# รายการอ้างอิง


**ภาษาไทย**

สุรินทร์ ปิยะโชคณากุล. พันธุวิศวกรรม : Genetic engineering. ใน พันธุศาสตร์พื้นฐาน. หน้า 131-147. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาพันธุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2537

**ภาษาอังกฤษ**

Brooks, R. A. Achieving artificial intelligence through building robots. MIT AI Lab Memo AIM-899, May. 1986.

_____. A hardware retargetable distributed layered architecture for mobile robot control. Proceedings IEEE Conf. Robotics and Automation, April, pp. 106-110. NC, 1987.

_____. Planning is just a way of avoiding figuring out what to do next. Working Paper 303 MIT AI Lab, September. 1987.

_____. A robot that walks: emergent behavior from a carefully evolved network. MIT AI Memo 1091, February. 1989.

_____. Challenges for complete creature architectures. Proc. First Int. Conf. on Simulation of Adaptive Behavior, MIT Press, pp. 434-443. Cambridge, MA. 1990.

_____. Intelligence without reason. MIT AI Lab Memo AIM-1293, April. 1991.

_____. and Flynn, A. M. MIT mobile robots - what's next?. Proceedings IEEE Conf. Robotics and Automation, Philadelphia. 1988.

_____. and Maes, P. Learning to coordinate behaviors. Proceedings Eight National Conference on Artificial Intelligence, August. 1990.

Chan, K. K. and Zalzala, A. M. S. Genetic-based Minimum-time Trajectory Planning of Articulated Manipulators with Torque constraints. IEE Coollooquium on "Genetic Algrithms for Control Systems Engineering", pp. 4/1-3. 1993.

Chongstitvatana, P. Behaviour based assembly experiments using vision sensing. Proceedings of Vision Interface'91, pp. 21-26. Calgary, Canada. 1991.

_____. The Design and Implementation of Visioon-Based Behaviooural Modules for a Robotic Assembly System. Doctoral dissertation University of Edinburgh, 1992.

Cliff, D. Harvey, I. and Husbands, P. Evolving visually guided robots. Proceedings of SAB92, the Second International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour, MIT Press Bradford Books, Cambridge, MA. 1993.

Connell, J. H. Creature design with the subsumption architecture. Proceedings IJCAI-87, Milan, Italy. August. 1987.

_____. A colony architecture for an artificial creature. PhD. thesis at MIT, MIT AI TR 1151, September. 1989.

Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading, Massachusetts :Addison-Wesley. 1989.

Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor,MI :University of Michigan Press. 1975.

Khoogar, A. R. Parker, J. K. and Goldberg, D. E. Inverse Kinematics of Redundant Robots Using Genetic Algorithms. Proceedings.1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp.271-276, vol. 1. 1989.

_____. and Parker, J. K. Obstacle Avoidance of Redundant Manipulators Using Genetic Algorithms. IEEE Proceedings of SOUTHEASTCON'91. pp.317-320, vol. 1. 1991.

Koza, J. R. Genetically Breeding Populations of Computer Program to Solve Problems in Artificial Intelligence. Proceedings of the 2nd Internatinal IEEE Conferennce on Tools for Artificial Intelligence, pp.819-827. 1990.

_____. Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Fourth printing. Massachusetts :MIT PRESS. 1994.

_____. Genetic Programming II : Automatic Discovery of Reusable Programs. First printing. Massachusetts :MIT PRESS. 1994.

_____. and Rice, J. P. Automatic programming of robots using genetic programming. AAAI-92 Proceedings of Tenth National Conference on Artificial Intelligence, July. 12-16, pp. 194-201. San Jose, California. 1992.

Lazano-Perez, T. Robot programming. MIT AI Lab Memo AIM-698, December. 1982.

_____. and Brooks, R. A. An approach to automatic robot programming. MIT AI Lab Memo AIM-862, April. 1985.

Lewis, M. A. Fagg, A. H. and Solidum, A. Genetic Programming Approach to the Construction of a Neural Network for Control of a Walking Robot. Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp. 2618-23, vol. 3. 1992.

Mel, B. W. Connectionist robot motion planning: A neurally-inspired approach to visually-guided reaching. Perspectives in Artificial Intelligence, volume 7. Boston : ACADEMIC PRESS, Harcourt Brace Jovanovich. 1990.

Michalewicz, Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. New York : Springer-verlag. 1992.

Patnaik, L. M. and Srinivas, M. Genetic algorithms: a survey. IEEE Computer 27 (June 1994): 17-26.

Roetzheim, W. H. Enter the complexity lab. First edition. Indianapolis, Indiana : Sams. 1994.

Rucker, R. Artificial life lab. Corte Madera, California : Waite Group Press. 1993.

Thro, E. Artificial life explorer's kit. First edition. Carmel, Indiana : Sams. 1993.

Treleaven, P. C. Ribeiro Filho, J. L. and Alippi, C. Genetic-algorithms programming environments. IEEE Computer 27 (June 1994): 28-43.

Twardowski, K. An associative architecture for genetic algorithm-based machine learning. IEEE Computer 27 (November 1994): 27-38.

Walnum, C. Adventures in artificial life. Carmel, Indiana : Que. 1993.

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

## รายละเอียดการทำงานของโปรแกรมที่ใช้

งานวิจัยครั้งนี้สามารถแบ่งการทดลองออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของกระบวนการโปรแกรมพันธุการซึ่งอาศัยการจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ และส่วนของการดำเนินการทดลองในโลกจริง ซึ่งแต่ละส่วนของการทดลองมีโปรแกรมที่ใช้แตกต่างกันไป ดังต่อไปนี้คือ

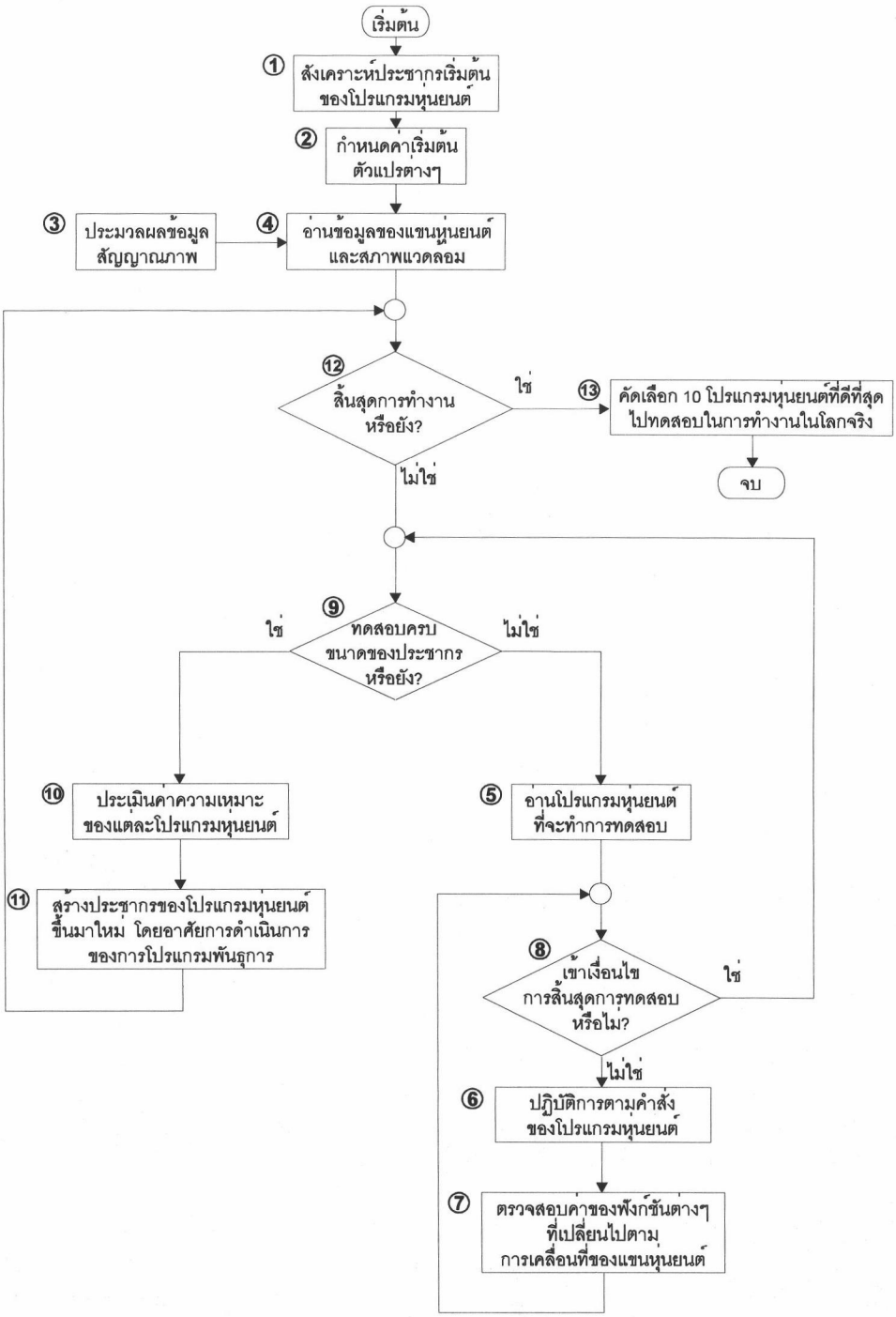
-โปรแกรม PGM_GENER.EXE เป็นโปรแกรมที่ทำการสังเคราะห์ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นทั้งหมดโดยวิธีการสุ่ม

