เอกสารอ้างอิง

Cadzow, James A., Martens, Hinrich R., Discrete-Time and Computer Control System, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1970.

D'Souza, A. Frank, Garg, Vijay K., Advanced Dynamics : Modeling and Analysis, p.131-147, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1984.

Franklin, Gene F., Powell, J. David and Workman, Michael L., Digital Control of Dynamic Systems, Addison-Wiley Publishing Company , Massachusetts, 1990.

Hannema, Dirk P., "Implementation and Performance Evaluation of a Computer Controlled Master Slave Manipulator with Variable Characteristics" , M.S. thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, 1979.

Kuo, Benjamin C. , Analysis and Synthesis of Sampled-Data Control Systems, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1963.

Kuo, Benjamin C. , Automatic Control Systems, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 4th Ed., 1982.

Palm III, William J. , Modeling Analysis and Control of Dynamic Systems, John Wiley & Sons, New York, 1983.

Schultz, D. G., Melsa, J. L. , State Functions and Linear Control Systems, McGraw-Hill Inc., New York, 1967.

Thring, M. W., Robots and Telechirs, Ellis Horwood Ltd.,Chichester , 1983.

Tou, Julius T., Modern Control Theory, McGraw-Hill Inc., New York, 1964.

Vertut, J., Coiffet, P., Teleoperation and Robotics : Applications and Technology, Kogan Page Ltd., London, 1985.

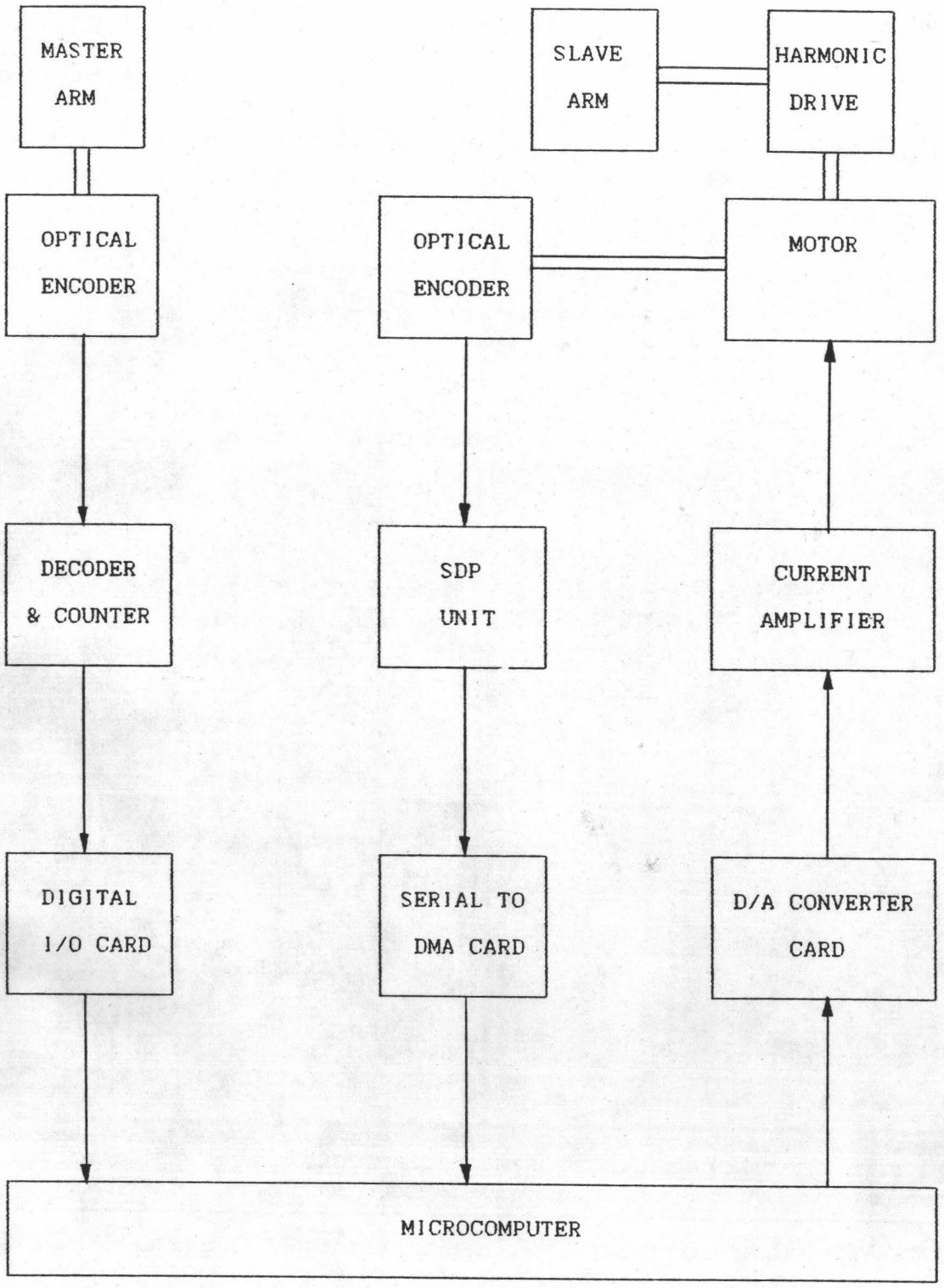
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม

