

เอกสารอ้างอิง

- Thomson, William T., "Theory of Vibration with Application" , Prentice-Hall, New Jersey, 2nd ed., 1981.
- Inman, Daniel J., "Vibration with Control, Measurement, and Stability" , Prentice-Hall, New Jersey, 1989.
- Yuan, B.S., Book, W.J., and Huggin, J.D., "Dynamics of Flexible Manipulator Arms: Alternative Derivation, and Characteristics for Control", Journal of Dynamic system, Measure, and Control, Vol. 115 pp. 394-404, 1995.
- Barbieri, Enrique, and Ozguner, Umit, "Unconstrained and Constrained Mode Expansions for a Flexible Slewing Link", Journal of Dynamic system, Measurement, and Control, Vol 110 pp. 416-421, 1988.
- Sangveraphunsiri, V., "The Optimal Control and Design of a Flexible Manipulator Arm", ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology , Georgia, 1984.
- Lewis, Frank L., "Applied Optimal Control and Estimation ", Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- , "Optimal Control", John Wiley and Sons, 1986.
- Derenzo, Stephen E., "Interfacing", Prentice Hall International Limitd, New Jersey, 1990.

ภาคผนวก ก

PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Available Options: Optical Encoder — Models R-80, RMC 1520

MOTOR RATINGS (@ 155°C Armature Temp.)	0642-31-011	0643-33-004	0644-36-012
Continuous Stall Torque (lb-in) (25°C Ambient Temp.)	5.9	9.7	12.5
Peak Torque (lb-in)	30	45	60
Maximum Terminal Voltage (V)	60	60	60
MECHANICAL DATA			
Rotor Movement of Inertia (lb-in-sec ²)	0.0012	0.0019	0.0023
Mechanical Time Constant (ms)	7.5	4.2	3.6
Damping Constant (lb-in/krpm)	0.1	0.16	0.16
Thermal Resistance (°C/watt)	2.7	2.2	1.9
Maximum Armature Temperature (°C)	155	155	155
Maximum Friction Torque (lb-in)	0.5	0.5	0.5
Maximum Shaft Radial Load (lb) (1 in. from front bearing continuous)	30	30	30
Motor Weight (including tachometer) (lb)	7.5	10	11.5
WINDING DATA (Class F Insulation)			
K _T Torque Constant ± 10% (lb-in/A)	0.74	1.05	2.74
K _E Voltage Constant ± 10% (V/krpm)	8.7	12.4	32.4
Winding Resistance * ± 15% @ 25°C (Ω)	0.34	0.32	1.5
Electrical Time Constant (ms)	0.8	1.5	1.7
Maximum Continuous Speed (rpm)	4500	4300	1800
Maximum Pulse Current (A)	40	43	22
Armature Inductance (mH)	0.5	0.7	2.8
Tachometer ± 10% (V/krpm)	14.2	14.2	14.2
± 15% Resistance (Ω)	110	110	110
640 — Motor Only Configuration	0642-01-010	0643-03-003	0644-06-011

* Plus .30 Ω for terminal resistance

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ข

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
2	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
3	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
4	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
5	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
6	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
7	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
8	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
9	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
10	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
11	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
12	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
13	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
14	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
15	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
16	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
17	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
18	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
19	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
20	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
21	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
22	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
23	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
24	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000
25	3.89178e-05	3.00023e-01	1.000000

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลแผ่นหนา ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	2.68233e-04	1.22245e+00	1.000000
2	2.67411e-04	1.21880e+00	1.000000
3	2.69150e-04	1.22653e+00	1.000000
4	2.69071e-04	1.22618e+00	1.000000
5	2.68662e-04	1.22496e+00	1.000000
6	2.68878e-04	1.22532e+00	1.000000
7	2.69731e-04	1.22911e+00	1.000000
8	2.68886e-04	1.23285e+00	1.000000
9	2.77824e-04	1.26508e+00	1.000000
10	2.72004e-04	1.24641e+00	1.000000
11	2.60317e-04	1.20082e+00	1.000000
12	2.69010e-04	1.23417e+00	1.000000
13	2.68867e-04	1.23160e+00	1.000000
14	2.67403e-04	1.22660e+00	1.000000
15	2.55569e-04	1.18050e+00	1.000000
16	2.59875e-04	1.19999e+00	1.000000
17	2.73989e-04	1.25314e+00	1.000000
18	2.67455e-04	1.22767e+00	1.000000
19	2.72139e-04	1.24232e+00	1.000000
20	2.65432e-04	1.21409e+00	1.000000
21	2.63832e-04	1.26857e+00	1.000000
22	2.68663e-04	1.22584e+00	1.000000
23	2.55801e-04	1.17807e+00	1.000000
24	2.65377e-04	1.20452e+00	1.000000
25	2.65091e-04	1.21419e+00	1.000000

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองโหมดเซฟที่ 2 สำหรับแกนกลแผ่นหนา ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	-6.36635e-04	-1.21699e+00	1.000000
2	-6.35401e-04	-1.21151e+00	1.000000
3	-6.29757e-04	-1.20075e+00	1.000000
4	-6.28112e-04	-1.19761e+00	1.000000
5	-6.31441e-04	-1.22146e+00	1.000000
6	-6.45936e-04	-1.24950e+00	1.000000
7	-6.35248e-04	-1.22645e+00	1.000000
8	-6.16909e-04	-1.16701e+00	1.000000
9	-6.69424e-04	-1.27906e+00	1.000000
10	-6.30837e-04	-1.20281e+00	1.000000
11	-6.35232e-04	-1.22880e+00	1.000000
12	-6.42468e-04	-1.24280e+00	1.000000
13	-6.09001e-04	-1.17556e+00	1.000000
14	-5.80975e-04	-1.11124e+00	1.000000
15	-5.56066e-04	-1.05407e+00	1.000000
16	-5.31561e-04	-1.01283e+00	1.000000
17	-5.11698e-04	-9.66499e-01	1.000000
18	-4.92793e-04	-9.29183e-01	1.000000
19	-5.42329e-04	-1.04708e+00	1.000000
20	-5.20260e-04	-1.00910e+00	1.000000
21	-5.02248e-04	-9.66025e-01	1.000000
22	-5.47362e-04	-1.05882e+00	1.000000
23	-5.78432e-04	-1.11892e+00	1.000000
24	-5.57971e-04	-1.07934e+00	1.000000
25	-5.30480e-04	-1.04105e+00	1.000000

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 3 สำหรับแขนกลแผ่นหนา ไม่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	1.83531e-04	3.44905e-01	1.000000
2	1.83321e-04	3.44747e-01	1.000000
3	1.83111e-04	3.44589e-01	1.000000
4	1.83111e-04	3.44589e-01	1.000000
5	1.83111e-04	3.44589e-01	1.000000
6	1.83111e-04	3.44589e-01	1.000000
7	1.83526e-04	3.44902e-01	1.000000
8	1.83526e-04	3.44902e-01	1.000000
9	1.83315e-04	3.44743e-01	1.000000
10	1.83946e-04	3.45219e-01	1.000000
11	1.83735e-04	3.45059e-01	1.000000
12	1.84370e-04	3.45539e-01	1.000000
13	1.84370e-04	3.45539e-01	1.000000
14	1.84158e-04	3.45379e-01	1.000000
15	1.84798e-04	3.45862e-01	1.000000
16	1.83946e-04	3.45218e-01	1.000000
17	1.83946e-04	3.45218e-01	1.000000
18	1.83732e-04	3.45057e-01	1.000000
19	1.84373e-04	3.45541e-01	1.000000
20	1.84160e-04	3.45380e-01	1.000000
21	1.84160e-04	3.45380e-01	1.000000
22	1.84592e-04	3.45706e-01	1.000000
23	1.84592e-04	3.45706e-01	1.000000
24	1.84504e-04	3.45542e-01	1.000000
25	1.84504e-04	3.45542e-01	1.000000

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองโหมตเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลผ่านบาง ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	-1.22531e-03	-7.26530e-01	1.000000
2	-1.21322e-03	-7.19363e-01	1.000000
3	-1.22751e-03	-7.27836e-01	1.000000
4	-1.22600e-03	-7.26941e-01	1.000000
5	-1.22737e-03	-7.19935e-01	1.000000
6	-1.22737e-03	-7.19935e-01	1.000000
7	-1.18819e-03	-6.90365e-01	1.000000
8	-1.24512e-03	-7.33335e-01	1.000000
9	-1.20518e-03	-7.03188e-01	1.000000
10	-1.23357e-03	-7.24617e-01	1.000000
11	-1.22234e-03	-7.16138e-01	1.000000
12	-1.21141e-03	-7.07888e-01	1.000000
13	-1.23967e-03	-7.29217e-01	1.000000
14	-1.22845e-03	-7.20749e-01	1.000000
15	-1.20077e-03	-6.99858e-01	1.000000
16	-1.25717e-03	-7.42428e-01	1.000000
17	-1.21753e-03	-7.12508e-01	1.000000
18	-1.20690e-03	-7.04484e-01	1.000000
19	-1.23445e-03	-7.25282e-01	1.000000
20	-1.19654e-03	-6.96670e-01	1.000000
21	-1.18645e-03	-6.89057e-01	1.000000
22	-1.21292e-03	-7.09034e-01	1.000000
23	-1.20258e-03	-7.01225e-01	1.000000
24	-1.20258e-03	-7.01225e-01	1.000000
25	-1.19249e-03	-6.93616e-01	1.000000

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองโหมดเซฟที่ 2 สำหรับแขนกลผ่านบาง ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	1.82272e-04	3.43956e-01	1.000000
2	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
3	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
4	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
5	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
6	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
7	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
8	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
9	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
10	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
11	1.82499e-04	3.44126e-01	1.000000
12	1.83114e-04	3.44591e-01	1.000000
13	1.82499e-04	3.44126e-01	1.000000
14	1.82499e-04	3.44126e-01	1.000000
15	1.82499e-04	3.44126e-01	1.000000
16	1.82806e-04	3.44358e-01	1.000000
17	1.82499e-04	3.44126e-01	1.000000
18	1.82499e-04	3.44126e-01	1.000000
19	1.82192e-04	3.43895e-01	1.000000
20	1.82192e-04	3.43895e-01	1.000000
21	1.82192e-04	3.43895e-01	1.000000
22	1.82192e-04	3.43895e-01	1.000000
23	1.82386e-04	3.44041e-01	1.000000
24	1.82079e-04	3.43810e-01	1.000000
25	1.82079e-04	3.43810e-01	1.000000

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองโหมตเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลผ่านบางคู่ ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	-1.22158e-03	-7.30663e-01	1.000000
2	-1.20752e-03	-7.20495e-01	1.000000
3	-1.21869e-03	-7.21338e-01	1.000000
4	-1.24584e-03	-7.48972e-01	1.000000
5	-1.21020e-03	-7.22074e-01	1.000000
6	-1.20723e-03	-7.04738e-01	1.000000
7	-1.23429e-03	-7.40255e-01	1.000000
8	-1.24691e-03	-7.49777e-01	1.000000
9	-1.25993e-03	-7.59606e-01	1.000000
10	-1.27338e-03	-7.69756e-01	1.000000
11	-1.23509e-03	-7.40859e-01	1.000000
12	-1.24803e-03	-7.50621e-01	1.000000
13	-1.21065e-03	-7.22414e-01	1.000000
14	-1.25139e-03	-7.60705e-01	1.000000
15	-1.27520e-03	-7.71127e-01	1.000000
16	-1.24920e-03	-7.51506e-01	1.000000
17	-1.30425e-03	-7.93054e-01	1.000000
18	-1.22364e-03	-7.32216e-01	1.000000
19	-1.23681e-03	-7.42157e-01	1.000000
20	-1.22681e-03	-7.42157e-01	1.000000
21	-1.22115e-03	-7.22789e-01	1.000000
22	-1.22422e-03	-7.32653e-01	1.000000
23	-1.23774e-03	-7.42856e-01	1.000000
24	-1.22141e-03	-7.22990e-01	1.000000
25	-1.19312e-03	-6.94090e-01	1.000000

