation manual 2002 (SDCInstall.pdf)

ตาราง ก.1 พอร์ตที่ใช้เชื่อมต่อสัญญาณแอนาล็อก

ชื่อพอร์ต		อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ	หน้าที่การทำงาน
Input	Output		
		ตัวขยายสัญญาณควบคุมมอเตอร์ Kollmorgen	ส่งไปสัญญาณแอนาล็อกควบคุมตัวขยายเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์
	DACH1	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 1	
	DACH2	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 2	
	DACH3	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 3	
	DACH4	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 4	
		ตัวตรวจรู้แรง ATI mini45	รับสัญญาณแรงที่ได้จากตัวตรวจรู้แรง ATI
ADCH5		ช่อง 0	
ADCH6		ช่อง 1	
ADCH9		ช่อง 2	
ADCH10		ช่อง 3	
ADCH13		ช่อง 4	
ADCH14		ช่อง 5	

สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจรู้แรงแต่ละช่องสัญญาณต้องนำมาคูณกับเมตริกซ์สอบเทียบของตัวตรวจรู้แรงเพื่อให้ได้แรงในแต่ละแกนความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณจากตัวตรวจรู้แรงกับแรงที่แท้จริงในแต่ละแกนคือ

$$F = G \cdot S$$

$$G = \begin{bmatrix} -1.11029e-001 & -5.02329e-002 & 1.48590e-001 & 2.25660e+001 & 6.13902e-002 & -2.21749e+001 \\ 7.42880e-003 & -2.45581e+001 & -8.66835e-002 & 1.30142e+001 & -2.97506e-002 & 1.29594e+001 \\ -2.84030e+001 & 7.73003e-001 & -3.02564e+001 & 3.15650e-001 & -3.12157e+001 & 3.86968e-001 \\ 4.97536e-003 & -1.75589e-001 & 5.11267e-001 & 9.19340e-002 & -5.01946e-001 & 9.21767e-002 \\ -5.39294e-001 & 3.45733e-003 & 3.06943e-001 & -1.54291e-001 & 2.84709e-001 & 1.53247e-001 \\ 9.12474e-003 & 3.12924e-001 & 7.99678e-003 & 3.25192e-001 & -6.59328e-003 & 3.28286e-001 \end{bmatrix}$$

โดยที่ F เป็นแรงในแต่ละแกนหรือ $[F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]$ และ S คือสัญญาณที่อ่านได้ในแต่ละช่องสัญญาณหรือ $[s_0 \ s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ s_5]$

ก.2 พอร์ตรับสัญญาณเอนคอคเคอร์

พอร์ตรับสัญญาณเอนคอคเคอร์เพื่อวัดตำแหน่งการอุปกรณ์ขับทั้งสี่ที่ได้แสดงในตาราง ก.2

ตาราง ก.2 พอร์ตรับสัญญาณเอนคอคเคอร์

ชื่อพอร์ต	อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ	หน้าที่การทำงาน
	ตัวขยายสัญญาณควบคุมมอเตอร์ Kollmorgen	รับสัญญาณเอนคอคเคอร์จากตัวขยายสัญญาณ Kollmorgen เพื่อใช้หาตำแหน่งของแขนกล
ENCODER1 PHI0(1) PHI90(1) IDX(1)	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 1	
ENCODER2 PHI0(2) PHI90(2)	ตัวขยายอุปกรณ์ขับ 2	

ตาราง ก.2 (ต่อ)		
IDX(2)		
ENCODER3 PHI0(3) PHI90(3) IDX(3)	ตัวขยายอุปกรณ์จับ 3	
ENCODER4 PHI0(4) PHI90(4) IDX(4)	ตัวขยายอุปกรณ์จับ 4	