-โปรแกรม GP_SIM.EXE เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในส่วนกระบวนการโปรแกรมพันธุการซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์บนเครื่องคอมพิวเตอร์

-โปรแกรม ACTUAL.EXE เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการดำเนินการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการโปรแกรมพันธุการ เพื่อใช้ในการควบคุมทำงานของแขนหุ่นยนต์ในโลกจริงหรือในสภาพแวดล้อมจริง โดยใช้การประมวลผลข้อมูลภาพจากสัญญาณภาพจากกล้องวิดีโอเป็นข้อมูลอินพุต

ลำดับขั้นตอนการทำงานในการทดลองครั้งนี้ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ ก.1 ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆมีดังต่อไปนี้

1.<u>**สังเคราะห์ประชากรเริ่มต้นของโปรแกรมหุ่นยนต์**</u> เป็นขั้นตอนแรกก่อนที่จะเริ่มกระบวนการโปรแกรมพันธุการ ซึ่งจะใช้โปรแกรม PGM_GENER.EXE โดย




*รูปที่ ก.1 แสดงแผนภูมิผังงานของการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยครั้งนี้*

โปรแกรมนี้จะทำการสังเคราะห์ประชากรโปรแกรมหุ่นยนต์เริ่มต้นทั้งหมดโดยวิธีการสุ่ม ซึ่งโปรแกรมหุ่นยนต์เหล่านี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของการค้นหาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่เหมาะสมในกระบวนการโปรแกรมพันธุการต่อไป

โปรแกรมมีลักษณะการใช้งานดังนี้

C:\>PGM_GENER [Population_Size]

โดยมีค่าโดยปริยาย Population_Size = 40

โปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีชื่อ PROGxx.GP โดย xx แทนด้วยตัวเลขแสดงลำดับของแต่ละโปรแกรม ในแต่ละโปรแกรมจะประกอบด้วยคำสั่งงานต่างๆทั้งที่เป็นฟังก์ชันและเทอร์มินอล ซึ่งเพื่อความสะดวกในการแปลคำสั่งงานต่างๆจึงได้ทำการลดรูปแต่ละคำสั่งให้เหลือเพียง 1 ตัวอักษร ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อารทำงานของโปรแกรมแม้แต่น้อย ดังต่อไปนี้ F = {&, |, ! } และ T = {H, C, I, D, O, 0, 1, 2, 3, 4, 5} โดยที่ & แทนฟังก์ชัน IF-AND, | แทนฟังก์ชัน IF-OR, ! แทนฟังก์ชัน IF-NOT, H แทนเทอร์มินอล HIT?, C แทนเทอร์มินอล SEE?, I แทนเทอร์มินอล INC?, D แทนเทอร์มินอล DEC?, O แทนเทอร์มินอล OUT?, 0 แทนเทอร์มินอล s+, 1 แทนเทอร์มินอล s-, 2 แทนเทอร์มินอล e+, 3 แทนเทอร์มินอล e-, 4 แทนเทอร์มินอล w+ และ 5 แทนเทอร์มินอล w-

2.**<u>กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปรต่าง ๆ</u>** เป็นส่วนเริ่มต้นของการทดลองในส่วนกระบวนการโปรแกรมพันธุการซึ่งเป็นการจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรต่างๆที่ใช้ในทดลอง ยกตัวอย่างเช่น Gen = 0, Success = 0, Dist = 2000 เป็นต้น ทั้งนี้รวมทั้งการจัดสรรหน่วยความจำที่จะใช้เก็บข้อมูลของสภาพแวดล้อมของการทดลองที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลศัญญาณภาพอีกด้วย

3.**<u>ประมวลผลข้อมูลสัญญาณภาพ</u>** เป็นส่วนที่ทำการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณที่ได้จากกล้องวิดีโอ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งจะถูกใช้ในการระบุตำแหน่งของข้อต่อหัวไหล่ ข้อต่อข้อศอก ข้อต่อข้อมือ และปลายแขน ของแขนหุ่นยนต์ รวมทั้งยังถูกใช้ในการระบุตำแหน่งของเป้าหมาย และสิ่งกีดขวางที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และใช้สำหรับการตรวจสอบของฟังก์ชันต่างๆที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้แก่ ฟังก์ชัน HIT?, SEE?, OUT? INC? และ OUT? ข้อมูลต่างๆเหล่าจะถูกจัดเก็บลงในแฟ้มข้อมูลที่ได้กำหนดไว้แล้ว

ข้อมูลของแขนหุ่นยนต์จะถูกจัดเก็บลงแฟ้มข้อมูลชื่อ ARM.DAT ที่เก็บข้อมูลของตำแหน่งของเป้าหมาย, ตำแหน่งของข้อต่อหัวไหล่ซึ่งจะไม่เคลื่อนที่, ความยาวของแขนหุ่นยนต์ส่วนบนจากข้อต่อหัวไหล่ถึงข้อต่อข้อศอก, ความยาวของแขนหุ่นยนต์ส่วนล่างจากข้อต่อข้อศอกถึงข้อต่อข้อมือ และความยาวของปลายแขนแขนหุ่นยนต์จากข้อต่อข้อมือถึงปลายแขน

ข้อมูลของสภาพแวดล้อมต่างๆของการทดลองจะถูกจัดเก็บลงแฟ้มข้อมูลชื่อ ENVIRON.PIC ที่มีลักษณะเป็นแฟ้มข้อมูลฐานสองมีขนาดเท่ากับขนาดของภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ ซึ่งกำหนดไว้คือ กว้างเท่ากับ 250 จุดภาพ และสูง 200 จุดภาพ โดยที่จุดภาพที่เป็นส่วนของเป้าหมายจะมีค่าเท่ากับ 2 ส่วน จุดภาพที่เป็นส่วนของสิ่งกีดขวางจะมีค่าเท่ากับ 4 และจุดภาพที่เป็นส่วนของฉากหลังจะมีค่าเป็น 8

ซึ่งทั้งสองแฟ้มข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในส่วนกระบวนการโปรแกรมพันธุ-การต่อไป

ส่วนนี้เป็นส่วนหนึ่งซึ่งอยู่ในโปรแกรม ACTUAL.EXE

4.**<u>อ่านข้อมูลของแขนหุ่นยนต์และสภาพแวดล้อม</u>** เป็นส่วนเริ่มต้นของทำงานโดยทำการอ่านข้อมูลของแขนหุ่ยนต์จากแฟ้มข้อมูล ARM.DAT ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเก็บไว้ในตัวแปรที่ได้กำหนดไว้แล้ว และทำการอ่านข้อมูลสภาพแวดล้อมจากแฟ้มข้อมูล ENVIRON.PIC ซึ่งข้อมูลจะถูกจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำที่ได้จัดสรรไว้แล้ว ตามลำดับ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในส่วนของการทดสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้เพื่อกำหนดค่าความเหมาะในการแก้ปัญหาแก่โปรแกรมหุ่นยนต์นั้นๆ