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 2 สำหรับแขนกลแผ่นบางคู่ ไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	3.72698e-05	2.94016e-01	1.000000
2	3.72698e-05	2.94016e-01	1.000000
3	3.72698e-05	2.94016e-01	1.000000
4	3.72698e-05	2.94016e-01	1.000000
5	3.72239e-05	2.93816e-01	1.000000
6	3.72688e-05	2.93870e-01	1.000000
7	3.72688e-05	2.93870e-01	1.000000
8	3.72684e-05	2.93821e-01	1.000000
9	3.72912e-05	2.93897e-01	1.000000
10	3.72915e-05	2.93946e-01	1.000000
11	3.72912e-05	2.93897e-01	1.000000
12	3.72564e-05	2.93798e-01	1.000000
13	3.73135e-05	2.93924e-01	1.000000
14	3.73122e-05	2.93730e-01	1.000000
15	3.72771e-05	2.93582e-01	1.000000
16	3.72771e-05	2.93582e-01	1.000000
17	3.72998e-05	2.93658e-01	1.000000
18	3.72650e-05	2.93559e-01	1.000000
19	3.72647e-05	2.93510e-01	1.000000
20	3.72644e-05	2.93462e-01	1.000000
21	3.72524e-05	2.93439e-01	1.000000
22	3.72520e-05	2.93390e-01	1.000000
23	3.72749e-05	2.93417e-01	1.000000
24	3.72740e-05	2.93369e-01	1.000000
25	3.72387e-05	2.93174e-01	1.000000

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลผ่านหนา ใส่ น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	1.63427e-04	8.29846e-01	1.000000
2	1.66173e-04	8.41142e-01	1.000000
3	1.64786e-04	8.36852e-01	1.000000
4	1.67633e-04	8.49257e-01	1.000000
5	1.66131e-04	8.42530e-01	1.000000
6	1.69023e-04	8.54461e-01	1.000000
7	1.66834e-04	8.45828e-01	1.000000
8	1.65389e-04	8.40656e-01	1.000000
9	1.66088e-04	8.49949e-01	1.000000
10	1.66799e-04	8.47295e-01	1.000000
11	1.67521e-04	8.50696e-01	1.000000
12	1.68225e-04	8.53346e-01	1.000000
13	1.66044e-04	8.45400e-01	1.000000
14	1.66763e-04	8.48795e-01	1.000000
15	1.66733e-04	8.47995e-01	1.000000
16	1.65941e-04	8.45278e-01	1.000000
17	1.65941e-04	8.45278e-01	1.000000
18	1.66608e-04	8.47092e-01	1.000000
19	1.67344e-04	8.50567e-01	1.000000
20	1.65807e-04	8.44343e-01	1.000000
21	1.66480e-04	8.46170e-01	1.000000
22	1.64943e-04	8.39954e-01	1.000000
23	1.65640e-04	8.42568e-01	1.000000
24	1.64074e-04	8.35541e-01	1.000000
25	1.61861e-04	8.26115e-01	1.000000

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 2 สำหรับแขนกลแผ่นหนา ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	-5.35498e-04	-1.16602e+00	1.000000
2	-5.35498e-04	-1.16620e+00	1.000000
3	-5.75895e-04	-1.28342e+00	1.000000
4	-6.50584e-04	-1.48059e+00	1.000000
5	-5.15850e-04	-1.13000e+00	1.000000
6	-5.15850e-04	-1.13000e+00	1.000000
7	-5.15850e-04	-1.13000e+00	1.000000
8	-5.15850e-04	-1.13000e+00	1.000000
9	-5.74971e-04	-1.28664e+00	1.000000
10	-5.74049e-04	-1.28986e+00	1.000000
11	-5.74971e-04	-1.28664e+00	1.000000
12	-5.74049e-04	-1.28986e+00	1.000000
13	-6.47067e-04	-1.49042e+00	1.000000
14	-6.47067e-04	-1.49042e+00	1.000000
15	-6.74804e-04	-1.57120e+00	1.000000
16	-6.73527e-04	-1.57448e+00	1.000000
17	-5.47564e-04	-1.24135e+00	1.000000
18	-5.27330e-04	-1.17631e+00	1.000000
19	-4.90247e-04	-1.07701e+00	1.000000
20	-5.45323e-04	-1.23024e+00	1.000000
21	-6.15461e-04	-1.41893e+00	1.000000
22	-5.65922e-04	-1.28581e+00	1.000000
23	-5.88594e-04	-1.34696e+00	1.000000
24	-6.15943e-04	-1.40762e+00	1.000000
25	-5.89331e-04	-1.33025e+00	1.000000

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 3 สำหรับแขนกลแผ่นหนา ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	1.77829e-04	3.40602e-01	1.000000
2	1.77284e-04	3.40191e-01	1.000000
3	1.77284e-04	3.40191e-01	1.000000
4	1.77284e-04	3.40191e-01	1.000000
5	1.77284e-04	3.40191e-01	1.000000
6	1.76950e-04	3.39939e-01	1.000000
7	1.76742e-04	3.39782e-01	1.000000
8	1.76203e-04	3.39375e-01	1.000000
9	1.76203e-04	3.39375e-01	1.000000
10	1.75877e-04	3.39129e-01	1.000000
11	1.75877e-04	3.39129e-01	1.000000
12	1.75877e-04	3.39129e-01	1.000000
13	1.75344e-04	3.38727e-01	1.000000
14	1.74816e-04	3.38328e-01	1.000000
15	1.74816e-04	3.38328e-01	1.000000
16	1.74816e-04	3.38328e-01	1.000000
17	1.73767e-04	3.37536e-01	1.000000
18	1.73767e-04	3.37536e-01	1.000000
19	1.73557e-04	3.37378e-01	1.000000
20	1.73037e-04	3.36986e-01	1.000000
21	1.73233e-04	3.37367e-01	1.000000
22	1.74117e-04	3.39089e-01	1.000000
23	1.74257e-04	3.39363e-01	1.000000
24	1.75477e-04	3.41737e-01	1.000000
25	1.75166e-04	3.41132e-01	1.000000

ตารางที่ ข.11 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลแผ่นบาง ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	-2.33719e-03	-1.68105e+00	1.000000
2	-2.33522e-03	-1.67974e+00	1.000000
3	-2.32178e-03	-1.67080e+00	1.000000
4	-2.32285e-03	-1.67634e+00	1.000000
5	-2.30761e-03	-1.66139e+00	1.000000
6	-2.31663e-03	-1.66139e+00	1.000000
7	-2.31593e-03	-1.66738e+00	1.000000
8	-2.30109e-03	-1.67473e+00	1.000000
9	-2.30215e-03	-1.67786e+00	1.000000
10	-2.31025e-03	-1.66517e+00	1.000000
11	-2.20151e-03	-1.59513e+00	1.000000
12	-2.12890e-03	-1.52799e+00	1.000000
13	-2.05784e-03	-1.47436e+00	1.000000
14	-2.15237e-03	-1.50192e+00	1.000000
15	-2.28512e-03	-1.58667e+00	1.000000
16	-2.47654e-03	-1.69890e+00	1.000000
17	-2.29171e-03	-1.59089e+00	1.000000
18	-2.13036e-03	-1.44289e+00	1.000000
19	-2.25135e-03	-1.56947e+00	1.000000
20	-2.33318e-03	-1.68217e+00	1.000000
21	-2.04834e-03	-1.46720e+00	1.000000
22	-1.98791e-03	-1.42159e+00	1.000000
23	-2.10901e-03	-1.52298e+00	1.000000
24	-2.17141e-03	-1.56008e+00	1.000000
25	-2.56395e-03	-1.85633e+00	1.000000

ตารางที่ ข.12 ผลการทดลองโหมดเซฟท์ 2 สำหรับแขนกลแผ่นบาง ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
2	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
3	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
4	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
5	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
6	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
7	1.73262e-04	3.37155e-01	1.000000
8	1.73262e-04	3.37155e-01	1.000000
9	1.73755e-04	3.37527e-01	1.000000
10	1.73755e-04	3.37527e-01	1.000000
11	1.74251e-04	3.37902e-01	1.000000
12	1.74051e-04	3.37751e-01	1.000000
13	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
14	1.74550e-04	3.38127e-01	1.000000
15	1.74852e-04	3.38355e-01	1.000000
16	1.75052e-04	3.38506e-01	1.000000
17	1.76064e-04	3.39270e-01	1.000000
18	1.76574e-04	3.39655e-01	1.000000
19	1.76375e-04	3.39505e-01	1.000000
20	1.77088e-04	3.40043e-01	1.000000
21	1.76889e-04	3.39892e-01	1.000000
22	1.77405e-04	3.40282e-01	1.000000
23	1.77925e-04	3.40674e-01	1.000000
24	1.76530e-04	3.40167e-01	1.000000
25	1.76530e-04	3.40167e-01	1.000000

ตารางที่ ข.13 ผลการทดลองโหมคเซฟที่ 1 สำหรับแขนกลขนาดแผ่นบางคู่ ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



ครั้งที่	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
2	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
3	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
4	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
5	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
6	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
7	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
8	-1.75051e-03	-1.22962e+00	1.000000
9	-1.74583e-03	-1.22655e+00	1.000000
10	-1.74583e-03	-1.22655e+00	1.000000
11	-1.74583e-03	-1.22655e+00	1.000000
12	-1.74583e-03	-1.22655e+00	1.000000
13	-1.74583e-03	-1.22655e+00	1.000000
14	-1.74583e-03	-1.22655e+00	1.000000
15	-1.74711e-03	-1.22745e+00	1.000000
16	-1.74711e-03	-1.22745e+00	1.000000
17	-1.74711e-03	-1.22745e+00	1.000000
18	-1.74711e-03	-1.22745e+00	1.000000
19	-1.74711e-03	-1.22745e+00	1.000000
20	-1.75525e-03	-1.23317e+00	1.000000
21	-1.75525e-03	-1.23317e+00	1.000000
22	-1.75525e-03	-1.23317e+00	1.000000
23	-1.75525e-03	-1.23317e+00	1.000000
24	-1.75327e-03	-1.23177e+00	1.000000
25	-1.75327e-03	-1.23177e+00	1.000000

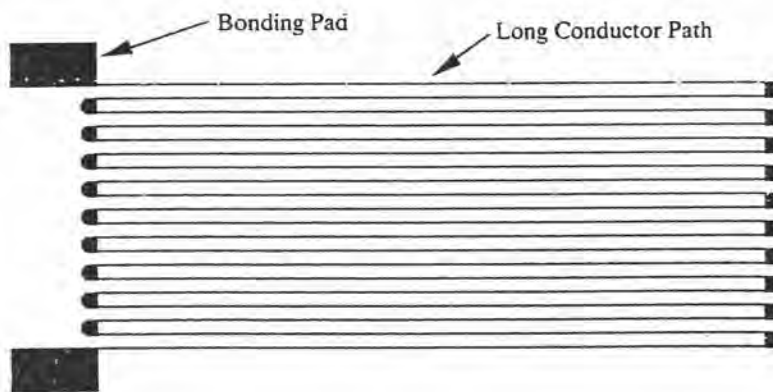
ตารางที่ ข.14 ผลการทดลองโหมตเซฟที่ 2 สำหรับแขนกลแผ่นบางคู่ ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกล

อุปกรณ์เกจวัดความเครียด (strain gauge)

ในระบบของเครื่องกลโดยมากจะมีแรงมากกระทำต่อระบบดังนั้นจึงได้มีการวิเคราะห์เกี่ยวกับผลของการกระทำต่อระบบของแรงที่กระทำว่ามีผลอย่างไร สิ่งที่ต้องศึกษาส่วนมากจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับค่าความเค้น (stress) ของระบบโดยค่าความเค้นจะเป็นอัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (F/A) และค่าความเครียด (strain) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่อความยาวเดิม ($\Delta l/l$) และคุณสมบัติของวัสดุคือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Young's modulus) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าความเค้นต่อค่าความเครียด

อุปกรณ์ที่นำมาใช้วัดค่าความเครียด คือ strain gauge ในการอธิบายผลที่เกิดขึ้นของตัว strain gauge โดยจะแทนตัวของ strain gauge ด้วยปรอทที่ใส่ภายในท่ออย่าง โดยขณะที่ท่อถูกแรงดึงจะทำให้ความยาว l เพิ่มขึ้น ขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ความต้านทานไฟฟ้า R สามารถแทนได้ด้วย $R = \rho l/A$ เมื่อให้ ρ แทนความต้านทานหน่วยเป็น ohm.cm. และปริมาตรที่คงที่ $V = Al$ ดังนั้น $R = \rho l/V$ สำหรับการเปลี่ยนแปลงความยาวเพียงเล็กน้อย Δl ดังนั้น $\Delta R = 2\rho \Delta l/V$ และ $\Delta R/R = 2\Delta l/l$