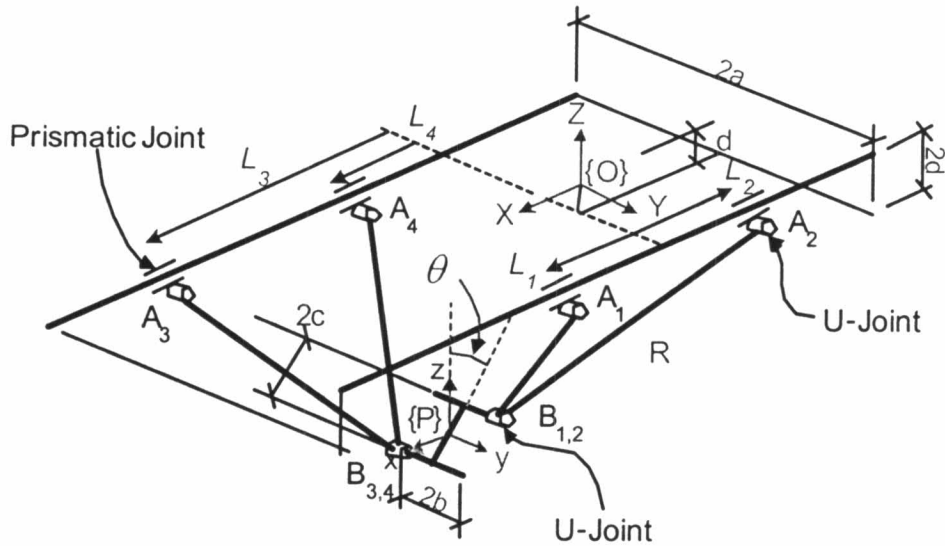
ภาคผนวก ข

ความสัมพันธ์เชิงวิเคราะห์ของตำแหน่งความเร็วและความแข็งตึงของแขนกล

รูปแบบความสัมพันธ์เชิงวิเคราะห์ที่ใช้อธิบายลักษณะเฉพาะตัวของแขนกลที่ได้สร้างขึ้นนี้สามารถแสดงโดยใช้ความสัมพันธ์พีชคณิต ระบบสมการต่างๆ และเมตริกซ์ ซึ่งได้กล่าวถึงในเนื้อหาวิทยานิพนธ์ ในภาคผนวกนี้จะสรุปความสัมพันธ์เชิงวิเคราะห์ทั้งหมดของแขนกลนี้ โดยแบ่งได้ดังนี้

ข.1 ความสัมพันธ์เชิงตำแหน่ง

พิจารณารูปที่ 2.5(3) ซึ่งได้นำมาแสดงใหม่เพื่อความสะดวกดังนี้



รูปที่ 2.5(3) รูปแบบการกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล

ข.1.1 ความสัมพันธ์อินเวอร์สคิเนแมติกส์

ความสัมพันธ์อินเวอร์สคิเนแมติกส์แสดงในสมการที่ 2.10 ถึง 2.13

$$l_1 = x_1 + \sqrt{R^2 - y_1^2 - z_1^2} \quad (2.10)$$

และ

$$l_2 = x_1 - \sqrt{R^2 - y_1^2 - z_1^2} \quad (2.11)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}x_1 &= x + c \cdot \sin(\theta) \\y_1 &= y + b - a \\z_1 &= z + c \cdot \cos(\theta) - d\end{aligned}$$

ในกรณีข้อต่อที่ 3 และ 4 พบว่า

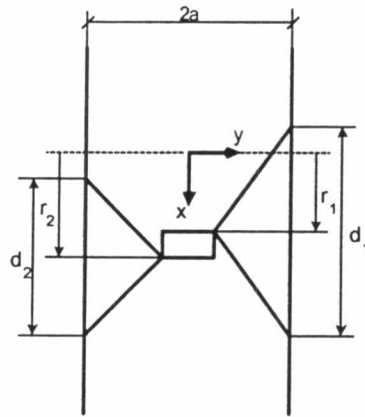
$$\begin{aligned}l_3 &= x_2 + \sqrt{R^2 - y_2^2 - z_2^2} \\l_4 &= x_2 - \sqrt{R^2 - y_2^2 - z_2^2}\end{aligned} \quad (2.12-2.13)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}x_2 &= x - c \cdot \sin(\theta) \\y_2 &= y - b + a \\z_2 &= z - c \cdot \cos(\theta) + d\end{aligned}$$