5.**<u>อ่านโปรแกรมหุ่นยนต์ที่จะทำการทดสอบ</u>** เมื่อเริ่มทำการทดสอบแต่ละโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกเก็บในรูปของแฟ้มข้อมูลแบบข้อความซึ่งจะถูกอ่านเข้ามาเก็บไว้ในหน่วยความจำในลักษณะที่เหมาะสมแก่การแปลความหมาย

6.**<u>ปฏิบัติการตามคำสั่งของโปรแกรมหุ่นยนต์</u>** เป็นส่วนของการปฏิบัติการตามคำสั่งต่างๆของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ทำการทดสอบ โดยอาศัยค่าของฟังก์ชันต่างที่วัดได้จากข้อมูลตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์และสภาพแวดล้อม ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวแปร 3 ตัวแปรที่กำหนดให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์มีการหมุนขึ้นลงอย่างไร โดยถ้ามีค่าเป็นบวก(+)จะหมุน

ขึ้น, มีค่าเป็นลบ(-)จะหมุนลง และมีค่าเป็นศูนย์(0)จะไม่มีการหมุน ทั้งนี้จะคำนึงถึงเงื่อนไขต่อไปนี้

-เริ่มต้นด้วยการหมุนของข้อต่อหัวไหล่, ข้อต่อข้อศอก และข้อต่อข้อมือตามลำดับ

-แต่ละข้อต่อจะหมุนภายในระยะจำกัดการหมุนที่กำหนดไว้เท่านั้น

-ถ้าการหมุนนั้นทำให้เกิดการชนกับสิ่งกีดขวาง จะมีการตรวจสอบว่าส่วนใดของแขนหุ่นยนต์ชนกับสิ่งกีดขวาง แล้วจะเคลื่อนที่แขนหุ่นยนต์ในทิศทางที่ทำให้ส่วนที่ชนดังกล่าวออกจากการชนจนไม่มีการชน ซึ่งได้กำหนดการหมุนสำหรับการชนของส่วนต่างๆของแขนหุ่นยนต์ทั้ง 6 ส่วนคือ ถ้ามีการชนด้านซ้ายของแขนหุ่นยนต์ส่วนบนจะหมุนข้อต่อหัวไหล่ลง 1 ขั้น, ถ้ามีการชนด้านขวาของแขนหุ่นยนต์ส่วนบนจะหมุนข้อต่อหัวไหล่ขึ้น 1 ขั้น, ถ้ามีการชนด้านซ้ายของแขนหุ่นยนต์ส่วนล่างจะหมุนข้อต่อข้อศอกลง 1 ขั้น, ถ้ามีการชนด้านขวาของแขนหุ่นยนต์ส่วนล่างจะหมุนข้อต่อข้อศอกขึ้น 1 ขั้น, ถ้ามีการชนด้านซ้ายของปลายแขนหุ่นยนต์จะหมุนข้อต่อข้อมือลง 1 ขั้น และถ้ามีการชนด้านขวาของปลายแขนหุ่นยนต์จะหมุนข้อต่อข้อมือขึ้น 1 ขั้น

-ถ้าการหมุนนั้นทำให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของแขนหุ่นยนต์ออกนอกขอบเขตการมองเห็นที่ได้กำหนดไว้ จะต้องทำให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่กลับมาอยู่ภายในขอบเขตการมอง-เห็น โดยมีการตรวจสอบว่าเป็นการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตด้านใด ถ้าเป็นด้านล่างจะบังคับให้ข้อต่อหัวไหล่หมุนขึ้นจนกว่าจะกลับเข้ามา ถ้าเป็นด้านบนและด้านข้างจะบังคับให้ข้อต่อหัวไหล่หมุนลงจนกว่าจะกลับเข้ามา

-ถ้าเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางตัวแปร PAIN ซึ่งแสดงความเจ็บจากการชนของแขนหุ่นยนต์ จะถูกบวกด้วย 10 ทุกครั้งที่มีการชน และถ้าไม่มีการชนค่า PAIN จะลดลงทีละ 1 ซึ่งจะไม่น้อยกว่า 0 ค่า PAIN นี้เป็นตัวกำหนดค่าให้กับฟังก์ชัน HIT?

การกำหนดทั้งหมดดังกล่าวเป็นไปเพื่อทำให้การทำงานของแขนหุ่นยนต์ในโลกจริง ซึ่งมีความไม่แน่นอนของอุปกรณ์มากกว่าการจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ให้อยู่ในเงื่อนไขของการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่เหมือนกัน ซึ่งจะทำให้การแก้ปัญหาการชนและการออกนอกขอบเขตการมองเห็นในการทดลองในโลกจริงสามารถทำได้ภายใต้ความไม่แน่นอนของอุปกรณ์

7.**<u>ตรวจสอบค่าของฟังก์ชันต่าง ๆที่เปลี่ยนไปตามการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์</u>** จากการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จะทำให้ค่าต่างๆของแต่ละฟังก์ชันมีการเปลี่ยนแปลง

ส่วนนี้จะเป็นที่ฟังก์ชันต่างๆมีการตรวจสอบ และให้ค่าของแต่ละฟังก์ชัน ซึ่งจะถูกใช้ในการปฏิบัติการของโปรแกรมหุ่นยนต์ในรอบต่อไป

ในระหว่างการดำเนินการทดลองจะมีการสร้างแฟ้มข้อมูลขึ้นมา 2 แฟ้ม คือ LOCAL.DIE ซึ่งเก็บข้อมูลของตำแหน่งต่างๆของแขนหุ่นยนต์ที่ได้ถูกบันทึกว่าเป็นภาวะตายซึ่งเป็นตำแหน่งที่แขนหุ่นยนต์มักจะมาหยุดเป็นเวลานานมากกว่า 10 รุ่น และ RESULT.GP ซึ่งจะทำการบันทึกข้อมูลการทดลองที่ประกอบด้วย จำนวนรุ่น, จำนวนของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ประสบความสำเร็จในรุ่น, เวลาที่ใช้, ระยะห่างจากเป้าหมายที่ใกล้ที่สุดในรุ่น และโปรแกรมหุ่นยนต์ตัวแรกของรุ่นที่ประสบความสำเร็จในรุ่นนั้น

8.**<u>เข้าเงื่อนไขการสิ้นสุดการทดสอบหรือไม่?</u>** โปรแกรมหุ่นยนต์จะถูกทดสอบจนกระทั่งเข้ากับเงื่อนไขการสิ้นสุดการทดสอบ 4 อย่างคือ ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหา, จำนวนรอบของการปฏิบัติการมากกว่าที่ได้กำหนดไว้, เวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหามากกว่าที่ได้กำหนดไว้ และตรวจสอบพบว่าแขนหุ่นยนต์อยู่ในภาวะตาย ซึ่งรายละเอียดสามารถอ่านได้ในบทที่ 7 หัวข้อ 7.4.2

9.**<u>ทดสอบครบขนาดของประชากรหรือยัง?</u>** การทดสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์จะทำการทดสอบทุกโปรแกรมในประชากรทั้งหมด ดังนั้นส่วนนี้เป็นการตรวจสอบว่าโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดในประชากรได้รับการทดสอบหรือยัง

10.**<u>ประเมินค่าความเหมาะของแต่ละโปรแกรมหุ่นยนต์</u>** เมื่อสิ้นสุดการทดสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ทั้งหมดในรุ่นแล้ว มีการประเมินค่าความเหมาะให้แต่ละโปรแกรมหุ่นยนต์ตามความสามารถของโปรแกรมในการแก้ปัญหา ซึ่งรายละเอียดสามารถอ่านในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.4.2