ความต้านทานของ strain gauge เช่น กรณีของ metal foil strain gauge จะประกอบด้วยรูปแบบการเรียงตัวดังรูป ค.1



รูปที่ ค.1 แสดง metal foil strain gauge

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัว strain gauge จะเกิดจากการดึง (tensile) หรือเกิดจากการอัด (compressive) ดังนั้นถ้าให้เกจอยู่ภายใต้การอัดจะทำให้ความยาวลด

ลง สำหรับนิยามความเครียดตามแนวยาว (longitudinal strain) $\epsilon_L = \Delta l/l$ และ ความเครียดตามแนวเส้นรอบวง (transverse strain) $\epsilon_t = \Delta d/d$ เมื่อค่า Poisson's ratio, ν จะนิยามเป็น $-\epsilon_t/\epsilon_L$ สำหรับความต้านทานไฟฟ้าของโลหะที่ใช้ทำ strain gauge จะได้

$$R = \rho l/A$$

เมื่อใช้การหาอนุพันธ์ย่อยจะได้

$$dR = (\rho/A)dl - (\rho l/A)da + (l/A)d\rho = R(dl/l) - R(da/A) + R(d\rho/\rho)$$

$$\Delta R/R = \Delta l/l - \Delta A/A + \Delta \rho/\rho$$

ถ้าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวด d ถูกอัดตัวเปลี่ยนแปลงเป็น d' ดังนั้น

$$\Delta A/A = 2(d' - d)/d = -2\nu \Delta l/l$$

ดังนั้น $\Delta R/R = \Delta \rho/\rho + \Delta l/l + 2\nu \Delta l/l = (1 + 2\nu)\Delta l/l + \Delta \rho/\rho$

resistivity, ρ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุ

$$\Delta \rho = m\rho \Delta v/v$$

สำหรับเส้นลวดของ strain gauge เป็นแบบลวดกลม

$$\Delta v/v = (1 - 2\nu)\Delta v/v$$

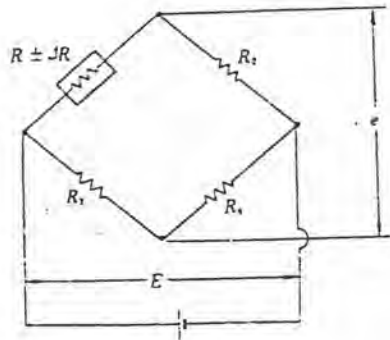
ดังนั้น $(\Delta R/R)/\epsilon = (1 + 2\nu) + m(1 - 2\nu)$

$$= (1 + m) + 2\nu(1 - m)$$

สำหรับเส้นลวดที่ใช้ทำ strain gauge ส่วนใหญ่จะเป็นทองแดงหรือนิกเกิลซึ่ง $m = 1$

ดังนั้น $(\Delta R/R)/\epsilon = 2 = G \dots\dots(1)$

โดยค่าคงที่ที่ปรากฏในสมการจะเรียกว่า strain sensitivity หรือ เกจเฟดเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ strain gauge สำหรับ ค่า gauge factor, G ในสมการ $\Delta R/R = G\Delta l/l$ จะมีค่า $G = 2$ โลหะโดยมากแล้ว $\mu = 0.3$ ค่าของเกจเฟดเตอร์โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 2 ถึง 4.5 สำหรับโลหะ และสามารถที่จะสูงได้ถึง 150 สำหรับ semiconductor วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดค่าความเครียดโดยการติดตั้งของ strain gauge บนชิ้นงานที่ทำการทดสอบ จะเป็นการวัดค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของลวดความต้านทานของตัว strain gauge วงจรนี้เรียกว่าวงจรบริดจ์ ซึ่งเป็นที่นิยมกันมากและเป็นวงจรที่มีความแม่นยำในการวัดสำหรับความต้านทานที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



รูปที่ ค.2 แสดงวงจรบริดจ์

ในรูปข้างบน R เป็นความต้านทานของเกจวัดและ R_2 , R_3 และ R_4 เป็นความต้านทานที่มีค่าคงที่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า E ถูกจ่ายเข้าสู่ลู่วงจรบริดจ์ และถ้าขณะนั้น strain gauge อยู่ภายใต้ความเครียดจะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไปเป็น $R \pm \Delta R$ ซึ่งจะทำให้ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า e เกิดขึ้นที่อีกด้านหนึ่งของวงจรบริดจ์

$$e = [R_2 / (R_2 + R_4) - R \pm \Delta R / (R \pm \Delta R + R_2)]$$

ถ้าให้ $R = R_2 = R_3 = R_4$

$$e = \pm \Delta R E / (2(2R \pm \Delta R))$$



เนื่องจาก $2R \gg \Delta R$

$$2R + \Delta R = 2R$$

ดังนั้น

$$e = \pm E \Delta R / (4R) \quad \dots\dots (2)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากวงจร จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของเกจที่ใช้วัด ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการ (1) ในสมการ (2) จะได้

$$e = (1/4) E G \epsilon$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า e ที่ได้จากวงจรบริดจ์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเครียด ϵ



ภาคผนวก ง

ระบบการควบคุมและการประมาณค่าตัวแปรสแตท

การควบคุมระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีวิธีการควบคุมได้หลายแบบ บางระบบอาจจะคำนึงเพียงความเสถียรภาพของระบบแบบจำลอง หรือ บางระบบอาจจะพิจารณาเพื่อที่ทำให้ระบบจำลองเข้าใกล้จุดที่ต้องการอย่างรวดเร็วซึ่งระบบที่กล่าวมาเหล่านี้จะไม่คำนึงถึงส่วนของพลังงานที่ใช้ช่วงระหว่างการควบคุมแบบจำลอง แต่ถ้าต้องการจะพิจารณาถึงตัวควบคุมที่ให้ความเหมาะสมกับการใช้งานโดยเฉพาะเรื่องต่างๆ เหล่านี้แล้วควรที่จะใช้ระบบควบคุมแบบ optimal control ซึ่งเป็นระบบที่รวมจุดที่สำคัญต่างๆ ของระบบเอาไว้ด้วยกันที่เรียกว่า performance index โดยจะประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรที่จะพิจารณาให้มีผลต่อการออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ในระบบแบบจำลอง ตัวแปรที่ถูกรวบรวมไว้จะประกอบด้วยตัวแปรที่สภาวะสุดท้าย (final state) จะเป็นการให้ความสำคัญต่อสภาวะสุดท้ายของระบบ ส่วนที่สองเป็นตัวแปรสแตทขณะทำการควบคุม โดยจะเป็นการให้ความสำคัญกับค่าความผิดพลาดขณะทำการควบคุม และส่วนที่สามเป็นส่วน of ค่าของสัญญาณที่เข้าควบคุมระบบแบบจำลอง ซึ่งเป็นการพิจารณาให้ความสำคัญต่อพลังงานที่ใช้กับแบบจำลองเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับการใช้งาน จากตัวแปรทั้งสามของระบบจะถูกรวมกันไว้เพื่อทำให้เกิดความเหมาะสมต่อระบบในการควบคุมที่ดีที่สุด

ระบบการควบคุมแบบ optimal control จะใช้การควบคุมแบบ free final state และ close loop control ในระบบนี้ส่วนของ สแตทสุดท้าย อาจจะเท่ากับศูนย์หรือไม่ก็ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเมทริกซ์ค่าคงที่ สำหรับสมการต่างๆ ของระบบเพื่อที่จะนำมาใช้งานพอที่จะสรุปได้ดังนี้

แบบจำลองของระบบ

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

performance index

$$J_1 = (1/2)x^T(N)Sx(N) + (1/2)\sum_{k=1}^{N-1} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k))$$

สมมติฐาน

$$S \geq 0 ; Q \geq 0 ; R > 0 ;$$

optimal feedback control

$$S(k) = A^T [S(k+1) - S(k+1)B(B^T S(k+1)B + R)^{-1} B^T S(k+1)]A + Q$$

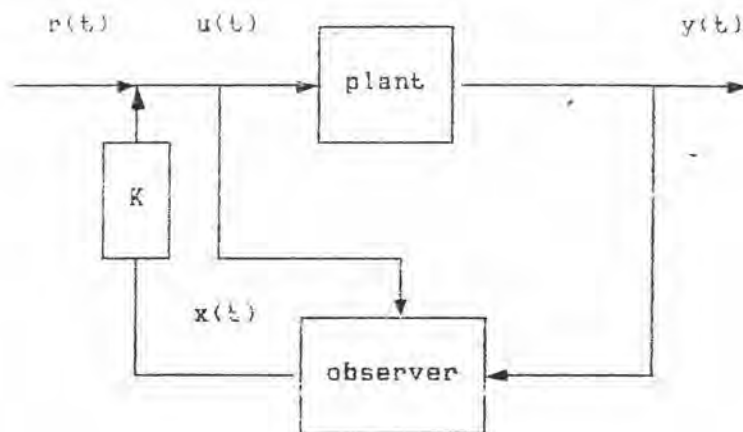
$$K(k) = (B^T S(k+1)B + R)^{-1} B^T S(k+1)A$$

$$u(k) = -K(k)x(k)$$

แต่สำหรับในงานการควบคุมจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้เวลาแต่ละช่วงการเก็บข้อมูลให้น้อยที่สุด เพื่อที่จะให้ผลที่อ่านค่าได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง หรือ ถ้ามองทางด้านการควบคุมจะพบว่า การรับส่งข้อมูลที่ใช้เวลาน้อยจะทำให้ระบบเหมือนถูกตัวควบคุมทำการควบคุมตลอดเวลา ดังนั้นจากภาวะจำเป็นข้างต้นจึงควรจะทำให้การลดช่วงเวลาการเก็บและส่งข้อมูลให้สั้นลงที่สุดเท่าที่จะทำได้ และเมื่อมองจากสมการแล้วจะพบว่าในการควบคุมแต่ละจังหวะการควบคุมจะใช้ค่า gain ที่ต่างกัน เพื่อที่จะมาคำนวณหาค่าอินพุต ถึงแม้ว่าส่วนของการหาค่า gain จะใช้แบบคำนวณแล้วเก็บค่าไว้ล่วงหน้าก่อนก็ตาม แต่การใช้ค่า gain ที่มากค่าจะทำให้เกิดความล่าช้ากับการคำนวณค่าได้ ดังนั้นในจุดนี้สามารถที่จะลดเวลาได้โดยการใช้ค่า gain ของระบบที่สภาวะ steady state ซึ่งเป็นค่าคงที่ขุดเดียวตลอดการควบคุม การหาค่า gain ที่สภาวะ steady state จะมีวิธีการหาได้หลายวิธีเช่น Riccati equation, Hamiltonian matrix, Eigenstructure Assignment โดยสรุปแล้วจะเป็นการหาค่าของ S_{∞} แล้วนำมาแทนค่าเพื่อหาค่า gain ที่สภาวะ steady state

สำหรับการประมาณค่าสเททของระบบแบบจำลอง การประมาณค่าสเททจะใช้เมื่อระบบแบบจำลองไม่สามารถทำการวัดค่าสเททได้ หรือไม่ต้องการวัดค่าสเททนั้น ดังนั้นการควบคุมจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องประมาณค่าตัวแปรสเททเหล่านี้เพื่อที่จะได้นำสเททที่ประมาณค่าไปใช้ในการควบคุมต่อไปในจุดนี้จะเห็นว่าระบบที่สเททไม่สามารถทำการวัดค่าได้หรือว่าจะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพงซึ่งทำให้ต้องการหลีกเลี่ยงสิ่งเหล่านี้จึงหันมาใช้การประมาณค่าแทน แต่ถ้าใช้การประมาณค่าในระบบการควบคุมแล้วจะพบว่าจะทำให้ระบบมีตัวแปรเพิ่มขึ้นมาในการควบคุมซึ่งทำให้เสียเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ช่วงเวลาการเก็บและส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น ทำให้การควบคุมติดตามระบบได้ไม่ดีเท่ากับระบบที่มีช่วงเวลาการเก็บและส่งข้อมูลที่แคบได้ สำหรับวิธีประมาณค่าสเททที่จะแสดงจะใช้ 2 แบบคือ state observer และ Kalman filter ซึ่งทั้งสองระบบมีลักษณะที่เหมือนกันที่จะประมาณตัวแปรทั้งหมดของระบบ แต่ระบบของ Kalman filter จะให้ข้อดีกว่าที่เป็นระบบการประมาณค่าที่สามารถจำกัด noise ของระบบและเครื่องมือวัด รูปแบบของการ