ข.1.2 ความสัมพันธ์ฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์

พิจารณาการกำหนดตัวแปรใหม่ดังรูปที่ 2.6 อีกครั้ง



รูปที่ 2.6 แสดงการกำหนดตัวแปรเพื่อจัดรูปสมการให้ง่ายขึ้น

กำหนดให้

$$\begin{aligned}r_1 &= \frac{l_1 + l_2}{2}, r_2 = \frac{l_3 + l_4}{2} \\d_1 &= l_1 - l_2, d_2 = l_3 - l_4\end{aligned}$$

จะได้ความสัมพันธ์ฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ดังสมการที่ 2.15 ถึง 2.20

$$x = \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (2.14)$$

$$\cos(\theta) = \frac{\sqrt{4c^2 - (r_1 - r_2)^2}}{2c} \quad (2.15)$$

$$y = \frac{d_1^2 - d_2^2 + 8z \left[\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2} - 2d \right]}{16(a-b)} \quad (2.18)$$

$$z = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2.20)$$

โดยที่

$$A = \frac{\left[\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2} - 2d \right]^2}{2(a-b)^2} + 2$$

$$B = \frac{(d_1^2 - d_2^2) \left[\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2} - 2d \right]}{8(a-b)^2}$$

$$C = \frac{d_1^2 + d_2^2}{4} - 2R^2 + 2(b-a)^2 + \frac{1}{2} \left[\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2} - 2d \right]^2 + \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{128(a-b)^2}$$

ข.2 ความสัมพันธ์เชิงความเร็วหรือ Jacobian ของแขนกล

Jacobian ของแขนกลอยู่ในรูปของ

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{B}\dot{\mathbf{x}} \quad (2.21)$$

โดยที่เมตริกซ์ \mathbf{A} \mathbf{B} และ \mathbf{J} แสดงใน (ข.1) ถึง (ข.3)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x + c \cdot \sin(\theta) - l_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x + c \cdot \sin(\theta) - l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x - c \cdot \sin(\theta) - l_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x - c \cdot \sin(\theta) - l_4 \end{bmatrix} \quad (ข.1)$$

และ

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x + c \cdot \sin(\theta) - l_1 & y + b - a & z + c \cdot \cos(\theta) - d & c \left(-(x + c \cdot \sin(\theta) - l_1) \cos(\theta) + (z + c \cdot \cos(\theta) - d) \sin(\theta) \right) \\ x + c \cdot \sin(\theta) - l_2 & y + b - a & z + c \cdot \cos(\theta) - d & c \left(-(x + c \cdot \sin(\theta) - l_2) \cos(\theta) + (z + c \cdot \cos(\theta) - d) \sin(\theta) \right) \\ x - c \cdot \sin(\theta) - l_3 & y - b + a & z - c \cdot \cos(\theta) + d & c \left((x - c \cdot \sin(\theta) - l_3) \cos(\theta) - (z - c \cdot \cos(\theta) + d) \sin(\theta) \right) \\ x - c \cdot \sin(\theta) - l_4 & y - b + a & z - c \cdot \cos(\theta) + d & c \left((x - c \cdot \sin(\theta) - l_4) \cos(\theta) - (z - c \cdot \cos(\theta) + d) \sin(\theta) \right) \end{bmatrix} \quad (ข.2)$$

และ

$$\mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$$

โดยที่

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 \frac{y+b-a}{x+c \cdot \sin(\theta)-l_1} & \frac{z+c \cdot \cos(\theta)-d}{x+c \cdot \sin(\theta)-l_1} & c \left(-\cos(\theta) + \frac{(z+c \cdot \cos(\theta)-d) \sin(\theta)}{x+c \cdot \sin(\theta)-l_1} \right) \\ 1 \frac{y+b-a}{x+c \cdot \sin(\theta)-l_2} & \frac{z+c \cdot \cos(\theta)-d}{x+c \cdot \sin(\theta)-l_2} & c \left(-\cos(\theta) + \frac{(z+c \cdot \cos(\theta)-d) \sin(\theta)}{x+c \cdot \sin(\theta)-l_2} \right) \\ 1 \frac{y-b+a}{x-c \cdot \sin(\theta)+l_3} & \frac{z-c \cdot \cos(\theta)+d}{x-c \cdot \sin(\theta)+l_3} & c \left(\cos(\theta) - \frac{(z-c \cdot \cos(\theta)+d) \sin(\theta)}{x-c \cdot \sin(\theta)+l_3} \right) \\ 1 \frac{y-b+a}{x-c \cdot \sin(\theta)+l_4} & \frac{z-c \cdot \cos(\theta)+d}{x-c \cdot \sin(\theta)+l_4} & c \left(\cos(\theta) - \frac{(z-c \cdot \cos(\theta)+d) \sin(\theta)}{x-c \cdot \sin(\theta)+l_4} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{ข.3})$$