ส่วนประกอบของระบบแขนกล

แขนกลที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ มีทั้งหมด 2 ตัว คือ แขนกลที่เคลื่อนที่นำ (MASTER MANIPULATOR ARM) และแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม (SLAVE MANIPULATOR ARM) แขนกลทั้งสองเป็นแขนกลที่มี 2 ข้อต่อ เป็นข้อต่อแบบหมุน (REVOLUTE JOINT) เคลื่อนที่ได้ในแนวระดับ ที่ตำแหน่งข้อต่อแต่ละข้อต่อจะมีออปติคัลเอ็นโคดเดอร์ (OPTICAL ENCODER) ติดตั้งอยู่เพื่อใช้วัดตำแหน่งเชิงมุมขณะที่มีการเคลื่อนที่ ส่วนความเร็วของการเคลื่อนที่จะหาได้โดยใช้การคำนวณจากโปรแกรม แขนกลที่เคลื่อนที่ตามจะมีขนาดใหญ่กว่าแขนกลที่เคลื่อนที่นำ และเคลื่อนที่ด้วยกำลังขับจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร (PERMANENT MAGNET D.C. SERVOMOTOR) ผ่านชุดเกียร์ทดชนิดฮาร์โมนิคไดรฟ์ (HARMONIC DRIVE) ซึ่งมีความหลวม (BACKLASH) น้อยมาก การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เคลื่อนที่ตามให้สามารถเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เคลื่อนที่นำจะใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจะนำข้อมูลอ้างอิงที่เก็บได้จากแขนกลที่เคลื่อนที่นำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อ่านได้จากแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม แล้วจะทำการคำนวณสัญญาณควบคุมที่จะส่งไปควบคุมมอเตอร์ของข้อต่อแต่ละข้อต่อ จากนั้นจะส่งสัญญาณควบคุมผ่านแผ่นวงจรสำหรับแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอก (DIGITAL TO ANALOG CONVERTER CARD) ไปยังวงจรขยายสัญญาณ (CURRENT AMPLIFIER) ซึ่งจะทำการขยายสัญญาณจากสัญญาณเข้าที่เป็นแรงดันไปเป็นสัญญาณออกที่เป็นกระแส เพื่อส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งจะส่งแรงบิดผ่านชุดของเกียร์ทดไปขับเคลื่อนข้อต่อของแขนกลที่เคลื่อนที่ตามต่อไป จากนั้นก็จะอ่านข้อมูลจากแขนกลทั้งสองเข้ามาอีก และดำเนินการตามขั้นตอนข้างต้นต่อไป จนกระทั่งหมดข้อมูลอ้างอิง หรือหมดพื้นที่ในหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูล หรือเลิกจากการควบคุม แล้วแต่กรณี (ดูรูปที่ ก.1)