ควบคุมประกอบกับการใช้ observer ในการควบคุมระบบแบบจำลองสามารถแสดงดังนี้



จากแผนภาพจะแสดงการควบคุมระบบแบบจำลองโดยใช้ controller และ observer สำหรับรูปแบบของสมการที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถทำการออกแบบได้ 2 แบบคือ การออกแบบในลักษณะของ continuous system และการออกแบบในลักษณะของ digital system สำหรับการวิจัยจะใช้วิธีการออกแบบ ลักษณะของ digital system ซึ่งเป็นระบบที่ใกล้เคียงต่อสภาวะการทำงาน สำหรับรูปแบบของสมการของ state observer จะมีรูปแบบดังนี้

discrete state space model

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

$x(k) \in R^n$ เป็น ตัวแปรสถานะ

$u(k) \in R^m$ เป็น อินพุตที่จะส่งเข้าระบบ

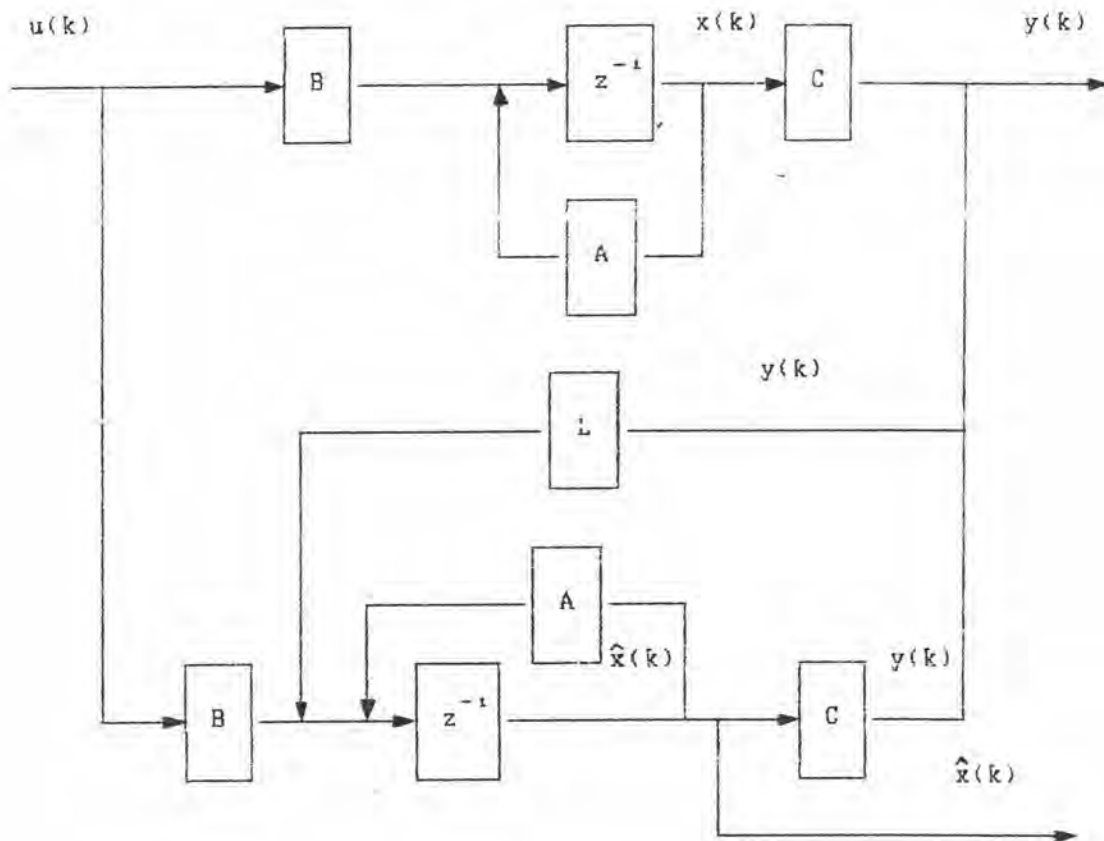
$y(k) \in R^p$ เป็น ค่าของสแตตที่ทำการวัดได้

observer dynamics

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k))$$

จากสมการสามารถเขียนเป็นผังการควบคุมเพื่อทำให้เห็นรูปแบบการควบคุมระบบแบบจำลองและ

จะได้นำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมการควบคุมต่อไป



จากแผนภาพด้านบนแสดงแผนผังการจำลองระบบการควบคุมของ controller และ observer เมทริกซ์ L เรียกว่า observer gain สามารถทำการหาค่าได้หลายแบบโดยมีวิธีการหาค่าคล้ายกับแบบการหา controller gain เช่นวิธีการหาโดยใช้ observer characteristic polynomial, Ackerman's formular, deatbeat observer แต่สำหรับในส่วนนี้จะออกแบบเช่นเดียวกับการออกแบบชุด controller โดยการใช้ discrete algebraic Riccati equation ซึ่งจะได้รูปแบบของสมการดังนี้

$$P(k) = AP(k+1)A^T + Q - AP(k+1)C^T (R + CP(k+1)C^T)^{-1} CP(k+1)A^T$$

$$L(k) = AP(k+1)C^T (R + CP(k+1)C^T)^{-1}$$

สมการข้างต้นเรียกว่า observer algebraic Riccati equation สำหรับการหาค่าเมทริกซ์ L นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ระบบจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้ (C, A) ต้องเป็น observable

(A, \sqrt{Q}) ต้องเป็น reachable

สำหรับในส่วนของ discrete Kalman filter ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีเกี่ยวกับการลดสัญญาณรบกวนของระบบ หรือ สัญญาณจากการวัด สำหรับสมการที่จะนำมาใช้งานมีรูปแบบดังนี้

system with noise

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Gw(k)$$

$$y(k) = Cx(k) + v(k)$$

$w(k)$ = process noise เป็นการแทนสัญญาณรบกวนหรือความไม่แม่นยำของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์

$v(k)$ = measurement noise เป็นการแทนความไม่แม่นยำในการวัด

kalman gain

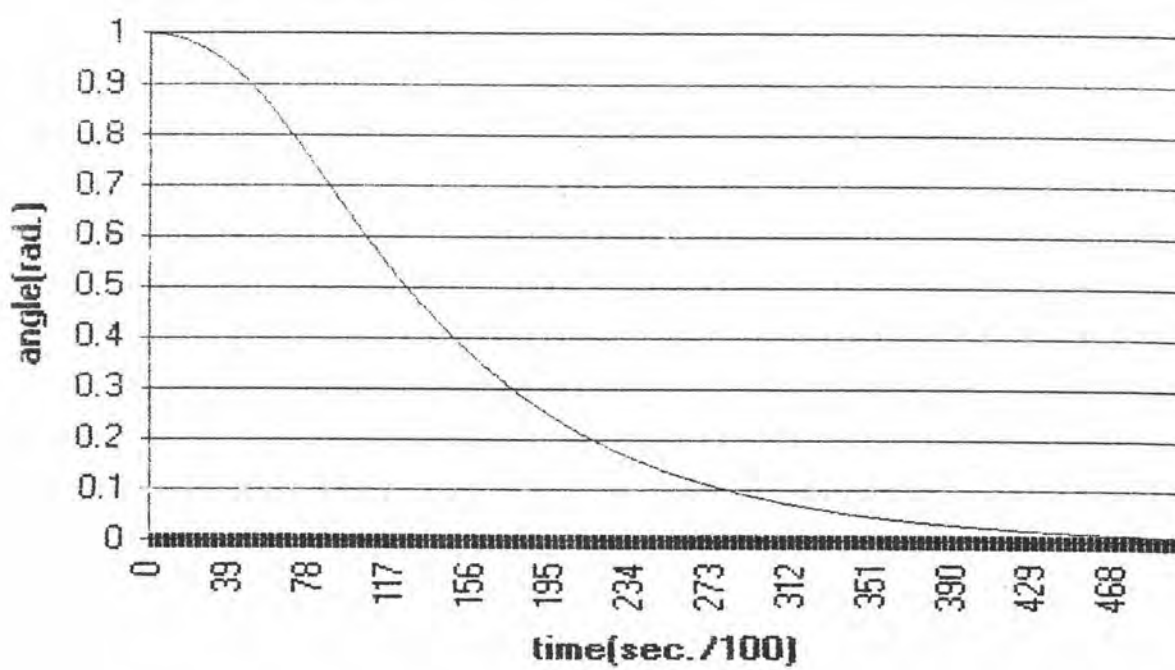
$$K(k) = P(k)C^T (CP(k)C^T + R)^{-1}$$

Estimate Recursion

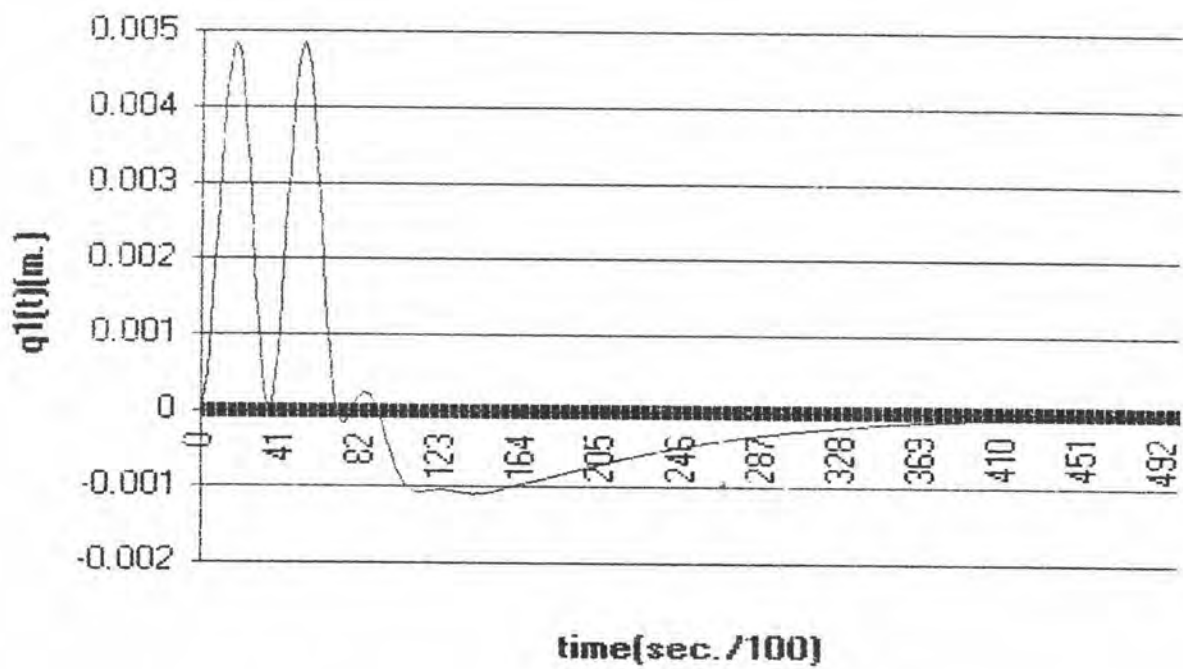
$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + AK(k)(y(k) - Cx(k))$$