11.**<u>สร้างประชากรของโปรแกรมหุ่นยนต์ขึ้นมาใหม่ โดยอาศัยการดำเนินการโปรแกรมพันธุการ</u>** ส่วนนี้เป็นการปฏิบัติการทางพันธุการซึ่งเป็นการสังเคราะห์ประชากรของโปรแกรมหุ่นยนต์ขึ้นมาใหม่ที่เป็นเสมือนลูกหลานของ 10 โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ดีที่สุดจากรุ่นที่แล้ว โดยการใช้ตัวดำเนินการพันธุการ ซึ่งตัวดำเนินการพันธุการที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วย การกำเนิดใหม่, การผสมพันธุ์, การบวกเพิ่ม และการต่อขยาย

12.**สิ้นสุดการทำงานหรือยัง?** โปรแกรมจะทำงานตามขบวนการโปรแกรมพันธุการจนกระทั่งพบว่ามีโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาได้ในแต่ละรุ่นมากกว่า 20 โปรแกรมของประชากรในแต่ละรุ่นเป็นจำนวนมากกว่า 20 รุ่น จึงหยุดการวิวัฒนาการซึ่งจะได้ 10 โปรแกรมหุ่นยนต์ที่แก้ปัญหาได้เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปทดสอบในการทดลองในโลกจริงต่อไป

13.**คัดเลือก 10 โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ดีที่สุดไปทดสอบในการทำงานในโลกจริง** ส่วนนี้เป็นการดำเนินการในส่วนของการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการโปรแกรมพันธุการ ซึ่งได้ทำการคัดเลือก 10 โปรแกรมหุ่นยนต์ที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาในส่วนของการจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมทำงานของแขนหุ่นยนต์ในโลกจริงหรือในสภาพแวดล้อมจริง โดยใช้การประมวลผลข้อมูลภาพจากสัญญาณภาพจากกล้องวิดีโอเป็นข้อมูลอินพุต

ในการทดลองในโลกจริงจะใช้โปรแกรม ACTUAL.EXE ซึ่งมีการแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนการจัดการ, ส่วนการประมวลผลข้อมูลจากสัญญาณภาพ และส่วนการทวนสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์

ส่วนการจัดการเป็นส่วนหลักที่ทำหน้าที่จัดการการทำงานทั้งหมดของโปรแกรม โดยอาศัยการกดแป้นกดพิเศษในการควบคุมการทำงานที่มีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งมีดังต่อไปนี้

แป้นกด [F1] เป็นการเริ่มต้นทำการดำเนินการโปรแกรมหุ่นยนต์เพื่อเป็นการทวนสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวด-ล้อมที่กำหนด

แป้นกด [F2] เป็นการสั่งให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเริ่มต้นก่อนที่จะเริ่มทำการทดลอง

แป้นกด [F3] เป็นการสั่งโดยตรงให้ข้อต่อหัวไหล่หมุนขึ้น 1 ขั้น

แป้นกด [F4] เป็นการสั่งโดยตรงให้ข้อต่อหัวไหล่หมุนลง 1 ขั้น

แป้นกด [F5] เป็นการสั่งโดยตรงให้ข้อต่อข้อศอกหมุนขึ้น 1 ขั้น

แป้นกด [F6] เป็นการสั่งโดยตรงให้ข้อต่อข้อศอกหมุนลง 1 ขั้น

แป้นกด [F7] เป็นการสั่งโดยตรงให้ข้อต่อข้อมือหมุนขึ้น 1 ขั้น

แป้นกด [F8] เป็นการสั่งโดยตรงให้ข้อต่อข้อมือหมุนลง 1 ขั้น

แป้นกด [F9] เป็นการประมวลผลข้อมูลจากสัญญาณภาพเพื่อทำการทดสอบว่าที่ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ขณะนั้นอยู่ภายในขอบเขตของการมองเห็นหรือไม่

แป้นกด [F10] เป็นการสั่งให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามคำสั่งได้บันทึกไว้ในการทดลองครั้งหลังสุด เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์อีกครั้งหนึ่ง

แป้นกด [RETURN] เป็นการประมวลผลข้อมูลจากสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ เพื่อทำการจัดเก็บข้อมูลของแขนหุ่นยนต์ลงแฟ้มข้อมูลชื่อ ARM.DAT และข้อมูลของสภาพแวดล้อมต่างๆลงแฟ้มข้อมูลชื่อ ENVIRON.PIC ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในส่วนกระบวนการโปรแกรมพันธุการต่อไป

แป้นกด [SPACE BAR] เป็นการแสดงภาพขาวดำของสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าขีดความเปลี่ยนที่ได้ตั้งไว้ ในการทดลองครั้งนี้ค่าขีดความเปลี่ยนของการประมวลผลสำหรับสภาพแวดล้อมมีค่าเท่ากับ 80 และค่าขีดความเปลี่ยนของการประมวลผลสำหรับแขนหุ่นยนต์มีค่าเท่ากับ 110

แป้นกด [ESC] เป็นการสิ้นสุดการทำงานสำหรับทุกๆขั้นตอนภายในโปรแกรมนี้

ส่วนของการประมวลผลข้อมูลจากสัญญาณภาพเป็นส่วนสำคัญที่ทำการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณที่ได้จากกล้องวิดีโอ ที่จะถูกนำมาเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งจะถูกใช้ในการระบุตำแหน่งของข้อต่อหัวไหล ข้อต่อข้อศอก ข้อต่อข้อมือ และปลายแขน ของแขนหุ่นยนต์ รวมทั้งยังถูกใช้ในการระบุตำแหน่งของเป้าหมาย และสิ่งกีดขวางที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และใช้สำหรับการตรวจสอบของฟังก์ชันต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณภาพ ซึ่งได้แก่ ฟังก์ชัน HIT?, SEE?, OUT? INC? และ OUT?

ส่วนของการทวนสอบการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์เป็นส่วนที่ทำการแปลคำสั่งของโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง โดยอาศัยฟังก์ชันที่ใช้การตรวจสอบโดยตรงจากการประมวลผลข้อมูลสัญญาณภาพจากสภาพแวดล้อมจริง และเอาต์พุตที่ได้จากการแปลคำสั่งจะถูกนำไปใช้เพื่อส่งคำสั่งไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งทำให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จนกระทั่งสามารถนำปลายแขนไปยังเป้าหมายได้

สรุปแล้วการทดลองทั้งหมดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของกระบวนการโปรแกรมพันธุการซึ่งอาศัยการจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ และส่วนของการดำเนิน-

การทดลองในโลกจริง มีใช้โปรแกรมทั้งหมด 3 โปรแกรม ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีความสัมพันธุกันคือ เป็นทั้งอินพุตและเอาต์พุตให้กันและกัน

# ภาคผนวก ข

## การประมวลผลข้อมูลภาพที่ใช้ในการทดลอง

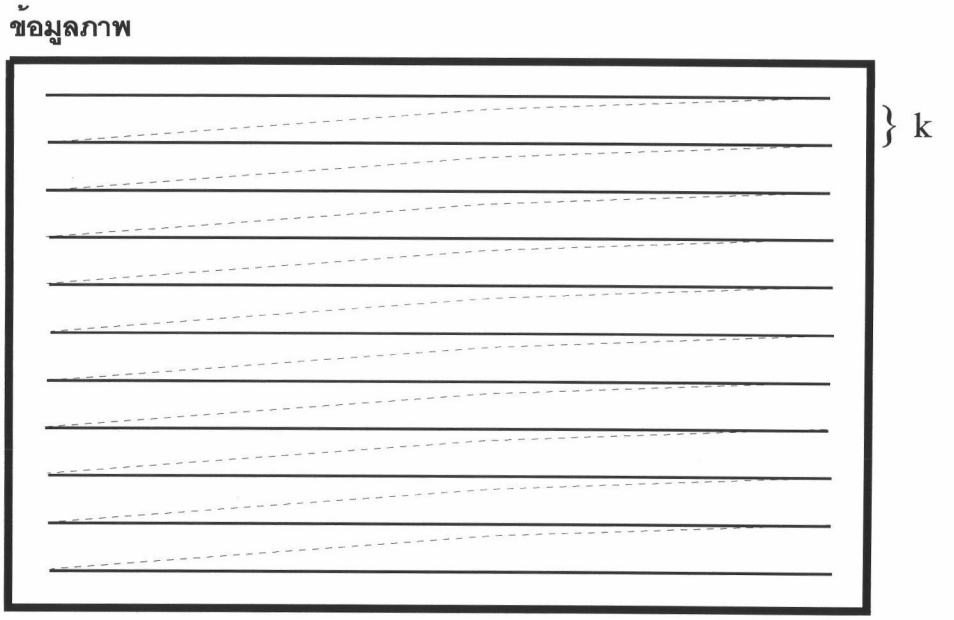
ภาคผนวกนี้จะอธิบายถึงวิธีการประมวลผลข้อมูลภาพที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งเป็นการแบ่งส่วนข้อมูลภาพของสัญญาณภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอในส่วนของการดำเนินการทดลองในโลกจริง เพื่อใช้สำหรับการแยกแยะวัตถุต่างๆในสัญญาณภาพ และสามารถให้ข้อมูลต่างๆที่เป็นคุณสมบัติของวัตถุต่างๆที่อยู่ในข้อมูลภาพได้ เช่น พื้นที่, ความกระทัดรัด, ความยาว-เส้นขอบรูป และตำแหน่งจุดตรงกลางของวัตถุ เป็นต้น