รูปที่ ก.1 แสดงส่วนประกอบของระบบการควบคุมแขนกลมาสเตอร์-สเลฟ

<u>รายละเอียดของอุปกรณ์</u>

1. ไมโครคอมพิวเตอร์ เป็นไมโครคอมพิวเตอร์AT 16 บิท (IBM COMPATIBLE) ทำงานที่ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา 16 เมกกะเฮิร์ท ติดตั้งตัวช่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (MATH CO-PROCESSOR)

2. แผ่นวงจรสำหรับแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอก เป็นแผ่นวงจรสำหรับเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอล 8 บิท ให้เป็นสัญญาณอนาลอกที่มีค่าแรงดันอยู่ในช่วง -10 ถึง 10 โวลท์ มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$V_{out} = -0.07581\ D_{IN} + 9.7037$ สำหรับช่องสัญญาณที่ 1

$V_{out} = -0.07594\ D_{IN} + 9.7474$ สำหรับช่องสัญญาณที่ 2

โดยที่

V_{out} = สัญญาณแรงดันที่ออก มีหน่วยเป็นโวลท์

D_{IN} = ข้อมูลสัญญาณดิจิตอลที่รับเข้ามา

3. แผ่นวงจรดิจิตอลอินพุทเอ้าท์พุท เป็นแผ่นวงจรสำหรับรับส่งสัญญาณดิจิตอล ใช้ส่งข้อมูลได้ 8 บิท และ ใช้รับข้อมูลได้ 40 บิท

4. แผ่นวงจรสำหรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบซีเรียลให้แก่ดีเอ็มเอ เป็นแผ่นวงจรสำหรับส่งสัญญาณดิจิตอลแบบซีเรียลเข้าไปเก็บไว้ในดีเอ็มเอ (DIRECT MEMORY ACCESS) ของไมโครคอมพิวเตอร์

5. วงจรประมวลข้อมูลเซอร์โว (SERVO DATA PROCESSOR UNIT ;SDP) เป็นหน่วยประมวลผลชนิดแผ่นวงจรเดี่ยว (SINGLE BOARD) ที่ใช้ Z-80 เป็น CPU ทำหน้าที่คำนวณข้อมูลตำแหน่งและความเร็วจากข้อมูลที่ได้รับมาจากออฟติคัลเอ็นโคดเดอร์และสัญญาณนาฬิกา แล้วส่งออกแบบซีเรียล

6. ออฟติคัลเอ็นโคดเดอร์ เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งชนิดดิจิตอลโดยใช้หลักการของแสงตัดผ่านช่อง ซึ่งจะให้สัญญาณออกเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม 2 ช่องที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ออฟติคัลเอ็นโคดเดอร์ที่ใช้สำหรับแขนกลที่เคลื่อนที่นำ มีความละเอียด 1000 PULSE/รอบ ออฟติคัลเอ็นโคดเดอร์ ที่ใช้สำหรับแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม มีความละเอียด 2048 PULSE/รอบ

7. ดีโคดเดอร์และวงจรนับ (DECODER AND COUNTER) เป็นอุปกรณ์สำหรับถอด

รหัสสัญญาณจากออฟติคัลเอ็นโคดเดอร์ให้เป็นสัญญาณบอกตำแหน่ง

8. วงจรขยายสัญญาณ (CURRENT AMPLIFIER) จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากสัญญาณเข้าที่เป็นแรงดันไปเป็นสัญญาณออกที่เป็นกระแสเพื่อส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรขยายสัญญาณที่ใช้เป็นของบริษัท ROBBINS AND MYERS , สหรัฐอเมริกา MODEL LA-5600 มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$I_{out} = 2.2026\ V_{IN}$$