Error Covariance Recursion

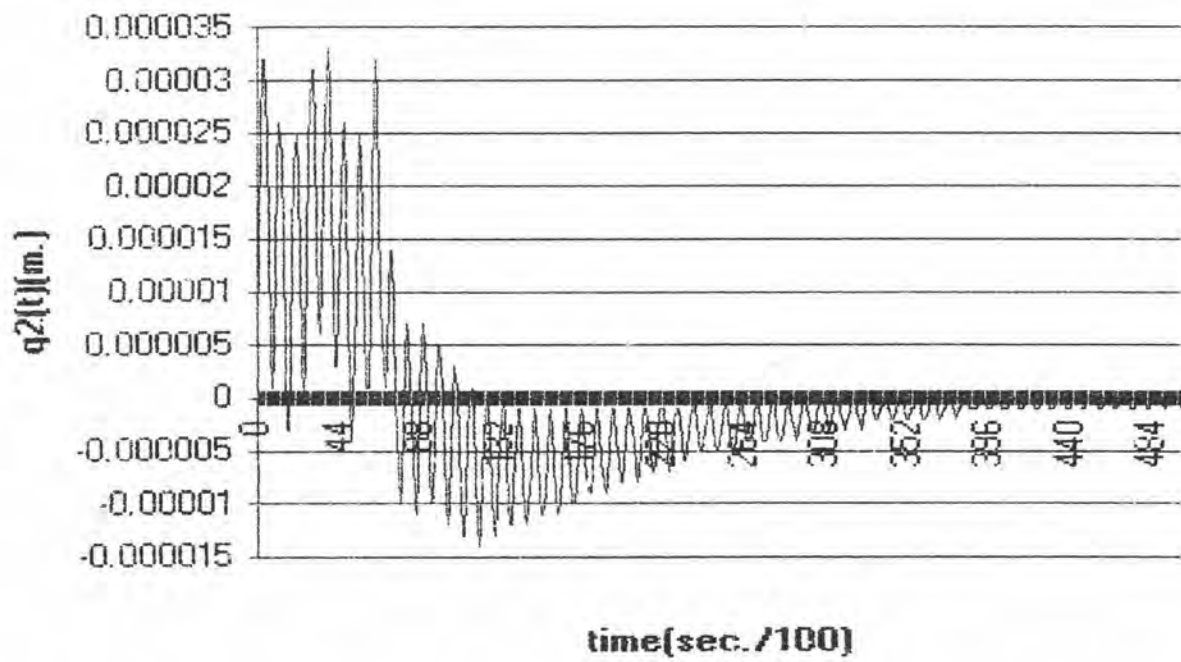
$$P(k+1) = AP(k)A^T - P(k)C^T (CP(k)C^T + R)^{-1} CP(k)A^T + GQG^T$$



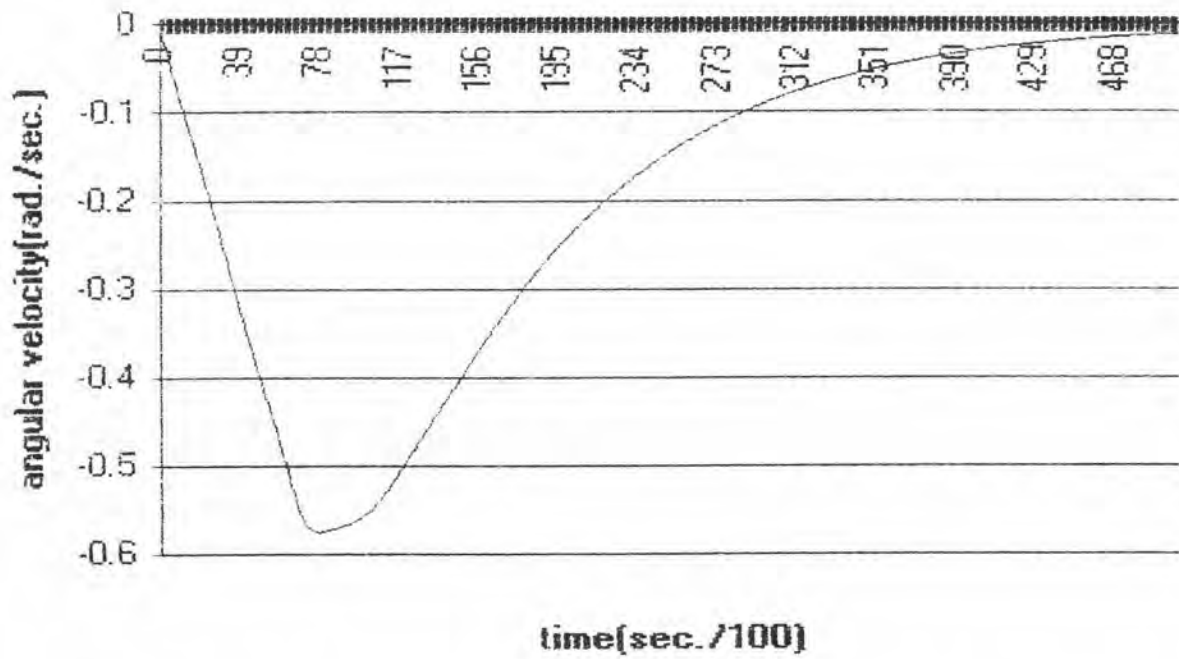
รูปที่ ง.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม-เวลา โดยใช้ state observer



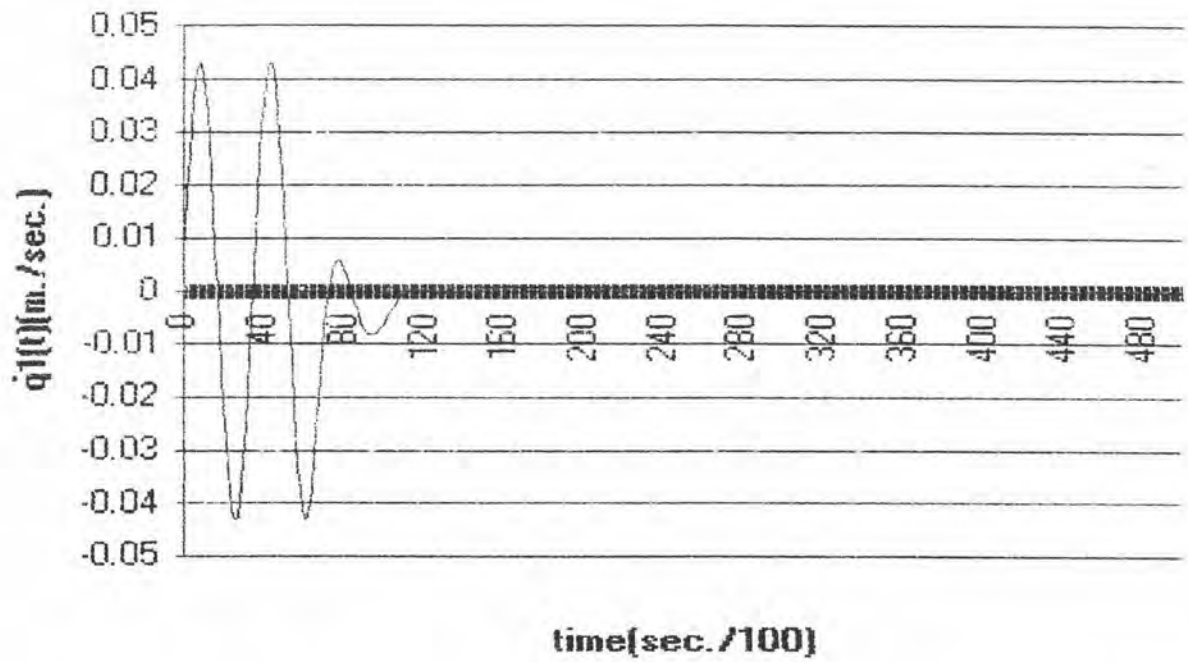
รูปที่ ง.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_1(t)$ -เวลา โดยใช้ state observer



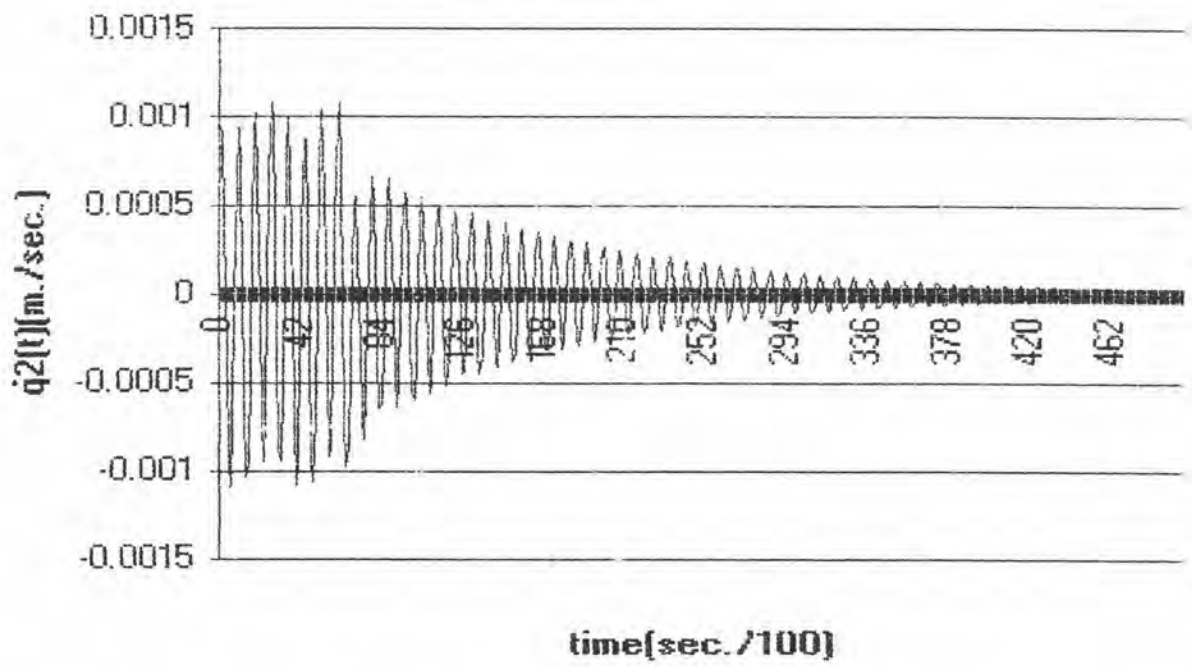
รูปที่ ง.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_2(t)$ -เวลา โดยใช้ state observer



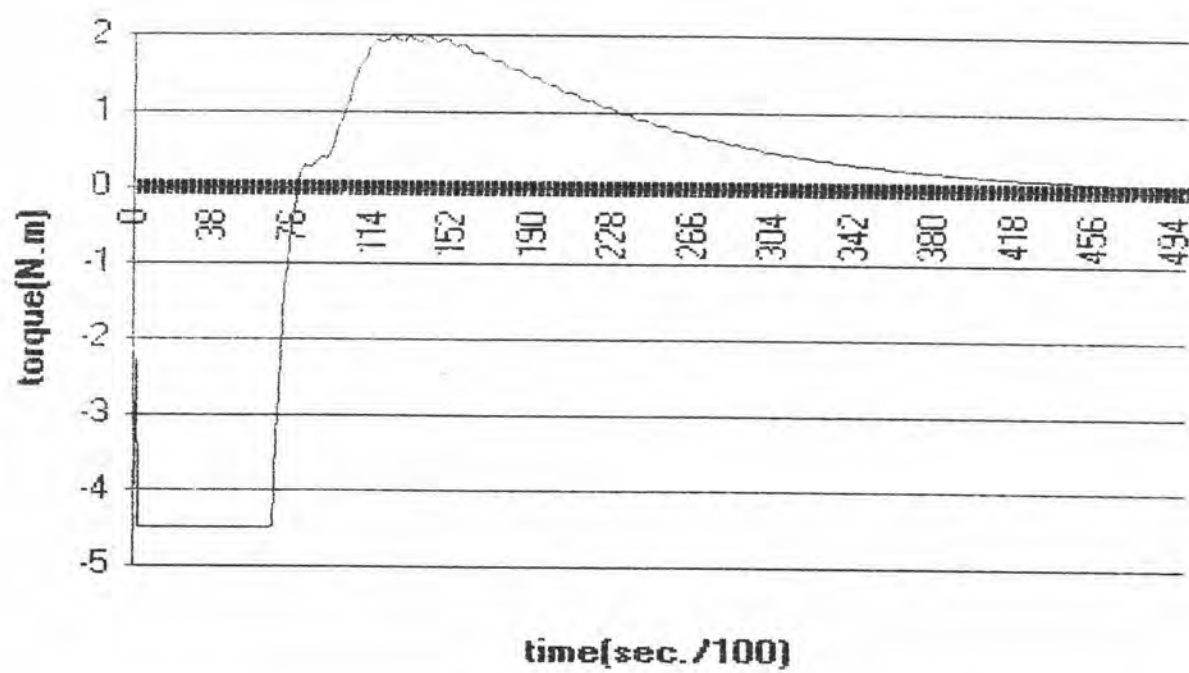
รูปที่ ง.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วเชิงมุม -เวลา โดยใช้ state observer