ข้อมูลต่างๆที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการกำหนดตำแหน่ง ข้อต่อหัวไหล่, ข้อต่อข้อศอก, ข้อต่อข้อมือ และปลายแขน ของแขนหุ่นยนต์ที่ปรากฏบนสัญญาณภาพ และถูกใช้เพื่อแยกส่วนต่างๆของสภาพแวดล้อมออกจากส่วนของแขนหุ่นยนต์ ทั้งที่เป็นสิ่งกีดขวางและเป้าหมาย

วิธีการที่ถูกนำมาใช้อาศัยวิธีการของ P. Chongstitvatana (1992) ที่อาศัยการประมวลผลและการแบ่งส่วนโดยใช้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน จากนั้นจะใช้การกวาดตรวจ(Scanning)เพื่อที่จะค้นหาวัตถุและหาขอบเขตของวัตถุนั้นโดยการตามรอย(Tracing)วัตถุที่มีทั้งหมดในข้อมูลภาพ และสุดท้ายจะอาศัยรายการของจุดต่างๆของขอบของวัตถุต่างๆที่ได้จากการตามรอย ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณเพื่อกำหนดค่าต่างๆที่เป็นคุณสมบัติให้กับแต่ละวัตถุ

### ข.1 <u>การแบ่งส่วนโดยใช้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน</u>

การแบ่งส่วนของข้อมูลภาพเป็นการกำหนดเพื่อแยกส่วนที่จะพิจารณาออกจากส่วนอื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องโดยใช้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของค่าความเข้มของจุดต่างๆในข้อมูลภาพ ในที่นี้เป็นการแยกส่วนของวัตถุออกจากส่วนที่เป็นพื้นหลัง ซึ่งอาศัยความเข้มที่แตกต่างกันในการแยกส่วนต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเข้มของวัตถุจะมีค่ามากกว่าความเข้มของพื้นหลัง และการแบ่ง




*รูปที่ ข.1 แสดงลักษณะการกวาดตรวจในข้อมูลภาพ*

ส่วนในข้อมูลจะอาศัยกฎที่ว่า จุดใดมีค่าความเข้มมากกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ จุดนั้นจะเป็นส่วนหนึ่งของวัตถุในข้อมูลภาพ

ในการทดลองครั้งนี้มีการแบ่งส่วนด้วยค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่แตกต่างกัน 2 ค่า ค่าหนึ่งเพื่อใช้ในการแยกส่วนของสภาพแวดล้อมทั้งที่เป็นสิ่งกีดขวางและเป้าหมายที่ถูกใช้ในขั้นตอนแรกของการทดลองทั้งในการจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์ในกระบวนการโปรแกรมพันธุการและการทดลองในโลกจริง และอีกค่าหนึ่งใช้ในการกำหนดตำแหน่งต่างๆของแขนหุ่นยนต์ในระหว่างการปฏิบัติการตามโปรแกรมหุ่นยนต์ในการทดลองในโลกจริง

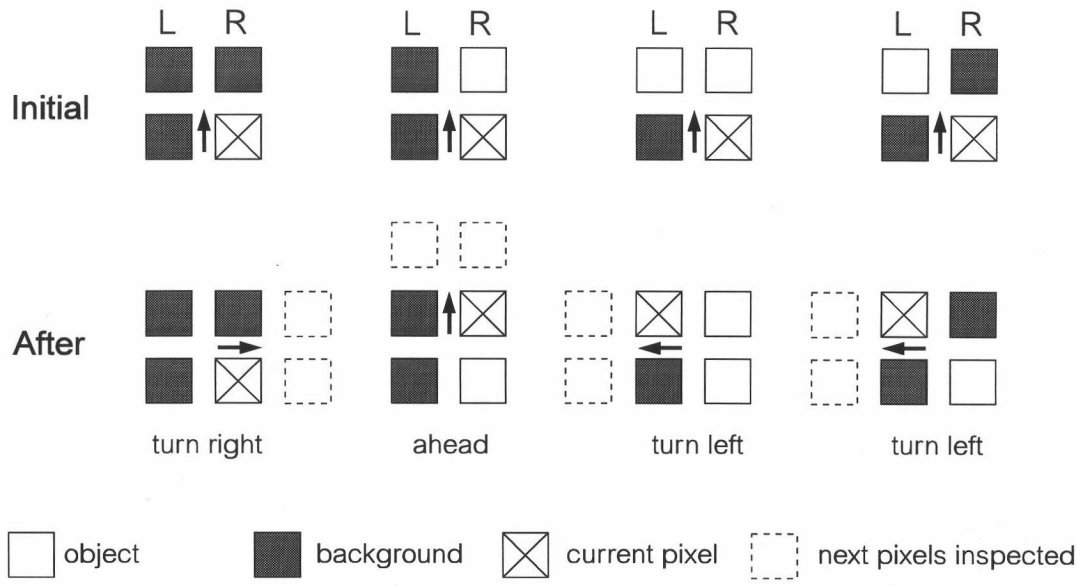
## ข.2 <u>การกวาดตรวจและการตามรอย</u>

เมื่อทำการแบ่งส่วนข้อมูลภาพเพื่อแยกส่วนที่เป็นวัตถุออกจากส่วนที่เป็นพื้นหลังได้แล้ว ข้อมูลภาพจะถูกนำมาประมวลผลเพื่อทำการแยกแยะวัตถุต่างๆที่มีอยู่ออกเป็นชิ้นๆโดยใช้การกวาดตรวจและการตามรอย

การกวาดตรวจเป็นการค้นหาจุดเริ่มต้นของการตามรอยวัตถุในข้อมูลภาพ ซึ่งมีลักษณะการกวาดตรวจดังแสดงในรูปที่ ข.1 โดยกวาดตรวจอย่างละเอียดในแนวนอนและกวาด-ตรวจในแนวตั้งตามความกว้าง k ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ใช้กำหนดขนาดความกว้างที่น้อยที่สุดของวัตถุที่

| L | R | Action |
|---|---|---|
| X | X | เลี้ยวขวา |
| X | O | รายงานจุดนั้น แล้วเดินตรงไป |
| O | O | รายงานจุดนั้น แล้วเลี้ยวซ้าย |
| O | X | รายงานจุดนั้น แล้วเลี้ยวซ้าย ( เพื่อป้องกันการเดินเข้าไปในวัตถุ) |

*ตารางที่ ข.1 กฎการเคลื่อนที่ของตัวตามรอย โดย L = ซ้าย, R = ขวา, X = พื้นหลัง และ O = วัตถุ*




*รูปที่ ข.2 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของการตามรอยรอบวัตถุ*

สามารถยอมรับได้ ซึ่งเมื่อตรวจพบว่าเป็นส่วนของวัตถุแล้วจะเริ่มการตามรอยที่จุดนั้น

การตามรอยเป็นการเก็บข้อมูลที่เป็นตำแหน่งของขอบรอบวัตถุ โดยมีขั้นตอนวิธีคือ ให้คิดเสมือนว่ามีตัวตามรอยอยู่ที่ขอบของวัตถุซึ่งมีจุดภาพอยู่รอบๆตัว โดยตัวตามรอยจะทำการตามรอยโดยการพิจารณาเฉพาะ 2 จุดภาพข้างหน้าเท่านั้น และพยายามให้วัตถุอยู่ทางด้านขวาของมันเสมอ โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่ตามตารางที่ ข.1 ซึ่งแสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ดังรูปที่ ข.2 อาศัยวิธีการดังกล่าวนี้ในการตามรอยรอบวัตถุจนกระทั่งตัวตามรอยกลับมาที่จุดเดิม จึงจะเป็นการสิ้นสุดการทำงาน จากนั้นจะทำการเปลี่ยนค่าของจุดภาพในวัตถุที่ได้ทำการตามรอยเสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อทำให้ไม่ถูกตรวจพบในการกวาดตรวจครั้งต่อไป

และจากนั้นจะทำการกวาดตรวจและการตามรอยต่อไปเพื่อเก็บข้อมูลที่เป็นตำแหน่งของขอบรอบวัตถุอื่นๆจนหมดข้อมูลภาพ

### ข.3 คุณสมบัติของวัตถุ

จากข้อมูลของตำแหน่งของขอบรอบวัตถุที่เก็บได้ของแต่ละวัตถุ ซึ่งสามารถคำนวณหาคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัตถุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้ดังตารางที่ ข.2 การคำนวณเพื่อหาตำแหน่งจุดตรงกลางของวัตถุทำได้โดยการรวมค่าของจุดทั้งหมดที่มีในรายการของจุดขอบรอบของวัตถุแล้วหารด้วยจำนวนของจุดทั้งหมด การหาพื้นที่ของวัตถุสามารถหาได้จากครึ่งหนึ่งของผลรวมของผลต่างของจุดขอบรอบวัตถุทั้งหมด ความยาวเส้นขอบรูปสามารถหาได้จากความยาวของรายการของจุดขอบรอบของวัตถุ ค่าความกระทัดรัดสามารถหาได้จากค่าความยาวเส้นขอบรูปยกกำลังสองแล้วหารด้วยพื้นที่ของวัตถุ ส่วนความกว้างของวัตถุหาได้โดยความแตกต่างของค่า x ที่มากที่สุดกับค่าที่ x ที่น้อยที่สุด และความสูงของวัตถุหาได้โดยความแตกต่างของค่า y ที่มากที่สุดกับค่าที่ y ที่น้อยที่สุด

| คุณสมบัติ | การคำนวณ |
|---|---|
| ตำแหน่งจุดตรงกลางของวัตถุ(centroid) | $x_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i}{n}$<br>$y_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} y_i}{n}$ |
| พื้นที่(area) | $\frac{1}{2}\left\| \sum_{i=0}^{n-1}(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right\|$ |
| ความยาวเส้นขอบรูป(perimeter) | $n$ |
| ความกระทัดรัด(compactness) | $\frac{perimeter^2}{area}$ |
| ความกว้าง(width) และความสูง(height) | $Width = MaxX - MinX$<br>$Height = MaxY - MinY$ |

*ตารางที่ ข.2 การคำนวณเพื่อค่าของคุณสมบัติโดยทั่วไปของวัตถุ โดย $x_i, y_i$ เป็นจุดในรายการของจุดขอบรอบวัตถุ*

# ภาคผนวก ค

## ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้

ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่แสดงต่อไปนี้ เป็นโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้จากการทดลองทั้ง 16 การทดลอง ซึ่งเป็น 1 ใน 10 โปรแกรมหุ่นยนต์ที่ได้ถูกคัดเลือกเพื่อทำการทดลองในโลกจริง โดยแต่ละโปรแกรมประกอบด้วยเซตของฟังก์ชัน F = {IF-AND, IF-OR, IF-NOT} และเซตของเทอร์มินอล T = {s+, s-, e+, e-, w+, w-, HIT?, SEE?, INC?, DEC?, OUT?}

รายละเอียดของแต่ละฟังก์ชัน, แต่ละเทอร์มินอล และลักษณะของโปรแกรมหุ่นยนต์สามารถอ่านได้ในบทที่ 7 ส่วนลักษณะการทำงานของแต่ละโปรแกรมหุ่นยนต์ที่แสดงต่อไปนี้สามารถอ่านได้ในบทที่ 8

ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการโปรแกรมพันธุการในแต่ละการทดลอง มีดังต่อไปนี้

**การทดลองที่ 1**

```
(IF-NOT (IF-AND (IF-AND s+ (IF-OR HIT? INC? s- (IF-AND e+ (IF-NOT (IF-NOT (IF-AND SEE? SEE? w- (IF-OR INC? (IF-NOT (IF-AND s+ (IF-AND (IF-AND w+ HIT? e+ (IF-AND e+ (IF-AND s+ (IF-AND (IF-AND w+ (IF-OR OUT? w- w- s- )e+ (IF-AND e+ s- s- s- ))(IF-NOT OUT? s- e+ )s- w+ )e+ w- )(IF-AND s+ e+ e+ w- )s- ))(IF-NOT OUT? s- (IF-OR (IF-NOT INC? (IF-OR INC? INC? w+ e- )(IF-OR w- (IF-AND e- w+ e+ w+ )s+ (IF-NOT (IF-NOT (IF-NOT (IF-AND s+ s+ s+ w- )(IF-NOT w- (IF-NOT e- s+ s+ )(IF-OR HIT? SEE? s+ w- ))(IF-OR DEC? s+ e- e+ ))w- w- )s+ w+ )))e+ s- s- ))s- w+ )e+ w- )e+ (IF-OR s+ e- e+ w+ ))s- ))s- e+ )(IF-OR e- DEC? e- w+ )(IF-NOT w+ (IF-OR OUT? w- w- s+ )e+ ))w- s- ))s- e- )w- w+ )w- w+ )
```

*รูปที่ ค.1 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 1*

**การทดลองที่ 2**

```
(IF-NOT w+ s+ (IF-OR s- (IF-OR s+ (IF-AND s+ w- s- (IF-NOT (IF-OR DEC? (IF-NOT OUT? (IF-NOT e- w- e+ )w- )w+ s+ )e+ w- ))(IF-NOT (IF-OR DEC? HIT? w- (IF-AND w- (IF-OR w- (IF-OR INC? e- (IF-OR (IF-NOT (IF-NOT SEE? e+ w+ )(IF-OR w+ (IF-OR w- (IF-OR (IF-OR e- DEC? s+ w- )w+ s+ w- )(IF-OR (IF-AND SEE? HIT? s+ s+ )s+ w+ (IF-AND HIT? (IF-NOT HIT? (IF-NOT SEE? e+ s+ )s+ )e+ e+ ))s+ )s+ (IF-NOT OUT? (IF-NOT (IF-OR OUT? OUT? s+ w- )w- s+ )e- )) w+ )s- e+ (IF-OR (IF-OR (IF-AND SEE? w+ w+ w+ )s- (IF-OR e- HIT? (IF-AND w- e- e+ e- )e+ ) s+ )s- e+ (IF-NOT w+ s+ OUT? )))(IF-OR w+ INC? s+ (IF-AND e- (IF-NOT DEC? w+ w+ )s+ e- )))e+ w+ )w- w+ ))e+ e- )e+ )w- (IF-OR (IF-OR s- HIT? e+ s- )w- s+ w+ )))
```

*รูปที่ ค.2 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 2*

**การทดลองที่ 3**

```
(IF-OR (IF-OR (IF-NOT (IF-OR HIT? (IF-AND HIT? OUT? w+ e+ )e- (IF-AND (IF-AND s+ e+ w+ OUT? )SEE? s+ (IF-OR e- DEC? s+ w- )))s+ s+ )HIT? e+ s+ )s- (IF-AND s- DEC? w+ s- )(IF-AND e+ s+ s+ (IF-NOT s+ e+ e+ )))
```