โดยที่

I_{out} = สัญญาณกระแสที่ออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์

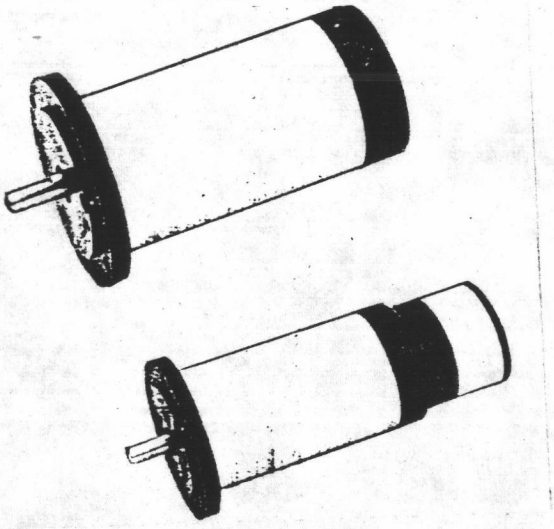
V_{IN} = สัญญาณแรงดันที่เข้า มีหน่วยเป็นโวลท์

9. มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ขับเคลื่อนระบบ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงของบริษัท ELECTRO-CRAFT CORPORATION , สหรัฐอเมริกา มอเตอร์สำหรับข้อต่อที่ 1 เป็น MODEL 0643-33-004 มอเตอร์สำหรับข้อต่อที่ 2 เป็น MODEL M-1040 WINDING TYPE A มีรายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ ก.2 และ รูปที่ ก.3

10. ชุดเกียร์ทดฮาร์โมนิคไดรฟ์ เป็นชุดเกียร์ที่ใช้ถ่ายทอดแรงบิดจากมอเตอร์ให้แก่ข้อต่อของแขนกล มีความหลวม (BACKLASH) น้อยมาก มีอัตราทด 1:160

640 Series Industrial Standard Products

The 640 Series permanent magnet DC servo motors are designed to meet the demanding requirements of today's industrial applications — fast acceleration and deceleration, improved commutation, maximum torque at low speed, and high torque to inertia ratio.



AVAILABLE OPTIONS:
OPTICAL ENCODER MODELS R-80
FEATURES:

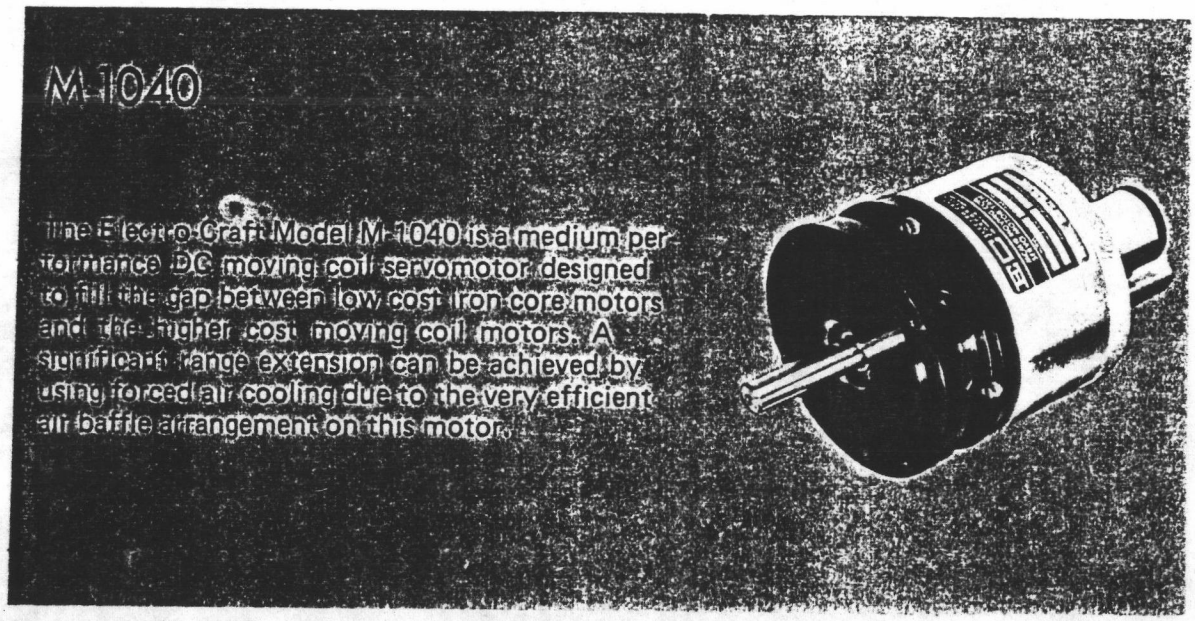
- Standard 14V/krpm tachometer (2% max. peak to peak ripple at 500 rpm)
- Sealed terminal box with conduit connector