ข.3 เมตริกซ์ความแข็งตึงของแขนกล

เมตริกซ์ความแข็งตึงและส่วนกลับของเมตริกซ์ความแข็งตึงต้องอาศัยส่วนกลับของ Jacobian ซึ่งอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} & \tau_{14} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} & \tau_{24} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} & \tau_{34} \\ \tau_{41} & \tau_{42} & \tau_{43} & \tau_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{ข.4})$$

อาศัยโปรแกรม Matlab® ช่วยในการคำนวณแบบสัญลักษณ์ทำให้ได้สมาชิกแต่ละตัวดังนี้

$$\tau_{11} = \tau_{12} = \tau_{13} = \tau_{14} = 1/4 \quad (\text{ข.5})$$

$$\tau_{21} = -1/8 * (z-c*\cos(\theta)+d) * (l1-l2-2*\tan(\theta) * z-2*\tan(\theta) * c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta) * d) / (z*b-z*a-c*\cos(\theta) * y+d*y) \quad (\text{ข.6})$$

$$\tau_{22} = -1/8 * (z-c*\cos(\theta)+d) * (l1-l2-2*\tan(\theta) * z-2*\tan(\theta) * c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta) * d) / (z*b-z*a-c*\cos(\theta) * y+d*y) \quad (\text{ข.7})$$

$$\tau_{23} = 1/8 * (-z-c*\cos(\theta)+d) * (-l3+l4+2*\tan(\theta) * z-2*\tan(\theta) * c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta) * d) / (z*b-z*a-c*\cos(\theta) * y+d*y) \quad (\text{ข.8})$$

$$\tau_{24} = 1/8 * (-z-c*\cos(\theta)+d) * (l3-l4+2*\tan(\theta) * z-2*\tan(\theta) * c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta) * d) / (z*b-z*a-c*\cos(\theta) * y+d*y) \quad (\text{ข.9})$$

$$\tau_{31} = -1/8 * (-y*l1+y*l2+b*l1-b*l2-a*l1+a*l2+2*\tan(\theta) * z*y-2*\tan(\theta) * c*\cos(\theta) * b+2*\tan(\theta) * c*\cos(\theta) * a+2*\tan(\theta) * d*b-2*\tan(\theta) * d*a) / (z*b-z*a-c*\cos(\theta) * y+d*y) \quad (\text{ข.10})$$

$$\begin{aligned} \tau_{32} = & -1/8 * (y * l_1 - y * l_2 - b * l_1 + b * l_2 + a * l_1 - a * l_2 + 2 * \tan(\theta) * z * y - \\ & 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * b + 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * a + 2 * \tan(\theta) * d * b - \\ & 2 * \tan(\theta) * d * a) / (z * b - z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y) \end{aligned} \quad (\text{ข.11})$$

$$\begin{aligned} \tau_{33} = & 1/8 * (-y * l_3 + y * l_4 - b * l_3 + b * l_4 + a * l_3 - a * l_4 + 2 * \tan(\theta) * z * y - \\ & 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * b + 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * a + 2 * \tan(\theta) * d * b - \\ & 2 * \tan(\theta) * d * a) / (z * b - z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y) \end{aligned} \quad (\text{ข.12})$$