*รูปที่ ค.3 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 3*

**การทดลองที่ 4**

```
(IF-AND w- (IF-OR s+ DEC? (IF-AND DEC? (IF-OR HIT? SEE? (IF-AND SEE? w- e- (IF-NOT (IF-OR DEC? s- e+ w- )(IF-NOT OUT? s+ s+ )w+ ))(IF-NOT (IF-AND (IF-AND e+ w- OUT? w+ )(IF-AND (IF-NOT w- w- e+ )s- s+ e+ )s- s+ )s- e+ ))w- w- )e+ )e- s+ )
```

*รูปที่ ค.4 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 4*

**การทดลองที่ 5**

```
(IF-OR s+ (IF-AND (IF-NOT (IF-OR DEC? (IF-AND DEC? (IF-NOT INC? (IF-OR (IF-OR e- (IF-OR (IF-OR s+ INC? (IF-OR (IF-AND INC? INC? s+ (IF-AND SEE? OUT? s- w+ ))DEC? s+ e+ )s- )w- s+ s+ )s- HIT? )(IF-OR w+ s- (IF-AND SEE? w+ s+ (IF-OR (IF-AND (IF-OR (IF-AND e+ (IF-OR SEE? s- w- (IF-NOT OUT? w- e- ))w- (IF-NOT (IF-NOT e- s+ (IF-OR w+ w- s+ e- ))s- s+ ))OUT? (IF-OR w+ s- (IF-AND SEE? w+ s+ (IF-OR (IF-AND e+ (IF-OR SEE? s- w- (IF-NOT OUT? w- e- )) w- (IF-NOT s- s+ w+ ))(IF-NOT OUT? e+ w- )e+ w+ ))(IF-OR HIT? e+ s- s+ ))w+ )(IF-OR SEE? s- w- (IF-NOT OUT? w- e- ))w- (IF-NOT e+ s+ (IF-NOT (IF-NOT HIT? e+ s+ )w- (IF-AND (IF-NOT w+ s- s- )OUT? w+ e+ ))))OUT? (IF-OR w+ s- (IF-AND SEE? w+ s+ (IF-OR (IF-AND e+ (IF-OR SEE? s- w- (IF-NOT OUT? w- e- ))w- HIT? )OUT? e+ e+ ))(IF-OR HIT? e+ s- s+ ))w+ ))(IF-NOT w- s+ e+ ))s- s+ )w- )w- s- )w- w+ )s- w- )e- s- e- )e+ w+ )
```

*รูปที่ ค.5 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 5*

**การทดลองที่ 6**

```
(IF-NOT SEE? (IF-AND (IF-OR s- (IF-NOT DEC? w+ e+ )(IF-AND e+ (IF-OR OUT? (IF-NOT HIT? (IF-AND s- OUT? (IF-OR HIT? SEE? e+ s+ )s+ )w+ )s+ w+ )w+ (IF-OR s- w+ e- (IF-NOT HIT? e- (IF-AND s- (IF-OR s- e- (IF-AND e+ (IF-OR OUT? (IF-NOT DEC? e- w+ )s- w+ )w+ (IF-OR s- w+ e- (IF-NOT HIT? e- (IF-AND e+ (IF-OR INC? (IF-AND w- SEE? s+ w- )DEC? (IF-NOT w+ s- w+ )) s+ HIT? ))))(IF-OR INC? s+ s+ s+ ))s+ s- ))))(IF-OR DEC? s+ (IF-NOT DEC? w+ e+ )s+ ))e+ w- w- )s+ )
```

*รูปที่ ค.6 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 6*

**การทดลองที่ 7**

```
(IF-OR (IF-OR w- e+ (IF-OR e+ (IF-OR SEE? HIT? (IF-AND (IF-NOT e- s+ (IF-OR SEE? (IF-OR OUT? SEE? s+ (IF-AND DEC? e- e+ s+ ))e- w- ))(IF-AND DEC? e- e+ s+ )(IF-AND (IF-NOT w+ e+ (IF-AND HIT? DEC? w+ (IF-AND s+ OUT? (IF-NOT s- w- (IF-NOT (IF-NOT SEE? s- e+ )e- (IF-NOT HIT? w- w- )))w+ )))(IF-NOT e+ e- w- )e+ w+ )w- )DEC? )s- (IF-NOT (IF-OR DEC? HIT? (IF-NOT (IF-OR e+ e- s+ (IF-OR w- (IF-AND w- (IF-NOT DEC? w- (IF-OR DEC? s+ e- (IF-OR w- HIT? s+ w- )))e- w- )w+ e- ))e+ e- )e- )e+ s- ))e+ )DEC? w+ s- )
```

*รูปที่ ค.7 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 7*

**การทดลองที่ 8**

```
(IF-NOT HIT? (IF-OR s- (IF-AND DEC? (IF-AND (IF-OR DEC? OUT? s- (IF-AND e+ s- s- w- ))e+
s- (IF-AND w- w+ s- s- ))(IF-OR INC? (IF-OR w+ e+ s- s- )s- e+ )e+ )w+ (IF-AND (IF-AND s- s-
w+ w- )e+ (IF-OR s+ s- (IF-AND OUT? e+ w+ (IF-AND s- s- w+ s- ))w- )(IF-OR (IF-NOT w+ s+
s- )(IF-OR s+ s- w+ s+ )DEC? e- )))e- )
```

*รูปที่ ค.8 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 8*

**การทดลองที่ 9**

```
(IF-NOT INC? (IF-AND e+ e+ e+ (IF-AND (IF-AND e+ SEE? w- w- )e+ w- INC? ))(IF-AND e+ e+
w- (IF-AND INC? (IF-NOT (IF-AND (IF-OR w- (IF-OR w+ w- (IF-AND (IF-OR SEE? e+ e+ (IF-AND
INC? e+ (IF-OR e+ w+ INC? w- )s- ))SEE? w- s- )w- )e+ w- )s+ e+ s- )w+ e+ )w- s- )))
```

*รูปที่ ค.9 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 9*

**การทดลองที่ 10**

```
(IF-OR (IF-NOT s- DEC? (IF-AND w+ INC? w+ (IF-NOT e+ w+ e+ )))OUT? (IF-NOT s- e+ (IF-
AND (IF-AND w+ e+ w+ (IF-NOT DEC? (IF-NOT w+ (IF-NOT (IF-NOT OUT? (IF-OR s- OUT? e+
w+ )e- )e+ (IF-OR e+ HIT? e+ w- ))(IF-NOT (IF-OR s+ (IF-NOT DEC? w- w- )w+ e- )s+ s+ ))s+ ))
e+ w+ (IF-NOT e+ DEC? e+ )))w+ )
```

*รูปที่ ค.10 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 10*

**การทดลองที่ 11**

```
(IF-AND (IF-AND (IF-NOT OUT? s- w+ )INC? e- w- )(IF-OR w- w- (IF-OR (IF-AND HIT? w+ w- (IF-
NOT (IF-AND e+ (IF-AND (IF-NOT (IF-AND SEE? e- (IF-AND e- (IF-AND w+ e- w+ e- )(IF-AND
HIT? w+ (IF-NOT INC? (IF-AND s+ (IF-OR w- w+ e+ w- )(IF-AND w+ s+ w+ s- )(IF-AND s-
DEC? e+ (IF-AND e- HIT? e+ e+ )))e- )(IF-OR OUT? (IF-AND (IF-AND e+ (IF-AND s+ (IF-OR w-
w+ e+ w- )(IF-AND w+ e- w+ s- )(IF-AND INC? e- s- s- ))e- (IF-AND s+ w+ s+ w- ))HIT? e+ w- )
w- s+ ))s- )(IF-AND HIT? w+ w+ (IF-NOT SEE? w+ s- )))s- e- )e+ w- s+ )w- )(IF-OR w- s+ (IF-OR
DEC? (IF-OR DEC? w+ (IF-AND w+ (IF-NOT s+ e- w- )(IF-OR e+ (IF-OR (IF-AND DEC? w- e- s+
)(IF-NOT s- s+ w+ )e- w+ )e+ s- )))w+ (IF-OR e- w- s- w- )))w+ ))INC? w- w+ )w+ )(IF-OR INC?
s+ (IF-NOT SEE? s- s+ )e+ )s- )
```