PERFORMANCE CHARACTERISTICS

MOTOR RATINGS (@ 155°C Armature Temp.)	0643-33-004
Continuous Stall Torque (lb-in) (25°C Ambient Temp.)	9.7
Peak Torque (lb-in)	45
Maximum Terminal Voltage (V)	60
MEHCANICAL DATA	
Rotor Movement of Inertia (lb-in-sec^2)	0.0019
Mechanical Time Constant (ms)	4.2
Damping Constant (lb-in/krpm)	0.16
Thermal Resistance (°C/watt)	2.2
Maximum Armature Temperature (°C)	155
Maximum Friction Torque (lb-in)	0.5
Maximum Shaft Radial Load (lb) (1 in. from front bearing continuous)	30
Motor Weight (including tachometer) (lb)	10
WINDING DATA (Class F Insulation)	
K_T Torque Constant ± 10% (lb-in/A)	1.05
K_E Voltage Constant ± 10% (V/krpm)	12.4
Winding Resistance * ± 15% @ 25°C (Ω)	0.32
Electrical Time Constant (ms)	1.5
Maximum Continuous Speed (rpm)	4300
Maximum Pulse Current (A)	43
Armature Inductance (mH)	0.7
Tachometer ± 10% (V/krpm) ± 15% Resistance (Ω)	 14.2 110
640 — Motor Only Configuration	0643-03-003

* Plus 30 Ω for terminal resistance.

รูปที่ ก.2 แสดงรายละเอียดของมอเตอร์สำหรับข้อต่อที่ 1



HOW TO ORDER

To order, you must supply sales model number.
Order Codes are shown below in color

M-1040 – _____ /110 – _____ – S
motor winding — tach winding — for special

Winding	Torque Constant (K_T) (oz. in/amp ± 10%	Voltage Constant (K_E) (Volts/KRPM) ± 10%	Winding Resistance (Ohms) ± 15% (+ 0.15 ohms for terminal resistance)	Armature Inductance (Millihenries)	Max. Pulse Current (Amps) (to avoid demagnetization)
A	5.8	4.3	0.70	0.09	60

MOTOR RATINGS	Uncooled
Maximum Safe Speed (no load)	7 krpm
Maximum Speed at Rating Load	4 krpm
Rated Torque (continuous at stall)	35 oz. in.
Rated Power Output	80 W
Power Rate (continuous)	14 KW/sec
Power Rate (peak)	1425 KW/sec
No Load Acceleration at Maximum Continuous Torque	58000 rad/sec^2
No Load Acceleration at Maximum Pulse Torque	580,000 rad/sec^2
Maximum Rated Armature Temp.	155°C
Maximum Static Friction Torque	2.5 oz. in.
Electrical Time Constant	0.1 msec
Mechanical Time Constant	2.3 msec
Damping Factor	1.0 oz. in./krpm
Armature Moment of Inertia (including bearings)	
1/2 in. Dia. Shaft, Mtr. Tach	0.00072 oz. in. s^2