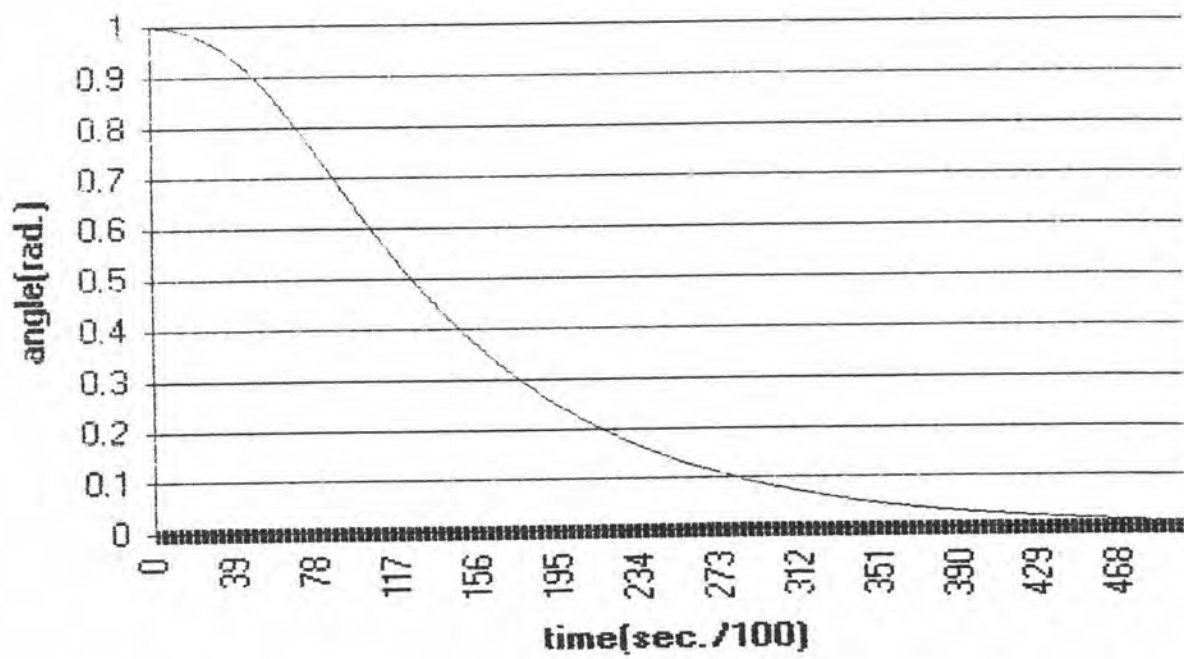
รูปที่ ง.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_1(t)$ -เวลา โดยใช้ state observer



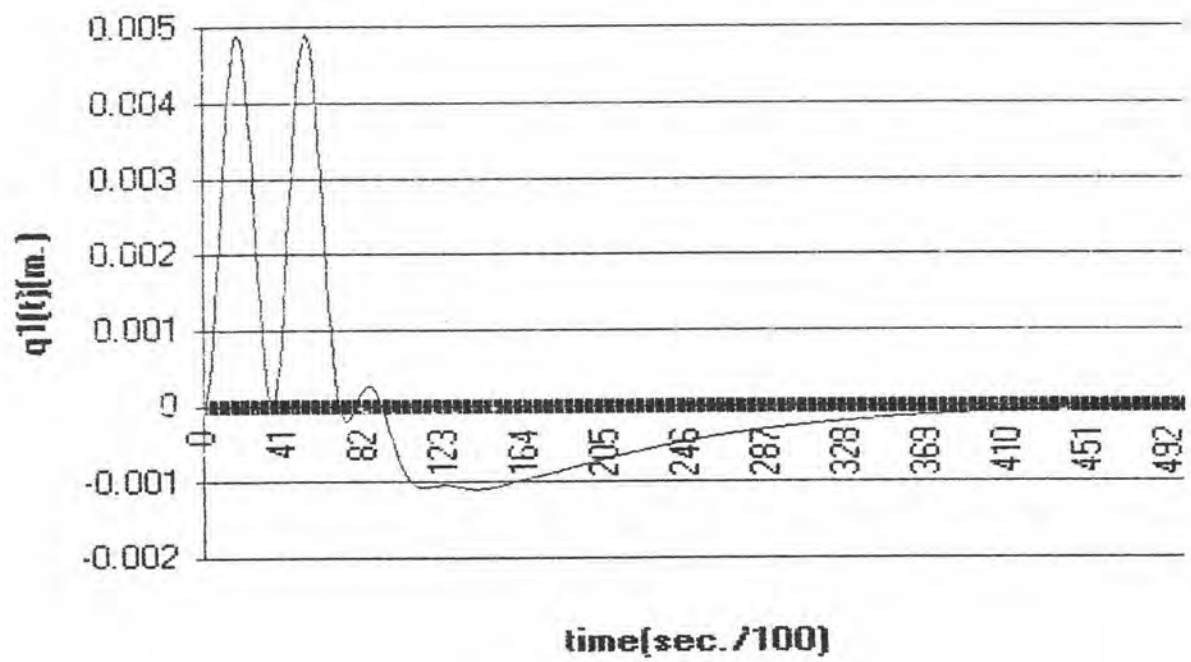
รูปที่ ง.๖ แสดงความล้ามน้ระหว่าง $\dot{q}_2(t)$ -เวลา โดยใช้ state observer



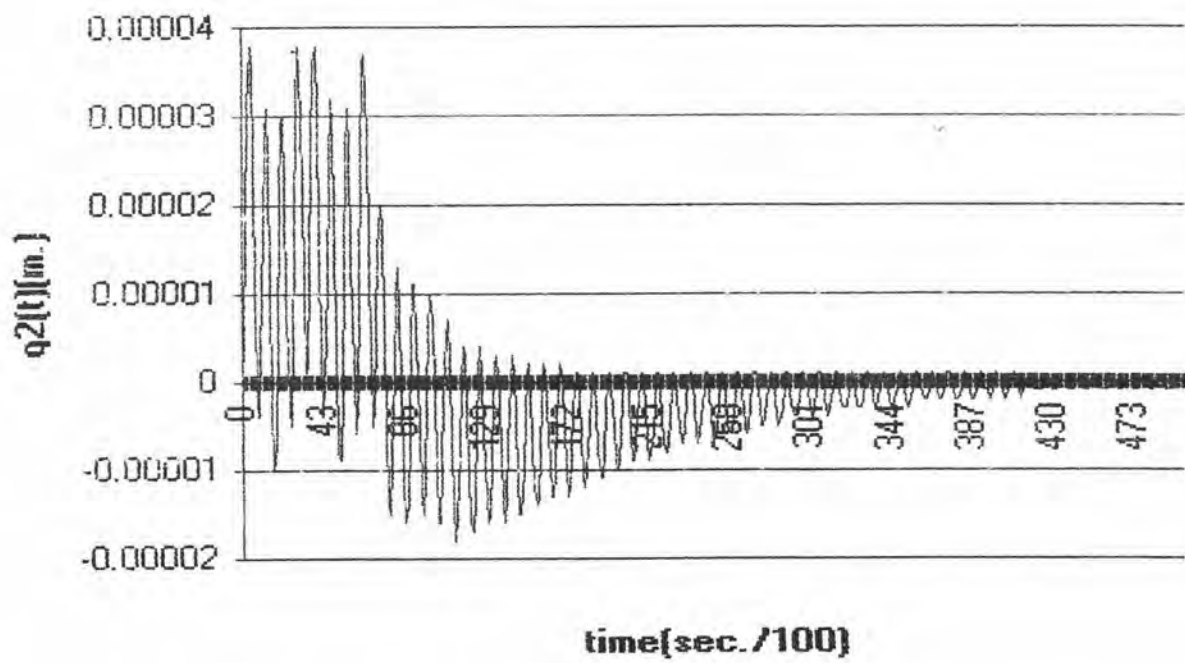
รูปที่ ง.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์ก -เวลา โดยใช้ state observer



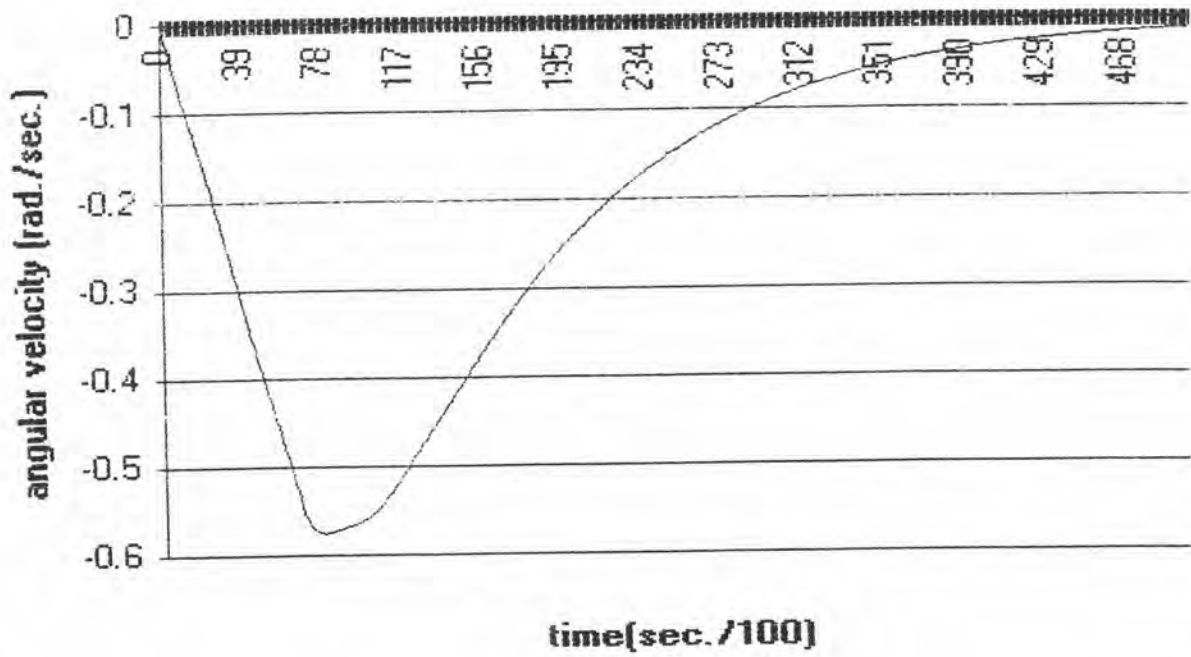
รูปที่ ง.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุม-เวลา โดยใช้ Kalman filter



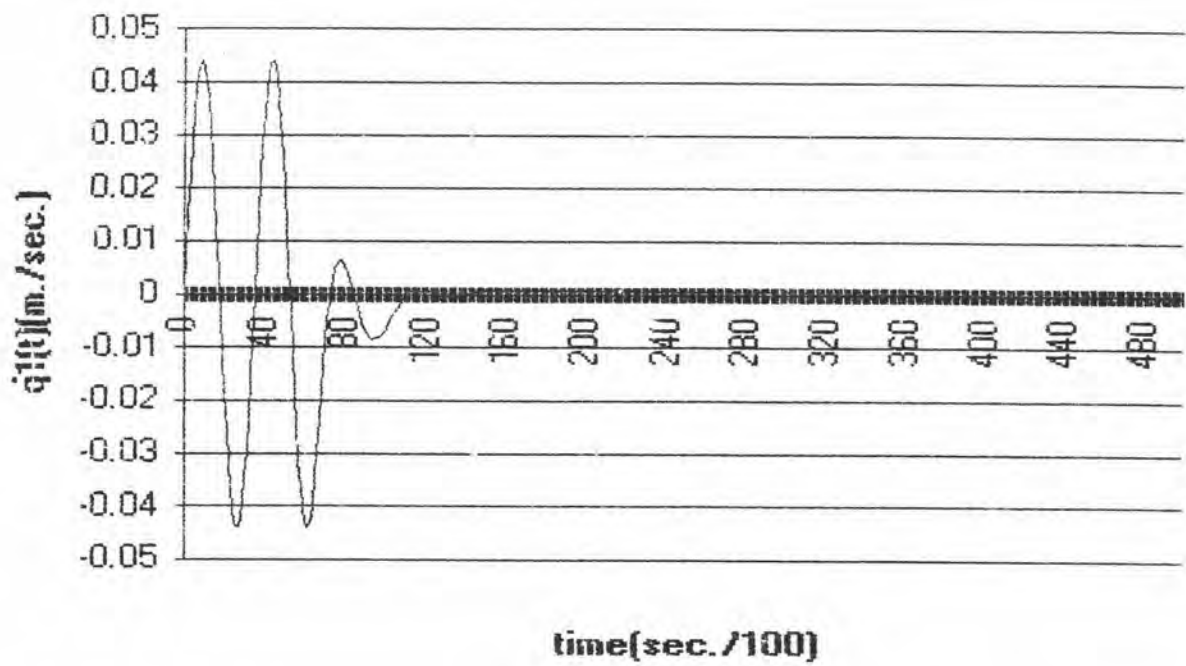
รูปที่ ง.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_1(t)$ -เวลา โดยใช้ Kalman filter