*รูปที่ ค.11 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 11*

**การทดลองที่ 12**

```
(IF-OR (IF-AND e+ SEE? (IF-NOT (IF-NOT w- s- s+ )s+ w+ )e+ )DEC? (IF-OR (IF-NOT w- s- e- )
DEC? w- (IF-NOT e- w- (IF-OR e- HIT? (IF-OR (IF-OR e- s+ s- (IF-AND e+ s+ w+ (IF-NOT INC?
e+ (IF-OR (IF-AND (IF-NOT (IF-OR OUT? SEE? e+ w+ )w- (IF-OR SEE? s- e- s+ ))(IF-OR e+ s-
e- s+ )(IF-OR HIT? e- e- w+ )(IF-AND DEC? (IF-AND SEE? OUT? s- (IF-AND HIT? s+ e+ e+ ))w-
e- ))e+ w- (IF-AND (IF-AND DEC? (IF-OR OUT? SEE? s- (IF-AND (IF-AND DEC? (IF-OR OUT?
SEE? s- w- )s+ (IF-OR s+ (IF-NOT e+ s- e+ )s+ w+ ))s+ e- s- ))s+ (IF-AND HIT? INC? w+ e- ))
s+ e- s- )))))OUT? w- e+ )(IF-AND s- (IF-AND INC? s- e+ s- )e+ s- ))))w+ )
```

*รูปที่ ค.12 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 12*

**การทดลองที่ 13**

```
(IF-NOT (IF-NOT (IF-NOT (IF-NOT (IF-AND SEE? SEE? e- (IF-OR SEE? e+ (IF-AND INC? (IF-
AND HIT? e+ e+ s+ )w- s- )(IF-OR w+ (IF-AND (IF-OR (IF-NOT (IF-AND (IF-AND (IF-OR SEE?
(IF-AND e- e+ s+ e- )(IF-NOT s- e+ w+ )w+ )w- w+ w+ )e+ (IF-AND INC? OUT? w- e- )w+ )s-
w+ )e- (IF-AND (IF-NOT SEE? w- w+ )(IF-NOT s+ e- s+ )(IF-NOT w- e+ e- )w+ )s- )e- e- (IF-NOT
DEC? e- w- ))(IF-NOT (IF-OR s- w- e+ (IF-AND (IF-NOT HIT? e- (IF-NOT s- (IF-AND (IF-OR w- e-
w+ e+ )(IF-NOT DEC? w+ s+ )e+ w- )(IF-NOT INC? e+ s+ )))DEC? w+ (IF-AND DEC? (IF-NOT
INC? (IF-AND e+ (IF-NOT DEC? e+ w+ )DEC? w- )s+ )e+ e+ )))e- w+ )s- )))e- s+ )s+ w- )e+ e- )
s- w+ )
```

*รูปที่ ค.13 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 13*

**การทดลองที่ 14**

```
(IF-NOT HIT? (IF-NOT INC? (IF-OR (IF-NOT SEE? (IF-AND (IF-OR INC? s- (IF-AND e- (IF-NOT
(IF-OR OUT? INC? e+ (IF-AND (IF-NOT OUT? e+ w+ )e+ (IF-OR s- INC? w- e+ )e+ ))w- s- )(IF-
NOT e+ (IF-OR OUT? HIT? SEE? (IF-OR (IF-AND (IF-AND w+ e- e+ w+ )e- (IF-AND DEC? (IF-
OR e- w+ e- s- )s- s+ )w+ )s- e- (IF-AND w- (IF-OR w+ HIT? s+ e+ )w+ e- )))e+ )s- )s- )HIT? (IF-
AND (IF-OR INC? s- (IF-AND e- (IF-NOT (IF-OR OUT? INC? e+ (IF-AND s+ e+ (IF-OR s- INC?
w- e+ )e+ ))w- s- )(IF-NOT e+ (IF-OR OUT? HIT? SEE? (IF-OR (IF-NOT s- HIT? (IF-AND DEC?
(IF-OR INC? w+ (IF-NOT s+ w- (IF-AND s- (IF-AND s+ DEC? e- w+ )(IF-AND s- s- s+ (IF-OR
DEC? e- s- s+ ))(IF-AND w- SEE? (IF-OR (IF-OR HIT? HIT? s+ e- )HIT? (IF-NOT w+ s+ s+ )s- )e-
)))s- )s- s- ))e+ e- (IF-AND w- (IF-OR w+ HIT? s+ e+ )e- w+ )))e+ )s- )s- )HIT? e- w+ )w+ )s+ )
HIT? e+ e- )s- )s- )
```

*รูปที่ ค.14 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 14*

**การทดลองที่ 15**

```
(IF-AND s+ s- (IF-AND OUT? (IF-OR (IF-AND s+ SEE? (IF-NOT (IF-OR w- INC? w+ w+ )e- s+ )
(IF-AND SEE? INC? w- (IF-NOT (IF-NOT (IF-AND w+ s- (IF-NOT SEE? (IF-NOT (IF-NOT INC?
(IF-NOT s- w- (IF-NOT e+ (IF-OR e- e- (IF-NOT (IF-AND w+ s- (IF-NOT SEE? (IF-NOT (IF-NOT
INC? (IF-AND SEE? DEC? (IF-NOT w+ (IF-NOT (IF-NOT INC? e+ (IF-OR w+ s+ e+ s- ))(IF-OR
(IF-NOT INC? s+ (IF-AND e+ HIT? e+ w+ ))w- w+ s- )w- )e+ )s- )w- )e+ e+ )w- )(IF-AND (IF-
AND (IF-AND INC? (IF-AND (IF-AND w- w+ s+ e+ )e- e- e- )e- (IF-NOT e+ e- w+ ))(IF-OR w- s-
w- e+ )w- w- )SEE? s+ s- ))(IF-AND DEC? e+ w+ s+ )s- )e+ )(IF-NOT s- w- w- )))w- )e+ e+ )w- )
(IF-AND (IF-AND (IF-AND INC? (IF-AND (IF-AND w- w+ s+ e+ )e- e- e- )e- (IF-NOT e+ e- w+ ))
(IF-OR w- s- w- e+ )w- w- )SEE? s+ s- ))(IF-AND DEC? e+ w+ OUT? )SEE? )s- e+ )))e- w+ (IF-
AND DEC? e+ e+ s+ ))e- w- )e- )
```

*รูปที่ ค.15 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 15*

**การทดลองที่ 16**

```
(IF-NOT (IF-AND SEE? e+ e- s- )e+ (IF-OR w- s+ (IF-NOT DEC? e- (IF-NOT SEE? e+ (IF-AND
HIT? w- s- (IF-NOT w+ e- s+ ))))(IF-NOT SEE? (IF-OR (IF-NOT (IF-OR e+ (IF-OR OUT? (IF-NOT
s- w- e+ )w+ (IF-AND (IF-NOT OUT? e- w+ )s+ w- w- ))w- w- )(IF-AND OUT? e- (IF-AND (IF-OR
OUT? DEC? (IF-AND w- w- e+ (IF-NOT w- e- s- ))(IF-AND DEC? DEC? s+ w+ ))HIT? (IF-AND w-
s+ HIT? e+ )e+ )s+ )w- )HIT? (IF-AND (IF-AND s- (IF-NOT e- (IF-NOT OUT? (IF-NOT OUT? (IF-
AND w- OUT? s+ e- )w+ )w+ )s+ )e- (IF-OR SEE? w- e+ w- ))e+ e- s- )(IF-NOT w+ s+ s- ))e+ )))
```

*รูปที่ ค.16 ตัวอย่างโปรแกรมหุ่นยนต์ที่สังเคราะห์ได้ในการทดลองที่ 16*

# ประวัติผู้เขียน

นายจุมพล พลวิชัย เกิดวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2512 ที่อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2533 เข้าทำงานกับบริษัท จัสมินอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด (มหาชน) เป็นเวลา 3 ปีครึ่ง และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2537 และเป็นผู้นำเสนอผลงานวิจัยนี้ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ผลงานในงาน Second Asian Conference on Computer Vision (ACCV'95) ที่ประเทศสิงค์โปร์ ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2538