รูปที่ ก.3 แสดงรายละเอียดของมอเตอร์สำหรับข้อต่อที่ 2

ภาคผนวก ข

โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม

โครงสร้างของโปรแกรม

ในการทำการวิจัย จำเป็นจะต้องมีโปรแกรมสำหรับใช้ในการทดลองควบคุมระบบควบคุมอัตโนมัติของแขนกล จึงได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นด้วยภาษา C โดยใช้ COMPILER ชื่อ TURBO C VERSION 2.0 ของบริษัท BORLAND INTERNATIONAL , สหรัฐอเมริกา ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ ข.1

การใช้งานโปรแกรมจะใช้ระบบเมนูเป็นหลัก ซึ่งในแต่ละเมนูจะประกอบด้วยเมนูย่อย ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันไป การเลือกเมนูกระทำได้โดยการกด ENTER หรืออักษรตัวใหญ่ประจำเมนูนั้น หน้าที่ของแต่ละเมนูพอจะอธิบายได้ ดังนี้

1. File เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับจัดการเกี่ยวกับแฟ้มข้อมูลและเลิกจากการใช้โปรแกรม ในคำสั่งนี้จะประกอบด้วยคำสั่งย่อย 5 คำสั่ง ได้แก่

1.1 Load data ใช้สำหรับอ่านแฟ้มข้อมูลที่ต้องการจากแผ่นเก็บข้อมูล (DISKETTE) มาไว้ในหน่วยความจำ (MEMORY) แฟ้มข้อมูลต้องมีชื่อสกุลเป็น PRN เท่านั้น

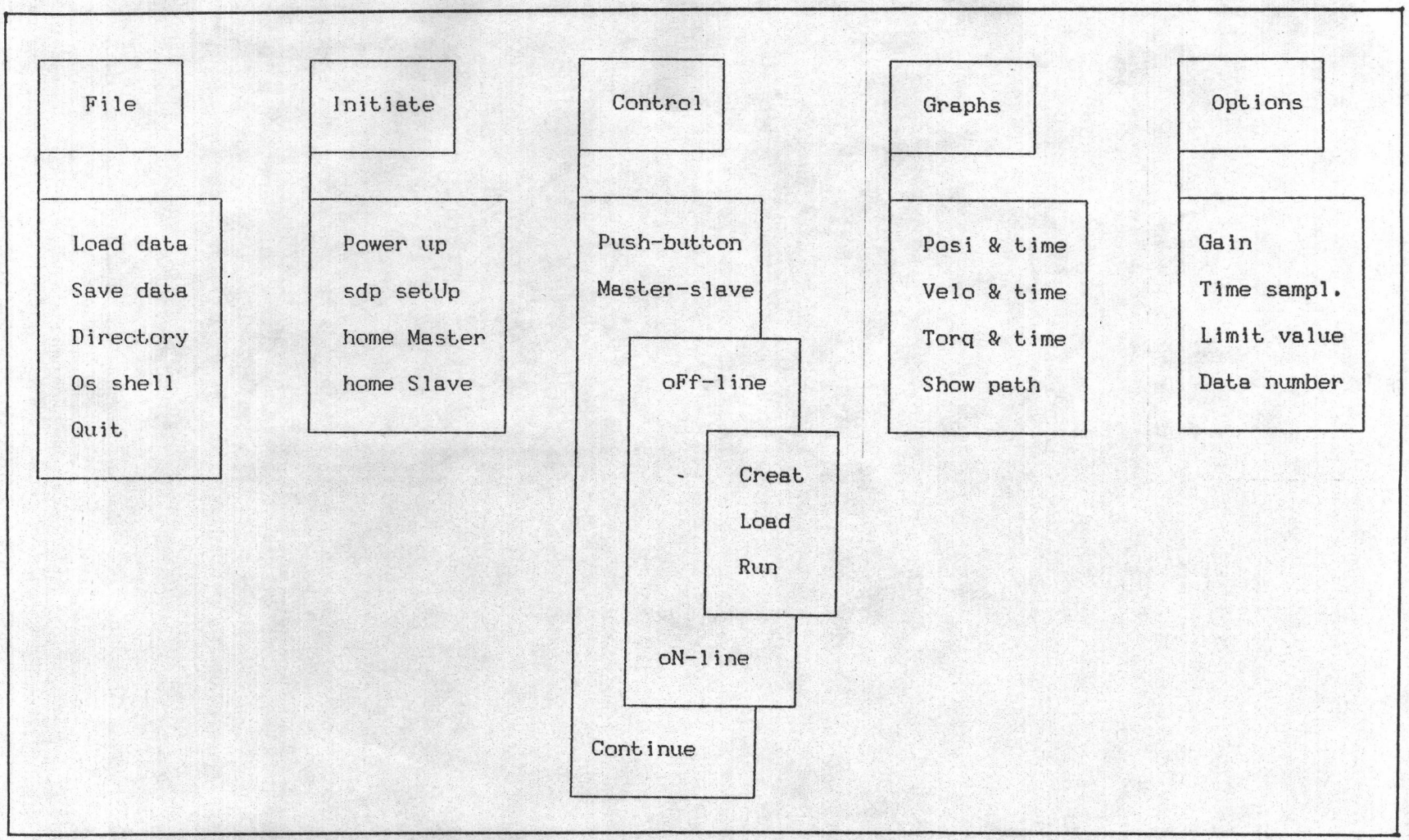
1.2 Save data ใช้สำหรับเก็บข้อมูลที่ต้องการจากหน่วยความจำลงในแผ่นเก็บข้อมูล ชื่อของแฟ้มข้อมูลต้องมีชื่อสกุลเป็น PRN เท่านั้น