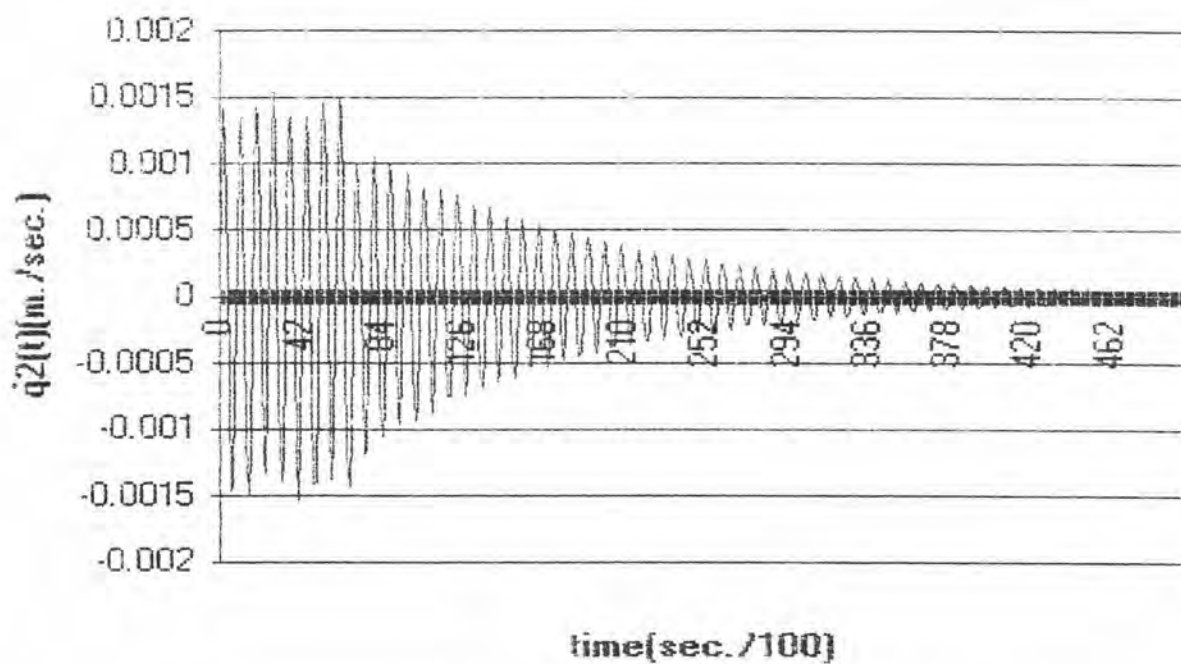
รูปที่ ง.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_2(t)$ -เวลา โดยใช้ Kalman filter



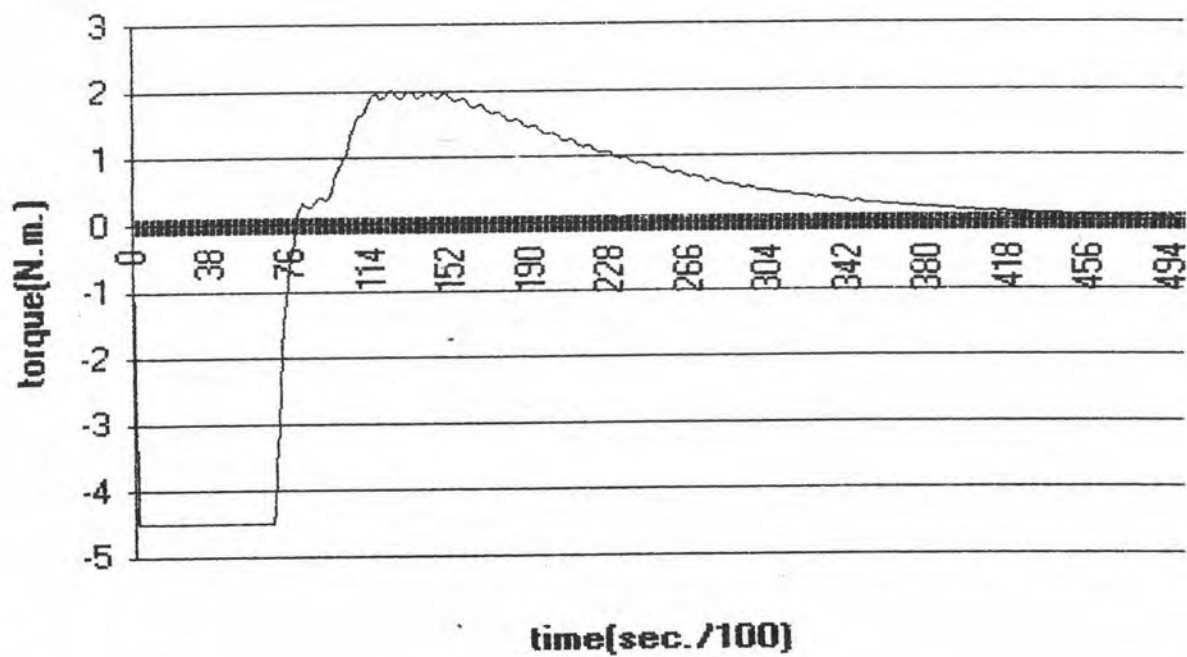
รูปที่ ง.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วเชิงมุม-เวลา โดยใช้ Kalman filter



รูปที่ ๑.๑๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_1(t)$ -เวลา โดยใช้ Kalman filter



รูปที่ ๑.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $q_2(t)$ -เวลา โดยใช้ Kalman filter



รูปที่ ง.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์ค -เวลา โดยใช้ Kalman filter

ภาคผนวก จ

การนอร์มอลไลซ์สำหรับโหมดเฉพ

จากบทที่ 2 สมการการหาค่าการโก่งตัวของแขนจะประกอบด้วยผลรวมของการคูณของสมการโหมดเฉพและสมการตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา จำนวนเทอมของผลรวมจะเท่ากับจำนวนโหมดเฉพที่ใช้ในการพิจารณาสำหรับงานวิจัยจะใช้ 2 โหมดเฉพ ดังนั้นสมการการหาระยะการโก่งตัวเท่ากับ

$$u_1(x_1, t) = \phi_1(x_1)q_1(t) + \phi_2(x_1)q_2(t)$$

$$m = \int_m \phi_1^2(x_1) dm = \int_m \phi_2^2(x_1) dm$$

และค่าของโหมดเฉพที่ใช้ในสมการลากรานจ์ (Lagrange's equation) จึงมีความสัมพันธ์เป็น

$$m_1 = \int_m \phi_1^{*2}(\xi) dm$$

$$m_2 = \int_m \phi_2^{*2}(\xi) dm$$

สำหรับค่าของโหมดเฉพกรณีของ pin free สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi_1^*(\xi) = \sin(\beta\xi) - \sinh(\beta\xi) + \delta [-\cos(\beta\xi) + \cosh(\beta\xi) - (2I^*/\beta^2)\sinh(\beta\xi) + (2I^*/\beta^2)\xi] \dots\dots (32)$$

$$\delta = (\sin(\beta) + \sinh(\beta)) / [(-2I^*/\beta^2)\sinh(\beta) + \cos(\beta) + \cosh(\beta)]$$

$$\beta^4 = \rho\omega^2 l^4 / EI$$

$$I^* = \rho l^3 / I_0$$

สำหรับค่าของโหมดเฉพกรณีของ clamp free สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi_2^*(\xi) = \sin(\beta\xi) - \sinh(\beta\xi) + \delta[-\cos(\beta\xi) + \cosh(\beta\xi)] \quad \dots\dots(34)$$

$$\delta = (\sin(\beta) + \sinh(\beta)) / (\cos(\beta) + \cosh(\beta))$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของ $\phi^*(\xi)$ กับ $\phi(x_1)$ เป็น

$$\sqrt{m/m_1} \phi_1^*(\xi) = \phi_1(x_1)$$

$$\sqrt{m/m_2} \phi_2^*(\xi) = \phi_2(x_1)$$

สำหรับค่าความเครียดจะได้สมการดังนี้

$$e_1 = (c/l^2) [(\partial^2 \phi_1^*(\xi_1) / \partial \xi^2) (\sqrt{m/m_1}) q_1(t) + (\partial^2 \phi_2^*(\xi_1) / \partial \xi^2) (\sqrt{m/m_2}) q_2(t)]$$

และค่าของการโก่งตัวของแนบจะได้

$$u(x_1, t) = \phi_1(\xi_1) (\sqrt{m/m_1}) q_1(t) + \phi_2(\xi_1) (\sqrt{m/m_2}) q_2(t)$$

เมื่อ $\xi_1 = x_1/l$

ภาคผนวก ฉ

สำหรับเมทริกซ์ที่ใช้ในระบบ controller และ observer

$$[S] = \begin{bmatrix} 800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 800 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 800 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix}$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} 6E+5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6E+5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6E+5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6E+5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = 2$$

controller gain

$$[K] = [18.2509 \quad -152.2272 \quad 694.8328 \quad 23.4669 \quad -62.0609 \quad -61.2133]$$

observer gain

$$[L] = \begin{bmatrix} 0.988503 & -0.009796 & -0.008211 & -0.000853 \\ -0.011896 & 0.99464 & -0.020255 & -0.008459 \\ -0.013509 & -0.013057 & 0.738795 & -0.015515 \\ -0.023636 & 0.25847 & 0.614050 & 0.977072 \\ -0.025604 & -1.021069 & -1.682565 & 0.251552 \\ 0.138284 & 0.090141 & -47.96096 & -0.095102 \end{bmatrix}$$

ระยะทาง(-)	โหนดเชฟที่ 1	โหนดเชฟที่ 2	โหนดเชฟที่ 3
0.003436	0.000039	0.000268	-0.000584
0.200000	0.120809	0.625768	-0.978127
0.300000	0.258501	1.095424	-1.223713
0.324750	0.299063	1.196071	-1.189400
0.500000	0.644954	1.495370	-0.032081
0.600000	0.877320	1.244400	0.766439
0.650000	1.000000	1.000000	1.000000
0.800000	1.384473	-0.115464	0.639280
0.900000	1.648082	-1.057415	-0.369200
1.000000	1.913360	-2.048881	-1.617456

ตารางที่ จ.1 โหนดเชฟสำหรับแขนแผ่นหนา โดยไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน



ระยะทาง(-)	โหมดเซฟที่ 1	โหมดเซฟที่ 2	โหมดเซฟที่ 3
0.010180	0.000186	-0.001194	0.003434
0.200000	0.065352	-0.320655	0.668462
0.300000	0.139515	-0.561186	0.838463
0.400000	0.234745	-0.730546	0.586984
0.500000	0.346314	-0.765402	0.028776
0.600000	0.469801	-0.636287	-0.519391
0.700000	0.601249	-0.349041	-0.729264
0.800000	0.737320	0.061326	-0.447143
0.900000	0.875474	0.544090	0.236662
0.989800	1.000000	1.000000	1.000000

ตารางที่ น.2 โหมดเซฟสำหรับแขนผ่านบาง โดยไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ระยะทาง(-)	โหนดเซฟที่ 1	โหนดเซฟที่ 2	โหนดเซฟที่ 3
0.010180	0.000183	-0.001221	0.003383
0.200000	0.064660	-0.328754	0.657146
0.300000	0.138202	-0.576824	0.822094
0.400000	0.232838	-0.753728	0.571727
0.500000	0.343972	-0.794424	0.021409
0.600000	0.467296	-0.667913	-0.515017
0.700000	0.598920	-0.378896	-0.714680
0.800000	0.735527	0.038080	-0.429278
0.900000	0.874535	0.531818	0.248372
0.989800	1.000000	1.000000	1.000000