$$\begin{aligned} \tau_{34} = & 1/8 * (y * l_3 - y * l_4 + b * l_3 - b * l_4 - a * l_3 + a * l_4 + 2 * \tan(\theta) * z * y - \\ & 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * b + 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * a + 2 * \tan(\theta) * d * b - \\ & 2 * \tan(\theta) * d * a) / (z * b - z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y) \end{aligned} \quad (\text{ข.13})$$

$$\tau_{41} = \tau_{42} = -1/4 / c / \cos(\theta) \quad (\text{ข.14})$$

$$\tau_{43} = \tau_{44} = 1/4 / c / \cos(\theta) \quad (\text{ข.15})$$

โดยที่ $[x \ y \ z \ \theta]$ เป็นตำแหน่งและมุมของ Moving platform และ $[l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]$ คือตำแหน่งของข้อต่อข้อขึ้นตั้งสี่

ลำดับต่อไปเมตริกซ์ Compliance ของแขนกลอยู่ในรูป

$$\begin{aligned} \Lambda(\mathbf{x}) &= \mathbf{J}^{-1} \mathbf{k}^{-1} (\mathbf{J}^T)^{-1} \\ &= \frac{1}{k} \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} & \tau_{14} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} & \tau_{24} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} & \tau_{34} \\ \tau_{41} & \tau_{42} & \tau_{43} & \tau_{44} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} \tau_{11} & \tau_{21} & \tau_{31} & \tau_{41} \\ \tau_{12} & \tau_{22} & \tau_{32} & \tau_{42} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \tau_{33} & \tau_{43} \\ \tau_{14} & \tau_{24} & \tau_{34} & \tau_{44} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.15)$$

เนื่องจากเมตริกซ์ Compliance มีความสมมาตร สมาชิกของเมตริกซ์เป็นดังสมการที่ (ข.16) ถึง (ข.25)

$$\Lambda_{11} = 1/4 \quad (\text{ข.16})$$

$$\Lambda_{12} =$$

$$\begin{aligned} & -1/k/32 * ((z - c * \cos(\theta) + d) * (l_1 - l_2 - 2 * \tan(\theta) * z - \\ & 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) + 2 * \tan(\theta) * d) / (z * b - z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y)) - 1/k/32 * ((z - \\ & c * \cos(\theta) + d) * (-l_1 + l_2 - 2 * \tan(\theta) * z - 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) + 2 * \tan(\theta) * d) / (z * b - \\ & z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y)) + 1/k/32 * ((-z - c * \cos(\theta) + d) * (-l_3 + l_4 + 2 * \tan(\theta) * z - \\ & 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) + 2 * \tan(\theta) * d) / (z * b - z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y)) + 1/k/32 * ((-z - \\ & c * \cos(\theta) + d) * (l_3 - l_4 + 2 * \tan(\theta) * z - 2 * \tan(\theta) * c * \cos(\theta) + 2 * \tan(\theta) * d) / (z * b - z * a - \\ & c * \cos(\theta) * y + d * y)) \end{aligned} \quad (\text{ข.17})$$

$$\Lambda_{13} =$$

$$\begin{aligned} & -1/k/32 * ((-y^{*11}+y^{*12}+b^{*11}-b^{*12}-a^{*11}+a^{*12}+2*\tan(\theta)*z*y- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*b+2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*a+2*\tan(\theta)*d*b- \\ & 2*\tan(\theta)*d*a)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) -1/k/32 * ((y^{*11}-y^{*12}- \\ & b^{*11}+b^{*12}+a^{*11}-a^{*12}+2*\tan(\theta)*z*y- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*b+2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*a+2*\tan(\theta)*d*b- \\ & 2*\tan(\theta)*d*a)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/32 * ((-y^{*13}+y^{*14}- \\ & b^{*13}+b^{*14}+a^{*13}-a^{*14}+2*\tan(\theta)*z*y- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*b+2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*a+2*\tan(\theta)*d*b- \\ & 2*\tan(\theta)*d*a)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/32 * ((y^{*13}-y^{*14}+b^{*13}-b^{*14}- \\ & a^{*13}+a^{*14}+2*\tan(\theta)*z*y- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*b+2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*a+2*\tan(\theta)*d*b- \\ & 2*\tan(\theta)*d*a)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) \end{aligned} \quad (9.18)$$