1.3 Directory ใช้สำหรับดูชื่อของแฟ้มข้อมูลที่ต้องการจากแผ่นเก็บข้อมูล

1.4 Os shell ใช้เมื่อต้องการใช้คำสั่งจากระบบปฏิบัติการ (OPERATING SYSTEM) ของเครื่องชั่วคราว สามารถกลับสู่โปรแกรมเดิมด้วยการพิมพ์ EXIT และกดปุ่ม ENTER

1.5 Quit ใช้สำหรับเลิกการใช้โปรแกรม

2. Initiate เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับเริ่มต้นการควบคุม ในคำสั่งนี้จะประกอบ



รูปที่ ข.1 แสดงโครงสร้างทั้งหมดของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม

ด้วยคำสั่งย่อย 4 คำสั่ง ได้แก่

2.1 Power up ใช้สำหรับเริ่มต้นการทำงานของระบบเมื่อเริ่มเปิดเครื่อง

2.2 sdp setUp ใช้สำหรับเริ่มต้นการทำงานของเครื่อง SERVO DATA PROCESSOR

2.3 home Master ใช้สำหรับเริ่มต้นการทำงานของแขนกลที่เคลื่อนที่นำ

2.4 home Slave ใช้สำหรับเริ่มต้นการทำงานของแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม

3. Control เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับการสั่งงานและควบคุมแขนกลจุฬา2 แบ่งเป็นคำสั่งย่อย 3 คำสั่ง ได้แก่

3.1 Push-button ใช้สั่งงานและควบคุมแขนกลโดยผู้ใช้

3.2 Master-slave ใช้สั่งงานและควบคุมแขนกลโดยคอมพิวเตอร์ โดยมีคำสั่งย่อยอีก 2 คำสั่ง คือ

3.2.1 oFf-line ใช้สั่งงานและควบคุมแขนกลโดยใช้แฟ้มข้อมูลอ้างอิงที่เก็บเอาไว้ในแผ่นเก็บข้อมูลก่อน มีคำสั่งย่อย 3 คำสั่ง คือ