ตารางที่ ฉ.3 ค่าโหนดเซฟสำหรับแขนกลผ่านบางคู่ โดยไม่ใส่น้ำหนักที่ปลายแขนกล

ระยะทาง(-)	โหนดเซฟที่ 1	โหนดเซฟที่ 2	โหนดเซฟที่ 3
0.003436	0.000037	0.000166	-0.000625
0.200000	0.116880	0.405026	-1.118224
0.300000	0.251750	0.734810	-1.511144
0.324750	0.291762	0.811220	-1.512393
0.500000	0.637394	1.144667	-0.421841
0.600000	0.873846	1.097582	0.590053
0.650000	1.000000	1.000000	1.000000
0.800000	1.400834	0.439044	1.256140
0.900000	1.679721	-0.100557	0.519368
1.000000	1.962375	-0.701217	-0.650463

ตารางที่ ฉ.4 โหนดเซฟสำหรับแขนขนาดแผ่นหนา โดยใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ระยะทาง(-)	โหมตเซฟที่ 1	โหมตเซฟที่ 2	โหมตเซฟที่ 3
0.010180	0.000176	-0.002252	0.011305
0.200000	0.062436	-0.630578	2.347260
0.300000	0.133975	-1.143850	3.179560
0.400000	0.226678	-1.568540	2.654890
0.500000	0.336390	-1.780930	0.913526
0.600000	0.459161	-1.706800	-1.215011
0.700000	0.591338	-1.327960	-2.662540
0.800000	0.729679	-0.679721	-2.670500
0.900000	0.871464	0.161151	-1.161310
0.989800	1.000000	1.000000	1.000000

ตารางที่ ฉ.5 โหมตเซฟสำหรับแขนกลแผ่นบาง โดยใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

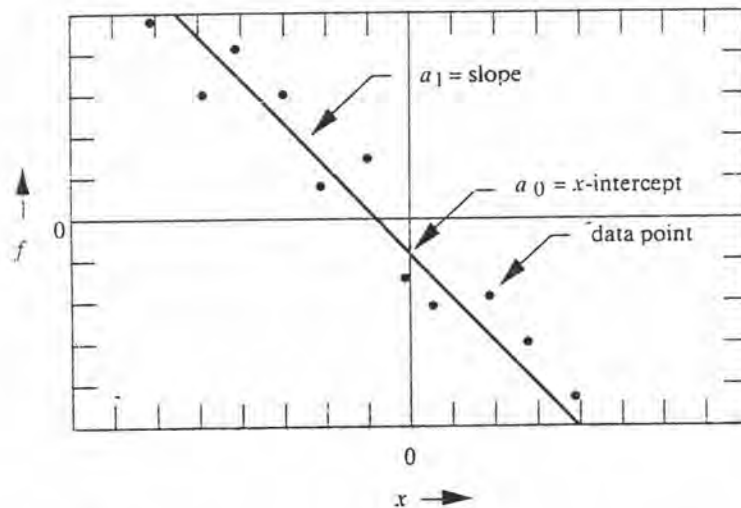
ระยะทาง(-)	โหนดเซฟที่ 1	โหนดเซฟที่ 2	โหนดเซฟที่ 3
0.010160	0.300177	-0.001735	0.005371
0.200000	0.062756	-0.480343	1.086707
0.300000	0.134586	-0.863174	1.428356
0.400000	0.227570	-1.167859	1.117002
0.500000	0.337492	-1.299390	0.264764
0.600000	0.460347	-1.203688	-0.689962
0.700000	0.592448	-0.871998	-1.230078
0.800000	0.730537	-0.337404	-1.035758
0.900000	0.871915	0.336891	-0.139130
0.989800	1.000000	1.000000	1.000000

ตารางที่ ๘.6 โหนดเซฟสำหรับแขนแผ่นบางคู่ โดยใส่น้ำหนักที่ปลายแขน

ภาคผนวก ช

วิธีการสร้างกราฟของข้อมูลแบบกำลังสองถดถอย

least square fitting เป็นวิธีการสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรงหรือเส้นโค้งที่ถุกวิเคราะห์ ดังนั้นผลรวมของยกกำลังสองของความแตกต่างของฟังก์ชันและข้อมูลควรมีค่าน้อยที่สุด สำหรับการสร้างตรงของข้อมูลที่ถุกทำการวัด โดยข้อมูลที่ถุกทำการวัดจะได้เป็น $f(x_i)$ ที่แต่ละค่าของ x_i เมื่อ i เปลี่ยนแปลงจาก 1 ไปยัง m และค่าที่ถุกวัดได้จะเป็น f_i เส้นตรงที่ได้จากฐานข้อมูลจะมีรูปแบบ $f(x) = a_0 + a_1 x$



รูปที่ ช.1 แสดงการสร้างเส้นตรงสำหรับข้อมูลทดสอบ

ข้อมูลที่ถุกจัดไว้เพื่อหาสมการพร้อมๆกัน

$$f_1 = a_0 + a_1 x_1$$

$$f_2 = a_0 + a_1 x_2$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$f_m = a_0 + a_1 x_m$$

เนื่องจากมีหลายสมการซึ่งมากกว่าตัวที่ต้องการรู้ค่า คือ a_0 และ a_1 ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องให้สมการทุกสมการให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องพร้อมกัน สำหรับนิยามความแตกต่างระหว่าง f_t และ ปริมาณ $a_0 + a_1 x_t$ เป็นค่าตัวแปร R_t

$$R_t = f_t - a_0 - a_1 x_t$$

ดังนั้นงานที่จะต้องทำคือการหาค่าตัวแปร a_0 และ a_1 โดยที่ผลรวมยกกำลังสองของ R_t มีค่าน้อยที่สุด

$$\sum R_t^2 = \text{minimum}$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่งเท่ากับศูนย์

$$\frac{\partial (\sum R_t^2)}{\partial a_0} = 2 \sum R_t \frac{\partial R_t}{\partial a_0} = 0$$

$$\text{และ } \frac{\partial (\sum R_t^2)}{\partial a_1} = 2 \sum R_t \frac{\partial R_t}{\partial a_1} = 0$$

จากสมการข้างบนทั้งสองสามารถแทนได้ด้วย

$$\sum (f_t - a_0 - a_1 x_t)(-1) = 0$$

$$\sum (f_t - a_0 - a_1 x_t)(-x_t) = 0$$

จัดรูปแบบของสมการข้างต้นเพื่อหาค่าตัวแปร จะได้

$$\sum f_t = m a_0 + a_1 \sum x_t$$

$$\text{และ } \sum f_t x_t = a_0 \sum x_t + a_1 \sum x_t^2$$

$$\text{ดังนั้น } a_0 = (\sum f_t \sum x_t^2 - \sum f_t x_t \sum x_t) / (m \sum x_t^2 - (\sum x_t)^2)$$

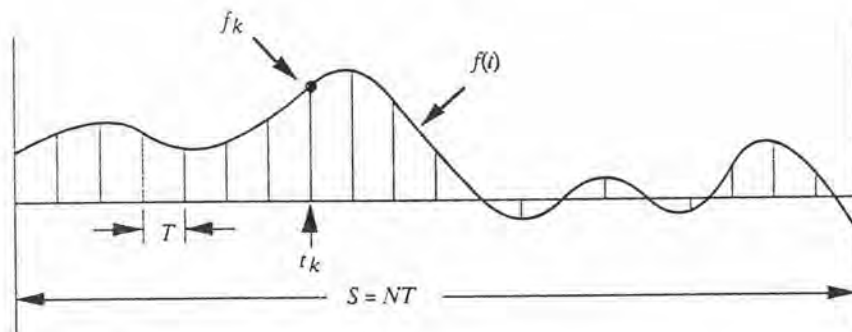
$$a_{t_1} = (m \sum f_{t_1} x_{t_1} - \sum f_{t_1} \sum x_{t_1}) / (m \sum x_{t_1}^2 - (\sum x_{t_1})^2)$$

rms deviative

$$= \sqrt{(1/(m-2)) \sum R_{t_1}^2}$$

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบฟูเรียร์

Discrete Fourier Transform (DFT) เป็นการพิจารณาแทนรูปแบบของสัญญาณคาบด้วยส่วนประกอบย่อยของฟังก์ชัน sine และ cosine ซึ่งโดยมากแล้วสัญญาณจะประกอบด้วยรูปแบบของสัญญาณที่แตกต่างกันหลายแบบ รูปแบบของสัญญาณ $f(t)$ จะถูกวัดค่าเป็นช่วงๆ จำนวน N ครั้ง จาก $t_0 = 0, t_1 = T, t_k = kT, \dots, t_{N-1} = (N-1)T$ โดยช่วงเวลาการวัดทั้งหมดจะเป็น $S = NT$



รูปที่ ๒.๒ แสดงการเก็บข้อมูลที่ช่วงเวลาห่างกันเท่ากับ T

เมื่อใช้ $f_k = f(t_k)$ ดังนั้น DFT ของ f_k จะนิยามเป็น

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i n k / N}$$

ข้อสังเกต

$$e^{i\phi} = \cos\phi + i\sin\phi, e^{-i\phi} = \cos\phi - i\sin\phi, e^0 = e^{2\pi i} = 1, e^{-2\pi i} = -1$$

ความหมายของสัมประสิทธิ์ของ DFT เช่น F_0 จะเป็นสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ที่ความถี่ 0, F_1 เป็นสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ที่ความถี่ 1 (1 cycle per S) และ F_n เป็นสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ที่ความถี่ n (n cycle per S)

ดังนั้นสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ที่จะคำนวณจะได้

$$F_0 = \sum_{k=0}^{N-1} f_k$$

จากนิยามของ DFT ดังนั้น Fourier amplitude สำหรับกรณี cycle per S ต่างๆกัน สำหรับกรณี $n = N$

$$F_N = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i k} = \sum_{k=0}^{N-1} f_k = F_0$$

สำหรับกรณี $n = N + n$

$$F_{N+n} = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i k} e^{-2\pi i k n / N} = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i k n / N} = F_n$$

สำหรับกรณี $n = N - n$

$$F_{N-n} = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i k} e^{2\pi i k n / N} = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{2\pi i k n / N}$$

ถ้า f_k เป็นจำนวนจริง ดังนั้น $F_{N-n} = F_n^*$ และ $F_{N/2}$ เป็นจำนวนจริง (* นิยามแทน complex conjugate) $F_{N/2}$ เป็นสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ที่ความถี่ $N/2$ (1 cycle per $2T$) ความถี่นี้เป็นความถี่สูงสุดซึ่ง DFT จะสามารถพิจารณาได้ แต่ละสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ F_n เป็นแบบ complex ซึ่งส่วนของจำนวนจริงจะแทนในส่วนของ cosine-like amplitude และส่วนของ imaginary จะแทนในส่วนของ sine-like amplitude สำหรับขนาดจะสามารถหาได้จาก

$$G = \sqrt{\text{Re}(F_n)^2 + \text{Im}(F_n)^2}$$

สำหรับ phase angle θ_n จะได้

$$\theta_n = \text{Im}(F_n) / \text{Re}(F_n)$$

Fast Fourier Transform , FFT เป็นวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้คำนวณ discrete Fourier transform , DFT โดยการคำนวณ DFT โดยตรงจะต้องใช้การคูณเท่ากับ N^2 ครั้ง และการบวก $N(N-1)$ ครั้ง สำหรับ FFT ต้องการการคูณ $N \log_2 N$ ครั้ง และการบวก $2N \log_2 N$ ครั้ง

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2\pi i k n / N} = \sum_{k=0}^{N-1} f_k W^{nk}$$

เมื่อนิยามให้ $W = e^{-2\pi i / N}$ และ $W^0 = W^N = 1$ และใช้ความสัมพันธ์ $W^{N+nk} = W^{nk}$

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & 1 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$

สำหรับวิธีการที่ทำให้วิธีของ FFT มีประสิทธิภาพคือการ factorization ของ matrix ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการสลับ row

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} F_0 \\ F_2 \\ F_1 \\ F_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^2 & 1 & W^2 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & W^2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



5/68¹⁴⁵

ประวัติผู้เขียน

นาย สมชาย เลียงเสนาะ เกิดเมื่อวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2508 ที่ อำเภอ
พระประแดง จังหวัด สมุทรปราการ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา วิศวกรรมเครื่องกล จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และเข้าศึกษาในระดับ
ปริญญาโท สาขา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการ
ศึกษา 2533