$$\Lambda_{14} = 0 \quad (9.19)$$

$$\Lambda_{22} =$$

$$\begin{aligned} & 1/k/64 * (z-c*\cos(\theta)+d) * (11-12-2*\tan(\theta)*z- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((z- \\ & c*\cos(\theta)+d) * (11-12-2*\tan(\theta)*z-2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a- \\ & c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/64 * (z-c*\cos(\theta)+d) * (-11+12-2*\tan(\theta)*z- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((z- \\ & c*\cos(\theta)+d) * (-11+12-2*\tan(\theta)*z-2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b- \\ & z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/64 * (-z-c*\cos(\theta)+d) * (-13+14+2*\tan(\theta)*z- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((-z- \\ & c*\cos(\theta)+d) * (-13+14+2*\tan(\theta)*z-2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b- \\ & z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/64 * (-z-c*\cos(\theta)+d) * (13-14+2*\tan(\theta)*z- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((-z- \\ & c*\cos(\theta)+d) * (13-14+2*\tan(\theta)*z-2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a- \\ & c*\cos(\theta)*y+d*y)) \end{aligned} \quad (9.20)$$

$$\Lambda_{23} =$$

$$\begin{aligned} & 1/k/64 * (z-c*\cos(\theta)+d) * (11-12-2*\tan(\theta)*z- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((- \\ & y^{*11}+y^{*12}+b^{*11}-b^{*12}-a^{*11}+a^{*12}+2*\tan(\theta)*z*y- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*b+2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*a+2*\tan(\theta)*d*b- \\ & 2*\tan(\theta)*d*a)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/64 * (z-c*\cos(\theta)+d) * (- \\ & 11+12-2*\tan(\theta)*z-2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a- \\ & c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((y^{*11}-y^{*12}-b^{*11}+b^{*12}+a^{*11}-a^{*12}+2*\tan(\theta)*z*y- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*b+2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*a+2*\tan(\theta)*d*b- \\ & 2*\tan(\theta)*d*a)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/64 * (-z-c*\cos(\theta)+d) * (- \\ & 13+14+2*\tan(\theta)*z-2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a- \\ & c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((-y^{*13}+y^{*14}-b^{*13}+b^{*14}+a^{*13}-a^{*14}+2*\tan(\theta)*z*y- \\ & 2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*b+2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)*a+2*\tan(\theta)*d*b- \\ & 2*\tan(\theta)*d*a)/(z*b-z*a-c*\cos(\theta)*y+d*y)) +1/k/64 * (-z-c*\cos(\theta)+d) * (13- \\ & 14+2*\tan(\theta)*z-2*\tan(\theta)*c*\cos(\theta)+2*\tan(\theta)*d)/(z*b-z*a- \\ & c*\cos(\theta)*y+d*y) * ((y^{*13}-y^{*14}+b^{*13}-b^{*14}-a^{*13}+a^{*14}+2*\tan(\theta)*z*y- \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& y^{13} + y^{14} - b^{13} + b^{14} + a^{13} - a^{14} + 2 \tan(\theta) * z * y - \\
& 2 \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * b + 2 \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * a + 2 \tan(\theta) * d * b - \\
& 2 \tan(\theta) * d * a / (z * b - z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y) * (1/c / \cos(\theta)) + 1/k/32 * (y^{13} - \\
& y^{14} + b^{13} - b^{14} - a^{13} + a^{14} + 2 \tan(\theta) * z * y - \\
& 2 \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * b + 2 \tan(\theta) * c * \cos(\theta) * a + 2 \tan(\theta) * d * b - \\
& 2 \tan(\theta) * d * a) / (z * b - z * a - c * \cos(\theta) * y + d * y) * (1/c / \cos(\theta)) \tag{9.24}
\end{aligned}$$

$$\Lambda_{44} = 1/k/4/c/\cos(\theta) * (1/c/\cos(\theta)) \tag{9.25}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐคนัย ดัชนีวิรุฬห์ เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม ปีพ.ศ.2520 เป็นชาว กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาเครื่องกล จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีพ.ศ.2539 หลังจากนั้นได้สำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2542