3.2.1.1 Creat ใช้เก็บข้อมูลอ้างอิงเอาไว้ในแผ่นเก็บข้อมูล ชื่อของแฟ้มข้อมูลต้องมีชื่อสกุลเป็น MAS เท่านั้น

3.2.1.2 Load ใช้อ่านแฟ้มข้อมูลอ้างอิงที่ต้องการจากแผ่นเก็บข้อมูลมาไว้ในหน่วยความจำ แฟ้มข้อมูลต้องมีชื่อสกุลเป็น MAS เท่านั้น

3.2.1.3 Run ใช้สั่งงานและควบคุมแขนกลโดยใช้แฟ้มข้อมูลอ้างอิงที่เก็บอยู่ในหน่วยความจำ

3.2.2 oN-line ใช้สั่งงานและควบคุมแขนกลโดยการอ่านข้อมูลอ้างอิงจากแขนกลที่เคลื่อนที่นำ แล้วส่งไปควบคุมแขนกลที่เคลื่อนที่ตามในเวลาจริงทันที

3.3 Continue ใช้สั่งงานและควบคุมแขนกลโดยการอ่านข้อมูลอ้างอิงจากแขนกลที่เคลื่อนที่นำแล้วส่งไปควบคุมแขนกลที่เคลื่อนที่ตามในเวลาจริงทันที เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.2 แต่จะไม่เก็บข้อมูลไว้ในหน่วยความจำ

4. Graphs เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลในรูปของกราฟ แบ่งเป็นคำสั่งย่อย 4 คำสั่ง ได้แก่

4.1 Posi & time ใช้แสดงข้อมูลระหว่างตำแหน่งและเวลา

4.2 Velo & time ใช้แสดงข้อมูลระหว่างความเร็วและเวลา

4.3 Torq & time ใช้แสดงข้อมูลระหว่างแรงบิดและเวลา

4.4 Show path ใช้แสดงทางเดินของแขนกลบนระนาบ X-Y

5. Options เป็นคำสั่งที่ใช้สำหรับแก้ไขค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ตั้งไว้ แบ่งเป็นคำสั่งย่อย 4 คำสั่ง ได้แก่

5.1 Gain ใช้สำหรับแก้ไขค่าเกน

5.2 Time sampl. ใช้สำหรับแก้ไขคาบเวลาในการสุ่ม

5.3 Limit value ใช้สำหรับแก้ไขค่าจำกัดของตำแหน่งและความเร็ว

5.4 Data number ใช้สำหรับแก้ไขจำนวนของข้อมูลที่ต้องการจะเก็บไว้ในหน่วยความจำ

โปรแกรมในส่วนของการควบคุม

โปรแกรมในส่วนของการควบคุมออนไลน์ (ON-LINE) มีรายละเอียดดังนี้

```
/*  On-line controller for the CHULA2 manipulator arm  */

extern float data[TOTAL_DATA][11];
extern int dataend;
extern int timeout;

void Online_controller (void)
{
  int n;

  init_master ();
  home_slave ();
  AMP_ready ();
```

```
    n = 0;
    timeout = tsamp*1000 - tcompute;
    while ( bioskey (1) == 0 )
    {
       data[n][0] = n*tsamp;
       in_ref_state (n);
       in_act_state ();
       calc_torque ();
       out_torque (T_operating);
       data_collect (n);
       delay (timeout);
       n++;
       if ( n > dnum )
       {
          MHC_active ();
          dataend = dnum - 1;
          lowlevel_reset ();
          errormsg ("EXCESSIVE POINTS OF CONTROL.");
          return;
       }
    }
    MHC_active ();
    dataend = n - 1;
    lowlevel_reset ();
    msg ("END OF MASTER-SLAVE ON-LINE CONTROL MODE.");
}
```

ประวัติผู้เขียน

นาย สมชาย ธนูธรรมาคุณ เกิดเมื่อวันที่ 24 เดือนกรกฎาคม พุทธศักราช 2507 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยมอันดับ 1) จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2529